



УНИВЕРЗИТЕТ У КРАГУЈЕВЦУ
ФАКУЛТЕТ ЗА МАШИНСТВО И
ГРАЂЕВИНАРСТВО У КРАЉЕВУ

Небојша Б. Здравковић

**УТИЦАЈНИ ПАРАМЕТРИ ЗГЛОБНО ВЕЗАНИХ
СЕГМЕНАТА НА ЕЛАСТО-ДИНАМИЧКУ
СТАБИЛНОСТ СТРЕЛА АУТОДИЗАЛИЦА**

Докторска дисертација

Краљево, 2015. год.

ИДЕНТИФИКАЦИОНА СТРАНИЦА

<i>I. Аутор</i>	
Име и презиме:	Небојша Здравковић
Датум и место рођења:	06.10.1973., Краљево
Садашње запослење:	Асистент на Факултету за машинство и грађевинарство у Краљеву Универзитета у Крагујевцу
<i>II. Докторска дисертација</i>	
Наслов:	Утицајни параметри зглобно везаних сегмената на еласто-динамичку стабилност стрела аутодизалица
Број страница:	170
Број слика:	64
Број библиографских података:	106
Установа и место где је рад израђен:	Факултет за машинство и грађевинарство у Краљеву Универзитета у Крагујевцу, Краљево
Научна област (УДК):	Дизалице уопште, дизалице неограничене покретљивости на тлу (621.873.3)
Ментор:	др Миломир Гашић, редовни професор
<i>III. Оцена и одбрана</i>	
Број одлуке и датум прихватања докторске дисертације:	392/7 2012.
Комисија за оцену подобности теме и кандидата:	<ol style="list-style-type: none">др Ружица Николић, редовни професор Факултет инжењерских наука у Крагујевцудр Јован Владић, редовни професор Факултет техничких наука у Новом Садудр Звонимр Југовић, редовни професор Технички факултет у Чачкудр Миле Савковић, ванредни професор Машински факултет у Краљевудр Миломир Гашић, редовни професор Машински факултет у Краљеву
Комисија за оцену и одбрану докторске дисертације:	<ol style="list-style-type: none">др Јован Владић, редовни професор, Председник Факултет техничких наука у Новом Садудр Драгослав Јаношевић, редовни професор, Члан Машински факултет у Нишудр Миле Савковић, редовни професор, Члан Факултет за машинство и грађевинарство у Краљевудр Драган Петровић, ванредни професор, Члан Факултет за машинство и грађевинарство у Краљевудр Миломир Гашић, редовни професор, Ментор Факултет за машинство и грађевинарство у Краљеву
Датум одбране дисертације:	

ПРЕДГОВОР

Ова докторска дисертација је урађена на Катедри за конструкције и пројектовање у машиноградњи Факултета за машинство и грађевинарство у Краљеву Универзитета у Крагујевцу и представља резултат вишегодишњег научног и стручног усавршавања у оквиру Центра за грађевинску и транспортну механизацију, из области механизације и носећих конструкција.

На првом месту, дубоку захвалност дугујем ментору, проф. др Миломиру Гашићу за свестрану и континуирану помоћ током израде ове дисертације. Такође, посебну захвалност желим да искажем и проф. др Јовану Владићу са Факултета техничких наука у Новом Саду, проф. др Драгославу Јаношевићу са Машинског факултета у Нишу, као и професорима са матичног факултета проф. др Милу Савковићу и проф. др Драгану Петровићу на корисним саветима и сугестијама.

Захвалност дугујем и свим члановима Катедре за конструкције и пројектовање у машиноградњи, као и свим осталим колегама на Факултету за машинство и грађевинарство у Краљеву на посредној или непосредној подршци у досадашњем раду.

Захваљујем се искрено својој породици на стрпљењу и разумевању током израде дисертације.

У Краљеву, фебруар 2015.

