

УНИВЕРЗИТЕТ У БЕОГРАДУ

МАШИНСКИ ФАКУЛТЕТ

Немања Д. Зорић

**ДИНАМИЧКО ПОНАШАЊЕ ПАМЕТНИХ
ТАНКОВИДНИХ КОМПОЗИТНИХ СТРУКТУРА**

Докторска дисертација

Београд, 2013.

UNIVERSITY OF BELGRADE
FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

Nemanja D. Zorić

**DYNAMIC BEHAVIOR OF SMART
THIN-WALLED COMPOSITE STRUCTURES**

Doctoral Dissertation

Belgrade, 2013

ПОДАЦИ О МЕНТОРУ И ЧЛАНОВИМА КОМИСИЈЕ

Ментор: **др Зоран Митровић, редовни професор**
Универзитет у Београду, Машински факултет

Коментор: **др Александар Симоновић, ванредни професор**
Универзитет у Београду, Машински факултет

Чланови комисије: **др Михаило Лазаревић, редовни професор**
Универзитет у Београду, Машински факултет

др Никола Младеновић, редовни професор
Универзитет у Београду, Машински факултет

др Срђан Русов, редовни професор
Универзитет у Београду, Саобраћајни факултет

Датум одбране: _____ 2013.

Динамичко понашање паметних танкозидних композитних структура

Резиме

Ова докторска дисертација бави се оптимизацијом и активним пригушењем вибрација паметних танкозидних композитних структура помоћу пиезоелектричних актуатора и сензора. Развијен је математички модел плочасте композитне структуре са интегрисаним актуаторима и сензорима. Проблем је дефинисан методом коначних елемената базиране на теорији смицања трећег реда. Конститутивне једначине и веза између померања и деформација су линеарне. У даљем раду, представљен је проблем одређивања оптималних величина, положаја и оријентација актуатор – сензор парова, а затим су дефинисане функција циља и ограничења. Такође, извршена је синтеза методе коначних елемената и оптимизације ројем честица и применом дефинисаних критеријума оптимизације, извршена је оптимизација величине, положаја и оријентације пет актуатор-сензор парова на квадратним укљештеним композитним плочама са следећим конфигурацијама слојева: $(90^\circ/0^\circ/90^\circ/0^\circ)_s$, $(90^\circ/0^\circ/90^\circ/0^\circ/90^\circ/0^\circ/90^\circ/0^\circ)$ и $(45^\circ/-45^\circ/45^\circ/-45^\circ/45^\circ/-45^\circ/45^\circ/-45^\circ)$. Актуатори и сензори, који се разматрају у овој дисертацији, једнаких су димензија, исто су оријентисани и налазе се на супротним странама плоче: актуатор на горњој страни, а сензор на доњој страни плоче. Ради превазилажења проблема приликом синтезе конвенционалних управљачких алгоритама који се јављају услед стохастичне природе вибрација, представљен је оптимизовани самоподешавајући фази-логички управљачки систем. Главна идеја овог управљачког система је праћење амплитуде и самоподешавање улазних скалирајућих фактора на основу амплитуде. Функције припадности су параметризоване, а оптимална комбинација

параметара нађена је помоћу оптимизације ројем честица на основу дефинисаних критеријума оптимизације. Разматрана су два принципа закључивања: Мамдани принцип закључивања и Такаги-Сугено-Канг принцип закључивања нултог реда. Нумерички примери су дати за композитну конзолу и композитну укљештену плочу за слободне и принудне вибрације. За конзолу разматрана је једно-улазно-једно-излазна („Single input – single output“, „SISO“) конфигурација, а за плочу више-улазно-више-излазна („Multiple inputs – multiple outputs“, „MIMO“) конфигурација. Извршено је поређење перформанси приликом употребе различитих принципа фази закључивања, као и поређење оптимизованог самоподешавајућег фази-логичког управљачког система са линеарно-квадратним регулатором.

Кључне речи: паметне танкозидне композитне структуре, пиезоелектрични актуатори, активно пригушење вибрација, метода коначних елемената, модална анализа, оптимизација ројем честица, фази-логичко управљање, мамдани принцип закључивања, Такаги-Сугено-Канг принцип закључивања нултог реда

Научна област: Машинство

Ужа научна област: Механика

УДК: 534.28:66.017/.018:53:082.73(043.3)

Dynamic behavior of smart thin-walled composite structures

Abstract

This doctoral dissertation deals with optimization and active vibration suppression of smart thin-walled composite structures by using piezoelectric actuators and sensors. Mathematical model of plate composite structure with integrated actuators and sensors is developed. The problem is formulated using the finite element method based on the third order shear deformation theory. Constitutive equations and the strain - displacement relations are linear. In further work, the problem of determination of optimal sizes, positions and orientations of actuator – sensor pairs are presented and, after that, objective functions and constraints are defined. Also, the integration of finite element method and particle swarm optimization is performed and using defined optimization criteria, the optimization of sizes, positions and orientations of five actuator – sensor pairs on square cantilever composite is performed. The cantilever composite plates have following orientation of layers: $(90^\circ/0^\circ/90^\circ/0^\circ)_S$, $(90^\circ/0^\circ/90^\circ/0^\circ/90^\circ/0^\circ/90^\circ/0^\circ)$ и $(45^\circ/-45^\circ/45^\circ/-45^\circ/45^\circ/-45^\circ/45^\circ/-45^\circ)$. Actuators and sensors considered in dissertation are collocated. In order to overcome problems during conventional control algorithm synthesis which occur due to vibration's stochastic nature, the optimized self-tuning fuzzy logic controller is presented. The main idea of proposed controller is amplitude monitoring and self-tuning of input scaling factors based on amplitude. Membership functions are parameterized and optimal combination of parameters are found by using the particle swarm optimization method based on previously defined optimization criteria. Two inference methods are considered: the Mamdani and zero-order Takagi-Sugeno-Kang inference methods. Numerical studies are provided for composite cantilever beam and composite cantilever plate for both free

and forced vibrations. Single-input single-output (SISO) configuration is considered for the cantilever beam and multiple-input multiple-output (MIMO) configuration is considered for cantilever plate. Comparisons of control performances for these two types of inference methods as well as optimized self-tuning fuzzy logic controller with linear quadratic regulator are performed.

Key words: smart thin-walled composite structures, piezoelectric actuators, active vibration reduction, finite element method, modal analysis, particle swarm optimization, fuzzy logic control, Mamdani inference methods, zero-order Takagi-Sugeno-Kang inference method

Scientific discipline: Mechanical engineering

Scientific subdiscipline: Mechanics

UDC: 534.28:66.017/.018:53:082.73(043.3)

Номенклатура

a_e, b_e	Половина дужине и ширине елемента
a_i, b_i	Дужина и ширина актуатор-сензор (А-С) пара
$a_{i \min}, a_{i \max}$	Минимална и максимална дужина i -тог А-С пара
A_i, B_i, C_i	Лингвистичке вредности фази променљивих
$[A]$	Матрица система
$b_{i \min}, b_{i \max}$	Минимална и максимална ширина i -тог А-С пара
$[B]$	Матрица улаза
$[\hat{B}]$	Матрица поремећаја
$[C]$	Матрица крутости изражена у локалном координатном систему слоја
$[\bar{C}]$	Матрица крутости изражена у глобалном координатном систему плоче
$[C_d]$	Матрица структуралног пригушења
$[C_s]$	Матрица излаза са сензора
$\{d\}$	Улазни вектор поремећаја
$\{D\}$	Вектор диелектричних помераја
E, EC	Грешка и извод грешке по времену у фази скупу
$[e]$	Матрица пиезоелектричних константи изражена у локалном координатном систему плоче
$[\bar{e}]$	Матрица пиезоелектричних константи изражена у глобалном координатном систему плоче
$\{E\}$	Вектор електричног поља
$\{F_m\}$	Вектор спољашњих механичких сила
$\{F_m^e\}$	Вектор чворних спољашњих механичких сила
g_{best}	Најбољи глобални положај честице
G_{12}, G_{13}, G_{23}	Модул смицања материјала слоја
h	Специфична енталпија пиезоелектричног слоја
h_{pl}	Укупна дебљина плоче на месту посматраног попречног пресека
H	Електрична енталпија
J_e	Индекс перформанси
K_{act}	Излазни скалирајући фактор
$K_{act i}$	Максимални напон којим се може оптеретити i -ти актуатор
K_d	Скалирајући фактор помераја
K_v	Скалирајући фактор брзине

$[k]$	Матрица диелектричних константи изражена у локалном координатном систему плоче
$[\bar{k}]$	Матрица диелектричних константи изражена у глобалном координатном систему плоче
$[K_e]_A, [K_e]_S$	Глобалне диелектричне матрице крутости актуатора и сензора
$[K_e^e]$	Елементарна диелектрична матрица крутости
$[K_m]$	Глобална еластична матрица крутости
$[K_m^e]$	Елементарна еластична матрица крутости
$[K_{me}^e]$	Елементарна пиезоелектрична матрицу крутости
l_{best}	Најбољи локални положај честице
$[L_u]$	Матрица диференцијалних оператора
$[M]$	Глобална матрица маса
$[M^e]$	Елементарна матрица маса
n_p	Број пиезоелектричних слојева у једном елементу
n_{POP}	Број популације код оптимизације ројем честица
N_{ACT}	Број актуатора
N_C	Број модова којима се управља
N_j^0	Интерполационе Лагранжеве функције
N_j, N_j^x, N_j^y	Интерполационе Хермитске функције
N_R	Број фази правила
$[N_u]$	Матрица интерполационих константи
$[O]$	Матрица осмотривости
$rand_1, rand_2$	Случајни бројеви код оптимизације ројем честица
r_i	Параметри правила закључивања код Такаги-Сугено-Канг (ТСК) принципа нултог реда
$[S]$	Матрица управљивости
t_1	Време потребно за формирање глобалне еластичне матрице крутости и глобале матрице маса
t_2	Време потребно за формирање глобалне пиезоелектричне матрице крутости актуатора и сензора
t_3	Време потребно за формирање глобалне диелектричне матрице крутости актуатора и сензора
t_4	Време потребно за одређивање модалне матрице и сопствених фреквенција Рејли-Риц апроксимативном методом за првих 6 модова осциловања
T	Кинетичка енергија
U	Излаз из фази скупа
U_d	Дисипативна функција
u	Излаз из фази-логичког управљања
$\{u\}$	Вектор помераја тачака попречног пресека
$\{\dot{u}\}$	Вектор брзина одговарајућих тачака плоче
$\{u_e\}$	Вектор механичких чворних помераја

$\{u_g\}$	Вектор помераја тачака који припадају средњој равни
(u, v, w)	Вектор механичких помераја у правцима (x, y, z)
(u_0, v_0, w_0)	Механички помераји тачака на средњој површи
W	Рад извршен од стране спољашњих сила
W_e	Рад извршен од стране спољашњих електричних сила
W_m	Рад извршен од стране спољашњих механичких сила
$[w]$	Матрица излазних тежинских фактора
$[W_C]$	Грамијанова матрица управљивости
$[W_O]$	Грамијанова матрица осмотривости
x_i, y_i	Положај центра А/С пара у односу на координатни систем плоче
$\{X\}$	Вектор стања
Y_1, Y_2	Јангов модули еластичности материјала слоја
$\{Y_S\}$	Вектор излаза са сензора
α_i, β_i	Параметри функција припадности улаза
γ_i	Параметри функција припадности излаза код Мамдани принципа закључивања
ε	Толеранцију прекривености површине
$\{\varepsilon\}$	Вектор деформација
$\{\varepsilon_g\}$	Вектор генералисаних деформација
$\zeta^{(k)}$	Локална координата k -тог слоја
ζ_i	Коефицијент пригушења i -тог мода
$\ \eta\ $	L^2 норма вектора модалног померања
$\{\eta\}$	Вектор модалних координата
Θ	Угао између локалног координатног система слоја и глобалног координатног система плоче
Θ_i	Оријентација А-С пара
$[\Lambda]$	Модална матрица пригушења
ν_{12}, ν_{21}	Пуасонов коефицијенти материјала слоја
ξ, η	Осе локалног координатног система елемента
ρ	Густина слоја
$\{\sigma\}$	Вектор напона
$\varphi^{(k)}$	Електрични потенцијал k -тог слоја
$\varphi_{\text{Top}}^{(k)}, \varphi_{\text{Bot}}^{(k)}$	Електрични потенцијали на горњој и доњој површини k -тог слоја
$\{\varphi_e\}$	Вектор електричних потенцијала у једном елементу
$\phi^{(k)}$	Напон између површина k -тог слоја
$\{\phi\}_A, \{\phi\}_S$	Напони који се јављају на актуатору и сензору услед пиезоелектричног ефекта
$\{\phi\}_{AA}$	Спољни напон на актуатору
ψ_x	Ротација попречног пресека плоче око осе x
ψ_y	Ротација попречног пресека плоче око осе y

$[\Psi]$
 $[\omega^2]$

Модална матрица

Матрица квадрата сопствених фреквенција

Садржај

1	Увод	1
1.1	Основне напомене.....	1
1.2	Пиезоелектрични материјали као актуатори и сензори.....	3
1.3	Предмет истраживања и организација дисертације.....	5
2	Преглед литературе	10
2.1	Теорија пиезоелектричних материјала и њихова употреба у паметним структурама.....	10
2.2	Моделовање танкозидних структура.....	10
2.3	Оптимизација величине и/или положаја пиезоелектричних актуатора и сензора.....	12
2.4	Управљачки системи.....	13
3	Математичко моделовање паметних танкозидних композитних плоча	18
3.1	Увод.....	18
3.2	Кинематске једначине плоче.....	19
3.3	Конститутивне једначине.....	24
3.4	Варијациона формулација.....	28
3.5	Дискретизација методом коначних елемената.....	28
3.5.1	Дискретизација механичких помераја и деформација.....	29
3.5.2	Дискретизација електричног поља.....	32
3.5.3	Дискретизација кинетичке енергије.....	33
3.5.4	Дискретизација рада извршеног од стране спољашњих сила..	33
3.5.5	Дискретизација дисипативне функције.....	35
3.5.6	Спрегнуте једначине кретања.....	35
3.6	Једначине кретања у модалним координатама.....	36
3.7	Једначине кретања у простору стања.....	36

3.8	Основни модови осциловања танкозидних композитних плоча.....	37
4	Оптимизација величине, положаја и оријентација пиезоелектричних актуатор-сензор парова	42
4.1	Увод.....	42
4.2	Управљивост и осмотривост.....	43
4.3	Циљна функција и ограничења.....	45
4.4	Дискретизација плоче помоћу коначних елемената.....	46
4.5	Утицај оријентације актуаторског слоја на управљивост....	51
4.5.1	Композитна плоча – оријентација $(90^\circ/0^\circ/90^\circ/0^\circ)_s$	52
4.5.2	Композитна плоча – оријентација $(90^\circ/0^\circ/90^\circ/0^\circ/90^\circ/0^\circ/90^\circ/0^\circ)$	55
4.5.3	Композитна плоча – оријентација $(45^\circ/-45^\circ/45^\circ/-45^\circ/45^\circ/-45^\circ/45^\circ/-45^\circ)$	59
4.6	Оптимизација ројем честица.....	63
4.7	Оптимизација величине и положаја пиезоелектричних актуатор-сензор парова: нумерички део.....	64
4.7.1	Оријентација $(90^\circ/0^\circ/90^\circ/0^\circ)_s$	65
4.7.2	Оријентација $(90^\circ/0^\circ/90^\circ/0^\circ/90^\circ/0^\circ/90^\circ/0^\circ)$	70
4.7.3	Оријентација $(45^\circ/-45^\circ/45^\circ/-45^\circ/45^\circ/-45^\circ/45^\circ/-45^\circ)$	73
4.8	Закључак.....	75
5	Фази-логичко управљање	77
5.1	Увод.....	77
5.2	Дефинисање фази-логичког управљачког система.....	77
5.2.1	Фазификација.....	78
5.2.2	Дефинисање фази правила и принципа закључивања.....	79
5.3	Самоподешавајући фази-логичко управљачки систем.....	84
5.4	Критеријуми оптимизације.....	88
6	Активно пригушење вибрација композитне конзоле	91
6.1	Увод.....	91
6.2	Активно пригушење слободних вибрација.....	92

6.3	Активно пригушење принудних вибрација.....	113
6.3.1	Периодично оптерећење на слободном крају конзоле са фреквенцијом 20rad/s.....	113
6.3.2	Периодично оптерећење на слободном крају конзоле на резонантној фреквенцији.....	125
6.3.3	Периодично оптерећење са изненадним ударним импулсима.....	130
6.4	Закључак.....	134
7	Активно пригушење вибрација композитне плоче	135
7.1	Увод.....	135
7.2	Активно пригушење слободних вибрација.....	135
7.3	Активно пригушење принудних вибрација.....	144
7.3.1	Фреквенција принудног оптерећења 20rad/s.....	144
7.3.2	Фреквенција принудног оптерећења 150rad/s.....	160
7.3.3	Комбиновано оптерећење.....	168
7.3.4	Принудно оптерећење са изненадним ударима.....	168
7.4	Закључак.....	170
8	Закључак	171
8.1	Резултати истраживања.....	171
8.2	Научни доприноси дисертације.....	173
8.3	Препоруке за будући рад.....	174
	Литература	176
	Биографија	188

Глава 1

Увод

1.1 Основне напомене

Композитни материјали имају широку примену у разним областима, као што су ваздухопловство, свемирска, аутомобилска индустрија, војна индустрија, роботика, медицинско инжењерство, спортска опрема... Танкозидне композитне структуре састоје се од неколико различито оријентисаних слојева пројектованих тако да заједно дају жељене структуралне особине, као што су крутост, густина, затезна чврстоћа, отпорност на спољашње хемијске утицаје... Пројектоване структуралне особине зависе од врсте материјала слојева, дебљине и оријентације слојева.

Услед спољашњих утицаја, може доћи до вибрација структура. Нежељене вибрације могу довести до смањења перформанси саме структуре, смањења радног века структуре и ломова. Постоји више приступа за пригушење вибрација, од којих су два основна: пасивно и активно. Код пасивног пригушења вибрација, употребљавају се пасивни пригушивачи или материјали са израженом високом вискоеластичношћу. Главна идеја овог приступа је у томе да нема довођења енергије у систем. Мана овог приступа је та што долази до повећања масе структуре, а ефикасна је само код модова високих фреквенција, док код модова нижих фреквенција није погодан, а управо ти нижи модови су најкритичнији јер могу имати веће амплитуде. Код активног приступа, актуатори и сензори се интегришу у структуру, а сигнал са сензора одлази у рачунар, где се према задатом управљачком алгоритму, шаљу сигнали на актуатор. Структура са

интегрисаним актуаторима и сензорима и системом управљања назива се паметна или интелигентна струкутра.

Следећи приступ је активно/пасивни хибридни приступ. Код овог приступа, слично као код активног приступа, интегришу се актуатори и сензори, али не постоји управљачки систем. До пригушења вибрација долази услед међусобног повезивања отпорника, калема и константног извора напона у систем. Постоји и комбиновани приступ, где се комбинују активно пригушење и пасивно пригушење.

Као актуатори, код паметних структура, у општем случају, могу се користити пиезоелектрични материјали, легуре са ефектом памћења облика, диелектрични еластомери, електрореолошки флуиди, магнетореолошки материјали. За пригушење вибрација танкозидних композитних структура најчешће се употребљавају пиезоелектрични материјали због мале масе, ниске цене, једноставности употребе и могућности примене на широки опсег фреквенција.

Перформансе паметних структура зависе, како од положаја и величина актуатора и сензора, тако и од изабраног управљачког система. Стога, три главне фазе у конструисању паметних структура су: одабир концепције, избор оптималних величина и положаја актуатора и сензора и синтеза управљачког система. За оптимизацију положаја и/или величина актуатора и сензора најчешће се користе, због комплексности проблема, хеуристичне методе оптимизације, као што су генетски алгоритам („Genetic Algorithm“, „GA“), оптимизација помоћу роја честица („Particle Swarm Optimization“, „PSO“), симулација каљењем („Simulated Annealing“, „SA“). Од управљачких система могу се користити разни алгоритми, почевши од класичних управљачких система као што су директна пропорционална повратна спрега („Direct proportional feedback“), повратна спрега по брзини („Constant gain velocity feedback“), оптималних, као што су Линеарно-квadratни регулатор („Linear-quadratic regulator“, „LQR“) и Линеарно-квadratни Гаузијан („Linear-quadratic Gaussian“, „LQG“), адаптивних, робусних па све до управљачких алгоритама базираних на методама фази-логике и неуронских мрежа.

1.2 Пиезоелектрични материјали као актуатори и сензори

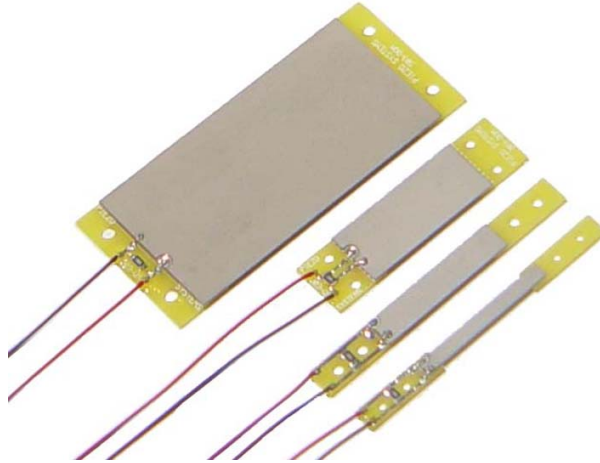
Пиезоелектрицитет је својство одређених врста кристалних материјала која се јавља када на њих делује механичка сила. Услед деформације која се јавља под дејством силе, ови материјали генеришу наелектрисања на својим површинама. Овај ефекат се назива директни пиезоелектрични ефекат. Са друге стране, ако се ови материјали изложе дејству електричног поља, долази до њихове деформације. Ова појава назива се инверзни пиезоелектрични ефекат. Пиезоелектрични ефекат су открили Пјер и Пол Кири 1880. године.

Због наведених способности, пиезоелектрични материјали могу се користити као сензори и актуатори. Ако се пиезоелектрични материјал интегрише у структуру, може се измерити деформација структуре помоћу напона који се јавља између површина захваљујући директном пиезоелектричним ефекту. Са друге стране, ако се на пиезоелектрични материјал делује електричним пољем, услед његове деформације доћи ће до деформације базичне структуре.

Пиезоелектрични ефекат у природним кристалима је слаб, тако да се у многим савременим применама користи поливинилиден флуорид („PVDF“), полукристални полимер и олово-цирконат-титанат („PZT“), пиезоелектрични керамички материјал. Олово-цирконат-титанат има веће пиезоелектричне коефицијенте у односу на поливинилиден флуорид, тако да може произвести веће силе и деформације, што га чини подесним за актуатор, а такође се може користити и као сензор. Са друге стране, олово-цирконат-титанат је крући у односу на поливинилиден флуорид, има већу масу и цену. Поливинилиден флуорид има одличне сензорске карактеристике, па се најчешће користе као сензор.

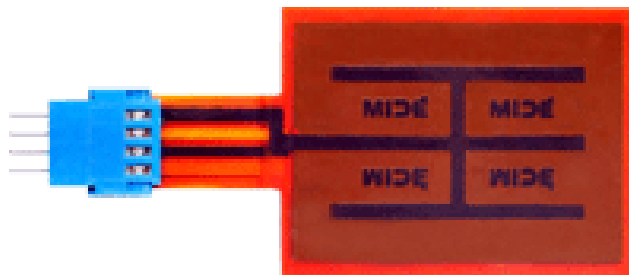
Код танкозидних структура користе се актуатори и сензори у облику плоче мале дебљине (до 1mm). Оса поларизације најчешће је управна на површину актуатора и сензора, а дејством електричног поља по дебљини, долази до деформације у равни актуатора. Са друге стране, деформацијом сензора у његовој равни, индукује се електрично поље дуж дебљине. Због тога, горња и доња страна пиезоелектричног актуатора су обложене електродама. На слици 1.1 приказан је

један такав актуатор, односно сензор, чији је произвођач америчка компанија „Piezo System INC.“



Слика 1.1. Пиезоелектрични актуатори и сензори произвођача „Piezo System INC.“.

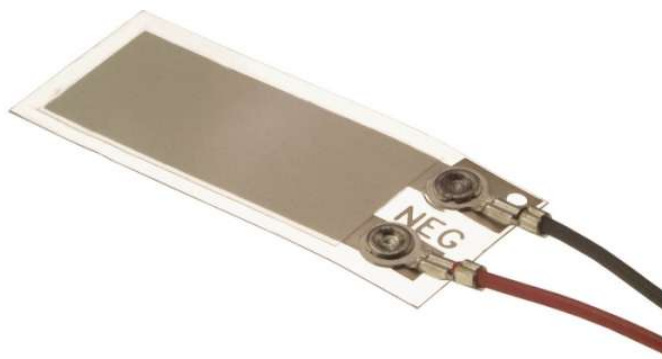
Влакна од олово-цирконат-титаната могу се сместити у полимерну матрицу, чиме се добија влакнасто-ојачани актуатор, односно сензор. Предност ових актуатора је у томе што имају мању масу и крутост, а такође деформација је доминантна само у правцу пружања влакана. Примери ових актуатора (сензора) дати су на слици 1.2 (произвођач „Mide“) и на слици 1.3 (произвођач „Smart Material“). Сензори се добијају тако што се танак филм поливинилиден флуорида смести између две електроде. На слици 1.4 приказан је сензор од поливинилиден флуорида произвођача „Measurement specialties“.



Слика 1.2. Влакнасто-ојачани пиезоелектрични актуатор (сензор) произвођача „Mide“



Слика 1.3. Влакнасто-ојачани пиезоелектрични актуатор (сензор) произвођача „Smart Material“



Слика 1.4. Сензор од поливинилиден флуорида произвођача „Measurement specialties“

1.3 Предмет истраживања и организација дисертације

Полазећи од чињенице да су најважнији кораци приликом конструисања паметне структуре одабир величине и положаја актуатора и сензора и управљачког алгорита, предмет истраживања ове докторске дисертације је активно пригушење вибрација паметних танкозидних композитних структура, почевши од оптимизације величине, положаја и оријентација актуатор-сензор парова, па до развијања и оптимизације управљачког алгорита.

Имајући у виду специфичну проблематику структуралне анализе композитних структура ваздухоплова [1], у оквиру ове дисертације разматрана је проблематика везана за типичне елементе танкозидних структура: ламиниране композитне греде правоугаоног попречног пресека и ламиниране композитне плоче.

Први корак је развијање математичког модела композитне струкутре са интегрисаним пиезоелектричним актуаторима и сензорима, као и дефинисање

проблема помоћу методе коначних елемената како би се извршила оптимизација димензија, положаја и оријентације актуатор-сензор парова. Актуатори и сензори, који се разматрају у овој дисертацији, једнаких су димензија, исто су оријентисани и налазе се на супротним странама плоче: актуатор на горњој страни, а сензор на доњој страни плоче. Са обзиром да особине композитних структура зависе од конфигурација слојева, потребно је испитати утицај оријентације и положаја (на горњој или доњој страни плоче) актуатора на управљивост вибрација танкозидних композитних плоча за различите конфигурације оријентација слојева. Да би се повећале перформансе у погледу активног пригушења вибрација, величине, положаје и оријентације пиезоелектричних актуатора потребно је оптимизовати. Због тога је потребно развити алгоритам за оптимизацију величине, положаја и оријентације актуатор-сензор парова са аспекта ефикаснијег пригушења вибрација који је базиран на синтези оптимизације ројем честица и методе коначних елемената.

С обзиром на проблеме који се јављају приликом синтезе конвенционалних управљачких алгоритама због стохастичне природе вибрација, следећи предмет истраживања је развој управљачког алгорита базираног на фази-логичком управљању како би се ови проблеми превазишли. Потребно је извршити поређење перформанси различитих принципа закључивања (Мамдани и Такаги-Сугено-Канг принцип нултог реда), као и поређење перформанси добијених применом линеарно-квадратног регулатора за различите случајеве вибрација.

Ова докторска дисертација је организована на следећи начин:

Глава 2: Преглед литературе

У овој глави извршен је преглед литературе везане за паметне танкозидне структуре и активно управљање вибрацијама применом пиезоелектричних актуатора и сензора. Глава је подељена на четири поглавља, где је наведена литература која разматра теорију пиезоелектричних материјала и њихову употребу у паметним структурама, моделовање паметних танкозидних композитних структура, оптимизацију величине и / или положаја пиезоелектричних актуатора и сензора и управљачке системе.

Глава 3: Математичко моделовање паметних танкозидних композитних плоча

У овој глави извршено је математичко моделовање танкозидних композитних плоча са интегрисаним актуаторима и сензорима помоћу теорије смицања трећег реда. Добијене једначине кретања су дискретизоване помоћу методе коначних елемената, да би се, затим, трансформисале у модални простор и простор стања. Помоћу добијених дискретизованих једначина одређене су фреквенције и приказани су првих шест модова осциловања за три случаја конфигурације слојева $((90^\circ/0^\circ/90^\circ/0^\circ)_s, (90^\circ/0^\circ/90^\circ/0^\circ/90^\circ/0^\circ/90^\circ/0^\circ), (45^\circ/-45^\circ/45^\circ/-45^\circ/45^\circ/-45^\circ/45^\circ/-45^\circ))$ код укљештених композитних квадратних плоча.

Глава 4: Оптимизација величине, положаја и оријентација пиезоелектричних актуатор-сензор парова

У овој глави описани су управљивост и осмотривост вибрација и представљени су циљна функција и ограничења која се тичу наведене оптимизације. Показан је утицај оријентације и положаја актуаторских слојева на управљивост вибрација наведених композитних плоча. У том случају је узето да актуаторски слој прекрива целу површину плоче, сензорски слој је постављен на супротној страни од актуаторског. Положај актуаторског слоја је дефинисан у смислу да ли се налази на горњој или доњој страни плоче.

Након тога извршена је синтеза методе коначних елемената и оптимизације ројем честица. Применом дефинисаних критеријума оптимизације, извршена је оптимизација величине, положаја и оријентације пет актуатор-сензор парова.

Глава 5: Фази-логичко управљање

У овој глави представљена је идеја фази-логичког управљања, дефинисане су улазне и излазне величине за случај активног пригушења вибрација, приказани су Мамдани и Такаги-Сугено-Канг принцип закључивања и извршена је параметризација функција припадности и правила закључивања. Након тога

представљен је самоподешавајући фази-логички управљачки систем који је развијен у оквиру ове дисертације, који има за циљ превазилажење проблема који се јављају услед стохастичне природе вибрација. Такође, представљен је начин одређивања параметара функција припадности и правила закључивања помоћу оптимизације ројем честица.

Глава 6: Активно пригушење вибрација композитне конзоле

У овој глави спроведена је нумеричка студија, где су испитане перформансе оптимизованог самоподешавајућег фази-логичког управљачког система приказаног у глави 5, са аспекта активног пригушења вибрација. Као модел, узета је симетрична композитна конзола са оријентацијом слојева $(90^\circ/0^\circ/90^\circ/0^\circ)_S$. Разматрана је тзв. једно-улазно-једно-излазна („SISO“) конфигурација, тј. за пригушење вибрација коришћен је један актуатор (који је том приликом смештен у корену конзоле), а сматрало се да се током вибрација јавља само први мод осциловања. Извршено је поређење перформанси оптимизованог самоподешавајућег фази-логичког управљачког система, фази-логичког управљачког система без подешавања скалирајућих фактора, линеарно-квadratног регулатора, као и поређење Мамдани и Такаги-Сугено-Канг принципа закључивања код оптимизованог самоподешавајућег фази-логичког управљачког система. Поређење је извршено за различита оптерећења, као и за случајеве слободних и принудних вибрација.

Глава 7: Активно пригушење вибрација композитне плоче

У овој глави спроведено је нумеричко испитивање као и у глави 6, али овог пута на укљештеној композитној плочи са оријентацијом слојева $(90^\circ/0^\circ/90^\circ/0^\circ)_S$ и конфигурацијом пиезоелектричних актуатор-сензор парова добијеним оптимизацијом у глави 4 за више-улазно-више-излазну („MIMO“) конфигурацију.

Глава 8: Закључак

У овој глави сумарно су приказани резултати истраживања и научни доприноси дисертације. Такође, дате су неке препоруке за будућа истраживања из ове области.

Глава 2

Преглед литературе

2.1 Теорија пиезоелектричних материјала и њихова употреба у паметним структурама

У књизи [2] приказане је линеарна теорија пиезоелектричних танкозидних плоча и љуски, а у књизи [3] приказане су и линеарна и нелинеарна теорија пиезоелектричних материјала.

Прва анализа примене пиезоелектричних материјала за пригушење вибрација приказана је у раду [4]. Употреба пиезоелектричних материјала у различитим концептима паметних структура приказана је у литератури [5 - 9].

2.2 Моделовање танкозидних композитних структура

Да би се дошло до коначних једначина кретања који описују структуру са интегрисаним пиезоелектричним сензорима и актуаторима, структуру је потребно математички моделовати, где се уводе одређене претпоставке о напонима и деформацијама. Добијене једначине могу се, у специјалним случајевима решити аналитички, али се због комплексности проблема, све чешће решавају нумеричким методама, као што је метода коначних елемената. Постоји неколико техника моделовања паметних структура, а најраспрострањеније су тродимензионална (3-Д) теорија, теорија еквивалентног једнослојног модела и теорија дискретних слојева. Наведене теорије могу се применити на греде, плоче и љуске, како у линеарној анализи, тако и у нелинеарној анализи вибрација.

3-Д теорија најчешће се користи за моделовање структура, а такође је применљива и на танкозидне композитне структуре. Ова теорија употребљена је за моделовање паметних структура, у радовима [10 - 17]. 3-Д теорија пружа најтачније решење зато што нема потребе за увођењем претпоставки о напонима и деформацијама, али добијене једначине је немогуће решити аналитички и мора се прибећи нумеричким методама, као што је метода коначних елемената. Дискретизацијом добијених једначина применом методе коначних елемената, добија се велики број генералисаних променљивих, што знатно отежава прорачун.

Теорија еквивалентног једнослојног модела користи се за моделовање танкозидних композитних структура, а базирана је на дводимензионалној теорији. Дводимензионална теорија је изведена из тродимензионалне, тако што се, искључиво у случају танкозидних структура, уведе претпоставка равног стања напона, тј. занемари се нормални напон у правцу дебљине, чиме се једначине кретања знатно поједностављују. Теорија еквивалентног једнослојног модела подразумева да се користи исто поље померања за све слојеве танкозидне композитне структуре. Најједноставније теорије еквивалентног једнослојног модела су класична ламинатна теорија („Classical laminated plate theory“, „CLPT“) и теорија смицања првог реда („First-order shear deformation theory“, „FSDT“).

Класична ламинатна теорија за линеарну анализу вибрација паметне композитне плоче употребљена је у раду [18], а за линеарну анализу вибрације плоче и греде у раду [19]. Ову теорију су за анализу нелинеарних вибрација паметне композитне греде користили су истраживачи у радовима [20, 21].

У радовима [22 - 26] коришћена је теорија смицања првог реда за анализу линеарних вибрација греда, плоча и љуски, док су нелинеарни модели разматрани у радовима [27-30].

Ове две теорије адекватно описују кинематику деформација већине танкозидних композитних структура. Међутим, за тачније описивање расподеле интерламинарних напона потребно је користити теорије вишег реда. Теорија смицања трећег реда („Third-order deformation theory“, „TSDT“) представљена је у раду [31], где је за извођење једначина кретања композитних структура, базираних на овој теорији, употребљен принцип виртуелних померања. Теорија смицања трећег реда боље описује кретање тачака попречних пресека у односу на

претходне две теорије, а самим тим и боље представља интерламинарне напоне. Ову теорију, било за греде, плоче или љуске, било за линеарне или нелинеарне случајеве, разматрали су истраживачи у радовима [32 - 45].

Теорија дискретних слојева је развијена под претпоставком да постоји само C^0 континуитет поља помераја дуж дебљине, тј. компоненте помераја дуж дебљине су непрекидне, али први извод може да има прекид и то на граници између два слоја. Теорија дискретних слојева пружа много тачнију апроксимацију од теорије еквивалентног једнослојног модела јер представља компромис између теорије еквивалентног једнослојног модела и 3-Д теорије. Код ове теорије сваки слој поседује своје променљиве, тако да велики броја слојева отежава прорачун, али опет, за моделовање користи се мање променљивих него код 3-Д теорије. За моделовање сваког слоја посебно, могу се користити класична теорија или теорије првог и вишег реда. Теорија дискретних слојева разматрана је у литератури [46 – 53].

2.3 Оптимизација величине и/или положаја пиезоелектричних актуатора и сензора

Приликом одређивања оптималног положаја и / или величине пиезоелектричних актуатора могу се разграничити два приступа. Код првог приступа, оптималне величине се одређују независно од управљачког система, а други приступ се састоји од комбинације оптимизације положаја и / или величине сензора и актуатора и параметара управљачког система. Опширан преглед критеријума оптимизације дат је у [54], а у [55] приказан је преглед проблема оптимизације паметних структура до 2001. године.

Што се тиче првог приступа, као меру ефикасности актуатора код активног пригушења вибрација може се користити индекс управљивости који је представљен у [56]. Што је овај индекс већи, то је актуатор ефикаснији и биће мања сила потребна за пригушење вибрација. У литератури [57, 58] овај индекс је употребљен за одређивање оптималног положаја неколико актуатора на композитним плочама и љускама користећи генетски алгоритам. Аутори у радовима [59, 60] извршили су оптимизацију положаја и величине пиезоелектричних актуатора са циљем повећања овог индекса уз што мању

промену сопствених фреквенција ротирајућих алуминијумских греда. Грамијанове матрице за оптимално постављање пиезоелектричних актуатора и сензора први пут су употребљени у [61]. Касније, ове матрице користе се у радовима [62 – 64], где је извршена оптимизација положаја актуатора и / или сензора применом генетског алгоритма. У [45], Грамијанове матрице су коришћене за оптимизацију димензија и положаја актуатор-сензор парова на композитним гредама применом оптимизације ројем честица и фази вишециљне оптимизације. Аутори у раду [65] поредили су добијене резултате у случајевима индекса управљивости и грамијанових матрица. У раду [66] приказано је постављање актуатора уз максимизацију модалног електромеханичког спрезања, а [67] представља оптимално постављање актуатора на основу карактеристика амплитуда. Истраживачи у својим радовима [68 – 72] користе H_2 норму за оптимално постављање пиезоелектричних сензора и актуатора.

Аутори радова [73 - 75] користе квадратну тежинску функцију која узима у обзир енергију управљања за оптимално постављање актуатора. Метода максимизације дисипативне енергије током управљања за оптимално постављање и / или димензионисање актуатора употребљена је у [76 – 78]. У радовима [74 – 76, 78] оптимизација је извршена помоћу генетског алгоритма. Истовремена синтеза H_∞ управљања и оптимизација положаја сензора и актуатора приказана је у [79]. Просторна H_2 норма преносне матрице је употребљена као оптимизациони индекс у раду [80].

2.4 Управљачки системи

Прегледи управљачких система који су коришћени за контролу вибрација паметних структура приказани су у [81, 82]. Управљачки системи се могу поделити на конвенционалне, робусне и адаптивне и управљачке системе базиране на неуронским мрежама и фази логици.

Од конвенционалних управљачких система, како за управљање линеарним тако и нелинеарним вибрацијама, најчешће се користи повратна спрега по брзини [19, 22, 27, 32, 35, 38, 76 - 78, 83 - 91]. Овај управљачки систем је једноставан, не захтева рачунар, али сензори и актуатори морају бити на истом месту на структури да би управљање било стабилно. Линеарно-квadratне регулаторе

(„LQR“ и „LQG“ повратне спреге по стању) за пригушење вибрација анализирали су истраживачи у радовима [45, 49, 57, 58, 92 - 97]. Код овог управљачког система, актуатори и сензори не морају бити на истом месту на структури, али све величине стања морају бити познате. Тиме се намеће још један проблем, а то је синтеза опсервера стања. Као опсервери стања најчешће се користи Калманов филтер и Луенбергеров опсервер. У [49] извршено је поређење потребне енергије за пригушење вибрација за различите типове слагања композитних слојева композитне конзоле. Поређење повратне спреге по брзини и линеарно-квадратног регулатора за пригушење вибрација танкозидних композитних структура у облику греде и плоче извршено је у [52, 53]. Аутори ових радова дошли су до закључка да код антисиметричних композита, због истезно-савојне спреге, у случају примене повратне спреге по брзини, актуатори и сензори морају бити на истом месту на структури да би управљање било стабилно. Линеарно квадратни регулатор се показао бољим у односу на повратну спрегу по брзини са становишта смањења амплитуде вибрација и времена смирења. У радовима [74, 75] извршено је поређење директне пропорционалне спреге, повратне спреге по брзини и линеарно-квадратног регулатора за алуминијумску плочу, односно греду. Ови аутори су дошли до закључка да је директна пропорционална спрега неупотребљива за пригушење вибрација, а да линеарно-квартни регулатор показује боље перформансе у односу на повратну спрегу по брзини. Истраживачи у раду [24] поредили су повратну спрегу по брзини, њапуновљеву повратну спрегу и линеарно-квадратни регулатор. У раду [20] коришћено је пропорционално-диференцијално управљање, а у [98] пропорционално-диференцијалног-интегрално управљање. Повратна спрегу по померању и убрзању, за пригушење флатера греде у суперсоничном струјном пољу, употребљена је у [99]. Аутори рада [100] вршили експериментално поређење позитивне повратне спреге по позицији, пропорционално-интегрално-диференцијалног управљања, линеарно-квадратног регулатора и нелинеарног управљања, као и хибридную верзију сваког од наведених управљачких система добијених имплементацијом „Bang-bang“ алгоритма управљања за пригушење вибрација алуминијумске конзоле. Експериментом је утврђено да долази до

знатног смањења потребне енергије уколико се имплементира „Bang-bang“ алгоритам.

Услед стохастичне природе вибрација, промена особина структуре током експлоатације као и буке са сензора услед спољашњих утицаја, претходни управљачки системи нису се показали применљивим у реалним апликацијама. Због тога неки истраживачи прибегавају робусним и адаптивним управљачким системима.

H_∞ робусно управљање представљено је у [101] за активно пригушење вибрација алуминијумског панела. H_∞ децентрализовано робусно управљање коришћено је за активно пригушење вибрација композитног панела [72], као и за активно пригушење вибрација соларног панела [102]. У [103] упоређено је H_2 робусно управљање и пропорционално-диференцијално управљање за активно пригушење нелинеарних вибрација и смањење термалних деформација композитних љуски. Аутори су дошли до закључка да H_2 робусно управљање даје боље резултате у погледу активног пригушења вибрација, али није погодан за смањивање статичких деформација изазваних топлотним дилатацијама. Управљање у клизном режиму употребљено је за активно пригушење нелинеарних вибрација ротирајуће греде [104] и за активно пригушење вибрација камере беспилотне летелице [105]. Адаптивно управљање за активно пригушење вибрација танкозидних структура употребљено је у [63, 106].

Због динамичке комплексности флексибилних структура, данас се све чешће употребљавају управљачки системи базирани на фази логици и неуронским мрежама. У раду [107] извршено је истраживање моделовања и управљачких система базираних на фази логици и неуронским мрежама на примеру алуминијумске плоче. Самоорганизујуће фази-логичко управљање приказано је у [108] где је, такође, извршен експеримент са челичном конзолом. У раду [109] представљено је декомпоновано паралелено фази-логичко управљање вибрацијама плоче. Идеја овог управљања је та што се велики систем разложи на мање паралелне системе, чиме се смањује број фази правила. У овом раду је такође приказан експеримент. Активно пригушење вибрација употребом адаптивних мрежа и хиерархијског фази-логичког управљања приказано је у раду [110]. У раду [111] експериментално је представљено резонантно фази-логичко

управљање које је упоређено са пропорционално-диференцијалним управљањем. Истраживачи су у раду [112] експериментално истраживали примену фази-логичког управљања за активно пригушење вибрација композитне конзоле са два актуатор-сензор пара. Експеримент је извршен за принудне вибрације греде изазване периодичном побудом константне фреквенције и за слободне вибрације које настају деловањем ударног импулса. Резултати су показали робусне карактеристике фази-логичког управљања. Модално фази-логичко управљање вибрација челичне плоче приказано је у [113]. Приликом синтезе фази-логичког управљачког система, један од главних проблема је одређивање параметара везаних за функције припадности улаза и излаза. У радовима [114-116] функције припадности оптимизоване су применом оптимизације ројем честица. Оптимизовано самоподешавајуће фази-логичко управљање приказано је у [117], где су функције припадности оптимизоване применом оптимизације ројем честица, а улазни скалирајући фактори мењају се током активног пригушења вибрација. Поређење фази-логичког управљања и пропорционално-интегрално-диференцијалног управљања представљено је у [118], где се дошло до закључка да фази-логичко управљање има боље перформансе у односу на пропорционално-интегрално-диференцијално управљање. У раду [119] експериментално је представљена комбинација фази-логичког и пропорционално-интегралног управљања за пригушење вибрација флексибилног манипулатора. Сама идеја ове комбинације је да је у присуству вибрација великих амплитуда активно фази-логичко управљање, а када се амплитуде спусте испод одређене границе, искључује се фази-логичко, а активира се пропорционално-интегрално управљање. Такође, у овом раду су испитани и утицаји различитих функција припадности на активно пригушење вибрација. Неуро-адаптивно управљање вибрација композитне греде приказано је у [120]. Експериментално је истраживана промена сопствених фреквенција греде и карактеристике неуро-адаптивног управљања у случају деламинације слојева. У раду [121] представљено је самоадаптивно управљање вибрацијама композитне греде. Хибридни систем се састоји од динамичке дијагоналне рекурентне неуронске мреже и адаптивне неуронске мреже са простирањем унапред. У раду [122] експериментално је, на примеру “L” конзоле, истражено адаптивно управљање

применом неуронских мрежа, где се трениране неуронске мреже користе за промену одређених параметара алгоритма управљања и опсервера.

Глава 3

Математичко моделовање паметних танкозидних композитних плоча

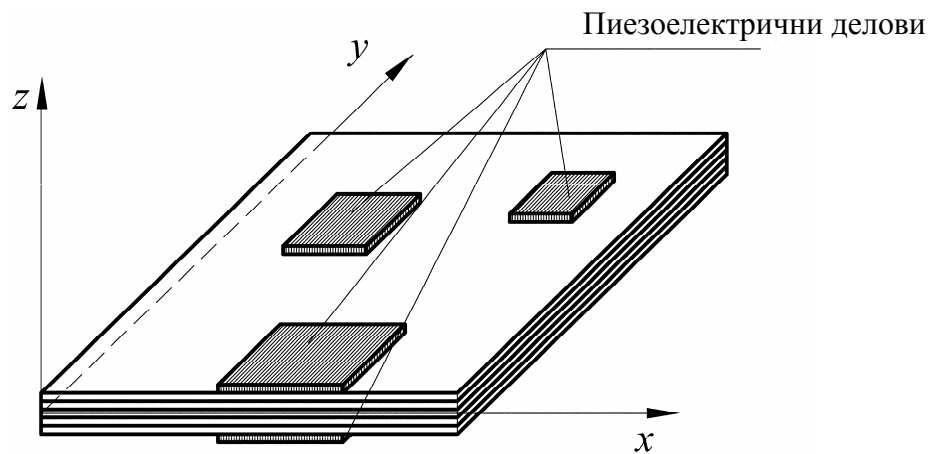
3.1 Увод

У овој глави биће дефинисане динамичке једначине кретања композитне плоче са интегрисаним пиезоелектричном деловима на горњој и доњој површини. Танкозидна композитна плоча моделована је уз помоћ еквивалентног једнослојног модела. Кинематске једначине изводе се на основу теорије смицања трећег реда. Ова теорија је базирана на истим претпоставкама као и класична теорија и теорије првог реда, осим за претпоставку да попречни пресек после деформације остаје права линија. Код теорије смицања трећег реда претпоставља се да је попречни пресек после деформације крива трећег степена. Везе између померања и деформација су линеарне.

Полазећи од специфичне енталпије, динамичке једначине изводе се на основу Хамилтоновог принципа. Употребом методе коначних елемената, једначине се дискретизују, тако да се од система са бесконачно много степени слободе, добија систем са коначним бројем степени слободе. Даље, добијене динамичке једначине се преводе у простор модалних координата, а затим у форму једначина стања.

3.2 Кинематске једначине плоче

На слици 3.1 приказана је композитна плоча са интегрисаним пиезоелектричним деловима на горњој и доњој површини. За еластичне и пиезоелектричне слојеве уводи се претпоставка да су танки, тако да се може применити равно стање напона. Координатни систем постављен је тако да се раван $x - y$ поклапа са средњом површи плоче, а оса z је дефинисана правилом десне руке.



Слика 3.1. Композитна плоча са пиезоелектричним деловима на горњој и доњој површини

Поље померања плоче, према теорији смицања трећег реда [31, 123], може се изразити на следећи начин:

$$\begin{aligned} u(x, y, z, t) &= u_0(x, t) + z\psi_x(x, t) - \frac{4}{3h_{pl}^2} z^3 \left(\psi_x + \frac{\partial w_0}{\partial x} \right) \\ v(x, y, z, t) &= v_0(x, t) + z\psi_y(x, t) - \frac{4}{3h_{pl}^2} z^3 \left(\psi_y + \frac{\partial w_0}{\partial y} \right) \\ w(x, z, t) &= w_0(x, t) \end{aligned} \quad (3.1)$$

где је t време, а (u, v, w) су механички помераји тачака попречног пресека у (x, y, z) правцима, (u_0, v_0, w_0) су механички помераји тачака на средњој површи, ψ_x и ψ_y су ротације попречног пресека око оса x и y а h_{pl} је укупна дебљина плоче на месту посматраног попречног пресека. Једначина (3.1) може се записати у матричној форми на следећи начин:

$$\{u\} = [A_u] \{u_g\}, \quad (3.2)$$

где

$$\{u\} = \begin{Bmatrix} u \\ v \\ w \end{Bmatrix} \quad (3.3)$$

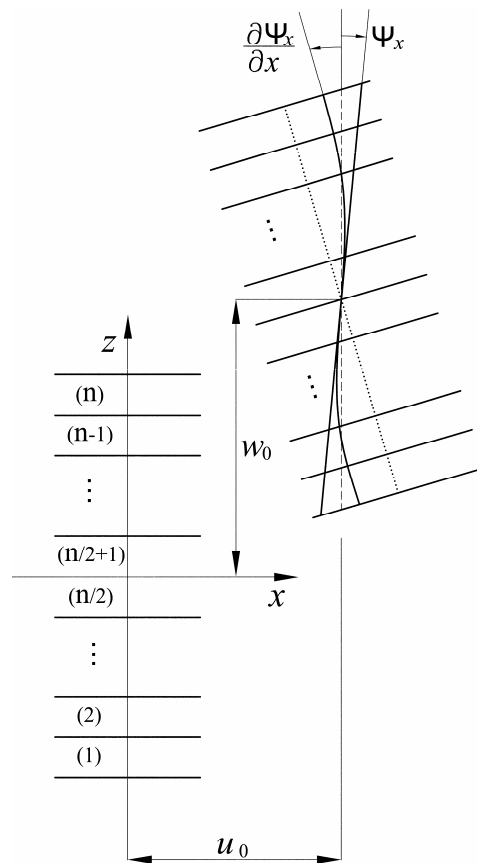
представља вектор механичког помераја тачака попречног пресека,

$$\{u_g\} = \begin{Bmatrix} u_0 \\ v_0 \\ w_0 \\ \phi_x \\ \phi_y \end{Bmatrix} \quad (3.4)$$

представља вектор помераја тачака које припадају средњој равни, а матрица $[A_u]$ је представљена на следећи начин:

$$[A_u] = \begin{bmatrix} 1 & 0 & -\frac{4}{3h_{pl}^2} z^3 \frac{\partial}{\partial x} & z - \frac{4}{3h_{pl}^2} z^3 & 0 \\ 0 & 1 & -\frac{4}{3h_{pl}^2} z^3 \frac{\partial}{\partial y} & 0 & z - \frac{4}{3h_{pl}^2} z^3 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \end{bmatrix}. \quad (3.5)$$

Попречни пресек плоче пре и после деформације приказан је на слици 3.2.



Слика 3.2. Попречни пресека плоче пре и после деформације

Деформације попречног пресека дуж осе z дате су следећим изразом:

$$\begin{Bmatrix} \varepsilon_{xx} \\ \varepsilon_{yy} \\ \gamma_{yz} \\ \gamma_{xz} \\ \gamma_{xy} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \varepsilon_{xx}^0 \\ \varepsilon_{yy}^0 \\ \gamma_{yz}^0 \\ \gamma_{xz}^0 \\ \gamma_{xy}^0 \end{Bmatrix} + z \begin{Bmatrix} \varepsilon_{xx}^1 \\ \varepsilon_{yy}^1 \\ \gamma_{yz}^1 \\ \gamma_{xz}^1 \\ \gamma_{xy}^1 \end{Bmatrix} - \frac{1}{3h_{pl}^2} z^2 \begin{Bmatrix} \varepsilon_{xx}^2 \\ \varepsilon_{yy}^2 \\ \gamma_{yz}^2 \\ \gamma_{xz}^2 \\ \gamma_{xy}^2 \end{Bmatrix} - \frac{4}{3h_{pl}^2} z^3 \begin{Bmatrix} \varepsilon_{xx}^3 \\ \varepsilon_{yy}^3 \\ \gamma_{yz}^3 \\ \gamma_{xz}^3 \\ \gamma_{xy}^3 \end{Bmatrix}, \quad (3.6)$$

где се генерализане деформације попречног пресека дуж осе z могу приказати преко следећих релација:

$$\begin{Bmatrix} \varepsilon_{xx}^0 \\ \varepsilon_{yy}^0 \\ \gamma_{yz}^0 \\ \gamma_{xz}^0 \\ \gamma_{xy}^0 \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \frac{\partial u_0}{\partial x} \\ \frac{\partial v_0}{\partial y} \\ \phi_y + \frac{\partial w_0}{\partial y} \\ \phi_x + \frac{\partial w_0}{\partial x} \\ \frac{\partial u_0}{\partial y} + \frac{\partial v_0}{\partial x} \end{Bmatrix}, \quad (3.7)$$

$$\begin{Bmatrix} \varepsilon_{xx}^1 \\ \varepsilon_{yy}^1 \\ \gamma_{yz}^1 \\ \gamma_{xz}^1 \\ \gamma_{xy}^1 \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \frac{\partial \phi_x}{\partial x} \\ \frac{\partial \phi_y}{\partial y} \\ 0 \\ 0 \\ \frac{\partial \phi_x}{\partial y} + \frac{\partial \phi_y}{\partial x} \end{Bmatrix}, \quad (3.8)$$

$$\begin{Bmatrix} \varepsilon_{xx}^2 \\ \varepsilon_{yy}^2 \\ \gamma_{yz}^2 \\ \gamma_{xz}^2 \\ \gamma_{xy}^2 \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} 0 \\ 0 \\ \phi_y + \frac{\partial w_0}{\partial y} \\ \phi_x + \frac{\partial w_0}{\partial x} \\ 0 \end{Bmatrix}, \quad (3.9)$$

$$\begin{Bmatrix} \varepsilon_{xx}^3 \\ \varepsilon_{yy}^3 \\ \gamma_{yz}^3 \\ \gamma_{xz}^3 \\ \gamma_{xy}^3 \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \frac{\partial \phi_x}{\partial x} + \frac{\partial^2 w_0}{\partial x^2} \\ \frac{\partial \phi_y}{\partial y} + \frac{\partial^2 w_0}{\partial y^2} \\ 0 \\ 0 \\ \frac{\partial \phi_x}{\partial y} + \frac{\partial \phi_y}{\partial x} + 2 \frac{\partial^2 w_0}{\partial x \partial y} \end{Bmatrix}. \quad (3.10)$$

Једначина (3.6) може се записати у матричној форми, на следећи начин:

$$\{\varepsilon\} = [H_\varepsilon] \{\varepsilon_g\} \quad (3.11)$$

где $\{\varepsilon\}$ представља вектор деформација, матрица $[H_\varepsilon]$ је дата следећим изразом:

$$[H_\varepsilon] = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & z & 0 & 0 & 0 & 0 & -\frac{4}{3h_{pl}^2}z^3 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & z & 0 & 0 & 0 & 0 & -\frac{4}{3h_{pl}^2}z^3 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -\frac{1}{3h_{pl}^2}z^2 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -\frac{1}{3h_{pl}^2}z^2 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & z & 0 & 0 & 0 & 0 & -\frac{4}{3h_{pl}^2}z^3 \end{bmatrix}, \quad (3.12)$$

а

$$\{\varepsilon_g\} = (\varepsilon_{xx}^0 \quad \varepsilon_{yy}^0 \quad \gamma_{yz}^0 \quad \gamma_{xz}^0 \quad \gamma_{xy}^0 \quad \varepsilon_{xx}^1 \quad \varepsilon_{yy}^1 \quad \gamma_{xy}^1 \quad \gamma_{yz}^2 \quad \gamma_{xz}^2 \quad \varepsilon_{xx}^3 \quad \varepsilon_{yy}^3 \quad \gamma_{xy}^3)^T \quad (3.13)$$

представља вектор генерализаних деформација. Такође, и једначине (3.7-3.10) могу се груписати и записати у једноставнијем матричном облику:

$$\{\varepsilon_g\} = [L_u]\{u_g\}, \quad (3.14)$$

где $[L_u]$ представља матрицу диференцијалних оператора која је дефинисана на следећи начин:

$$[L_u] = \begin{bmatrix} \frac{\partial}{\partial x} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{\partial}{\partial y} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{\partial}{\partial y} & 0 & 1 \\ 0 & 0 & \frac{\partial}{\partial x} & 1 & 0 \\ \frac{\partial}{\partial y} & \frac{\partial}{\partial x} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{\partial}{\partial x} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{\partial}{\partial y} \\ 0 & 0 & 0 & \frac{\partial}{\partial y} & \frac{\partial}{\partial x} \\ 0 & 0 & \frac{\partial}{\partial y} & 0 & 1 \\ 0 & 0 & \frac{\partial}{\partial x} & 1 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{\partial^2}{\partial x^2} & \frac{\partial}{\partial x} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{\partial^2}{\partial y^2} & 0 & \frac{\partial}{\partial y} \\ 0 & 0 & 2 \frac{\partial^2}{\partial x \partial y} & \frac{\partial}{\partial y} & \frac{\partial}{\partial x} \end{bmatrix} \quad (3.15)$$

3.3 Конститутивне једначине

Специфична енталпија пиезоелектричног слоја може се представити на следећи начин [7]:

$$h = \frac{1}{2} \{\varepsilon\}^T [\bar{C}] \{\varepsilon\} - \{\varepsilon\}^T [\bar{e}] \{E\} - \frac{1}{2} \{E\}^T [\bar{k}] \{E\}, \quad (3.16)$$

где је $[\bar{C}]$ матрица крутости, $[\bar{e}]$ је матрица пиезоелектричних константи, $\{E\}$ је вектор електричног поља и $[\bar{k}]$ је матрица диелектричних константи. Матрице крутости, пиезоелектричних и диелектричних константи изражене су у односу на координатни систем плоче. Специфична енталпија еластичног слоја добија се тако

што се пиезоелектричне и диелектричне константе изједначе са нулом. Конститутивна једначина за k -ти слој добија се на следећи начин:

$$\begin{aligned} \{\sigma\}^{(k)} &= \frac{\partial h^{(k)}}{\partial \{\varepsilon\}^{(k)}} = [\bar{C}]^{(k)} \{\varepsilon\}^{(k)} - [\bar{e}]^{(k)\Gamma} \{E\}^{(k)} \\ \{D\}^{(k)} &= -\frac{\partial h^{(k)}}{\partial \{E\}^{(k)}} = [\bar{e}]^{(k)} \{\varepsilon\}^{(k)} + [\bar{k}]^{(k)} \{E\}^{(k)} \end{aligned} \quad (3.17)$$

при чему $\{\sigma\}^{(k)}$ представља вектор напона, а $\{D\}$ вектор диелектричног помераја.

