

**Универзитет у Београду  
Машински факултет**

**Драган Б. Наупарац**

**Прилог теорији пројектовања  
актуатора за управљање вектором  
потиска  
ракетног мотора  
са флексибилним млазником**

**докторска дисертација**

**Београд, 2016.**

**University of Belgrade**  
**Faculty of Mechanical Engineering**

**Dragan. B.Nauparac**

**Contribution to Designing Theory for the  
Actuator for Rocket Motor Thrust Vector  
Control by Flexible Nozzle**

**Belgrade, 2016.**

Комисија за преглед и одбрану:

Ментор:                    др Марко Милош, в. професор,  
                                  Машински факултет у Београду

Чланови Комисије:     др Милосав Огњановић, редовни  
професор,

Машински факултет у Београду

др Слободан Ступар, редовни професор  
Машински факултет у Београду

професор,                    др Алекдсандар Симоновић, в.

Машински факултет у Београду

професор,                    др Слободан Гвозденовић, редовн

Саобраћајни факултет у Београду

Датум одбране: \_\_\_\_\_

### **Захвалност:**

Ова дисертација представља резултат вишегодишњег истраживачког рада у области пројектовања електрохидрауличних актуационих система. Посебну захвалност дугујем покојном професору др Ђорђу Благојевићу, првом ментору овог рада, чија је идеја била да се истраживања синтетизују на примеру флексибилног млазника за управљање вектором потиска. Ова идеја показала се изузетно корисном, погодном и јединственом за истраживачки рад .

Руковођење радом преузима в. професор др Марко Милош, дугогодишњи сарадник пок. проф. др Ђорђа Благојевића, са посебном пажњом и жељом да овај рад успе, са већим дOMETИМА од оних који су првобитно постављени, са додатном пажњом и саветима зашта му се најдубље захваљујем.

Посебно се захваљујем и в. проф. др Зорану Бојанићу, на низу корисних савета и помоћи око дефинисања експерименталног система. Захвалност дугујем и проф. др Момчилу Милиновићу на низу корисних савета после прегледа ове дисертације.

Захваљујем се и свим колегама који су ми на разне начине помогли да се овај рад успешно заврши, где посебну захвалност на корисним саветима у области моделирања дугујем др Драгану Пршићу, доценту на машинском факултету у Краљеву и Микану Радојевићу за помоћ у програмирању на Ц језику.

Аутор

# **Прилог теорији пројектовања актуатора за управљање вектором потиска ракетног мотора са флексибилним млазником**

## **Апстракт**

Пројектовање актуационих система, посебно електро хидрауличних, предмет је обимних истраживања већ дуги низ година, може се рећи готово већ 70 година, када је почео развој ове области технике за потребе војног ваздухопловства на крају Другог светског рата. Истраживања су посебно интензивна од почетка широке употребе рачунара, када су се створили услови за имплементацију сложених математичких форми алгоритама управљања. Тада су створени услови за имплементацију постојећих алгоритама управљања са претходним искуством у оквиру аналогне технике и развоја великог броја додатних алгоритамиких решења.

У овом раду је развијена специфична методологија инжењерског дизајна актуатора за управљање вектором потиска ракетног мотора са флексибилним млазником на основу теорисјких анализа, са елементима аксиоматског приступа, која треба да олакшава рад пројектанту ове класе актуационих система. Резултат обимне систематизације је припрема теоријске основе да се посебно може разматрати флексибилни млазник као специфична врста структурног оптерећења актуатора, са елементима позиционог и инерцијалног оптерећења. У оквиру истраживачког рада у тези, сукцесивно се разматра опис еластичног оптерећења, избор конфигурације електро хидрауличног актуатора, базни линеарни и нелинеарни математички модели, критеријуми за избор алгоритама управљања и процењује се стварни проблем немоделоване динамике актуационог система.

Кроз претходну теоријску анализу, синтетитизован је алгоритам управљања на основу off-line идентификације, који је проверен на симулатору оптерећења са реалним електро хидрауличним актуатором и дефинисана је конфигурација електро хидрауличног актуатора која решава проблем закретања млазника око тачке везе са актуатором после аксијалног померања флексибилне везе на почетку рада ракетног мотора.

**Кључне речи:** електрохидраулични актуатор, флексибилни млазник, ракетни мотор, управљање вектором потиска

**Научна област:** Машинство

**Ужа научна област:** Ваздухопловство

**UDK 621.453:681.523(043.3)**

# **Contribution to Designing Theory for the Actuator for Rocket Motor Thrust Vector Control by Flexible Nozzle**

## **Abstract**

Design of actuation systems, especially electro hydraulics systems, has been subject of research in the past decades, we can say almost for 70 years, when started the development of this field of technology to the needs of military aviation at the end of the Second World War. Research has particularly intense since the beginning of the widespread use of computers, when they created the conditions for the implementation of complex mathematical algorithms form. Then they created the conditions for the implementation of the existing control algorithms with previous experience within the analogue techniques and the development of a large number of additional algorithmic solutions.

In this thesis we developed a specific methodology for the engineering design of the actuator for thrust vector control of rocket engine with flexible nozzle based on theoretic analysis with elements of the axiomatic approach, which should facilitate the work of the designer of this class of actuating systems. The result of extensive systematization is prepared theoretical basis for consideration of the flexible nozzle as a specific type of structural load of actuators, with elements of positioning type and inertial type loads. Within the research work in the thesis, the focus is the description of elastic load, selection of the configuration of the electro hydraulic actuators, basic linear and nonlinear mathematical models, criteria for the selection of control algorithms and assesses the actual problem of non-modeled dynamics actuating systems.

With previous theoretical analysis, the control algorithm has been synthesized based on off-line identification, which is checked in the simulator with real electro hydraulic actuator and is defined the configuration of electro hydraulic actuator that solves the problem of nozzle swivel around point of connection with an actuator after the axial displacement of flexible connections at rocket motor starting phase.

