

ПРИМЉЕНО:	НО. ЛО. 2012.		
ОРГ. ЈЕДИНИЦА:	КАТЕДРА:	ОБЛАСТ:	ВРЕДНОСТ:
	1207/1		

## НАСТАВНО-НАУЧНОМ ВЕЋУ ФАКУЛТЕТА ТЕХНИЧКИХ НАУКА У КОСОВСКОЈ МИТРОВИЦИ

**Предмет: Извештај Комисије за преглед, оцену и одбрану докторске дисертације**

Одлуком Наставно – научног већа Факултета техничких наука у Косовској Митровици број 1058/3-1 донетој на седници одржаној 26.09.2012. године, именовани смо за чланове Комисије за преглед, оцену и одбрану докторске дисертације кандидата **мр Зорана Голубовића**, дипломираног машинског инжењера, под насловом

### ***Прилог истраживању оптималних решења за реконструкцију погонских система роторног багера***

Након прегледа докторске дисертације, сагласно Закону о Универзитету, Закону о Високом образовању и Статуту Факултета техничких наука у Косовској Митровици, Комисија подноси следећи

## ИЗВЕШТАЈ

Докторска дисертација кандидата мр Зорана Голубовића, предата Факултету техничких наука у Косовској Митровици, изложена је на 133 страница текста једностраног А4 формата и илустрована је са 122 слика са објашњењем и 8 табеларних приказа. Нумерација слика извршена је помоћу два броја, од којих први указује на број поглавља, а други на редни број слике у оквиру датог поглавља. Целокупна материја докторске дисертације је изложена у осам поглавља, увод и закључна разматрања. После закључних разматрања дати су литературни наводи.

Рад је написан у латиничном писму коришћењем текст процесора MS Word. Укорићен је тврдим повезом.

Основни садржај докторске дисертације је приказан кроз:

1. Увод;
2. Роторни багер;
3. Математички модел отпора копању;
4. Динамички прорачун подсистема роторног багера;
5. Развој програма за динамички прорачун подсистема роторног багера;
6. Утицај уградње диск кочнице на добошу подсистема за дизање на диначко понашање роторног багера;

7. Утицај уградње турбоспојнице на динамичко понашање погонског система радног точка;
8. Утицај конструктивних промена на радном точку на динамичко понашање подсистема копања;
9. Закључци

Овај рад је посвећен истраживању оптималних решења за реконструкцију погонских система роторних багера. Анализа оптерећења и одзива механизма и конструкције роторног багера на поменуто оптерећење често се дели на одређене подсистеме који се у радовима аутора: *Волков, Д.П., Черкасов В.А., С. Бошњак, Н. Зрнић, Д. Огуаманам* засебно посматрају. Тако се засебно раде прорачуни: погона радног точка, погона окретања стреле, оптерећења конструкције, погона дизања стреле и тд. Тиме се занемарују утицаји оптерећења једног подсистема на рад и оптерећење другог. Кандидат је у раду дао оригиналне резултате који указују да на динамичко понашање једног подсистема роторног багера утичу остали подсистеми што доводи до суперпонирања оговарајућих карактеристика кретања. Најважнији подсистеми код роторних багера, који су истовремено оптерећени у процесу копања, су подсистем за копање, подсистем за држање стреле и горња носећа конструкција роторног багера. Кандидат је у свом раду једним математичким моделом описао сва три подсистема што представља оригинални допринос овог рада.

Оптерећење радног точка роторног багера је математички описано како у предходним научним радовима кандидата тако и у радовима аутора: *Hitzschke, K., Jacob, K., Н. Г. Домбровски, С. Бошњак, Н. Зрнић, З. Петковић.* на које се кандидат ослонио у свом истраживању. Променљивост дужине резне ивице кашике односно попречног пресека одреска услед вибрација стреле и радног точка у вертикалној равни у процесу копања у тим радовима није обухваћена. Поред промене дужине резне ивице услед цикличног уласка и изласка кашика у захват са материјалом који се копа, кандидат је утврдио и зависност промене дужине резне ивице од вертикалног померања средишта радног точка што такође представља оригинални научни допринос ове докторске дисертације.