Једначине (3.17) записане у развијеном облику постају:

$$\begin{Bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{yz} \\ \tau_{xz} \\ \tau_{xy} \end{Bmatrix}^{(k)} = \begin{bmatrix} \bar{C}_{11} & \bar{C}_{12} & 0 & 0 & \bar{C}_{16} \\ \bar{C}_{12} & \bar{C}_{22} & 0 & 0 & \bar{C}_{26} \\ 0 & 0 & \bar{C}_{44} & \bar{C}_{45} & 0 \\ 0 & 0 & \bar{C}_{45} & \bar{C}_{55} & 0 \\ \bar{C}_{16} & \bar{C}_{26} & 0 & 0 & \bar{Q}_{66} \end{bmatrix}^{(k)} \begin{Bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \gamma_{yz} \\ \gamma_{xz} \\ \gamma_{xy} \end{Bmatrix}^{(k)} - \begin{bmatrix} 0 & 0 & \bar{e}_{31} \\ 0 & 0 & \bar{e}_{32} \\ \bar{e}_{14} & \bar{e}_{24} & 0 \\ \bar{e}_{15} & \bar{e}_{25} & 0 \\ 0 & 0 & \bar{e}_{36} \end{bmatrix}^{(k)} \begin{Bmatrix} E_x \\ E_y \\ E_z \end{Bmatrix}^{(k)} \quad (3.18)$$

$$\begin{aligned} \begin{Bmatrix} D_x \\ D_y \\ D_z \end{Bmatrix}^{(k)} &= \begin{bmatrix} 0 & 0 & \bar{e}_{14} & \bar{e}_{15} & 0 \\ 0 & 0 & \bar{e}_{24} & \bar{e}_{25} & 0 \\ \bar{e}_{31} & \bar{e}_{32} & 0 & 0 & \bar{e}_{36} \end{bmatrix}^{(k)} \begin{Bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \gamma_{yz} \\ \gamma_{xz} \\ \gamma_{xy} \end{Bmatrix}^{(k)} + \\ &+ \begin{bmatrix} \bar{k}_{11} & \bar{k}_{12} & 0 \\ \bar{k}_{12} & \bar{k}_{22} & 0 \\ 0 & 0 & \bar{k}_{33} \end{bmatrix}^{(k)} \begin{Bmatrix} E_x \\ E_y \\ E_z \end{Bmatrix}^{(k)} \end{aligned} \quad (3.19)$$

Узимајући у обзир да је електрично поље унидирекционо, тј. електрично поље дуж оса x и y је занемарено ($E_x = E_y = 0$), конститутивна једначина за k -ти слој може се записати у следећем облику:

$$\begin{Bmatrix} \sigma_{xx} \\ \sigma_{yy} \\ \sigma_{yz} \\ \sigma_{xz} \\ \sigma_{xy} \\ D_3 \end{Bmatrix}^{(k)} = \begin{bmatrix} \bar{C}_{11} & \bar{C}_{12} & 0 & 0 & \bar{C}_{16} & -\bar{e}_{31} \\ \bar{C}_{12} & \bar{Q}_{22} & 0 & 0 & \bar{C}_{26} & -\bar{e}_{32} \\ 0 & 0 & \bar{C}_{44} & \bar{C}_{45} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \bar{C}_{45} & \bar{C}_{55} & 0 & 0 \\ \bar{C}_{16} & \bar{C}_{26} & 0 & 0 & \bar{C}_{66} & -\bar{e}_{36} \\ -\bar{e}_{31} & -\bar{e}_{32} & 0 & 0 & -\bar{e}_{36} & \bar{k}_{33} \end{bmatrix}^{(k)} \begin{Bmatrix} \varepsilon_{xx} \\ \varepsilon_{yy} \\ \gamma_{yz} \\ \gamma_{xz} \\ \gamma_{xy} \\ E_3 \end{Bmatrix}^{(k)}. \quad (3.20)$$

Везе између физичких карактеристика слојева изражених у локалном координатном систему слоја (1,2,3) и глобалном координатном систему плоче (x, y, z) су следеће:

-коэффициенти крутости

$$\bar{C}_{11} = C_{11} \cos^4 \Theta + 2(C_{12} + 2C_{66}) \sin^2 \Theta \cos^2 \Theta + C_{22} \sin^4 \Theta, \quad (3.21)$$

$$\bar{C}_{12} = (C_{11} + C_{22} - 4C_{66}) \sin^2 \Theta \cos^2 \Theta + C_{12} (\sin^4 \Theta + \cos^4 \Theta), \quad (3.22)$$

$$\bar{C}_{22} = C_{11} \sin^4 \Theta + 2(C_{12} + 2C_{66}) \sin^2 \Theta \cos^2 \Theta + C_{22} \cos^4 \Theta, \quad (3.23)$$

$$\bar{C}_{16} = (C_{11} - C_{12} - 2C_{66}) \sin \Theta \cos^3 \Theta + (C_{12} - C_{22} + 2C_{66}) \sin^3 \Theta \cos \Theta, \quad (3.24)$$

$$\bar{C}_{26} = (C_{11} - C_{12} - 2C_{66}) \sin^3 \Theta \cos \Theta + (C_{12} - C_{22} + 2C_{66}) \sin \Theta \cos^3 \Theta, \quad (3.25)$$

$$\bar{C}_{66} = (C_{11} + C_{22} - 2C_{12} - 2C_{66}) \sin^2 \Theta \cos^2 \Theta + C_{66} (\sin^4 \Theta + \cos^4 \Theta), \quad (3.26)$$

$$\bar{C}_{44} = C_{44} \cos^2 \Theta + C_{55} \sin^2 \Theta, \quad (3.27)$$

$$\bar{C}_{45} = (C_{55} - C_{44}) \cos \Theta \sin \Theta, \quad (3.28)$$

$$\bar{C}_{55} = C_{55} \cos^2 \Theta + C_{44} \sin^2 \Theta \quad (3.29)$$

-пиезоелектричне константе

$$\bar{e}_{31} = e_{31} \cos^2 \Theta + e_{32} \sin^2 \Theta, \quad (3.30)$$

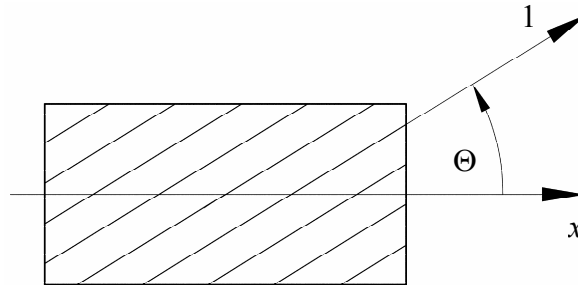
$$\bar{e}_{32} = e_{31} \sin^2 \Theta + e_{32} \cos^2 \Theta, \quad (3.31)$$

$$\bar{e}_{36} = (e_{31} - e_{32}) \sin \Theta \cos \Theta, \quad (3.32)$$

-диелектричне константе

$$\bar{k}_{33} = k_{33}. \quad (3.33)$$

Θ је угао између локалног координатног система слоја и глобалног координатног система плоче (слика 3.3).



Слика 3.3. Угао између локалног координатног система слоја и глобалног координатног система плоче

Величине e_{31} и e_{32} представљају чланове матрице пиезоелектричних константи изражене у локалном координатном систему слоја. Чланови матрице крутости могу се изразити помоћу инжењерских константи материјала слоја, тако да су коефицијенти крутости појединачног изражени у локалном координатном систему:

$$Q_{11} = \frac{Y_1}{1 - \nu_{12}\nu_{21}}, \quad Q_{12} = \frac{\nu_{12}Y_2}{1 - \nu_{12}\nu_{21}}, \quad Q_{22} = \frac{Y_2}{1 - \nu_{12}\nu_{21}}, \quad (3.34)$$

$$Q_{44} = G_{23}, \quad Q_{55} = G_{13}, \quad Q_{66} = G_{12}$$

где је Y_i одговарајући Јангов модул еластичности материјала слоја, ν_{ij} одговарајући Пуасонов коефицијент, а G_{ij} одговарајући модул смицања.

3.4 Варијациона формулација

Једначине кретања плоче могу се извести помоћу Хамилтоновог принципа:

$$\int_{t_1}^{t_2} (\delta T - \delta H - \delta U_d + \delta W) dt = 0 \quad (3.35)$$

где су t_1 и t_2 два произвољна временска тренутка, δT је варијација кинетичке енергије плоче, δH је варијација електричне енталпије, δU_d је варијација дисипативне функције, а δW је варијација рада извршеног од стране спољашњих сила. Према једначини (3.16), варијација електричне енталпије може се изразити на следећи начин:

$$\delta H = \int_V \delta h dV = \delta H_m - \delta H_{me} - \delta H_{em} - \delta H_e, \quad (3.36)$$

где је:

$$\begin{aligned} \delta H_m &= \int_V \delta \{\varepsilon\}^T [\bar{C}] \{\varepsilon\} dV \\ \delta H_{me} &= \int_V \delta \{\varepsilon\}^T [\bar{e}]^T \{E\} dV \\ \delta H_{em} &= \int_V \delta \{E\}^T [\bar{e}] \{\varepsilon\} dV \\ \delta H_e &= \int_V \delta \{E\}^T [\bar{k}] \{E\} dV. \end{aligned} \quad (3.37)$$

Варијација кинетичке енергије је:

$$\delta T = \int_V \rho \delta \{\dot{u}\}^T \{\dot{u}\} dV, \quad (3.38)$$

где $\{\dot{u}\}$ представља вектор брзина одговарајућих тачака плоче, а ρ је густина слоја.

3.5 Дискретизација методом коначних елемената

Јединствено поље механичких помераја важи за све слојеве плоче, док се поље електричних помераја уводи за сваки слој посебно. Плоча је дискретизирана са правоугаоним елементима са четири чвора. За интерполацију механичких помераја на средњој површи, u_0 и v_0 , користе се Лагранжеве линеарне интерполационе функције, а неконформне кубне Хермитове интерполационе

функције за интерполацију механичког помераја w_0 . Како се на површинама пиезоелектричних делова налазе електроде, они се разматрају као еквипотенцијалне површине. Стога, један елемент има 28 механичких степени слободе и n_p електричних степени слободе, где n_p представља број пиезоелектричних слојева у једном елементу. Вектор механичких чворних променљивих код једног елемента је:

$$\{u_e\} = \left(u_0^j \quad v_0^j \quad w_0^j \quad \left(\frac{\partial w_0}{\partial x} \right)_j \quad \left(\frac{\partial w_0}{\partial y} \right)_j \quad \psi_x^j \quad \psi_y^j \right)^T \quad j = 1, \dots, 4, \quad (3.39)$$

а електрични потенцијали су

$$\{\phi_e\} = \left(\phi_e^{(1)} \quad \phi_e^{(2)} \quad \dots \quad \phi_e^{(n_p-1)} \quad \phi_e^{(n_p)} \right)^T. \quad (3.40)$$

3.5.1 Дискретизација механичких помераја и деформација

Генералисани механички помераји у једном елементу могу се интерполирати у зависности од чворних величина на следећи начин:

$$\begin{aligned} u_0(x, t) &= \sum_{j=1}^4 u_0^j N_j^0(x, y), & \phi_x(x, t) &= \sum_{j=1}^4 \phi_x^j N_j^0(x, y) \\ v_0(x, t) &= \sum_{j=1}^4 v_0^j N_j^0(x, y), & \phi_y(x, t) &= \sum_{j=1}^4 \phi_y^j N_j^0(x, y) \\ w_0(x, t) &= \sum_{j=1}^4 \left(w_0^j N_j + \left(\frac{\partial w_0}{\partial x} \right)_j a_e N_j^x + \left(\frac{\partial w_0}{\partial y} \right)_j b_e N_j^y \right) \end{aligned} \quad (3.41)$$

где су N_j^0 интерполационе Лагранжеве функције:

$$\begin{Bmatrix} N_1^0 \\ N_2^0 \\ N_3^0 \\ N_4^0 \end{Bmatrix} = \frac{1}{4} \begin{Bmatrix} (1 - \xi_e)(1 - \eta_e) \\ (1 - \xi_e)(1 + \eta_e) \\ (1 + \xi_e)(1 + \eta_e) \\ (1 + \xi_e)(1 - \eta_e) \end{Bmatrix}, \quad (3.42)$$

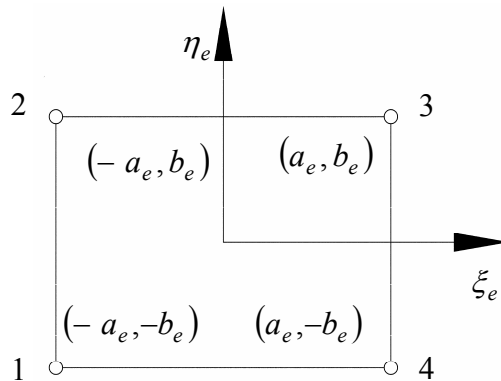
а N_j , N_j^x и N_j^y интерполационе Хермитске функције дефинисане на следећи начин:

$$\begin{aligned} \begin{Bmatrix} N_1 \\ N_2 \\ N_3 \\ N_4 \end{Bmatrix} &= \frac{1}{8} \begin{Bmatrix} (1 - \xi_e)(1 - \eta_e)(2 - \xi_e - \eta_e - \xi_e^2 - \eta_e^2) \\ (1 - \xi_e)(1 + \eta_e)(2 - \xi_e + \eta_e - \xi_e^2 - \eta_e^2) \\ (1 + \xi_e)(1 + \eta_e)(2 + \xi_e + \eta_e - \xi_e^2 - \eta_e^2) \\ (1 + \xi_e)(1 - \eta_e)(2 + \xi_e - \eta_e - \xi_e^2 - \eta_e^2) \end{Bmatrix}, \\ \begin{Bmatrix} N_1^x \\ N_2^x \\ N_3^x \\ N_4^x \end{Bmatrix} &= \frac{1}{8} \begin{Bmatrix} (\xi_e + 1)(1 - \eta_e)(1 - \xi_e)^2 \\ (\xi_e + 1)(1 + \eta_e)(1 - \xi_e)^2 \\ (\xi_e - 1)(1 + \eta_e)(1 + \xi_e)^2 \\ (\xi_e - 1)(1 - \eta_e)(1 + \xi_e)^2 \end{Bmatrix}, \\ \begin{Bmatrix} N_1^y \\ N_2^y \\ N_3^y \\ N_4^y \end{Bmatrix} &= \frac{1}{8} \begin{Bmatrix} (\eta_e + 1)(1 - \xi_e)(1 - \eta_e)^2 \\ (\eta_e - 1)(1 - \xi_e)(1 + \eta_e)^2 \\ (\eta_e - 1)(1 + \xi_e)(1 + \eta_e)^2 \\ (\eta_e + 1)(1 + \xi_e)(1 - \eta_e)^2 \end{Bmatrix}. \end{aligned} \quad (3.43)$$

У претходним једначинама ξ_e и η_e представљају осе локалног координатног система елемента:

$$\xi_e = \frac{x}{a_e}, \quad \eta_e = \frac{y}{b_e}. \quad (3.44)$$

где су a_e и b_e половине дужине и ширине елемента. На слици 3.4 приказан је елемент са осама локалног координатног система и чворним величинама.



Слика 3.4. Коначни елемент

Једначина (3.41) може се записати у једноставнијем матричном облику:

$$\{u_g\} = [N_u] \{u_e\}, \quad (3.45)$$

где је $[N_u]$ матрица интерполационих функција дата на следећи начин:

$$[N_u] = \begin{bmatrix} [N_u^1] & [N_u^2] & [N_u^3] & [N_u^4] \end{bmatrix}$$

$$[N_u^j] = \begin{bmatrix} N_j^0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & N_j^0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & N_j & a_e N_j^x & b_e N_j^y & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & N_j^0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & N_j^0 \end{bmatrix}. \quad (3.46)$$

Заменом једначине (3.40) у једначину (3.14), може се добити следећа веза између генералисаних деформација и чворних механичких помераја:

$$\{\varepsilon_g\} = [B_u] \{u_e\}, \quad (3.47)$$

где је

$$[B_u] = [L_\varepsilon] [N_u]. \quad (3.48)$$

Заменом једначине (3.47) у једначину (3.11), добија се следећа једначина:

$$\{\varepsilon\} = [H_\varepsilon] [B_u] \{u_e\} \quad (3.49)$$

која дефинише везу између вектора деформације и вектора чворних механичких величина. Заменом једначине (3.49) у прву од једначина (3.37), може се добити:

$$\delta H_m = \delta \{u_e\}^T [K_m^e] \{u_e\}, \quad (3.50)$$

где

$$[K_m^e] = \int_V [B_u]^T [H_\varepsilon]^T [\bar{C}] [H_\varepsilon] [B_u] dx dy dz \quad (3.51)$$

представља елементарну еластичну матрицу крутости.

3.5.2 Дискретизација електричног поља

За промену електричног потенцијала по дебљини k -тог слоја претпоставља се да је линеарна:

$$\varphi^{(k)} = \left(\frac{1}{2} + \zeta^{(k)}\right)\varphi_{\text{Top}}^{(k)} + \left(\frac{1}{2} - \zeta^{(k)}\right)\varphi_{\text{Bot}}^{(k)} \quad (3.52)$$

где $\zeta^{(k)}$ представља локалну координату k -тог слоја која је дефинисана на следећи начин:

$$\zeta^{(k)} = \frac{z}{h_k} - \frac{z_k + z_{k-1}}{2h_k}, \quad (3.53)$$

а $\varphi_{\text{Top}}^{(k)}$ и $\varphi_{\text{Bot}}^{(k)}$ су електрични потенцијали на горњој и доњој површини k -тог слоја. Промена електричног поља по дебљини k -тог слоја може се добити на следећи начин:

$$E_z^{(k)} = -\frac{\partial\varphi^{(k)}}{\partial z}. \quad (3.54)$$

Према једначинама (3.52) и (3.53), електрично поље је:

$$E_z^{(k)} = \frac{\phi^{(k)}}{h_k}, \quad (3.55)$$

где

$$\phi^{(k)} = \varphi_{\text{Bot}}^{(k)} - \varphi_{\text{Top}}^{(k)}, \quad (3.56)$$

представља напон између површина слоја. Узимајући у обзир једначину (3.55), која важи за један слој, може се написати вектор електричног поља свих слојева у једном елементу:

$$\{E_z\} = [L_\phi]\{\phi\}, \quad (3.57)$$

где је

$$[L_\phi] = \text{diag}\left(\frac{1}{h_k}\right)_{k=1,n}. \quad (3.58)$$

Заменом једначина (3.49) и (3.58) у другу и трећу једначину од једначина (3.37), могу се добити следећи изрази:

$$\begin{aligned}\delta H_{me} &= \delta \{u_e\}^T [K_{me}^e] \{\phi_e\} \\ \delta H_{em} &= \delta \{\phi\}^T [K_{me}^e]^T \{u_e\}\end{aligned}\quad (3.59)$$

где $[K_{me}^e]$ представља елементану пиезоелектричну матрицу крутости која има следећи облик:

$$[K_{me}^e] = \int_V [B_u]^T [H_\varepsilon]^T [\bar{e}]^T [L_\phi] dx dy dz. \quad (3.60)$$

Заменом једначине (3.57) у четврту од једначина (3.37), добија се следеће:

$$\delta H_e = \delta \{\phi\}^T [K_e^e] \{\phi\}, \quad (3.61)$$

где $[K_e^e]$ представља елементарну диелектричну матрицу крутости која је дата изразом:

$$[K_e^e] = \int_V [L_\phi]^T [\bar{k}] [L_\phi] dx dy dz. \quad (3.62)$$

3.5.3 Дискретизација кинетичке енергије

Заменом једначина (3.2) и (3.45) у једначину (3.38) и применом варијационог рачуна, добија се следећа једначина:

$$\delta T = -\delta \{u_e\}^T [M^e] \{\dot{u}_e\}, \quad (3.63)$$

где

$$[M^e] = \int_V \rho [N_u]^T [A_u]^T [A_u] [N_u] dx dy dz \quad (3.64)$$

представља елементарну матрицу маса.

3.5.4 Дискретизација рада извршеног од стране спољашњих сила

Укупан рад извршен од стране спољашњих сила (W) једнак је збиру рада извршеног од стране спољашњих механичких сила (W_m) и рада извршеног од стране спољашњих електричних сила (W_e):

$$W = W_m + W_e. \quad (3.65)$$

Варијација рада извршеног од стране спољашњих механичких сила може се представити, у дискретизованој форми, на следећи начин:

$$\delta W_m = \delta \{u_e\}^T \{F_m^e\}, \quad (3.66)$$

где $\{F_m^e\}$ представља вектор чворних спољашњих механичких сила. Варијација рада извршеног од стране спољашњих електричних сила је:

$$\delta W_e = -\delta \{Q\}^T \{\phi\}_{AA}, \quad (3.67)$$

где $\{Q\}$ представља вектор наелектрисања пиезоелектричних слојева, а $\{\phi\}_{AA}$ је спољни напон на актуатору. Чланови вектора наелектрисања су наелектрисања сваког слоја појединачно. Вектор наелектрисања се добија интеграљењем по површини електроде сваког актуатора, на следећи начин:

$$\{Q\} = \int_S d\{Q\} = \int_S \{D_z\} dx dy. \quad (3.68)$$

Претходна једначина може се разложити, тако да се интеграл по сваком слоју, посебно:

$$\{Q\} = \frac{1}{2} \left\{ \int_{S^{(k-1)}} D_3^{(k-1)} dx dy + \int_{S^{(k)}} D_3^{(k)} dx dy \right\} = \left\{ \int_V \frac{1}{h_k} D_3^{(k-1)} dx dy dz \right\}. \quad (3.69)$$

Из друге једначине (3.17), може се изразити електрични померај у функцији од електричног поља и уврстити у претходну једначину:

$$\begin{aligned} \{Q\} &= \left\{ \int_V \frac{1}{h_k} \bar{k}_3^{(k)} E_z^{(k-1)} dx dy dz \right\} = \\ &= \int_V [L_\phi]^T [\bar{k}] \{E_z\} dx dy dz = \\ &= \int_V [L_\phi]^T [\bar{k}] [L_\phi] \{\phi\}_A dx dy dz = [K_e^e] \{\phi\}_A \end{aligned} \quad (3.70)$$

У претходној једначини $\{\phi\}_A$ представља напон индукован на актуатору услед пиезоелектричног ефекта. После варирања једначине (3.70), и заменом у једначину (3.69), добија се једначина за варијацију рада извршеног од стране спољашњих електричних сила:

$$\delta W_e = -\delta \{\phi_e\}_A^T [K_e^e]_A \{\phi\}_{AA}. \quad (3.71)$$

3.5.5 Дискретизација дисипативне функције

Дискретизована форма дисипативне функције може се представити на следећи начин:

$$U_d = \frac{1}{2} \{\dot{u}_e\}^T [C_d] \{\dot{u}_e\}, \quad (3.72)$$

односно, њена варијација је:

$$\delta U_d = \delta \{\dot{u}_e\}^T [C_d] \{\dot{u}_e\}, \quad (3.73)$$

где је $[C_d]$ матрица структуралног пригушења.

3.5.6 Спрегнуте једначине кретања

Заменом добијених дискретизованих форми варијација кинетичке енергије (једначина (3.63)), варијација енталпија (једначине (3.50), (3.59) и (3.61)), варијација спољашњих радова (једначине (3.66) и (3.67)) и варијације дисипативне функције (једначина (3.73)) у једначину Хамилтоновог принципа (једначина (3.35)), раздвајајући електричне потенцијале на сензорски и актуаторски део и формирајући глобалне матрице од елементарних матрица, могу се добити следеће спрегнуте једначине кретања у функцији чворних величина:

$$\begin{aligned} [M] \{\ddot{u}\} + [C_d] \{\dot{u}\} + [K_m] \{u\} - [K_{me}]_A \{\phi\}_A - [K_{me}]_S \{\phi\}_S &= \{F_m\} \\ [K_{me}]_A^T \{u\} + [K_e]_A \{\phi\}_A &= [K_e]_A \{\phi\}_{AA} \\ [K_{me}]_S^T \{u\} + [K_e]_S \{\phi\}_S &= 0, \end{aligned} \quad (3.74)$$

где $[M]$ представља глобалну матрицу маса, $[K_m]$ је глобална еластична матрица крутости, $[K_{me}]_A$ и $[K_{me}]_S$ пиезоелектричне матрице крутости актуатора и сензора, респективно, $[K_e]_A$ и $[K_e]_S$ су глобалне диелектричне матрице крутости актуатора и сензора, респективно, $\{\phi\}_A$ и $\{\phi\}_S$ су напони који се јављају на актуатору и сензору услед пиезоелектричног ефекта а $\{F_m\}$ представља вектор спољашњих механичких сила. Заменом одговарајућих напона ($\{\phi\}_A$ и $\{\phi\}_S$) из последње две у прву једначину (3.74) може се добити следећа једначина:

$$[M] \{\ddot{u}\} + [C_d] \{\dot{u}\} + [K^*] \{u\} = \{F_m\} + [K_{me}]_A \{\phi\}_{AA}, \quad (3.75)$$

где

$$[K^*] = [K_m] + [K_{me}]_A [K_e]_A^{-1} [K_{me}]_A^T + [K_{me}]_S [K_e]_S^{-1} [K_{me}]_S^T, \quad (3.76)$$

представља спрегнуту матрицу крутости.

3.6 Једначине кретања у модалним координатама

Због великог броја степени слободe, једначину (3.75) није практично користити. Због тога, добијени модел мора се апроксимирати, где се само првих неколико модова узимају у обзир. Вектор механичких помераја може се апроксимирати суперпозицијом првих r модова:

$$\{u\} \approx [\Psi] \{\eta\} \quad (3.77)$$

где $[\Psi]$ представља модалну матрицу а $\{\eta\}$ је вектор модалних координата. Користећи једначину (3.77), једначина (3.75) може се трансформисати у модални простор:

$$\{\ddot{\eta}\} + [\Lambda] \{\dot{\eta}\} + [\omega^2] \{\eta\} = [\Psi]^T \{F_m\} - [\Psi]^T [K_{me}]_A \{\phi\}_{AA} \quad (3.78)$$

где $[\omega^2]$ представља дијагоналну матрицу квадрата сопствених фреквенција, а

$$[\Lambda] = \text{diag} (2\zeta_i \omega_i)_{i=1, \dots, r} \quad (3.79)$$

представља модалну матрицу пригушења, где је ζ_i је коефицијент пригушења i -тог мода.

3.7 Једначине кретања у простору стања

Једначина (3.78) може се изразити у простору стања на следећи начин:

$$\{\dot{X}\} = [A] \{X\} + [B] \{\phi\}_{AA} + [\hat{B}] \{d\}, \quad (3.80)$$

где

$$\{X\} = \begin{Bmatrix} \eta \\ \dot{\eta} \end{Bmatrix}, \quad (3.81)$$

представља вектор стања,

$$[A] = \begin{bmatrix} [0] & [I] \\ -[\omega^2] & -[\Lambda] \end{bmatrix}, \quad (3.82)$$

представља матрицу система,

$$[B] = \begin{bmatrix} [0] \\ [\hat{B}] \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} [0] \\ -[\Psi]^T [K_{me}]_A \end{bmatrix}, \quad (3.83)$$

је матрица улаза, и

$$[\hat{B}] = \begin{bmatrix} [0] \\ [\Psi]^T \{F_m\} \end{bmatrix}, \quad (3.84)$$

је матрица поремећаја, где су $[I]$ и $[0]$ јединична и нула матрица, респективно, адекватно димензионисане. $\{d\}$ је улазни поремећајни вектор. Једначина излаза сензора може се записати на следећи начин:

$$\{Y_s\} = [C_s] \{X\}, \quad (3.85)$$

где $[C_s]$ представља матрицу излаза која зависи од модалне матрице и пиезоелектричне и деиелектричне матрице крутости сензора.

3.8 Основни модови осциловања танкозидних композитних плоча

У овом поглављу биће одређени, на основу приказаног математичког модела методе коначних елемената, основни модови осциловања танкозидних композитних плоча. Плоче су на једном крају укљештене, а квадратног су облика, димензија $0.5 \times 0.5 \text{ m}$. Плоче се састоје од осам слојева графит-епоксија, дебљина сваког слоја је 0.25 mm и биће анализирана три случаја оријентација:

1. Симетрично са специјално-ортотропним слојевима: $(90^\circ/0^\circ/90^\circ/0^\circ)_s$
2. Антисиметрично са специјално-ортотропним слојевима:
 $(90^\circ/0^\circ/90^\circ/0^\circ/90^\circ/0^\circ/90^\circ/0^\circ)$
3. Антисиметрично са генерално-ортотропним слојевима:
 $(45^\circ/-45^\circ/45^\circ/-45^\circ/45^\circ/-45^\circ/45^\circ/-45^\circ)$.

Особине графит-епоксија приказане су у табели 3.1.

Табела 3.1. Материјалне особине графит-епоксија

Материјалне особине	Графит-епоски
Модул еластичности, Y_1 (GPa)	174
Модул еластичности, Y_2 (GPa)	10.3
Модул смицања, G_{13} (GPa)	7.17
Модул смицања, G_{23} (GPa)	6.21
Пуасонов коефицијент, ν_{12}	0.25
Густина, ρ (kg/m ³)	1389.23

У табелама 3.2, 3.3 и 3.4 приказане су фреквенције осциловања и карактер првих 6 модова за симетричну плочу, плочу са антисиметрично постављеним специјално-ортотропним слојевима и плочу са антисиметрично постављеним генерално-ортотропним слојевима, респективно. На сликама 3.5, 3.6 и 3.7 приказани су првих 6 модова осциловања плоча са следећим конфигурацијама слојева: $(90^\circ/0^\circ/90^\circ/0^\circ)_s$, $(90^\circ/0^\circ/90^\circ/0^\circ/90^\circ/0^\circ/90^\circ/0^\circ)$ и $(45^\circ/-45^\circ/45^\circ/-45^\circ/45^\circ/-45^\circ/45^\circ/-45^\circ)$, респективно.

Табела 3.2. Фреквенције и карактери првих 6 модова осциловања плоче са конфигурацијом слојева $(90^\circ/0^\circ/90^\circ/0^\circ)_s$

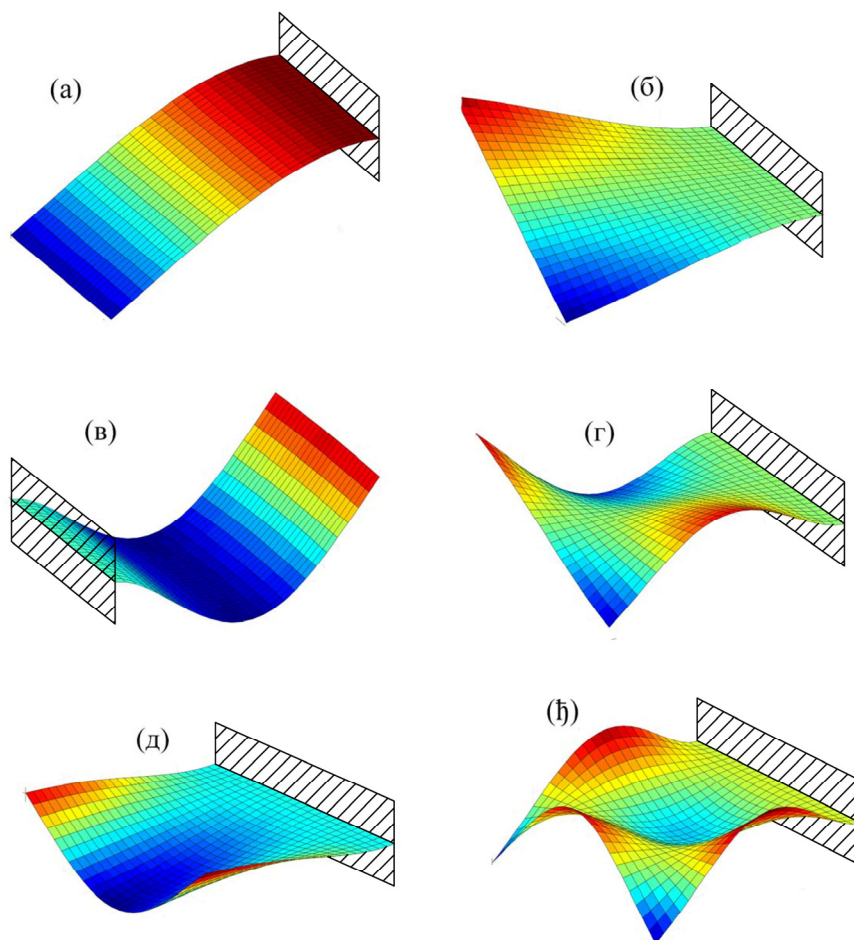
Мод осциловања		1	2	3	4	5	6
Фрекв. (Hz)	25 KE	8.63	14.554	54.157	63.055	81.247	114.967
	50 KE	8.628	14.54	54.069	62.908	81.181	114.663
Карактер		савојни	увојни	савојни	увојни	савојни	савојни

Табела 3.3. Фреквенције и карактери првих 6 модова осциловања плоче са конфигурацијом слојева $(90^\circ/0^\circ/90^\circ/0^\circ/90^\circ/0^\circ/90^\circ/0^\circ)$

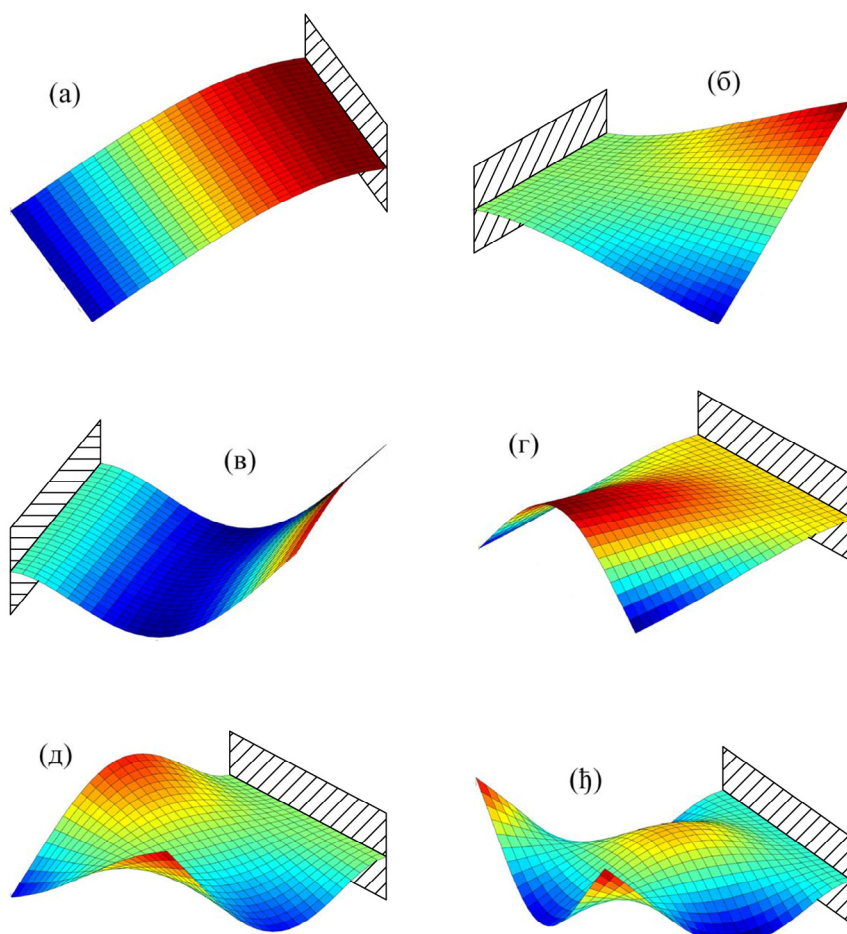
Мод осциловања		1	2	3	4	5	6
Фрекв. (Hz)	25 KE	10.371	15.76	65.054	70.595	72.629	113.543
	50 KE	10.369	15.747	64.949	70.531	72.474	113.226
Карактер		савојни	увојни	савојни	савојни	увојни	савојни

Табела 3.4. Фреквенције и карактери првих 6 модова осциловања плоче са конфигурацијом слојева $(45^\circ/-45^\circ/45^\circ/-45^\circ/45^\circ/-45^\circ/45^\circ/-45^\circ)$

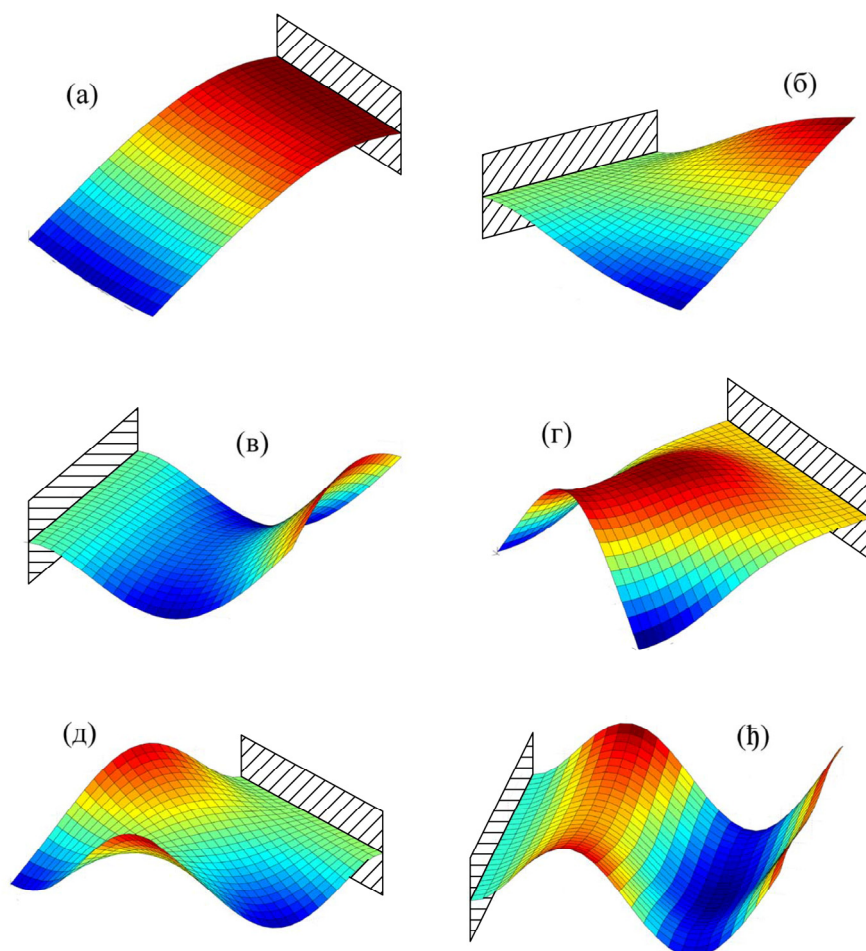
Мод осциловања		1	2	3	4	5	6
Фрекв. (Hz)	25 KE	7.027	25.873	41.322	69.854	84.968	126.623
	50 KE	7.012	25.814	41.186	69.696	84.667	125.914
Карактер		савојни	увојни	савојни	савојни	увојни	савојни



Слика 3.5. Основни модови осциловања укљештене плоче са конфигурацијом слојева $(90^\circ/0^\circ/90^\circ/0^\circ)_S$: (а) први мод, (б) други мод, (в) трећи мод, (г) четврти мод, (д) пети мод, (е) шести мод



Слика 3.6. Основни модови осциловања укљештене плоче са конфигурацијом слојева $(90^\circ/0^\circ/90^\circ/0^\circ/90^\circ/0^\circ/90^\circ/0^\circ)$: (а) први мод, (б) други мод, (в) трећи мод, (г) четврти мод, (д) пети мод, (е) шести мод



Слика 3.7. Основни модови осциловања укљештене плоче са конфигурацијом слојева $(45^\circ/-45^\circ/45^\circ/-45^\circ/45^\circ/-45^\circ/45^\circ/-45^\circ)$: (а) први мод, (б) други мод, (в) трећи мод, (г) четврти мод, (д) пети мод, (ђ) шести мод

Глава 4

Оптимизација величине, положаја и оријентација пиезоелектричних актуатор-сензор парова

4.1 Увод

Ефикасност активног управљања вибрацијама одређена је положајима и величинама актуатора и сензора. Положаји и величине актуатора бирају се тако да, уз што мање уложене енергије, пригушење вибрација буде боље. Слично, да би се добиле боље информације о величинама стања са сензора, положаји и величине сензора бирају се тако да пружају што јачи излаз. Другим речима, ако се жели пригушити одређени мод, актуаторе и сензоре неопходно је димензионисати и сместити тако да се оствари што боља управљивост и осмотривост тог мода. Услед спољашњих утицаја, код вибрација структура, може се јавити један мод, а могу и неколоко модова истовремено, са чиме одређивање положаја и величина актуатора и сензора постаје комплексније.

Да би се одредили оптимални положаји и величине актуатора и сензора, у овом раду употребљена је метода оптимизације која се назива „Particle swarm“ оптимизација („PSO”), или, у преводу, оптимизација ројем честица.

4.2 Управљивост и осмотривост

Управљивост је способност система да, уз помоћ актуатора, управља свим величинама стања датог система. Осмотривост се може дефинисати као способност система да се на основу излазног сигнала, са сензора, могу добити све неопходне информације за утврђивање свих величина стања система. Другим речима, линеарни систем, дефинисан једначином (3.80) је у потпуности управљив ако постоји вектор управљања који може превести систем из почетног стања $\{X(t_0)\}$ у неко коначно стање $\{X(t_1)\}$ унутар произвољног коначног времена $t_0 \leq t \leq t_1$. Систем је у потпуности осмотрив ако се сваки вектор стања $\{X(t)\}$ у сваком тренутку $t_0 \leq t \leq t_1$ може утврдити на основу излаза са сензора $\{Y_S\}$. Провера управљивости система може се извршити провером ранга матрице управљивости $[S]$, која је дата на следећи начин:

$$[S] = \begin{bmatrix} [B] & [A][B] & [A]^2[B] & \dots & [A]^{n-1}[B] \end{bmatrix}, \quad (4.1)$$

где су матрице $[A]$ и $[B]$ дефинисане у глави 3. Систем је у потпуности управљив ако матрица $[S]$ има ранг n . На сличан начин се може дефинисати и матрица осмотривости:

$$[O] = \begin{bmatrix} [C_S] \\ [C_S][A] \\ [C_S][A]^2 \\ \vdots \\ [C_S][A]^{n-1} \end{bmatrix}, \quad (4.2)$$

где је систем осмотрив ако је ранг матрице осмотривости n . Матрица $[C_S]$ дефинисана је у глави 3.

Наведени критеријуми за управљивост и осмотривост имају свој недостатак, а то је да они дају само информацију да ли је систем управљив или не, односно, осмотрив или не, тј. не пружају квантитативне информације о управљивости и осмотривости.

Алтернативни приступ је употреба грамијана за одређивање особина система. Грамијани су ненегативне матрице које квантитативно изражавају управљивост и осмотривост, а при томе су лаке за рачунање и могу се применити

и на системе вишег реда. Грамијанове матрице управљивости и осмотривости могу се дефинисати на следећи начин [124]:

$$\begin{aligned} [W_C(t)] &= \int_0^t \exp([A]\tau)[B][B]^T \exp([A]^T\tau) d\tau, \\ [W_O(t)] &= \int_0^t \exp([A]^T\tau)[C_S]^T [C_S] \exp([A]\tau) d\tau \end{aligned} \quad (4.3)$$

Ако се Грамијанове матрице управљивости и осмотривости изразе у модалним координатама, тада оне постају дијагонално доминантне [124]:

$$[W_C] = \begin{bmatrix} W_{C11} & 0 & \dots & 0 \\ 0 & W_{C22} & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & W_{Cnn} \end{bmatrix}, \quad (4.4)$$

$$[W_O] = \begin{bmatrix} W_{O11} & 0 & \dots & 0 \\ 0 & W_{O22} & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & W_{Onn} \end{bmatrix}, \quad (4.5)$$

где се сваки дијагонални члан може изразити у форми независно од времена:

$$\begin{aligned} W_{Cii} &= \frac{1}{4\zeta_i\omega_i} (B)_i (B)_i^T, \\ W_{Oii} &= \frac{1}{4\zeta_i\omega_i} \{C\}_i^T \{C\}_i, \end{aligned} \quad (4.6)$$

где $(B)_i$ представља i -ту врсту матрице улаза, а $\{C\}_i$ представља i -ту колону матрице излаза. Вредност W_{Cii} пружа информацију о енергији пренесеној са актуатора на структуру у случају редукције i -тог мода. Другим речима, већа вредност i -те сопствене вредности грамијанове матрице управљивости доводи до бољег управљања i -тим модом. Опет, ако је бар једна сопствена вредност мала, управљање одговарајућим модом ће бити теже и захтеваће више енергије. Са друге стране, ако је вредност i -те сопствене вредности грамијанове матрице осмотривости мала, тада i -ти мод неће бити довољно осмотрив.

4.3 Циљна функција и ограничења

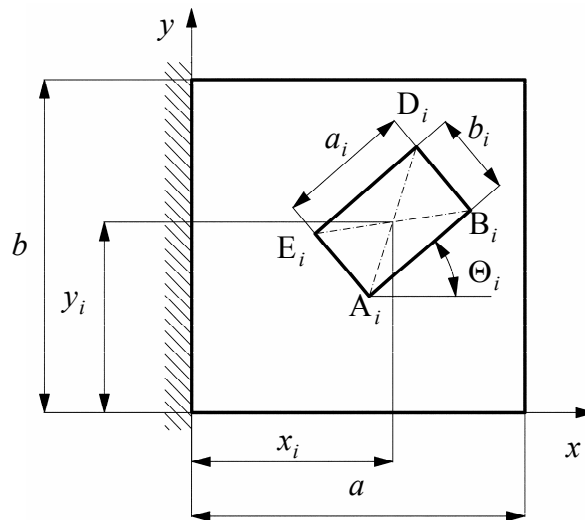
У овом поглављу биће формулисан критеријум оптимизације за оптималне величине и положаје пиезоелектричних актуатор-сензор (А-С) парова. Њихови положаји и величине морају бити такви да пружају што већу управљивост и осмотривост за модове којима се управља. Како се актуатор-сензор парови налазе на истом месту, само са супротних страна плоче и истих су димензија, биће извршена само оптимизација на основу управљивости. У раду [61] представљен је индекс перформанси:

$$J_e = \text{trace}([W_C]) (\det([W_C]))^{1/(2N_C)}, \quad (4.7)$$

где N_C представља број модова којима се управља. Имајући у виду једначину (4.7), функција циља је:

$$OBJ = \text{maximize}(J_e). \quad (4.8)$$

На слици 4.1 приказана је плоча са i -тим актуатор-сензор паром.



Слика 4.1. Композитна плоча са i -тим актуатор-сензор паром

Величине којима је одређен i -ти актуатор-сензор пар су следеће:

- x_i, y_i : положај центра А-С пара у односу на координатни систем плоче
- a_i, b_i : дужна и ширина А-С пара
- Θ_i : оријентација А-С пара.

Врсте ограничења које се намећу су следеће:

1) ограничења у погледу димензије А-С пара:

$$a_{i \min} \leq a_i \leq a_{\max}, \quad b_{i \min} \leq b_i \leq b_{\max}, \quad i = 1, \dots, N_p, \quad (4.9)$$

где су $a_{i \min}$ и $a_{i \max}$ минимална и максимална дужина i -тог А-С пара, а $b_{i \min}$ и $b_{i \max}$ је њихова минимална и максимална ширина, док N_p представља број А-С парова.

2) ограничења у погледу положаја А-С пара:

$$0 \leq x_{Ai}, x_{Bi}, x_{Di}, x_{Ei} \leq a, \quad 0 \leq y_{Ai}, y_{Bi}, y_{Di}, y_{Ei} \leq b, \quad i = 1, \dots, N_p, \quad (4.10)$$

3) ограничења у погледу укупне површине коју прекривају А-С парови:

$$\frac{\sum_{i=1}^{N_p} a_i b_i}{ab} \leq \varepsilon, \quad (4.11)$$

где ε представља толеранцију прекривености површине,

4) последња ограничења су динамичка ограничења која не дозвољавају међусобна преклапања А-С парова.

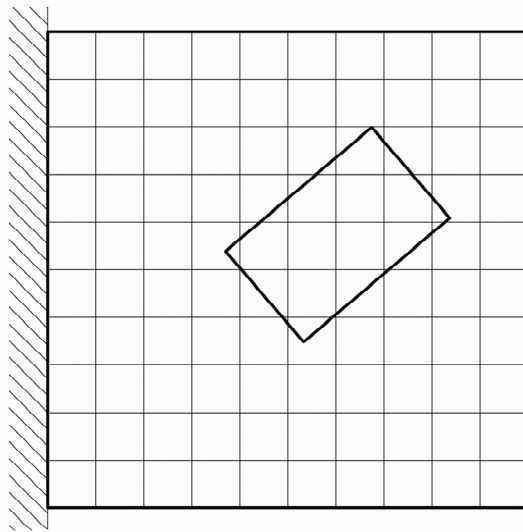
Узимајући у обзир ограничења, проблем оптимизације своди се на налажење параметара $x_i, y_i, a_i, b_i, \Theta_i$ ($i = 1, \dots, N_p$), тако да функција циља:

$$\bar{J}_e = \begin{cases} J_e, & \text{ако ограничења нису нарушена} \\ 0, & \text{ако су ограничења нарушена} \end{cases}. \quad (4.12)$$

буде максимизирана.

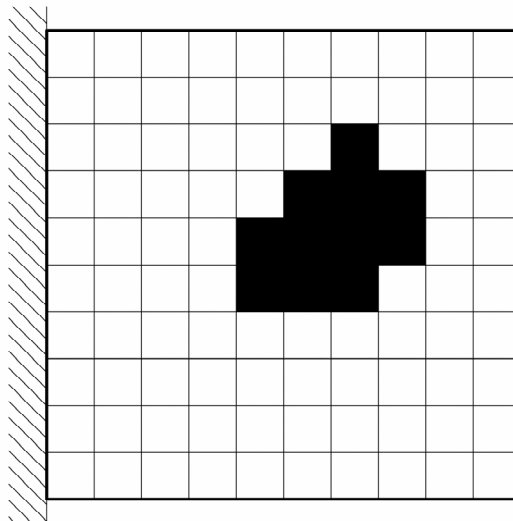
4.4 Дискретизација плоче помоћу коначних елемената

Приликом прорачуна, плоча је подељена на коначне елементе, као што је дефинисано у глави 3. Такође, биће коришћени и квадратни коначни елементи. Током оптимизације величине и облици коначних елемената неће бити мењани. На слици 4.2 приказана је плоча са i -тим актуатор-сензор паром подељена на коначне елементе. Број коначних елемената је 100 (свака стрница је подељена на 10 елемената).



Слика 4.2. Композитна плоча са i -тим актуатор-сензор паром подељена на 100 коначних елемената

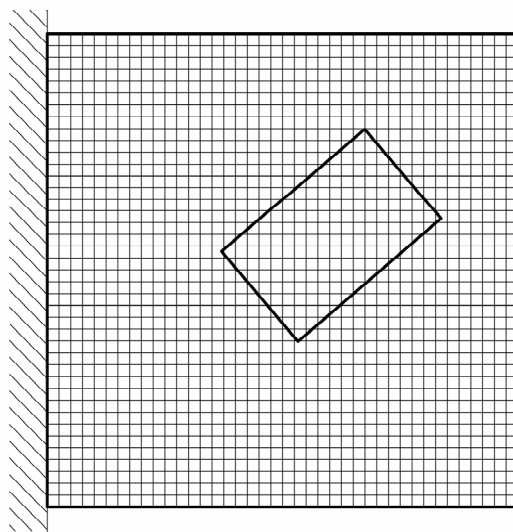
Са слике 4.2 јасно се види да, услед начина дефиниције математичког модела плоче, постоји проблем интеграције самог А-С пара у структуру коначних елемената. Наиме, ивице А-С пара секу коначне елементе. Овај проблем је решен на следећи начин: уколико се центар коначног елемента налази унутар или на граници контуре коју образује А-С пар, овај елемент припада А-С пару. Облик А-С пара након дискретизације је приказан на слици 4.3.



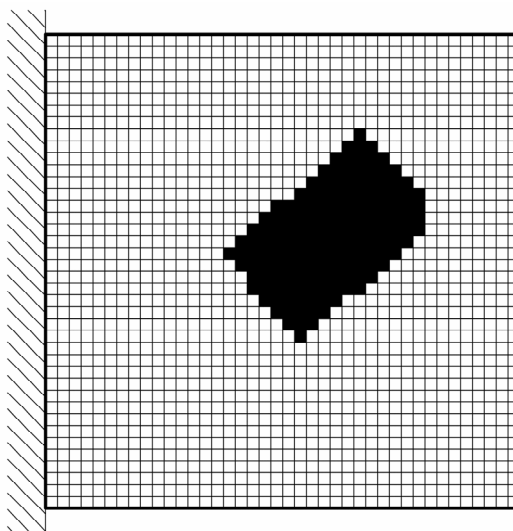
Слика 4.3. Композитна плоча подељена на 100 коначних елемената са дискретизовани А-С паром

Уколико се упореде слике 4.3 и 4.2, може се видети да постоје одступања у облицима А-С пара услед величине коначних елемената.

Дискретизације за 1600 (40x40) коначних елемената приказане су на сликама 4.4 и 4.5.



Слика 4.4. Композитна плоча са i -тим актуатор-сензор паром подељена на 1600 коначних елемената



Слика 4.5. Композитна плоча подељена на 1600 коначних елемената са дискретизованим А-С паром

Упоредивајући слике 4.5 и 4.4, може се закључити да је одступање у облику знатно мање него у претходном случају.

Повећавањем броја коначних елемената, одступања у облицима недискретизованих и дискретизованих актуатор-сензор парова се смањују. Такође, овим повећањем повећава се и број степени слободe, тако да се повећава време формирање глобалне матрице од локалних матрица. Да би се имао увид колико је времена потребно за сваку тачку приликом решавања алгоритма оптимизације, анализирана су следећа времена:

t_1 - време потребно за формирање глобалне еластичне матрице крутости и глобале матрице маса,

t_2 - време потребно за формирање глобалне пиезоелектричне матрице крутости актуатора и сензора,

t_3 - време потребно за формирање глобалне диелектричне матрице крутости актуатора и сензора

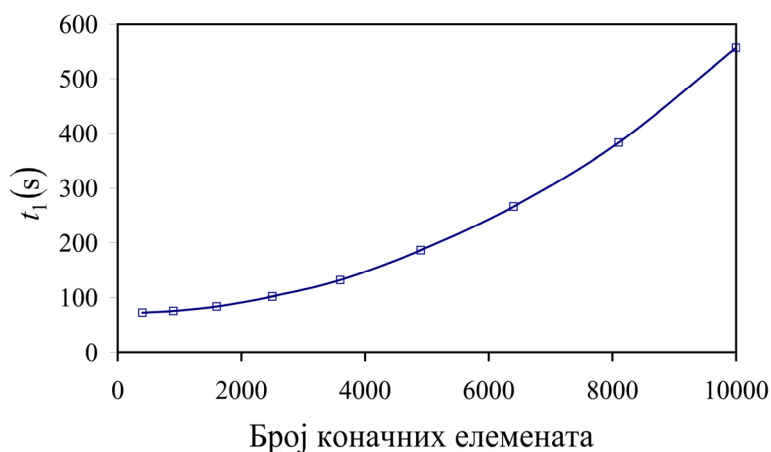
t_4 - време потребно за одређивање модалне матрице и сопствених фреквенција Рејли-Риц апроксимативном методом за првих 6 модова осциловања.

Анализа је вршена за плочу са конфигурацијом слојева $(90^\circ/0^\circ/90^\circ/0^\circ)_s$, која је дефинисана у глави 3, а положаји актуатор-сензор парова су изабрани случајно. Узимани су у обзир следећи бројеви коначних елемената: 20^2 , 30^2 , 40^2 , 50^2 , 60^2 , 70^2 , 80^2 , 90^2 и 100^2 (свака страница плоче је једнако подељена тако да се добијају квадратни елементи). За сваки број коначних елемената је узето 5 случајно изабраних конфигурација актуатор-сензор парова и приказано је средње време. У табели 4.1 приказана су наведена времена у зависности од броја коначних елемената.

Табела 4.1. Времена потребна за склапање локалних матрица у глобалне и одређивање модалне матрице и сопствених фреквенција

Број КЕ	$t_1(s)$	$t_2(s)$	$t_3(s)$	$t_4(s)$	$\sum t_i(s)$
20^2	72.384	9.1	0.00544	0.228	81.717
30^2	75.412	9.118	0.0157	0.574	85.12
40^2	83.859	9.21	0.03	1.098	94.087
50^2	101.924	9.35	0.055	1.789	113.118
60^2	131.743	9.533	0.1	2.769	144.145
70^2	186.289	9.867	0.195	4.032	200.383
80^2	266.014	10.314	0.267	5.691	282.268
90^2	383.038	10.412	0.33	7.256	401.036
100^2	556.237	11.81	0.712	10.528	579.287

Из табеле 4.1 може се видети да највише времена потроши за склапања глобалне матрице маса и глобалне еластичне матрице крутости, знатно више него за остале операције. На слици 4.6 графички је приказана зависност времена потребног за склапање глобалне матрице маса и глобалне еластичне матрице крутости од броја коначних елемената.



Слика 4.6. Зависност времена потребног за формирање глобалне еластичне матрице крутости и глобалне матрице маса од броја коначних елемената

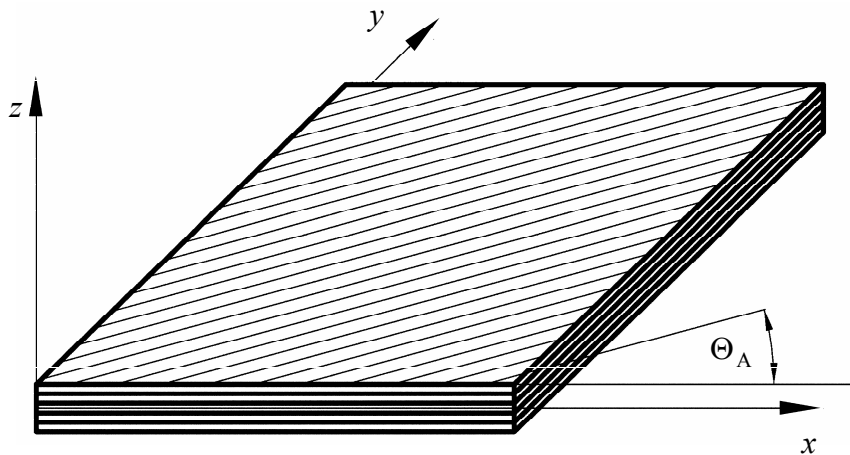
Са слике 4.6 може се видети да са порастом броја коначних елемената, време потребно за склапање глобалне матрице маса и глобалне еластичне матрице крутости расте експоненцијално.

4.5 Утицај оријентације актуаторског слоја на управљивост

Овде ће бити разматране композитне плоче различитих оријентација, чији су подаци приказани у потпоглављу 3.8. Како ће се користити композитни актуатор-сензор парови, важно је оценити утицај оријентације актуатора на управљивост. Анализираће се утицаји оријентација пиезоелектричних слојева на управљивост, при чему ће пиезоелектрични слој прекривати целу површину плоче. Влакна пиезоелектричних актуатора и сензора су направљена од PZT5A, а подаци о материјалу актуатора и сензора приказани су у табели 4.2. Разматра се случај када је актуатор на једној страни, а сензор на супротној страни плоче. На слици 4.7 приказана је плоча са обележеном оријентацијом пиезоелектричног слоја.

Табела 4.2. Материјалне особине актуатора и сензора

Материјалне особине	PZT5A влакнасти композит
Модул еластичности, Y_1 (GPa)	30.2
Модул еластичности, Y_2 (GPa)	14.9
Модул смицања, G_{13} (GPa)	5.13
Модул смицања, G_{23} (GPa)	5.13
Пуасонов коефицијент, ν_{12}	0.45
Густина, ρ (kg/m ³)	4600
Пиезоелектрична константа, e_{31} (C/m ²)	9.41
Пиезоелектрична константа, e_{32} (C/m ²)	0.166
Диелектрична константа, k_{33} (F/m)	6.1×10^{-9}



Слика 4.7. Композитна плоча са означеном оријентацијом пиезоелектричног слоја

За нумеричку анализу, коришћена је мрежа коначних елемената 25x25.

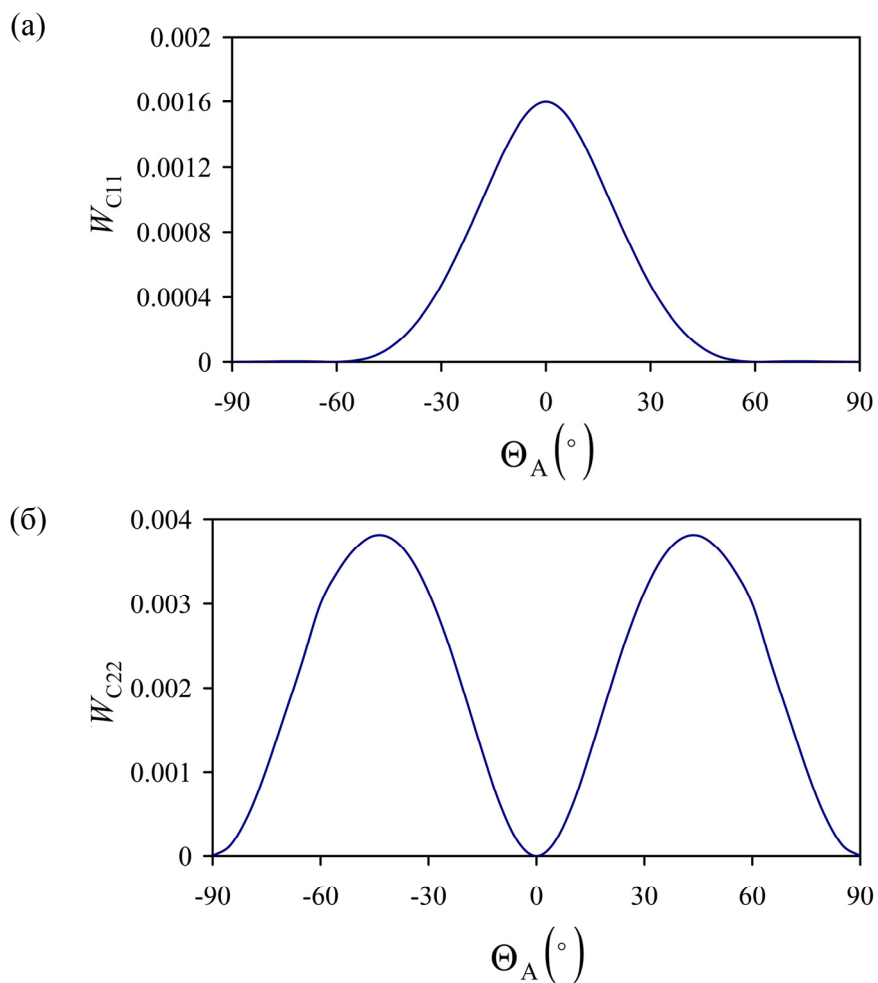
4.5.1 Композитна плоча – оријентација $(90^\circ/0^\circ/90^\circ/0^\circ)_s$

Код плоче са оваквом конфигурацијом слојева, сензорски слој је постављен на доњој страни, а актуаторски на горњој страни. Оба слоја су симетрично оријентисана у односу на средњу површ. Због симетричности матичне структуре, није разматран случај када је актуатор на доњој страни. Угао оријентације пиезоелектричних слојева вариран је у опсегу $[-90^\circ \ 90^\circ]$. На слици 4.8 приказана је зависност дијагоналних чланова Грамијанове матрице управљивости за првих шест модова осциловања од угла оријентације актуаторског слоја. Слика 4.9 представља зависност индекса перформанси од оријентације актуаторског слоја.

