

УНИВЕРЗИТЕТ У КРАГУЈЕВЦУ  
ФАКУЛТЕТ ЗА МАШИНСТВО И ГРАЂЕВИНАРСТВО У КРАЉЕВУ  
КРАЉЕВО

## НАСТАВНО НАУЧНОМ ВЕЋУ

Предмет: **Извештај Комисије о прегледу и оцени докторске дисертације кандидата мр Небојше Здравковића, дипл. инж. маш.**

Одлуком Наставно научног већа Факултета за машинство и грађевинарство у Краљеву, бр. 209/3 од 20. 02. 2015. год. именовани смо за чланове Комисије за преглед и оцену докторске дисертације кандидата **мр Небојше Здравковића, дипл. инж. маш.**, под називом «**Утицајни параметри зглобно везаних сегмената на еласто-динамичку стабилност стрела аутодизалица**».

На основу прегледа докторске дисертације Наставно-научном већу подносимо следећи

### ИЗВЕШТАЈ

#### 1. Значај и допринос докторске дисертације са становишта актуелног стања у области истраживања

Аутодизалице представљају најзаступљенији тип дизалица када је реч о изградњи и одржавању стамбене, саобраћајне и индустријске инфраструктуре. Зглобне стреле аутодизалица имају боље маневарске способности од телескопских при обављању деликатних операција манипулисања теретом и људством.

Пројектовање зглобних стрела аутодизалица представља мултидисциплинаран и веома комплексан задатак, при чему инжењери поступно долазе до конструкционог решења које мора да задовољи бројне захтеве и ограничења. С обзиром да су многа ограничења међусобно супротстављена и да је, услед структурне сложености, број параметара са који се мора узети у разматрање веома велики, сам процес пројектовања представља својеврсан оптимизациони проблем. Наиме, тенденција за добијањем лаке конструкције, која је пожељна са аспекта цене производње, неопходног простора за заузимање транспортног положаја након утовара или истовара, степена искоришћења погонске енергије и маневарских могућности, доводи до нежељених ефеката у виду појаве дуготрајних осцилација стреле током и након завршетог маневра са окаченим теретом, што смањује радни век машине услед замора материјала структурних елемената. Поред тога, динамичка нестабилност умањује укупни учинак дизалице, с

обзиром да се транспортни циклус продужава због додатног времена које се мора трошити на смиривање осцилаторног кретања. Додатни проблем настаје и код управљања услед губитка тачности позиционирања. Због свега наведеног, истраживање динамичког понашања зглобних стрела аутодизалица представља стални задатак истраживача и инжењера.

Спроведена истраживања у овом раду су значајна са теоријског и практичног аспекта, пре свега због специфичног аналитичко-нумеричког приступа моделирању динамичког понашања стрела аутодизалица. Презентовани приступ омогућава креирање динамичких модела стрела аутодизалица високе тачности, јер полази од Euler-Bernoulli-јеве теорије греда при савојним осцилацијама, што значи да се носећа структура стреле посматра као систем са расподељеним инерцијалним и еластичним параметрима. Такође, овим се омогућава да се моделом обухвати и врло сложени проблем променљивости попречног пресека зглобно везаних сегмената. Са друге стране, утицај хидроцилиндра и вешајних скопова је дискретизован концентрисањем параметара у карактеристичним тачкама. Такође, утицај унутрашње силе хидроцилиндра на локалне деформације код упоришних тачака је дискретизован. На крају, примена методе централних коначних разлика, којом се цео проблем дискретизује и пребацује из диференцијалног у алгебарски домен, доводи до формирања нумеричког облика модела, погодног за програмирање, који задржава параметарску функционалност.

## **2. Оцена да је урађена докторска дисертација резултат научног рада кандидата у одговарајућој научној области**

У току израде рада кандидат је унапредио постојеће и развио нов комбиновани приступ при решавању проблема у домену динамичког понашања стрела аутодизалица. Потребно је нагласити чињеницу да је посебна пажња усмерена на конструкционе специфичности реалних решења.