Небојша Здравковић

УТИЦАЈНИ ПАРАМЕТРИ ЗГЛОБНО ВЕЗАНИХ СЕГМЕНАТА НА ЕЛАСТО-ДИНАМИЧКУ СТАБИЛНОСТ СТРЕЛА АУТОДИЗАЛИЦА

РЕЗИМЕ

Аутодизалице имају једну од кључних улога током изградње и одржавања свих видова стамбене, саобраћајне и индустријске инфраструктуре. Честе промене локације утовара и истовара, манипулација разноврсним теретом у условима ограниченог маневарског простора, повећање носивости, висине дизања и дохвата, оперативна безбедност и стабилност, ергономско и ефикасно управљање, уз висок степен искоришћења енергије формирају комплексан скуп супротстављених захтева и ограничења при њиховом пројектовању. У циљу добијања лакших, енергетски ефикаснијих и економичнијих решења, инжењери су приморани да оптимизују носећу структуру стрела аутодизалица. Директна последица ове тенденције је повећање еластичности и појава осцилација, које неповољно утичу на радни век стреле услед појаве замора и отежавају управљање дизалицом. У раду је 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 третирано 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. Маса терета је концентрисана у крајњој тачки флексибилног манипулатора. С обзиром да шасија вучног возила није апсолутно крута, еластичност ослањања је уграђена у модел преко опруге у ослонцу. 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. Као генерализане координате слободних савојних осцилација усвојена су попречна померања еквидистантних тачака дуж неутралних линија. Успостављена је аналитичка зависност силе у хидроцилиндру у функцији трансверзалних померања карактеристичних тачака на сегментима, чије су аксијалне деформације занемарене. Цела зглобна структура је издељена на секције тачкама у којима делују трансверзалне силе. 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. Проблем променљивости попречних пресека сегмената је обухваћен посебним поглављем. Коришћењем истог приступа, извршена је и фреквентна анализа телескопског дела стреле.

Кључне речи: аутодизалице, зглобне стреле, флексибилни манипулатори, савојне осцилације, *Euler-Bernoulli*-јева теорија греда, метода централних коначних разлика, природне учестаности, метода коначних елемената.

INFLUENTIAL PARAMETERS OF ARTICULATED SEGMENTS ON ELASTIC-DYNAMIC STABILITY OF TRUCK CRANE BOOMS

SUMMARY

Truck cranes have one of key roles in construction and maintenance of all kinds of residential, traffic and industrial infrastructure. Frequent changes in loading and unloading locations, manipulation with different loads in conditions of restricted maneuver space, capacity increase, lifting height and reach increase, operating safety and stability, ergonomic and efficient control, with high degree of energy utilization, create a complex set of opposing demands and restrictions in their design. In order to get the lightweight, energetically more efficient and economical solutions, the engineers are forced to optimize the carrying structure of truck crane booms. Direct effect of this tendency is the increase of elasticity and the occurrence of vibrations which unfavorably affect the boom's life due to fatigue and make the crane control difficult. In this research, a combined approach to modeling of dynamic behaviour of boom articulated segments in bending vibration is presented, in the case of a real-life structure which consists of two segments, hydro cylinder and mounting subassemblies. Segments of the boom are considered as Euler-Bernoulli's beams with distributed inertial and elastic parameters, while the total influence of hydro cylinders and mounting subassemblies has been taken into account through lumped masses in mounting points. Given that the towing vehicle's chassis is not absolutely rigid, the boom support elasticity has been built in the model through the spring in the support. Special attention has been given to the constructive specificity of truck cranes' booms which deals with the eccentricity of hydro cylinders' mounting points in relation to segments' neutral lines. Bond of hydro-cylinders and segments has been modeled by a special system of light, axially rigid rods. As generalized coordinates of free bending vibrations there have been adopted the transverse displacements of equidistant points along the neutral lines. There has been established the analytic dependence of the force in hydro-cylinder in terms of transverse displacements of characteristic points on segments, whose axial deformations are neglected. Whole articulated structure is divided in sections by points where transverse forces act. Differential forms of sections' dynamic elastic lines and boundary conditions are discretized by central finite difference method. Boundary problem is transformed into a system of linear algebraic equations, suitable for programming. Accuracy of obtained dependencies of elastic-dynamic structure parameters is confirmed by comparing the natural frequencies of proposed model with results from the model built on the base of finite element method, for all geometrical configurations of articulated manipulator. The problem of segments' cross-sections non-uniformity is covered in special chapter. By using the same approach, there has been also carried out the frequency analysis of telescopic part of the boom.