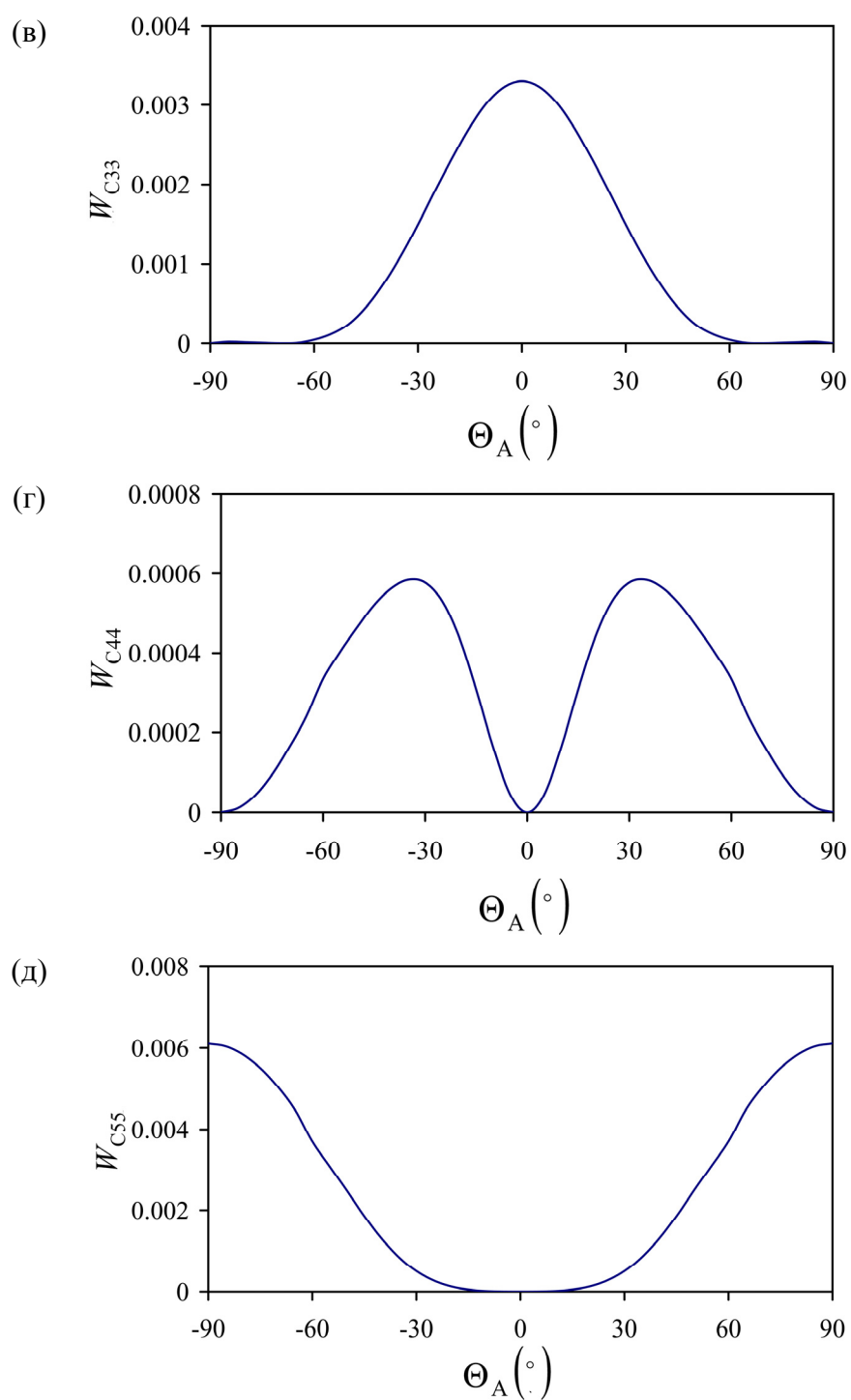
Са слике 4.10 може се видети да су, услед симетрије слојева плоче, дијагонални чланови Грамијанове матрице управљивости и индекс перформанси једнаки за супротне углове оријентације $(+\Theta_A$ и $-\Theta_A$). Ако се упореди слика 4.8 са сликом 3.5, јасно се види да се максимална управљивост за одређени мод остварује када се влакна актуаторског слоја усмере у смеру деформације плоче која се јавља код одговарајућег мода. За први и трећи мод (оба су савојна), максимална управљивост је за угао 0° , јер је то правац пружања деформације за те модове, док за угао 90° управљивост не постоји јер због оријентације пиезоелектричног актуатора не долази до деформације његових влакана.

Насупрот томе, максимална управљивост код петог и шестог мода остварена је за угао 90° , док је за угао 0° управљивост знатно мања. Што се тиче торзионих модова (други и четврти), управљивост не постоји за углове 0° и 90° . Код другог мода, максимална управљивост је остварена за угао $\pm 45^\circ$, а код четвртог мода за угао $\pm 35^\circ$. Разлог непостојања управљивости код одређених оријентација за торзионе модове дат је у раду [76]. Наиме, уколико модална линија представља симетралу пиезоелектричног актуатора, тада је управљивост тог актуатора једнака нули.

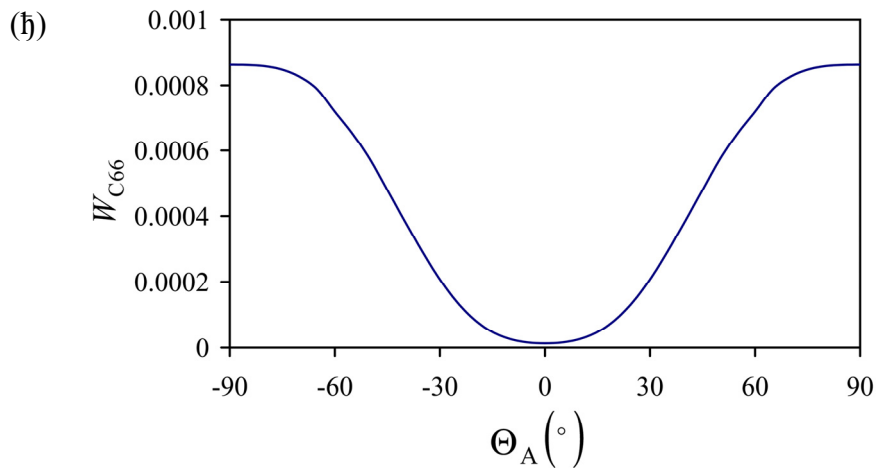
Због дефиниције индекса перформанси, његова вредност је 0 за углове 0° и 90° , а максималну вредност има за углове $\pm 40^\circ$ (слика 4.9).



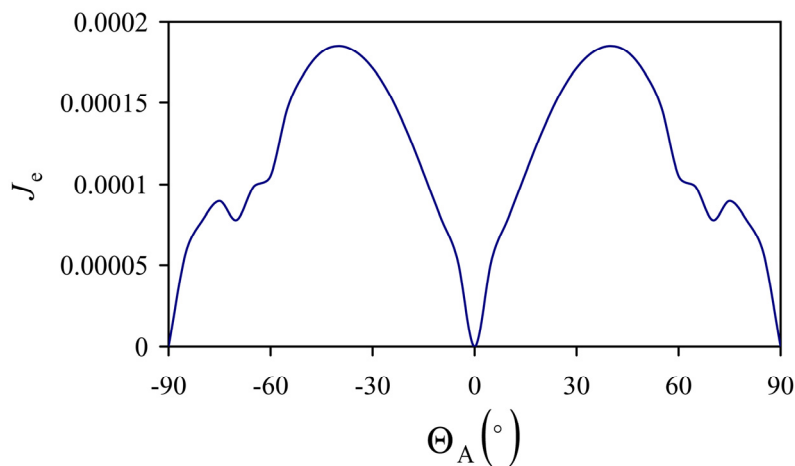
Слика 4.8. (наставља се...)



Слика 4.8. (наставља се...)



Слика 4.8. Зависност дијагоналних чланова Грамијанове матрице управљивости за првих шест модова осциловања од угла оријентације актуаторског слоја укљештене плоче са конфигурацијом слојева $(90^\circ/0^\circ/90^\circ/0^\circ)_S$: (а) први мод, (б) други мод, (в) трећи мод, (г) четврти мод, (д) пети мод, (ђ) шести мод



Слика 4.9. Зависност индекса перформанси од угла оријентације актуаторског слоја укљештене плоче са конфигурацијом слојева $(90^\circ/0^\circ/90^\circ/0^\circ)_S$

4.5.2 Композитна плоча – оријентација $(90^\circ/0^\circ/90^\circ/0^\circ/90^\circ/0^\circ/90^\circ/0^\circ)$

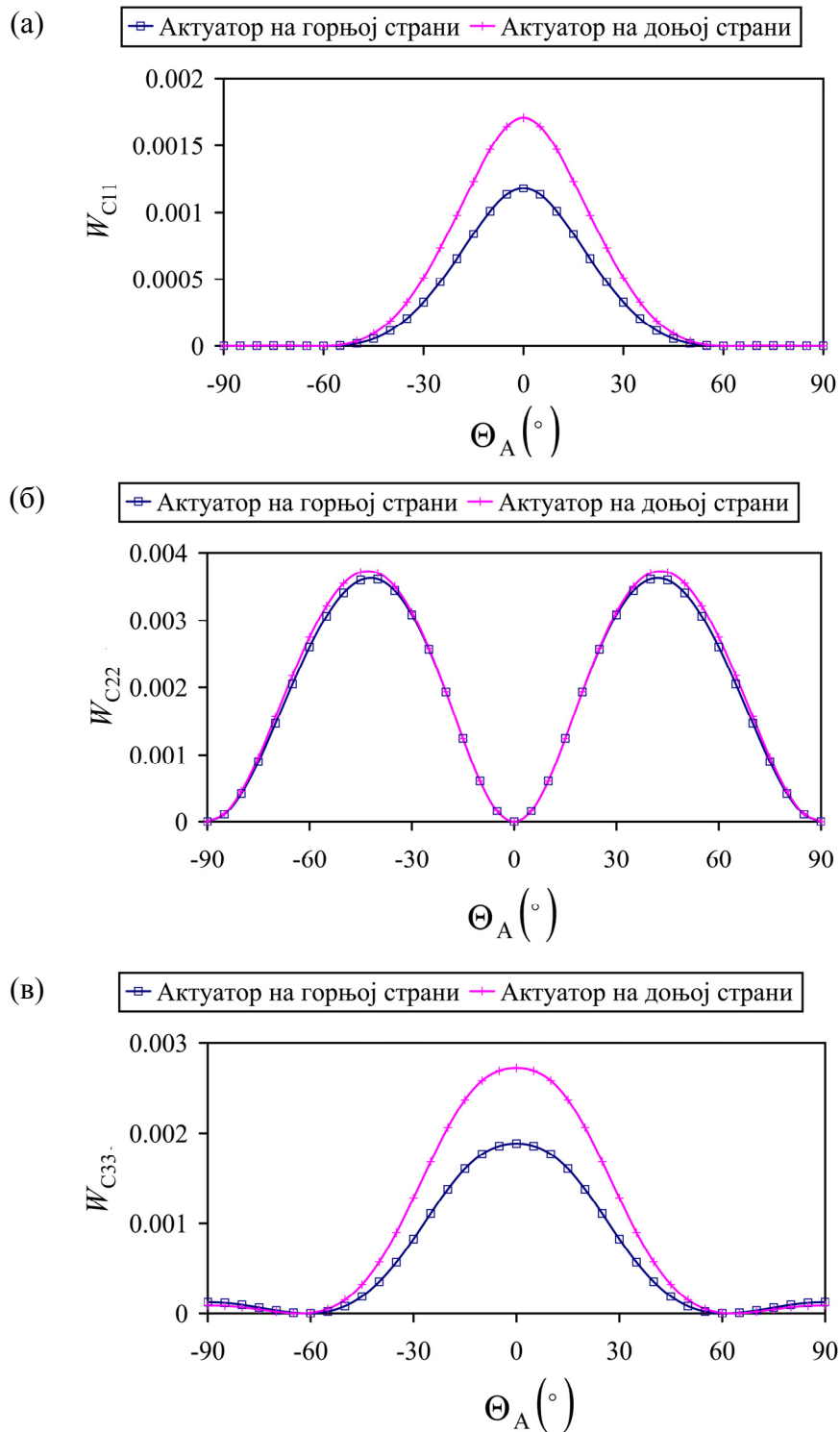
Код плоче са оваквом конфигурацијом слојева, анализирани су случајеви када је актуатор на горњој и када је актуатор на доњој страни плоче. Актуаторски и сензорски слој су, као и у претходном случају, симетрично постављени један у односу на други. Угао оријентације пиезоелектричних слојева вариран је у опсегу $[-90^\circ \ 90^\circ]$. На слици 4.10 приказана је зависност дијагоналних чланова Грамијанове матрице управљивости за првих шест модова осциловања од угла

оријентације актуаторског слоја. Слика 4.11 представља зависност индекса перформанси од оријентације актуаторског слоја.

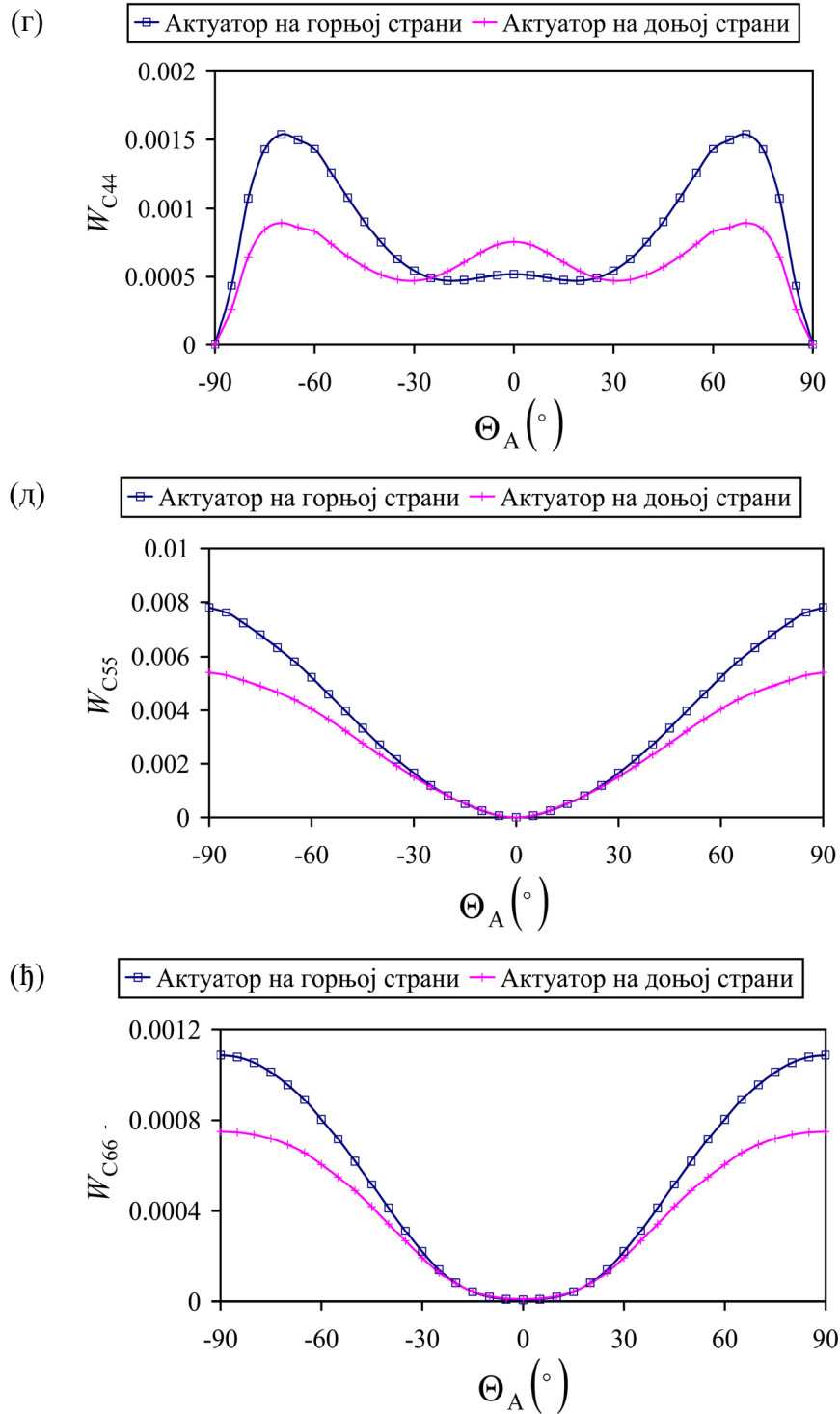
На основу слика 4.12 и 3.6, може се донети закључак исти као и у претходном случају, тј., да се максимална управљивост остварује када се влакна актуаторског слоја усмере у смеру деформације плоче која се јавља код одговарајућег мода.

Са слике 4.10 и 4.11 може се видети да су дијагонални чланови Грамијанове матрице управљивости и индекс перформанси једнаки за супротне углове оријентације ($+\Theta_A$ и $-\Theta_A$). За разлику од претходног случаја, услед антисиметричности, постоји знатна разлика у зависности да ли се актуатор поставља на горњој или на доњој страни плоче. Код првог и другог мода, управљивост је знатно већа уколико се актуатор постави на доњу страну плоче (максимална вредност је за 0°), а код четвртог, петог и шестог мода, управљивост је знатно већа уколико се актуатор постави на доњу страну плоче. Максимална вредност за четврти мод остварује се за оријентацију -70° , а за пети и шести за угао од 90° . Код другог мода, управљивост је незнатно већа ако се актуаторски слој постави на доњу страну, а максимум се остварује за угао оријентације -45° . Другим речима, код овог типа оријентације слојева већа управљивост се остварује са оне стране где влакна актуаторског слоја заклапају већи угао са влакнима суседног слоја. Разлог што се ово дешава је у томе да, услед антисиметричности, долази то тзв. савојно-истезног ефекта. Услед деформације савијања или увијања долази до истезања (или сабијања) плоче, тако да је апсолутна вредност деформација већа са једне стране плоче, што доводи до несиметричне управљивости.

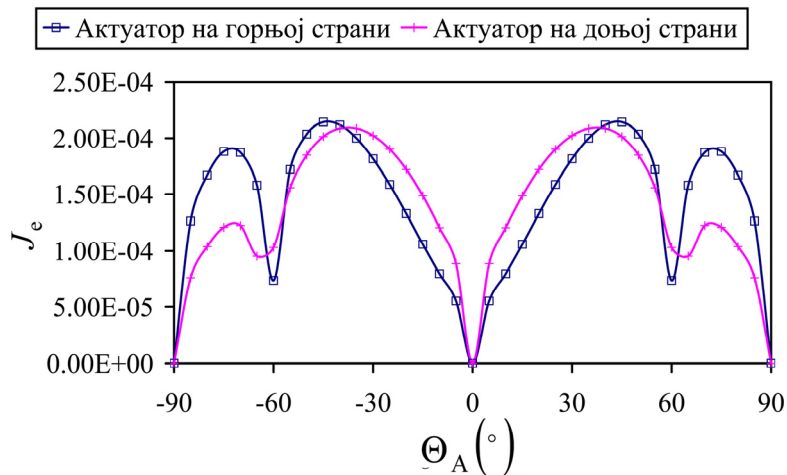
Што се тиче индекса перформанси, његова вредност је 0 за углове 0° и 90° (слика 4.11). За углове између -35° и 35° индекс перформанси је већи када је актуатор на доњој страни. За остале углове оријентације индекс перформанси има веће вредности када је актуатор на горњој страни плоче. Највећа вредност се постиже за углове $\pm 40^\circ$ и то када је актуатор на горњој страни плоче.



Слика 4.10. (наставља се...)



Слика 4.10. Зависност дијагоналних чланова Грамијанове матрице управљивости за првих шест модова осциловања од угла оријентације актуаторског слоја укљештене плоче са конфигурацијом слојева ($90^\circ/0^\circ/90^\circ/0^\circ/90^\circ/0^\circ/90^\circ/0^\circ$): (а) први мод, (б) други мод, (в) трећи мод, (г) четврти мод, (д) пети мод, (љ) шести мод



Слика 4.11. Зависност индекса перформанси од угла оријентације актуаторског слоја укљештене плоче са конфигурацијом слојева ($90^\circ/0^\circ/90^\circ/0^\circ/90^\circ/0^\circ/90^\circ/0^\circ$)

4.5.3 Композитна плоча – оријентација ($45^\circ/-45^\circ/45^\circ/-45^\circ/45^\circ/-45^\circ/45^\circ/-45^\circ$)

Код плоче са оваквом конфигурацијом слојева, анализирани су случајеви када је актуатор на горњој и када је актуатор на доњој страни плоче. Актуаторски и сензорски слојеви су, као и у претходна два случаја, симетрично постављени један у односу на други. Угао оријентације пиезоелектричних слојева вариран је у опсегу $[-90^\circ \ 90^\circ]$. На слици 4.12 приказана је зависност дијагоналних чланова Грамијанове матрице управљивости за првих шест модова осциловања од угла оријентације актуаторског слоја. Слика 4.13 представља зависност индекса перформанси у од оријентације актуаторског слоја.

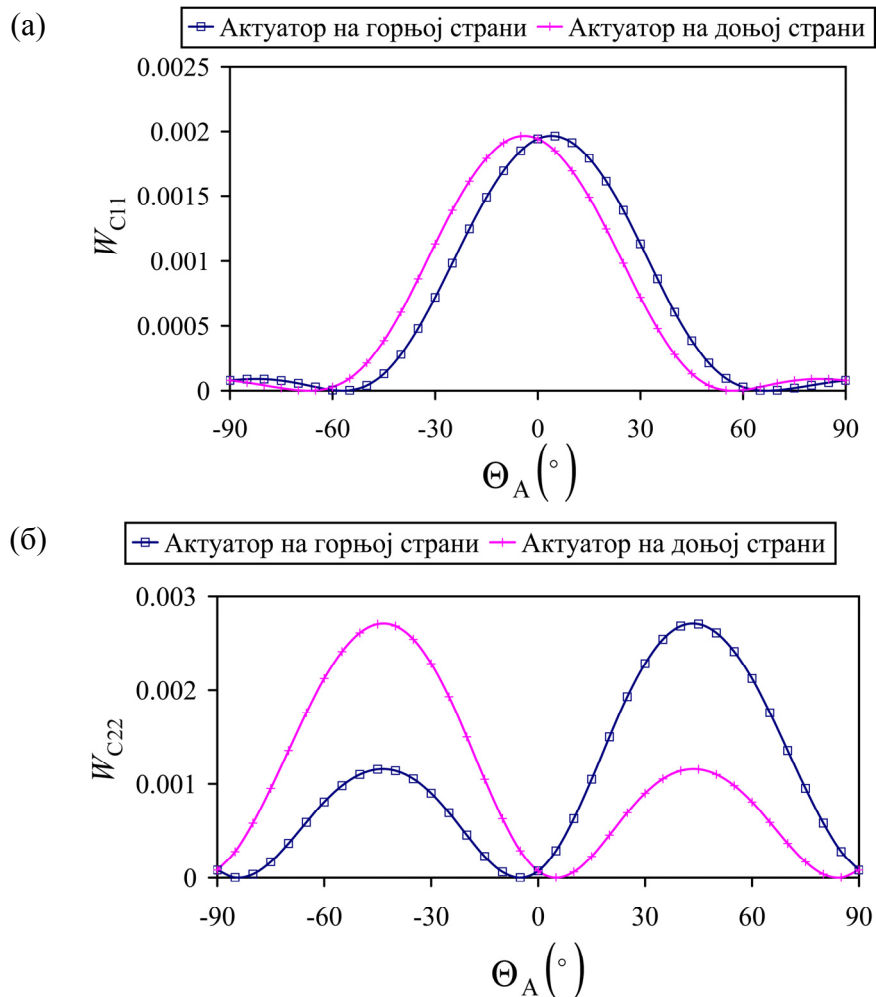
Упоредјујући слике 4.12 и 3.7, може се донети исти закључак као и у претходна два случаја, тј., да се максимална управљивост остварује када се влакна актуаторског слоја усмере у смеру деформације плоче која се јавља код одговарајућег мода.

Са слике 4.12 може се видети да, за разлику од претходна два случаја, дијагонални чланови Грамијанове матрице управљивости и индекс перформанси нису једнаки за супротне углове оријентације ($+\Theta_A$ и $-\Theta_A$). Ово је најизраженије код увојних модова (други и пети), док је код савојних модова ова појава много мање изражена. Боља управљивост се добија када је оријентација актуаторског слоја супротна од оријентације слоја са којим је актуаторски слој у

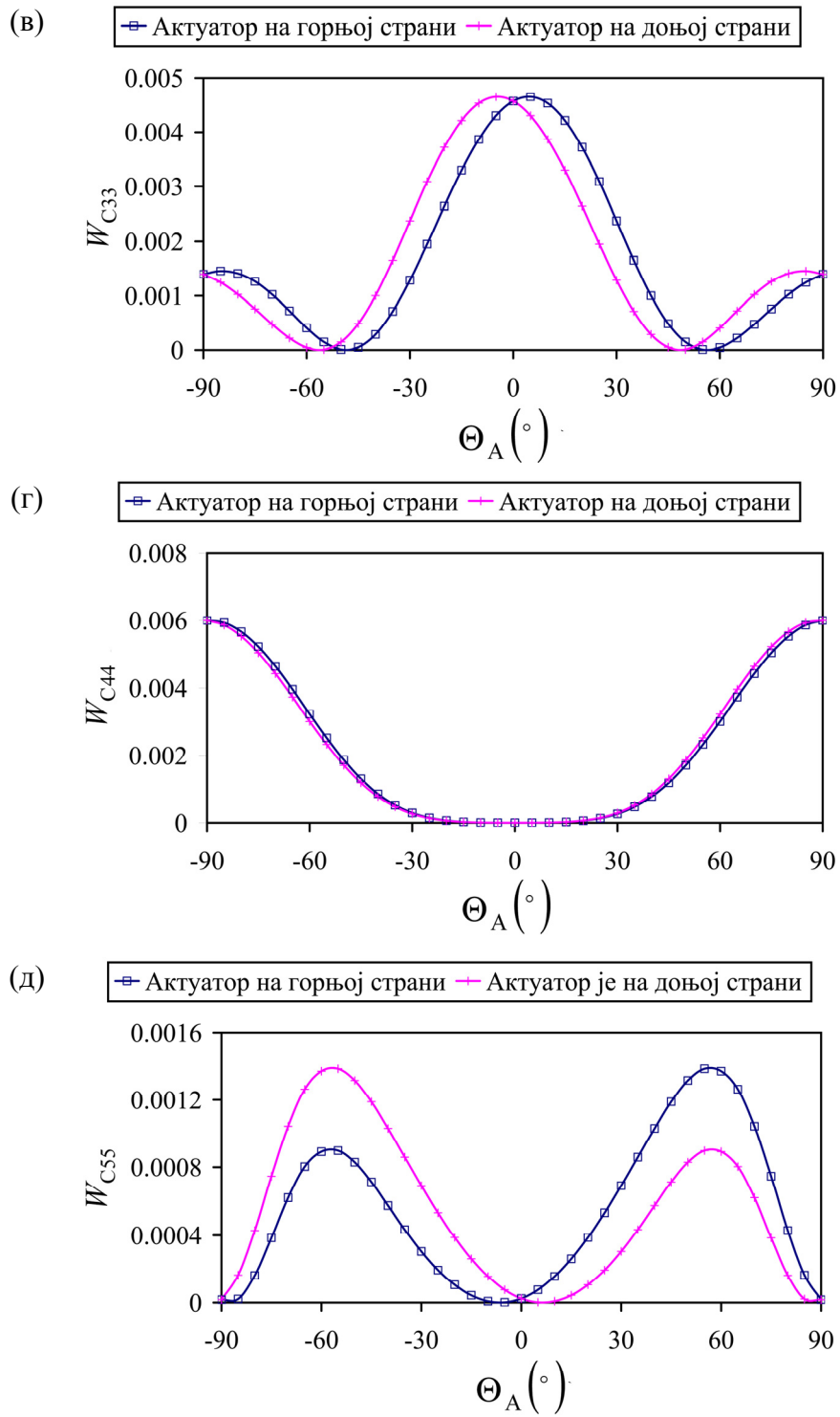
додиру. Разлог због чега долази до овога је управо савојно-истезни ефекат описан у претходном случају.

Уколико се анализира место постављања актуаторског слоја (на горњој или доњој страни), може се видети да су управљивости једнаке за супротне углове (управљивост у случају када је актуаторски слој на горњој страни под углом $+ \Theta_A$ једнака је управљивости у случају када је актуаторски слој на доњој страни под углом $- \Theta_A$, и обрнуто).

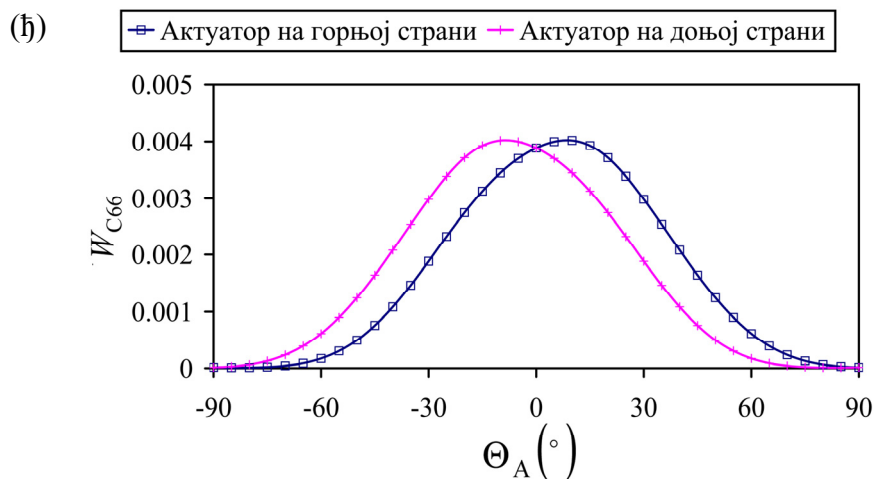
Са слике 4.13 може се видети да индекс перформанси има највећу вредност за угао 25° у случају када се актуатор налази на горњој страни и за угао -25° у случају када се актуатор налази на доњој страни плоче.



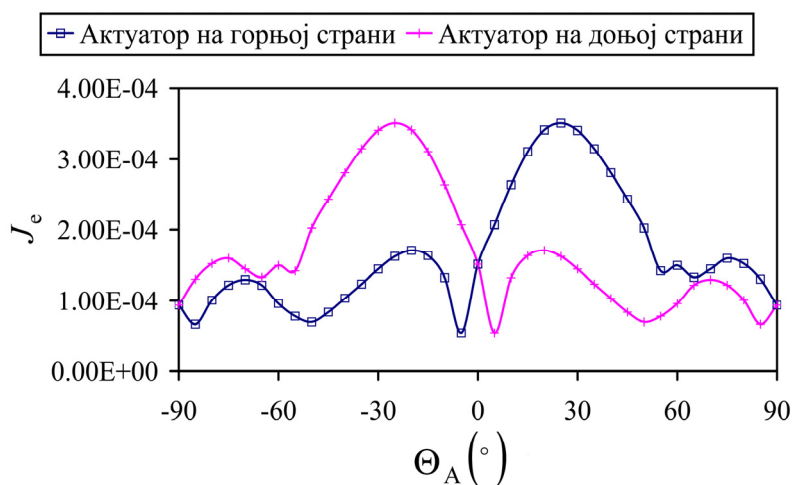
Слика 4.12. (наставља се...)



Слика 4.12. (наставља се...)



Слика 4.12. Зависност дијагоналних чланова Грамијанове матрице управљивости за првих шест модова осциловања од угла оријентације актуаторског слоја укљештене плоче са конфигурацијом слојева ($45^{\circ}/-45^{\circ}/45^{\circ}/-45^{\circ}/45^{\circ}/-45^{\circ}/45^{\circ}/-45^{\circ}$): (а) први мод, (б) други мод, (в) трећи мод, (г) четврти мод, (д) пети мод, (ђ) шести мод



Слика 4.13. Зависност индекса перформанси од угла оријентације актуаторског слоја укљештене плоче са конфигурацијом слојева ($45^{\circ}/-45^{\circ}/45^{\circ}/-45^{\circ}/45^{\circ}/-45^{\circ}/45^{\circ}/-45^{\circ}$)

4.6 Оптимизација ројем честица

Инспирација за оптимизацију ројем честица нађена је у друштвеном понашању јата риба, ројева инсеката и јата птица. Представљена је у раду [126]. Сама идеја оптимизационе методе је да је свака честица представљена координатама које представљају потенцијално решење оптимизационог проблема. За дату i -ту честицу, њена позиција је представљена вектором $(p_i) = (p_{i1} \ p_{i2} \ \dots \ p_{id} \ \dots \ p_{im})$, где свака координата представља параметар који се оптимизује, а m представља број тих параметара. На тренутни положај сваке честице утиче три фактора: брзина $(v_i) = (v_{i1} \ v_{i2} \ \dots \ v_{id} \ \dots \ v_{im})$, најбољи положај икада постигнут те честице (најбољи локални положај), који је дефинисан најбољом вредности функције циља те честице, и најбољи положај достигнут од свих честица (најбољи глобални положај), који је одређен најбољом вредности функције циља у свим претходним итерацијама. Почетна популација честица се случајно одабере, а положај сваке честице се мења на следећи начин:

$$v_{id}^{k+1} = \chi v_{id}^k + c_1 \text{rand}_1 (lbest_{id} - p_{id}^k) + c_2 \text{rand}_2 (gbest_d - p_{id}^k), \quad (4.13)$$

$$p_{id}^{k+1} = p_{id}^k + v_{id}^{k+1}, \quad i = 1, \dots, n_{\text{POP}} \quad d = 1, \dots, m \quad (4.14)$$

где χ представља фактор инерције, c_1 је когнитивни фактор, c_2 је социјални фактор, rand_1 and rand_2 су случајни бројеви између 0 и 1, индекс k означава број итерације, n_{POP} је број популације, а $lbest$ и $gbest$ су најбољи локални и глобални положај честице.

У овом раду, сваки актуатор је одређен величинама x_i , y_i , a_i , b_i , Θ_i , које су дефинисане у потпоглављу 4.3. Према томе, координате i -те честице у k -тој итерацији могу се записати у следећем облику:

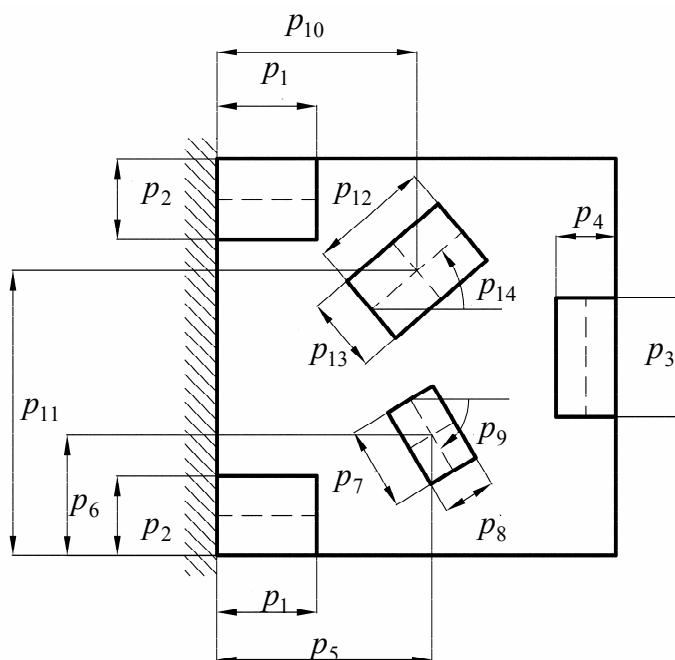
$$\begin{bmatrix} p_i^k \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_{i1}^k & y_{i1}^k & a_{i1}^k & b_{i1}^k & \Theta_{i1}^k \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ x_{iN_p}^k & y_{iN_p}^k & a_{iN_p}^k & b_{iN_p}^k & \Theta_{iN_p}^k \end{bmatrix}. \quad (4.15)$$

4.7 Оптимизација величине и положаја пиезоелектричних актуатор-сензор парова: нумерички део

У реалним случајевима није изводљиво прекривање целе структуре једним актуаторским, односно сензорским слојем из два разлога. Први разлог је повећање масе структуре и промена њених динамичких особина. Други разлог је то што онда постоји само један актуатор, што значи да у случају отказа тог актуатора, структура више неће бити активна. Из наведених разлога, на структуру се поставља већи број мањих актуатора.

У овом делу показује се оптимизација величине, положаја и оријентације актуатор-сензор парова на композитним плочама на основу критеријума дефинисаним у претходним поглављима. Разматраће се пригушење првих 6 модова осциловања. Произвољно је узето 5 актуатор-сензор парова. Актуатори и сензори су истих димензија и оријентација, а постављени су на истом положају само са супторних страна плоче, тако да се оптимизује само актуатор на основу критеријума представљеног у поглављу 4.3.

Са слика 3.5 – 3.7 јасно се вида да се за поједине модове осциловања максимална управљивост постиже када је актуатор оријентисан под углом од 0° , а за неке модове осциловања када је актуатор оријентисан под углом од 90° . Да би се смањио број параметара који се оптимизује, а у складу са претходном констатацијом, положаји три актуатора су фиксирана, и то: прва два актуатора су једнаких димензија, смештена су у корену плоче, на ивицама, и оријентисани су под углом од 0° . Трећи актуатор је смештен на средину слободног краја плоче и оријентисан је под углом од 90° (слика 4.14).



Слика 4.14. Параметри актуатора који се оптимизују

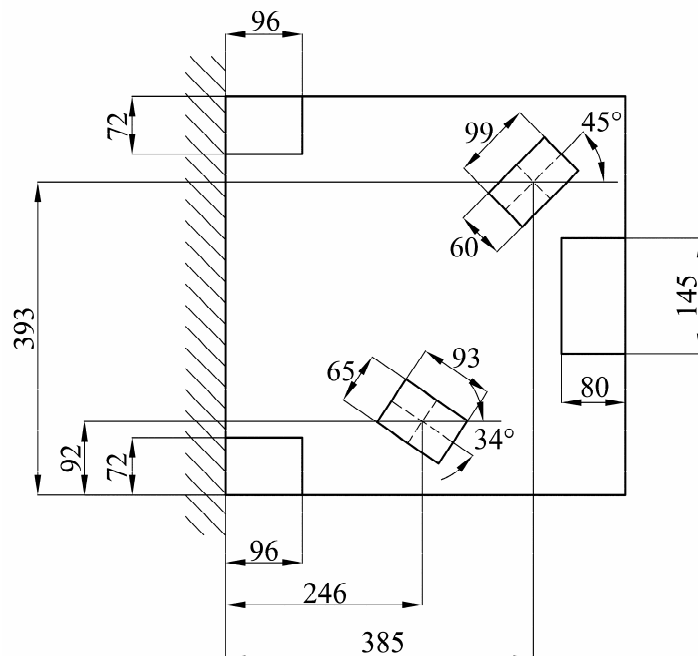
Подаци о плочама дати су у поглављу 3.7, а подаци о материјалу пиезоелектричних актуатора и сензора дати су у табели 4.1. Оптимизација је извршена за сва три начина слагања слојева.

Што се тиче параметара оптимизације ројем честица, у раду [45] показано је да се најбоља конвергенција добија када су когнитивни и социјални фактор једнаки: $c_1 = c_2 = 1.5$, тако да ће се ове вредности користити у оптимизацији. Инерцијални фактор (χ) ће бити линеарно мењан од 1 до 0.5 током итерација. Број случајно генерисаних честица је 100, а број итерација је 100.

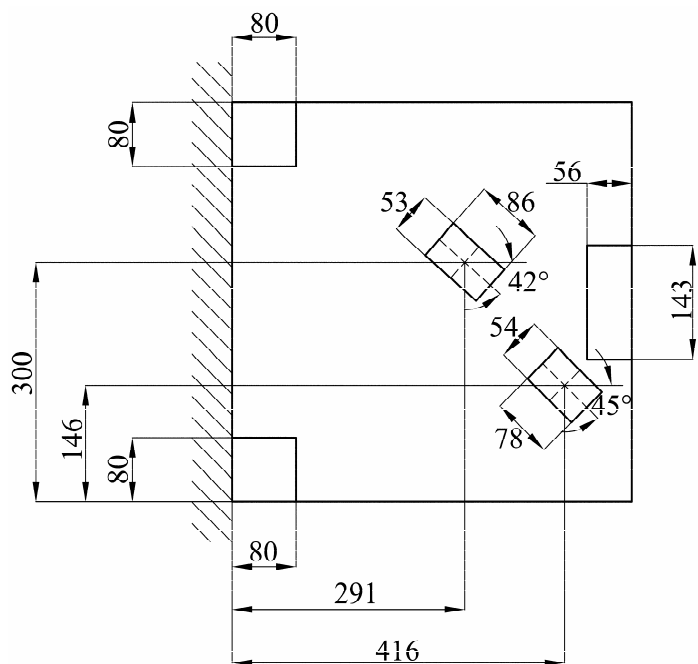
4.7.1 Оријентација $(90^\circ/0^\circ/90^\circ/0^\circ)_s$

Код ове плоче, актуатори су постављени на горњој површини, а сензори на доњој. Разматрана су три случаја покривености површина: 12% и 15%. Код покривености 12%, поред стандардних параметара којих треба одредити оптимизацијом, разматран је случај где су димензије актуатора непроменљиве са циљем да се испита како ови параметри утичу на циљну функцију и управљивост. У том случају, дужина једног актуатор-сензор пара је 100mm, а ширина је 60mm. У табели 4.3 и на сликама 4.15, 4.16 и 4.17 приказане су положаји и димензије

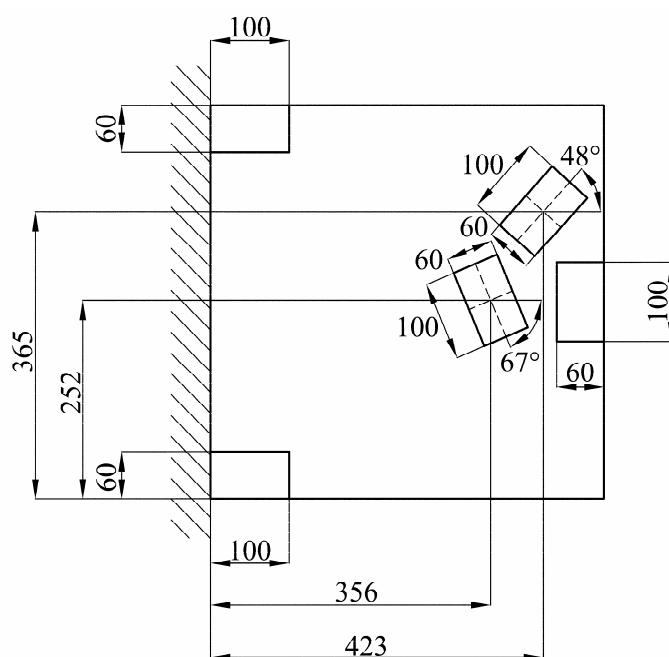
актуатор-сензор парова добијени оптимизацијом. Слика 4.18 приказује конвергенцију функције циља за сва три случаја покривености површина.



Слика 4.15. Димензије и положаји актуатор-сензор парова на плочи добијени оптимизацијом за покривеност површине 15%



Слика 4.16. Димензије и положаји актуатор-сензор парова на плочи добијени оптимизацијом за покривеност површине 12%

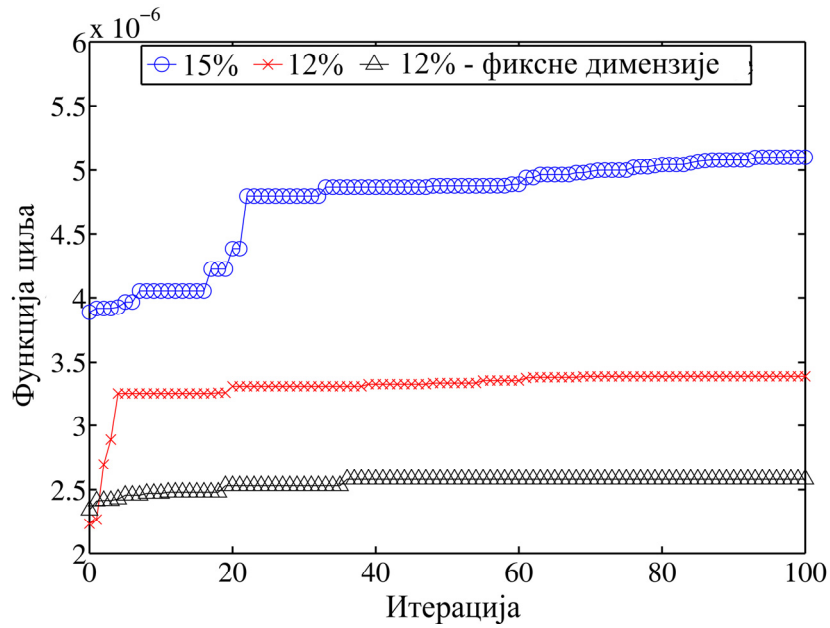


Слика 4.17. Положаји актуатор-сензор парова на плочи са фиксним димензијама добијени оптимизацијом за покривеност површине 12%

Табела 4.3. Положаји и димензије актуатор-сензор парова добијене оптимизацијом

	15%	12%	12% константне димензије
$p_1(mm)$	96	80	100*
$p_2(mm)$	72	80	60*
$p_3(mm)$	145	143	100*
$p_4(mm)$	80	56	60*
$p_5(mm)$	246	416	356
$p_6(mm)$	92	146	252
$p_7(mm)$	93	78	100*
$p_8(mm)$	65	54	60*
$p_9(^{\circ})$	-34	-45	-67
$p_{10}(mm)$	385	291	423
$p_{11}(mm)$	393	300	365
$p_{12}(mm)$	99	86	100*
$p_{13}(mm)$	60	53	60*
$p_{14}(^{\circ})$	45	-42	48

* Димензије су фиксне



Слика 4.18. Конвергенција функције циља

У табели 4.4 приказани су дијагонални чланови Грамијанове матрице управљивости и функција циља.

Табела 4.4. Дијагонални чланови Грамијанове матрице управљивости и функција циља

	15%	12%	12% константне димензије
$W_{C11} (\times 10^{-3})$	0.0148	0.0119	0.0108
$W_{C22} (\times 10^{-3})$	0.0392	0.03	0.03
$W_{C33} (\times 10^{-3})$	0.0517	0.0476	0.0311
$W_{C44} (\times 10^{-3})$	0.1137	0.0958	0.0875
$W_{C55} (\times 10^{-3})$	0.1977	0.1172	0.0976
$W_{C66} (\times 10^{-3})$	0.1884	0.1521	0.1209
$J_e (\times 10^{-6})$	5.1	3.3858	2.5806

Из табеле 4.4 може се видети да се са повећањем површине дела плоче коју покривају актуатори повећава управљивост сваког мода осциловања, као и то да

оптимизација само положаја, са унапред одређеним димензијама актуатор-сензор парова смањује управљивост сваког мода.

Постављање актуатор-сензор парова такође, у случају када нема активног пригушења вибрација, утиче на сопствене фреквенције структуре, и у табели 4.5 приказане су сопствене фреквенције првих 6 модова осциловања плоче пре и после постављања актуатор-сензор парова.

Табела 4.5. Сопствене фреквенције плоче пре и после постављања актуатор-сензор парова

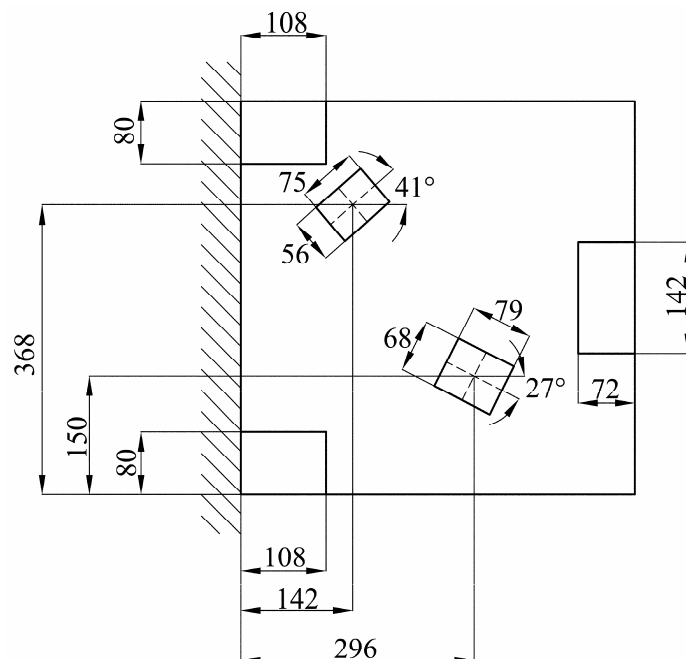
Мод	Без А-С парова	15%	12%	12% константне димензије
1	8.628	8.505	8.538	8.494
2	14.54	15.198	15.266	15.191
3	54.069	53.454	53.849	53.94
4	62.908	65.079	65.411	65.18
5	81.181	81.203	80.852	80.814
6	114.663	114.655	114.944	115.068

4.7.2 Оријентација ($90^{\circ}/0^{\circ}/90^{\circ}/0^{\circ}/90^{\circ}/0^{\circ}/90^{\circ}/0^{\circ}$)

Како су прва два актуатора оријантисана под углом од 0° , биће постављена на доњу страну јер, према слици 4.10, за оријентацију од 0° већа управљивост се постиже када је актуатор на доњој страни. Трећи актуатор је на горњој страни. Што се тиче четвртог и петог актуатора, уколико је оријентација између -30° и 30° , налазиће се на доњој страни, а у осталим случајевима на горњој.

На слици 4.19 и у табели 4.6 приказане су димензије, положаји и оријентације актуатор – сензор парова добијене оптимизацијом. Како је оријентација четвртог актуатора 27° он се налази на доњој површини, а пети актуатор је на горњој површини јер му је оријентација 41° . Слика 4.20 приказује конвергенцију функције циља.

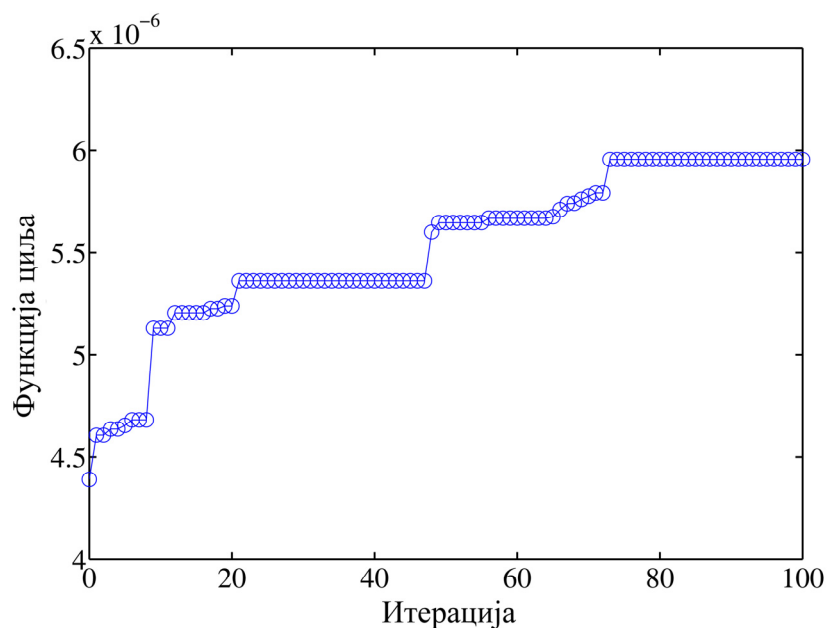
У табели 4.7 приказани су дијагонални чланови Грамијанове матрице управљивости и функција циља, а у табели 4.8 сопствене фреквенције првих 6 модова осциловања плоче пре и после интеграције актуатор-сензор парова.



Слика 4.19. Димензије и положаји актуатор-сензор и добијени оптимизацијом за плочу са конфигурацијом слојева $(90^\circ/0^\circ/90^\circ/0^\circ/90^\circ/0^\circ/90^\circ/0^\circ)$

Табела 4.6. Положаји и димензије актуатор-сензор парова добијене оптимизацијом

$p_1(mm)$	$p_2(mm)$	$p_3(mm)$	$p_4(mm)$	$p_5(mm)$	$p_6(mm)$	$p_7(mm)$
108	80	142	72	296	150	79
$p_8(mm)$	$p_9(^{\circ})$	$p_{10}(mm)$	$p_{11}(mm)$	$p_{12}(mm)$	$p_{13}(mm)$	$p_{14}(^{\circ})$
68	-27	142	368	75	56	41



Слика 4.20. Конвергенција функције циља

Табела 4.7. Дијагонални чланови Грамијанове матрице управљивости и функција циља

$W_{C11} (\times 10^{-3})$	$W_{C22} (\times 10^{-3})$	$W_{C33} (\times 10^{-3})$	$W_{C44} (\times 10^{-3})$	$W_{C55} (\times 10^{-3})$	$W_{C66} (\times 10^{-3})$	$J_e (\times 10^{-6})$
0.024	0.0508	0.08	0.121	0.1228	0.1744	5.955

Табела 4.8. Сопствене фреквенције плоче пре и после постављања актуатор-сензор парова

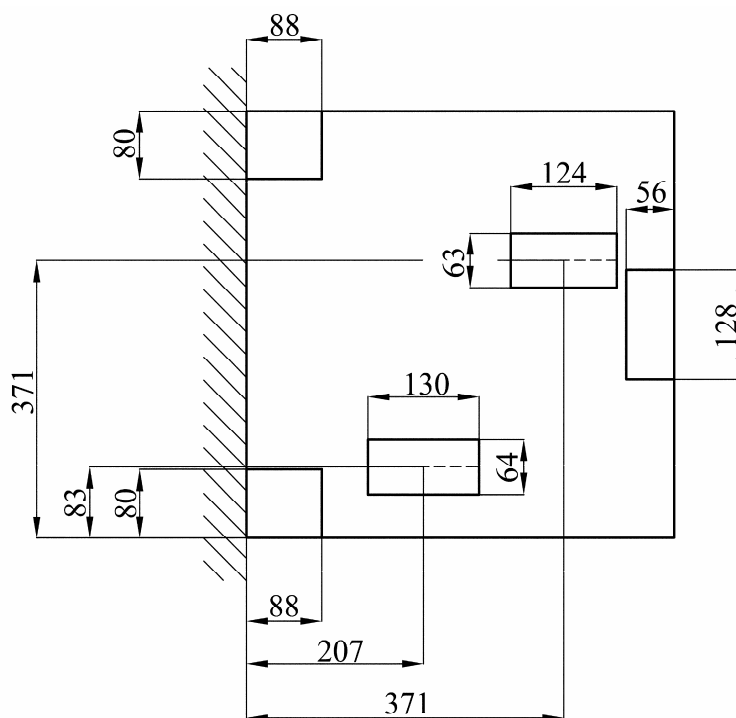
Мод	1	2	3	4	5	6
Без А-С парова	10.369	15.747	64.949	70.531	72.474	113.226
Са А-С паровима	10.325	16.603	63.606	71.541	73.936	112.737

4.7.3 Оријентација ($45^\circ/-45^\circ/45^\circ/-45^\circ/45^\circ/-45^\circ/45^\circ/-45^\circ$)

Прва три актуатора постављена су на горњој страни, а за четврти и пети, уколико је њихова оријентација негативна, налазиће се на доњој страни, а уколико је 0° или позитивна налазиће се на доњој страни.

На слици 4.21 и у табели 4.9 приказане су димензије, положаји и оријентације актуатор – сензор парова добијене оптимизацијом. Како су оријентације четвртог и петог актуатора 0° , они се налазе на горњој страни плоче. Слика 4.22 приказује конвергенцију функције циља.

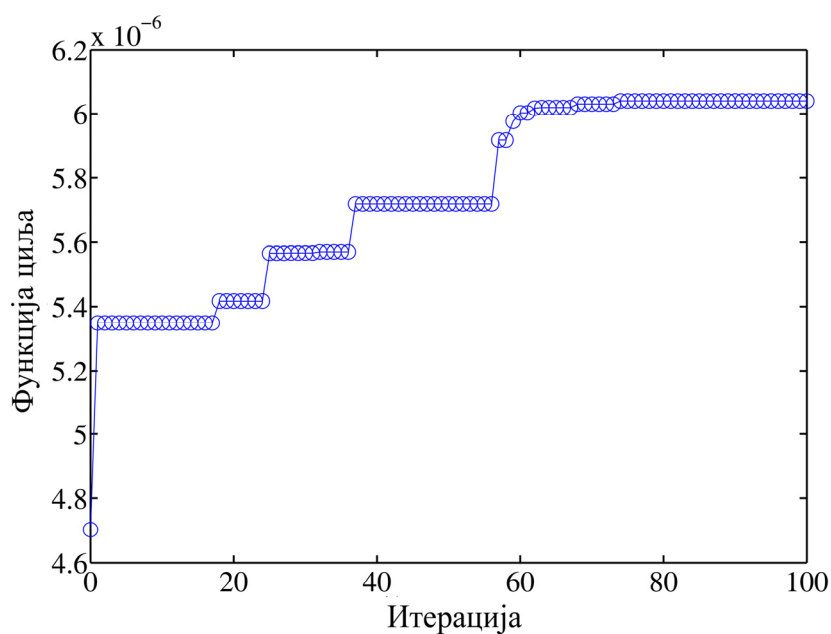
У табели 4.10 приказани су дијагонални чланови Грамијанове матрице управљивости и функција циља, а у табели 4.11 сопствене фреквенције првих 6 модова осциловања плоче пре и после интеграције актуатор-сензор парова.



Слика 4.21. Димензије и положаји актуатор-сензор и добијени оптимизацијом за плочу са конфигурацијом слојева ($45^\circ/-45^\circ/45^\circ/-45^\circ/45^\circ/-45^\circ/45^\circ/-45^\circ$)

Табела 4.9. Положаји и димензије актуатор-сензор парова добијене оптимизацијом

$p_1(mm)$	$p_2(mm)$	$p_3(mm)$	$p_4(mm)$	$p_5(mm)$	$p_6(mm)$	$p_7(mm)$
88	80	128	56	207	83	130
$p_8(mm)$	$p_9(^{\circ})$	$p_{10}(mm)$	$p_{11}(mm)$	$p_{12}(mm)$	$p_{13}(mm)$	$p_{14}(^{\circ})$
64	0	371	375	124	63	0



Слика 4.22. Конвергенција функције циља

Табела 4.10. Дијагонални чланови Грамијанове матрице управљивости и функција циља

$W_{C11} (\times 10^{-3})$	$W_{C22} (\times 10^{-3})$	$W_{C33} (\times 10^{-3})$	$W_{C44} (\times 10^{-3})$	$W_{C55} (\times 10^{-3})$	$W_{C66} (\times 10^{-3})$	$J_e (\times 10^{-6})$
0.0198	0.0356	0.1438	0.0773	0.1323	0.2639	6.04

Табела 4.11. Сопствене фреквенције плоче пре и после уградње актуатор-сензор парова

Мод	1	2	3	4	5	6
Без А-С парова	7.012	25.814	41.186	69.696	84.667	125.914
Са А-С паровима	7.094	26.405	42.323	70.374	85.711	127.589

4.8 Закључак

У овој глави дефинисани су критеријуми оптимизације величине, положаја и оријентације пиезоелектричних актуатора базираних на Грамијановим матрицама управљивости. Испитан је утицај оријентације актуаторског слоја на управљивост првих шест модова осциловања за правоугану укљештену плочу за три случаја конфигурације слојева: $(90^\circ/0^\circ/90^\circ/0^\circ)_S$, $(90^\circ/0^\circ/90^\circ/0^\circ/90^\circ/0^\circ/90^\circ/0^\circ)$ и $(45^\circ/-45^\circ/45^\circ/-45^\circ/45^\circ/-45^\circ/45^\circ/-45^\circ)$. Показало се да се максимална управљивост за одређени мод остварује када се влакна актуаторског слоја усмере у смеру деформације плоче која се јавља код одговарајућег мода. Код антисиметричних слагања слојева показало се да управљивост такође зависи и од тога да ли се актуаторски слој налази на горњој или доњој страни плоче. Разлог што се ово дешава је у томе да, услед антисиметричности, долази то тзв. савојно-истезног ефекта. Услед деформације савијања или увијања долази до истезања (или сабијања) плоче, тако да је апсолутна вредност деформација већа са једне стране плоче, што доводи до несиметричне управљивости. Већа управљивост постиже се када се актуаторски слој налази са оне стране плоче где влакна актуаторског слоја заклапају већи угао са влакнима суседног слоја плоче. У даљем раду, извршена је синтеза методе коначних елемената и оптимизације ројем честица и применом дефинисаних критеријума оптимизације, извршена је оптимизација величине, положаја и оријентације пет актуатор-сензор парова. Код плоче са оријентацијом $(90^\circ/0^\circ/90^\circ/0^\circ)_S$ испитан је утицај ограничења покривености површи плоча актуаторима, као и случај када су димензије актуатор-сензор парова непроменљиве током оптимизације. У случају непроменљивих димензија добијају

се мање управљивости за све модове осциловања. Како после уградње актуатор-сензор парова долази до промене сопствених фреквенција плоче, ова промена је табеларно приказана за сваку конфигурацију слагања слојева плоче.

Глава 5

Фази-логичко управљање

5.1 Увод

У разним инжењерским и научним областима инжењери и истраживачи сусрећу се са величинама и параметрима које карактерише неизвесност, непрецизност и вишезначност. Самим тим, приликом математичког моделирања одређеног проблема са параметрима који су недовољно дефинисани, субјективно процењени, неопходно је користити математичке методе које на задовољавајући начин третирају неодређеност, неизвесност или субјективност [127].

Најпогоднији математички апарат за третирање неодређености, неизвесности и субјективности је теорија фази („Fuzzy“) скупова. Ову теорију је представио Лотфи Задех [128] и од тада се примењује у разним областима. У инжењерским областима, теорија фази скупова најчешће се користи за управљање и оптимизацију.

5.2 Дефинисање фази-логичког управљачког система

Идеја фази-логичког управљања је у коришћењу лингвистичких наредби као основе за управљање. Употребом лингвистичких променљивих и „АКО-ОНДА“ правила, фази-логичко управљање се може синтетисати као било које конвенционално управљање. Синтеза фази-логичког управљачког система обухвата следеће кораке:

- фазификација
- дефинисање фази правила и принципа закључивања
- дефазификација

5.2.1 Фазификација

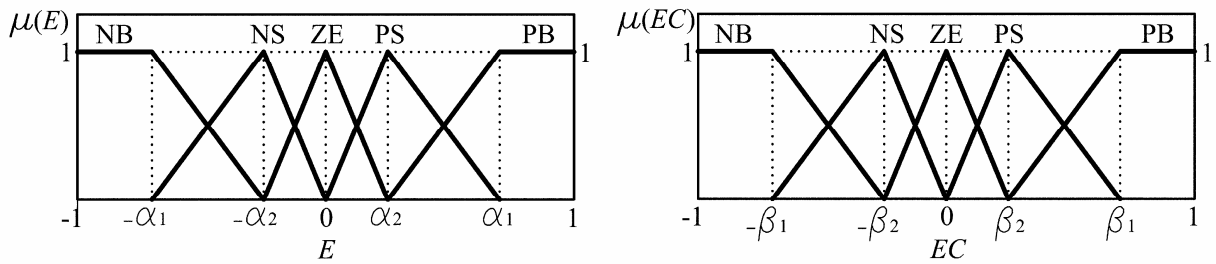
Прва фаза у синтези фази-логичког управљачког система је одабир излазних и излазних величина. Често се као улазне величине користе грешка и прираштај грешке. У овом истраживању, улази су модално померање (η), и први извод модалног померања по времену – модална брзина ($\dot{\eta}$).

Улазне величине у фази-логички управљачки систем су конкретни подаци прикупљени са сензора или естиматора стања. Ови подаци се преводе у фази променљиве кроз процес фазификације. Улази су дефинисани у фази простору као лингвистичке променљиве: NB (negative big – негативно велико), NS (negative small – негативно мало), ZE (zero - нула), PS (positive small – позитивно мало) and PB (positive big – позитивно велико). Домен фази улаза улазних величина је у опсегу $[-1 \ 1]$, тако да улази морају бити скалирани на начин да најмања вредност буде -1 , а највећа вредност 1 . Скалирање улаза и излаза се може извршити на следећи начин:

$$E = K_d \eta, EC = K_v \dot{\eta} \quad (5.1)$$

где E и EC представљају грешку и извод грешке по времену у фази скупу, а K_d и K_v представљају скалирајуће факторе помераја и брзине, респективно.

Следећа фаза је дефинисање функција припадности. У овом раду, трапезоидне функције припадности употребљене су за “NB” и “PB” фази променљиве, а троугаоне функције припадности за “NS”, “ZE” и “PB” фази променљиве. Функције припадности су параметризоване параметрима који ће се добити оптимизацијом. Параметризоване функције припадности су приказане на слици 5.1.