**Key words:** electro hydraulic actuator, flexible nozzle, rocket engine, thrust vector control

**Scientific discipline:** Mechanical Engineering

**Scientific sub discipline:** Aerospace Engineering

**UDK 621.453:681.523(043.3)**

## Садржај

-Мотивација

-Списак ознака и слика

<b>1.0 Увод</b>	<b>1</b>
1.1 Уводне напомене	1
1.2 Преглед расположивелитературе	5
1.3 Актуатор као класа система аутоматског управљања	14
1.4 Истраживачки циљевидисертације	26
1.5 Преглед садржајадисертације	27
1.6Терминологија	29
<b>2.0 Конструктивни опис актуационог система и објекта управљања</b>	<b>30</b>
2.1 Ракета као објектуправљања	30
2.2 Специфичности конфигурације и концепта електрохидрауличног актуатора флексибилног млазника за управљање вектором потиска ракетног мотора	42
2.3 Конструктивна решења склопа за развођење радног флуида за актуаторски систем флексибилног млазника	49
2.4 Спектар управљачких дејстава за актуациони систем управљања флексибилним млазником	57
<b>3.0 Пројектовање актуатора за управљање вектором потиска ракетног мотора са флексибилним млазником (општи систематизовани приступ)</b>	<b>61</b>
3.1 Избор конструктивног концепта пројектног решења актуатора за флексибилни млазник	61
3.2 Избор концепта и конфигурације електро хидрауличног актуатора	66
3.3 Почетно димензионисање електро хидрауличног актуатора	75
3.4 Напредни, унапређени прорачун електрохидрауличних актуационих система	88

3.5 Математичко моделериње актуационог система-основни линеаризовани математички модел са додавањем статичких нелинеарности	104
3.6 Математичко моделирање актуационог система-основни линеаризовани математички модел са додавањем статичких нелинеарности	118
3.7 Методологија експерименталне верификације пројектованог електрохидрауличног актуатора за управљање флексибилним млазником ракетног мотора	132
3.8 Преглед могућих алгоритама управљања за електро хидраулични актуатор и критеријуми за њихову селекцију	141
3.9 Синтеза управљања за актуациони електрохидраулични систем флексибилног млазника-сисрематизација класичног приступа	164
<b>4.0 Веза између конструктивних карактеристика ракете и актуатора-општи прилаз</b>	<b>190</b>
4.1 Утицај конструкције ракете на избор основних параметра актуатора за управљање и дефиниција механичких карактеристика актуатора у почетној фази пројектовања	190
4.2 Механичка карактеристика хидрауличног актуатора	201
4.3 Утицај другог актуатора	204
4.4 Сопствена фреквенција ракете	209
4.5 Утицај еластичности ракете на структуру управљања	213
<b>5.0 Нови прилози за технологију пројектовања актуационог система за управљање вектором потиска ракетног мотора са флексибилним млазником</b>	<b>218</b>
5.1 Зависност појачања актуационог система од крутости позиционог оптерећења	218
5.2 Утицај начина моделирања нелинеарне статичке карактеристике разводника и оптерећења актуатора на појаву самосциловања у електрохидрауличном актуаторском систему	229
5.3 Принудне осцилације, самоосцилације и комбинација принудних осцилација и самоосциловања	234
5.4 Идентификација и структура математичких модела за актуатор флексибилног млазника-доминантан опис хистерезиса	240
<b>6.0 Симулациони резултати</b>	<b>244</b>



6.1 Увођење у математички модел перформанси рачуанског система	244
6.2 Упоређивање аналогног и дигиталног управљачког система у математичком моделу	245
6.3 Симулација математичког модела актуатора са уведеним крутостима веза актуатора	250
6.4 Симулација посебне актуаторске структуре-развијање са четири нормално затворена вентила	2/2 251
6.5 Симулациона провера повратне спрега по притиску	254
6.6 Симулација актуационог система у Simscape/Simhydraulics опцијама у оквиру Матлаб-а	256
<b>7.0 Експериментални резултати</b>	<b>258</b>
<b>8.0 Закључак и могући правци даљег истраживања</b>	<b>271</b>
<b>9.0 Литература</b>	<b>276</b>
<b>10.0 Прилози</b>	<b>281</b>
10.1 Прилог 1-Опис електрохидрауличног система за експерименталну верификацију управљачких алгоритама	281
10.2 Прилог 2 – Код управљачког софтвера за експерименталну верификацију управљачких алгоритама	294
10.3 Прилог 3-Структура актуатора	295
10.4 Прилог 4-Математички модел актуаторског система са нумерчким вредностима параметара	296
10.5 Прилог-Управљање вектором потиска ракетног мотора	299
10.6 Прилог-Специфичности конструкције флексибилног млазника за управљање вектором потиска ракетног мотора	308
10.7 Прилог-Математичко моделирање електро хидрауличног актуационог система –нелинеарни математички модел-општи систематизовани приступ	320

## Мотивација

Класична и модерна теорија аутоматског управљања, односно теорија линеарних и нелинеарних система поставила је основе које се могу користити у пракси за пројектовање електро хидрауличних актуационих система, са извршним органом, хидрауличним цилиндром. Теорија линеарних и нелинеарних система аутоматског управљања је већ дуже време предмет класичних и посебних курсева на универзитетима.

Пројектовање актуаторских система на бази ове теорије почело је у оквиру пројектовања актуаторских система у ваздухопловству. Један део теорије нелинеарних система, настао је као резултат првобитног проучавања хидрауличних серво система у току и непосредно после Другог светског рата. То је била теорија Луријевих нелинеарних система.

Класична анализа структуре актуаторског система говори да су главне нелинеарности присутне у управљачком органу објекта (цилиндар) и у извршном органу управљачког система (разводник). Други део нелинеарности се односи на такозвано оптерећење актуатора, то су нелинеарности спољњег трења, зазора и хистерезиса, које зависе од типа оптерећења.

Пројектовање актуатора за флексибилни млазник ради управљања вектором потиска ракетног мотора заснива се на претходно наведеним поставкама али са далеко мање потврђених резултата и искустава у пракси и са далеко мање развијеном пројектантском технологијом јавно доступном у односу на класичне актуационе системе у ваздухопловству. Јасно да је разлог томе, одређена масовност пројектовања ових других у односу на оне који су предмет разматрања у овом раду.

Први мотив за анализу теорије пројектовања актуатора за флексибилни млазник је претходно наведена чињеница о релативно малој заступљености у пракси и теорији. Други мотив је специфичност оптерећења, које је структурне природе и карактерише га велики хистерезис и нема аналогије у другим областима.