Модел је заснован на Euler-Bernoulli-јевој теорији греда које врше савојне осцилације, где су зглобно везани стуб и полуга посматрани као носачи са дистрибуираним параметрима масе и крутости. Усвојена је претпоставка о апсолутној крутости сегмената у аксијалном правцу, с обзиром на велике површине попречних пресека. Такође, моделом је обухваћена деформабилност подконструкције кроз еластични ослонац, који дозвољава почетни нагиб динамичке еластичне линије стуба.

Конструктивна специфичност реалних решења у виду ексцентричности упоришних тачака хидроцилиндра у односу на тежишне линије сегмената, моделирана је преко три лака и аксијално апсолутно крута штапа. На тај начин, дејство концентрисаних момената савијања који се јављају на местима везе хидроцилиндра са сегментима, замењен је одговарајућим спреговима трансверзалних сила, које преносе спољашњи штапови. Средишњи штапови преносе на сегменте трансверзалне силе као директне пројекције силе хидроцилиндра.

Утицај маса хидроцилиндра и вешајних подсклопова је узет у обзир концентрисањем масе у тачкама на тежишним линијама које су најближе ексцентричним упоришним тачкама цилиндра и клипњаче. Моделом је обухваћена и аксијална еластичност хидроцилиндра посредством линеарне опруге између вешајних тачака. Маса терета је концентрисана у крајњој тачки полуге.

Цела структура зглобног манипулатора је издељена на секције, у оквиру којих су функције еластичних линија диференцијабилне и непрекидне. Претпоставком облика решења, дошло се до диференцијалног облика еластичне динамичке линије свих секција. Написани су гранични услови по померањима, нагибима, трансверзалним силама и моментима у крајњим тачкама секција. Померање полуге је разложено на померање полуге као крутог тела и померање услед еластичних савојних деформација.

Диференцијалне једначине динамичких еластичних линија секција и гранични услови су дискретизовани методом централних коначних разлика. Цела структура је тако дискретизована помоћу еквидистантних тачака, чија померања представљају генералисане координате. При томе, у дискретизованим једначинама код граничних чворова се јављају фиктивна померања, јер излазе из одговарајућег домена функције еластичне линије секције. Решавањем локалних система линеарних једначина, фиктивна померања су изражена преко померања реалних тачака сегмената.

За сваки чвор је написан дискретизован облик динамичке еластичне линије, уз елиминисање фиктивних померања. На тај начин је гранични проблем из диференцијалног домена пребачен на алгебарски у виду система линеарних хомогених једначина по непознатим померањима реалних чворова структуре. За решавање карактеристичне једначине система написан је програмски алгоритам. Као компаративни модел, изграђен је коначно-елементни модел зглобног манипулатора.

Кандидат је спровео анализу резултата за прве три природне учестаности зглобног манипулатора, при чему су варирана четири параметра: крутост еластичног ослоња зглобног манипулатора, крутост хидроцилиндра, угао полуге и маса терета.

Приликом дефинисања модела, посебна пажња је посвећена разматрању граничних услова у контактима између сегмената стреле аутодизалице, што је објављено у научном раду категорије M21<sup>1</sup>.

На основу напред реченог Комисија констатује да дисертација представља оригиналан научни рад кандидата.

### **3. Преглед остварених резултата рада кандидата у оквиру докторске дисертације**

Докторска дисертација кандидата **мр Небојше Здравковића, дипл. инж. маш.**, под називом **«Утицајни параметри зглобно везаних сегмената на еласто-динамичку стабилност стреле аутодизалице»** написана је на 170 страна.

Цитирана литература, наведена је у 106 библиографских јединица.

---

<sup>1</sup> Mile Savković, Milomir Gašić, Goran Pavlović, Radovan Bulatović, **Nebojša Zdravković**: Stress analysis in contact zone between the segments of telescopic booms of hydraulic truck cranes, Thin Walled Structures, Vol. 85, pp. 332–340, ISSN 0263-8231, IF (2013): 1,432 - M21, 2014.