Слика 5.1. Параметризоване функције припадности улаза

5.2.2 Дефинисање фази правила и принципа закључивања

Следећи део код дефинисања фази-логичког управљачког система је дефинисање фази правила и принципа закључивања. Ова правила су обично базирана на одређеном искуству онога ко дизајнира управљачки систем и могу се представити помоћу “АКО-ОНДА” правила. Два највише коришћена принципа закључивања су Мамдани и Такаги-Сугено-Канг (ТСК) принцип закључивања [129].

Мамдани принцип закључивања

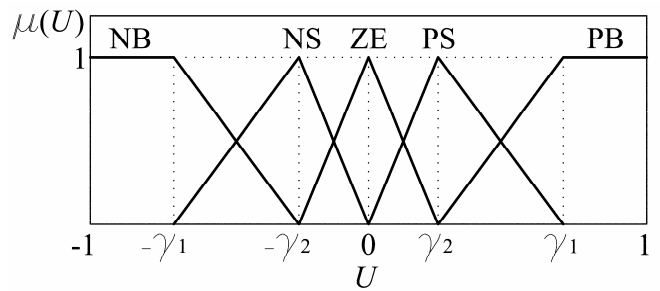
Према Мамданијевом принципу закључивања, i -то правило закључивања се може записати на следећи начин:

$$R^i : \text{ако } E \text{ је } A_i \text{ и } EC \text{ је } B_i \text{ онда } U \text{ је } C_i, \quad i = 1, \dots, N_R \quad (5.2)$$

где су A_i , B_i и C_i лингвистичке вредности фази променљивих, а N_R представља број фази правила. Према изразу (5.2) и узимајући у обзор број фази лингвистичких променљивих за сваку улазну величину, може се закључити да је број фази правила 25. Ова правила су приказана у табели 5.1. Функције припадности излаза су такође параметризоване на исти начин као улаз, и приказани су на слици 5.2.

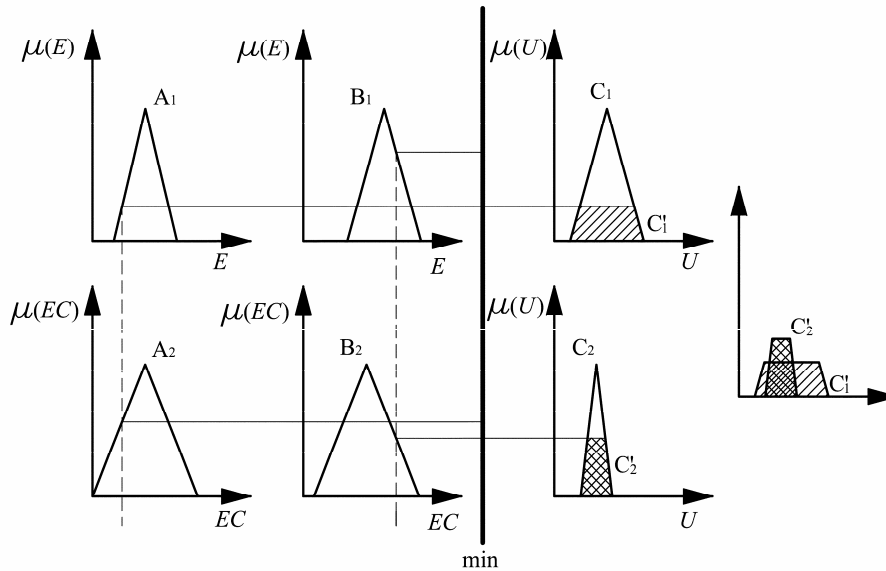
Табела 5.1. Правила закључивања за фази-логички управљачки систем базиран на Мамданијевом принципу закључивања

		EC				
		NB	NS	ZE	PS	PB
E	NB	PB	PB	PB	PS	PS
	NS	PS	PS	PS	ZE	ZE
	ZE	PS	PS	ZE	NS	NS
	PS	ZE	ZE	NS	NS	NS
	PB	NS	NS	NB	NB	NB



Слика 5.2. Параметризоване функције припадности излаза

На пример, правило приказано другом врстом и другом колоном и Табели 5.1 чита се на следећи начин: „Ако E је „NS“ и ако EC је „NS“ онда U је „PS““. Мамдани правило закључивања је графички представљено на слици 5.3.



Слика 5.3. Графички приказ Мамданијевог принципа закључивања

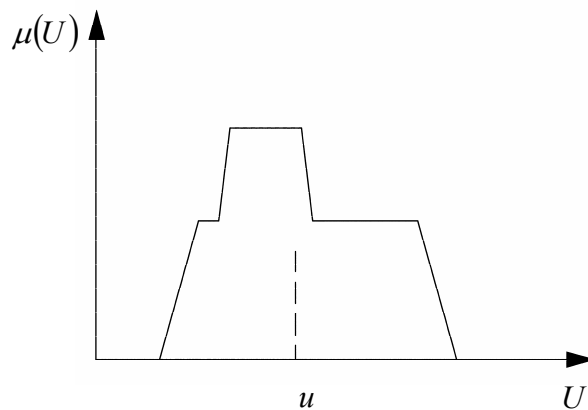
Резултат фази закључивања мора се трансформисати у нумеричку излазну вредности кроз процес који се зове дефазификација, да би се могао применити за управљање. Овај процес се може описати на најједноставнији начин:

$$u = \text{defuzz}(U) \quad (5.3)$$

где u представља излаз фази-логичког управљања. Постоји много метода дефазификације, али је најраспрострањенији метод центра површи (или тежишта), где је излазна нумеричка величина положај тежишта површи која је настала унијом α -пресека функција припадности излазне величине после фази закључивања. Овај начин дефазификације је дат следећом једначином:

$$u = \frac{\int \mu(U)UdU}{\int \mu(U)dU} \quad (5.4)$$

и представљен је на слици 5.4.



Слика 5.4. Метод центра површина

Како је излазна величина u у границама $[-1 \ 1]$, она се мора скалирати да би се добио напон којим се дејствује на актуатор:

$$\phi_{AA} = K_{\text{act}} u \quad (5.5)$$

где K_{act} представља илазни скалирајући фактор, који је једнак максималном дозовљеном напону којим се може дејствовати на актуатор, а да не дође до деполаризације.

Такаги-Сугено-Канг (ТСК) принцип закључивања

Правило фази закључивања код овог принципа закључивања се може представити на следећи начин:

$$R^i : \text{ ако } E \text{ је } A_i \text{ и } EC \text{ је } B_i \text{ онда } U = f(E, EC). \quad (5.6)$$

Обично $f(E, EC)$ представља полином улазних величина. На пример, прво и друго фази правило може се написати на следећи начин:

$$\begin{aligned} R^1 : \text{ ако } E \text{ је } A_1 \text{ и } EC \text{ је } B_1 \text{ онда } U_1 &= p_1 E + q_1 EC + r_1 \\ R^2 : \text{ ако } E \text{ је } A_2 \text{ и } EC \text{ је } B_2 \text{ онда } U_2 &= p_2 E + q_2 EC + r_2 \end{aligned} \quad (5.7)$$

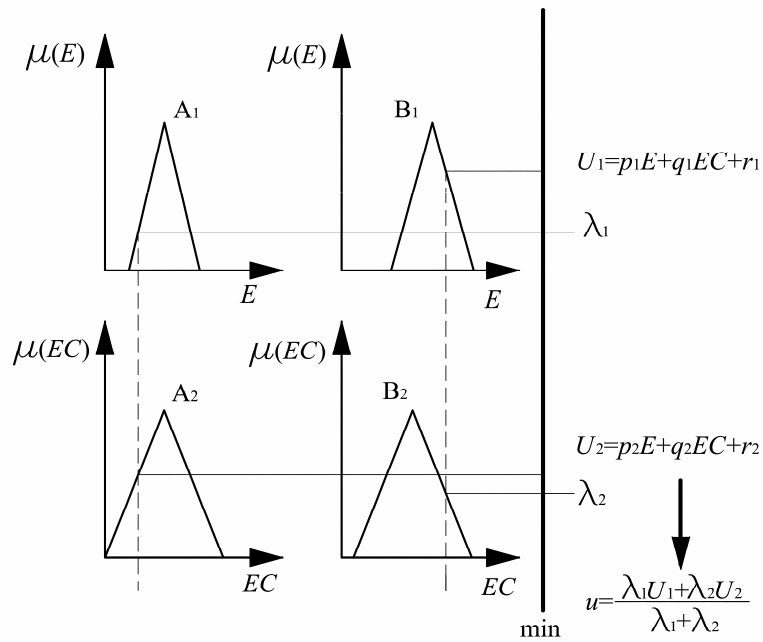
Ако се p_i и q_i поставе да буду 0, онда се овај принцип зове ТСК нултог реда, и онда се своди на одређивање параметара r_i . Дефазификација за овај принцип закључивања може се представити на следећи начин:

$$u = \frac{\sum_{i=1}^{N_R} \lambda_i U_i}{\sum_{i=1}^{N_R} \lambda_i} \quad (5.8)$$

где је:

$$\lambda_i = \min(\mu_{A_j}(E), \mu_{B_k}(EC)), \quad j = 1, \dots, N_A, k = 1, \dots, N_B \quad (5.9)$$

Такаги-Сугено-Канг принцип закључивања је графички представљено на слици 5.5.



Слика 5.5. Графички приказ ТСК принципа закључивања

У овој дисертацији ће се узети у обзир ТСК принцип закључивања нултог реда. У циљу очувања симетричности излаза, број параметара r_i ће се редуковати са 25 на 13, и овај принцип закључивања може се представити табеларно у табели 5.2

Табела 5.2. Правила закључивања за фази-логички управљачки систем базиран на ТСК принципу закључивања нултог реда

		EC				
		NB	NS	ZE	PS	PB
E	NB	r_1	r_2	r_3	r_4	r_5
	NS	r_6	r_7	r_8	r_9	r_{10}
	ZE	r_{11}	r_{12}	r_{13}	$-r_{12}$	$-r_{11}$
	PS	$-r_{10}$	$-r_9$	$-r_8$	$-r_7$	$-r_6$
	PB	$-r_5$	$-r_4$	$-r_3$	$-r_2$	$-r_1$

Напон управљања може се израчунати према једначини (5.5).

5.3 Самоподешавајући фази-логичко управљачки систем

Као што је речено у претходном поглављу, домени улазних величина су у опсегу $[-1 \ 1]$. Због тога се скалирајући фактори K_d и K_v морају одабрати на такав начин да трансформишу величине са сензора, тако да оне на улазу у фази-логички управљачки систем буду у опсегу $[-1 \ 1]$. Према томе, скалирајући фактори модалног помераја и модалне брзине могу се израчунати на следећи начин:

$$K_d = \frac{1}{|\eta_{\max}|}, \quad K_v = \frac{1}{|\dot{\eta}_{\max}|}, \quad (5.10)$$

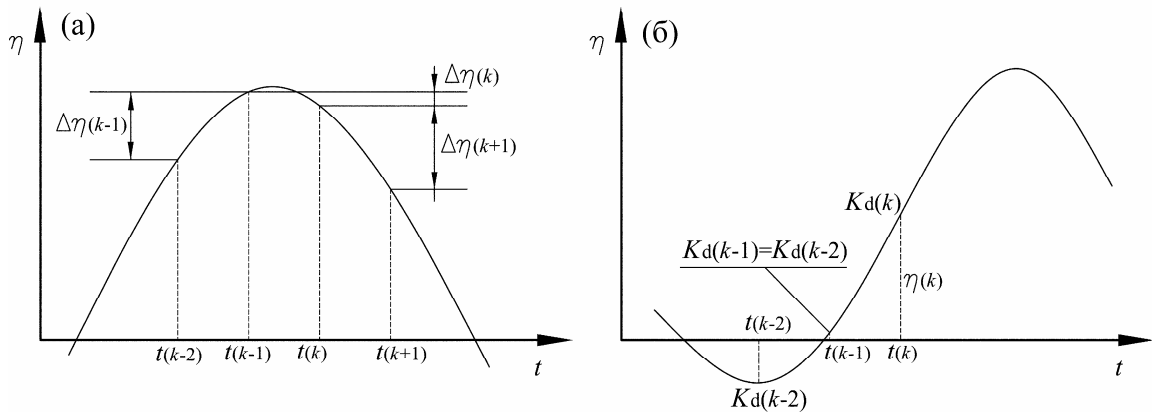
где η_{\max} и $\dot{\eta}_{\max}$ представљају амплитуде модалног помераја и модалне брзине. Амплитуде су променљиве током времена, и такође, услед спољашњих поремећаја може доћи до непредвидивих пораста. Због тога, одређивање ових фактора је компликовано, а и кад се одреде, одржавање на константној вредности може смањити перформансе управљачког система [130]. У раду [131] представљено је самоподешавање ових параметара током времена употребом опсервера максимума за „PID“ тип фази-логичког управљачког система. Опсервер максимума, представљен од стране поменутих аутора, прати излазни сигнал и мери локални максимум. Овај приступ адаптиран је за проблем активног пригушења вибрација, тако да је опсервер максимума подешен да, уместо излазну величину, прати улазне величине фази-логичког управљачког система. Поред тога, опсервер максимума такође прати повећање амплитуде. Представљени опсервер максимума прати улаз и рачуна прираштај улазне величине. Узимајући у обзир k -то време одабира, тренутни и претходни прираштај модалног помераја су:

$$\Delta\eta(k) = \eta(k) - \eta(k-1), \quad \Delta\eta(k-1) = \eta(k-1) - \eta(k-2) \quad (5.11)$$

и скалирајући фактор помераја рачуна се у регулатору параметара на следећи начин:

$$K_d(k) = \begin{cases} \frac{1}{|\eta(k-1)|}, & \Delta\eta(k) \cdot \Delta\eta(k-1) \leq 0 \\ \frac{1}{|\eta(k)|}, & \Delta\eta(k) \cdot \Delta\eta(k-1) > 0 \text{ и } |\eta(k)| > \frac{1}{K_d(k-1)}, \\ K_d(k-1), & \text{у другим случајевима} \end{cases} \quad (5.12)$$

За скалирање фактора брзине користи се иста процедура као и за фактор померања. На слици 5.6 илустративно је приказано подешавање фактора скалирања.

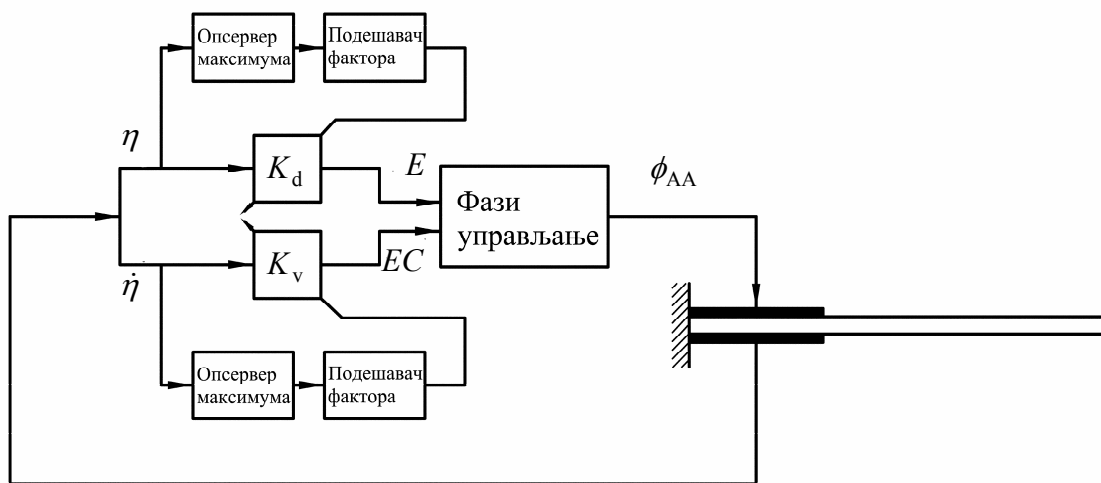


Слика 5.6. Подешавање скалирајућег фактора помераја помоћу опсервера максимума

Према слици 5.6(a), када је $\Delta\eta(k-1) > 0$ и $\Delta\eta(k) < 0$ следи да је $\eta(k-1) \cdot \eta(k) < 0$, па према једначини (5.12) скалирајући фактор се подешава према тој једначини. Са друге стране, када се узме у обзир $(k+1)$ -то време одабира, очигледно је да је $\Delta\eta(k+1) < 0$, па одатле следи $\eta(k-1) \cdot \eta(k) > 0$, тако да, према једначини (5.12), скалирајући фактор помераја не мења своју тренутну вредност. Током експлоатације, структура може бити изложена различитим поремећајима, што може довести до изненадног пораста амплитуде. У том случају, скалирајући фактори морају се подесити. Ово је дато у другом реду једначине (5.12) и илустровано је на слици 5.6(b). Према слици 5.6(b), може се видети да је $\Delta\eta(k-1) > 0$ и $\Delta\eta(k) > 0$, па је њихов производ позитиван, али апсолутна вредност модалног помераја у тренутном k -том времену одабира је већа него

апсолутна вредност претходног максимума ($\eta(k-2)$). У том случају, скалирајући фактор помераја мора се подесити да би улаз у фази-логички управљачки систем био опсегу $[-1 \ 1]$.

У случају пригушења једног мода осциловања помоћу једног актуатор-сензор пара (једно-улазно-једно-излазна конфигурација), блок дијаграм самоподешавајућег фази-логичког управљачког система је приказан на слици 5.7.



Слика 5.7. Блок дијаграм самоподешавајућег фази-логичког управљачког система – једно-улазно-једно-излазна конфигурација

У општем случају, код вибрација структуре јављају се спрегнути модови осциловања. Ти модови су најнижи модови (1., 2., 3.,...), тј., који одговарају најнижим фреквенцијама. Због тога, систем је декомпонован у мање паралелне подсистеме који се називају модални управљачки подсистеми. Сигнал са сензора долази у естиматор стања где се одређују величине стања (модално померање и модална брзина), одакле се сигнал сваког мода усмерава ка одређеном модалном управљачком подсистему: први модални управљачки подсистем узима η_1 и $\dot{\eta}_1$ као улазне величине, други модални управљачки подсистем узима η_2 и $\dot{\eta}_2$ као улазне величине, итд. Заправо, сваки овај подсистем може се представити блок дијаграмом, као на слици 5.7, тј, има свој опсервер максимума, подешавач параметара и функције припадности који су независни од других подсистема. Такође, сваки подсистем има свој локални излаз, тако да се управљачки сигнал може представити на следећи начин:

$$\{\bar{u}\} = [w]\{u\} \quad (5.13)$$

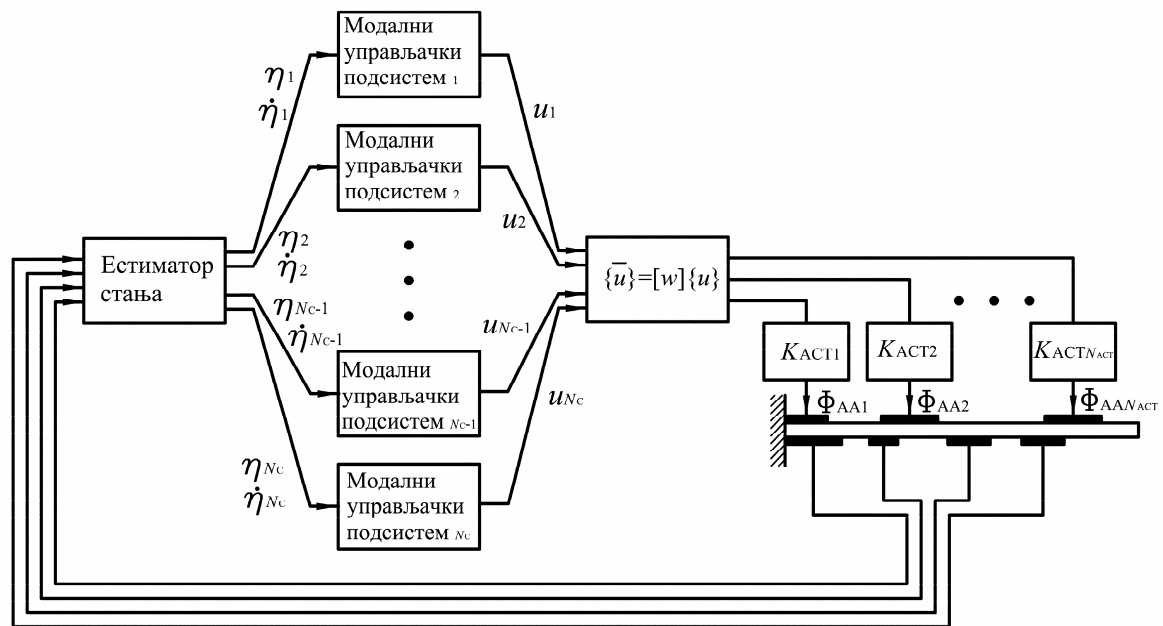
где $[w]$ представља матрицу излазних тежинских фактора, таквих да важи:

$$\sum_{i=1}^{N_C} w_{ij} = 1, \quad j = 1, \dots, N_{\text{АСТ}} \quad (5.14)$$

где $N_{\text{АСТ}}$ представља број актуатора. Управљачки напони на актуаторима добијају се на следећи начин:

$$\phi_{AAi} = K_{\text{act}i} \bar{u}_i, \quad i = 1, \dots, N_{\text{АСТ}} \quad (5.15)$$

где $K_{\text{act}i}$ представља максимални напон којим се може оптеретити i -ти актуатор. Оваква конфигурација назива се више-улазно-више-излазна конфигурација. Блок дијаграм оваквог система приказан је на слици 5.8.



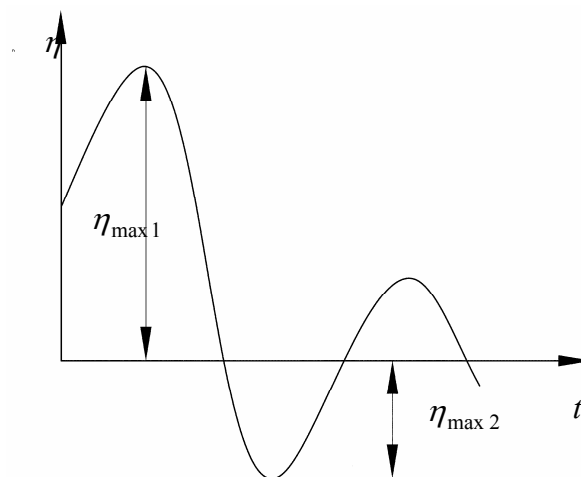
Слика 5.8. Блок дијаграм самоподешавајућег фази-логичког управљачког система; више-улазно-више-излазна конфигурација

5.4 Критеријуми оптимизације

После дефинисања фази правила, принципа закључивања и облика функција припадности улаза и излаза, потребно је у потпуности одредити ове функције припадности. Као што је дефинисано у претходном поглављу, функције припадности су параметризоване, па се њихово одређивање своди на одређивање тих параметара. У овом истраживању, ови параметри биће добијени оптимизацијом, а циљ овог поглавља је да дефинише критеријуме оптимизације у циљу добијања оптималних комбинација параметара са аспекта пригушења вибрација.

Код проблема оптимизације, слободне и принудне вибрације посматране су посебно, тј. због специфичности природе ових вибрација, дефинисане су посебне функције циља за сваки случај.

Што се тиче слободних вибрација, модално померање произвољног мода приказано је на слици 5.9. Такође, на тој слици је су означене прва ($\eta_{\max 1}$) и друга ($\eta_{\max 2}$) амплитуда.



Слика 5.9. Модално померање произвољног мода осциловања код слободних вибрација

У циљу повећања перформанси разматраног управљачког система за активно пригушење слободних вибрација, функција циља може се написати на следећи начин:

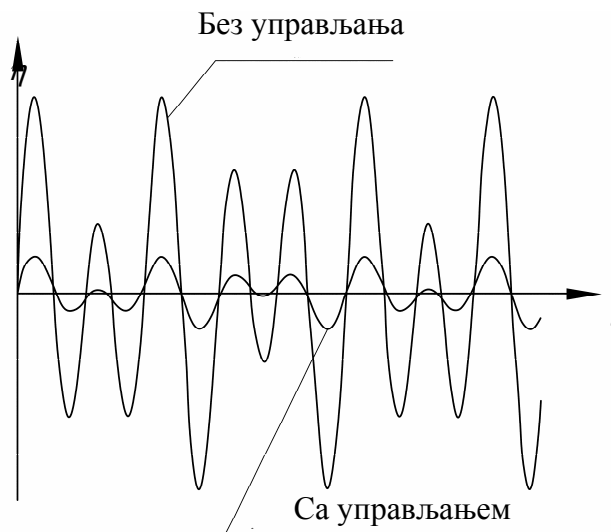
$$OBJ = \text{maximize} \left(J_1 = \frac{|\eta_{\max 1}|}{|\eta_{\max 2}|} \right). \quad (5.16)$$

Код случаја са више модова осциловања, оптимизација се врши за сваки мод посебно, тј. узима се у обзир само тај мод и на тај начин се добијају параметри за тај подсистем (модални контролер).

Код принудних вибрација, претходно дефинисану функцију циља није погодно користити зато што због дејства принудне силе, није могуће у потпуности пригушити вибрације. На слици 5.10 приказана су модална померања под дејством принудне силе, у првом случају када нема управљања, а у другом случају постоји активно пригушење вибрација. Да би се повећала ефикасност активног пригушења вибрација, потребно је што више смањити површину коју график на слици 5.10 образује са осом t . Да би се то постигло, може се дефинисати функција циља на следећи начин:

$$OBJ = \text{maximize} \left(J_2 = \frac{1}{\|\eta\|} \right), \quad (5.17)$$

где $\|\eta\|$ представља L^2 норму вектора модалног померања.



Слика 5.10. Модално померање произвољног мода осциловања код принудних вибрација

У случају фази-логичког управљачког система базираног на Мамданијевом принципу закључивања, проблем оптимизације се своди на налажење параметара $\alpha_1, \alpha_2, \beta_1, \beta_2, \gamma_1$ и γ_2 . Ограничења код овог типа закључивања су:

$$\begin{aligned} 0 < \alpha_i \leq 1, \quad 0 < \beta_i \leq 1, \quad 0 < \gamma_i \leq 1 \quad i = 1, 2 \\ \alpha_2 < \alpha_1, \quad \beta_2 < \beta_1, \quad \gamma_2 < \gamma_1 \end{aligned} \quad (5.18)$$

За разлику од Мамданијевог принципа закључивања, где је потребно наћи само 6 параметара, код ТСК нултог реда принципа закључивања потребно је наћи 17 параметара. У циљу смањења броја параметара, урађено је следеће: $\alpha_2 = \alpha_1 / 2$ и $\beta_2 = \beta_1 / 2$. На овај начин број параметара са 17 је смањен на 15. Код овог типа закључивања, ограничења су:

$$\begin{aligned} 0 < \alpha_1 \leq 1, \quad 0 < \beta_1 \leq 1 \\ 0 \leq r_i \leq 1, \quad i = 1, \dots, 13 \end{aligned} \quad (5.19)$$

Уколико се у процес оптимизације укључе ограничења, тада функције циља постају:

$$\bar{J}_1 = \begin{cases} J_1, & \text{ако ограничења нису нарушена} \\ 0, & \text{ако су ограничења нарушена} \end{cases} \quad (5.20)$$

за Мамдани принцип закључивања, и

$$\bar{J}_2 = \begin{cases} J_2, & \text{ако ограничења нису нарушена} \\ 0, & \text{ако су ограничења нарушена} \end{cases} \quad (5.21)$$

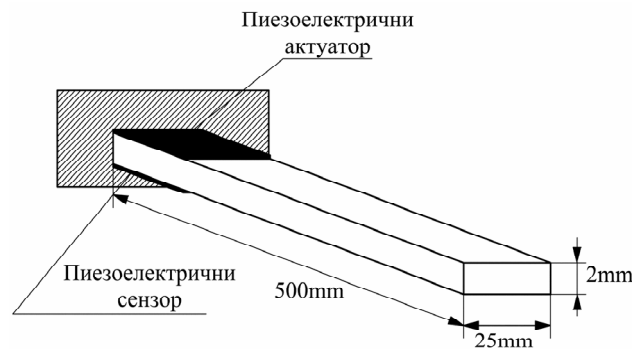
за ТСК нултог реда принцип закључивања. Овај проблем оптимизације решава се помоћу оптимизације ројем честица дефинисане у поглављу 4.6, где наведени параметри функција припадности представљају координате честица.

Глава 6

Активно пригушење вибрација КОМПОЗИТНЕ КОНЗОЛЕ

6.1 Увод

У овој глави биће истражене перформансе оптимизованог самоподешавајућег фази-логичког управљачког система, приказаног у глави 5, за активно пригушење вибрација танкозидне композитне конзоле. Разматрана конзола је симетрична, са осам специјално-ортотропним слојевима распоређеном под следећом оријентацијом: $(90^\circ/0^\circ/90^\circ/0^\circ)_s$. Дебљина сваког слоја је 0.25mm, а материјал је графит-епокси. Пиезоелектрични сензори и актуатори су направљени од PZT5A, влакнастог композита, дебљине 0.2mm, а разматра се само случај када су актуатор и сензор једнаких димензија. Дужина актуатор-сензор пара је 100mm, а постаљени су у корену конзоле. Дужина конзоле је 0.5m, а ширина је 0.25m. Разматрана конзола приказана је на слици 6.1.



Слика 6.1. Конзола разматрана у нумеричкој студији

Материјалне особине композита и актуатора дате су у табелама 3.1 и 4.2.

Што се тиче вибрација, биће анализирани слободне вибрације, које су изазване почетним статичким отклоном или ударним импулсом, принудне вибрације узроковане периодичним оптерећењем и принудне вибрације узроковане периодичним оптерећењем са неочекиваним ударним импулсом. У овом случају, биће разматрана само једно-улазно-једно-излазна („SISO“) конфигурација, тј. један актуатор-сензор пар и претпоставиће се да се услед спољашњих утицаја јавља само први мод осциловања. Сопствена фреквенција првог мода осциловања наведене конзоле је 62.703rad/s , односно 9.98Hz . Оптимизација управљачких система ће бити извршена према критеријумима дефинисаним у глави 5.

У циљу илустровања супериорности предложеног управљачког система, резултати добијени помоћу оптимизованог самоподешавајућег фази-логичког управљачког система биће упоређени са оптимизованим фази-логичким управљачким системом са константним скалирајућим факторима и линеарно-квadratним регулатором. Такође, извршиће се поређење Мамданијевог и ТСК принципа закључивања.

Што се тиче оптимизације ројем честица, когнитивни и социјални фактори имају вредности $c_1 = c_2 = 1.5$. Тежински фактор инерције линеарно се мења током итерације у границама од 1 до 0.5. Број иницијалне популације честица је 300, а број итерација је 200. За сваки проблем урађено је пет оптимизација са различитим иницијалним популацијама, а за даље разматрање узети су само резултати са најбољим вредностима функција циља.

6.2 Активно пригушење слободних вибрација

Активно пригушење слободних вибрација композитне конзоле ће бити анализирано за вибрације које су настале услед следећих почетних услова:

1. почетни статички угиб слободног краја конзоле од 20 mm,
2. ударни импулс од 10N трајању од 0.1ms,
3. ударни импулс од 50N трајању од 0.1ms,
4. случај када је слободном крају конзоле саопштена почетна брзина од 0.5m/s.

У случају првог почетног услова, конзола је оптерећена континуалним оптерећењем, управно на осу, на свом слободном крају тако да је статички угиб слободног краја једнак 20mm. Код другог и трећег почетног услова, на слободан крај конзоле дејствује ударни импулс од 10N; односно 50N, у трајању од 0.1ms. Након престанка дејства импулса, почиње активно пригушење вибрација. Код четвртог почетног услова, слободном крају конзоле саопштена је почетна брзина 0.5m/s, након чијег дејства почиње активно пригушење вибрација.

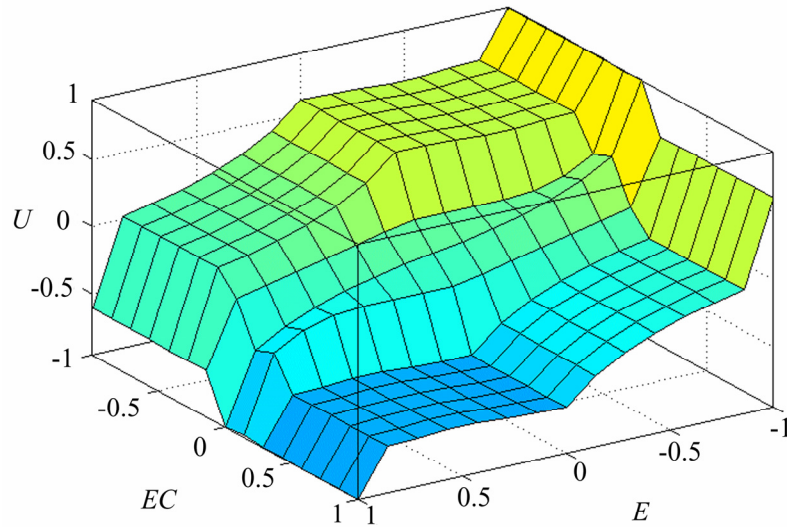
Разлог разматрања различитих почетних услова је испитивање како ти почетни услови утичу на коначне резултате оптимизације. Резултати активног пригушења вибрација уз помоћ оптимизованог самоподешавајућег фази-логичког управљачког система биће упоређени са резултатима добијеним уз помоћ оптимизованог фази-логичког управљачког система са константним факторима. Такође, биће извршено поређење Мамданијевог и ТСК принципа закључивања и линеарно-квадратног регулатора.

Како се скалирајући фактори подешавају тек након почетка активног пригушења вибрација, односно након наилаaska на прву амплитуду, потребно је усвојити неке почетне вредности ових фактора. У овом случају, за почетне вредности скалирајућих фактора узете су следеће величине: $K_d = 10000$, $K_v = 10$. Након извршене оптимизације самоподешавајућег фази-логичког управљачког система базираног на Мамданијевом принципу закључивања за сва четири почетна услова, резултати оптимизације (оптимизовани параметри, вредности функције циља и максимални напон на актуатору) приказани су у табели 6.1.

Табела 6.1. Оптимизовани параметри α_i , β_i , γ_i , функција циља и максимални напон на актуатору за самоподешавајуће фази-логичко управљање базирано на Мамданијевом принципу закључивања

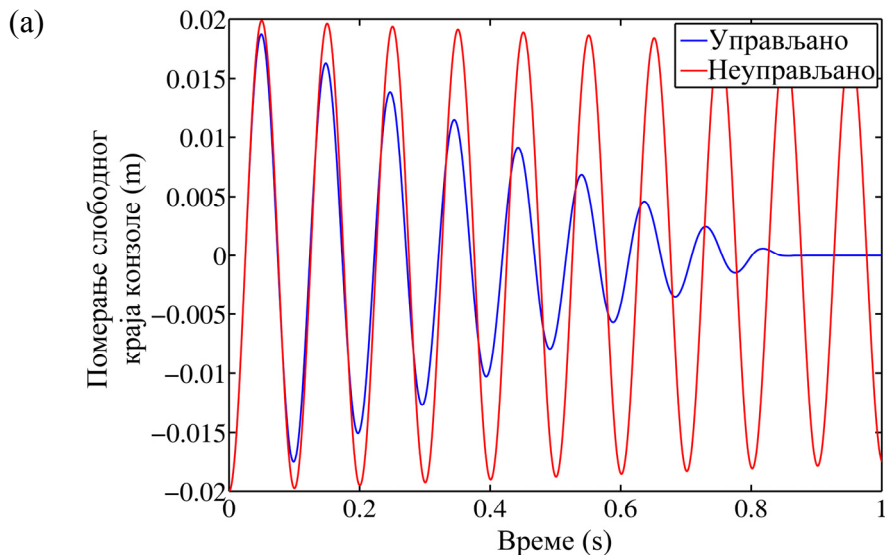
Почетни услов	$\begin{bmatrix} \alpha_1 \\ \alpha_2 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} \beta_1 \\ \beta_2 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} \gamma_1 \\ \gamma_2 \end{bmatrix}$	Функција циља	Максимални напон на актуатору (V)
1	$\begin{bmatrix} 1 \\ 0.991 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0.384 \\ 0.278 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 1 \\ 0.812 \end{bmatrix}$	1.0707	181
2	$\begin{bmatrix} 1 \\ 0.991 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0.384 \\ 0.278 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 1 \\ 0.812 \end{bmatrix}$	3.052	188.73
3	$\begin{bmatrix} 1 \\ 0.991 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0.384 \\ 0.278 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 1 \\ 0.812 \end{bmatrix}$	1.156	188.73
4	$\begin{bmatrix} 1 \\ 0.991 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0.384 \\ 0.278 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 1 \\ 0.812 \end{bmatrix}$	1.187	181.163

Уколико се упореде резултати добијени оптимизацијом, приказани у табели 6.1, може се закључити да су за све разматране различите почетне услове, резултати оптимизације исти. Другим речима, резултати оптимизације не зависе од избора почетних услова. То значи да је за оптимизацију функција припадности довољно узети у обзир само један произвољно изабрани почетни услов, а као резултат ће се добити оптимизоване функције припадности које су оптималне и за било које друге почетне услове. На слици 6.2 приказане су површи фази правила оптимизованих функција припадности, представљених у табели 6.1.

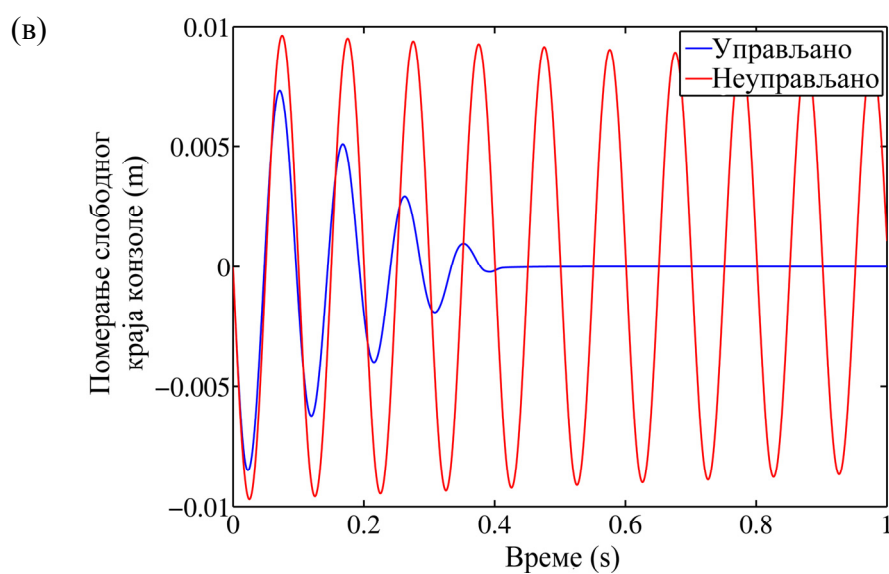
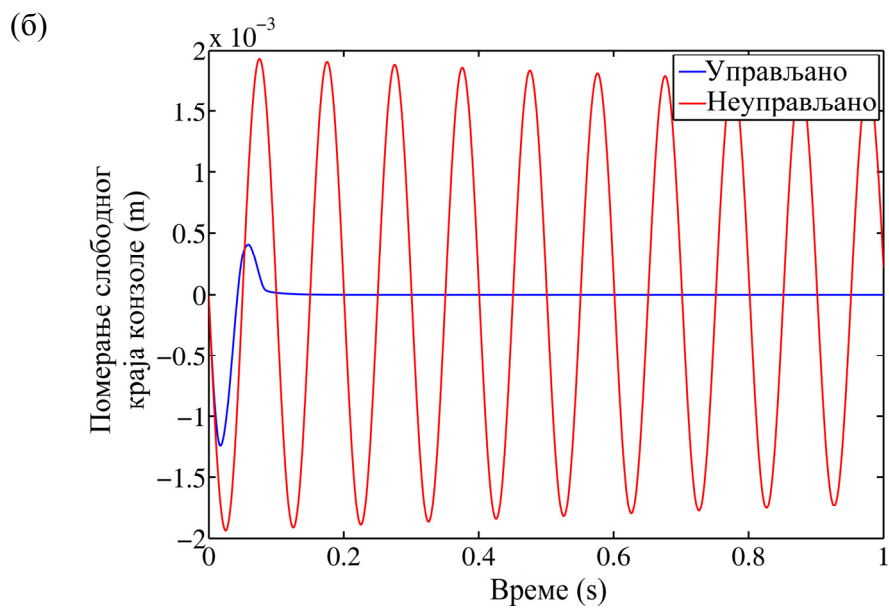


Слика 6.2. Површи фази-правила за Мамдани принцип закључивања

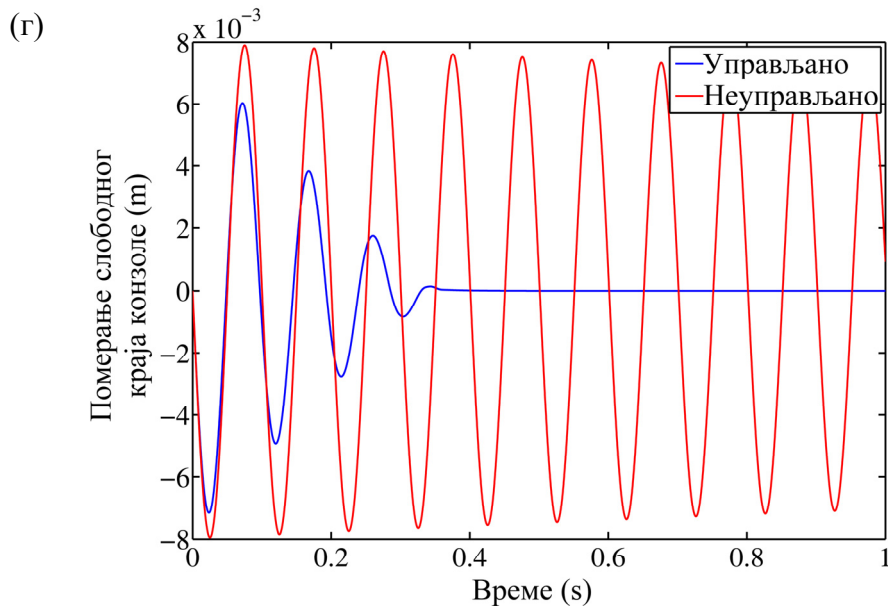
Слика 6.3 представља померање слободног краја конзоле, где је упоређен случај са активним пригушењем применом оптимизованог самоподешавајућег фази-логичког управљања и случаја где нема активног пригушења вибрација. На слици 6.4 приказана је промена скалирајућег фактора помераја и брзине током активног пригушења вибрација у случају првог почетног услова.



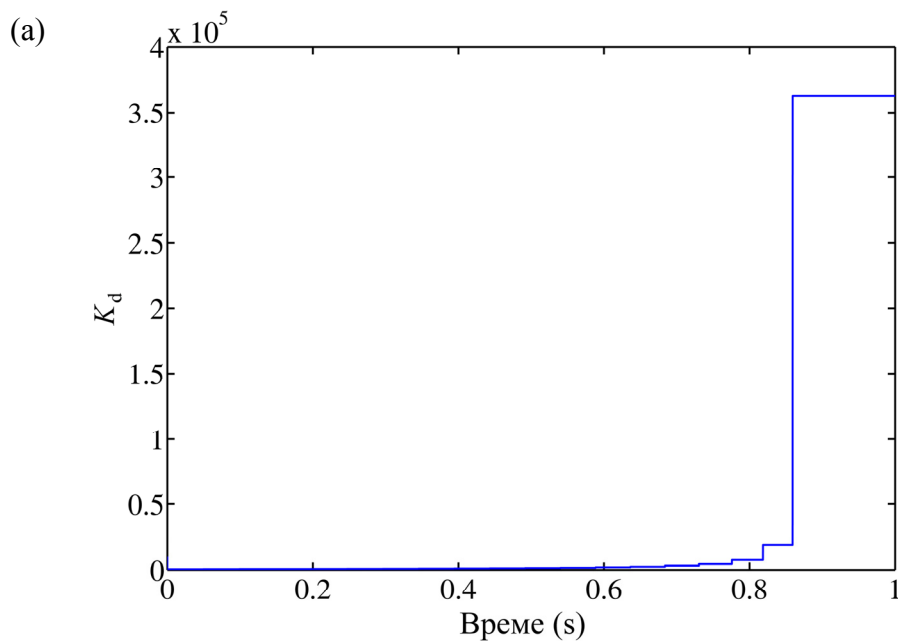
Слика 6.3. (наставља се...)



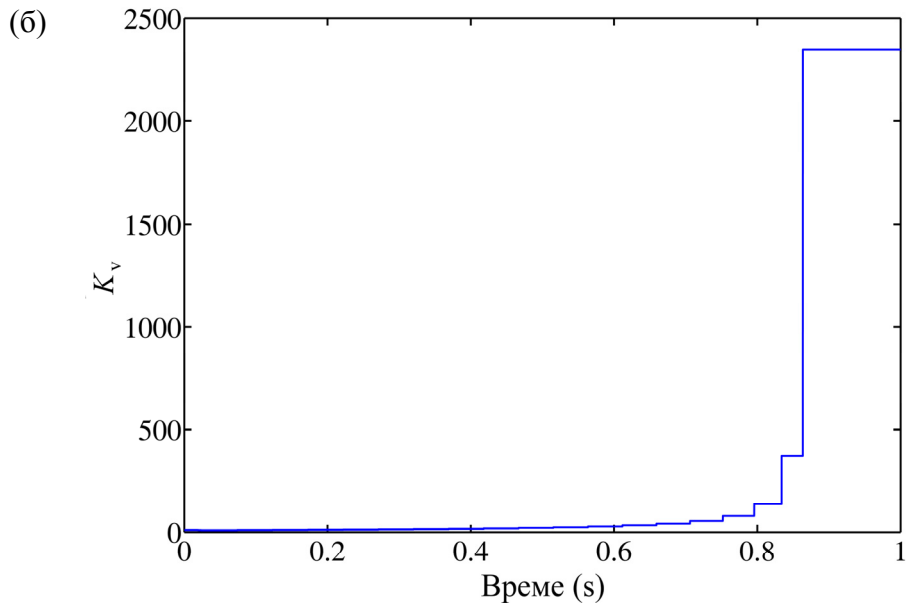
Слика 6.3. (наставља се...)



Слика 6.3. Померање слободног краја конзоле; поређење оптимизованог самоподешавајућег фази-логичког управљања базираног на Мамданијевом принципу закључивања и случаја када нема активног пригушења: (а) 1. почетни услов, (б) 2. почетни услов, (в) 3. почетни услов, (г) 4. почетни услов

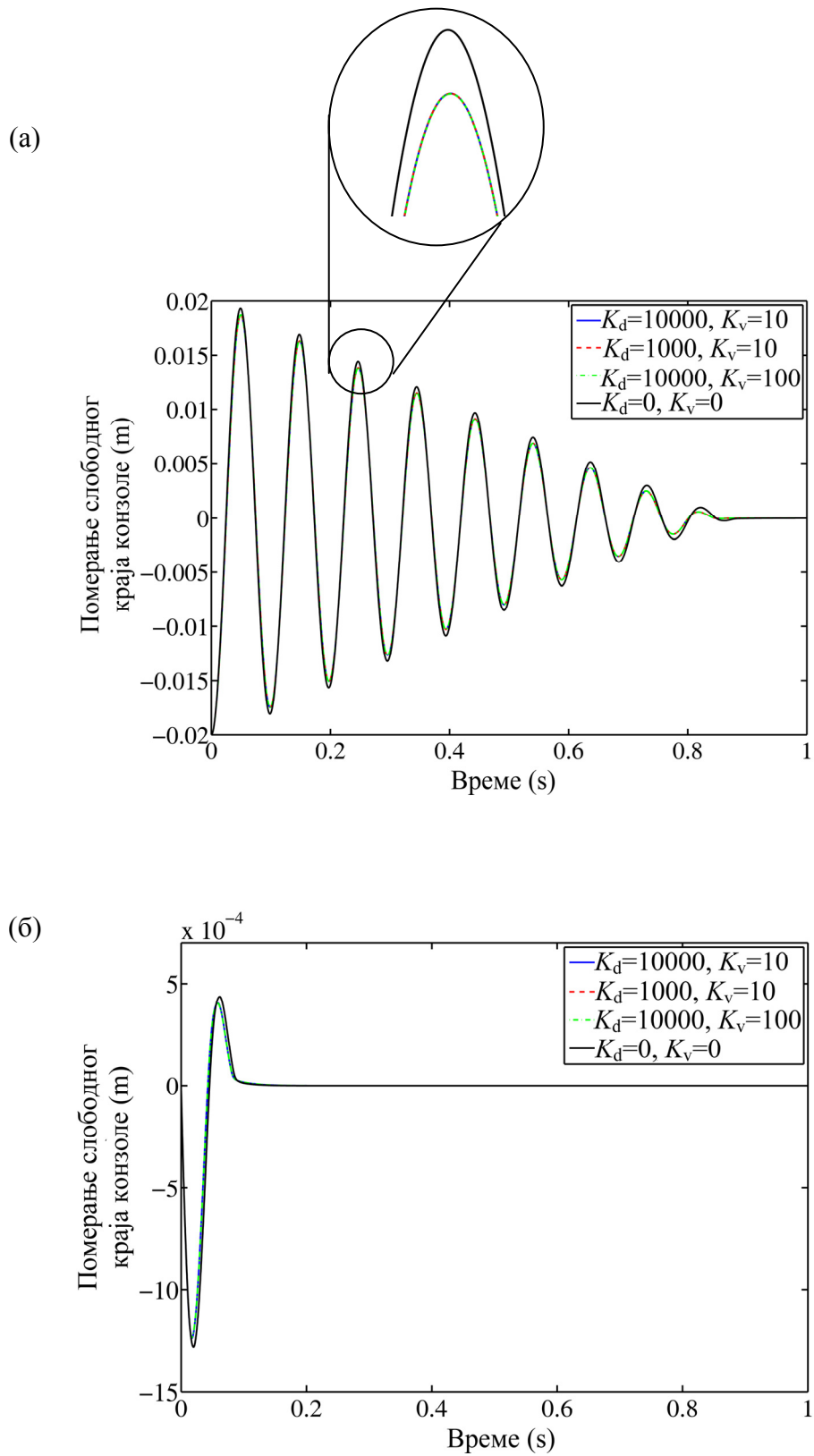


Слика 6.4. (наставља се...)

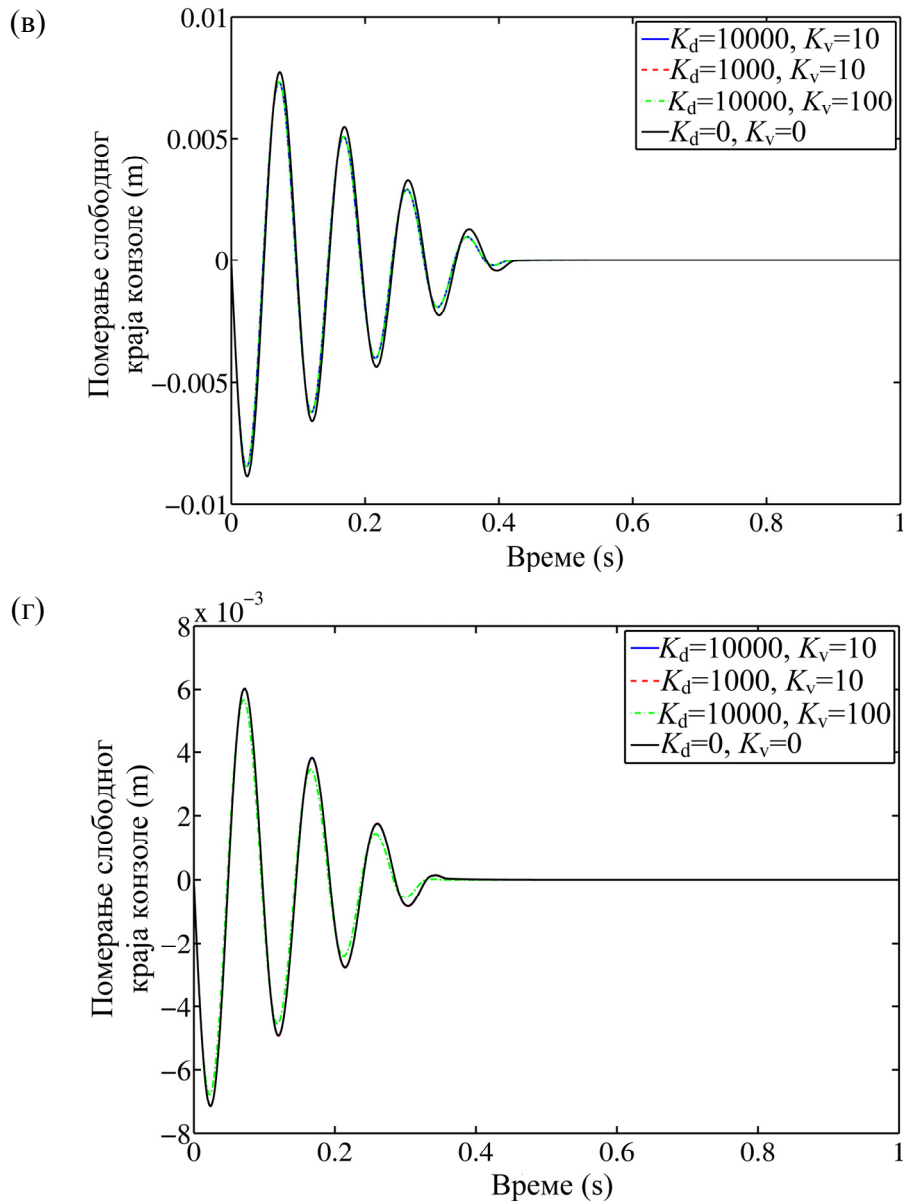


Слика 6.4. Промена скалирајућих фактора: (а) помераја, (б) брзине

Како су почетне вредности скалирајућих фактора, коришћене за оптимизацију функција припадности, $K_d = 10000$, $K_v = 10$, следећи задатак је испитивање како различите вредности ових почетних фактора утичу на перформансе представљеног управљачког система. Другим речима, функције припадности оптимизоване за једне вредности почетних скалирајућих фактора употребљене су за активно пригушење вибрација, при чему се користе друге почетне вредности скалирајућих фактора. Према томе, испитан је утицај за следеће факторе: $K_d = 1000$, $K_v = 10$; $K_d = 10000$, $K_v = 100$ и $K_d = 0$, $K_v = 0$, а при томе се коришћене функције припадности чији су параметри приказани у табели 6.1. Померање слободног краја конзоле за те различите почетне вредности су приказане на слици 6.5.



Слика 6.5. (наставља се...)



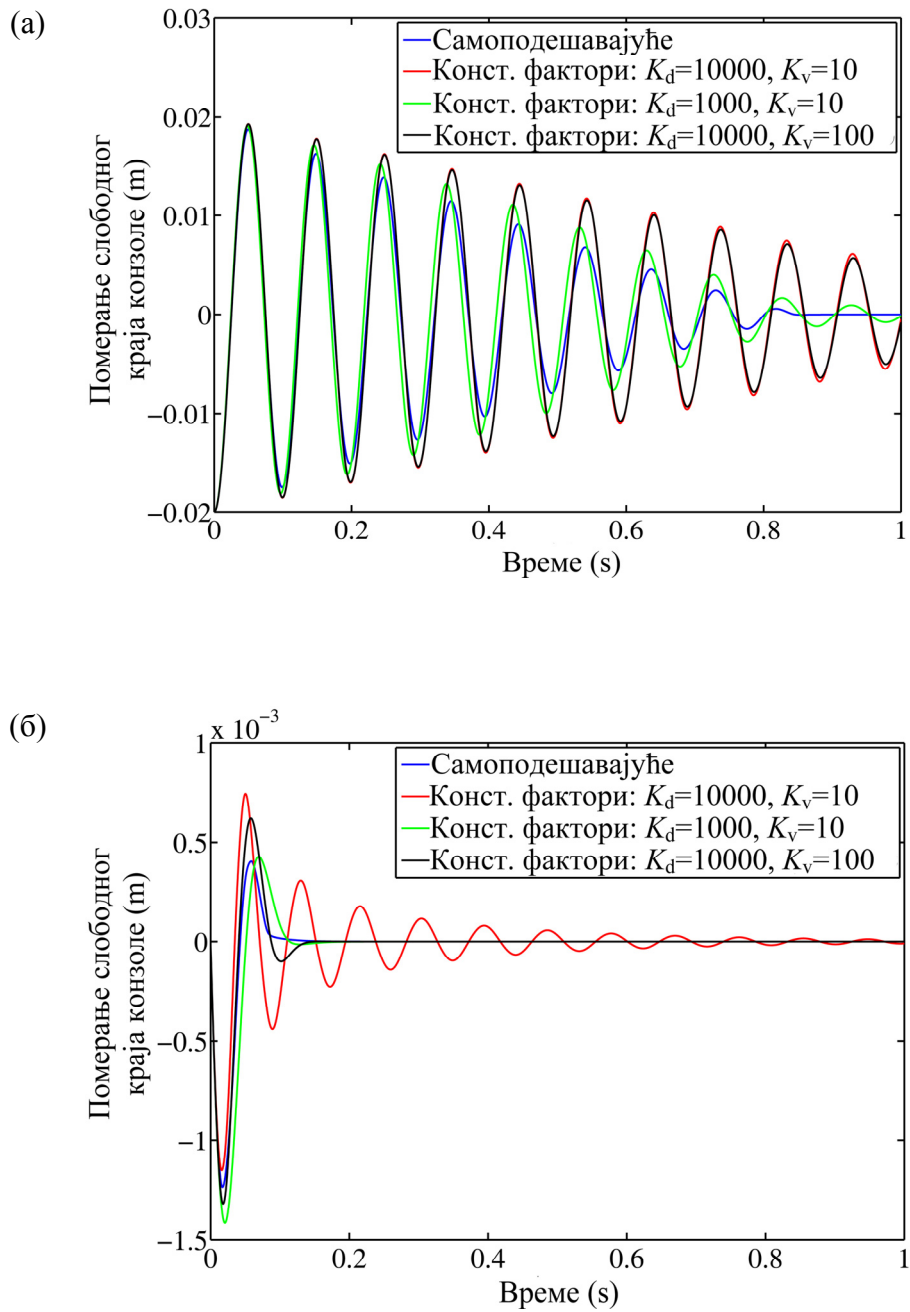
Слика 6.5. Померање слободног краја конзоле за оптимизовано самоподешавајуће фази-логичко управљање базирано на Мамданијевом принципу закључивања; поређење утицаја различитих почетних вредности скалирајућих фактора: (а) 1. почетни услов, (б) 2. почетни услов, (в) 3. почетни услов, (г) 4. почетни услов

Посматрајући слику 6.5, може се закључити да промена почетних вредности скалирајућих фактора има веома мали утицај на перформансе управљачког система. То значи, да иако су у процесу оптимизације коришћене једне почетне вредности скалирајућих фактора, током даље експлоатације могу се користити друге вредности, а перформансе се неће значајно променити.

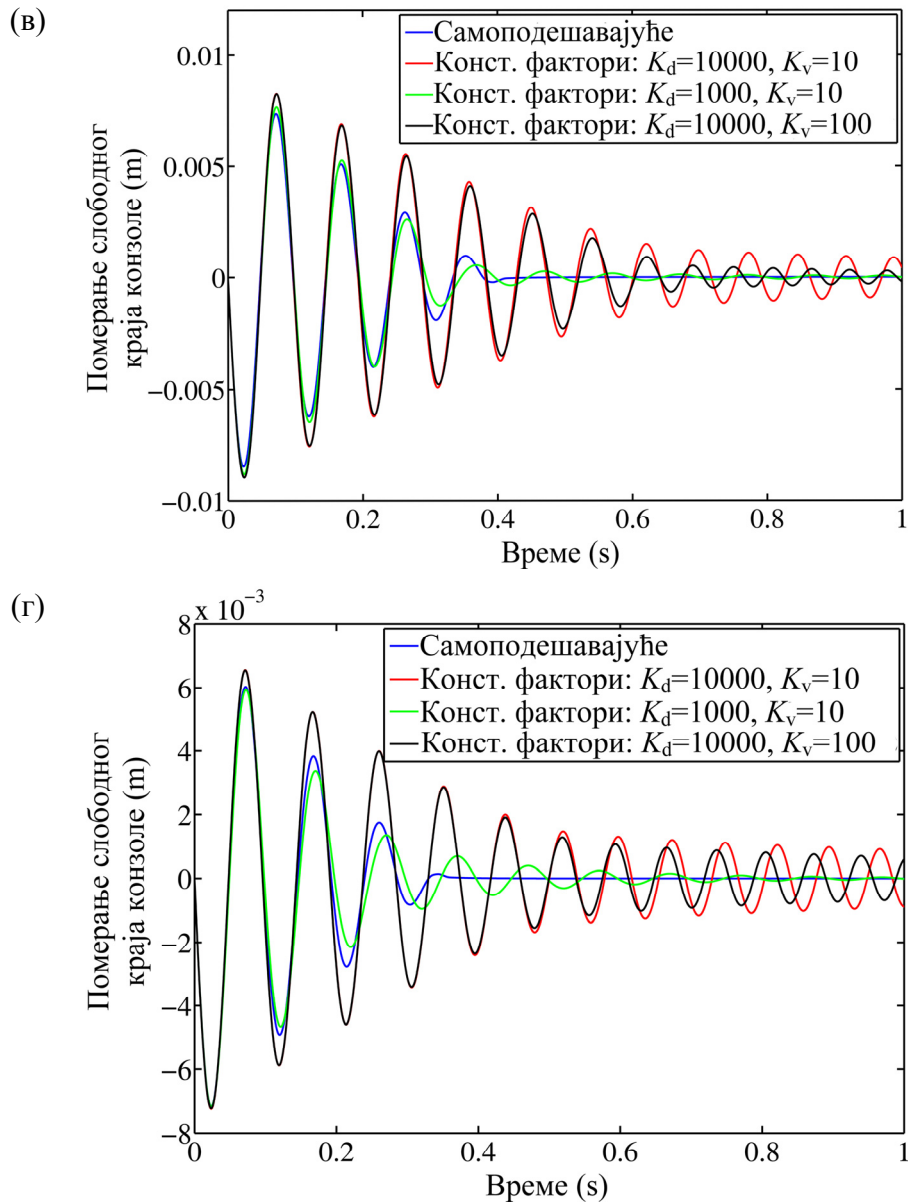
Наредни задатак је упоређивање оптимизованог самоподешавајућег фази-логичког управљачког система са оптимизованим фази-логичким управљачким системом са константним факторима базираних на Мамданијевом принципу закључивања. Разматрана су три случаја са различитим константним вредностима скалирајућих фактора: $K_d = 10000$, $K_v = 10$; $K_d = 1000$, $K_v = 10$ и $K_d = 10000$, $K_v = 100$, и за сваки случај и за све почетне услове извршена је оптимизација. Резултати оптимизације приказани су у табели 6.2. Слика 6.6 приказије поређење оптимизованог самоподешавајућег фази-логичког управљачког система са оптимизованим фази-логичким управљачким системом са константним скалирајућим факторима.