Поред идеје да се у овом раду систематизује теорија пројектовања актуатора за управљање вектором потиска флексибилним млазником, главни мотив је да се за ову класу актуатора дефинише могућа технологија пројектовања актуаторског система која би обухватила неке посебне приступе анализи и синтези управљања актуаторског система као што је развој принципа описа актуаторског система преко еквивалентне нелинеарности и линеарног дела система. Кроз овакав приступ покушаће да се што јасније постави граница о стално присутном питању, без универзалног одговора, шта треба моделовати а шта не, односно одредити границу између моделоване и немоделоване динамике при пројектовању

електрохидрауличног актуационог система. На такав начин се одређује и ред система у математичком опису а он директно диктира и сложеност алгорита управљања.

**Списак ознака:**

Ознака	Значење
$K_{( )}, k_{( )}$	Коефицијент појачања, тип се дефинише индексом
$T_{( )}$	Временска константа
$Q_{( )}$	Проток хидрауличног уља
$A_{( )}$	Радна површина клипа или клипног прстена или ознака за рад у функцији индекса, површина проточног отвора разводника
$P_{( )}$	Притисак, коначна ознака преко индекса
$V_o, V_1, V_2$	Укупна запремина цилиндра, са индексима 1 и 2, запремине радних комора цилиндра
$M_{( )}, m_{( )}$	Маса, ближе одређење индексом
$\beta_e$	Модул стишљивости хидрауличног уља
$x_v$	Позиција разводног клипа разводника
$x_p, y, x_i$	Позиција клипњаче цилиндра/актуатора
$\dot{x}_p$	Брзина клипњаче цилиндра/актуатора
$\ddot{x}_p, a_{( )}$	Убрзање клипњаче цилиндра/актуатора
$\omega_{( )}$	Кружна фреквенција, зависно од индекса пригушена, непригушена, сопствена
$\Omega_{( )}$	Угаона брзина
$\xi$	Коефицијент пригушења
$B$	Коефицијент вискозног пригушења
$u$	Сигнал управљања
$W_{( )}(s)$	Преносна функција, s домен
$W_{( )}(z)$	Преносна функција, z домен (дискретна)
$F_{( )}$	Сила, тип зависи од индекса

$N(\cdot), \Phi(\cdot)$	Ознака за нелинеарност
$\alpha, \beta$	Коефицијенти или углови
$Z(s), Z(t)$	Поремећај, комплексни, временски домен
$z$	Координата положаја клипњаче у оси клипњаче
$v_{(i)}$	Брзина
$e(t), e(s), e(k), \varepsilon(t)$	Грешка
$\varepsilon$	Деформација
$M_{(i)}$	Момент, коначна ознака зависи од индекса
$J, I$	Момент инерције
$\sigma_{(i)}$	Нормални напон
$\tau_{(i)}$	Тангенцијални напон
$\mu$	Поасонов коефицијент
$G_{(i)}$	Модул клизања, дефинисан индексом
$\gamma$	Угао клизања
$\delta_{(i)}$	Угао закретања млазника
$R_{(i)}, r_{(i)}$	Радијуси, комплетна ознака преко индекса
$\chi_1, \chi_2$	Углови еластичне везе
$P_{(i)}$	Сила потиска
$P$	Пропорционално дејство
$D$	Диференцијално дејство
$I$	Интегрално дејство
$a_n, a_{n-1}, \dots, a_1, b_m, b_{m-1}, b_1, b_o$	Коефицијенти једначине улаз - излаз
$t_{(i)}$	Време
$t_e$	Дебљина
$C_{(i)}^{(i)}$	Аеродинамички коефицијенти
$g$	Убрзање силе земљине теже

$c_{(i)}$	Коефицијент крутости
$C_{(i)}$	Идеална еластична сила
$\theta, \mathcal{G}$	Означавање угловног положаја ракете, вектор потиска, вектор брзине
$q(a)$	Коефицијент хармонијске линеаризације
$X(a, \omega, x^0), Y(a, \omega, x^0)$	Реални и комплексни део полинома у функцији од коефицијента хармонјске линеаризације, кружне фреквенције и почетног услова
$Q(s)$	Реални део полинома
$i * R(s)$	Комплексни део полинома
$0_{(L)}$	Индекс за оптерећење
$0_z$	Индекс за хидраулично напајање

### *Списак слика:*

1. Слика 1.1-Структурни елементи пројектовања
2. Слика 1.2-Структура актуатора као система аутоматског управљања
3. Слика 1.3-Основни структурни дијаграм актуатора као система аутоматског управљања
4. Слика 1.4-Основни блок дијаграм електро хидрауличног актуатора
5. Слика 1.5-лево, појачање по притиску за разводник са нултим преклопом, десно појачање по притиску разводник са позитивним преклопом
6. Слика 1.6-Структура конфигурације електро хидрауличног актуатора по сили
7. Слика 1.7-Структурирање актуатора преко блок дијаграма
8. Слика 2.1-Структурна шема управљања ракетом
9. Слика 2.2-Структурна шема управљања ракетом један канал
10. Слика 2.3-Аеродинамичке шеме за управљање ракетом
11. Слика 2.4 Технологија управљања вектором потиска
12. Слика 2.5-Ракета V2 управљање аеродинамичким површинама и вектором потиска
13. Слика 2.6-Актуациони систем
14. Слика 2.7-Уздужно кретање ракете
15. Слика 2.8-Структурни дијаграм управљања нападним углом и углом нагиба трајекторије ракете
16. Слика 2.9-Затворена структура актуаторског система, линеаризовани модел, трећег реда
17. Слика 2.10-Основна структура управљања ракетом
18. Слика 2.11-Структура ракете као објекта управљања
19. Слика 2.12-Преглед погонских варијанти за извор хидрауличне енергије у актуационом систему
20. Слика 2.13-Конфигурација две тандем клипнооксијалне пумпе са двопозиционим регулатором притиска
21. Слика 2.14-Стандардне конфигурације разводника и помоћних вентила за електрохидраулични актуатор
22. Слика 2.15-Преглед основних технологија развођења радног флуида под притиском
23. Слика 2.16-Класична конструкција серво разводника
24. Слика 2.17-Класична конструкција серво разводника са додатим пиезо претварачем
25. Слика 2.18-Главне особине разводника, хистерезис у коју је укључена поновљивост, симетрија и линеарност
26. Слика 2.19-Симулациони модел у Матлаб
27. Слика 2.20-Резултати симулација технологије развођења са  $4 \frac{2}{2}$  разводника са седиштем, 1 Hz, 0.005 м
28. Слика 2.21-Резултати симулација технологије развођења са  $4 \frac{2}{2}$  разводника са седиштем, 2 Hz, 0.001 мм
29. Слика 2.22 Спектар управљачког сигналаж
30. Слика 2.23 Моментно оптерећење од флексибилног млазника
31. Слика 2.24 Стварне вредности путање хидрауличног актуатора (пример)
32. Слика 2.25 Дискретне вредности позиције електро хидрауличног актуатора
33. Слика 2.26 Реални управљачки сигнал-тестирање у технологији HILS
34. Слика 2.27 Реални управљачки сигнал-снимак из реалне летне мисије
35. Слика 3.1-Апликативни критеријум конструктивних концепата актуатора према критеријуму снага-фреквенција оптерећења
36. Слика 3.2-Основна шема, серворазводник и пумпа констатног протока
37. Слика 3.3-Основна шема, серворазводник и пумпа променљивог протока и хидраулични акумулатор
38. Слика 3.4-Конфигурација актуаторског система, напајање из хидрауличног акумулатора