У овом раду понуђен је комбиновани приступ при моделирању динамичког понашања стрела аутодизалица код слободних савојних осцилација, који се састоји из примене Euler-Bernoulli-јеве теорије греда са расподељеним параметрима, концентрисању инерцијалних и еластичних параметара хидроцилиндра и припадајућих подсклопова и дискретизацији проблема методом коначних разлика.

Резултати обављених истраживања, везани за циљ рада су:

- комбиновање метода при дефинисању модела за одређивање динамичких карактеристика реалних решења конструкција стрела аутодизалица, узимајући у обзир све конструктивне специфичности,
- дефинисање утицаја ексцентричности вешајних тачака хидроцилиндра на локалне еластичне деформације сегмената помоћу система лаких и кругих штапова и успостављање аналитичке зависности силе у хидроцилиндру од померања карактеристичних тачака структуре,
- израда динамичког модела и валидација предложеног приступа при одређивању природних учестаности савојних осцилација зглобног и телескопског дела стреле аутодизалице кроз компарацију са резултатима добијеним из коначно-елементног симулационог модела.

Докторски рад приказан је у седам поглавља:

1. Увод
  2. Преглед досадашњих истраживања из области динамике ауто-дизалица и флексибилних манипулатора
  3. Преглед типова ауто-дизалица и опште карактеристике конструкција зглобних стрела
  4. Примена методе коначних разлика у фреквентној анализи структура са дистрибуираним и променљивим параметрима
  5. Моделирање утицаја структурних параметера зглобног дела стреле на природни фреквентни спектар
  6. Фреквентна анализа телескопског дела стреле код савојних осцилација применом методе централних коначних разлика
  7. Закључак и правци даљих истраживања
- Литература  
Прилози

У првом поглављу изнете су полазне основе истраживања и дефинисани предмет, циљ и значај истраживања. Постављени су оквири истраживања као и очекивани резултати и допринос истраживања.

Друго поглавље је посвећено анализи и прегледу постојеће литературе у области истраживања зглобних стрела ауто-дизалица и зглобних манипулатора уопште. Дата је подела литературе према предмету истраживања и методама које су коришћене код дефинисања динамичких модела.

У трећем поглављу извршен је кратак преглед типова ауто-дизалица уз идентификацију заједничких структурних карактеристика зглобних стрела. Такође, дате су компаративне предности зглобних у односу на телескопске стреле ауто-дизалица.

У четвртом поглављу је показана примена методе централних коначних разлика у фреквентној анализи структура са дистрибуираним параметрима на конкретном примеру савојних осцилација еластично ослоњеног конзолног носача променљивог попречног пресека са концентрисаном масом на врху.

У петом поглављу је изграђен детаљан динамички модел зглобног дела стреле као дво-полужног зглобног манипулатора са еластичним ослањањем и теретом на врху. Изграђен је аналитичко-нумерички модел за фреквентну анализу у функцији спољашњих и унутрашњих утицајних параметара зглобног манипулатора као система са расподељеном крутошћу и масом. Као конфигурационе координате које дефинишу тренутни положај стреле у радном пољу усвојени су углови које полуге заклапају са вертикалним, односно, хоризонталним правцем.

Утицај силе у хидроцилиндру и ексцентричности вешајних тачака у односу на неутралну линију полужја је моделиран увођењем по три лака и крута штапа код сваког вешајног склопа. Тиме су концентрисани моменти растављени на одговарајуће спрегове сила, које делују трансверзално на полуге манипулатора. Након тога, дефинисана је зависност тригонометријских величина од геометријских параметара и конфигурационих координата структуре. Анализом деформација делова сегмената код вешајних тачака хидроцилиндра, утврђена је аналитичка зависност између силе у хидроцилиндру и померања карактеристичних тачака на неутралним линијама.

Користећи исти приступ, у шестом поглављу је спроведена фреквентна анализа телескопског дела стреле код савојних осцилација. Анализиран је телескоп који се састоји из три сегмента, као геометријски изменљива структура, при чему су као конфигурационе координате усвојене релативне координате унутрашњих сегмената у односу на спољашње. Цела структура је посматрана као јединствен носач, степенасто променљивог попречног пресека.