Табела 6.2. Оптимизовани параметри α_i , β_i , γ_i , функција циља и максимални напон на актуатору за фази-логичко управљање са константним скалирајућим факторима базирано на Мамданијевом принципу закључивања

Почетни услов	K_d K_v	$\begin{bmatrix} \alpha_1 \\ \alpha_2 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} \beta_1 \\ \beta_2 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} \gamma_1 \\ \gamma_2 \end{bmatrix}$	Функција циља	Максимални напон на актуатору (V)
1	10000 10	$\begin{bmatrix} 0.85 \\ 0.447 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0.909 \\ 0.078 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0.092 \\ 0.081 \end{bmatrix}$	1.0392	110
	1000 10	$\begin{bmatrix} 1 \\ 0.929 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0.737 \\ 0.116 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0.968 \\ 0.961 \end{bmatrix}$	1.052	198
	10000 100	$\begin{bmatrix} 1 \\ 0.085 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0.737 \\ 0.346 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0.079 \\ 0.078 \end{bmatrix}$	1.0401	108
2	10000 10	$\begin{bmatrix} 0.653 \\ 0.550 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0.889 \\ 0.051 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0.943 \\ 0.876 \end{bmatrix}$	1.552	191.54
	1000 10	$\begin{bmatrix} 0.610 \\ 0.605 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0.119 \\ 0.050 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 1 \\ 0.304 \end{bmatrix}$	3.307	91.29
	10000 100	$\begin{bmatrix} 1 \\ 0.998 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0.897 \\ 0.292 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0.996 \\ 0.419 \end{bmatrix}$	2.135	162.57
3	10000 10	$\begin{bmatrix} 0.265 \\ 0.251 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0.517 \\ 0.098 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0.069 \\ 0.065 \end{bmatrix}$	1.085	108
	1000 10	$\begin{bmatrix} 0.928 \\ 0.863 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0.682 \\ 0.058 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0.991 \\ 0.978 \end{bmatrix}$	1.156	131.5
	10000 100	$\begin{bmatrix} 0.557 \\ 0.153 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0.842 \\ 0.461 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0.053 \\ 0.050 \end{bmatrix}$	1.088	106
4	10000 10	$\begin{bmatrix} 0.764 \\ 0.160 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0.734 \\ 0.111 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0.058 \\ 0.050 \end{bmatrix}$	1.104	106
	1000 10	$\begin{bmatrix} 1 \\ 0.998 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0.897 \\ 0.117 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0.998 \\ 0.814 \end{bmatrix}$	1.208	120.753
	10000 100	$\begin{bmatrix} 0.280 \\ 0.185 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0.992 \\ 0.948 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0.082 \\ 0.077 \end{bmatrix}$	1.104	108.8



Слика 6.6. (наставља се...)



Слика 6.6. Померање слободног краја конзоле; поређење оптимизованог самоподешавајућег фази-логичког управљачког система са оптимизованим фази-логичким управљачким системом са константним скалирајућим факторима: (а) 1. почетни услов, (б) 2. почетни услов, (в) 3. почетни услов, (г) 4. почетни услов

Са слике 6.6 може се видети да је самоподешавајуће фази-логичко управљање супериорније у погледу активног пригушења вибрација у односу на фази-логичко управљање са константним скалирајућим факторима. Код неких случајева, амплитуда се смањи до неке вредности, али ју је даље немогуће пригушити (трећи и четврти почетни услов, скалирајући фактори $K_d = 10000$, $K_v = 10$ и $K_d = 10000$, $K_v = 100$). Овај недостатак конвенционалних фази-

логичких управљачких система приказан је у раду [119]. Ако се упореде резултати у табелама 6.1 и 6.2, може се видети да је код појединих случајева оптимизованог фази-логичког управљачког система са константим скалирајућим факторима функција циља већа него код самоподешавајућег. Али, ипак, самоподешавајући је ефикаснији у погледу активног пригушења вибрација од онога са константним факторима управо због подешавања скалирајућих фактора у реалном времену.

Што се тиче ТСК принципа закључивања нултог реда, добијени резултати оптимизације (параметри функција припадности, функција циља и максимални напон на актуатору) за самоподешавајући управљачки систем приказани су у табели 6.3. У табелама 6.4 – 6.7 приказана су правила закључивања добијена оптимизацијом за сваки почетни услов. За почетне вредности скалирајућих фактора узете су исте вредности као за Мамдани закључивање: $K_d = 10000$, $K_v = 10$.

Табела 6.3. Оптимизовани параметри α_1 , β_1 , функција циља и максимални напон на актуатору за самоподешавајуће фази-логичко управљање базирано на ТСК принципу закључивања нултог реда

Почетни услов	α_1	β_1	Функција циља	Максимални напон на актуатору (V)
1	1	0.16	1.135	199
2	1	0.16	∞	199
3	1	0.16	1.316	200
4	1	0.16	1.421	200

Табела 6.4. Правила закључивања за оптимизовани самоподешавајуће фази-логичко управљање базирано на ТСК принципу закључивања нултог реда за први почетни услов

		ЕС				
		NB	NS	ZE	PS	PB
E	NB	1	1	0.992	0.259	0.183
	NS	0.979	0.221	0.22	-0.247	-0.519
	ZE	0.953	0.282	0	-0.282	-0.953
	PS	0.519	0.247	-0.22	-0.221	-0.979
	PB	-0.183	-0.259	-0.992	-1	-1

Табела 6.5. Правила закључивања за оптимизовани самоподешавајуће фази-логичко управљање базирано на ТСК принципу закључивања нултог реда за други почетни услов

		EC				
		NB	NS	ZE	PS	PB
E	NB	1	1	0.992	0.259	0.183
	NS	0.979	0.221	0.22	-0.247	-0.519
	ZE	0.953	0.282	0	-0.282	-0.953
	PS	0.519	0.247	-0.22	-0.221	-0.979
	PB	-0.183	-0.259	-0.992	-1	-1

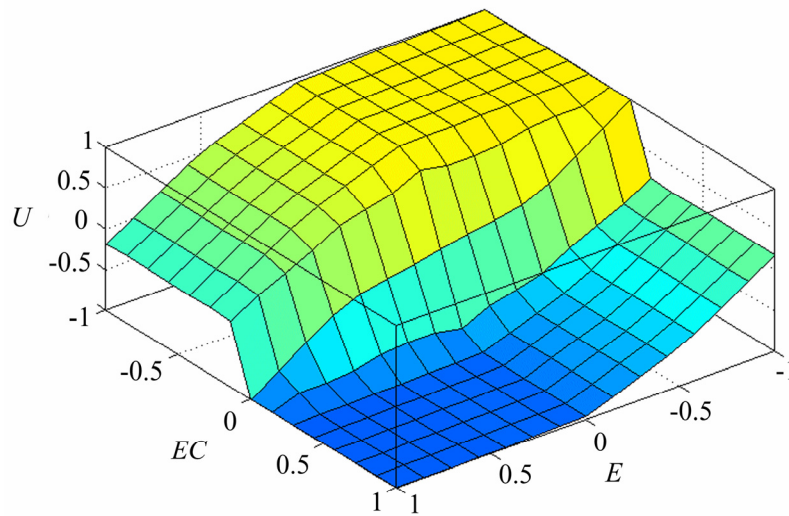
Табела 6.6. Правила закључивања за оптимизовани самоподешавајуће фази-логичко управљање базирано на ТСК принципу закључивања нултог реда за трећи почетни услов

		EC				
		NB	NS	ZE	PS	PB
E	NB	1	1	0.992	0.259	0.183
	NS	0.979	0.221	0.22	-0.247	-0.519
	ZE	0.953	0.282	0	-0.282	-0.953
	PS	0.519	0.247	-0.22	-0.221	-0.979
	PB	-0.183	-0.259	-0.992	-1	-1

Табела 6.7. Правила закључивања за оптимизовани самоподешавајуће фази-логичко управљање базирано на ТСК принципу закључивања нултог реда за четврти почетни услов

		EC				
		NB	NS	ZE	PS	PB
E	NB	1	1	0.992	0.259	0.183
	NS	0.979	0.221	0.22	-0.247	-0.519
	ZE	0.953	0.282	0	-0.282	-0.953
	PS	0.519	0.247	-0.22	-0.221	-0.979
	PB	-0.183	-0.259	-0.992	-1	-1

Ако се упореде резултати добијени у табелама 6.3 – 6.7 може се видети да су, као и код Мамданијевог принципа закључивања, за све разматране различите почетне услове, резултати оптимизације исти. На слици 6.7 приказане су површи фази правила оптимизованих функција припадности за самоподешавајући фази-логички управљачки систем базиран на ТСК принципу закључивања нултог реда.



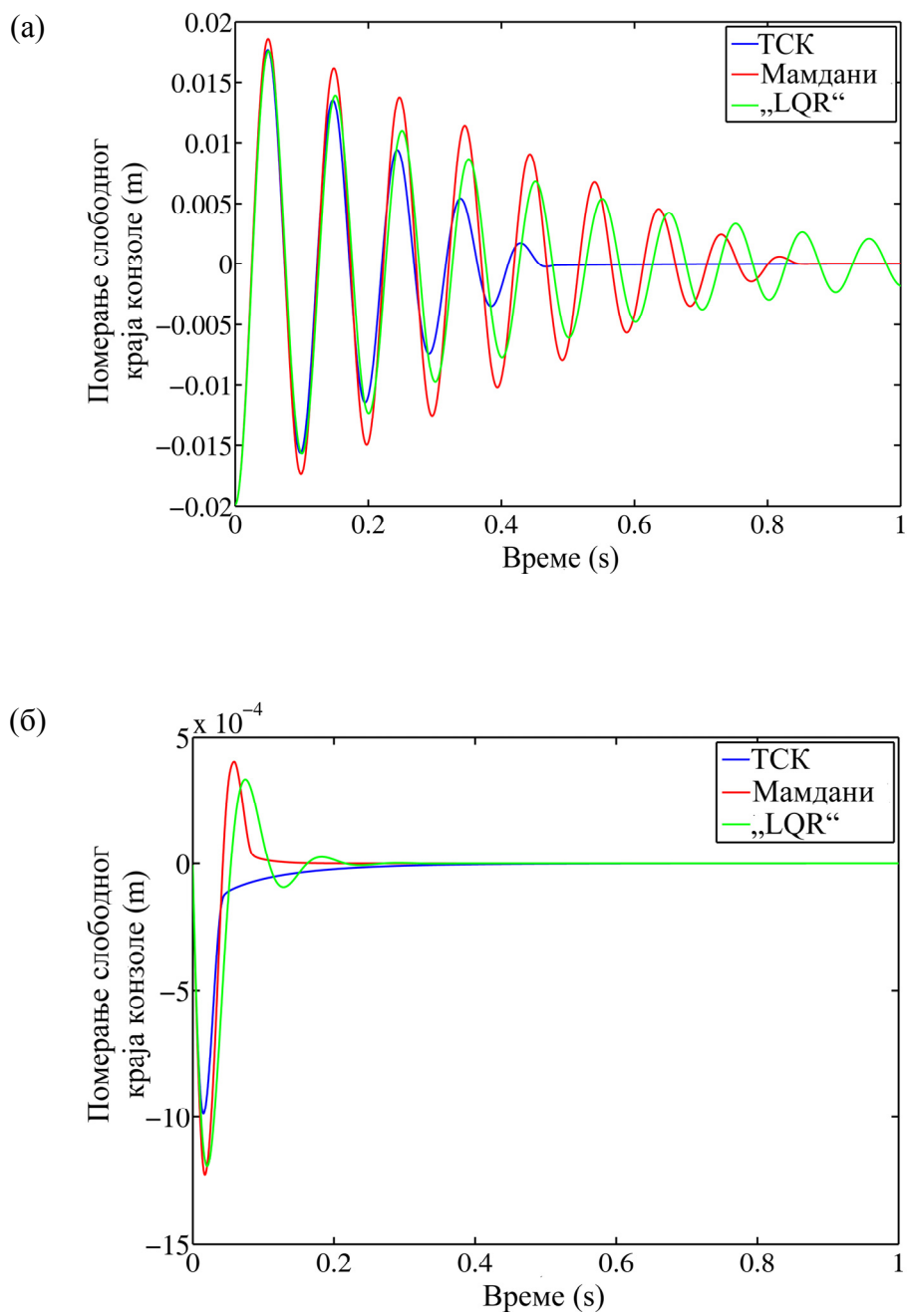
Слика 6.7. Површи фази-правила за ТСК принцип закључивања нултог реда

Што се тиче линеарно-квadratног регулатора, тежинске матрице $[Q]$ и $[R]$, као и максимални напон који се јавља на актуатору, за сваки почетни услов, приказани су у табели 6.8. Ове матрице су биране методом покушаја, тако да максимални напон на актуатору не прелази 200 V.

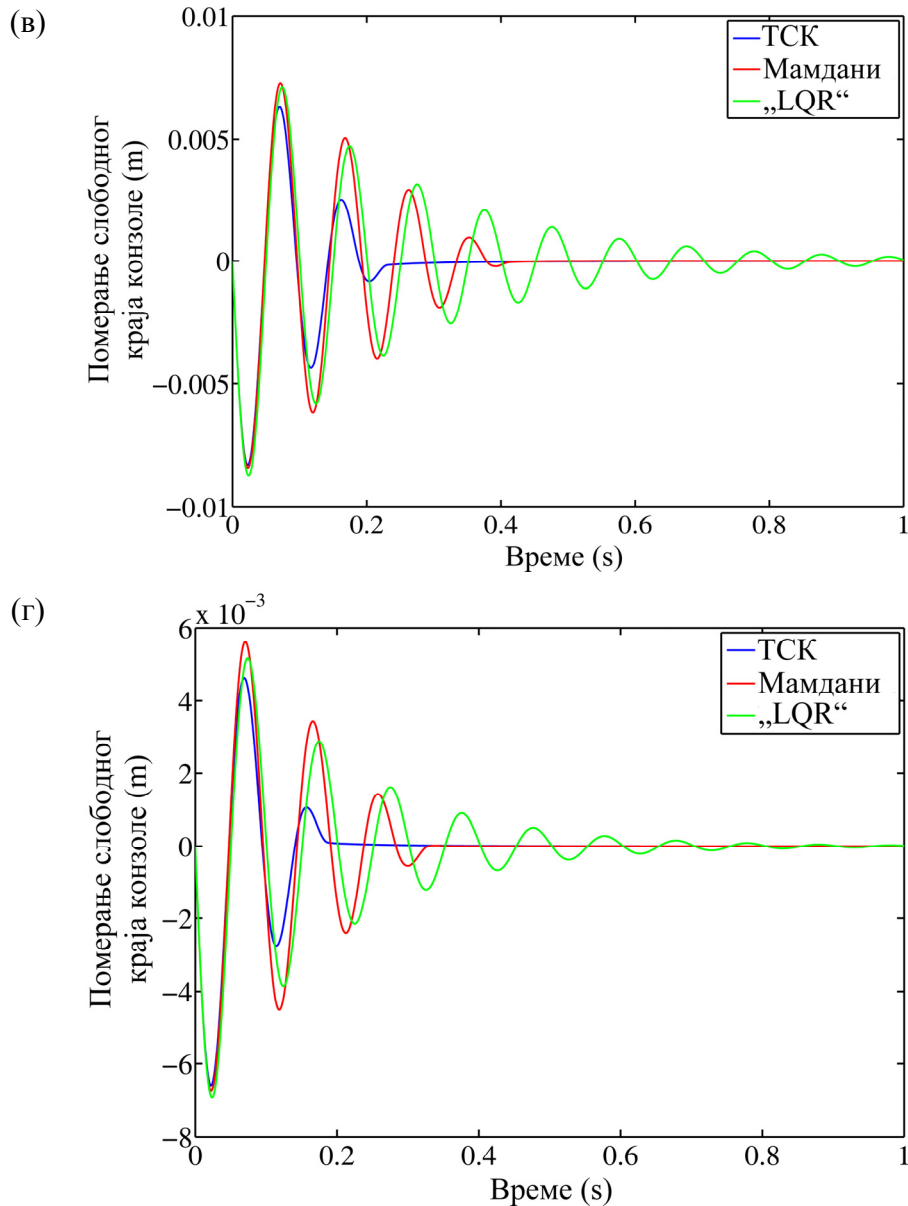
Табела 6.8. Тежинске матрице $[Q]$ и $[R]$ и максимални напон на актуатору код линеарно-квadratног регулатора

Почетни услов	$[Q]$	$[R]$	Максимални напон на актуатору (V)
1	$10^7[I]_{2 \times 2}$	3	185.61
2	$10^9[I]_{2 \times 2}$	3	200
3	$10^7[I]_{2 \times 2}$	1	169.33
4	$10^8[I]_{2 \times 2}$	5	198.128

Поређење перформанси самоподешавајућег фази-логичког управљачког система базираног на Мамданијевом и ТСК принципу закључивања нултог реда и линеарно-квadratног регулатора приказано је на слици 6.8, где је приказано померање слободног краја конзоле за сваки почетни услов.



Слика 6.8. (наставља се...)

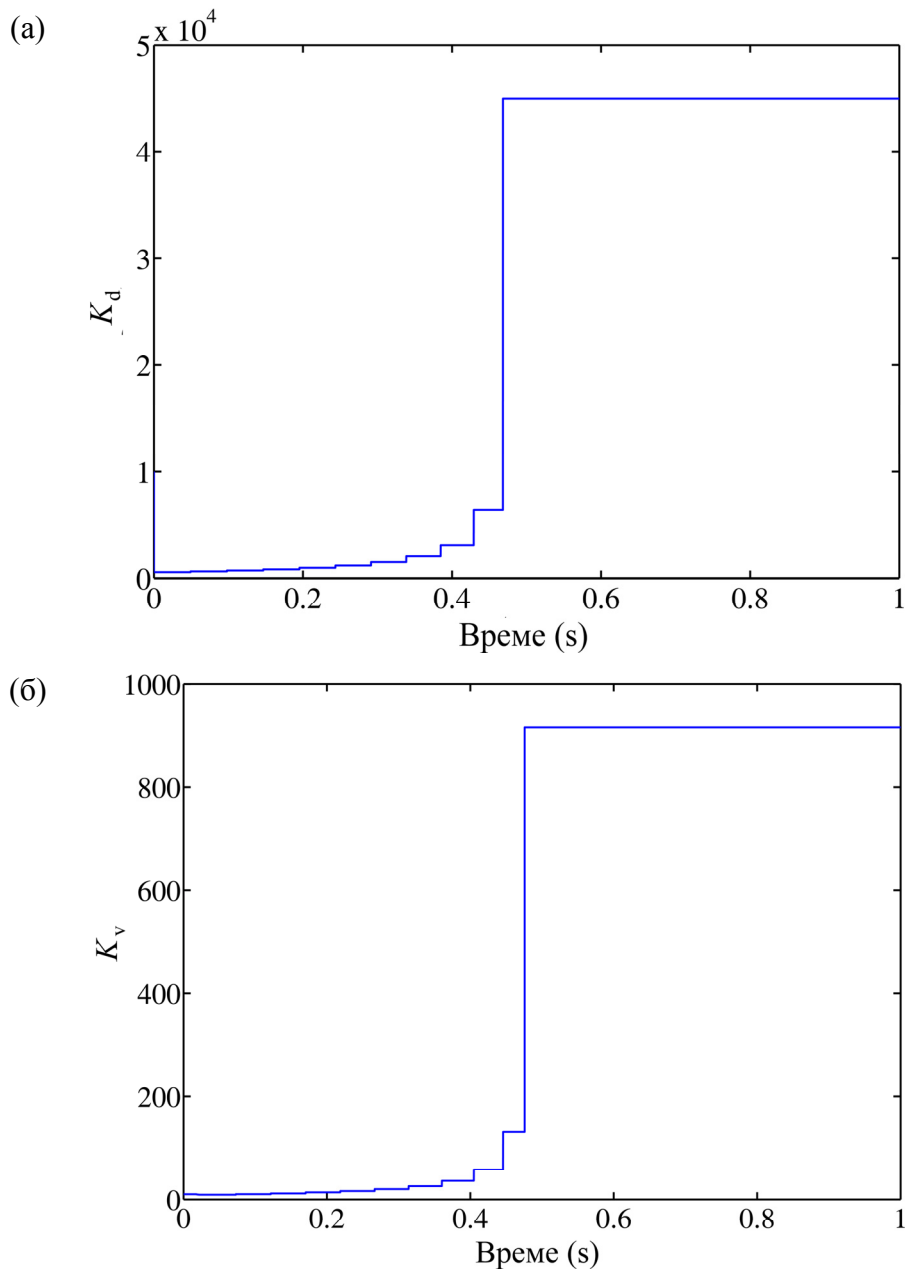


Слика 6.8. Померање слободног краја конзоле; поређење самоподешавајућег фази-логичког управљачког система базираног на Мамданијевом и ТСК принципу закључивања нултог реда и линеарно-квadratног регулатора: (а) 1. почетни услов, (б) 2. почетни услов, (в) 3. почетни услов, (г) 4. почетни услов

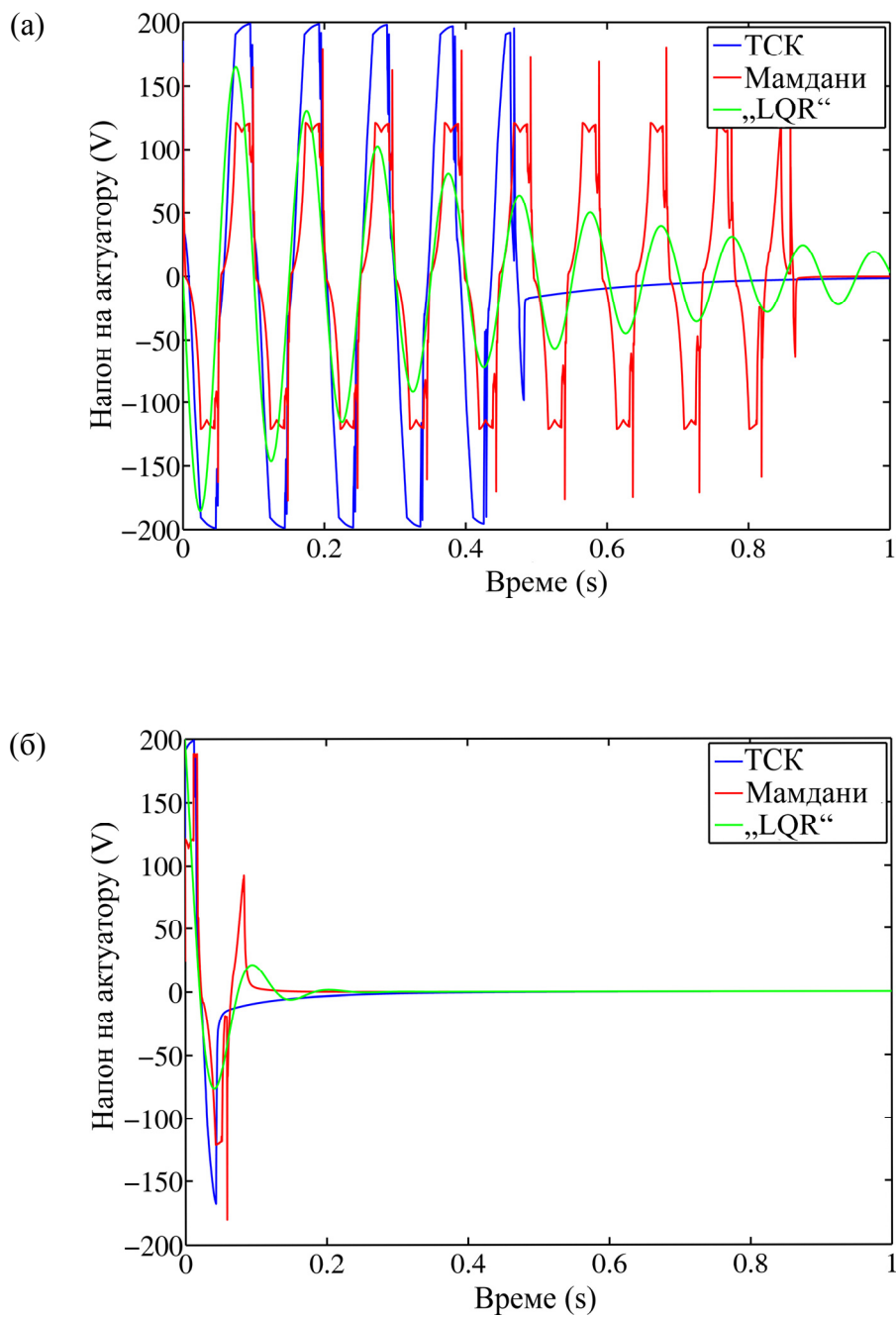
Са слике 6.8 може се закључити да је оптимизовано самоподешавајуће фази-логичко управљање базирано на ТСК принципу закључивања нултог реда супериорније у односу на остала два остала два управљачка система. После њега следи оптимизовано самоподешавајуће фази-логичко управљање базирано на Мамданијевом принципу закључивања, а линеарно-квadratни регулатор показује

најлошије перформансе. Са друге стране, код ТСК принципа закључивања јавља се највећи максимални напон.

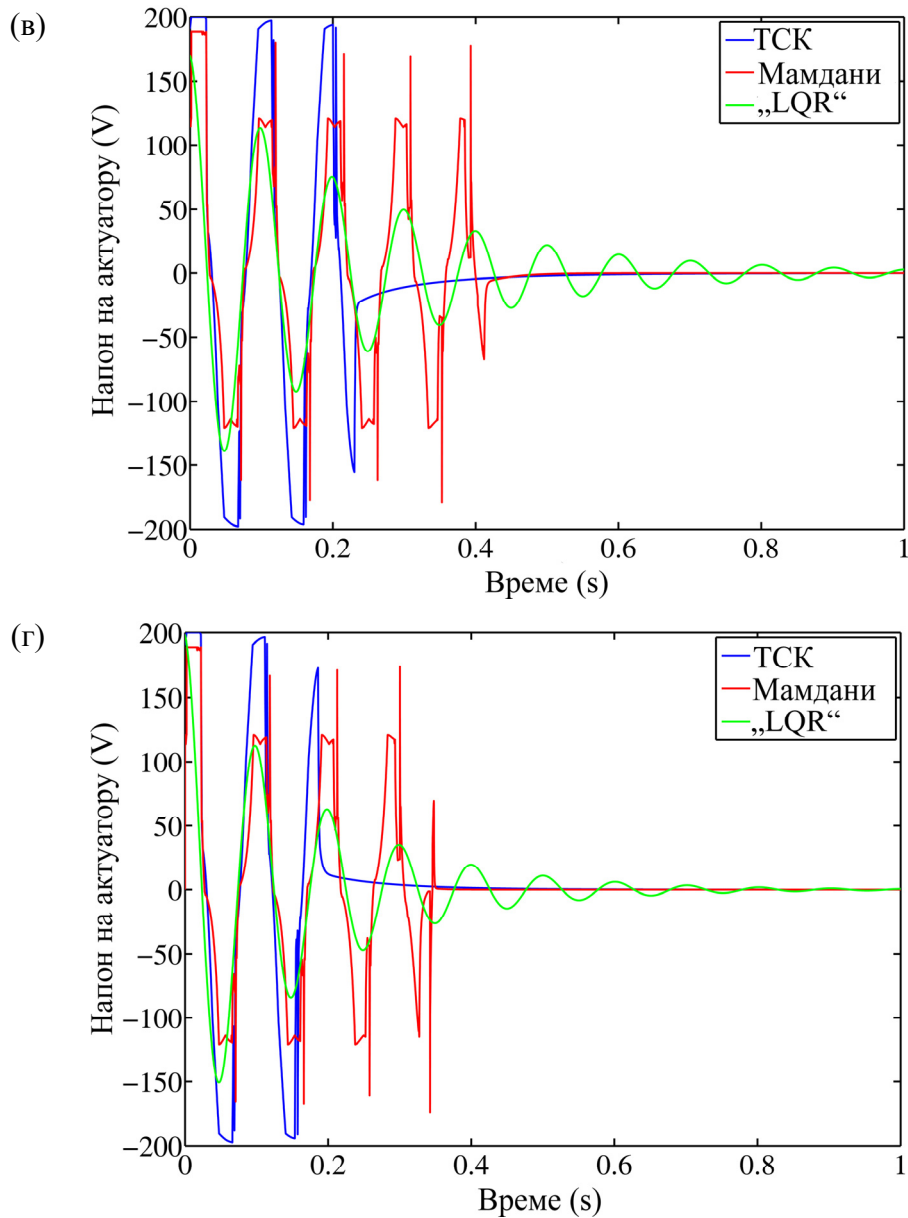
Слика 6.9 приказује промену скалирајућег фактора помераја и брзине током активног пригушења вибрација у случају првог почетног услова за ТСК принцип закључивања. На слици 6.10 приказани су напони који се јављају на актуатору током активног пригушења вибрација.



Слика 6.9. Промена скалирајућих фактора за ТСК принцип закључивања нултог реда у случају првог почетног услова: (а) помераја, (б) брзине



Слика 6.10. (наставља се...)



Слика 6.10. Напон на актуатору; поређење самоподешавајућег фази-логичког управљачког система базираног на Мамданијевом и ТСК принципу закључивања нултог реда и линеарно-квadratног регулатора: (а) 1. почетни услов, (б) 2. почетни услов, (в) 3. почетни услов, (г) 4. почетни услов

Са слике 6.10 може се уочити да је облик напона код линеарно-квadratног регулатора у облику синусоиде што није случај код самоподешавајућег фази-логичког управљања, а разлог томе је нелинеарни карактер фази-логичких управљачких система. Код линеарно-квadratног регулатора амплитуда напона се смањује, а код фази-управљачких система амплитуда је константна све док не дође до тоталног пригушења вибрација због подешавања скалирајућих фактора.

6.3 Активно пригушење принудних вибрација

Активно пригушење принудних вибрација биће анализирано за следеће случајеве спољашњег оптерећења:

1. кружна фреквенција 20rad/s
2. резонантна фреквенција првог мода осциловања
3. периодично оптерећење са изненадним ударима

Спољашње периодично оптерећење делује на слободни крај конзоле. Као и за слободне вибрације, и код принудних вибрација резултати ће бити упоређени са резултатима добијеним уз помоћ оптимизованог фази-логичког управљачког система са константним скалирајућим факторима. Такође, биће извршено поређење Мамданијевог и ТСК принципа закључивања нултог реда и линеарно-квadratног регулатора.

6.3.1 Периодично оптерећење на слободном крају конзоле са фреквенцијом 20rad/s

У овом случају, конзола је оптерећена периодичним оптерећењем $0.04\sin(20t)$ [N] које делује на њен слободни крај. За иницијалне вредности скалирајућих фактора узете су следеће величине: $K_d = 10000$, $K_v = 10$. Оптимизација је спроведена према критеријумима који су представљени у глави 5.

За Мамданијев принцип закључивања, на основу неколико примера, нађено је да се најбољи резултати постижу када су троугаоне функције припадности улаза и излаза симетричне, тј.

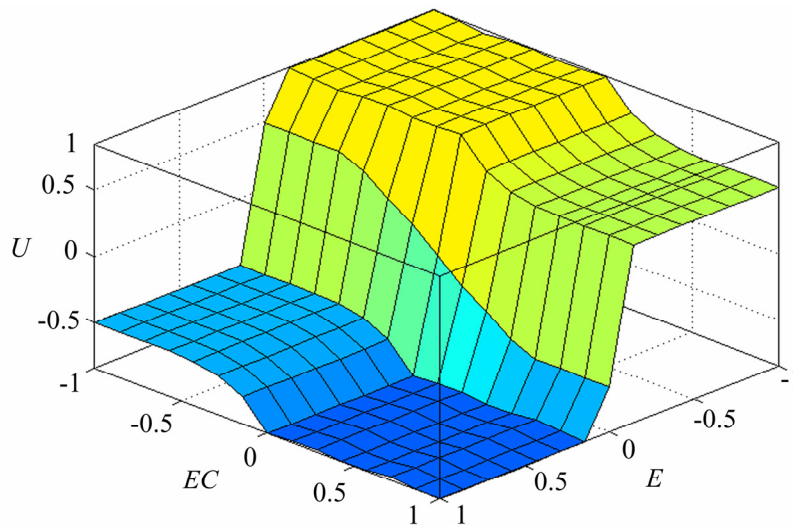
$$\alpha_2 = \alpha_1 / 2, \quad \beta_2 = \beta_1 / 2, \quad \gamma_2 = \gamma_1 / 2. \quad (6.1)$$

тако да ће се оптимизацијом налазити само параметри α_1 , β_1 , γ_1 . У табели 6.9 приказани су оптимизовани параметри α_1 , β_1 , γ_1 , функција циља (L_2 норма) и максимални напон који се јавља на актуатору за самоподешавајуће фази-логички управљачки систем базиран на Мамданијевом принципу закључивања. L_2 норма

се рачуна за првих 1s активног пригушења вибрација. Слика 6.11 представља површи фази правила оптимизованих функција припадности, представљених у табели 6.9.

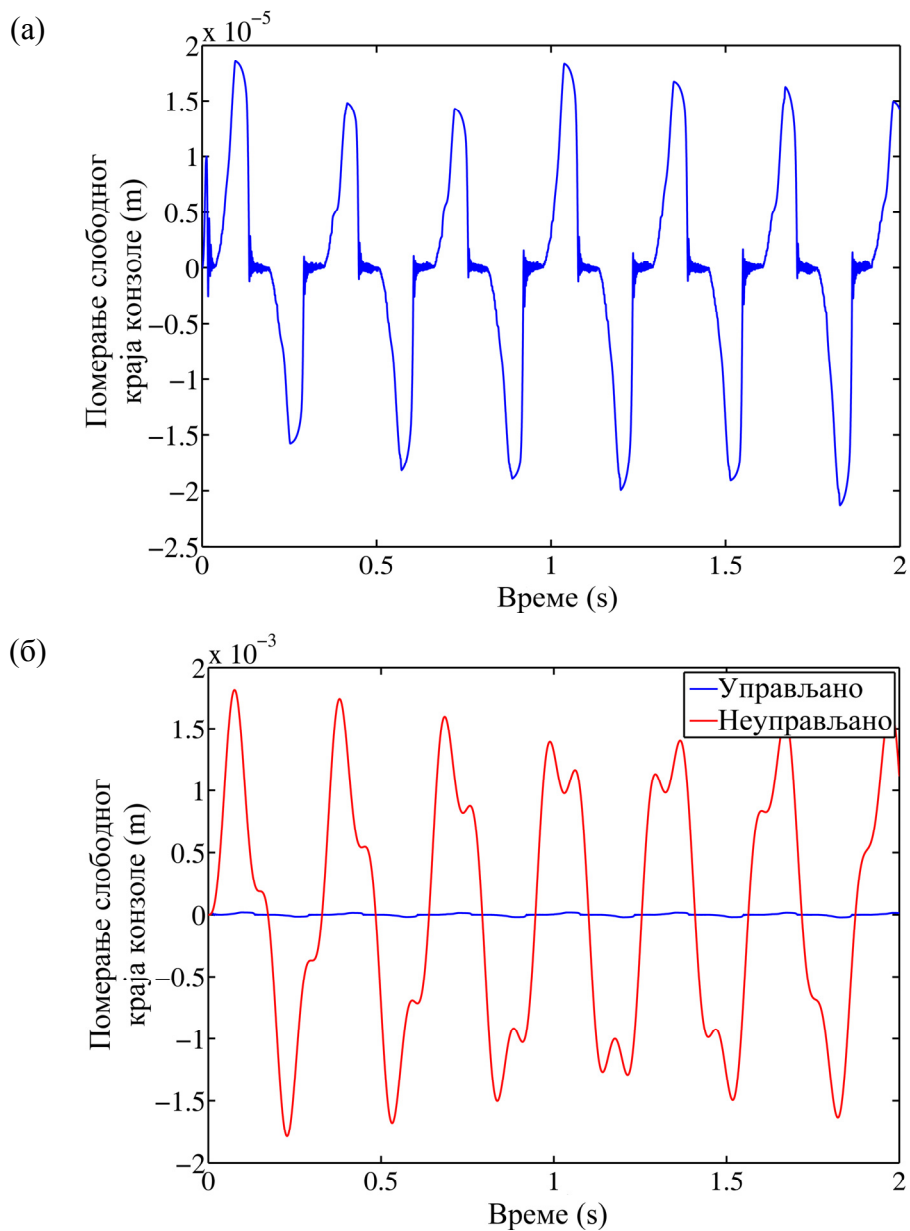
Табела 6.9. Оптимизовани параметри α_1 , β_1 , γ_1 , L_2 норма и максимални напон на актуатору за самоподешавајуће фази-логичко управљање базираног на Мамданијевом принципу закључивања за периодично оптерећење $0.04\sin(20t)$ [N]

α_1	β_1	γ_1	L_2 норма	Максимални напон на актуатору (V)
0.053	0.977	1	$1.207 \cdot 10^{-4}$	168

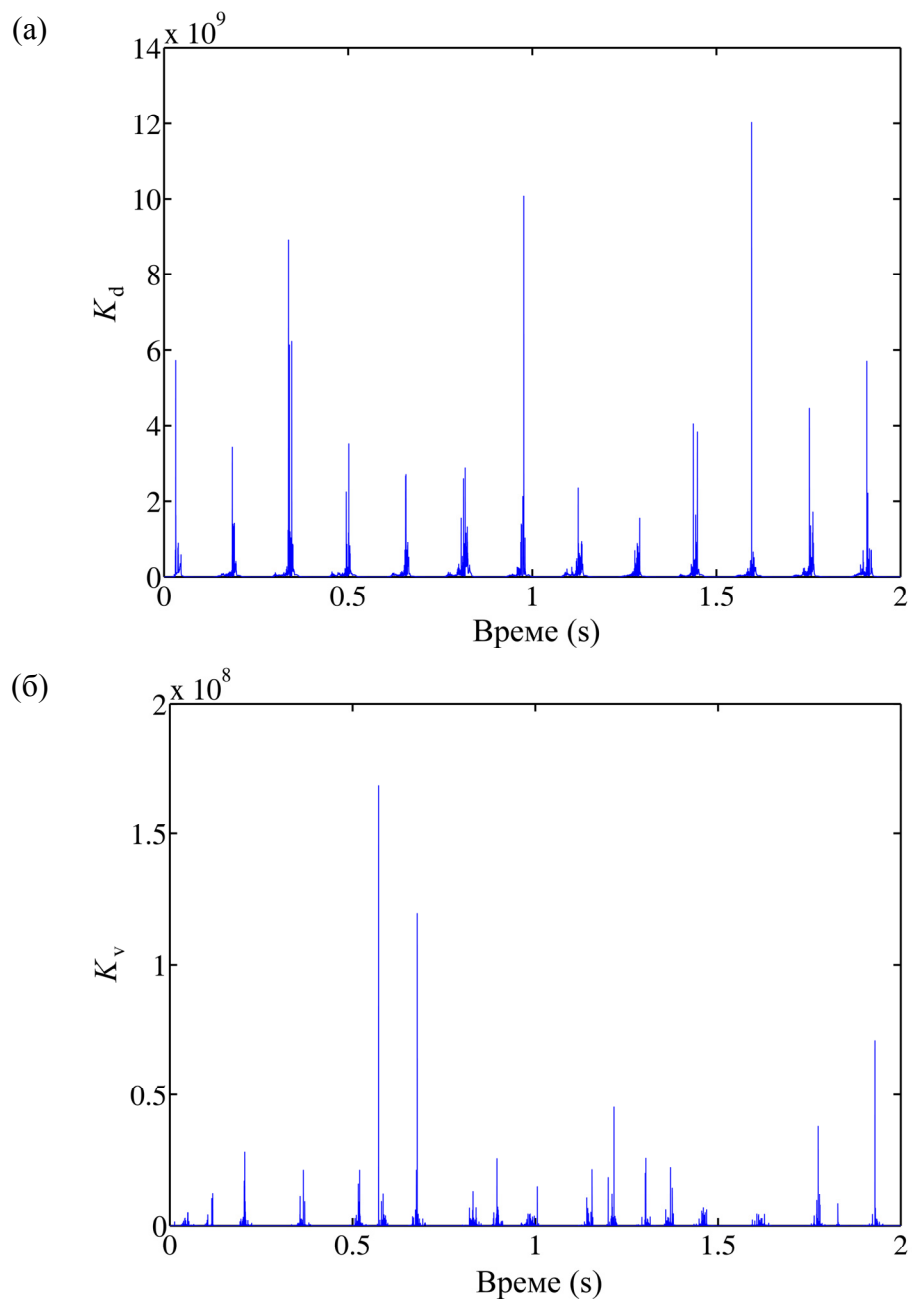


Слика 6.11. Површи фази-правила за Мамдани принцип закључивања

Слика 6.12(а) представља померање слободног краја конзоле за оптимизовано самоподешавајуће фази-логичко управљање базирано на Мамданијевом принципу закључивања. На слици 6.12(б) извршено је поређење померања слободног краја конзоле за случајеве када има и када нема активног управљања. На слици 6.13 приказана је промена скалирајућег фактора помераја и брзине током активног пригушења вибрација у случају првог почетног услова.



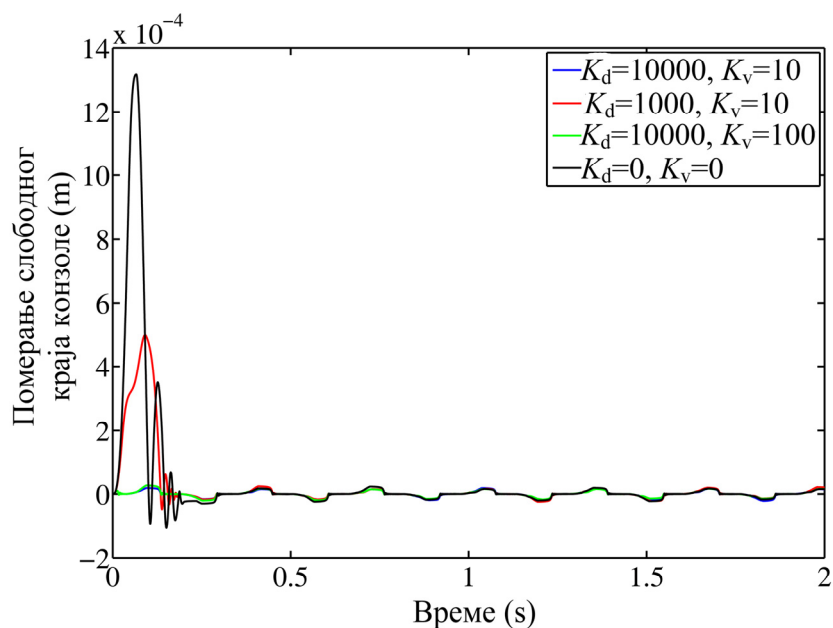
Слика 6.12. Померање слободног краја конзоле у случају дејства периодичног оптерећења $0.04\sin(20t)$ [N]: (а) за оптимизовано самоподешавајуће фази-логичко управљање базирано на Мамданијевом принципу закључивања, (б) поређење са случајем када нема активног пригушења вибрација



Слика 6.13. Промена скалирајућих фактора: (а) помераја, (б) брзине

Следеће што је урађено је испитивање како различите почетне вредности скалирајућих фактора утичу на перформансе представљеног управљачког система. Испитан је утицај за следеће почетне вредности скалирајућих фактора: $K_d = 1000$, $K_v = 10$; $K_d = 10000$, $K_v = 100$ и $K_d = 0$, $K_v = 0$, а при томе су коришћене функције припадности чији су параметри приказани у табели 6.9.

Померања слободног краја конзоле за те различите почетне вредности приказана су на слици 6.14.



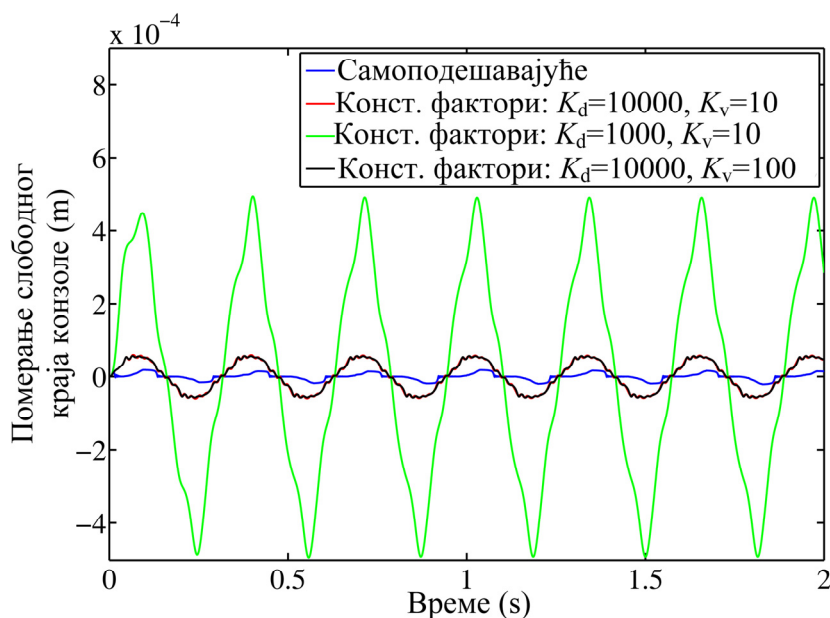
Слика 6.14. Померање слободног краја конзоле у случају дејства периодичног оптерећења $0.04\sin(20t)$ [N] за оптимизовано самоподешавајуће фази-логичко управљање базирано на Мамданијевом принципу закључивања: поређење утицаја различитих почетних вредности скалирајућих фактора

Са слике 6.14 може се закључити да различите почетне вредности скалирајућих фактора имају утицај на активно пригушење вибрација у првих 0.2s. После тога, ови фактори се подесе и перформансе после не зависе од почетних вредности фактора.

Наредни задатак је упоређивање оптимизованог самоподешавајућег фази-логичког управљачког система са оптимизованим фази-логичким управљачким системом са константним факторима базираних на Мамданијевом принципу закључивања. Разматрана су три случаја са различитим вредностима скалирајућих фактора: $K_d = 10000$, $K_v = 10$; $K_d = 1000$, $K_v = 10$ и $K_d = 10000$, $K_v = 100$. Резултати оптимизације приказани су у табели 6.10. Поређење оптимизованог самоподешавајућег и оптимизованих фази логичких управљачких система са константним факторима приказано је на слици 6.15, где је илустровано померање слободног краја конзоле за сваки случај.

Табела 6.10. Оптимизовани параметри α_1 , β_1 , γ_1 , L_2 норма и максимални напон на актуатору за фази-логичко управљање са константним факторима базирано на Мамданијевом принципу закључивања за периодично оптерећење на слободном крају конзоле $0.04\sin(20t)$ [N]

Почетна вредност K_d	Почетна вредност K_v	α_1	β_1	γ_1	L_2 норма	Максимални напон на актуатору (V)
10000	10	0.050	0.255	0.989	$5.2065 \cdot 10^{-4}$	167.593
1000	10	0.050	0.299	1	0.003789	135.06
10000	100	0.050	0.847	0.986	$5.1944 \cdot 10^{-4}$	167.44



Слика 6.15. Померање слободног краја конзоле у случају дејства периодичног оптерећења $0.04\sin(20t)$ [N]; поређење самоподешавајућег фази-логичког управљања са фази-логичким управљањем са константним факторима базираних на Мамданијевом принципу закључивања

Са слике 6.15 може се закључити да је, као и у случају слободних вибрација, самоподешавајуће фази-логичко управљање супериорније у погледу активног пригушења вибрација у односу на фази-логичко управљање са константним скалирајућим факторима.

Што се тиче ТСК принципа закључивања нултог реда, добијени резултати оптимизације (параметри функција припадности, L_2 норма и максимални напон на актуатору) за самоподешавајући управљачки систем су приказани у табели 6.11. У

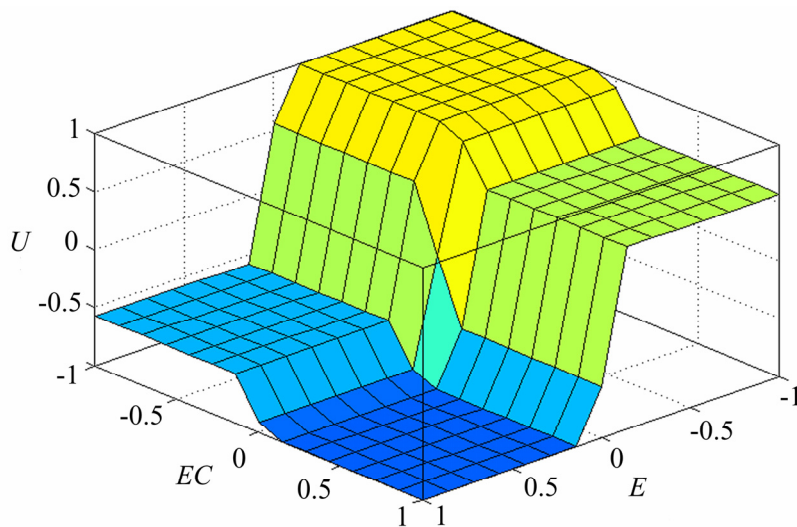
табели 6.12 приказана су правила закључивања добијена оптимизацијом. За почетне вредности скалирајућих фактора узете су исте вредности као за Мамдани закључивање: $K_d = 10000$, $K_v = 10$. Слика 6.16 представља површи фази правила за ТСК принцип закључивања нултог реда, за оптимизоване параметре приказане у табелама 6.11 и 6.12.

Табела 6.11. Оптимизовани параметри α_1 , β_1 , L_2 норма и максимални напон на актуатору за самоподешавајуће фази-логичко управљање у случају ТСК принципа закључивања за периодично оптерећење $0.04\sin(20t)$ [N]

α_1	β_1	L_2 норма	Максимални напон на актуатору (V)
0.0528	0.0522	$7.843 \cdot 10^{-5}$	200

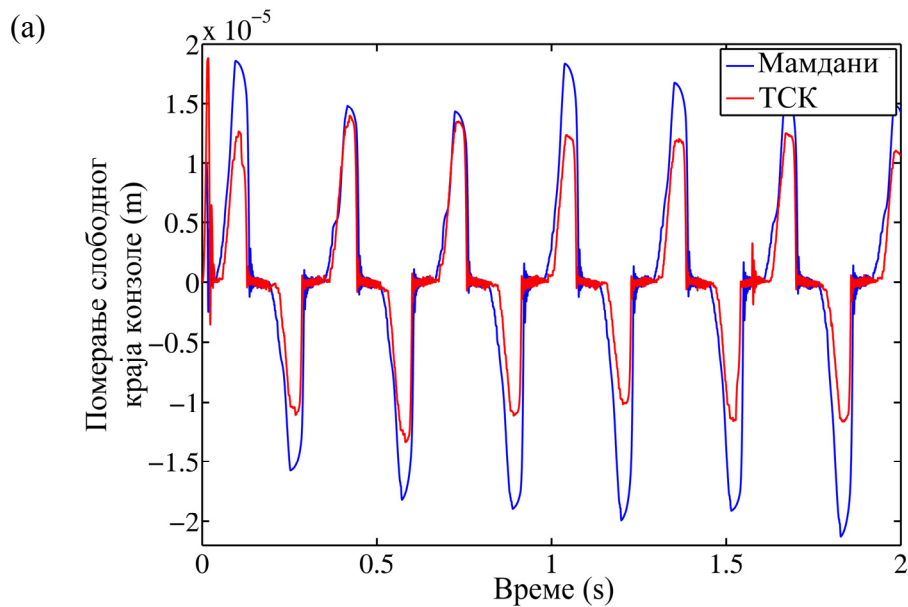
Табела 6.12. Правила закључивања за оптимизовани самоподешавајуће фази-логичко управљање базирано на ТСК принципу закључивања за периодично оптерећење $0.04\sin(20t)$ [N]

		EC				
		NB	NS	ZE	PS	PB
E	NB	1	0.933	0.908	0.702	0.574
	NS	0.576	0.512	0.326	-0.092	-0.121
	ZE	0.555	0.308	0	-0.308	-0.555
	PS	0.121	0.092	-0.326	-0.512	-0.576
	PB	-0.574	-0.702	-0.908	-0.933	-1

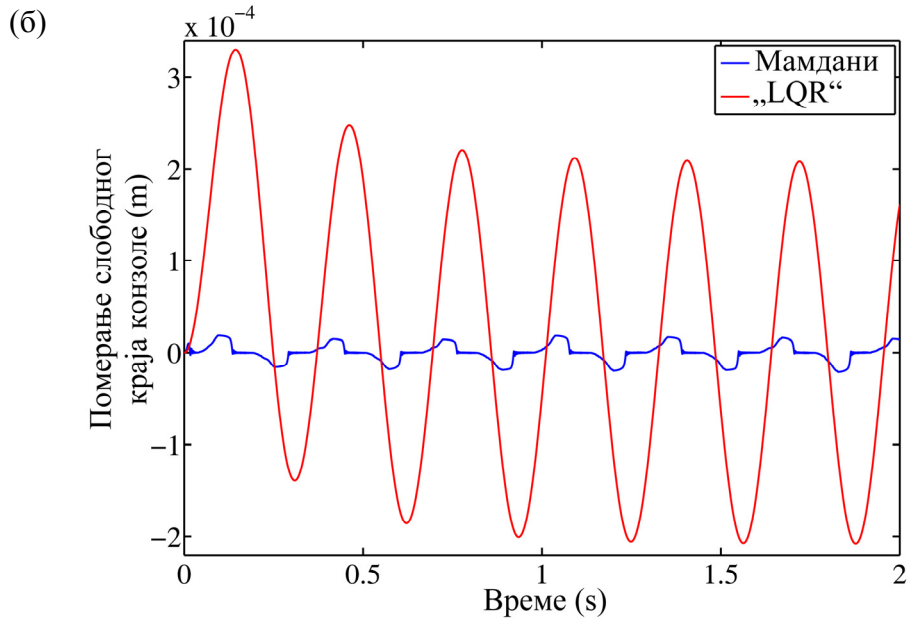


Слика 6.16. Површи фази-правила за ТСК принцип закључивања нултог реда

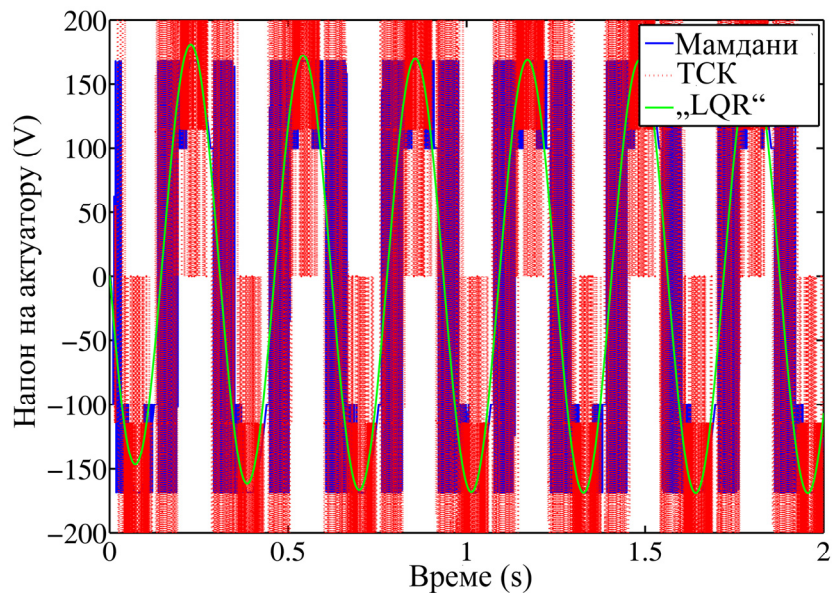
Поређење перформанси самоподешавајућег фази-логичког управљачког система за Мамдани и ТСК принцип закључивања приказано је на слици 6.17(а), где је приказано померање слободног краја конзоле. Такође, методом покушаја нађене су вредности матрица $[Q]$ и $[R]$ за линеарно-квадратни регулатор. Вредност ових матрица је: $[Q]=10^{11}[I]_{2 \times 2}$, $[R]=0.5$, а максимални напон који се јавља на актуатору је 181.2V. Поређење перформанси између линеарно-квадратног регулатора и самоподешавајућег фази-логичког управљања базираног на Мамданијевом принципу закључивања приказано је на слици 6.17(б). Напон на актуатору који се јавља током активног пригушења вибрација за сва три случаја приказан је на слици 6.18.



Слика 6.17. (наставља се...)



Слика 6.17. Померање слободног краја конзоле у случају дејства периодичног оптерећења $0.04\sin(20t)$ [N]: (а) поређење оптимизованих самоподешавајућих фази-логичких управљачких система базираних на Мамданијевом и ТСК принципу закључивања нултог реда, (б) поређење оптимизованог самоподешавајућег фази-логичког управљачког система базираног на Мамданијевом принципу закључивања и линеарно-квadratног регулатора



Слика 6.18. Напон на актуатору у случају дејства периодичног оптерећења $0.04\sin(20t)$ [N]: поређење оптимизованих самоподешавајућих фази-логичких управљачких система базираних на Мамданијевом и ТСК принципу закључивања и линеарно-квadratног регулатора

Са слике 6.17(a) може се видети да оптимизовано самоподешавајуће фази-логичко управљање базирано на ТСК принципу закључивања нултог реда пружа боље перформансе у погледу активног пригушења вибрација у односу на Мамдани принцип закључивања. Ово се може закључити поређењем L_2 норме за сваки принцип закључивања, приказане у табелама 6.9 и 6.11. Такође, из ових табела може се видети да је максимални напон код ТСК принципа закључивања нултог реда већи него код Мамданијевог принципа. Са слике 6.17(б) може се закључити да је оптимизовано самоподешавајуће фази-логичко управљање базирано на Мамданијевом принципу закључивања супериорније у односу на линеарно-квадратни регулатор.

Следећа оптимизација је урађена за оптерећења $0.035\sin(20t)$ и $0.045\sin(20t)$. Циљ ове оптимизације је да се закључи како промена у амплитуди, при истој фреквенцији спољашњег оптерећења, утиче на резултате оптимизације. Као и у претходним случајевима, за почетне вредности скалирајућих фактора узете су следеће величине: $K_d = 10000$, $K_v = 10$. У табели 6.13 приказани су оптимизовани параметри функција припадности, L_2 норма и максимални напон на актуатору за самоподешавајуће фази-логичко управљање базирано на Мамданијевом принципу закључивања. За ТСК принцип закључивања нултог реда, оптимизовани параметри функција припадности, L_2 норма и максимални напон на актуатору приказани су у табели 6.14. У табелама 6.15 и 6.16 приказана су правила закључивања добијена оптимизацијом за наведена оптерећења.

Табела 6.13. Оптимизовани параметри α_1 , β_1 , γ_1 , L_2 норма и максимални напон на актуатору за самоподешавајуће фази-логичко управљање базораног на Мамданијевом принципу закључивања за периодична оптерећења $0.035\sin(20t)$ [N] и $0.045\sin(20t)$ [N]

Оптерећење	α_1	β_1	γ_1	L_2 норма	Максимални напон на актуатору (V)
$0.035\sin(20t)$	0.053	0.977	1	$4.013 \cdot 10^{-5}$	168
$0.045\sin(20t)$	0.053	0.977	1	0.00183	168

Табела 6.14. Оптимизовани параметри α_1 , β_1 , L_2 норма и максимални напон на актуатору за самоподешавајуће фази-логичко управљање у случају ТСК принципа закључивања за периодично оптерећење $0.035\sin(20t)$ [N] и $0.045\sin(20t)$ [N]

Оптерећење	α_1	β_1	L_2 норма	Максимални напон на актуатору (V)
$0.035\sin(20t)$	0.0528	0.0522	$1.623 \cdot 10^{-5}$	200
$0.045\sin(20t)$	0.0528	0.0522	$1.177 \cdot 10^{-4}$	200

Табела 6.15. Правила закључивања за оптимизовани самоподешавајуће фази-логичко управљање базирано на ТСК принципу закључивања за периодично оптерећење $0.035\sin(20t)$ [N]

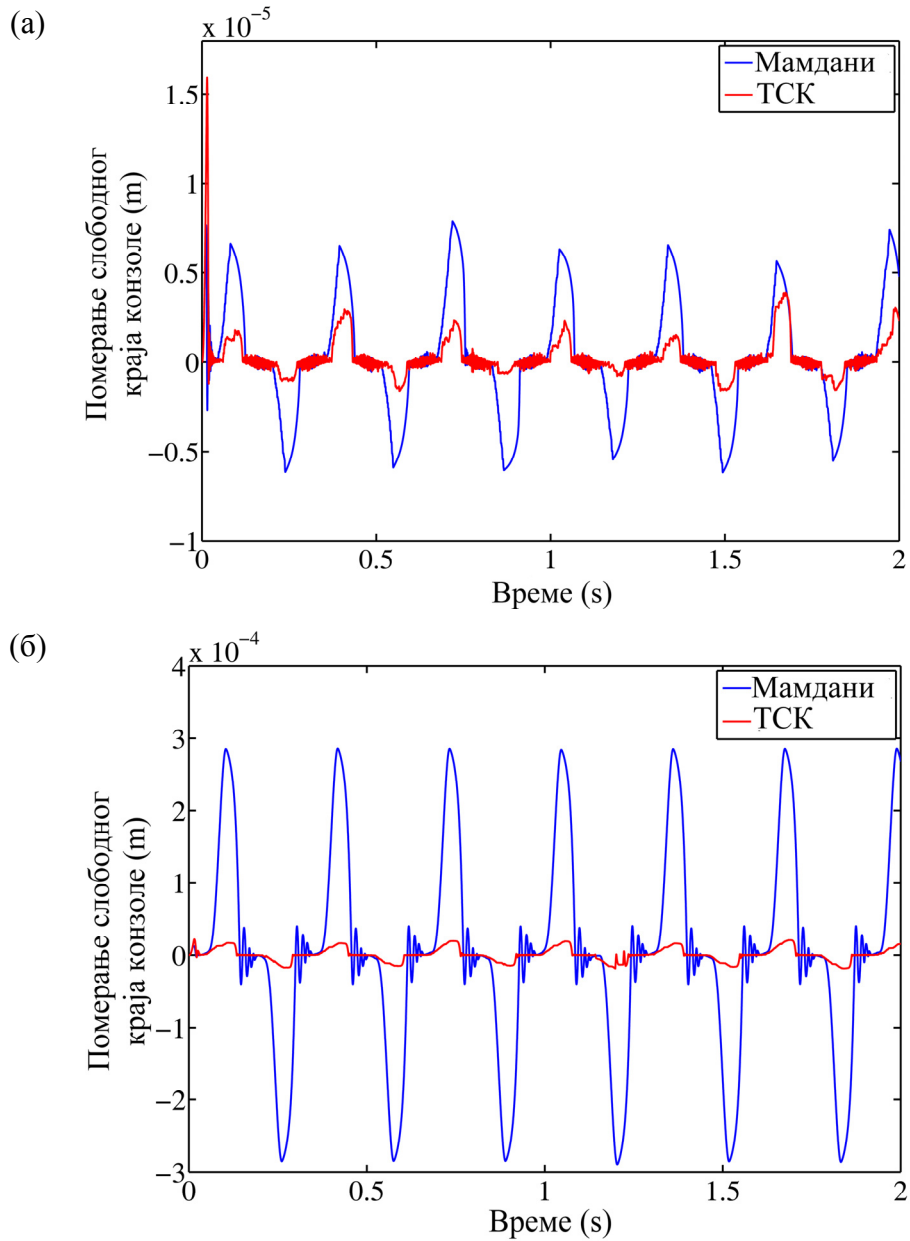
		ЕС				
		NB	NS	ZE	PS	PB
E	NB	1	0.933	0.908	0.702	0.574
	NS	0.576	0.512	0.326	-0.092	-0.121
	ZE	0.555	0.308	0	-0.308	-0.555
	PS	0.121	0.092	-0.326	-0.512	-0.576
	PB	-0.574	-0.702	-0.908	-0.933	-1

Табела 6.16. Правила закључивања за оптимизовани самоподешавајуће фази-логичко управљање базирано на ТСК принципу закључивања за периодично оптерећење $0.045\sin(20t)$ [N]

		ЕС				
		NB	NS	ZE	PS	PB
E	NB	1	0.933	0.908	0.702	0.574
	NS	0.576	0.512	0.326	-0.092	-0.121
	ZE	0.555	0.308	0	-0.308	-0.555
	PS	0.121	0.092	-0.326	-0.512	-0.576
	PB	-0.574	-0.702	-0.908	-0.933	-1

Упоредивајући податке у табелама 6.13 – 6.16 са подацима у табелама 6.9, 6.11 и 6.12, може се закључити да се за различите амплитуде спољашњег оптерећења, при истој фреквенцији, добијају исте вредности параметара функција припадности. Поређење Мамданијевог и ТСК принципа закључивања за оптерећења $0.035\sin(20t)$ и $0.045\sin(20t)$ [N] приказано је на слици 6.19, где је приказано померање слободног краја конзоле за ове случајеве. На основу слике 6.19, као и вредности L_2 норми у табелама 6.13 и 6.14, може се закључити да је

оптимизовано самоподешавајуће фази логичко управљање базирано на ТСК принципу закључивања нултог реда суперионије у погледу активног пригушења вибрација у односу на Мамдани принцип закључивања.