39. Слика 3.5-Електро хидраулични актуатор са 4 разводника 2/2 седишног типа
40. Слика 3.6-Електро хидраулични актуатор са диференцијалним управљањем по сили
41. Слика 3.7-Електро хидраулични актуатор двоканална конфигурација
42. Слика 3.8-Електро хидраулични актуатор са пнеуматском погоном пумпе
43. Слика 3.9-Електро хидраулични актуатор са вентилом за компензацију закретања млазника
44. Слика 3.10-Управљање флексибилним млазником у једној равни са два цилиндра
45. Слика 3.11-Конструкција флексибилног млазника са једним цилиндром и једном мерном полугом за позицију у истој равни
46. Слика 3.12-Елементи крутости извршног органа актуатора
47. Слика 3.13-Кинематика закретања флексибилног млазника
48. Слика 3.14-Симулациони модел динамике притиска ради провере димензија цилиндра
49. Слика 3.15-Профил притиска у коморама хидрауличног цилиндра када цилиндар није добро димензионисан
50. Слика 3.16-Профил притиска у коморама хидрауличног цилиндра када цилиндар добро димензионисан
51. Слика 3.17-Рачунска шема за избор параметара актуаторског система са пригушним управљањем
52. Слика 3.18-График решења задатка избора параметара електрохидрауличног актуатора са пригушним управљањем и констатним притиском
53. Слика 3.19-Општи блок дијаграм електрохидрауличног актуатора за моделирање
54. Слика 3.20-Блок дијаграм електрохидрауличног актуатора (разводник и цилиндар) са инерцијалном масом као оптерећењем
55. Слика 3.21-Блок дијаграм актуатора са моделованом крутошћу веза са ослонцем и оптерећењем
56. Слика 3.22-Основни блок дијаграм актуационог система са инерцијалним и позиционим оптерећењем
57. Слика 3.23-Структурни дијаграм система са засићењем по протоку
58. Слика 3.24-Основно структурно коло са нелинеарностима типа засићења по брзини и убрзању
59. Слика 3.25- Структурни дијаграм актуатора са нелинеарношћу типа засићења по притиску
60. Слика 3.26 Дијаграм који раздваја линеарну област система са делом где се манифестује нелинеарна природа система, по основу засићења по брзини и убрзању
61. Слика 3.27 Структурни дијаграм актуатора (еквивалентан дијаграм после хармонијске линеаризације) са нелинеарношћу типа засићења по притиску
62. Слика 3.28- Експериментално понашање еластичног материјала снимљено на динамичкој кидалици
63. Слика 3.29-Дијаграм сила ход после моделирања са LOOK UP функцијом
64. Слика 3.30-Симулациони блок дијаграм са LOOK UP функцијом
65. Слика 3.31-Simscape-Translation hard stop функција
66. Слика 3.32-Симулациони блок дијаграм са Translation hard stop функцијом
67. Слика 3.33-Оптерећење актуатора-концентрисано на крају клипњаче
68. Слика 3.34-Оптерећење актуатора-редукована маса-полужни механизам
69. Слика 3.35 -Оптерећење актуатора-редукована структурна маса
70. Слика 3.36 -Оптерећење актуатора-редукована структурна маса
71. Слика 3.37-Рачунски модел оптерећења на смицање
72. Слика 3.38-Модел чистог смићања-на примеру квадратне призме
73. Слика 3.39-Структурни дијаграм оптерећења актуатора од флексибилног млазника
74. Слика 3.40-Почетни избор алгоритма за синтезу управљања према критеријуму сопствених фреквенција
75. Слика 3.38-Електро хидраулични актуатор са линеарним мотором (цилиндар)
76. Слика 3.39- Структура feedforward управљања, горњи дијаграм по поремећају, доњи дијаграм по управљачкој величини
77. Слика 3.40-Симулирање оптерећења по интезитету без механичког инерцијалног дела