Key words: *truck cranes, articulated booms, flexible manipulators, bending vibrations, Euler-Bernoulli's beam theory, central finite difference method, natural frequencies, finite element method.*

САДРЖАЈ

СПИСАК ОЗНАКА ПО РЕДОСЛЕДУ ПОЈАВЉИВАЊА.....	1
1. УВОД.....	4
1.1. Предмет истраживања.....	6
1.2. Циљ истраживања	7
1.3. Значај истраживања	8
1.4. Структура рада	9
2. ПРЕГЛЕД ДОСАДАШЊИХ ИСТРАЖИВАЊА ИЗ ОБЛАСТИ ДИНАМИКЕ АУТО-ДИЗАЛИЦА И ФЛЕКСИБИЛНИХ МАНИПУЛАТОРА	12
3. ПРЕГЛЕД ТИПОВА АУТО-ДИЗАЛИЦА И ОПШТЕ КАРАКТЕРИСТИКЕ КОНСТРУКЦИЈА ЗГЛОБНИХ СТРЕЛА.....	22
3.1. Типови ауто-дизалица.....	22
3.2. Опште карактеристике конструкција зглобних стрела ауто-дизалица и основни радни параметри.....	26
4. ПРИМЕНА МЕТОДЕ КОНАЧНИХ РАЗЛИКА У ФРЕКВЕНТНОЈ АНАЛИЗИ СТРУКТУРА СА ДИСТРИБУИРАНИМ И ПРОМЕНЉИВИМ ПАРАМЕТРИМА.....	30
4.1. Однос методе коначних разлика према аналитичком приступу и методи коначних елемената.....	30
4.2. Опис модела и полазна једначина	32
4.3. Гранични услови у диференцијалном облику	35
4.4. Дискретизација граничног проблема помоћу централних коначних разлика.....	36
4.4.1. Шема дискретизације носача	36
4.4.2. Дискретизација диференцијалне једначине еластичне линије	37
4.4.3. Дискретизација граничних услова.....	38
4.4.4. Карактеристична једначина.....	39
4.5. Нумерички пример и компарација са моделом на бази коначних елемената	42
5. МОДЕЛИРАЊЕ УТИЦАЈА СТРУКТУРНИХ ПАРАМЕТАРА ЗГЛОБНОГ ДЕЛА СТРЕЛЕ НА ПРИРОДНИ ФРЕКВЕНТНИ СПЕКТАР.....	49
5.1. Опис модела и полазне претпоставке.....	50
5.2. Полазне једначине у аналитичком и дискретизованом облику	55
5.3. Одређивање зависности тригонометријских величина од геометријских параметара и конфигурационих координата зглобног механизма.....	58
5.4. Моделирање функционалне зависности између силе у хидроцилиндру и померања карактеристичних тачака на тежишним линијама стуба и полуге	61
5.5. Дефинисање граничних услова у карактеристичним тачкама зглобног дела стреле у аналитичком и дискретизованом облику	67
5.5.1. Гранични услови у еластичном ослонцу.....	67