Седмо поглавље формулише закључке и даје уопштени поступак на бази предложеног приступа. Такође, изложене су предности и недостаци комбинованог аналитичко-нумеричког приступа у односу на методу коначних елемената код израде динамичких модела зглобних стрела ауто-дизалица.

#### **4. Оцена испуњености обима и квалитета докторске дисертације у односу на пријављену тему**

У раду су у потпуности остварени очекивани резултати дати у Извештају комисије за оцену подобности теме и кандидата докторске дисертације број 232/19 од 11.05.2012. године и испоштован оквирни садржај рада дат у поменутом извештају. Ови резултати помињани су у претходном поглављу и делом се дају у наредном.

## **5. Научни резултати докторске дисертације**

У раду је дефинисан и представљен комбиновани приступ моделирању динамичког понашања зглобно везаних сегмената стреле при савојним осцилацијама, на примеру једне реалне конструкције, састављене од два сегмента и хидроцилиндра са вешајним скоповима. Сегменти стреле су третирани као Euler-Bernoulli-јеве греде са дистрибуираним инерцијалним и еластичним параметрима, док је збирни утицај хидроцилиндра и вешајних подскопова узет у обзир преко концентрисаних маса у вешајним тачкама. Такође, при дефинисању модела узета је у обзир аксијална крутост самог хидроцилиндра. Посебна пажња је посвећена конструктивној специфичности стрела аутодизалица која се тиче ексцентричности вешајних тачака хидроцилиндра у односу на неутралне линије сегмената. Веза хидроцилиндра и сегмената је моделирана специјалним системом лаких, аксијално крутих штапова. Успостављена је аналитичка зависност силе у хидроцилиндру и трансверзалних померања карактеристичних тачака на сегментима, чије су аксијалне деформације занемарене. Диференцијални облици динамичких еластичних линија секција и граничних услова су дискретизовани методом централних коначних разлика. Гранични проблем је трансформисан у систем линеарних алгебарских једначина, погодан за програмирање. Тачност добијених зависности еласто-динамичких параметара структуре је потврђена поређењем природних учестаности предложеног модела са резултатима из модела изграђеног на бази методе коначних елемената, за све геометријске конфигурације зглобног манипулатора. Коришћењем истог приступа, извршена је и фреквентна анализа телескопског дела стреле.

## **6. Примењивост и корисност резултата у теорији и пракси**

С обзиром да се применом предложеног комбинованог аналитичко-нумеричког приступа добија дискретизован модел високе тачности а који истовремено задржава параметарску функционалност, пројектант добија ефикасан и прецизан алат за контролу динамичких карактеристика стреле у раној фази пројектовања. Поред тога, предложени приступ се може сматрати основом код моделирања осциловања стреле са укљученим пригушењем у хидроцилиндрима, као пасивним начином сузбијања нежељених вибрација. Показана висока тачност модела отвара могућност да се он узме као референтни модел при дефинисању еквивалентног динамичког модела са концентрисаним масама, који је знатно једноставнији за решавање. Ова идеја укључује употребу неког од савремених алгоритама оптимизације, који би одредио положај и вредности концентрисаних маса на стрели, при чему би се као функција циља поставило одржање природних учестаности.

## **7. Начин презентирања резултата научној јавности**

Представљени приступ је укључио разматрање граничних услова у контактима између сегмената стреле аутодизалице, што је објављено у научном раду категорије M21:

Mile Savković, Milomir Gašić, Goran Pavlović, Radovan Bulatović, **Nebojša Zdravković**: STRESS ANALYSIS IN CONTACT ZONE BETWEEN THE SEGMENTS OF TELESCOPIC BOOMS OF HYDRAULIC TRUCK CRANES, Thin-Walled Structures (2014), Vol. 85, pp. 332-340, ISSN 0263-8231, IF (2013): 1,432 - M21

Кандидат је као аутор или коаутор објавио више научних радова у међународним часописима као и на међународним и домаћим научним скуповима, од којих се издвајају

- саопштења на међународним научним скуповима штампана у целини

**Zdravković N.**, Petković Z., Gašić M., Savković M.: Research of deflection-payload dependence of the auto crane articulated boom, International Conference on material Handling, Construction and Logistics MHCL'12, Belgrade, Serbia, ISBN 978-86-7083-763-8, pp. 101-106, 2012.