78. Слика 3.41-Симулирање оптерећења по интезитету са механичким инерцијалним оптерећењем
79. Слика 3.42 а-Систем за проверавање крутости електро хидрауличног актуатора
80. Слика 3.42 б-Систем за проверу актуатора са константним или променљивим оптерећењем
81. Слика 3.43 Клатно са еластичним везама
82. Слика 3.44 Клатно са еластичним ослањањем
83. Слика 3.45 Блок дијаграм математичког модела симулатора оптерећења са хидрауличким цилиндром
84. Слика 3.46-Бонд граф симулатора оптерећења-механичко клатно са еластичним ослонцима
85. Слика 3.47-Одзиви за типичне случајеве моделирања неидеалне опруге
86. Слика 3.48-Комбинација математичког модела у Matlab-у (simscape-Hydraulics) и модела у Бонд графу
87. Слика 3.49-Почетни избор алгоритма за синтезу управљања према критеријуму сопствених фреквенција
88. Слика 3.50-Електро хидраулични актуатор са линеарним мотором (цилиндар)
89. Слика 3.51 Структура feedforward управљања, горњи дијаграм по поремећају, доњи дијаграм по управљачкој величини
90. Слика 3.52-Конфигурација адаптивног алгоритма са референтним моделом
91. Слика 3.53-Промена фазне карактеристике актуатора у функцији од пропусног опсега при компензацији
92. Слика 3.54-Различити положаји контролера у актуаторској структури
93. Слика 3.55-Управљање у простору стања-систем трећег реда
94. Слика 3.56-Блок дијаграм математичког модела актуационог система са feedforward компензацијом и моделовањем флексибилног оптерећења
95. Слика 3.57-Одзив система са ПИД управљањем, дијаграм лево и ПИД управљањем и feedforward компензацијом дијаграм десно
96. Слика 3.58-Структурна шема алгоритма променљиве структуре са клизном равни
97. Слика 3.59-Структурна шема алгоритма на бази Фази логике
98. Слика 3.60-Структурна шема система са диференцијалним законом управљања
99. Слика 3.61-Структурна шема система са интегралним законом управљања
100. Слика 3.62-Структурна шема са алгоритмом управљања
101. Слика 3.63-Структурна шема контуре убрзања
102. Слика 3.64- Структура актуационог система са еквивалентном нелинеарношћу система
103. Слика 3.65- Структура актуационог система са компензацијом померања
104. Слика 3.66-Структурна шема електрохидрауличног актуационог система са микропроцесорском имплементацијом модела система за мала померања
105. Слика 3.67-ГМК дијаграм
106. Слика 3.68-Одзив система са П управљањем
107. Слика 3.69-Бод и Најквистов дијаграм преносне функције отвореног кола актуатора, типично за гранично стабилан систем (интегрално понашање система)
108. Слика 3.70 Основна симулациона структура неоптерећеног актуатора
109. Слика 3.71-Промена одзива при промени коефицијента цурења
110. Слика 3.72-Симулинк модел са положајем Д-диференцијалног дејства у главној грани
111. Слика 3.73 Симулинк модел са положајем Д-диференцијалног дејства у повратној грани
112. Слика 3.74 Управљање са Feedforward чланом , дијаграм лево, 1Hz, 0.005 m и дијаграм десно, 2Hz 0.005 m
113. Слика 3.75-Сличности ПИД (ПИ, ПД и ПИД) управљачке структуре са компензацијом у с равни
114. Слика 3.76-Структура симулационог модела оптерећеног актуатора са П управљањем ( $K_p=2.5$ )
115. Слика 3.77-Одзив актуатора и структуре на задату позицију од 0.005m



116. Слика 3.78-Профил брзине приликом позиционирања хидрауличног актуатора за мала померања
117. Слика 3.79-Синусни одзив усклађеног система,  $3\text{Hz}$   $0.005\text{ m}$
118. Слика 3.80 Синусни одзив неусклађеног система
119. Слика 3.81-Структура управљачког алгоритма са дијагностиком исправности актуационог система
120. Слика 3.82-Симулациони модел и одзив за управљање у простору стања са ПД алгоритмом дијаграм лево и П алгоритам слика десно
121. Слика 3.83-Општа структура електро-хидрауличног система
122. Слика 3.84-Структурни дијаграм управљања актуатора-каскадна структура
123. Слика 3.85-Симулациона структура за управљање актуатором-каскадна конфигурација
124. Слика 3.86-Одзив система за каскадну конфигурацију управљања на синусну промену жељене вредности позиције
125. Слика 3.87-Карактер управљања за каскадну конфигурацију управљања на синусну промену жељене вредности позиције
126. Слика 4.1 Структурна шема управљања кретањем ракете по нападном углу са јединичном динамиком актуационог система
127. Слика 4.2 Структурна шема управљања ракетом по нападном углу са идеалним приказом нелинеарне природе актуационог система
128. Слика 4.3 Структурна шема управљања ракетом са унетом нелинеарном и интегралном природом актуационог система
129. Слика 4.4 Структурна шема са система за стабилизацију са филтером за хармонике од еластичности ракете
130. Слика 4.5-Типски дијаграм за управљачку силу
131. Слика 4.6-Параметри управљачке силе
132. Слика 4.7-Графички приказ динамике управљачког дејства
133. Слика 4.9-Механичка карактеристика актуатора у функцији од хидрауличног концепта
134. Слика 4.10-Општи модел хидрауличног дела актуатора
135. Слика 4.11 а Структурни дијаграм рада два актуатора у пару
136. Слика 4.11 б-Блок дијаграм рада два актуатора у пару
137. Слика 4.12-Референтна тачка за положај флексибилног млазника
138. Слика 4.13-Маргине међусобног утицаја актуатора у функцији међусобног положаја
139. Слика 4.14-Структурна шема система за идентификацију  $K_d$
140. Слика 4.15-Оптерећен актуатор, структура 1
141. Слика 4.16-Оптерећен актуатор, структура 2
142. Слика 4.18-Блок дијаграм-утицај структуре ракете на актуаторски систем
143. Слика 4.19-Блок дијаграм детаљних еластичних интеракција ракета-управљачки актуациони систем
144. Слика 5.1-Стварни карактер флексибилног оптерећења
145. Слика 5.2-Зависност појачања од крутости флексибилног оптерећења
146. Слика 5.3 Утицај позиционог оптерећења на фреквентну карактеристику отвореног кола актуатора ( $G_1, K=120, G_2, K=250, G_3, K=420$ )
147. Слика 5.4-График функције  $\beta = \beta(\alpha)$
148. Слика 5.5-График функције  $\beta = \beta(\alpha_1)$
149. Слика 5.6-Актуаторски систем са засићењем по управљању-електрични сигнал
150. Слика 5.7-Актуаторски систем са засићењем по протоку
151. Слика 5.8-Оптерећење актуатора је изложено принудним осцилација
152. Слика 5.9-Осцилације у актуаторском систему «пеглају» нелинеарност
153. Слика 6.1-Бодеев дијаграм и одзив минимално фазног (слика горе) и неминимално фазног линеарног система (слика доле)
154. Слика 6.2-Симилинк модел актуационог система са дискретним ( $Z$  трансформација) и аналогним описом регулатора
155. Слика 6.3-Одзиви за различиту резолуцију дискретизације по нивоу