Комплексан математички модел, описан у програмском пакету MATLAB модул SIMULINK, главних подсистема роторног багера послужио је кандидату да испита утицаје интелигентних решења за реконструкцију роторног багера аутора М. Гнилке на његово динамичко понашање у процесу копања. Испитивањем утицаја:

- уградње диск кочнице на добошу подсистема дизања (држања) стреле,
- замене спојнице на подсистему копања,
- замене редуктора на подсистему копања и
- промене конструкције радног точка

кандидат је дошао до оригиналних резултата који указују на оптимална решења за реконструкцију роторног багера са аспекта његовог динамичког понашања у процесу копања.

У уводном делу кандидат даје кратак приказ стања рудаске механизације у Србији и основне разлоге за реконструкцију роторног багера. Указује на дуготрајност и високу цену испитивања, почев од утврђивања оптерећења, израде модела, контроле тежишта, геодетског снимања, мерења напона и убрзања и бројних других испитивања, која такође није могуће применити истовремено на већем броју багера. Да би се процес испитивања скратио и био применљив на више роторних багера осећа се потреба да се развије софтвер који ће, на бази анализе динамичког понашања погонског система за разне варијације са делимицно или потпуно реконструисаним елементима

погона: електромотор, спојница, кочница, редуктор и радни орган, указати на идеално решење за реконструкцију. У уводном делу постављена су и два циља истраживања ове докторске дисертације. Најважнији циљ истраживања у овом раду јесте да се направи софтвер који ће препознати оптимално решење при реконструкцији роторног багера. Да би се то остварило потребно је предложити различите комбинације замена при реконструкцији и испитивати динамичко понашање багера за сваку комбинацију. Други циљ је да се смање трошкови код дуготрајних и скувих испитивања која су потребна при одређивању критичних места у систему, која сугеришу врсту реконструкције. Ова истраживања би могла да буду путоказ конструкторима при усвајању најповољнијих решења роторних багера за одговарајуће површинске копове угља. Решења ових истраживања треба да буду применљива на већи број роторних багера.

Развој алгоритма и софтвера који ће на бази анализе динамичког понашања погонског система за разне варијације, са делимично или потпуно реконструисаним елементима погона: електромотор, спојница, кочница, редуктор и радни орган, указати на идеално решење при реконструкцији представља научни допринос ове докторске дисертације. Поред тога развијени модели, методе које су примењене и дато софтверско решење су универзални и могу се применити на друге роторне багере.

Носећа конструкција и главни подсистеми на роторном багеру описани су у првом поглављу. Кандидат даје преглед облика конструкција роторног багера, различита конструктивна решења погона главних подсистема роторног багера. Детаљније описује конструкцију радног точка, стреле радног точка као и елементе погона: електромотор, редуктор и спојницу. Механизам за дизање (држање) стреле такође је детаљно описан у овом поглављу.

У другом поглављу је описан начин моделирања и дата је графичка интерпретација момента отпора на радном точку. Како момент отпора на радном точку зависи од две променљиве: коефицијента отпора који је случајна величина добијена мерењем и дужине резне ивице кашике његово математичко описивање представља множење две матрице. Програмски се то множење одвија истовремено са решавањем диференцијалних једначина кретања система. Решавањем диференцијалних једначина кретања система добија се померање радног точка у вертикалној равни које представља улазну величину за срачунавање промене дужине резне ивице кашике. Резултат је матрица момента отпора где први ред представља време а други величину момента отпора на радном точку. Као резултат истовремено се добија графикон силе и момента отпора.

Оригинални допринос овог рада у другом поглављу:

- Поред промене дужине резне ивице услед цикличног уласка и изласка кашика у захват са материјалом који се копа, кандидат је дефинисао и аналитичку зависност промене дужине резне ивице од вертикалног померања средишта радног точка.