**Zdravković N.**, Gašić M., Savković M., Petrović, D.: Research of the Force Values Dependences in Hydro Cylinders of the Mobile Elevating Work Platform Articulated Boom on the Work Position and Load Weight, The 7th International conference research and development of mechanical elements and system IRMES 2011, Zlatibor, Serbia, ISBN 978-86-6055-012-7, pp. 271-278, 2011.

Mile Savković, Milomir Gašić, **Nebojša Zdravković**, Goran Bošković, Goran Pavlović: Fracture analysis of the hydraulic truck crane ATLAS 3006, Proceedings of VIII International Conference Heavy Machinery – HM2014, Zlatibor, Serbia, ISBN 978-86-6055-012-7, pp. A.29-35, 2014.

- Референце националног нивоа - публикације у домаћим часописима:

**Zdravković N.**, Gašić M., Savković M.: Analytical Form for Total Static Deflection of the Articulated Boom of the Mobile Elevating Work Platform, IMK-14 Research & Development, ISSN 0354-6829, Vol. 19, No. 1, pp. EN21-28, 2013.


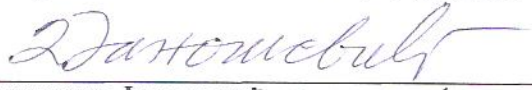

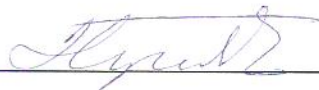
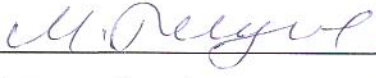
Сви наведени резултати су директно из проблематике којом се бави ова докторска дисертација.

## **8. Закључак и предлог комисије**

На основу извршене анализе докторске дисертације Комисија је утврдила да је она у потпуности реализована сагласно плану истраживања.

Резултати истраживања су методолошки јасно презентирани а њихова анализа дата је на научном нивоу. Моделирање граничних услова у контактима између сегмената стреле аутодизалице потврђено је у раду категорије M21, 2014. године. Поред тога, истраживања која су директно везана за проблематику којом се бави ова докторска дисертација су публикована у већем броју радова на међународним конференцијама и у домаћем часопису.

На основу свега реченог Комисија позитивно оцењује урађену докторску дисертацију и предлаже Наставно научно већу Факултета за машинство и грађевинарство у Краљеву да прихвати Извештај о прегледу и оцени докторске дисертације кандидата **мр Небојше Здравковића, дипл. инж. маш.**, под називом «Утицајни параметри зглобно везаних сегмената на еласто-динамичку стабилност стрела аутодизалица».

1.   
др **Јован Владић**, редовни професор,  
Факултет техничких наука Универзитета у Новом Саду.  
Ужа научна област: Машинске конструкције,  
транспортни системи и логистика, председник
2.   
др **Драгослав Јаносевић**, редовни професор,  
Машински факултет Универзитета у Нишу.  
Ужа научна област: Транспортна техника и логистика,  
члан
3.   
др **Миле Савковић**, редовни професор  
Факултет за машинство и грађевинарство у Краљеву  
Универзитета у Крагујевцу  
Ужа научна област: Механизација и носеће  
конструкције, члан
4.   
др **Драган Петровић**, ванредни професор  
Факултет за машинство и грађевинарство у Краљеву  
Универзитета у Крагујевцу  
Ужа научна област: Железничко машинство, члан
5.   
др **Миломир Гашић**, редовни професор  
Факултет за машинство и грађевинарство у Краљеву  
Универзитета у Крагујевцу  
Ужа научна област: Механизација и носеће  
конструкције, ментор