156. Слика 6.4-Симулинк модел актуаторског система где је управљачки алгоритам приказан диференцијалним једначинама
157. Слика 6.5-Симулациони одзив при периоди одабирања 0.005 с за различите резолуције дискретизације по нивоу
158. Слика 6.6-Симулација неоптерећеног актуационог система, са узетим у обзир крутостима веза цилиндра
159. Слика 6.7 –Структура симулационог модела где је функција развођења остварена са четири 2/2 нормално затворена вентила са седиштем
160. Слика 6.8 горе-Неоптерећен хидраулични актуатор, одскочна улазна функција 2 мм, доле неоптерећен хидраулични актуатор, синусна улазна функција, амплитуда 2 мм, фреквенција 1 Hz
161. Слика 6.9 горе-Неоптерећен хидраулични актуатор, синусна улазна функција, амплитуда 2 мм, фреквенција 1 Hz, доле оптерећен хидраулични актуатор, синусна улазна функција, амплитуда 2 мм, фреквенција 1 Hz
162. Слика 6.10-Оптерећен хидраулични актуатор, синусна улазна функција, амплитуда 2 мм, фреквенција 2 Hz
163. Слика 6.11 –Симулациони модел са повратном спрегом по притиску
164. Слика 6.11 –Симулациони модел са повратном спрегом по притиску
165. Слика 6.12-Резултати симулације са повратном спрегом по притиску
166. Слика 6.13-Структура симулационог модела актуационог система у Sim-hydraulics-у
167. Слика 6.14-Одзив актуаторског система на синусни улаз, 0.003 мм, 2Hz и П управљање и дијаграм сила-ход
168. Слика 6.15-Одзив актуаторског система на одскочни улаз, 0.003 мм, 2Hz и П управљање и дијаграм **сила-ход**
169. Слика 7.1- ARMAX-стандардна структура
170. Слика 7.2-Експериментално снимљене карактеристике разводника, управ. 0.01%
171. Слика 7.3--Експериментално снимљене карактеристике разводника, управ. 0.01%
172. Слика 7.4-Отворено коло управљања, оптерећење модел оптерећења флексибилним млазником
173. Слика 7.5 Управљање по позицији, пропорционално са и без процењеним офсетом појачања по притиску
174. Слика 7.6 Повратна спрега по сили (директно мерење силе) и повратна спрега по сили (мерење разлике притисака)
175. Слика 7.7 –Хистерзис управљање-разлика притиска сила, отворено и затворено коло (десно)
176. Слика 7.8 –Хистерзис управљање-позиција, затворено коло
177. Слика 7.9 –Хистерезис позиција-сила, затворено коло, лево са и десно без инерцијалног оптерећења
178. Слика 7.10 –Хистерезис управљање-позиција, затворено коло, лево са и десно без инерцијалног оптерећења
179. Слика 10.1-Блок дијаграм система за експерименталну проверу
180. Слика 10.2-Функционална шема система за експерименталну проверу
181. Слика 10.3-Хидраулични цилиндар-склоп, извршни део електрохидрауличног актуационог система
182. Слика 10.4-Склоп система за тестирање
183. Слика 10.5a-Поглед са предње стране на комплетан систем актуатор, хидраулички агрегат и механички симулатор инерцијалног оптерећења и оптерећења на смицање
184. Слика 10.5b- Поглед из угла на комплетан систем актуатор, хидраулички агрегат и механички симулатор инерцијалног оптерећења и оптерећења на смицање
185. Слика 10.5c- Поглед на склоп механичког дела за задавање оптерећења и актуатора
186. Слика 10.5d- Поглед на склоп механичког дела за задавање оптерећења и актуатора са бочне стране
187. Слика 10.5e- Поглед на склоп механичког дела за задавање оптерећења и актуатора са задње бочне стране