5.5.2. Гранични услови у тачки Н.....	69
5.5.3. Гранични услови у тачки В.....	71
5.5.4. Гранични услови у тачки Ј.....	73
5.5.5. Гранични услови у зглобу С.....	75
5.5.6. Гранични услови у тачки R.....	78
5.5.7. Гранични услови у тачки D.....	80
5.5.8. Гранични услови у тачки Q.....	82
5.5.9. Гранични услови у тачки P.....	84
5.6. Формирање система алгебарских једначина по померањима реалних чворова зглобног манипулатора.....	85
5.7. Нумерички пример и упоредни коначно-елементни модел структуре зглобног дела стреле.....	92
5.8. Резултати математичког модела и компарација са резултатима из коначно-елементног модела зглобног манипулатора.....	96
6. ФРЕКВЕНТНА АНАЛИЗА ТЕЛЕСКОПСКОГ ДЕЛА СТРЕЛЕ КОД САВОЈНИХ ОСЦИЛАЦИЈА ПРИМЕНОМ МЕТОДЕ ЦЕНТРАЛНИХ КОНАЧНИХ РАЗЛИКА.....	108
6.1. Опис структуре телескопа.....	108
6.2. Основне претпоставке, прорачунски модел и полазне једначине.....	110
6.3. Гранични услови у дискретизованом облику преко централних коначних разлика.....	114
6.3.1. Гранични услови у ослонцу А.....	114
6.3.2. Гранични услови у тачки В.....	114
6.3.3. Гранични услови у тачки С.....	116
6.3.4. Гранични услови у тачки D.....	119
6.3.5. Гранични услови у тачки F.....	121
6.3.6. Гранични услови на врху телескопа у тачки G.....	124
6.4. Формирање система алгебарских једначина по померањима реалних чворова структуре телескопа.....	126
6.5. Нумерички пример и упоредни коначно-елементни модел структуре телескопског дела стреле.....	132
6.6. Резултати математичког модела и компарација са резултатима из коначно- елементног модела телескопске структуре.....	135
7. ЗАКЉУЧАК И ПРАВЦИ ДАЉИХ ИСТРАЖИВАЊА.....	142
ЛИТЕРАТУРА.....	147
Списак слика.....	155
Списак табела.....	158
Прилози.....	159
Прилог 1 - MatLab код уз поглавље 4.....	159
Прилог 2 - MatLab код уз поглавље 5.....	161
Прилог 3 - MatLab код уз поглавље 6.....	166

СПИСАК ОЗНАКА ПО РЕДОСЛЕДУ ПОЈАВЉИВАЊА

k	- крутост флексионе опруге ослонца конзолног носача
M	- концентрисана маса на врху конзолног носача
B	- константна ширина правоугаоног танкозидног профила
δ	- дебљина зидова правоугаоног танкозидног профила
$H(x)$	- висина правоугаоног танкозидног профила
H_0	- висина пресека код ослонца
H_L	- висина пресека на слободном крају
$m(x)$	- маса по јединици дужине конзолног носача
$EI(x)$	- савојна крутост
E	- <i>Young</i> -ов модул еластичности
$I(x)$	- аксијални момент инерције попречног пресека
L	- дужина конзолног носача
$f(x,t)$	- расподељено трансверзално оптерећење
$M(x,t)$	- момент савијања
$Q(x,t)$	- трансверзална сила
C	- амплитуда осциловања
$Y(x)$	- сопствени облик (мод) осциловања
ω	- кружна природна учестаност
φ	- фазни угао
η	- бездимензиони декремент висине попречног пресека
ψ	- бездимензиони коефицијент нагиба контуре носача
$A(x)$	- површина попречног пресека
ρ	- специфична маса материјала
I_0	- аксијални момент инерције попречног пресека код ослонца
I_L	- аксијални момент инерције попречног пресека на слободном крају
n	- број елементарних сегмената
Δs	- дужина елементарног сегмента
i	- редни број чвора
Y_i	- попречно померање i -тог чвора
P_i	- кондезовани израз
Q_i	- кондезовани израз
R_i	- кондезовани израз
S_i	- кондезовани израз
λ	- карактеристична вредност
T	- кондезовани израз
J	- кондезовани израз
f_i	- сопствена фреквенција