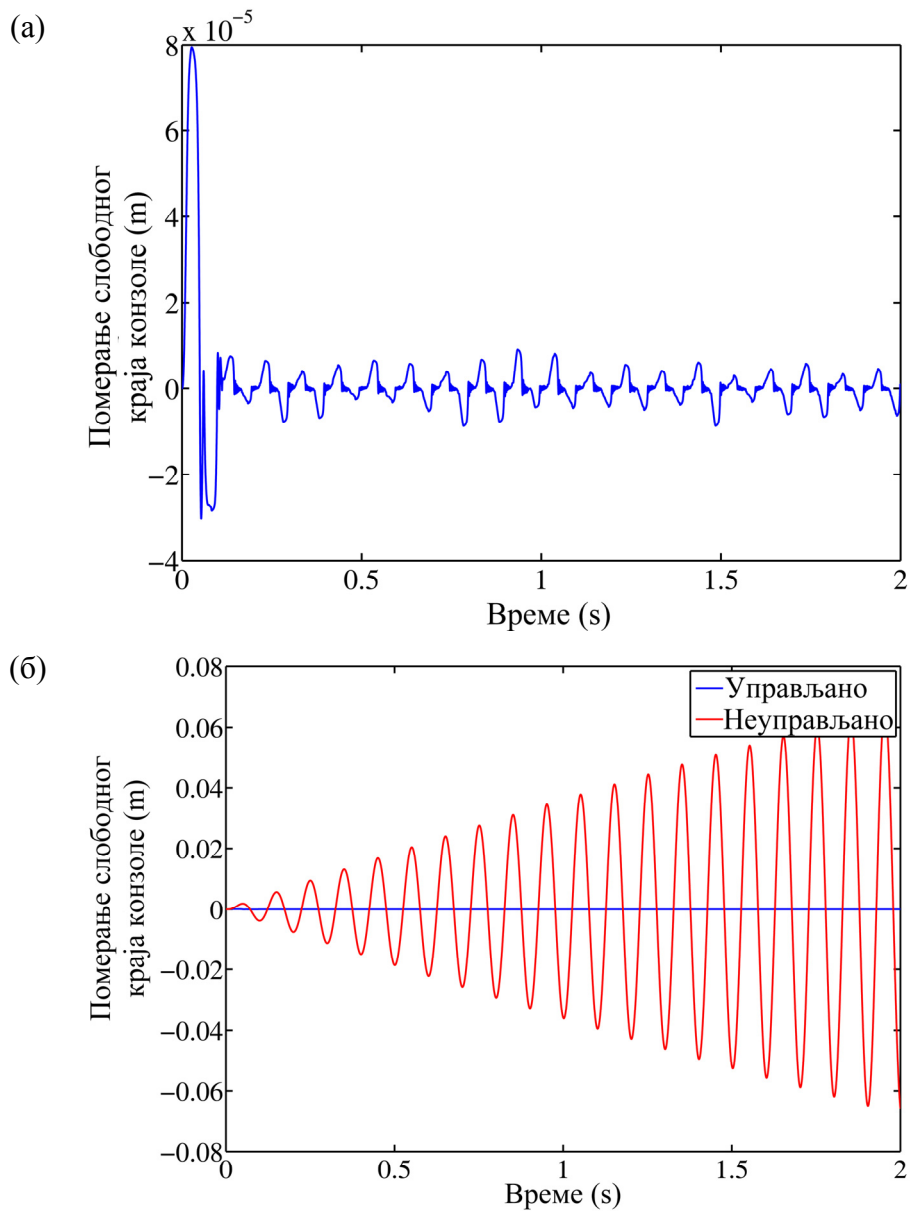
Слика 6.19. Померање слободног краја конзоле; поређење оптимизованих самоподешавајућих фази-логичких управљачких система базираних на Мамданијевом и ТСК принципу закључивања нултог реда: (а) $0.035\sin(20t)$ [N], (б) $0.045\sin(20t)$ [N]

6.3.2 Периодично оптерећење на слободном крају конзоле на резонантној фреквенцији

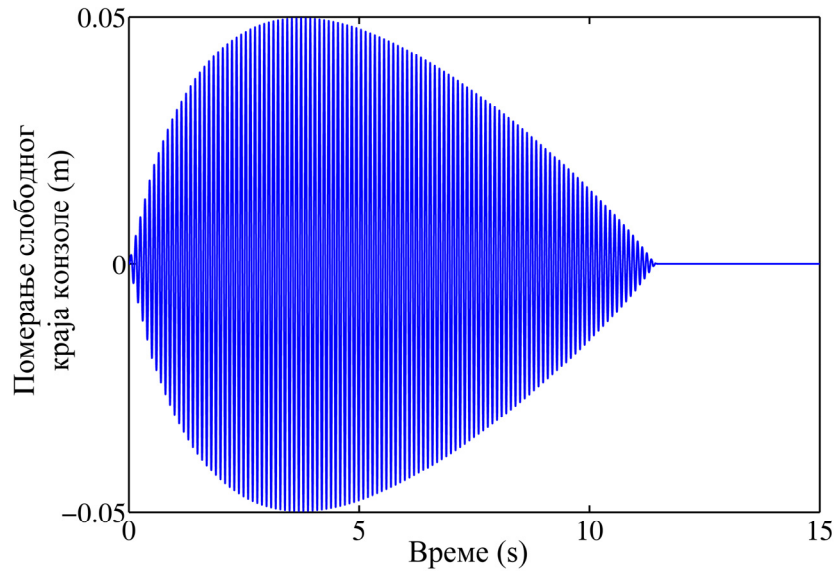
Потребно је испитати перформансе управљачког система у случају када спољашње оптерећење има фреквенцију која је једнака фреквенцији првог мода конзоле (случај резонанције). Тако је овде узето у обзир оптерећење $0.04\sin(62.703t)$ [N] које делује на слободном крају конзоле. За почетне вредности скалирајућих фактора узете су исте величине као и у претходним случајевима: $K_d = 10000$, $K_v = 10$. У табели 6.17 приказани су оптимизовани параметри α_1 , β_1 , γ_1 , функција циља (L_2 норма) и максимални напон који се јавља на актуатору за самоподешавајуће фази-логички управљачки систем базиран на Мамданијевом принципу закључивања. Слика 6.20(а) представља померање слободног краја конзоле за оптимизовано самоподешавајуће фази-логичко управљање базирано на Мамданијевом принципу закључивања, а на слици 6.20(б) извршено је поређење померања слободног краја конзоле за случајеве када има и када нема активног управљања. Слика 6.21 приказује померање слободног краја конзоле за случај када управљање почиње од 0.5-те секунде. Поредећи оптимизоване параметре приказане у табели 6.17 са параметрима добијеним у претходним случајевима оптерећења, може се закључити да су добијени параметри идентични.

Табела 6.17. Оптимизовани параметри α_1 , β_1 , γ_1 , L_2 норма и максимални напон на актуатору за самоподешавајуће фази-логичко управљање базираног на Мамданијевом принципу закључивања за периодично оптерећење $0.04\sin(62.703t)$ [N]

α_1	β_1	γ_1	L_2 норма	Максимални напон на актуатору (V)
0.053	0.977	1	$1.362 \cdot 10^{-4}$	168



Слика 6.20. Померање слободног краја конзоле у случају дејства периодичног оптерећења $0.04\sin(62.703t)$ [N]: (а) за оптимизовано самоподешавајуће фазилоричко управљање базирано на Мамданијевом принципу закључивања, (б) поређење са случајем када нема активног пригушења вибрација



Слика 6.21. Померање слободног краја конзоле у случају дејства периодичног оптерећења $0.04\sin(62.703t)$ [N] за оптимизовано самоподешавајуће фази-логичко управљање базирано на Мамданијевом принципу закључивања: управљање почиње након 0.5-те секунде

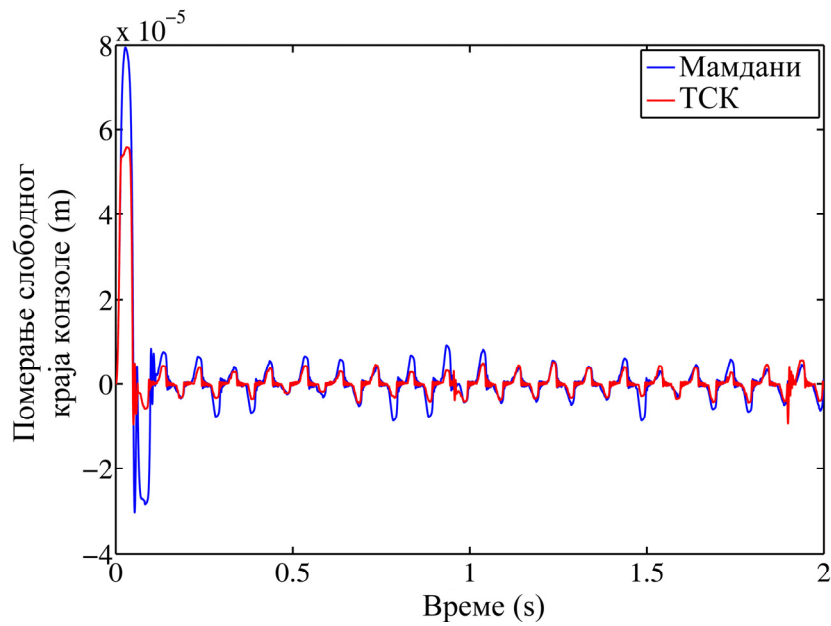
Што се тиче ТСК принципа закључивања нултог реда, добијени резултати оптимизације (параметри функција припадности, L_2 норма и максимални напон на актуатору) за самоподешавајући управљачки систем су приказани у табели 6.18. У табели 6.19 приказана су правила закључивања добијена оптимизацијом. Почетне вредности за скалирајуће факторе су узети исто као за Мамдани закључивање: $K_d = 10000$, $K_v = 10$. Из табела 6.18 и 6.19 може се видети да су добијени параметри функција припадности и правила закључивања исти као и за случај анализиран за оптерећење фреквенције 20rad/s . Слика 6.22 представља поређење перформанси самоподешавајућег фази-логичког управљачког система за Мамдани и ТСК принцип закључивања, док је на слици 6.23 приказано померање слободног краја конзоле за случај када управљање почиње од 0.5-те секунде.

Табела 6.18. Оптимизовани параметри α_1 , β_1 , L_2 норма и максимални напон на актуатору за самоподешавајуће фази-логичко управљање у случају ТСК принципа закључивања за периодично оптерећење $0.04\sin(62.703t)$ [N]

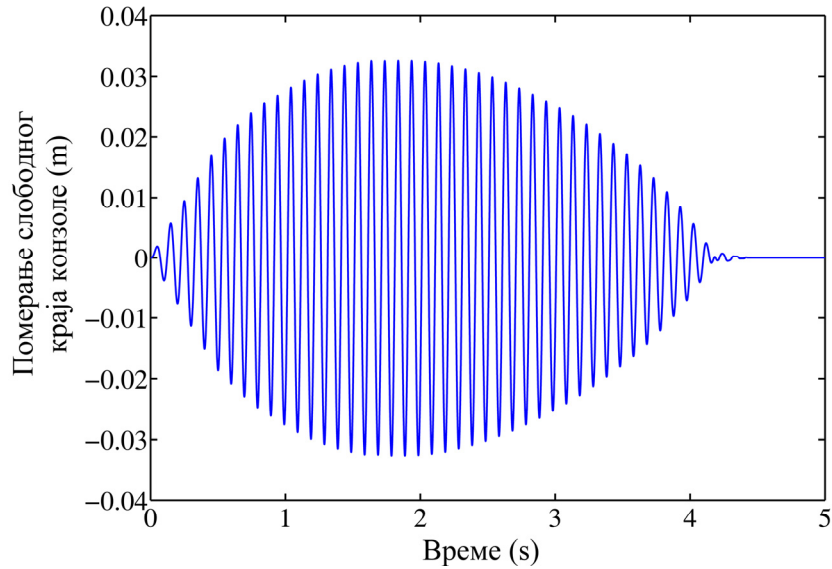
α_1	β_1	L_2 норма	Максимални напон на актуатору (V)
0.0528	0.0522	$9.517 \cdot 10^{-5}$	200

Табела 6.19. Правила закључивања за оптимизовани самоподешавајуће фази-логичко управљање базирано на ТСК принципу закључивања за периодично оптерећење $0.04\sin(62.703t)$ [N]

		EC				
		NB	NS	ZE	PS	PB
E	NB	1	0.933	0.908	0.702	0.574
	NS	0.576	0.512	0.326	-0.092	-0.121
	ZE	0.555	0.308	0	-0.308	-0.555
	PS	0.121	0.092	-0.326	-0.512	-0.576
	PB	-0.574	-0.702	-0.908	-0.933	-1

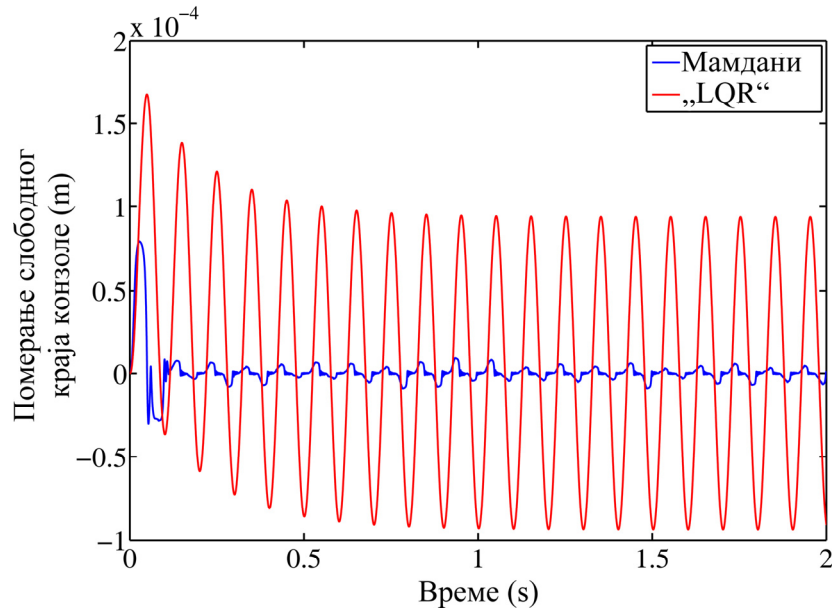


Слика 6.22. Померање слободног краја конзоле у случају дејства периодичног оптерећења $0.04\sin(62.703t)$ [N]: поређење самоподешавајућих фази-логичких управљачких система базираних на Мамданијевом и ТСК принципу закључивања нултог реда



Слика 6.23. Померање слободног краја конзоле у случају дејства периодичног оптерећења $0.04\sin(62.703t)$ [N] за оптимизовано самоподешавајуће фази-логичко управљање базирано на ТСК принципу закључивања нултог реда: управљање почиње након 0.5-те секунде

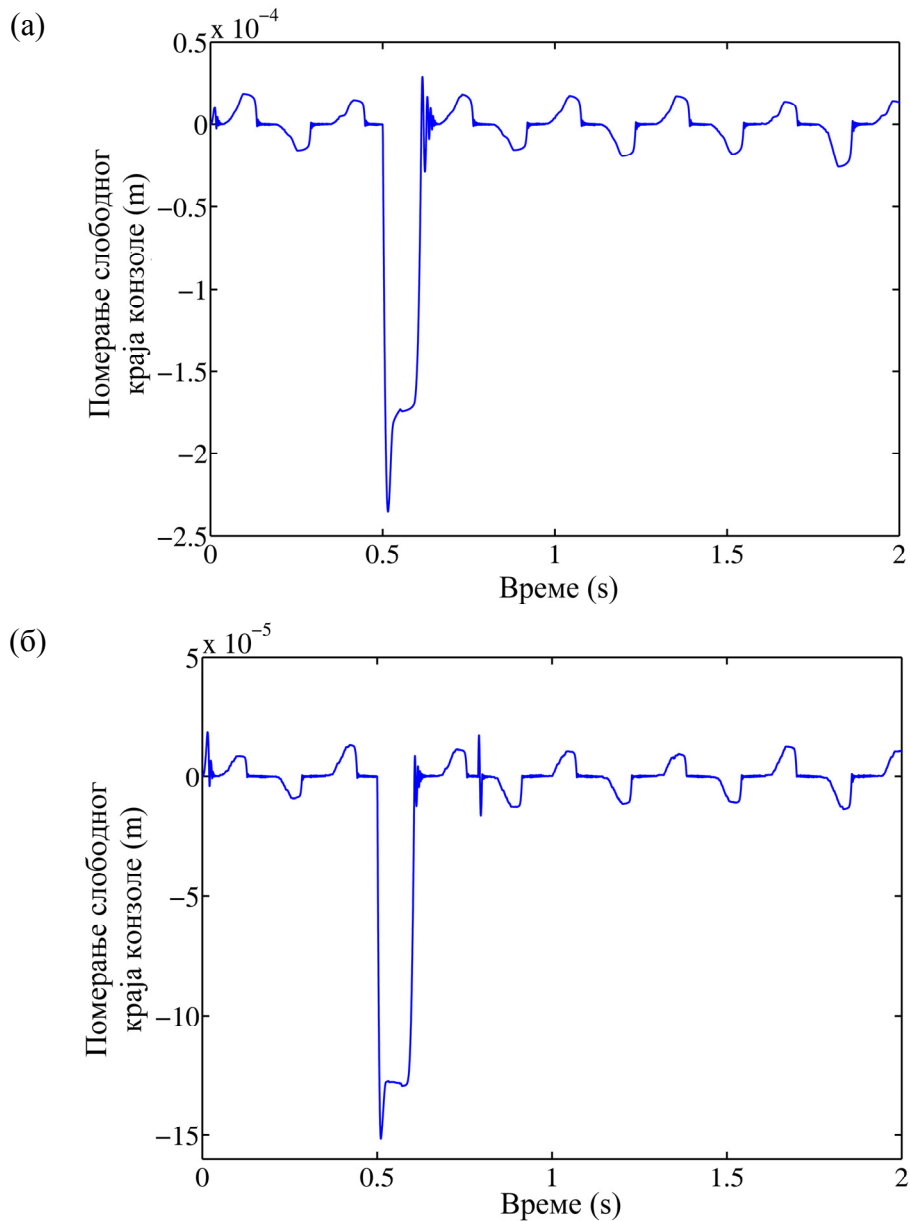
За случај линеарно-квadratног регулатора, методом покушаја нађене су следеће вредности тежинских матрица: $[Q]=10^{11}[I]_{2 \times 2}$, $[R]=1$. Максимални напон који се јавља на актуатору у случају ових тежинских матрица је 178.572V. Поређење перформанси између линеарно-квadratног регулатора и самоподешавајућег фази-логичког управљања базираног на Мамданијевом принципу закључивања приказано је на слици 6.24.



Слика 6.24. Померање слободног краја конзоле у случају дејства периодичног оптерећења $0.04\sin(62.703t)$ [N]: поређење самоподешавајућег фази-логичког управљачког система базираном на Мамданијевом принципу закључивања и „LQR“ оптималног управљања

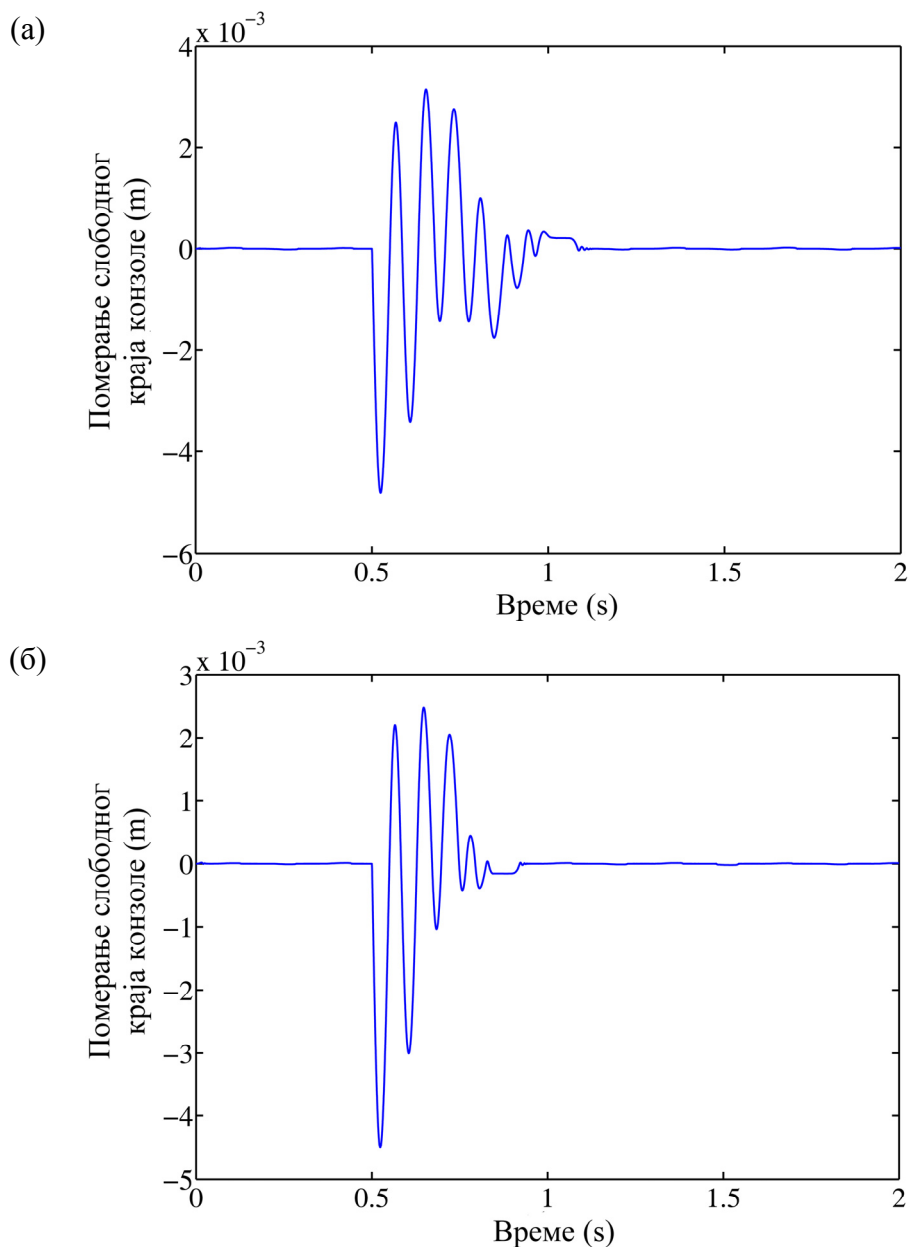
6.3.3 Периодично оптерећење са изненадним ударним импулсима

Овде је приказано испитивање робусности оптимизованих самоподешавајућих фази-логичких управљачких система под дејством периодичног оптерећења са неочекиваним поремећајем. За анализу су узета периодична оптерећења $0.04\sin(20t)$ [N] и $0.04\sin(62.703t)$ [N] и неочекивани удари у 0.5-тој секунди од 1N трајању од 1ms, односно 10N у трајању од 1ms. На слици 6.25 приказано је померање слободног краја конзоле у случају дејства периодичног оптерећења $0.04\sin(20t)$ [N] са неочекиваним ударом у 0.5s од 1N у трајању 1ms.



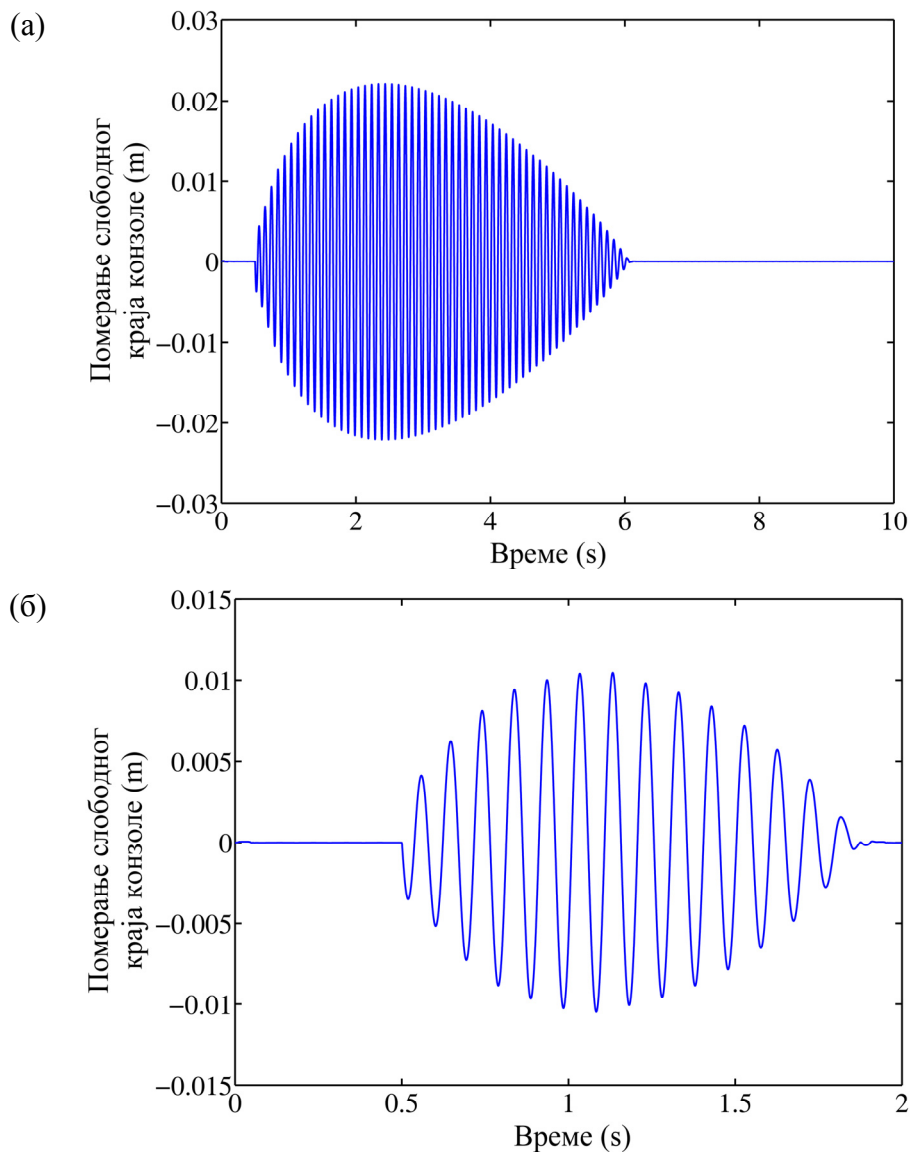
Слика 6.25. Померање слободног краја конзоле у случају дејства периодичног оптерећења $0.04\sin(20t)$ [N] са неочекиваним ударом у 0.5s од 1N у трајању 1ms за оптимизовано самоподешавајуће фази-логичко управљање: (а) Мамдани, (б) ТСК принцип закључивања нултог реда

Померање слободног краја конзоле у случају дејства периодичног оптерећења $0.04\sin(20t)$ [N] са неочекиваним ударом у 0.5s од 10N у трајању 1ms приказано је на слици 6.26.



Слика 6.26. Померање слободног краја конзоле у случају дејства периодичног оптерећења $0.04\sin(20t)$ [N] са неочекиваним ударом у 0.5s од 10N у трајању 1ms за оптимизовано самоподешавајуће фази-логичко управљање: (а) Мамдани, (б) ТСК принцип закључивања нултог реда

Што се тиче дејства оптерећења на резонантној фреквенцији са неочекиваним ударом од 10N у трајању 1ms у 0.5-тој секунди, померање слободног краја конзоле приказано је на слици 6.27.



Слика 6.27. Померање слободног краја конзоле у случају дејства периодичног оптерећења $0.04\sin(62.703t)$ [N] са неочекиваним ударом у 0.5s од 10N у трајању 1ms за оптимизовано самоподешавајуће фази-логичко управљање: (а) Мамдани, (б) ТСК принцип закључивања нултог реда

Са слика 6.25 - 6.27, може се закључити самоподешавајуће фази-логичко управљање показује велики степен робусности према изненадним ударима.

6.4 Закључак

После нумеричког испитивања оптимизованог самоподешавајућег фази логичког управљачког система за слободне и принудне вибрације композитне конзоле може се закључити да резултати оптимизације не зависе од почетних услова оптерећења код слободних вибрација, као ни од принудне силе код принудних вибрација. Ово важи и за Мамдани и за ТСК принцип закључивања нултог реда. Другим речима, решење је робусно према карактеристикама оптерећења, што овај алгоритам чини корисним за структуре које су изложене различитим оптерећењима. Приликом оптимизације параметара функција припадности, довољно је произвољно изабрати оптерећење, а решење ће бити оптимално за остала оптерећења која се јављају током експлоатације. Наравно, при том треба водити рачуна да ли се јављају слободне или принудне вибрације.

Промена почетних вредности скалирајућих фактора за оптимизовани самоподешавајући фази-логички управљачки систем не утиче на перформансе активног пригушења вибрација.

Поређење оптимизованог самоподешавајућег са оптимизованим фази-логичким управљачким системом са константним факторима у случају Мамданијевог принципа закључивања показује да оптимизовани самоподешавајући управљачки систем има знатно боље перформансе у односу на онај са константним факторима.

Поређење оптимизованог самоподешавајућег фази-логичког управљачког система са линеарно-квadratним регулатором показује да се најбоље перформансе остварују за ТСК принцип закључивања нултог реда, затим следи Мамдани принцип закључивања, док најлошије перформансе показије линеарно-квadratни регулатор.

Глава 7

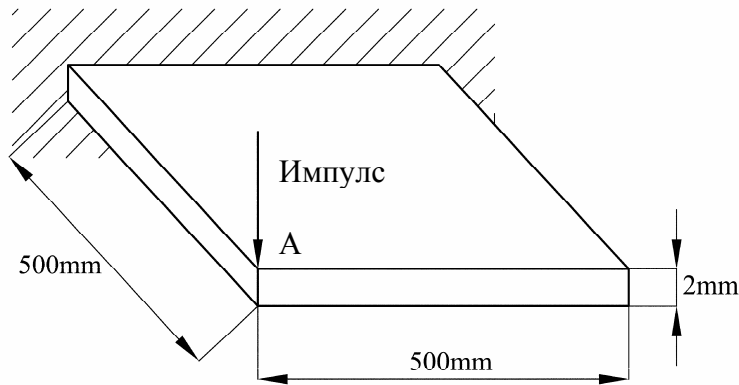
Активно пригушење вибрација композитне плоче

7.1 Увод

У глави 6 испитан је самоподешавајући фази-логички управљачки систем за активно пригушење вибрација композитне конзоле. У овој глави иста процедура биће спроведена на композитној плочи са оријентацијом слојева $(90^\circ/0^\circ/90^\circ/0^\circ)_S$. Конфигурација актуатор-сензор парова која је добијена оптимизацијом у глави 4, за покривеност површине 15%, биће употребљена у овој анализи.

7.2 Активно пригушење слободних вибрација

Активно пригушење слободних вибрација плоче са оријентацијом слојева $(90^\circ/0^\circ/90^\circ/0^\circ)_S$ рађено је за ударни импулс од 300N у трајању од 0.1ms у слободан угао, тј тачку А, која је означена на слици 7.1. Разлог зашто је ова тачка узета као место на које делује оптерећење, а и касније ће бити посматрано њено померање за сваки мод осциловања, је тај што за сваки мод осциловања ова тачка има највећу амплитуду, што се може видети на слици 3.5. Такође, претпоставиће се да ће дејство ударног импулса у ову тачку изазвати свих шест модова осциловања. На тај начин, ова тачка верно приказује понашање структуре приликом вибрација.



Слика 7.1. Дејство ударног импулса на плочу.

Матрица улаза $[\bar{B}]$ за задату конфигурацију актуатор-сензор парова износи:

$$[\bar{B}] = 10^3 \begin{bmatrix} -1.7234 & -1.7864 & 0.0636 & -0.4108 & -0.1088 \\ 3.4777 & -3.3 & 0.0205 & 1.9786 & -1.7422 \\ -7.7102 & -7.0136 & -2.1983 & 4.9142 & 1.1112 \\ -10.9496 & 11.8344 & 0.3721 & 6.5562 & -8.2981 \\ 2.715 & 2.9872 & 2.7 & 5.4935 & 5.5988 \\ 11.1649 & 12.5939 & -23.78 & -4.3202 & -14.7885 \end{bmatrix}. \quad (7.1)$$

Врсте ове матрице одговарају модовима осциловања (прва врста првом моду, друга врста другом моду, итд.), а колоне одговарају актуаторима (прва колона првом актуатору, друга колона другом актуатору, итд.). Из матрице улаза може се закључити следеће о управљивости одговарајућих модова осциловања:

1. Први мод: највећа управљивост остварује се преко прва два актуатора. Иако су ова два актуатора постављена симетрично у односу на подужну осу плоче, ипак не дају једнаку управљивост јер симетрију нарушавају остали актуатор-сензор парови. Нешто мања управљивост се остварује преко четвртог актуатора, док је управљивост трећег актуатора скоро занемарљива.
2. Други мод: важи исто као и за први мод.
3. Трећи мод: важи исто као и за претходна два, само је управљивост преко трећег актуатора реда величине као код осталих актуатора.
4. Четврти мод: управљивост је максимална код прва два актуатора, али четврти и пети актуатор пружају такође добру управљивост.

5. Пети мод: управљивост који пружају свих пет актуатора су истих редова величина, стим да четврти и пети актуатор пружају највећу управљивост.
6. Шести мод: највећа управљивост остварује се преко трећег актуатора, затим преко петог. Управљивост која се остварује преко прва два актуатора је нешто мања од управљивости преко трећег и петог актуатора, док је код четвртог актуатора најмања управљивост.

Приликом избора матрице излазних тежинских фактора, за одговарајући мод осциловања више ће се користити они актуатори са којима се постижу највеће управљивости, али у складу са једначином (5.14). Имајући у виду матрицу излаза, дату једначином (7.1), изабрана је следећа матрица излазних тежинских фактора:

$$[w] = \begin{bmatrix} 0.8 & 0.2 & 0 & 0 & 0 \\ 0.2 & 0.4 & 0 & 0 & 0.4 \\ 0 & 0.1 & 0 & 0.8 & 0 \\ 0 & 0.2 & 0 & 0 & 0.4 \\ 0 & 0 & 0.5 & 0.2 & 0.2 \\ 0 & 0.1 & 0.5 & 0 & 0 \end{bmatrix}. \quad (7.2)$$

Да би упоредили резултате, оптимизација за сваки мод појединачно ће се вршити за излазне тежинске факторе изабране за пригушење свих 6 модова (једначина (7.2)) и за случај када су сви актуатори активни и раде под пуним оптерећењем за дати мод ($(w)_i = (1 \ 1 \ 1 \ 1 \ 1)$).

У табели 7.1 приказане су оптимизоване вредности параметара функција припадности и функција циља за самоподешавајуће фази-логичко управљање базирано на Мамданијевом принципу закључивања за сваки мод осциловања и за две вредности излазних тежинских фактора за сваки мод. Табела 7.2 приказује оптимизоване параметре α_i и функцију циља за самоподешавајуће фази-логичко управљање базирано ТСК принципу закључивања нултог реда. Уколико се међусобно упореде подаци у табелама 7.1 и 7.2 може се закључити да су оптимизовани параметри исти за сваки мод осциловања и за сваку комбинацију излазних тежинских фактора. Такође, поредећи ове резултате са резултатима у табелама 6.1 и 6.4, види се да су параметри код плоче исти као и код греде.

Табела 7.1. Оптимизовани параметри α_i , β_i , γ_i , функција циља за самоподешавајуће фази-логичко управљање у случају Мамданијевог принципа закључивања

Мод осц.	(w)	$\begin{bmatrix} \alpha_1 \\ \alpha_2 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} \beta_1 \\ \beta_2 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} \gamma_1 \\ \gamma_2 \end{bmatrix}$	Функција циља
1.	(0.8 0.2 0 0 0)	$\begin{bmatrix} 1 \\ 0.991 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0.384 \\ 0.278 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 1 \\ 0.812 \end{bmatrix}$	1.0964
	(1 1 1 1 1)	$\begin{bmatrix} 1 \\ 0.991 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0.384 \\ 0.278 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 1 \\ 0.812 \end{bmatrix}$	1.2706
2.	(0.2 0.4 0 0 0.4)	$\begin{bmatrix} 1 \\ 0.991 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0.384 \\ 0.278 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 1 \\ 0.812 \end{bmatrix}$	1.0488
	(1 1 1 1 1)	$\begin{bmatrix} 1 \\ 0.991 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0.384 \\ 0.278 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 1 \\ 0.812 \end{bmatrix}$	1.2126
3.	(0 0.1 0 0.8 0)	$\begin{bmatrix} 1 \\ 0.991 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0.384 \\ 0.278 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 1 \\ 0.812 \end{bmatrix}$	1.0428
	(1 1 1 1 1)	$\begin{bmatrix} 1 \\ 0.991 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0.384 \\ 0.278 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 1 \\ 0.812 \end{bmatrix}$	1.2374
4.	(0 0.2 0 0 0.4)	$\begin{bmatrix} 1 \\ 0.991 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0.384 \\ 0.278 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 1 \\ 0.812 \end{bmatrix}$	1.0246
	(1 1 1 1 1)	$\begin{bmatrix} 1 \\ 0.991 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0.384 \\ 0.278 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 1 \\ 0.812 \end{bmatrix}$	1.1604
5.	(0 0 0.5 0.2 0.2)	$\begin{bmatrix} 1 \\ 0.991 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0.384 \\ 0.278 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 1 \\ 0.812 \end{bmatrix}$	1.046
	(1 1 1 1 1)	$\begin{bmatrix} 1 \\ 0.991 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0.384 \\ 0.278 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 1 \\ 0.812 \end{bmatrix}$	1.1299
6.	(0 0.1 0.5 0 0)	$\begin{bmatrix} 1 \\ 0.991 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0.384 \\ 0.278 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 1 \\ 0.812 \end{bmatrix}$	1.0311
	(1 1 1 1 1)	$\begin{bmatrix} 1 \\ 0.991 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0.384 \\ 0.278 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 1 \\ 0.812 \end{bmatrix}$	1.139

Што се тиче правила закључивања код ТСК принципа закључивања, добијени параметри су, као и у претходном случају, исти и за сваки мод

осциловања и за сваку комбинацију излазних тежинских фактора, као и за греду (табела 6.4). Ови параметри су приказани у табели 7.3.

Табела 7.2. Оптимизовани параметри α_1 , β_1 , функција циља и максимални напон на актуатору за самоподешавајуће фази-логичко управљање базирано на ТСК принципу закључивања нултог реда

Мод осц.	(w)	α_1	β_1	Функција циља
1.	(0.8 0.2 0 0 0)	1	0.16	1.1831
	(1 1 1 1 1)	1	0.16	1.612
2.	(0.2 0.4 0 0 0.4)	1	0.16	1.0862
	(1 1 1 1 1)	1	0.16	1.4553
3.	(0 0.1 0 0.8 0)	1	0.16	1.0759
	(1 1 1 1 1)	1	0.16	1.5429
4.	(0 0.2 0 0 0.4)	1	0.16	1.0407
	(1 1 1 1 1)	1	0.16	1.3355
5.	(0 0 0.5 0.2 0.2)	1	0.16	1.0799
	(1 1 1 1 1)	1	0.16	1.2604
6.	(0 0.1 0.5 0 0)	1	0.16	1.0495
	(1 1 1 1 1)	1	0.16	1.2762

Табела 7.3. Правила закључивања за оптимизовани самоподешавајуће фази-логичко управљање базирано на ТСК принципу закључивања

		ЕС				
		NB	NS	ZE	PS	PB
E	NB	1	1	0.992	0.259	0.183
	NS	0.979	0.221	0.22	-0.247	-0.519
	ZE	0.953	0.282	0	-0.282	-0.953
	PS	0.519	0.247	-0.22	-0.221	-0.979
	PB	-0.183	-0.259	-0.992	-1	-1

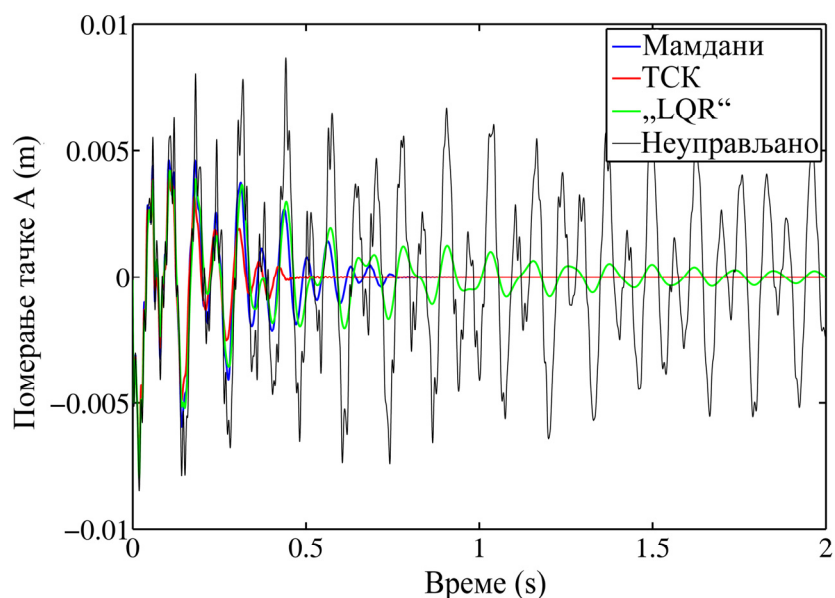
У циљу поређења оптимизованих самоподешавајућих фази-логичких управљачких система са линеарно-квадратним регулатором, за тежинске матрице узете су следеће вредности: $[Q]=10^6[I]_{12 \times 12}$, $[R]=[I]_{5 \times 5}$. Максимални напони који

се јављају на актуаторима за време активног пригушења вибрација за сваки управљачки систем приказани су у табели 7.4.

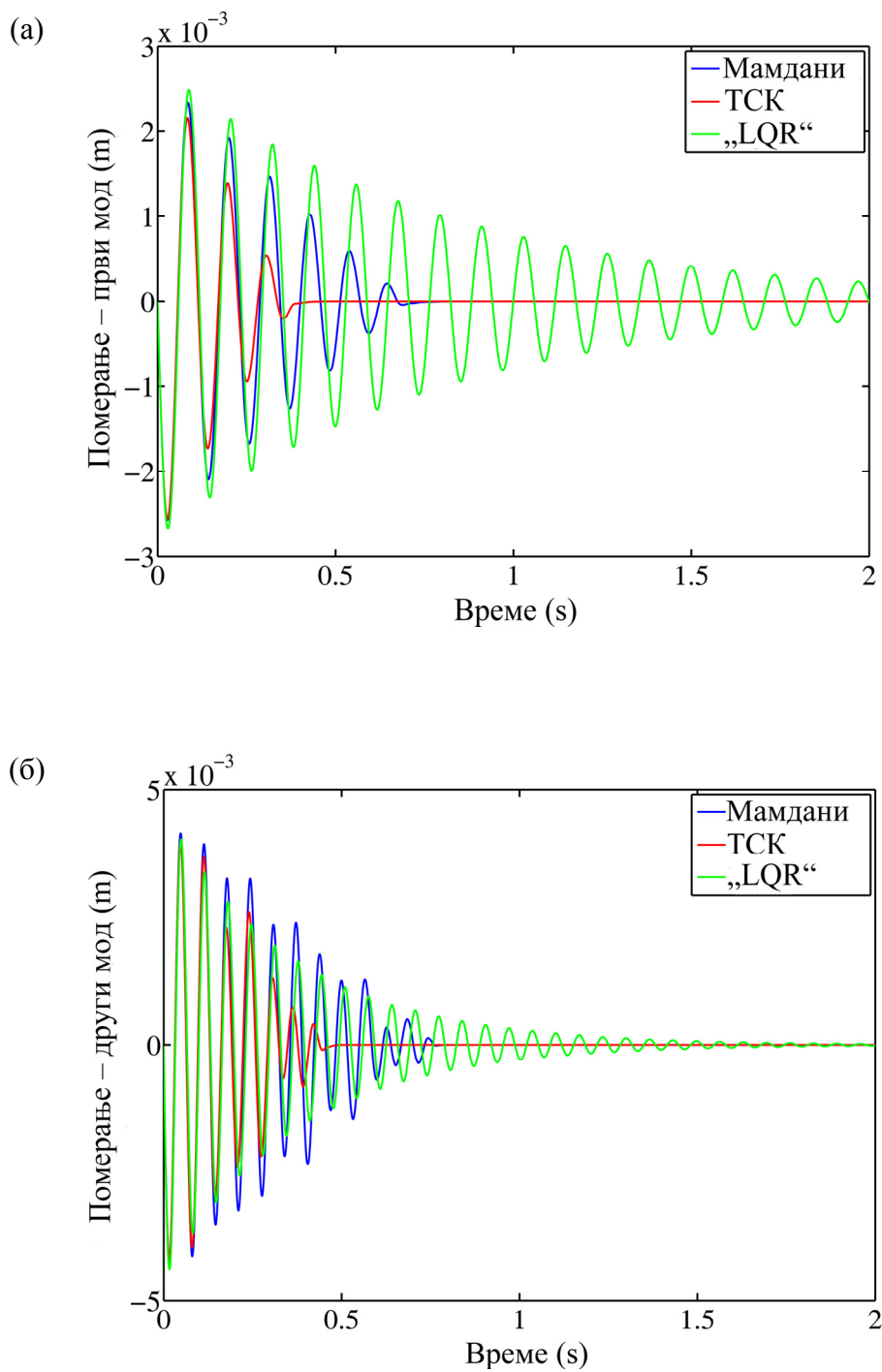
Табела 7.4. Максимални напони на актуаторима који се јављају током активног пригушења вибрација

	Мамдани	ТСК	LQR
$\phi_{AA1max}(V)$	188.735	200	157.225
$\phi_{AA2max}(V)$	171.0978	196.848	146.261
$\phi_{AA3max}(V)$	188.735	200	196.002
$\phi_{AA4max}(V)$	188.735	200	149.404
$\phi_{AA5max}(V)$	188.6334	200	91.3

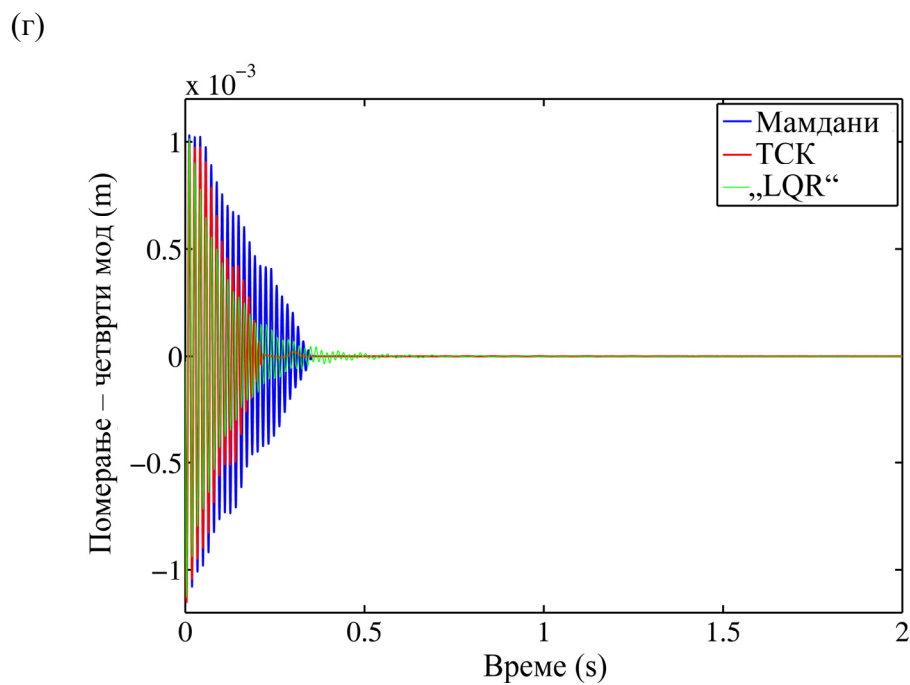
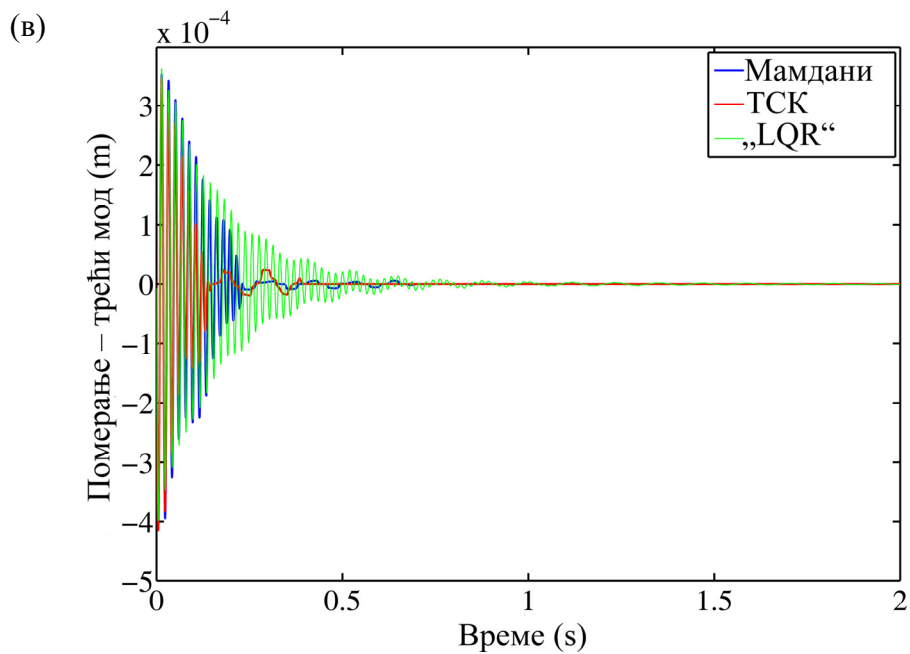
На слици 7.2 приказано је померање тачке А за Мамдани и ТСК принцип закључивања, линеарно-квadratни регулатор и у случају када нема активног пригушења вибрација. На слици 7.3 приказана су померања тачке А која одговарају првом, другом, трећем, четвртном, петом и шестом моду осциловања за сваки анализирани управљачки систем.



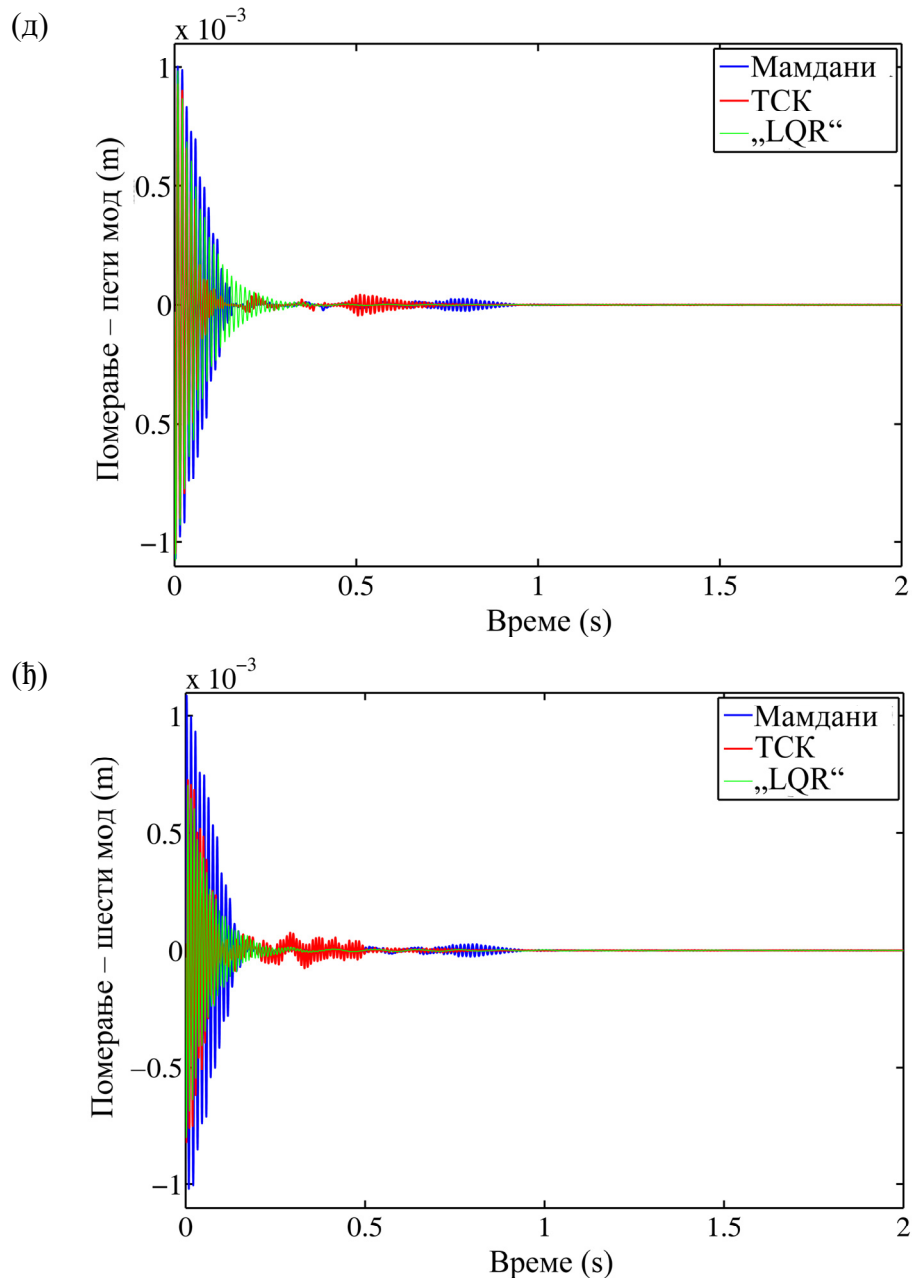
Слика 7.2. Померање тачке А плоче; поређење самоподешавајућег фази-логичког управљачког система базираног на Мамданијевом и ТСК принципу закључивања нултог реда, линеарно-квadratног регулатора и случаја када нема активног пригушења вибрација



Слика 7.3. (наставља се...)



Слика 7.3. (наставља се...)



Слика 7.3. Померање тачке А плоче код слободних вибрација; поређење самоподешавајућих фази-логичких управљачких система базираних на Мамданијевом и ТСК принципу закључивања и „LQR“ оптималног управљања: (а) први мод, (б) други мод, (в) трећи мод, (г) четврти мод, (д) пети мод, (ђ) шести мод

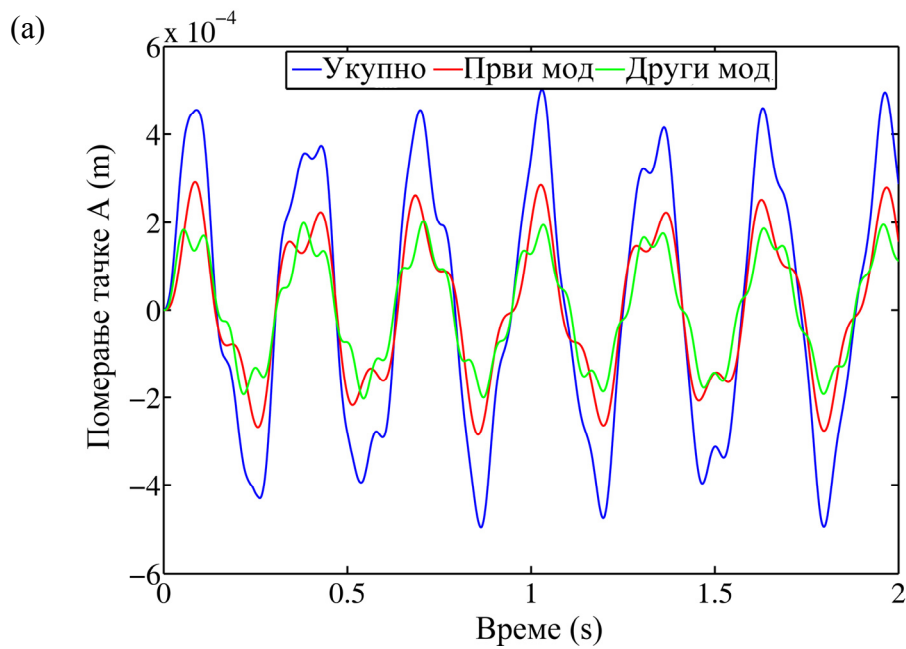
Са слике 7.2 може се закључити да је најефикасније оптимизовано самоподешавајуће фази-логичко управљање базирано на ТСК принципу закључивања нултог реда, затим следи Мамдани принцип закључивања, а на крају је линеарно-квadratни регулатор. Са слике 7.3 може се видети да је линеарно-

квадратни регулатор ефикаснији у пригушењу виших мода осциловања (у овом случају четвртог, петог и шестог) у односу на фази-логичко управљање.

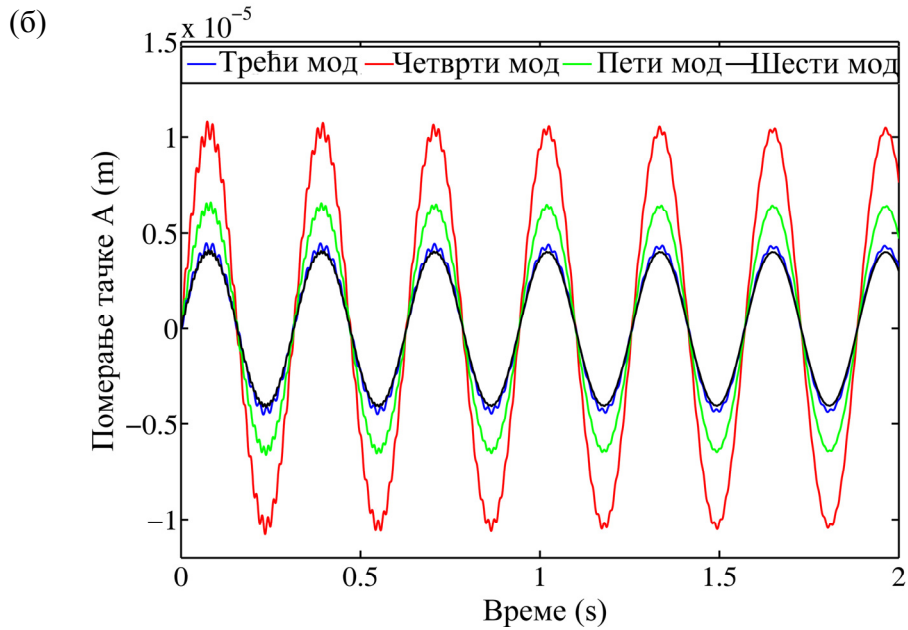
7.3 Активно пригушење принудних вибрација

7.3.1 Фреквенција принудног оптерећења 20rad/s

На слици 7.4 приказана су померања тачке А и то укупно померање и померања која одговарају сваком моду посебно у случају када нема активног пригушења вибрација.



Слика 7.4. (наставља се...)



Слика 7.4. Померање тачке А плоче под дејством периодичног оптерећења у случају када нема активног пригушења вибрација: (а) укупно померање и померања за први и други мод, (б) померања за трећи, четврти, пети и шести мод

Уколико се упореде померања тачке А која одговарају појединим модовима, може се видети да су амплитуде за трећи, четврти, пети и шести мод и до 20 пута мање у односу на први и други мод. На основу тога, вршиће се активно пригушење само прва два мода. Приликом активног пригушења прва два мода, може доћи до појаве виших модова осциловања (тзв. резидуални модови). Такав случај ће се и овде разматрати. Да би се испитао утицај управљачког система на појаву резидуалних модова, сматраће се да ће се, током активног пригушења прва два мода, јавити наредна четири мода као резидуални (трећи, четврти, пети и шести). Ако се погледа матрица улаза (једначина 7.1), видеће се да је се максимална управљивост за прва два мода постиже преко првог и другог актуатора, а нешто мања преко трећег актуатора. Због тога, испитаће се случајеви када за два и за три активна актуатора, као и утицај различитих излазних тежинских фактора на укупно померање, као и на померања која одговарају управљаним и резидуалним модовима.