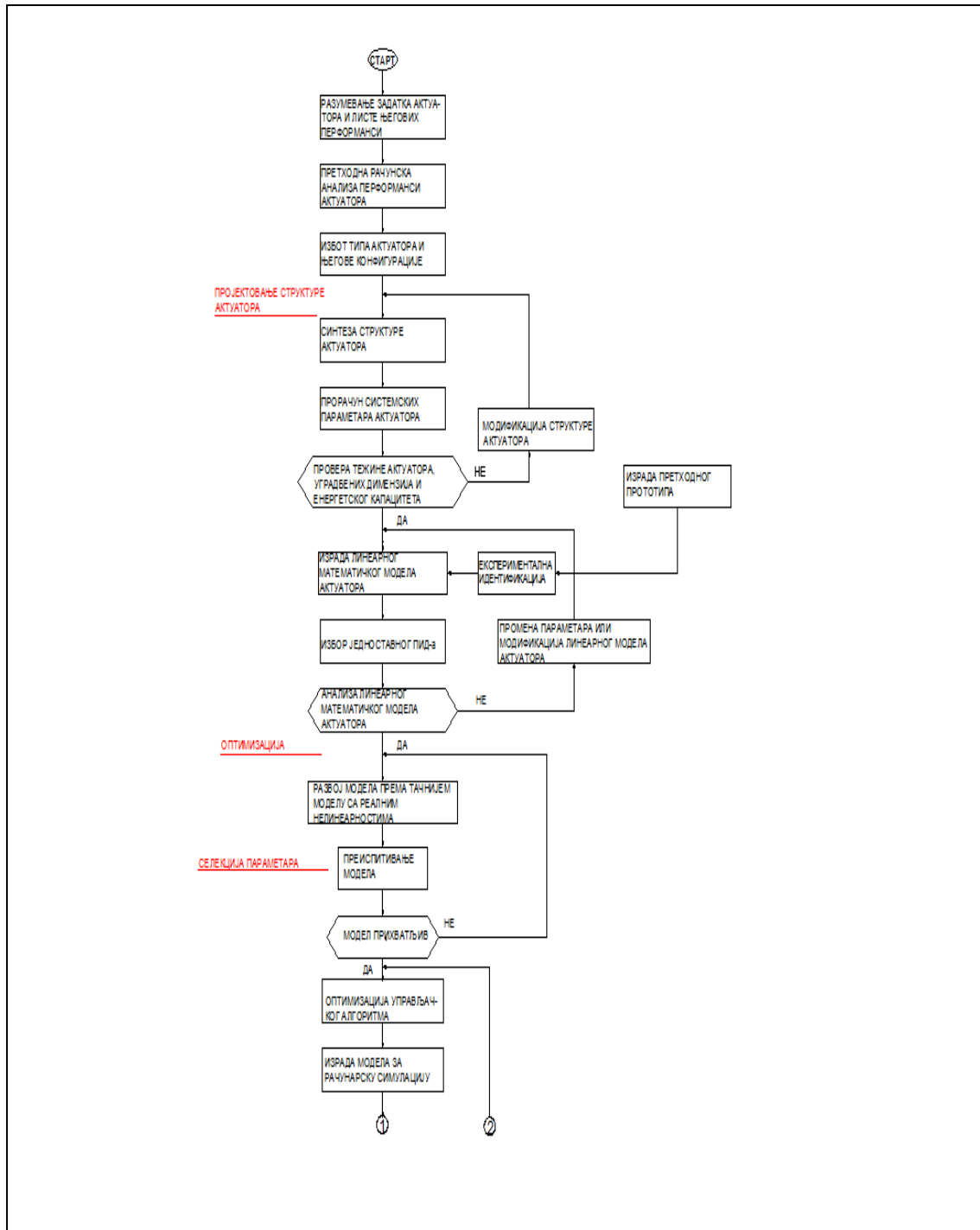
- 188.Слика 10.5 f- Поглед на склоп механичког дела за задавање оптерећења и актуатора
- 189.Слика 10.5g- Поглед на серво разводник који је уграђен на подножну плочу у склопу хидрауличког агрегата
- 190.. Слика 10.5 h-Поглед на хидраулички агрегат са предње стране
- 191.Слика 10.6-Цртеж гуменог блока за симулацију флексибилног оптерећења
- 192.Слика 10.7-Фотографија гуменог блока за симулацију флексибилног оптерећења-оптерећење на смицање
- 193.Слика 10.8-Испитивање управљања вектором потиска за ракетни мотор Р80, ракета Вега
- 194.Слика 10.9-Структура пројектног решења актуатора
- 195.Слика 10.10 Основне динамичке карактеристике разводника и пресек разводника
- 196.Слика 10.11-Управљање вектором потиска основна принципско-технолошка подела
- 197.Слика 10.12-Конструктивна извођења гасних крмила која се могу налазити у дивергентном делу млазника или изван њега
- 198.Слика 10.13-Конструктивна решења управљања вектором потиска флексибилним млазником
- 199.Слика 10.14-Конструкција ракетног мотора на чврсто гориво
- 200.Слика 10.15-Ефективни рад ракетног мотора
- 201.Слика 10.16-Карактер измене управљачке силе при раду вишестепене ракете
- 202.Слика 10.17-Горе лево конструкција са ламинарним лежајем, горе десно конструкција са ротирајућом куглом
- 203.Слика 10.18-Положаји центра ротације у односу на карактер флексибилне везе-конструкција са ламинарним лежајем
- 204.Слика 10.19-Конструкција флексибилног млазника са две флексибилне везе односно серво дејством
- 205.Слика 10.20-Флексибилни млазник са два актуатора чија флексибилна веза омогућава закретање у две нормалне равни
- 206.Слика 10.21а-Флексибилни млазник са два актуатора чија флексибилна веза омогућава закретање у две нормалне равни
- 207.Слика 10.21б-Флексибилна веза у векторисаном положају
- 208.Слика 10.22-Функционална шема актуаторске конфигурације са вентилом за раскрућивање актуатора-стање после постизања притиска у комори ракетног мотора
- 209.Слика 2.23-Конструкција флексибилног млазника са два цилиндра у једној равни
- 210.Слика 10.24-Ракетни мотор са четири млазнице
- 211.Слика 10.25-Конструкција са карданском везом млазника и коморе ракетног мотора
- 212.Слика 10.26-Конструкција са хидропрстеном
- 213.Слика 10.27-Конструкција са ламинарним лежајем
- 214.Слика 10.28-Конструкција са силфоном
- 215.Слика 10.29-Склоп разводник хидраулични цилиндар

## 1.1 Увод

Наслов овог рада је **Прилог теорији пројектовања актуатора за управљање вектором потиска ракетног мотора са флексибилним млазником**. Поставља се циљ да се критички размотри основна општа теорија пројектовања актуационих система и сагледају могућности за њено проширење или модификовање за дефинисани објекат којим је потребно управљати, а у овом раду то је флексибилни млазник ракетног мотора. Ово се ради на примеру електро хидрауличног актуационог система, што значи да је енергетски потенцијал актуационог система флуид под притиском. Прво питање које се намеће за уводно разматрање је шта све обухвата теорија пројектовања, где она почиње и где се она завршава. Дефинише се следећи приступ. Пројектовање почиње дефинисањем пројектног задатка. После пројектног задатка следи: више пројектних анализа које доводе до тога да се може синтетизовати структура актуатора, која обухвата концепцију и конфигурацију. Дефинисана структура омогућава следећи корак у пројектовању, а то је састављање математичких описа односно модела. На основу математичких описа спроводе се сви потребни прорачуни. На основу прорачуна ради се анализа да ли су испуњени захтеви из пројектног задатка, односно да ли постоји радна способност анализираних структуре актуатора. Ако постоји, почиње пројектовање у ужем смислу, а то је израда техничке документације. После тога и даље егзистира процес пројектовања али поново у ширем смислу, а то је израда технологије за израду делова актуатора, израда технологије монтаже до технологије испитивања, сертификације и валидације (испитивања на век, и слично). Ако су прорачуни показали да нису испуњени захтеви из пројектног задатка, није постигнута радна способност претходно усвојене структуре актуатора, која се сматра прихватљивим, проверава се да ли се ситуација може поправити преко расположивих унапређења у управљању пре свега алгоритамским решењима. Ако нема могућности да се параметри (захтеви из пројектног задатка) остваре у оквиру варирања технологије управљања актуатором неизбежно је приступити промени пројектног задатка. На слици 1.1 описане су претходно разматране фазе пројектовања детаљно. Промена пројектног задатка није популарна, и у истраживачком смислу као алтернатива промени пројектног задатка се стално отварају нова пројектантска решења, највише кроз технологију управљања која је интегрални део актуаторског система. Сваки актуаторски систем у току свог пројектовања не може да игнорише захтеве за сигурним и поузданим радом као и захтеве дизајна везаних за уградњу и тежину. У сваком случају ово се не разматра у оним фазама пројектовања које се разматрају директно у овом раду али потребно је ради општег приступа нагласити следеће: Сигуран и поуздан рад, значи да је конструктивно решење тако дефинисано да нема ризика од отказа типа лома или проблема стабилности радних параметара. Ово друго се може укључити и у део дефиниције која уводи категорију: „Инхерентно добро пројектован актуаторски систем“. Овај други услов се испуњава пре свега кроз врло прецизно, свеобухватно димензионисање конфигурације актуаторског система и делимично кроз алгоритамско решење за управљање, док први услов зависи од статичких и динамичких прорачуна конструкције и усвојених степена сигурности како би се избегао отказ типа лома. Веродостојност прорачуна се обезбеђује адекватним степенима сигурности, који су усвојени на основу експерименталних испитивања.