Треће поглавље у раду садржи теоријску анализу проблема узајамног утицаја променљивог оптерећења на радном точку на осцилације механизма за дизање и промену путање резне ивице кашике. У њему је кандидат дао динамички и математички модел носеће структуре роторног багера чије решавање као резултат даје силу у ужету. Она представља основу за анализу вибрација погонског система подсистема за дизање стреле. За конкретан пример роторног багера који је предмет реконструкције дефинисан је динамички модел, затим је исти математички описан и решен применом програмског пакета MATLAB. Као резултат решавања програма дате су карактеристике битних механичких величина погона подсистема за дизање стреле и подсистема копања: торзиони momenti, угаоне брзине, померања, итд. Ти резултати су

омогућили кандидату да анализира вибрације на елементима погона подсистема за дизање и копање као и промену путање резне ивице кашике. Диференцијалне једначине кретања подсистема копања, подсистема дизања и једначине осциловања носеће конструкције дефинисане су у овом поглављу.

Оригинални допринос рада у трећем поглављу:

- Кандидат је у трећем поглављу једним динамичким и математичким моделом описао три главна подсистема роторног багера у процесу копања. Диференцијалне једначине кретања подсистема копања и једначине осциловања носеће конструкције повезује отпор копања. Заједничко за диференцијалне једначине осциловања носеће конструкције и диференцијалне једначине кретања подсистема дизања је сила у ужету.

Програм за динамички прорачун поменутих подсистема роторног багера се састоји од неколико потпрограма који су међусобно повезани зависним величинама. Математички модели решавани су програмским пакетом MATLAB и резултати њиховог решавања дати су у поглављу 4. Графичко окружење модула SIMULINK омогућило је кандидату да да јасан приказ повезаности динамичког прорачуна одговарајућих подсистема, који су представљени потпрограмским модулима, зависним величинама као што су сила отпора копању и сила у ужету. Све величине које се прорачунавају покретањем програма истовремено „оживе“ 3Д модел нацртан у VIRTUALWORLD модулу. На тај начин поред функција промене појединих величина које се представљају графиконима паралелно са њиховим нумеричким одредјивањем кандидат те промене приказује у на виртуалном 3Д моделу. Кандидат у овом поглављу анализира добијене резултате и преко карактеристика основних механичких величина система утврђује веома неповољно динамичко понашање виталних елемената главних подсистема роторног багера у процесу копања. Симулинк окружење омогућава веома лаку измену или комплетну замену појединих потпрограма што даје велику слободу кандидату у раду и у сагледавању ефеката промене динамичких модела односно ефеката реконструкције појединих подсистема на роторном багеру. Паралелано посматрање тока решавања математичких модела направљених на основу динамичких модела пре и после реконструкције преко графичког окружења представља веома ефектан начин презентовања резултата.

Оригинални допринос рада у четвртном поглављу:

- Развој алгорита а затим и софтвера који на бази анализе динамичког понашања погонског система за разне варијације, са делимицно или потпуно реконструисаним елементима погона: електромотор, спојица, кочница, редуктор и радни орган, указује на идеално решење за реконструкцију.
- Анализа резултата динамичког прорачуна подсистема роторног багера која указује да се морају извршити одговарајуће реконструкције како би се веома неповољно динамичко понашање у процесу копања главних подсистема на роторном багеру побољшало.

У петом поглављу се указује на промене у динамичком понашању носеће конструкције и погонског система подсистема копања које доноси уградња диск кочнице на добошу подсистема дизања стреле радног точка роторног багера. У процесу копања када је систем укочен, оптерећена су свега два или три зупца зупчаника који су у захвату. То доводи до веома брзог хабања бокова зубаца који губе свој еволвентни облик, а самим тим и функцију преношења оптерећења. Нарочито је то изражено код последњег зупчастог пара редуктора погонског система дизања стреле, који се обично налази ван кућишта чиме је и подмазивање отежано, чији су зупчаници великих димензија тешки за израду и врло скупи. Анализирајући добијене резултате кандидат уочава значајан утицај уградње диск кочнице на динамичко понашање роторног багера