За Мамданијев принцип закључивања, на основу неколико примера, нађено је да се најбољи резултати постижу када су троугаоне функције припадности улаза и излаза симетричне, тј.

$$\alpha_2 = \alpha_1 / 2, \quad \beta_2 = \beta_1 / 2, \quad \gamma_2 = \gamma_1 / 2, \quad (7.3)$$

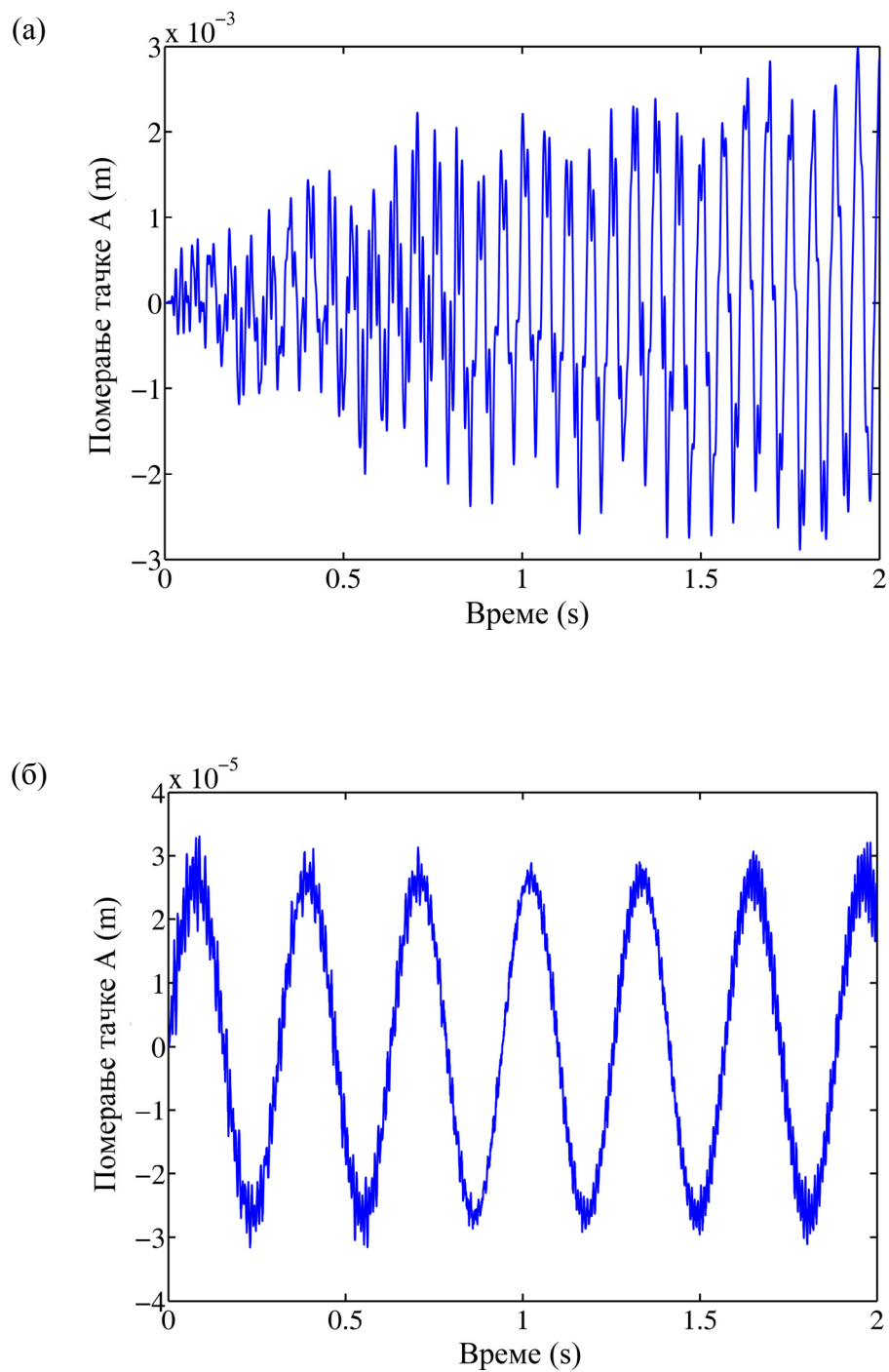
тако да ће се оптимизацијом налазити само параметри $\alpha_1, \beta_1, \gamma_1$.

У табели 7.5 приказани су оптимизовани параметри $\alpha_1, \beta_1, \gamma_1$, функција циља за самоподешавајуће фази-логичко управљање базирано на Мамданијевог принципа за оптерећење $0.1\sin(20t)$ [N] за прва два мода осциловања у случају различитих комбинација излазних тежинских фактора. За израчунавање L_2 норме узето је у обзир време од 1s.

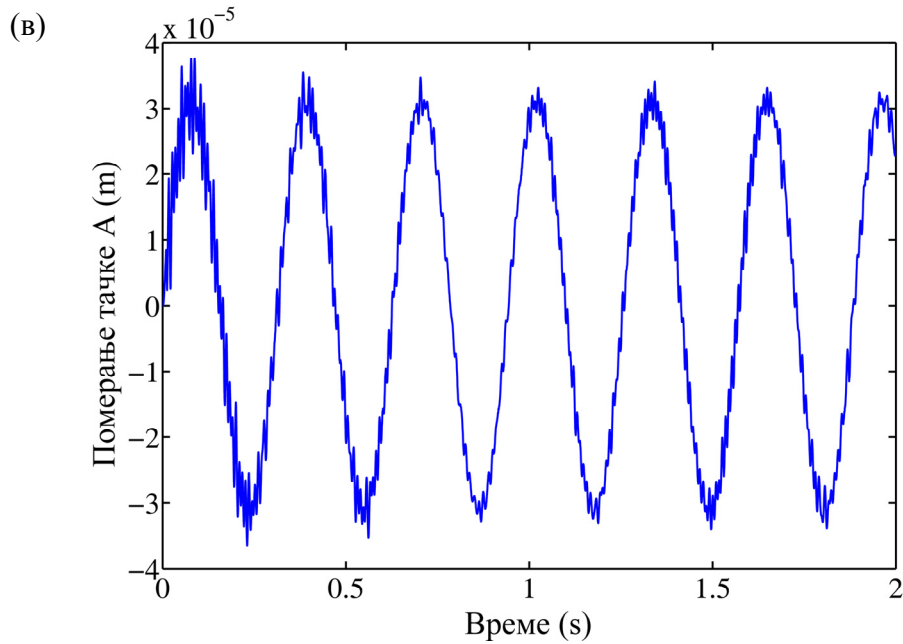
Табела 7.5. Оптимизовани параметри $\alpha_1, \beta_1, \gamma_1$, функција циља за самоподешавајуће фази-логичко управљање у случају Мамданијевог принципа закључивања за амплитуду 0.1N

$[w]$	Мод осц.	α_1	β_1	γ_1	L_2 норма
$\begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0.5 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0.5 & 0 \end{bmatrix}$	1.	0.0512	0.2955	0.9961	187186.88
	2.	0.058	0.8933	0.9432	398161.42
$\begin{bmatrix} 0.7 & 0.7 & 0 & 0 & 0 \\ 0.3 & 0.3 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}$	1.	0.0510	0.4654	0.9815	366990.25
	2.	0.0504	0.9983	0.9584	367158.18
$\begin{bmatrix} 0.5 & 0.5 & 0 & 0.5 & 0 \\ 0.5 & 0.5 & 0 & 0.5 & 0 \end{bmatrix}$	1.	0.0501	0.1189	0.9555	236642.02
	2.	0.0521	0.9147	0.8272	408682.73

На слици 7.5, приказана су померања тачке А за прву, другу и трећу комбинацију излазних тежинских фактора.

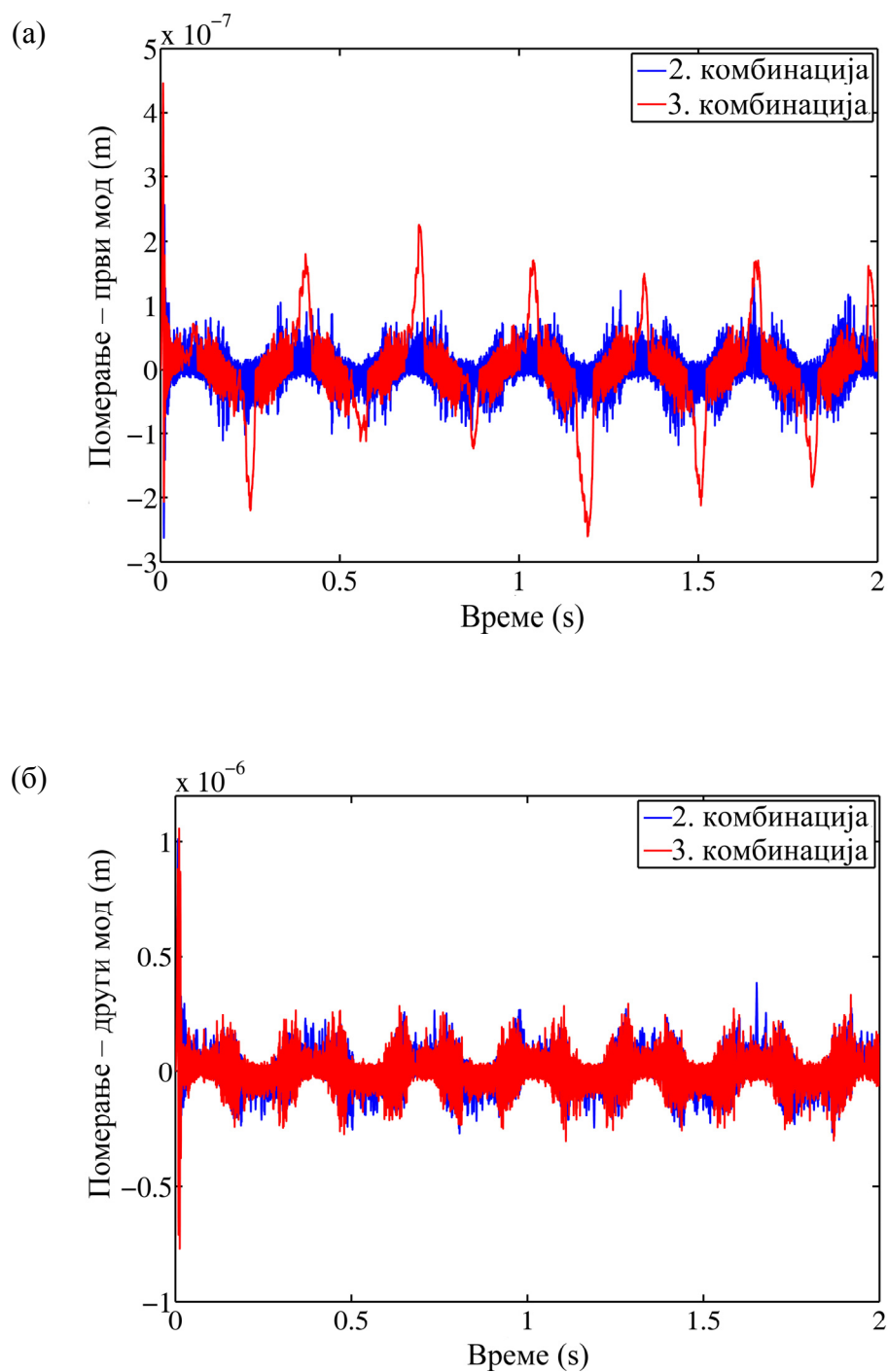


Слика 7.5. (наставља се...)

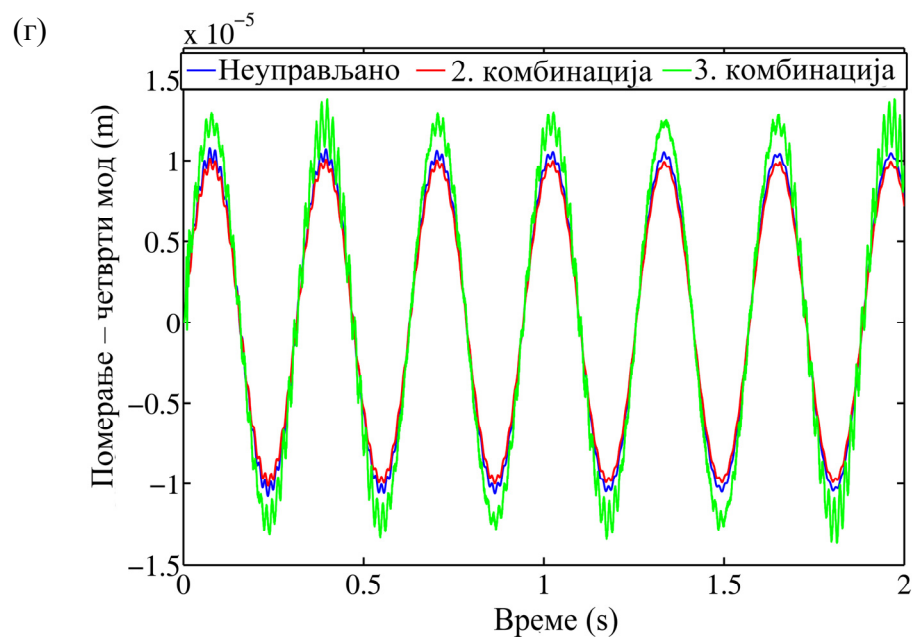
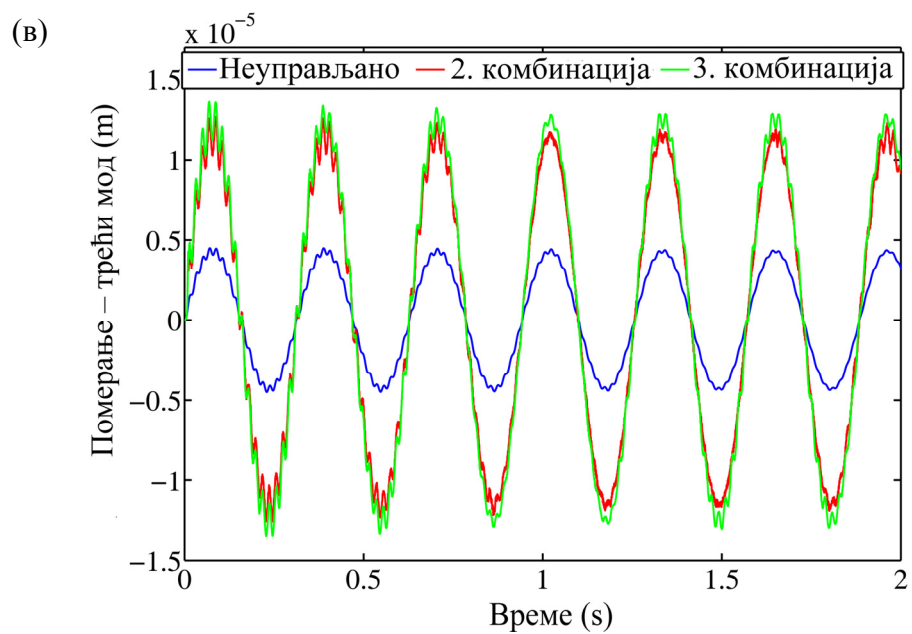


Слика 7.5. Померање тачке А плоче за оптерећење $0.1\sin(20t)$ [N] за различите комбинације излазних тежинских фактора за Мамдани принцип закључивања: (а) прва комбинација, (а) друга комбинација, (а) трећа комбинација

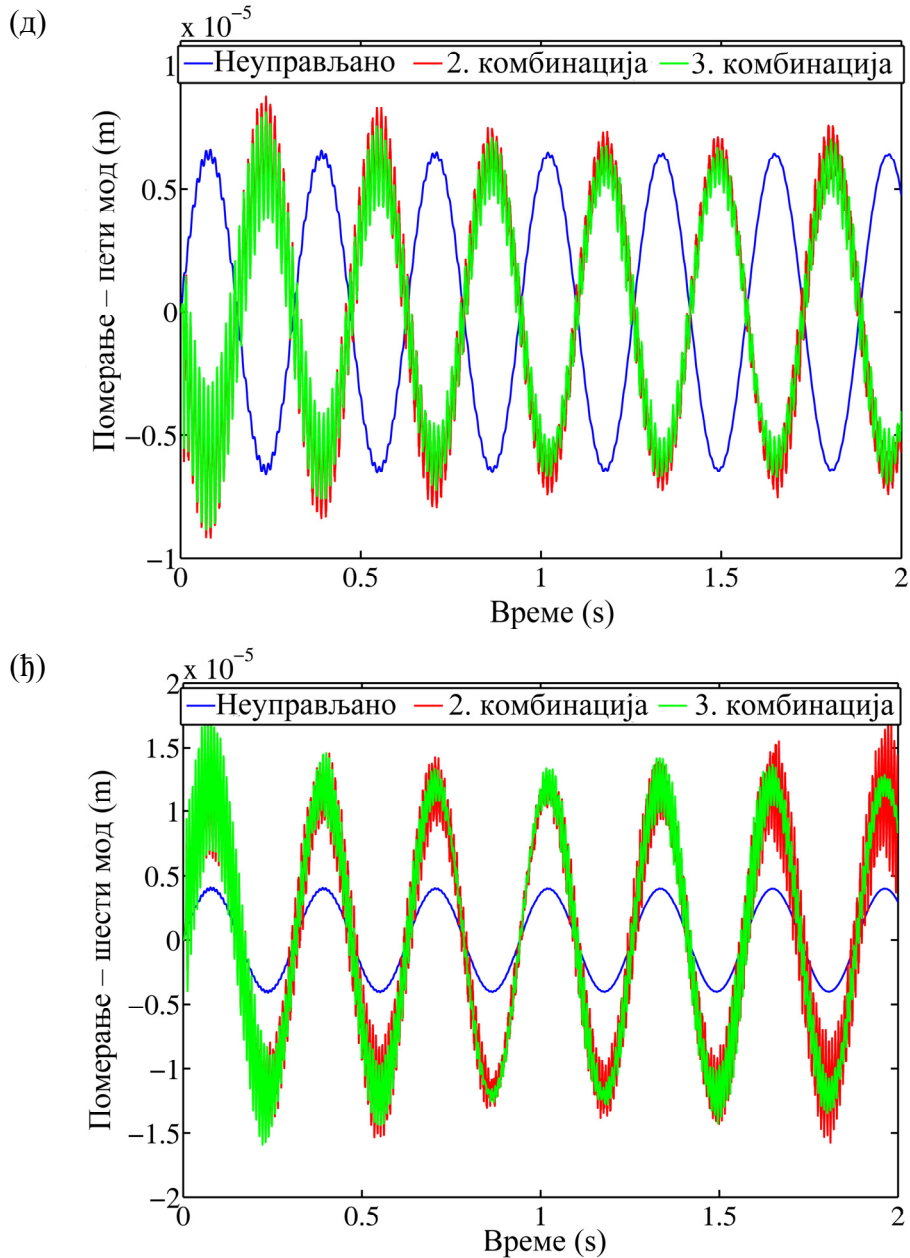
Ако се упореди слика 7.5(а) са сликом 7.4(а), може се видети да долази, не до пригушења, него чак до повећања амплитуде и до шест пута, што чини ову комбинацију излазних тежинских фактора неефикасном. Са слика 7.5(б) и 7.5(в) може се видети да друга и трећа комбинација излазних тежинских фактора пружа много боље перформансе, смањујући амплитуде и до 15 пута, где је друга комбинација нешто ефикаснија у односу на трећу. На слици 7.6 приказана су померања тачке А за сваки мод осциловања, и управљане и резидуалне модове, за другу и трећу комбинацију параметара.



Слика 7.6. (наставља се...)



Слика 7.6. (наставља се...)



Слика 7.6. Померање тачке А плоче за оптерећење $0.1\sin(20t)$ [N]: (а) први мод, (б) други мод, (в) трећи мод, (г) четврти мод, (д) пети мод, (ђ) шести мод

Са слика 7.6(а) и 7.6(б), које приказују управљане модове, може се видети да је амплитуда ових модова смањена и до 1000 пута, где је друга комбинација излазних тежинских фактора нешто ефикаснија у односу на трећу. Са слика 7.6 (в)-(ђ), које приказују резидуалне модове, може се закључити да долази до повећања амплитуде резидуалних модова. То је најизраженије код трећег, петог и

шестог мода, док је код четвртог мода дошло до незнатног смањења амплитуде. За даљу анализу, узете се друга комбинација излазних тежинских фактора.

Иста процедура је спроведена и за ТСК принцип закључивања нултог реда, где је коришћена друга комбинација излазних тежинских фактора. У табели 7.6 приказани су оптимизовани параметри α_1 и β_1 и функција циља за самоподешавајуће фази-логичко управљање базирано на ТСК принципу закључивања за оптерећење $0.1\sin(20t)$ [N]. Табела 7.7 приказује правила закључивања за ТСК принцип закључивања добијена оптимизацијом за први мод, а табела 7.8 за други мод осциловања. У циљу поређења оптимизованих самоподешавајућих фази-логичких управљачких система са линеарно-квadratним регулатором, узете су вредности матрица $[Q]=10^{11}[I]_{4 \times 4}$, $[R]=[I]_{3 \times 3}$.

Табела 7.6. Оптимизовани параметри α_1 и β_1 и L_2 норма за самоподешавајуће фази-логичко управљање базирано на ТСК принципу закључивања за оптерећење $0.1\sin(20t)$ [N]

$[w]$	Мод осц.	α_1	β_1	Функција циља
$\begin{bmatrix} 0.7 & 0.7 & 0 & 0 & 0 \\ 0.3 & 0.3 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}$	1.	0.0503	0.2521	220381.25
	2.	0.0503	0.1606	298122.28

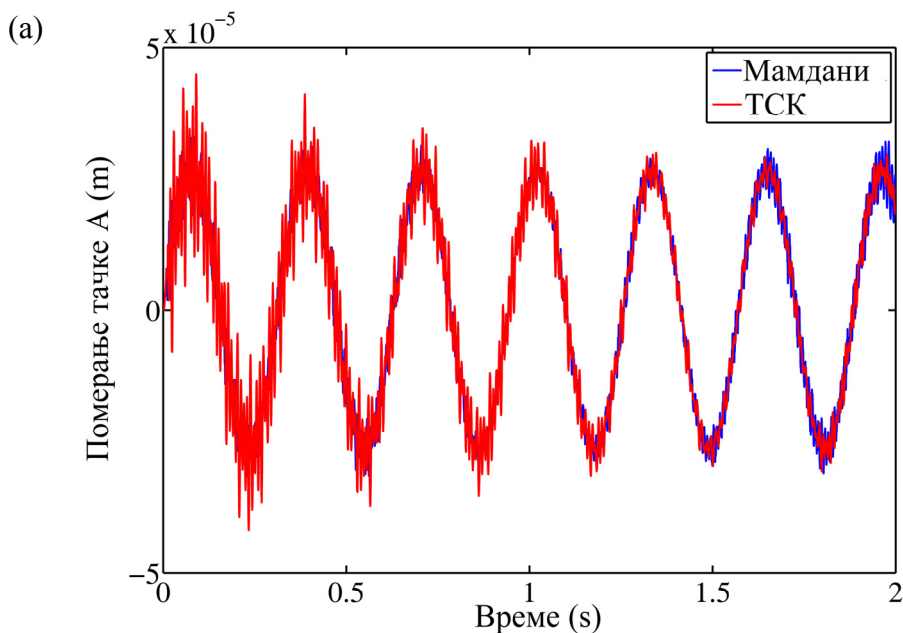
Табела 7.7. Правила закључивања за оптимизовано самоподешавајуће фази-логичко управљање базирано на ТСК принципу закључивања нултог реда за први мод осциловања

		ЕС				
		NB	NS	ZE	PS	PB
E	NB	1	0.966	0.671	0.663	0.401
	NS	0.695	0.672	0.357	0.153	-0.028
	ZE	0.647	0.21	0	-0.21	-0.647
	PS	0.028	-0.153	-0.357	-0.672	-0.695
	PB	-0.401	-0.663	-0.671	-0.966	-1

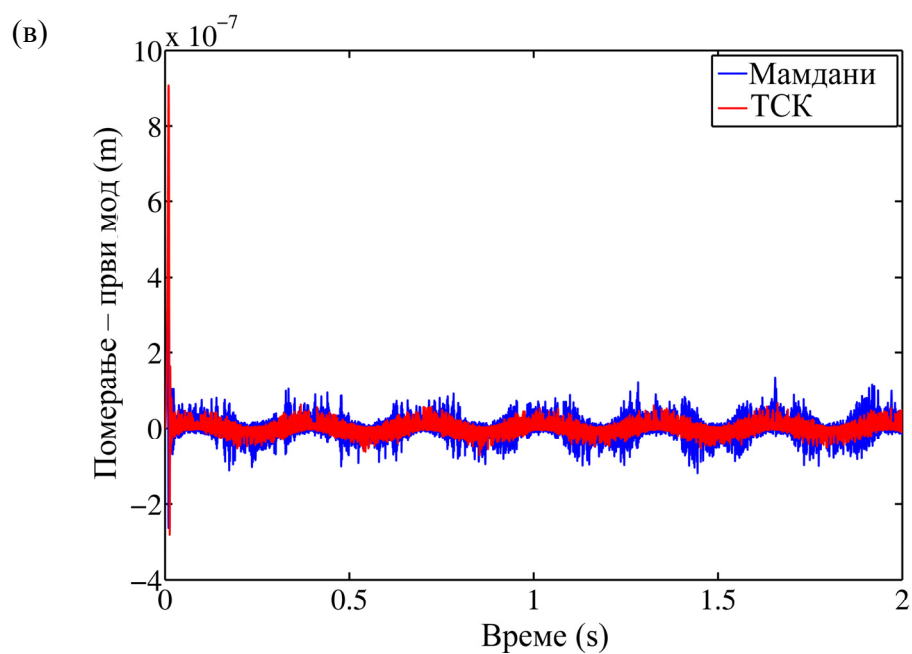
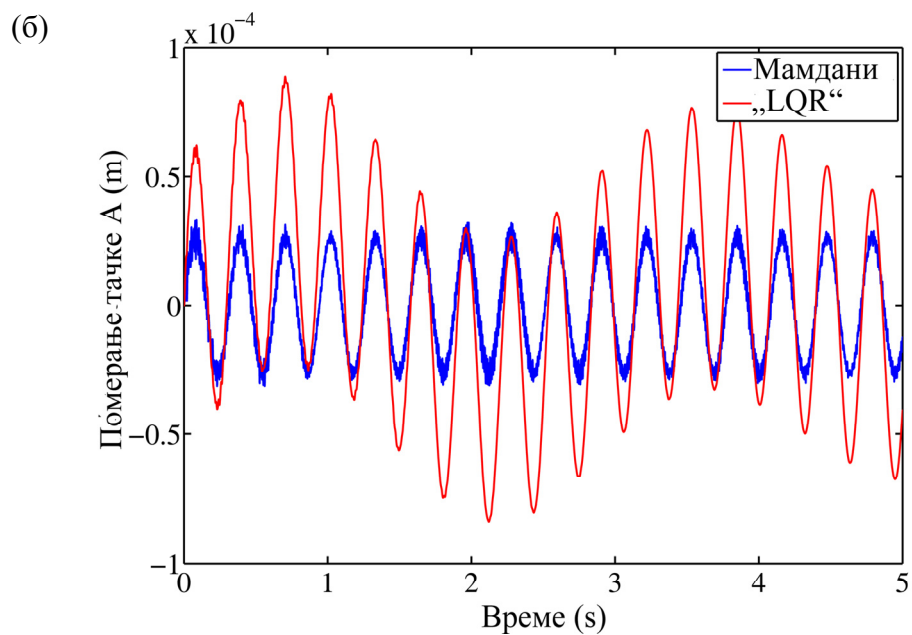
Табела 7.8. Правила закључивања за оптимизовано самоподешавајуће фази-логичко управљање базирано на ТСК принципу закључивања нултог реда за други мод осциловања.

		ЕС				
		NB	NS	ZE	PS	PB
E	NB	1	0.996	0.747	0.641	0.406
	NS	0.7	0.547	0.338	0.193	-0.041
	ZE	0.543	0.36	0	-0.36	-0.543
	PS	0.041	-0.193	-0.338	-0.547	-0.7
	PB	-0.406	-0.641	-0.747	-0.996	-1

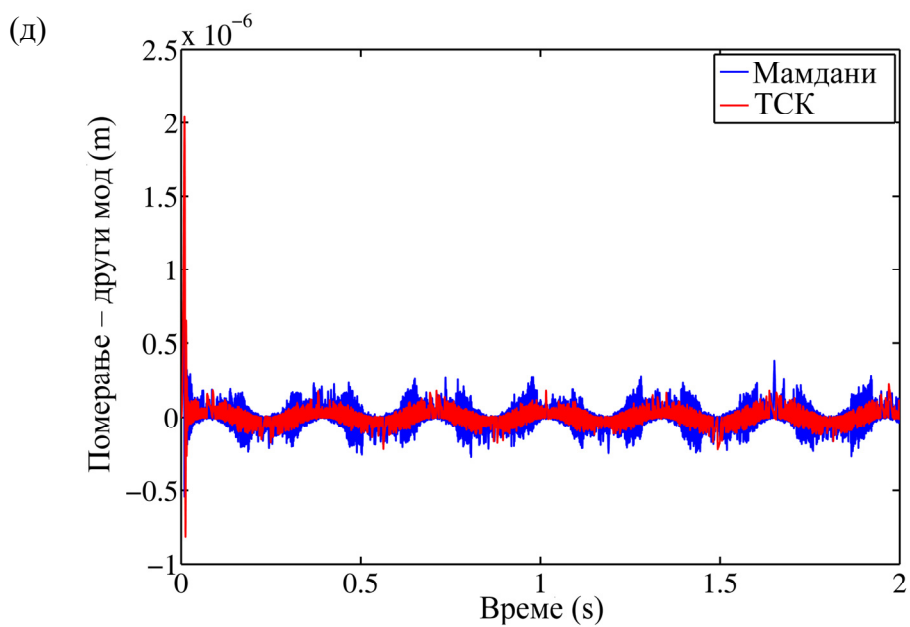
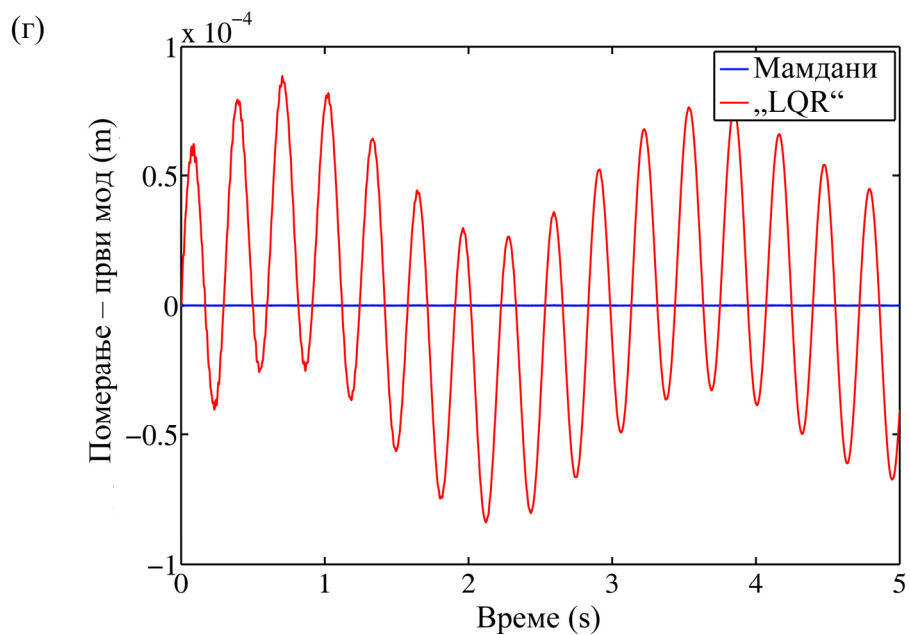
На сликама 7.7 представљена су укупна померања тачке А, као и померања која одговарају првом и другом моду за оптерећење $0.1\sin(20t)$ [N]. На сликама су поређени Мамдани и ТСК принцип закључивања (слике 7.7(а), (в) и (д) за укупно померање и померања која одговарају првом и другом моду респективно) и Мамдани принцип закључивања и линеарно-квадратни регулатор (слике 7.7(б), (г) и (ђ) за укупно померање и померања која одговарају првом и другом моду респективно).



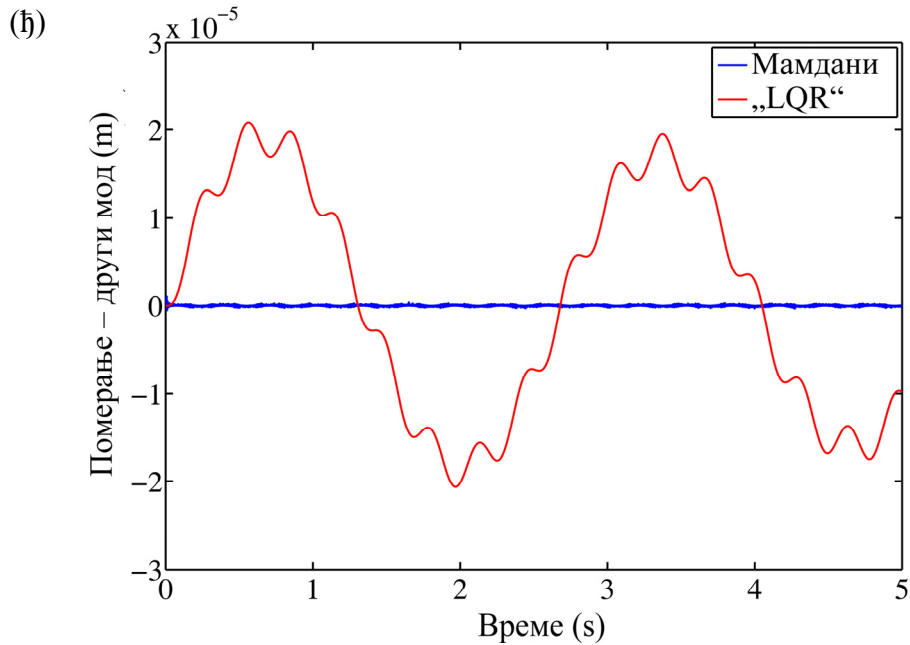
Слика 7.7. (наставља се...)



Слика 7.7. (наставља се...)



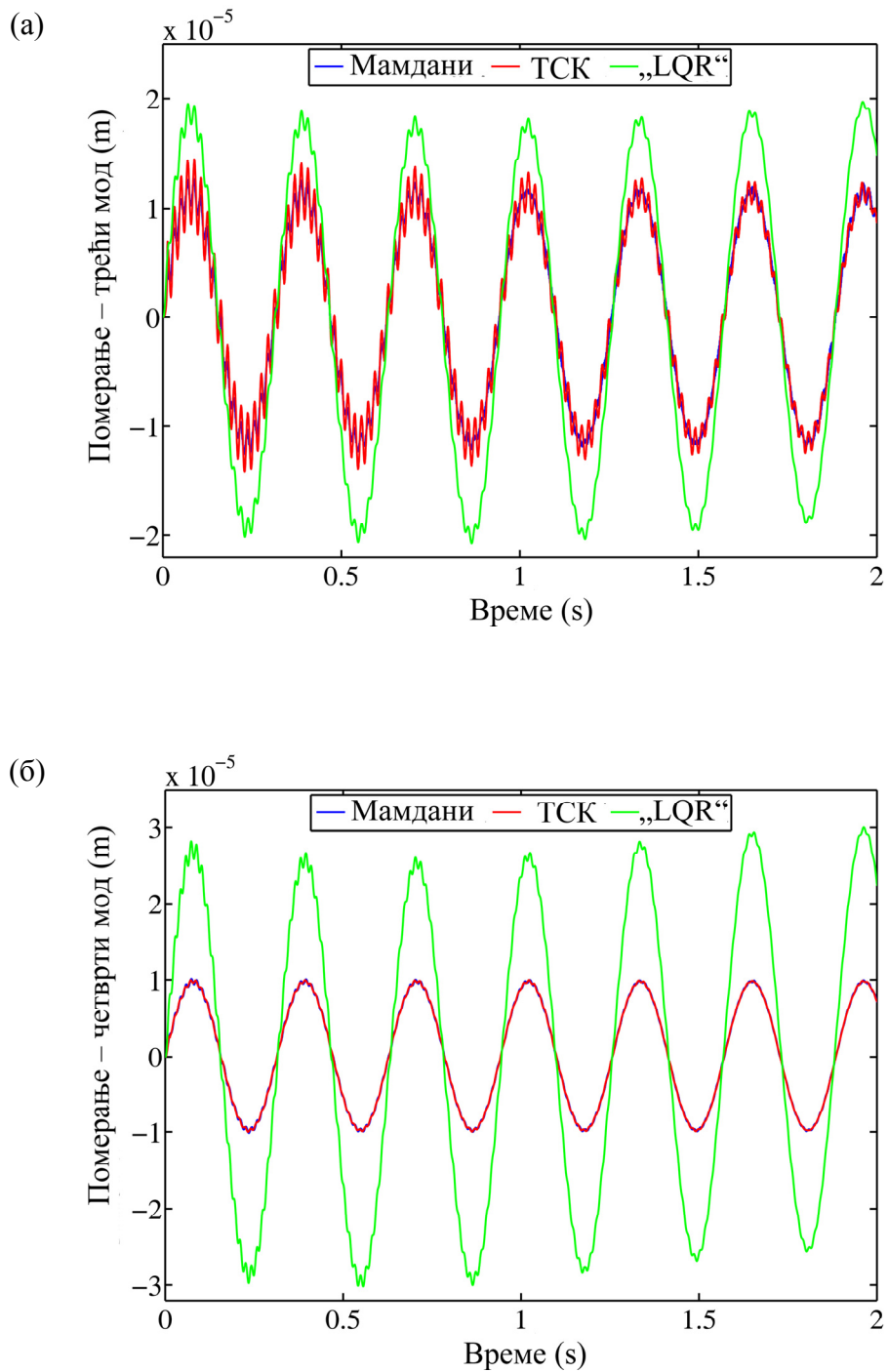
Слика 7.7. (наставља се...)



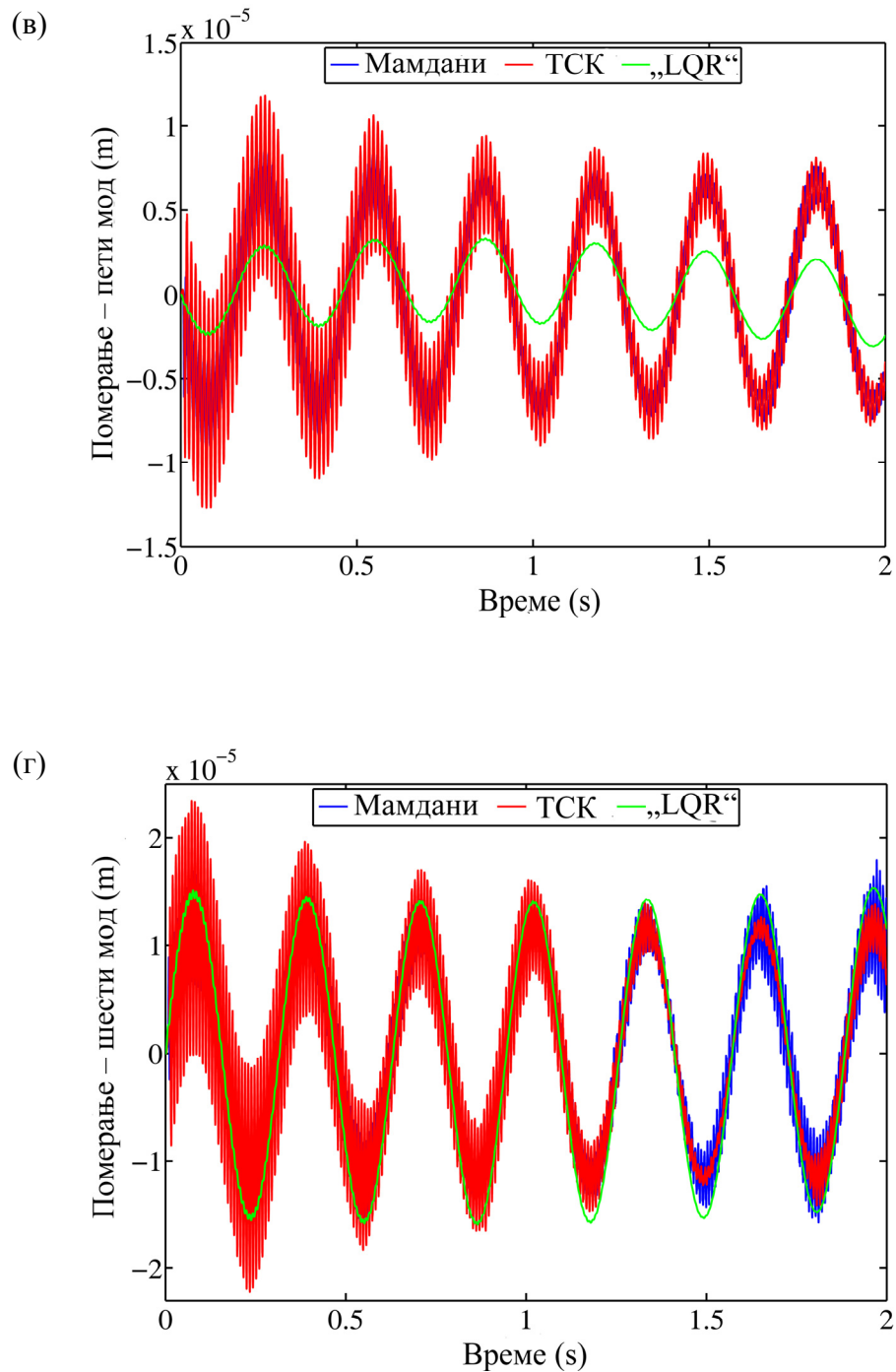
Слика 7.7. Померање тачке А плоче за оптерећење $0.1\sin(20t)$ [N]: (а) укупно (поређење Мамдани и ТСК), (б) укупно (поређење Мамдани и LQR), (в) први мод (поређење Мамдани и ТСК), (г) први мод (поређење Мамдани и LQR), (д) други мод (поређење Мамдани и ТСК), (ђ) други мод (поређење Мамдани и LQR)

Са слика 7.7(а) може се видети да Мамданијев и ТСК принцип закључивања даје приближно исте резултате. Што се тиче првог и другог мода, код ТСК принципа закључивања амплитуда је нешто мања него код Мамданијевог принципа. Са друге стране, са слика 7.7(б), (г) и (ђ) може се уочити да Мамдани принцип закључивања пружа боље перформансе у односу на линеарно-квадратни регулатор.

На слици 7.8 приказана су померања тачке А која одговарају резидуалним модовима.



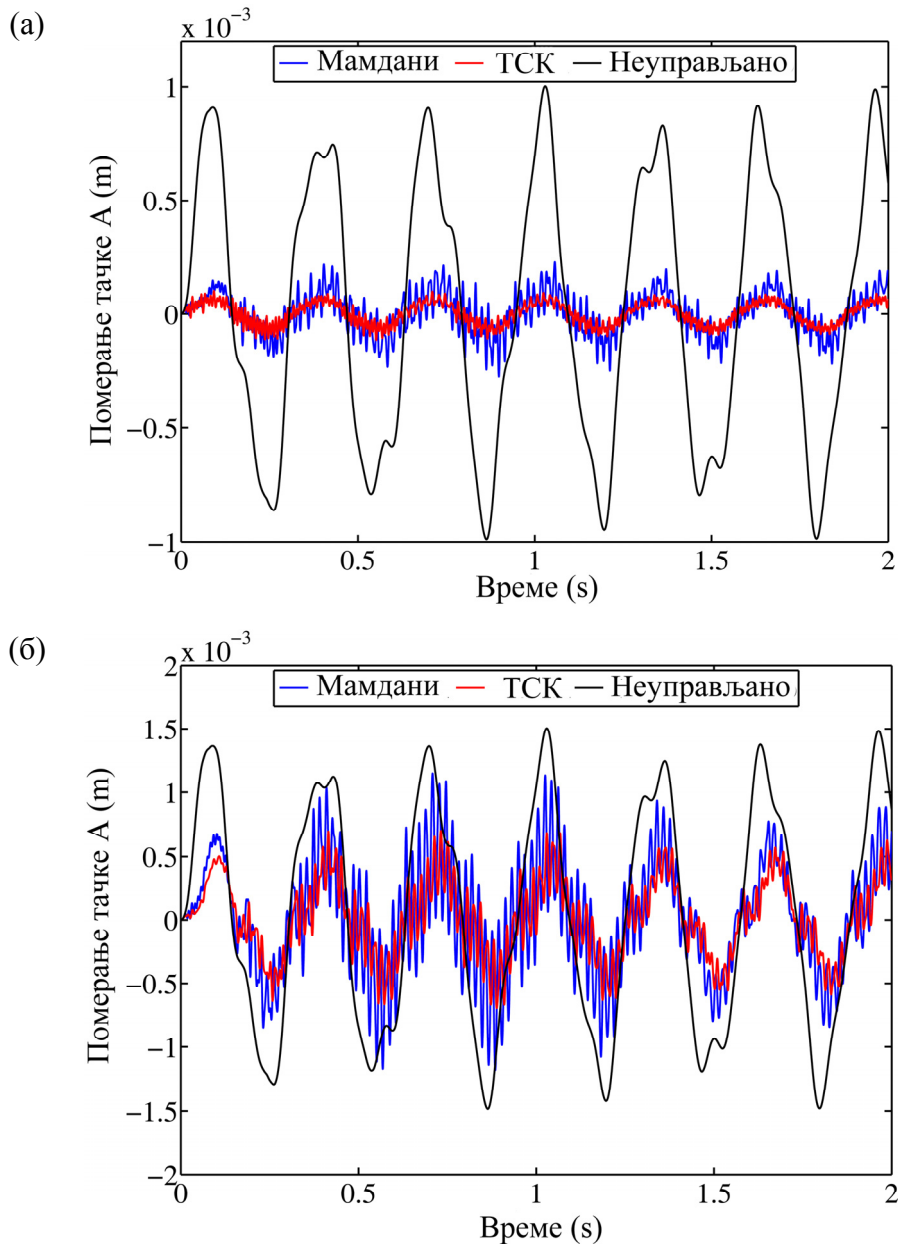
Слика 7.8. (наставља се...)



Слика 7.8. Померање тачке А плоче које одговара резидуалним модовима за оптерећење $0.1 \sin(20t)$ [N]; поређење Мамданијевог и ТСК принципа закључивања и LQR оптималног управљања : (а) трећи мод, (б) четврти мод, (в) пети мод, (г) шести мод

Са слике 7.8 може се видети да код трећег и четвртог мода амплитуда већа у случају линеарно-квadratног регулатора, док је код петог и шестог мода амплитуда већа код активног пригушења вибрација помоћу фази-логичких управљачких система.

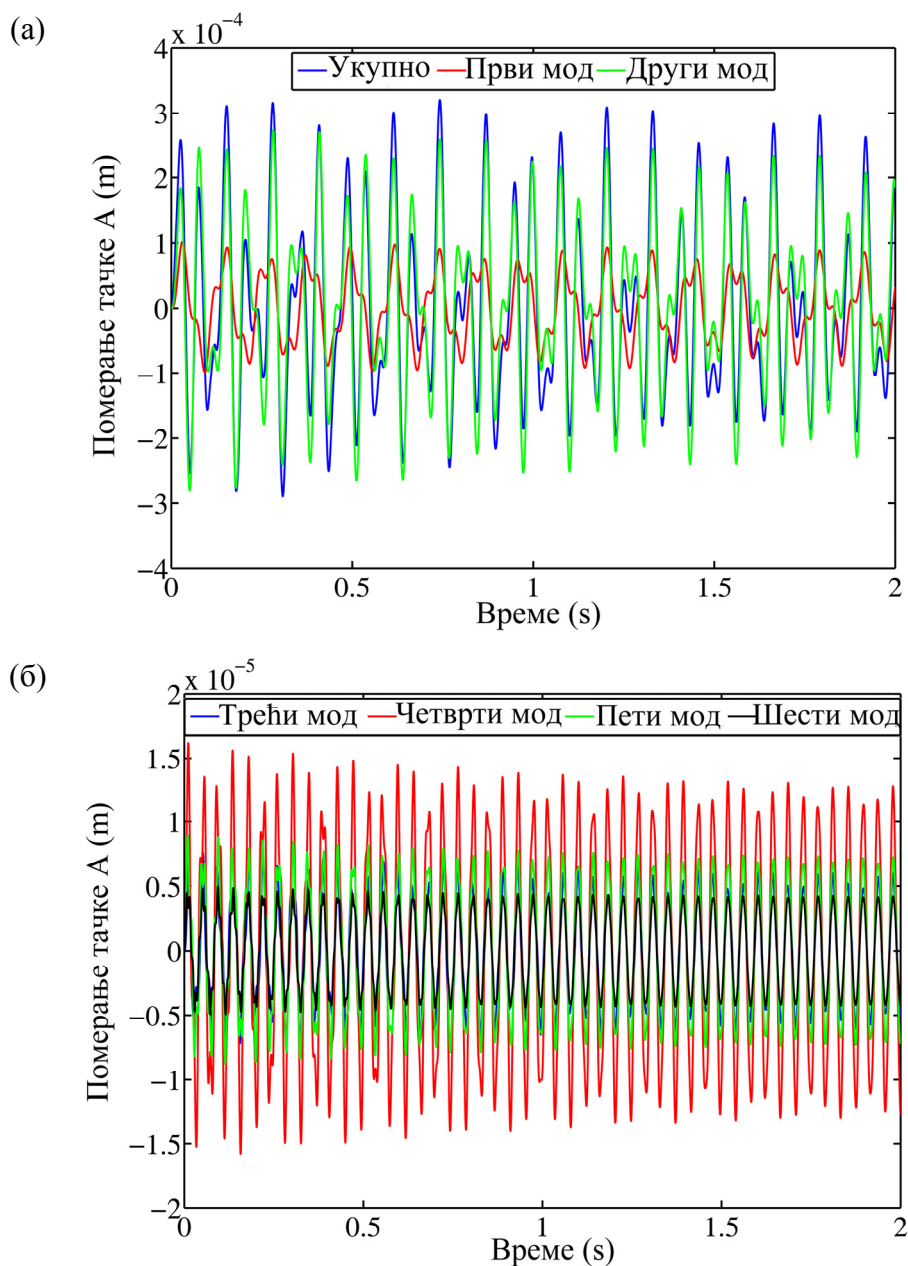
Слика 7.9 приказује укупно померање тачке А за оптерећења $0.2\sin(20t)$ [N] и $0.3\sin(20t)$ [N]. Са слике 7.9 може се закључити да са повећањем амплитуде, ТСК принцип закључивања показује боље особине у погледу пригушења вибрација и смањења амплитуда у односу на Мамдани принцип закључивања.



Слика 7.9. Померање тачке А плоче: (а) оптерећење $0.2\sin(20t)$ [N], (б) оптерећење $0.3\sin(20t)$ [N]

7.3.2 Фреквенција принудног оптерећења 150rad/s

На слици 7.10 приказана су померања тачке А и то укупно померање и померања која одговарају сваком моду посебно у случају када нема активног пригушења вибрација за оптерећење $0.1\sin(150t)$ [N].

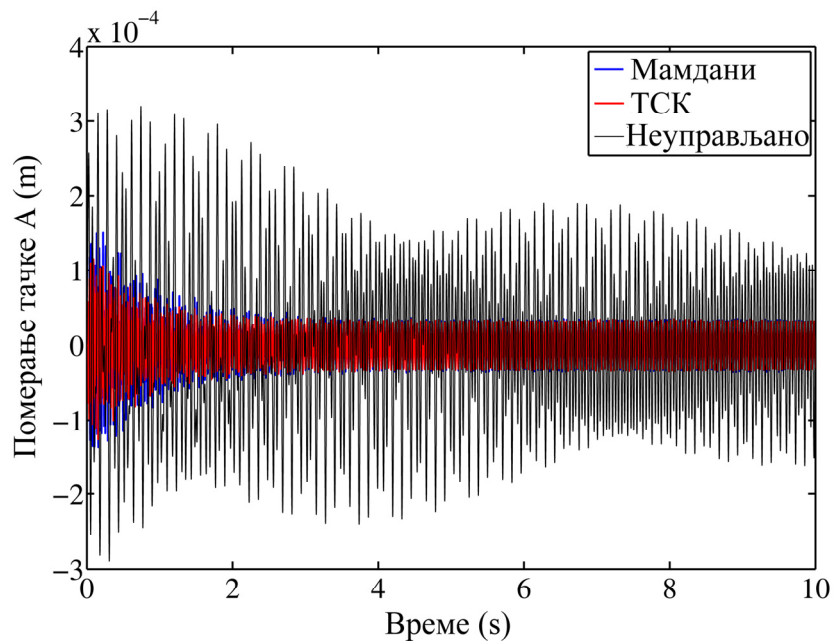


Слика 7.10. Померање тачке А плоче под дејством периодичног оптерећења $0.1\sin(150t)$ [N] у случају када нема активног пригушења вибрација: (а) укупно померање и померања за први и други мод, (б) померања за трећи, четврти, пети и шести мод

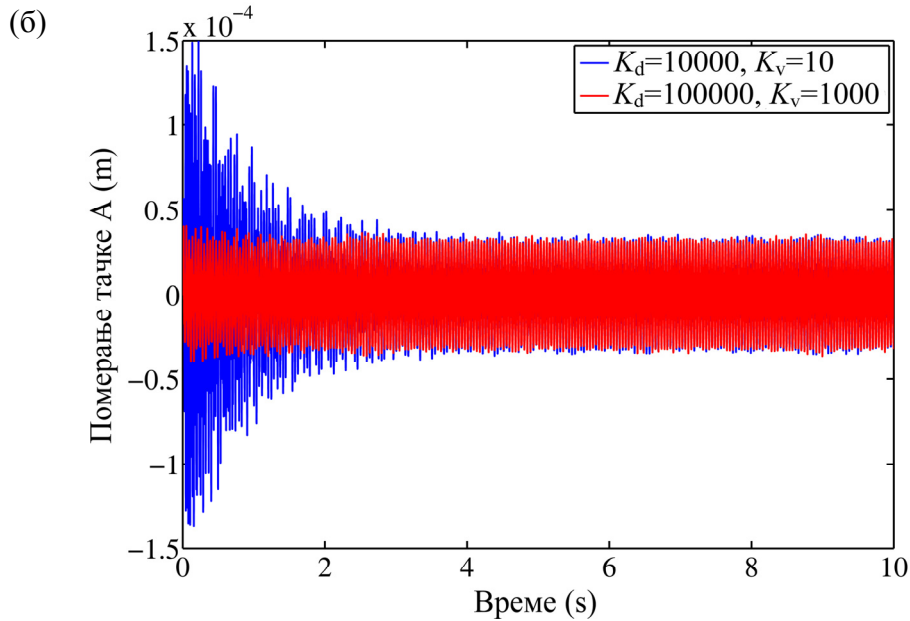
Поређењем амплитуда прва два и последња четири мода може се закључити да, као и у претходном случају оптерећења, амплитуде последња четири мода су много мање него код прва два, тако да ће се само разматрати пригушење прва два мода, узимајући трећи, четврти, пети и шести мод као резидуалне модове.

За излазне тежинске факторе узета је друга комбинација, а као резултати оптимизације добијају се потпуно исте функције припадности и правила закључивања као и у претходном случају (табела 7.6, 7.7 и 7.8).

(a)



Слика 7.11. (наставља се...)

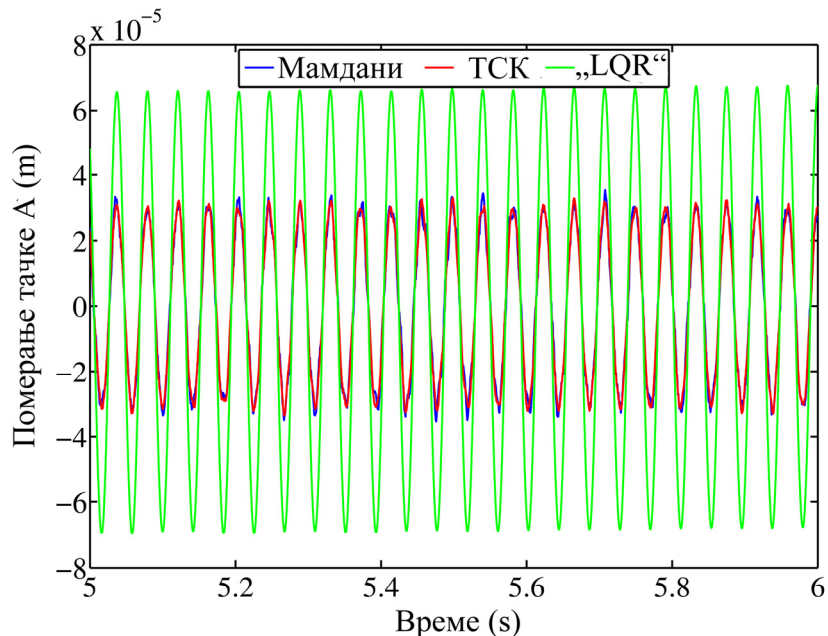


Слика 7.11. Померање тачке А плоче под дејством периодичног оптерећења $0.1\sin(150t)$ [N]: (а) поређење Мамдани и ТСК принципа закључивања и случаја када нема активног пригушења, (б) поређење Мамдани принципа закључивања за различите вредности иницијалних скалирајућих фактора

На слици 7.11(а) приказано је померање тачке А за оптерећење $0.1\sin(150t)$ [N], где су поређени Мамдани и ТСК принцип закључивања и случај када нема активног пригушења вибрација. Може се приметити да је, код оба принципа закључивања, амплитуда нешто већа на почетку и да се смањује до друге секунде, па је, након тога, приближно константна. На слици 7.11(б) приказано је померање тачке А за Мамдани принцип закључивања за различите вредности иницијалних скалирајућих фактора. Поред иницијалних скалирајућих фактора разматраних у претходном тексту ($K_d = 10000, K_v = 10$), извршено је поређење са скалирајућим факторима који имају већу вредност од претходних: $K_d = 100000$ и $K_v = 1000$, из разлога да би се видело да ли већа вредност амплитуде у првих две секунде има везе са избором фактора. Са слике 7.11(б) може се видети да је за веће вредности иницијалних скалирајућих фактора амплитуда приближно константна. Из овога се може закључити да, у случају мањих вредности иницијалних скалирајућих фактора, управљачки алгоритам генерише мању силу на самом почетку, што има за резултат већу амплитуду. Када се ови фактори

подесе, амплитуда има мању вредност и приближно је константна. Даља анализа је вршена за факторе $K_d = 10000$, $K_v = 10$.

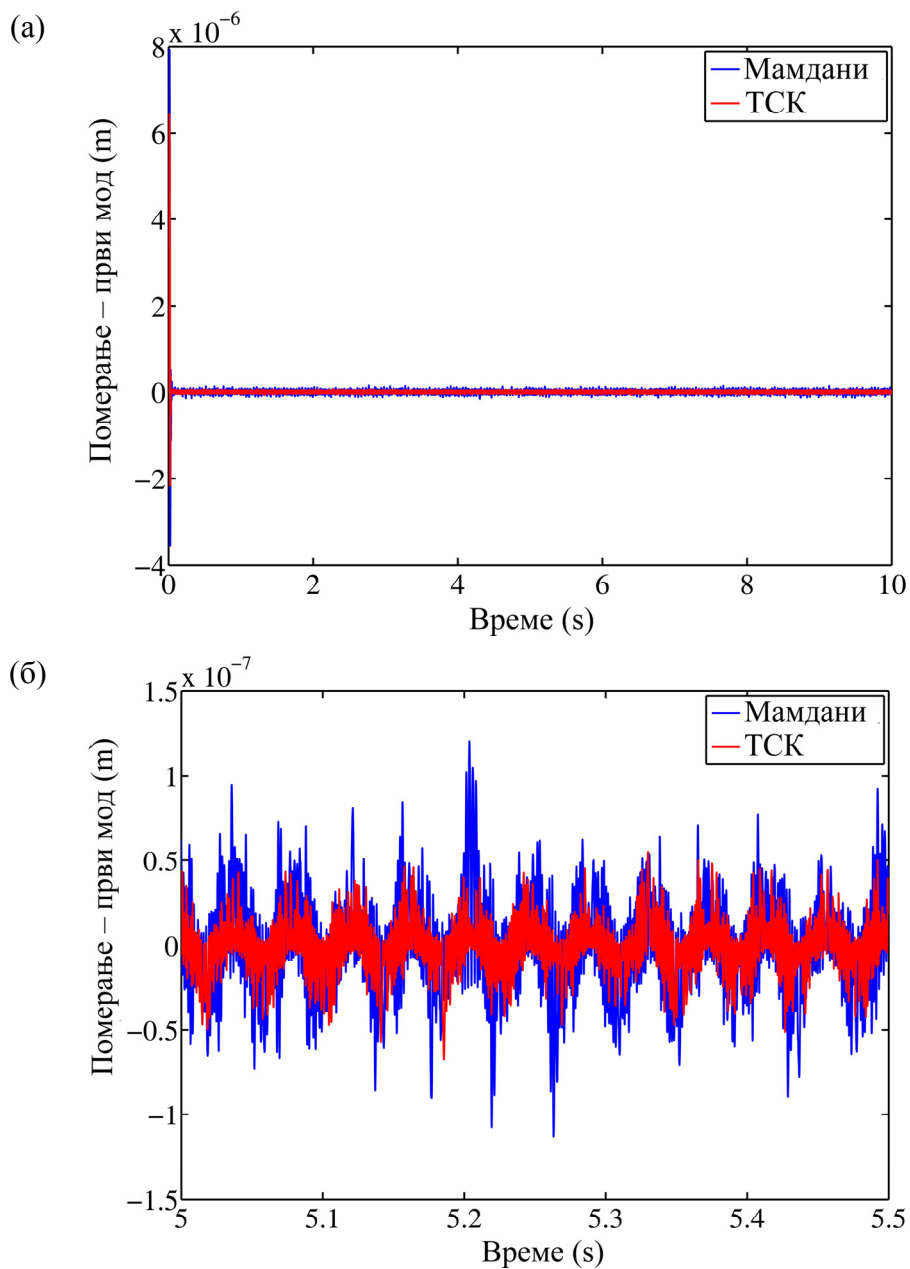
Због високих фреквенција, истовремено приказивање резултата линеарно-квadratног регулатора на слици 7.11 (а) утицало би на видљивост, тако да је поређење самоподешавајућих фази-логичких управљачких система са линеарно-квadratним регулатором приказано на слици 7.12 између пете и шесте секунде. Са слике 7.12 може се закључити да је амплитуда вибрација код линеарно-квadratног већа у односу на фази управљања, што га чини мање ефикасним. Амплитуде код Мамдани и ТСК принципа закључивања су приближно једнаке.