q	- бездимензионална крутост
r	- бездимензионална маса
m	- укупна сопствена маса носача
Δ_i	- релативно одступање i -те сопствене кружне учестаности
MKE	- метода коначних елемената
l_1	- дужина стуба
l_2	- дужина полуге
A_1	- површина попречног пресека стуба
I_1	- аксијални момент инерције стуба
A_2	- површина попречног пресека полуге
I_2	- аксијални момент инерције полуге
k	- крутост ослоња зглобног манипулатора
M_P	- маса корисног терета манипулатора
α_1	- угао између осе стуба и вертикалног правца
α_2	- угао између осе полуге и хоризонталног правца
h_1	- крак спрега код доње вешајне тачке хидроцилиндра
h_2	- крак спрега код горње вешајне тачке хидроцилиндра
e_1	- ексцентрицитет доње вешајне тачке од тежишне линије стуба
e_2	- ексцентрицитет горње вешајне тачке од тежишне линије полуге
F_c	- сила у хидроцилиндру
c	- аксијална крутост хидроцилиндра
$T_1(T_B)$	- трансверзална сила код доњег вешања од силе хидроцилиндра
$T_2(T_D)$	- трансверзална сила код горњег вешања од силе хидроцилиндра
N_1	- аксијална сила код доњег вешања која потиче од силе хидроцилиндра
N_2	- аксијална сила код горњег вешања која потиче од силе хидроцилиндра
T_H	- трансверзална сила доњег вешања услед разлагања момента на спрег
T_J	- трансверзална сила доњег вешања услед разлагања момента на спрег
T_R	- трансверзална сила горњег вешања услед разлагања момента на спрег
T_Q	- трансверзална сила горњег вешања услед разлагања момента на спрег
δ_1	- угао између осе хидроцилиндра и осе стуба
δ_2	- угао између осе хидроцилиндра и осе полуге
M_{hc}	- укупна маса хидроцилиндра са вешајним подсклоповима
M_B	- концентрисана маса
M_D	- концентрисана маса
l_j	- дужина j -те секције зглобног манипулатора
A_j	- површина попречног пресека j -те секције зглобног манипулатора
m_j	- подужна маса j -те секције зглобног манипулатора
$Y_j(x_j)$	- функција померања j -те секције зглобног манипулатора
I_j	- аксијални момент инерције пресека j -те секције зглобног манипулатора
EI_j	- савојна крутост пресека j -те секције зглобног манипулатора
L	- укупна дужина зглобно везаних сегмената

N	- број елементарних делића при дискретизацији структуре
s	- корак дискретизације структуре
Y_i^f	- фиктивно померање i -тог чвора
l_0	- дужина опруге хидроцилиндра у недеформисаном стању
l_B	- растојање тачке В од краја стуба
l_D	- растојање тачке D од краја полуге
l	- дужина опруге хидроцилиндра у деформисаном стању
Δl	- промена дужине опруге (промена растојања крајњих тачака хидроцилиндра)
Δl_F	- парцијална промена дужине опруге код доње вешајне тачке
Δl_G	- парцијална промена дужине опруге код горње вешајне тачке
r_1	- коефицијент ексцентрицитета доње вешајне тачке
r_2	- коефицијент ексцентрицитета горње вешајне тачке
φ_B	- угао нагиба еластичне линије стуба код доње вешајне тачке
φ_D	- угао нагиба еластичне линије стуба код горње вешајне тачке
H, B, J, C, D, Q, P	- редни бројеви истоимених чворова у систему једначина
$B_1 \div B_{13}$	- кондезовани изрази
$\delta_1, \delta_2, \delta_3$	- релативне грешке природних фреквенција
l_1, l_2, l_3	- дужине сегмената телескопа
s_1, s_2	- конфигурационе координате телескопа (извученост сегмената)
L	- тренутни укупни дохват (дужина) телескопа
$A_I \div A_V$	- површине попречних пресека секција телескопа
$I_I \div I_V$	- аксијални моменти инерције попречних пресека секција телескопа
$L_1 \div L_5$	- дужине секција телескопа
$m_I \div m_V$	- подужне масе секција телескопа
A, B, C, D, F, G	- редни бројеви истоимених чворова у систему једначина
a, b	- бездимензиони коефицијенти крутости и маса прве и друге секције
c, d	- бездимензиони коефицијенти крутости и маса друге и треће секције
e, f	- бездимензиони коефицијенти крутости и маса треће и четврте секције
g, h	- бездимензиони коефицијенти крутости и маса четврте и пете секције
$B_1 \div B_5$	- кондезовани изрази