у процесу копања. Зупчаници редуктора подсистема дизања стреле а посебно последњи зупчасти пар потпуно су растерећени у процесу копања хоризонталним резивима. Знатно мање вредности силе у ужету за систем са диск кочницом гарантују дужи радни век ужета и мањи ризик од великих хаварија. Осциловање радног точка у вертикалној равни при ископу нехомогених масива може да повећа оптерећење на подсистему копања и за 50% и тиме изазове отказе и оштећења резних зуба кашика, деформацију конструкције радног точка, ломове и хабање зуба зупчаника и лежајева редуктора као и спојних елемената. Амлитуде вертикалних осцилација средишта радног точка применом диск кочнице на добошу подсистема дизања стреле умањене су са максималних 27 цм на мање од 1 цм што недвосмислено показује оправданост уградње диск кочнице на добошу подсистема дизања са аспекта динамичког понашања роторног багера.

Оригинални допринос рада у петом поглављу:

- Испитивање утицаја уградње диск кочнице на добошу подсистема копања на динамичко понашање главних подсистема роторног багера.
- Упоредни приказ и анализа резултата два модела са и без уградјене диск кочнице на добошу подсистема за дизање. Резултати који су изложени у овом поглављу недвосмислено указују на вишеструка побољшања динамичког понашања виталних елемената главних подсистема роторног багера у процесу копања уградњом диск кочнице на подсистему дизања(држања) стреле.

У шестом поглављу приказани су ефекти реконструкције погонског система подсистема копања на динамичко понашање његових виталних елемената уградњом хидродинамичке спојнице уместо механичке спојнице. Кандидат у овом поглављу описује структуру, принцип рада и математички моделира основне карактеристике турбоспојнице. Заједничку радну карактеристику турбоспојнице добијену испитивањем у лабораторијским условима кандидат је аналитички описао експоненцијалном зависношћу поступком интерполације методом Nelder-Mead.

Највећа промена а самим тим и оправданост уградње са аспекта динамичког понашања подсистема копања се манифестује код угаоне брзине радног точка. Амплитуде осциловања у периоду залета система су практично преполовљене у односу на вредности амплитуда са механичком спојницом у подсистему копања.

Оригинални допринос овог рада у шестом поглављу:

- Испитивање утицаја уградње хидродинамичке спојнице на подсистему копања на динамичко понашање виталних елемената тог подсистема у процесу копања.
- Упоредни приказ и анализа резултата два модела са механичком и хидродинамичком спојницом.

Утицај замене редуктора на динамичко понашање подсистема копања урађен је у поглављу седам. Погонски систем подсистема копања роторног багера реконструисан је заменом линиског редуктора са планетарним редуктором. За динамички модел реконструисаног подсистема копања кандидат формира математички модел, који му омогућава одређивање оптерећења и угаоне брзине мотора, радног точка и зупчаника редуктора у процесу копања. Анализа резултата коју је кандидат урадио показује да су вибрације момента електромотора и момента турбоспојнице знатно мање и по учестаности и по амплитуди од вибрација истих величина код подсистема копања са класичним редуктором. Елементи редуктора и турбоспојница пригушују осцилације узроковане ударним оптерећењима на радном точку. И поред великих ударних оптерећење електромотор сада ради у номиналном режиму рада. Елементи редуктора и турбоспојница пригушују осцилације узроковане ударним оптерећењима на радном точку.

Оригинални допринос овог рада у седмом поглављу:

- Испитивање утицаја замене линиског редуктора у подсистему копања планетарним на динамичко понашање виталних елемената тог подсистема у процесу копања.
- Упоредни приказ и анализа резултата два модела са линијским и планетарним редуктором.

Конструктивне промене на радном точку, разматране у поглављу 7, условиле су промену константи крутости и момената инерције у динамичком прорачуну подсистема копања. Као резултат динамичког прорачуна дати су упоредни дијаграми динамичког понашања елемената подсистема копања са старом и новом конструкцијом радног точка. Поједностављена конструкција доноси следеће предности:

- краће време транспорта копаног материјала (стрмија равана)
- елиминација акумулације материјала у мртвој зони,
- повећана еластичност конструкције радног точка.