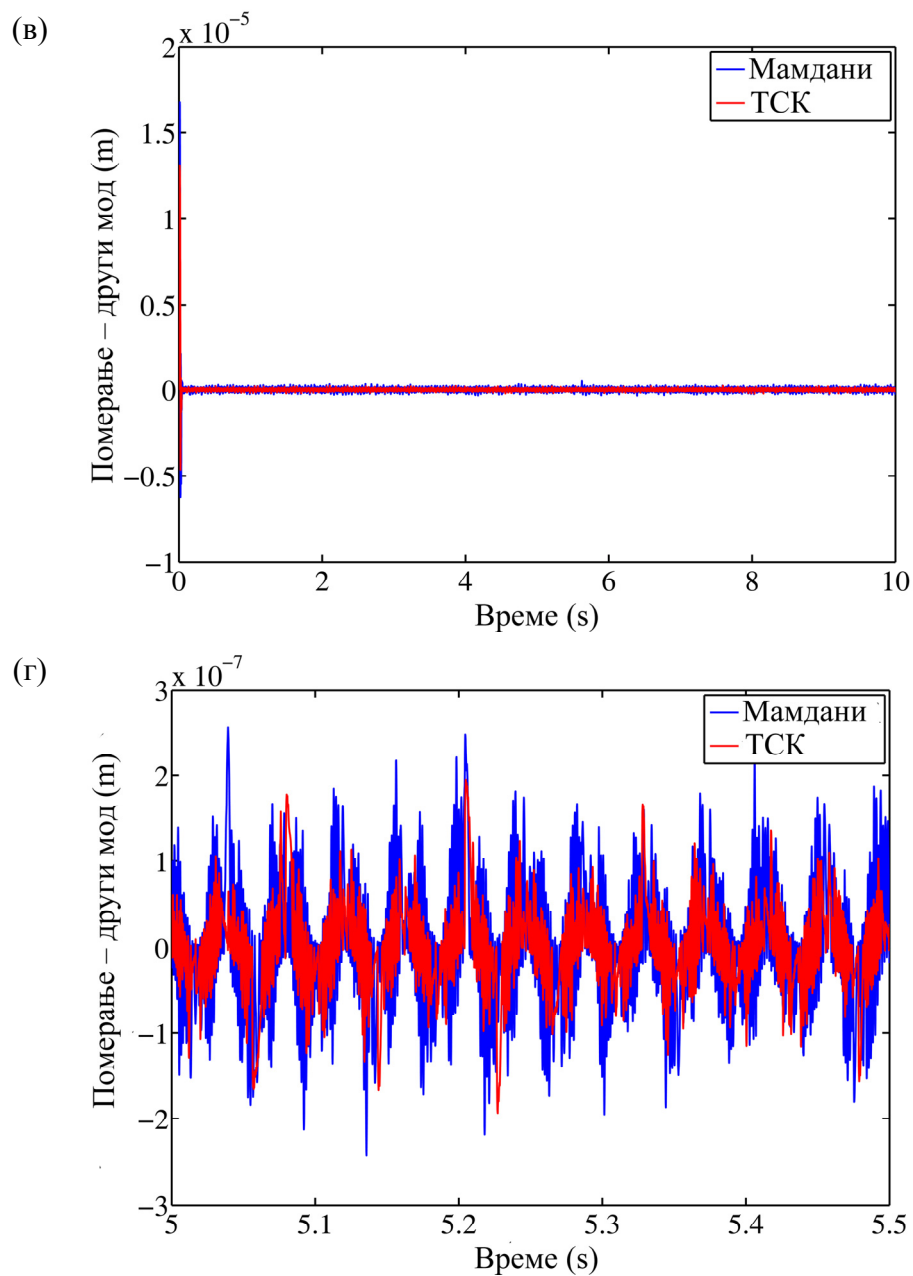
Слика 7.12. Померање тачке А плоче под дејством периодичног оптерећења $0.1\sin(150t)$ [N]: поређење Мамдани и ТСК принципа закључивања и линеарно-квadratним регулатором

На слици 7.13 приказани су померања тачке А за прва два управљана мода. Такође, извршено је поређење Мамдани и ТСК принципа закључивања. Слика 7.13(а) приказује померање за први мод у првих 10 секунди. Опет, због мањих вредности иницијалних скалирајућих фактора, чији је утицај објашњен, у почетном тренутку амплитуда је много већа да би се, после подешавања фактора, смањила. Да би се јасно виделе амплитуде после подешавања, на слици 7.13(б) приказана су померања између 5-те и 5.5-те секунде, на којима се види да је

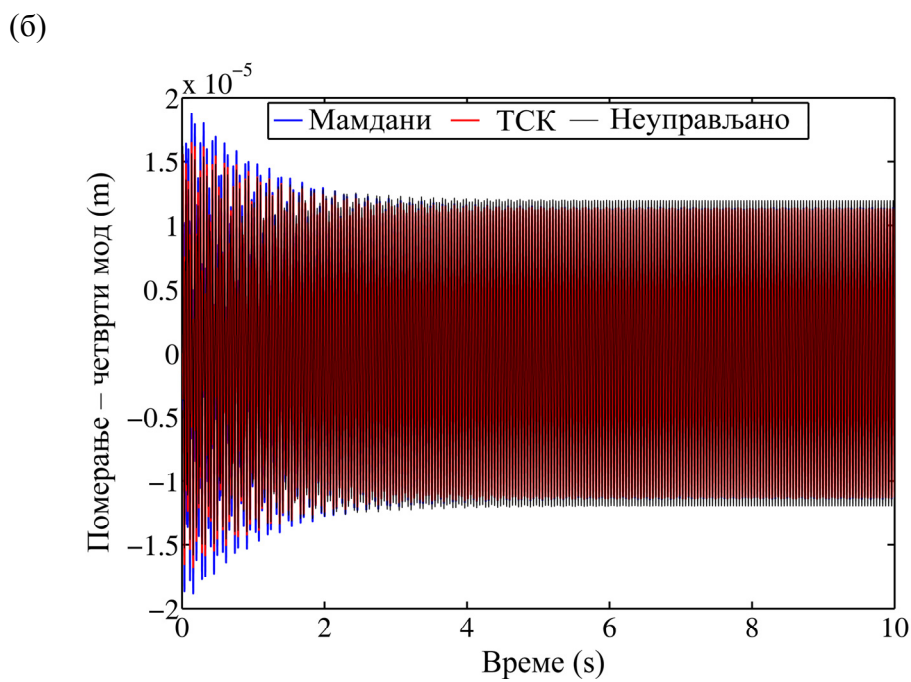
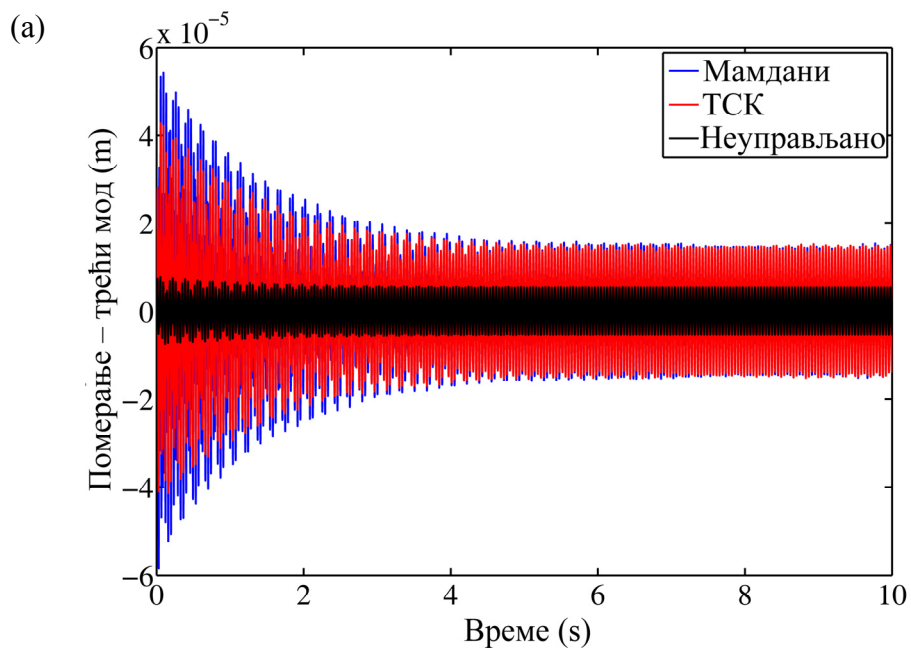
амплитуда код ТСК принципа закључивања нешто мања него код Мамданијевог принципа. Исто важи и за други мод (слика 7.13(в) и (г)). На слици 7.14 приказана су померања тачке А која одговарају резидуалним модовма (трећем, четвртом, петом и шестом).



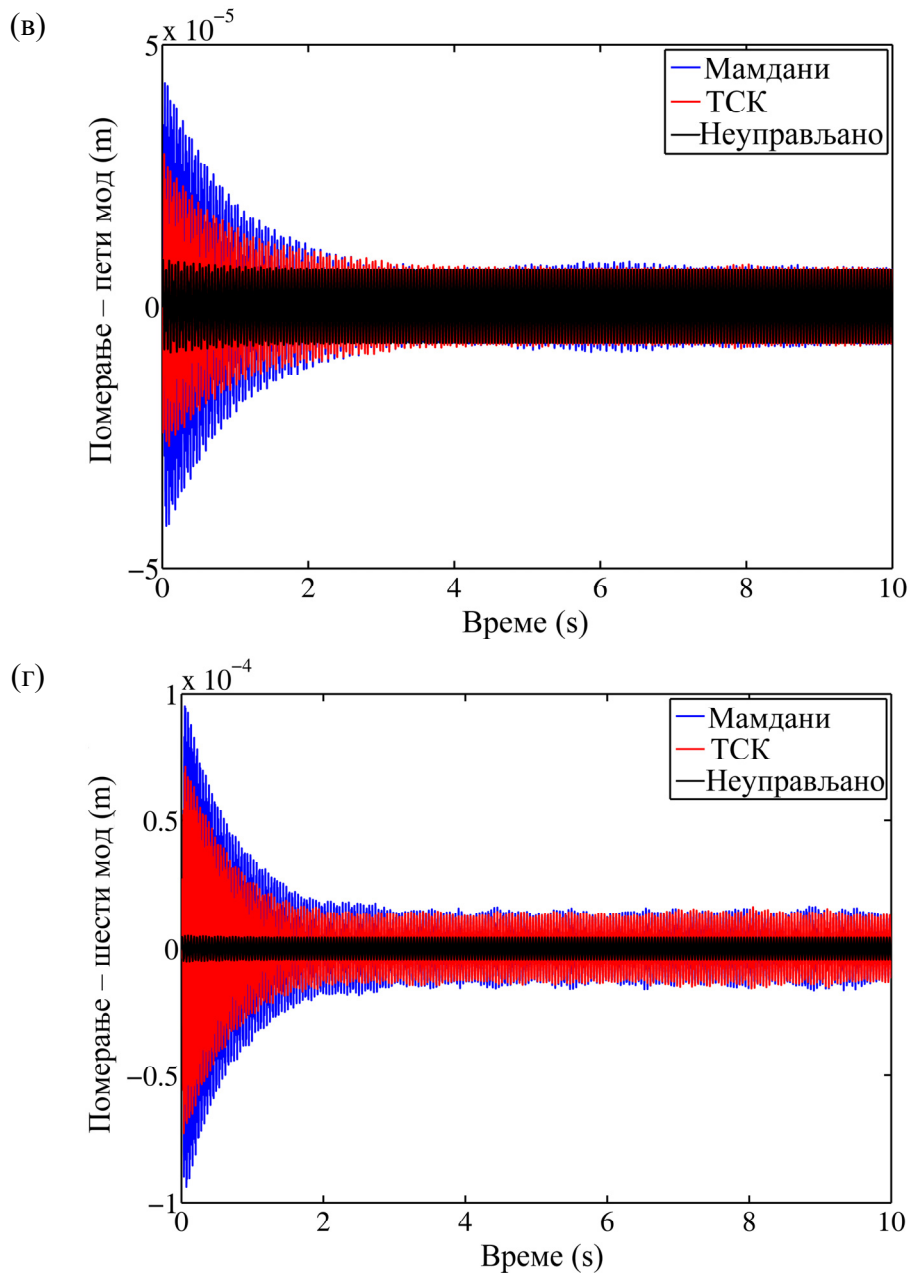
Слика 7.13. (наставља се...)



Слика 7.13. Померање тачке А плоче под дејством периодичног оптерећења $0.1\sin(150t)$ [N]: (а),(б) први мод, (в), (г) други мод



Слика 7.14. (наставља се...)

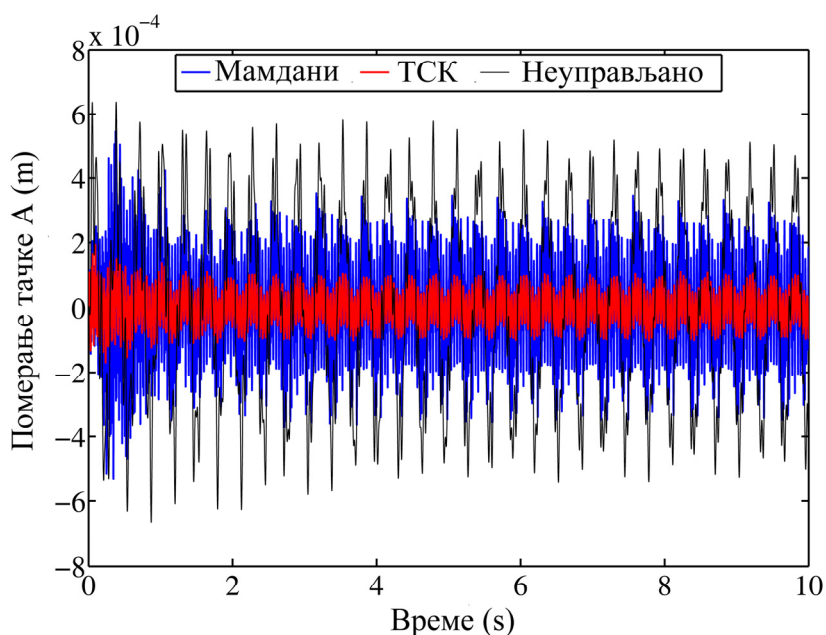


Слика 7.14. Померање тачке А плоче за резидуалне модове под дејством периодичног оптерећења $0.1\sin(150t)$ [N]: (а) трећи мод, (б) четврти мод, (в) пети мод (г) шести мод

Са слике 7.14(а) и (г), на којима су приказана померања која одговарају трећем и шестом моду респективно, може се видети да су амплитуде код случајева где постоји активно пригушење око три пута веће него код случајева где нема активног управљања. Код четвртог и петог мода (слика 7.14(б), (в) респективно) амплитуде управљаних и неуправљаних вибрација су приближно једнаке.

7.3.3 Комбиновано оптерећење

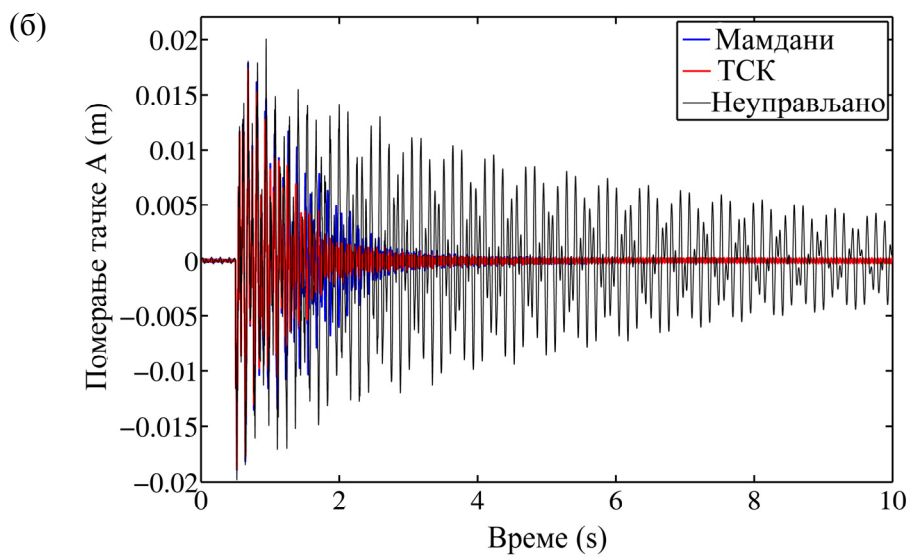
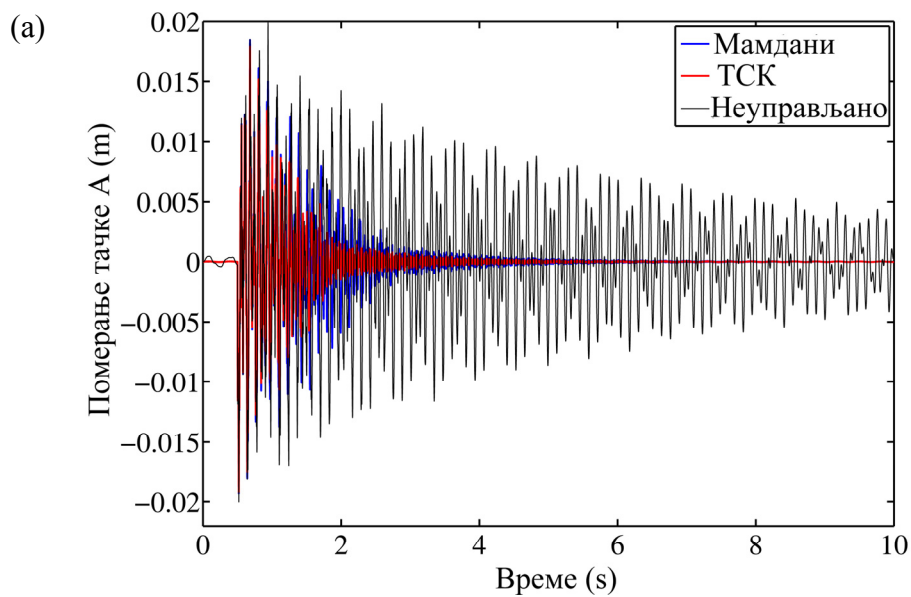
У овом случају плоча је оптерећена у тачки А принудном силом $0.1\sin(20t)$ [N], а на супротном слободом углу силом $0.1\sin(150t)$ [N]. На слици 7.15 приказано је померање тачке А, одакле се види да је оптимизовано самоподешавајуће фази-логичко управљање ефикасно и за ову врсту оптерећења. ТСК принцип закључивања нултог реда показује боље перформансе у односу на Мамдани принцип закључивања.



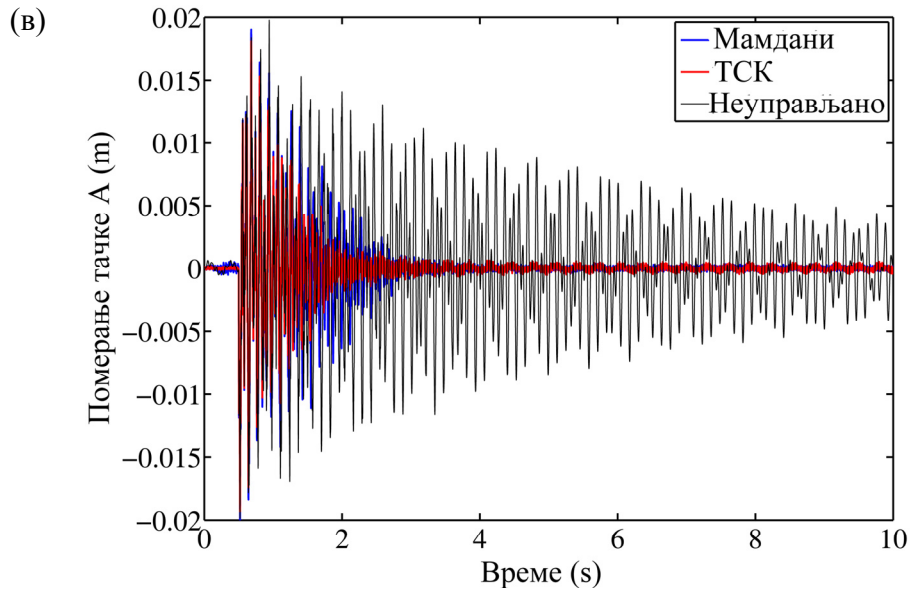
Слика 7.15. Померање тачке А плоче у случају комбинованог оптерећења

7.3.4 Принудно оптерећење са изненадним ударима

Као и код греда, и код плоча биће разматрана робусност оптимизованих самоподешавајућих фази-логичких управљачких система под дејством периодичног оптерећења са неочекиваним ударом. За анализу су узета периодична оптерећења из претходна три потпоглавља, а до неочекиваног удара, интензитета 1000N у трајању од 0.1ms, долази у 0.5-ој секунди у тачки А. На слици 7.16 приказано је померање тачке А.



Слика 7.16. (Наставља се...)



Слика 7.16. Померање тачке А плоче у случају периодичног оптерећења са изненадним ударом од 1000N у трајању од 0.1ms у 0.5-ој секунди: (а) $0.1 \sin(20t)$ [N], (б) $0.1 \sin(150t)$ [N], (в) комбиновано оптерећење.

Са слика 7.16 може се закључити самоподешавајуће фази-логичко управљање показује велики степен робустности према изненадним ударима.

7.4 Закључак

После нумеричког испитивања оптимизованог самоподешавајућег фази-логичког управљачког система за слободне и принудне вибрације укљештене композитне плоче може се видети да се све оне особине које овакви управљачки системи пружају код греда, јављају и код пригушења вибрације плоче.

Такође, поређење оптимизованог самоподешавајућег фази-логичког управљачког система са линеарно-квadratним регулатором показује да се најбоље перформансе остварују за ТСК принцип закључивања нултог реда, затим следи Мамдани принцип закључивања, док најлошије перформансе показује линеарно-квadratни регулатор.

Глава 8

Закључак

8.1 Резултати истраживања

У овој дисертацији истраживано је активно пригушење вибрација паметних танкозидних композитних структура, почевши од оптимизације величине, положаја и оријентација актуатор-сензор парова, па до развијања и оптимизације управљачког алгоритма. У следећим параграфима приказани су кратак преглед и резултати истраживања ове докторске дисертације:

- Дефинисани су критеријуми оптимизације величине, положаја и оријентације пиезоелектричних актуатора базираних на Грамијановим матрицама управљивости. Испитан је утицај оријентације актуаторског слоја на управљивост првих шест модова осциловања за правоугаону укљештену плочу за три случаја конфигурације слојева: $(90^\circ/0^\circ/90^\circ/0^\circ)_s$, $(90^\circ/0^\circ/90^\circ/0^\circ/90^\circ/0^\circ/90^\circ/0^\circ)$ и $(45^\circ/-45^\circ/45^\circ/-45^\circ/45^\circ/-45^\circ/45^\circ/-45^\circ)$. Показало се да се максимална управљивост за одређени мод остварује када се влакна актуаторског слоја усмере у смеру деформације плоче која се јавља код одговарајућег мода. Код антисиметричних слагања слојева показало се да управљивост такође зависи и од тога да ли се актуаторски слој налази на горњој или доњој страни плоче. Разлог што се ово дешава је у томе да, услед антисиметричности, долази то тзв. савојно-истезног ефекта. Услед деформације савијања или увијања долази до истезања (или сабијања) плоче, тако да је апсолутна вредност деформација већа са једне стране плоче, што доводи до несиметричне управљивости. Већа

управљивост постиже се када се актуаторски слој налази са оне стране плоче са где влакна актуаторског слоја заклапају већи угао са влакнима суседног слоја плоче. У даљем раду, извршена је синтеза методе коначних елемената и оптимизације ројем честица и применом дефинисаних критеријума оптимизације, извршена је оптимизација величине, положаја и оријентације пет актуатор-сензор парова. Код плоче са оријентацијом $(90^\circ/0^\circ/90^\circ/0^\circ)_S$ испитан је утицај ограничења покривености површи плоча актуаторима, као и случај када су димензије актуатор-сензор парова непроменљиве током оптимизације. У случају непроменљивих димензија добијају се мање управљивости за све модове осциловања. Како после уградње актуатор-сензор парова долази до промене сопствених фреквенција плоче, ова промена је табеларно приказана за сваку конфигурацију слагања слојева плоче.

- После нумеричког испитивања оптимизованог самоподешавајућег фази логичког управљачког система за слободне и принудне вибрације композитне конзоле може се закључити да резултати оптимизације не зависе од почетних услова оптерећења код слободних вибрација, као ни од принудне силе код принудних вибрација. Ово важи и за Мамдани и за ТСК принцип закључивања нултог реда. Другим речима, решење је робусно према карактеристикама оптерећења, што је логично за очекивати да овај алгоритам буде применљив за структуре које су изложене различитим оптерећењима. Приликом оптимизације параметара функција припадности, довољно је произвољно изабрати оптерећење, а решење ће бити оптимално за остала оптерећења која се јављају током експлоатације. Наравно, при том треба водити рачуна да ли се јављају слободне или принудне вибрације. Промена почетних вредности скалирајућих фактора за оптимизовани самоподешавајући фази-логички управљачки систем не утиче на перформансе активног пригушења вибрација. Поређење оптимизованог самоподешавајућег са оптимизованим фази-логичким управљачким системом са константним факторима у случају Мамданијевог принципа закључивања показује да оптимизовани самоподешавајући управљачки систем има знатно боље перформансе у односу на онај са

константним факторима. Поређење оптимизованог самоопдешавајућег фази-логичког управљачког система са линеарно-квадратним регулатором показује да се најбоље перформансе остварују за ТСК принцип закључивања нултог реда, затим следи Мамдани принцип закључивања, док најлошије перформансе показује линеарно-квадратни регулатор.

- После нумеричког испитивања оптимизованог самоопдешавајућег фази-логичког управљачког система за слободне и принудне вибрације укљештене композитне плоче може се видети да се све оне особине које овакви управљачки системи пружају код греда, јављају и код пригушења вибрације плоче. Такође, поређење оптимизованог самоопдешавајућег фази-логичког управљачког система са линеарно-квадратним регулатором показује да се најбоље перформансе остварују за ТСК принцип закључивања нултог реда, затим следи Мамдани принцип закључивања, док најлошије перформансе показује линеарно-квадратни регулатор.

8.2 Научни доприноси дисертације

На основу остварених резултата истраживања и њихове упоредне анализе са расположивим досадашњим истраживањима, научни доприноси ове дисертације су следећи:

- Досадашња истраживања оптимизације актуатора и сензора базирају се на оптималном постављању актуатора и сензора фиксних димензија и са већ унапред дефинисаном оријентацијом. Синтеза методе коначних елемената и оптимизације ројем честица, представљена у овој дисертацији, бави се, поред оптимизације положаја, оптимизацијом величина, оријентација и места постављања (на горњој или доњој страни плоче) актуатора и сензора. Како повећање броја параметара који се оптимизују доводи до бољих решења, примена алгоритма представљеног у овој дисертацији резултује да се за исту масу пиезоелектричних делова добија боља управљивост чиме се смањује пораст масе структуре и трошкови израде.

- Ако се сагледају особине оптимизованог фази-логичког управљачког система развијеног у оквиру ове докторске дисертације, које су дате у претходном поглављу, може се закључити да овај управљачки систем представља оригинално решење за проблеме који су приказани у радовима [113] и [119], а који се јављају код класичних фази-логичких система везаних за пригушење вибрација са малим амплитудама. Такође, превазиђени су и проблеми одређивања параметара функција припадности и скалирајућих фактора. Због ових особина описани управљачки алгоритам може се применити за пригушење вибрација реалних структура и то у условима стохастичних спољашњих побуда које су узрок вибрација.

8.3 Препоруке за будући рад

Препоруке за будући рад су следеће:

- Синтеза методе коначних елемената и оптимизације ројем честица може се применити и на реалне танкозидне структуре као што су нпр. крило авиона, лопатица ротора хеликоптера, лопатица ветротурбине или манипулатор робота. У овим случајевима треба имати у виду да, због геометрије, коначни елементи нису међусобно једнаки. Због тога је погодно извршити синтезу оптимизације ројем честица са неким комерцијалним софтвером за анализу коначним елементима.
- У овој дисертацији извршена је анализа за линеарне конститутивне моделе. Наредна истраживања могу обухватити и нелинеарне конститутивне моделе.
- Код оптимизованог самоподешавајућег фази-логичког управљачког система узете су у обзир троугаоне и трапезоидне функције припадности. Неко наредно истраживање може обухватити испитивање утицаја различитих облика функција припадности на перформансе управљачког система.
- У овој дисертацији оптимизовани самоподешавајући фази-логички управљачки систем представљен је на примерима греде и плоче. Неки

будући рад може се бавити експерименталним истраживањима на пригушењу вибрација реалних структура.

Литература

- [1] Kassapoglou C.: *Design and Analysis of Composite Structures With Applications to Aerospace Structures*, John Wiley & Sons, United Kingdom, 2010.
- [2] Rogacheva, N. N.: *The theory of piezoelectric shells and plates*, CRC Press, Boca Raton, 1993.
- [3] Yang, J.: *An introduction to the theory of piezoelectricity*, Springer, Boston, 2005.
- [4] Bailey T., Hubbard, J. E.: Distributed piezoelectric-polymer active vibration control of a cantilever beam, *AIAA Journal of Guidance control and Dynamics*, Vol. 8, No. 5, pp. 605-611, 1985.
- [5] Петровић, Н. Б.: *Интелигентни пиезоактуатори*, Машински факултет, Београд, 2003.
- [6] Moheimani, S. O. R., Fleming, A. J.: *Piezoelectric transducers for vibration control and damping*, Springer-Verlag, London, 2006.
- [7] Ballas. R. G.: *Piezoelectric multilayer beam bending actuators: static and dynamic behavior and aspects of sensor integration*, Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, 2007.
- [8] Brockmann, T. H.: *Theory of adaptive fiber composites: from piezoelectric material behavior to dynamic of rotating structures*, Springer, Berlin, 2009.
- [9] Jalili, P.: *Piezoelectric-based vibration control: from macro to micro/nano scale systems*, Springer, New York, 2010.
- [10] Vel, S., Batra, R.: Three-dimensional analytical solution for hybrid multilayered piezoelectric plates, *Journal of Applied Mechanics*, Vol. 67, No. 3, pp. 558-567, 2000.

- [11] Ooato, Y., Yanigawa, Y.: Three-dimensional transient piezothermoelasticity in functionally graded rectangular plate bonded to a piezoelectric plate, *International Journal of Solids and Structures*, Vol. 37, No. 32, pp. 4377-4401, 2000.
- [12] Kashtalyan, M.: Three-dimensional elasticity solution for bending of functionally graded rectangular plates, *European Journal of Mechanics A/Solids*, Vol. 23, No. 5, pp. 853-864, 2004.
- [13] Nie, G. J., Zhong, Z.: Semi-analytical solution for three-dimensional vibration of functionally graded circular plates, *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, Vol. 196, No. 49-52, pp. 4901-4910, 2007.
- [14] Liu, W., Zhong, Z.: Three-Dimensional Analysis of Simply Supported Functionally Graded Plate with Arbitrary Distributed Elastic Modulus, *Tsinghua Science & Technology*, Vol. 14, No. 2, pp. 58-63, 2009.
- [15] Malekzadeh, P.: Three-dimensional free vibration analysis of thick functionally graded plates on elastic foundations, *Composite Structures*, Vol. 89, No. 3, pp. 367-373, 2009.
- [16] Xu, Y., Zhou, D.: Three-dimensional elasticity solution of functionally graded rectangular plates with variable thickness, *Composite Structures*, Vol. 91, No. 1, pp. 56-65, 2009.
- [17] Wang, Y., Xu, R., Ding, H.: Three-dimensional solution of axisymmetric bending of functionally graded circular plates, *Composite Structures*, Vol. 92, No. 7, pp. 1683-1693, 2010.
- [18] Kim, T. W., Kim, J. H.: Optimal distribution of an active layer for transient vibration control of a flexible plate, *Smart Materials and Structures*, Vol. 14, No. 5, pp. 904-916, 2005.
- [19] He, X. Q., Ng, T. Y., Sivashanker, T., Liew, K. M.: Active control of FGM plates with integrated piezoelectric sensors and actuators, *International Journal of Solids and Structures*, Vol. 38, No. 9, pp. 1641-1655, 2001.
- [20] Belouettar, S., Azrar, L., Daya, E. M., Laptev, V., Potier-Ferry, M.: Active control of nonlinear vibration of sandwich piezoelectric beams: A simplified approach, *Computers and Structures*, Vol. 86, No. 3-5, pp. 386-397, 2008.
- [21] Jayakumar, K., Yadav, D., Rao, B. N.: Nonlinear free vibration analysis of simply supported piezo-laminated plates with random actuation electric potential difference and material properties, *Communications in Nonlinear Science and Numerical Simulation*, Vol. 14, No. 4, pp. 1646-1663, 2009.

- [22] Wang, S. Y., Quek, S. T., Ang, K. K.: Vibration control of smart piezoelectric composite plates, *Smart Materials and Structures*, Vol. 10, No. 4, pp. 637-644, 2001.
- [23] Chakraborty, A., Gopalakrishnan, S., Reddy, J. N.: A new beam finite element for the analysis of functionally graded materials, *International Journal of Mechanical Sciences*, Vol. 45, No. 3, pp. 519-539, 2003.
- [24] Narayanan, S., Balamurugan, V.: Finite element modelling of piezolaminated smart structures for active vibration control with distributed sensors and actuator, *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 262, No. 3, pp. 529-562, 2003.
- [25] Ray, M. C., Sachade, H. M.: Finite element analysis of smart functionally graded plates, *International Journal of Solids and Structures*, Vol. 43, No. 18-19, pp. 5468-5484, 2006.
- [26] Roy, T., Manikandan, P., Chakraborty, D.: Improved shell finite element for piezothermoelastic analysis of smart fiber reinforced composite structures, *Finite Elements in Analysis and Design*, Vol. 46, No. 9, pp. 710-720, 2010.
- [27] Gao, J. X, Shen, Y. P.: Active control of geometrically nonlinear transient vibration of composite plates with piezoelectric actuators, *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 264, No. 4, pp. 911-928, 2003.
- [28] Kusculuoglu, Z. K., Royston, J. T.: Nonlinear modeling of composite plates with piezoceramic layers using finite element analysis”, *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 315, pp. 911-926, 2008.
- [29] Panda, S., Ray, M. C.: Nonlinear finite element analysis of functionally graded plates integrated with patches of piezoelectric fiber reinforced composite, *Finite Elements in Analysis and Design*, Vol. 44, No. 8, pp. 493-504, 2008.
- [30] Mahato, P. K, Maiti, D. K.: Aeroelastic analysis of smart composite structures in hygro-thermal environment, *Composite Structures*, Vol. 92, No. 4, pp. 1027-1038., 2010.
- [31] Reddy, J. N.: A simple higher-order theory for laminated composite plates, *Journal of Applied Mechanics*, Vol. 51, No. 4, pp. 745-752, 1984.
- [32] Peng, X. Q., Lam, K. Y., Liu, G. R.: “Active vibration control of composite beams with piezoelectrics: A finite element model with third order theory, *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 209, No. 4, pp. 635-650, 1998.
- [33] Shi, G., Lam, K. Y.: Finite element vibration analysis of composite beams based on higher-order beam theory, *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 219, No. 4, pp. 707-721, 1999.

-
- [34] Tabiei, A., Tanov, R.: A nonlinear higher order shear deformation shell element for dynamic explicit analysis: Part I. Formulation and finite element equations, *Finite Elements in Analysis and Design*, Vol. 36, No. 1, pp. 17-37, 2000.
- [35] Lee, S. J.: *Nonlinear Analysis of Smart Composite Plate and Shell Structures*, PhD thesis, Texas A&M University, College Station, Texas, United States, 2004.
- [36] Thornburgh, R. P., Chattopadhyay, A., Ghoshal, A.: Transient vibration of smart structures using a coupled piezoelectric-mechanical theory, *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 274, No. 1-2, pp. 53-72, 2004.
- [37] Moita, J. M. S., Soares, C. M. M., Soares, C. M. M.: Active control of forced vibrations in adaptive structures using a higher order model, *Composite Structures*, Vol. 71, No. 3-4, pp. 349-355, 2005.
- [38] Lee, S. J., Reddy, J. N., Rostam-Abadi, F.: Nonlinear finite element analysis of laminated composite shells with actuating layers, *Finite Elements in Analysis and Design*, Vol. 43, No. 1, pp. 1-21, 2006.
- [39] Jiang, J. P., Li, D. X.: A new finite element model for piezothermoelastic composite beam, *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 306, No. 3-5, pp. 849-864, 2007.
- [40] Matsunaga, H.: Free vibration and stability of functionally graded shallow shells according to a 2D higher-order deformation theory, *Composite Structures*, Vol. 84, No. 2, pp. 132-146, 2008.
- [41] Dash, P., Singh, B. N.: Nonlinear free vibration of piezoelectric laminated composite plate, *Finite Elements in Analysis and Design*, Vol. 45, No. 10, pp. 686-694, 2009.
- [42] Yiqi, M., Yiming, F.: Nonlinear dynamic response and active vibration control for piezoelectric functionally graded plate, *Journal of Sound and Vibrations*, Vol. 329, No. 11, pp. 2015-2028, 2010.
- [43] Godoy, T. C., Trindade, M. A.: Modeling and analysis of laminate composite plates with embedded active-passive piezoelectric networks, *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 330, No. 2, pp. 194-216, 2011.
- [44] Zorić, N. D., Simonović, A. M., Mitrović, Z. S., Stupar, S. N.: Multi-objective fuzzy optimization of sizing and location of piezoelectric actuators and sensors, *FME Transactions*, Vol. 40, No. 1, pp. 1-9, 2012.
- [45] Zorić, N. D., Simonović, A. M., Mitrović, Z. S., Stupar, S. N.: Optimal vibration control of smart composite beams with optimal size and location of piezoelectric sensing and actuation, *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, Vol. 24, No. 4, pp. 499-526, 2013.

- [46] Kassenge, S. K.: *Layerwise Theory for Discretely Stiffened Laminated Cylindrical Shells*, PhD thesis, Virginia Polytechnic Institute and State University, Blacksburg, Virginia, United States, 1992.
- [47] Cho, M., Oh, J.: Higher order zig-zag theory for fully coupled thermo-electric-mechanical smart composite plates, *International Journal of Solids and Structures*, Vol. 41, No. 5-6, pp. 1331-1356, 2004.
- [48] Oh, I. K., Lee, I.: Supersonic flutter suppression of piezolaminated cylindrical panels based on multifield layerwise theory, *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 291, No. 3-5, pp. 1186-1201, 2006.
- [49] Zabihollah, A., Sedagahti, R., Ganesan, R., Active vibration suppression of smart laminated beams using layerwise theory and an optimal control strategy, *Smart Materials and Structures*, Vol. 16, No. 6, pp. 2190-2201, 2007.
- [50] Kapuria, S., Kulkarni, S. D.: An efficient quadrilateral element based on improved zigzag theory for dynamic analysis of hybrid plates with electroded piezoelectric actuators and sensors, *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 315, No. 1-2, pp. 118-145, 2008.
- [51] Balamurugan, V., Narayanan, S.: Multilayer Higher Order Piezolaminated Smart Composite Shell Finite Element and its Application to Active Vibration Control, *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, Vol. 20, No. 4 pp. 435-441, 2009.
- [52] Kapuria, S., Yasin, M. Y.: Active vibration control of piezoelectric laminated beams with electroded actuators and sensors using an efficient finite element involving an electric node, *Smart Materials and Structures*, Vol. 19: 045019, 2010.
- [53] Kapuria, S., Yasin, M. Y.: Active vibration suppression of multilayered plates integrated with piezoelectric fiber reinforced composites using an efficient finite element model, *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 329, pp. 3247-3265, 2010.
- [54] Gupta, V., Sharma, M., Thakur, T.: Optimization Criteria for Optimal Placement of Piezoelectric Sensors and Actuators on a Smart Structure: A Technical Review, *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, Vol. 21, No. 12, pp. 1227-1243, 2010.
- [55] Frecker, M. I.: Recent Advances in Optimization of Smart Structures and Actuators, *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, Vol.14, No. 4-5, pp. 207-216, 2003.
- [56] Wang, Q., Wang, C. M.: A controllability index for optimal design of piezoelectric actuators in vibration control of beam structures”, *Journal of Sound and Vibrations*, Vol. 242, No.3, pp. 507-518, 2001.

- [57] Roy, T., Chakraborty, D.: Genetic algorithm based optimal control of smart composite shell structures under mechanical loading and thermal gradient, *Smart Materials and Structures*, Vol. 18, No. 11, pp. 1-12, 2009.
- [58] Roy, T., Chakraborty, D.: Optimal vibration control of smart fiber reinforced composite shell structures using improved genetic algorithm, *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 319, No. 1-2, pp. 15-40, 2009.
- [59] Dhuri, K. D., Seshu, P.: Piezo actuator placement and sizing for good control effectiveness and minimal change in original system dynamics, *Smart materials and Structures*, Vol. 15, No. 6, pp. 1661-1672, 2006.
- [60] Dhuri, K. D., Seshu, P.: Multi-objective optimization of piezo actuator placement and sizing using genetic algorithm, *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 323, No. 3-5, pp. 495-514, 2009.
- [61] Hac, A., Liu, L.: Sensor and Actuator Location in Motion Control of Flexible Structures, *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 167, No. 2, pp. 239-261, 1993.
- [62] Jha, A. K., Inman, D. J.: Optimal Sizes and Placements of Piezoelectric Actuators and Sensors for an Inflated Torus, *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, Vol. 14, No. 9, pp. 563-576, 2003.
- [63] Peng, F., Ng, A., Hu, Y. R.: Actuator Placement Optimization and Adaptive Vibration Control of Plate Smart Structures, *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, Vol. 16, No. 3, pp. 263-271, 2005.
- [64] Bruant, I., Gallimard, L., Nikoukar, S.: Optimal piezoelectric actuator and sensor location for active vibration control, using genetic algorithm, *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 329, No. 10, pp. 1615-1635, 2010.
- [65] Bruant, I., Proslie, L.: Optimal Location of Actuators and Sensors in Active Vibration Control, *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, Vol. 16, No. 3, pp. 197-206, 2005.
- [66] Bourisli, R. I., Al-Ajmi, M. A.: Optimization of Smart Beams for Maximum Modal Electromechanical Coupling Using Genetic Algorithms, *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, Vol. 21, No. 9, pp. 907-914, 2010.
- [67] Mehrabian, A. R., Yousefi-Koma, A.: A novel technique for optimal placement of piezoelectric actuators on smart structures, *Journal of the Franklin Institute*, Vol. 348, No 1, pp. 12-23, 2011.
- [68] Gawronski, W.: Simultaneous placement of actuators and sensors, *Proceedings of the 18 th International Modal Analysis Conference*, 07-10.02.2000, San Antonio, USA, pp. 1474-1478.

-
- [69] Halim, D., Moheimani, S. O. R.: An optimization approach to optimal placement of collocated piezoelectric actuators and sensors on a thin plate, *Mechatronics*, Vol. 13, No. 1, pp. 27-47, 2003.
- [70] Dhuri, K. D., Seshu, P.: Favorable locations for piezo actuators in plates with good control effectiveness and minimal change in system dynamic, *Smart Material and Structures*, Vol. 16, No. 6, pp. 2526-2542, 2007.
- [71] Qiu, Z., Zhang, X., Wu, H., Zhang, H.: Optimal placement and active vibration control for piezoelectric smart flexible cantilever plate, *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 301, No. 3-5, pp. 521-543, 2007.
- [72] Jiang, J. P., Li, D. X.: Optimal placement and decentralized robust vibration control for spacecraft smart solar panel structures, *Smart Materials and Structures*, Vol. 19, No. 8, 085020, 2010.
- [73] Bruant, I., Coffignal, G., Lene, F., Verge, M.: A methodology for determination of piezoelectric actuator and sensor location on beam structures, *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 243, No. 5, pp. 861-882, 2001.
- [74] Kumar, K. R., Narayanan, S.: The optimal location of piezoelectric actuators and sensors for vibration control of plates, *Smart Materials and Structures*, Vol. 16, No. 6, pp. 2680-2691, 2007.
- [75] Kumar, K. R., Narayanan, S.: Active vibration control of beams with optimal placement of piezoelectric sensor/actuator pairs, *Smart Materials and Structures*, Vol. 17, No. 5, pp. 055008 (1-15), 2008.
- [76] Jin, Z., Yang, Y., Soh, C. K.: Application of fuzzy GA for optimal vibration control of smart cylindrical shells, *Smart Materials and Structures*, Vol. 14, No. 6, pp. 1250-1264, 2005.
- [77] Yang, Y., Jin, Z., Soh, C. K.: Integrated optimal design of vibration control system for smart beams using genetic algorithms, *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 282, No. 3-5, pp. 1293-1307, 2005.
- [78] Wang, S. Y., Tai, K., Quek, S. T.: Topology optimization of piezoelectric sensors/actuators for torsional vibration control of composite plates, *Smart Materials and Structures*, Vol. 15, No. 2, pp. 253-269, 2006.
- [79] Hiramoto, K., Doki, H., Obinata, G.: Optimal sensor/actuator placement for active vibration control using explicit solution of algebraic riccati equation, *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 229, No. 5, pp. 1057-1075, 2000.
- [80] Liu, W., Hou, Z., Demetriou, M. A.: A computational scheme for the optimal sensor/actuator placement of flexible structures using spatial H_2 measures, *International Journal of Mechanical Sciences*, Vol. 20, No.4, pp. 881-895, 2006.

- [81] Alkhatib, R., Golnaraghi, M. F.: Active Structural Vibration Control: A Review, *The Shock and Vibration Digest*, Vol. 35, No. 5, pp. 367-383, 2003.
- [82] Fisco, N. R, Adeli, H.: Smart structures: Part II — Hybrid control systems and control strategies, *Scientia Iranica A*, Vol. 18, No. 3, pp. 285-295, 2011.
- [83] Quek, S. T., Wang., S. Y., Ang, K. K.: Active control of geometrically nonlinear vibrations of functionally graded laminated composite plates using piezoelectric fiber reinforced composites, *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 325, No. 1-2, pp. 186-205, 2009.
- [84] Moita, J. M. S., Correira, F. V. M., Martins, P. G., Soares, C. M. M., Soares, C.A. M.: Optimal design in vibration control of adaptive structures using a simulated annealing algorithm, *Composite Structures*, Vol. 75, No. 1-4, pp. 79-87, 2006.
- [85] Gatti, G., Brennan, M. J., Gardonio, P.: Active damping of a beam using a physically collocated accelerometer and piezoelectric patch actuator, *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 303, No. 3-5, pp. 798-813, 2007.
- [86] Choi, S. C., Park, J. S., Kim, J. H.: Vibration control of pre-twisted rotating composite thin-walled beams with piezoelectric fiber composites, *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 300, No. 1-2, pp. 176-196, 2007.
- [87] Tanaka, N., Sanada, T.: Modal control of a rectangular plate using smart sensors and smart actuators, *Smart Materials and Structures*, Vol. 16, No. 1, pp. 36-46, 2007.
- [88] Moita, J. M. S., Martins, P. G., Soares, C. M. M., Soares, C.A. M.: Optimal dynamic control of laminated adaptive structures using Optimal dynamic control of laminated adaptive structures using a higher order model and a genetic algorithm, *Computers and Structures*, Vol. 86, pp. 198-206, 2008.
- [89] Panda, S., Ray, M. C.: Active control of geometrically nonlinear vibrations of functionally graded laminated composite plates using piezoelectric fiber reinforced composites, *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 325, No. 1-2, pp. 186-205, 2009.
- [90] Tian, Y. P., Fu, Y. M., Wang, Y.: Nonlinear dynamic response of piezoelectric elasto-plastic laminated plates with damage, *Composite Structures*, Vol. 88, No. 2, pp. 169-178, 2009.
- [91] Malgaca, L.: Integration of active vibration control methods with finite element models of smart laminated composite structures, *Composite Structures*, Vol. 92, No. 7, pp. 1651-1663, 2010.
- [92] Bruant, I., Coffignal, G., Lene, F., Verge, M.: Active control of beam structures with piezoelectric actuators and sensors: modeling and simulation, *Smart Materials and Structures*, Vol. 10, No. 2, pp. 404-408, 2001.

- [93] Ang, K. K., Wang, S. Y., Quek, S. T.: Weighted energy linear quadratic regulator vibration control of piezoelectric composite plates, *Smart Materials and Structures*, Vol. 11, No. 1, pp. 98-106, 2002.
- [94] Gabbert, U., Nestorović Trajkov T., Köppe, H.: Modelling, control and simulation of piezoelectric smart structures using finite element method and optimal LQ control, *Automatic Control and Robotics*, Vol. 3, No. 12, pp. 417–430, 2002.
- [95] Xu, S. X., Koko, T. S.: Finite element analysis and design of actively controlled piezoelectric smart structures, *Finite Elements in Analysis and Design*, Vol. 40, No. 3, pp. 241-262, 2004.
- [96] Gabbert, U., Nestorović Trajkov T., Köppe, H.: Controller design and implementation for active vibration suppression of a piezoelectric smart shell structure, *Journal of Theoretical and Applied Mechanics*, Vol. 43, No. 3, pp. 487-500, 2005.
- [97] Roy, T., Chakraborty, D.: GA-LQR Based Optimal Vibration Control of Smart FRP Composite Structures with Bonded PZT Patches, *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, Vol. 28, No. 11, pp. 1383-1404, 2009.
- [98] Karagülle, H., Malgaca, L., Öktem, H. F.: Analysis of active vibration control in smart structures by ANSYS, *Smart Materials and Structures*, Vol. 13, No. 4, pp. 661-667, 2004.
- [99] Li, F. M., Chen, Z. B., Cao, D. Q.: Improving the Aeroelastic Flutter Characteristics of Supersonic Beams Using Piezoelectric Material, *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, Vol. 22, No. 7, pp. 615-629, 2011.
- [100] Wang, Y., Inman, D. J.: Comparison of Control Laws for Vibration Suppression Based on Energy Consumption, *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, Vol. 22, No. 8, pp. 795-809, 2011.
- [101] Chang, W., Gopinathan, S. V., Varadan, V. V., Varadan, V. K.: Design of Robust Vibration Controller for a Smart Panel Using Finite Element Model, *Journal of Vibration and Acoustics*, Vol. 124, No. 2, pp. 265-276, 2002.
- [102] Jiang, J. P., Li, D. X.: Decentralized Robust Vibration Control of Smart Structures with Parameter Uncertainties, *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, Vol. 22, No. 2, pp. 137-147, 2011.
- [103] Fakhari, V., Ohadi, A.: Nonlinear vibration control of functionally graded plate with piezoelectric layers in thermal environment, *Journal of Vibration and Control*, Vol. 17, No. 3, pp. 449-469, 2011.
- [104] Xue, X., Tang, J.: Vibration Control of Nonlinear Rotating Beam Using Piezoelectric Actuator and Sliding Mode Approach, *Journal of Vibration and Control*, Vol. 14, No. 6, pp. 885–908, 2008.

- [105] Oh, J. S., Han, Y. M., Choi, S. B.: Vibration control of a camera mount system for an unmanned aerial vehicle using piezostack actuators, *Smart Materials and Structures*, Vol. 20, No. 8, pp. 085020 (1-13), 2011.
- [106] Nestorović Trajkov, T., Köppe, H., Gabbert, G.: Direct model reference adaptive control (MRAC) design and simulation for the vibration suppression of piezoelectric smart structures, *Communications in Nonlinear Science and Numerical Simulation*, Vol. 13, No. 9, pp. 1896-1909, 2008.
- [107] Darus, I. Z. M., Tokhi, M. O.: Soft computing-based active vibration control of a flexible structure, *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, Vol. 18, No 1, pp. 93-114, 2005.
- [108] Abreu, G. L. C. M., Ribeiro, J. F.: A self-organizing fuzzy logic controller for the active control of flexible structures using piezoelectric actuators, *Applied Soft Computing*, Vol. 1, No. 4, pp. 271-283, 2002.
- [109] Lin, J.: An active vibration absorber of smart panel by using a decomposed parallel fuzzy control structure, *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, Vol.18, No. 8, pp. 985-998, 2005.
- [110] Lin, J.: A vibration absorber of smart structures using adaptive networks in hierarchical fuzzy control, *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 287, No. 4-5, pp. 683-705, 2005.
- [111] Lin, J., Liu, W. Z.: Experimental evaluation of a piezoelectric vibration absorber using a simplified fuzzy controller in a cantilever beam, *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 296, No. 3, pp. 567-582, 2006.
- [112] Nasser, H., Kiefer-Kamal, E. H., Hua, H., Belouettar, S., Barkanov, E.: Active vibration damping of composite structures using a nonlinear fuzzy controller, *Composite Structures*, Vol. 94, No. 4, pp. 1385-1390, 2012.
- [113] Sharma, M., Singh, S. P, Sachdeva, B. L: Modal control of a plate using a fuzzy logic Controller, *Smart Materials and Structures*, Vol. 16, No. 4, pp. 1331-1341, 2007.
- [114] Marinaki, M., Marinakis, Y., Stavroulakis, G. E.: Fuzzy control optimized by PSO for vibration suppression of beams, *Control Engineering Practice*, Vol. 18, No. 6, pp. 618-629, 2010.
- [115] Marinaki, M., Marinakis, Y., Stavroulakis, G. E.: Fuzzy control optimized by a Multi-Objective Particle Swarm Optimization algorithm for vibration suppression of smart structures, *Structural and multidisciplinary optimization*, Vol. 43, No. 1, pp. 29-42, 2011.

- [116] Зорић Н., Митровић З., Симоновић А., Постељник З.: Оптимална контрола вибрација композитног еластичног пиезоелектричног манипулатора применом фази-логичког управљања, 38. *Јупитер конференција*, 34. *NU/ROBOTI/FTS симпозијум* (ISBN 978-86-7083-757-7), pp. 3.165-3.170, Машински факултет, Београд, 2012.
- [117] Zorić, N., Simonović, A., Mitrović, Z., Stupar, S.: Active vibration control of smart composite beams using PSO-optimized self-tuning fuzzy logic controller, *Journal of Theoretical and Applied Mechanics*, Vol. 51, No. 2, 2013.
- [118] Shirazi, A., H., N., Owji, H. R., Rafeeyan, M: Active Vibration Control of an FGM Rectangular Plate using Fuzzy Logic Controllers, *Procedia Engineering*, Vol. 14, pp. 3019-3026, 2011.
- [119] Wei, J. J., Qiu, Z. C., Han, J. D., Wang, Y. C.: Experimental Comparison Research on Active Vibration Control for Flexible Piezoelectric Manipulator Using Fuzzy Controller, *Journal of Intelligent & Robotic Systems*, Vol. 59, No. 1, pp. 31-56, 2010.
- [120] Youn, S. H., Han, J. H., Lee, I.: Neuro-adaptive vibration control of composite beams subject to sudden delamination, *Journal of Sound and Vibrations*, Vol. 238, No. 2, pp. 215-231, 2000.
- [121] Valoor, M. T., Chandrashekhara, K., Agarwal, S.: Self-adaptive vibration control of smart composite beams using recurrent neural architecture, *International Journal of Solids and Structures*, Vol. 38, No. 44-45, pp. 7857-7874, 2001.
- [122] Kumar, R., Singh, S. P., Chandrawat, H. N.: MIMO adaptive vibration control of smart structures with quickly varying parameters: Neural networks vs classical control approach, *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 37, No. 3-5, pp. 639-661, 2007.
- [123] Reddy, J. N.: *Mechanics of laminated composite plates and shells: Theory and analysis, Second edition*, CRC Press, Boca Raton, 2004.
- [124] Gawronski, W. K: *Advanced Structural Dynamics and Active Control of Structures*, Springer-Verlag, New York, 2004.
- [125] Kailath, T.: *Linear Systems*, Prentice-Hall, Englewood Cliffs, N. J., 1980.
- [126] Kennedy, J. and Eberhart, R.: Particle swarm optimization, *Proceedings of the IEEE International Conference on Neural Networks*, Vol. 4, 27.11-01.12.1995, Perth, Australia, pp. 1942-1948.
- [127] Teodorović, D., Kikuchi, S.: *Fuzzy skupovi i primene u saobraćaju*, Saobraćajni fakultet Univerziteta u Beogradu, Beograd, 1994.

- [128] Zadeh, L. A.: Fuzzy sets, *Information and Control*, Vol. 8, pp., 338-353, 1965.
- [129] Lee, K. H.: *First Course on Fuzzy Theory and Application*, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2005.
- [130] Wilson, C. M. D.: *Fuzzy Control of Magnetorheological Dampers for Vibration Reduction of Seismically Excited Structures*, PhD thesis, Florida State University, Tallahassee, United States, 2005.
- [131] Qiao, W. Z., Mizumoto, M.: PID type fuzzy controller and parameters adaptive method, *Fuzzy Sets and Systems*, Vol. 78, No. 1, pp. 23-35, 1996.

Биографија

Име и презиме:	Немања Зорић
Датум рођења:	08. 10. 1983.
Место рођења:	Книн, Хрватска
Школовање:	1990.-1995.: Основна школа у Книну 1995.-1998.: Основна школа у Перлезу 1998.-2002.: Зрењанинска гимназија, Зрењанин 2002.-2007.: Универзитет у Београду, Машински факултет, одсек за ваздухопловство, просек 9.71 2007.-2013.: Докторске студије на Машинском факултету Универзитета у Београду
Кретање у послу:	2007.-2010.: Истраживач приправник на Катедри за ваздухопловство на Машинском факултету Универзитета у Београду 2010.: Редован војни рок 2010.- Асистент на Катедри за механику на Машинском факултету Универзитета у Београду

Референце:

- [1] **Zorić, N. D.**, Simonović, A. M., Mitrović, Z. S., Stupar, S. N.: Optimal vibration control of smart composite beams with optimal size and location of piezoelectric sensing and actuation, *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, Vol. 24, No. 4, pp. 499-526, 2013.
- [2] **Zorić, N.**, Simonović, A., Mitrović, Z., Stupar, S.: Active vibration control of smart composite beams using PSO-optimized self-tuning fuzzy logic controller, *Journal of Theoretical and Applied Mechanics*, Vol. 51, No. 2, 2013.
- [3] **Zorić, N. D.**, Simonović, A. M., Mitrović, Z. S., Stupar, S. N.: Multi-objective fuzzy optimization of sizing and location of piezoelectric actuators and sensors, *FME Transactions*, Vol. 40, No. 1, pp. 1-9, 2012.
- [4] **Zorić, N. D.**, Lazarević, M. P., Simonović, A. M.: Multi-Body Kinematics and Dynamics in Terms of Quaternions: Langrange Formulation in Covariant Form-Rodriguez Approach, *FME Transactions*, Vol. 38, No. 1, pp. 19-28, 2010.
- [5] **Zorić N.**, Mitrović Z., Simonović A., Stupar S., A PIC32 based active vibration control of smart composite beams, *The 29th Danubia-Adria-Symposium on Advances in Experimental Mechanics*, 26th-29th September 2012, Belgrade, Serbia (ISBN 978-86-7083-762-1), pp. 194-197.

Прилог 1.

Изјава о ауторству

Потписани Немања Д. Зорић

број индекса Д6/07

Изјављујем

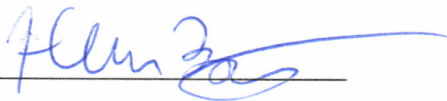
да је докторска дисертација под насловом

Динамичко понашање паметних танкозидних композитних структура

- резултат сопственог истраживачког рада,
- да предложена дисертација у целини ни у деловима није била предложена за добијање било које дипломе према студијским програмима других високошколских установа,
- да су резултати коректно наведени и
- да нисам кршио/ла ауторска права и користио интелектуалну својину других лица.

Потпис докторанда

У Београду, 04. 04. 2013.



Прилог 2.

**Изјава о истоветности штампане и електронске верзије
докторског рада**

Име и презиме аутора Немања Д. Зорић

Број индекса Д6/07

Студијски програм Докторске академске студије

Наслов рада Динамичко понашање паметних танкозидних композитних
структура

Ментор проф. др Зоран Митровић

Потписани/а Немања Д. Зорић

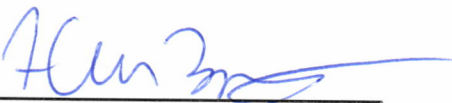
Изјављујем да је штампана верзија мог докторског рада истоветна електронској верзији коју сам предао/ла за објављивање на порталу **Дигиталног репозиторијума Универзитета у Београду**.

Дозвољавам да се објаве моји лични подаци везани за добијање академског звања доктора наука, као што су име и презиме, година и место рођења и датум одбране рада.

Ови лични подаци могу се објавити на мрежним страницама дигиталне библиотеке, у електронском каталогу и у публикацијама Универзитета у Београду.

Потпис докторанда

У Београду, 04. 04. 2013.



Прилог 3.

Изјава о коришћењу

Овлашћујем Универзитетску библиотеку „Светозар Марковић“ да у Дигитални репозиторијум Универзитета у Београду унесе моју докторску дисертацију под насловом:

Динамичко понашање паметних танкозидних композитних структура

која је моје ауторско дело.

Дисертацију са свим прилозима предао/ла сам у електронском формату погодном за трајно архивирање.

Моју докторску дисертацију похрањену у Дигитални репозиторијум Универзитета у Београду могу да користе сви који поштују одредбе садржане у одабраном типу лиценце Креативне заједнице (Creative Commons) за коју сам се одлучио.

1. Ауторство

2. Ауторство - некомерцијално

3. Ауторство – некомерцијално – без прераде

4. Ауторство – некомерцијално – делити под истим условима

5. Ауторство – без прераде

6. Ауторство – делити под истим условима

(Молимо да заокружите само једну од шест понуђених лиценци, кратак опис лиценци дат је на полеђини листа).

У Београду, 04. 04. 2013.

Потпис докторанда



1. **Ауторство** - Дозвољавате умножавање, дистрибуцију и јавно саопштавање дела, и прераде, ако се наведе име аутора на начин одређен од стране аутора или даваоца лиценце, чак и у комерцијалне сврхе. Ово је најслободнија од свих лиценци.
2. **Ауторство – некомерцијално.** Дозвољавате умножавање, дистрибуцију и јавно саопштавање дела, и прераде, ако се наведе име аутора на начин одређен од стране аутора или даваоца лиценце. Ова лиценца не дозвољава комерцијалну употребу дела.
3. **Ауторство - некомерцијално – без прераде.** Дозвољавате умножавање, дистрибуцију и јавно саопштавање дела, без промена, преобликовања или употребе дела у свом делу, ако се наведе име аутора на начин одређен од стране аутора или даваоца лиценце. Ова лиценца не дозвољава комерцијалну употребу дела. У односу на све остале лиценце, овом лиценцом се ограничава највећи обим права коришћења дела.
4. **Ауторство - некомерцијално – делити под истим условима.** Дозвољавате умножавање, дистрибуцију и јавно саопштавање дела, и прераде, ако се наведе име аутора на начин одређен од стране аутора или даваоца лиценце и ако се прерада дистрибуира под истом или сличном лиценцом. Ова лиценца не дозвољава комерцијалну употребу дела и прерада.
5. **Ауторство – без прераде.** Дозвољавате умножавање, дистрибуцију и јавно саопштавање дела, без промена, преобликовања или употребе дела у свом делу, ако се наведе име аутора на начин одређен од стране аутора или даваоца лиценце. Ова лиценца дозвољава комерцијалну употребу дела.
6. **Ауторство - делити под истим условима.** Дозвољавате умножавање, дистрибуцију и јавно саопштавање дела, и прераде, ако се наведе име аутора на начин одређен од стране аутора или даваоца лиценце и ако се прерада дистрибуира под истом или сличном лиценцом. Ова лиценца дозвољава комерцијалну употребу дела и прерада. Слична је софтверским лиценцама, односно лиценцама отвореног кода.