Што се динамичког понашања елемената подсистема копања тиче, заочекивати је било да ће ново конструктивно решење највише помоћи пригушењу осцилација односно смањењу амплитуда осциловања елемената подсистема копања приликом наглих (ударних) промена момента оптерећења али резултатима кандидат то демантује.

Оригинални допринос рада у осмом поглављу:

- Испитивање утицаја конструктивних промена на радном точку на динамичко понашање виталних елемената подсистема копања.
- Упоредни приказ и анализа резултата два модела са старом и новом конструкцијом радног точка.

## Оцена научних доприноса

Резултати научних истраживања кандидата по теми докторске дисертације су садржани у:

- Дефинисању аналитичке зависности промене дужине резне ивице од вертикалног померања средишта радног точка.
- Једним динамичким и математичким моделом кандидат је обухватио три главна подсистема роторног багера у процесу копања. Диференцијалне једначине кретања подсистема копања и једначине осциловања носеће конструкције повезује отпор копања. Заједничко за диференцијалне једначине осциловања носеће конструкције и диференцијалне једначине кретања подсистема дизања је сила у ужету.
- Развоју алгорита а затим и софтвера који на бази анализе динамичког понашања погонског система за разне варијације, са делимично или потпуно реконструисаним елементима погона: електромотор, спојица, кочница, редуктор и радни орган, указује на идеално решење при реконструкцији.
- Анализи резултата динамичког прорачуна подсистема роторног багера која указује да се морају извршити одговарајуће реконструкције како би се веома неповољно динамичко понашање у процесу копања главних подсистема на роторном багеру побољшало.
- Испитивању утицаја уградње диск кочнице на добошу подсистема копања на динамичко понашање главних подсистема роторног багера. Упоредном приказу и анализи резултата два модела са и без уградјене диск кочнице на добошу подсистема за дизање. Резултати које је кандидат изложио

недвосмислено указују на вишеструка побољшања динамичког понашања виталних елемената главних подсистема роторног багера у процесу копања уградњом диск кочнице на подсистему дизања(држања) стреле.

- Испитивању утицаја уградње хидродинамичке спојнице на подсистему копања на динамичко понашање виталних елемената тог подсистема у процесу копања. Упоредном приказу и анализи резултата два модела са механичком и хидродинамичком спојницом.
- Испитивању утицаја замене линиског редуктора у подсистему копања планетарним на динамичко понашање виталних елемената тог подсистема у процесу копања. Упоредном приказу и анализи резултата два модела са линијским и планетарним редуктором.
- Испитивању утицаја конструктивних промена на радном точку на динамичко понашање виталних елемената подсистема копања. Упоредном приказу и анализи резултата два модела са старом и новом конструкцијом радног точка.

Треба напоменути да у целини рад представља и оригиналну композицију. Комбинацијом резултата других истраживача, који су послужили за старт истраживачког подухвата, као и оригинално постављених методологија на основу истих, чиме је дат значајан и оригинални допринос на постављену истраживачку тему истраживања оптималних решења за реконструкцију погонских система роторних багера.

И да резимирамо да су оригинални резултати видљиви кроз:

\* Систематизацију познатих знања и научних доприноса других истраживача потребних за истраживање оптималних решења за реконструкцију погонских система роторних багера, за коју је коришћења литература високог универзитетског и научног и садржаја.

\* Оригинални математички модел који представља комбинацију аналитичких, нумеричких и апроксимативно аналитичких метода, уз коришћење софтверског алата MATLAB који има и теоријски и практични значај, поред очигледне оригиналности.

\* Проширењем научних сазнања о интелигентним решењима за реконструкцију роторног багера са аспекта побољшања динамичког понашања која она доносе.

\* Посебно треба истаћи друго, треће и четврто поглавље која садрже нове оригиналне доприносе, који су добијени и публиковани у ауторским радовима са ментором докторске дисертације или су у процесу рецензије. Посебно се истиче једноставно софтверско решење комплексног математичког модела.

\* Оригиналном применом и коришћењем софтверског програма MATLAB, модула SIMULINK i VIRTUALWORLD и аналитичких израза за дужину резне ивице кашике, момент електромотора, радну карактеристику турбоспојнице.

\* Ова истраживања могу да послуже конструкторима при усвајању најповољнијих решења за реконструкцију роторног багера. Иако је ова методологија, приказана на примеру два роторна багера са старим и реконструисаним решењима, она

добија на значају и као алгоритам, који олакшано води одабиру оптималних решења за реконструкцију роторног багера.

Сматрамо да рад садржи оригинални научни допринос, и унос нових знања о истраживању оптималних решења за реконструкцију погонских система роторних багера, што је и био задатак рада, а што по Закону о Високом образовању треба да представља докторску дисертацију.

### ***Закључак и предлог***

На основу прегледа урађене докторске дисертације и анализе постигнутих резултата, чланови Комисије констатују:

- да поднети рад у потпуности одговара наслову и теми прихваћеној од стране Наставно – научног већа Факултета техничких наука у Косовској Митровици;
- да је кандидат резултатима добијеним у раду показао да поседује потребна знања из области истраживања оптималних решења за реконструкцију погонских система роторних багера и сналази се изузетно добро у коришћењу софтверских алата и математичких програма а за шта је потребан висок ниво теоријских знања и истраживачке спремности;
- да је кандидат показао потребан ниво самосталности у истраживањима и испољио способност анализе научних знања из задате области, као и самосталност и оригиналност у осмишљавању и креирању одређених модела;
- да докторска дисертација представља вредан и оригинални научни допринос у истраживању оптималних решења за реконструкцију погонских система роторних багера.
- да се дати софтвер за анализу динамичког понашања виталних елемената главних подсистема роторног багера може применити у различитим случајевима, тј. да резултати истраживања имају изванредан степен општости;
- да је један број оригиналних резултата саопштен на међународној конференцији: Symposium Non-linear Dynamics Multi- and Interdisciplinary Applications (SNDMIA 2012).
- један број научних резултата још није публикован, и чланови комисије оцењују да ће их кандидат ускоро публиковати јер је урађен поступак рецензије;
- да је рад технички обрађен на високом нивоу.

На основу свега напред изложеног чланови Комисије оцењују да је поднети рад кандидата мр Зорана Голубовића у потпуности оригиналан. Рад садржи оригиналне резултате који описују динамичко понашање виталних елемената роторног багера у процесу копања усмерених ка истраживању оптималних решења за реконструкцију погонских система роторних багера.



Имајући у виду све претходно изложено Комисија предлаже Наставно- научном већу Факултета техничких наука у Косовској Митровици да рад под називом

**Прилог истраживању оптималних решења за реконструкцију погонских система роторног багера**

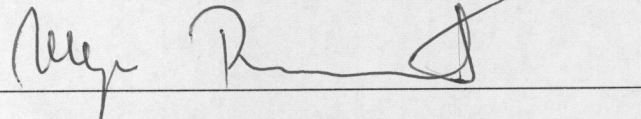
прихвати за докторску дисертацију и да кандидату мр Зорану Голубовићу, дипл.маш.инж. одобри усмену јавну одбрану.

У Косовској Митровици, Београду  
08.10.2012.год.

Чланови комисије:

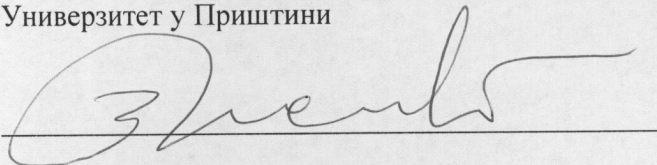
**1. Проф.др Ивица Ристовић, председник**

ванредни професор Рударско-геолошког факултета у Београду  
Универзитет у Београду



**2. Проф.др Златибор Лекић, ментор**

ванредни професор Факултета техничких наука у Косовској Митровици  
Универзитет у Приштини



**3. Проф.др Слободан Макрагић, члан**

ванредни професор Факултета техничких наука у Косовској Митровици  
Универзитет у Приштини