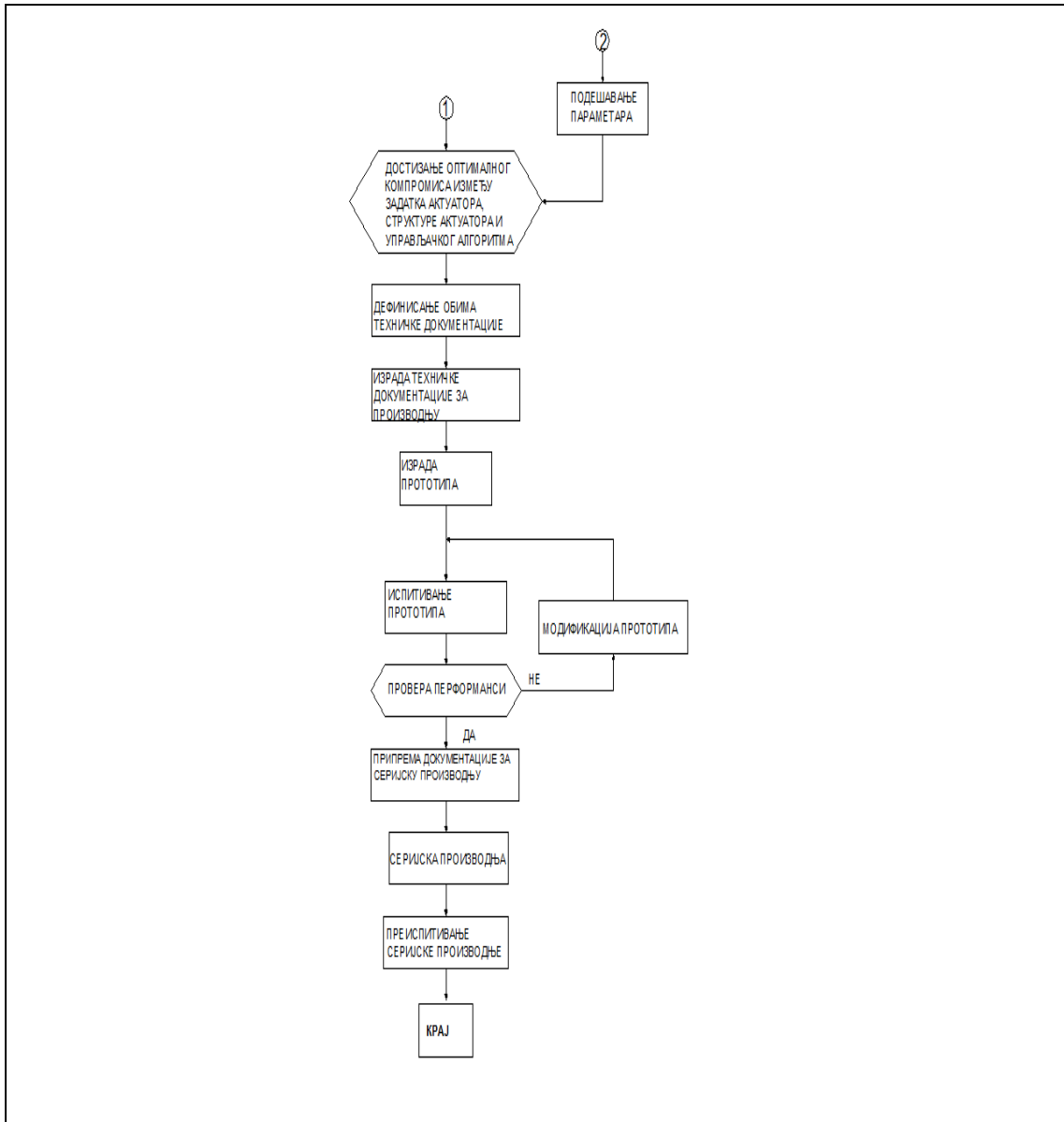
## Прилог теорији пројектовања актуатора за управљање вектором потиска ракетног мотора са флексибилним млазником

У оквиру претходно наведеног у раду се посебно фокусира теорија пројектовања за део процеса пројектовања, после усвајања структуре актуатора, хидраулични цилиндар управљан електро хидрауличним серво разводником са неконвенцијалним алтернативама до фазе провере радне способности што је услов да се може радити техничка документација за актуаторски систем.



Слика 1.1-Структурни елементи пројектовања-први део

## Прилог теорији пројектовања актуатора за управљање вектором потиска ракетног мотора са флексибилним млазником



Слика 1.1-Структурни елементи пројектовања-други део

У оквиру претходне слике 1.1, даје се детаљни графички приказ комплетне технологије пројектовања електрохидраулиних актуационих система.

У оквиру увода сагледава се уkratко и развој првих ракетних мотора на чврсто гориво. Не улазећи у дефинисање ко је проналазач ракетног мотора на чврсто гориво, може се сматрати да су совјетске невођене ракете БМ13 и БМ8, прве ракете на чврсто гориво у масовној употреби од 1941. године. Почетком педесетих година прошлог века урађена су прва ракетна горива са примесам алуминијума. Крајем шездесетих година освојена је технологија ливења чврстих горива у коморе ракетних мотора. Почетком седамдесетих година освојене су конструкције ракетних мотора са више млазника. У истом временском периоду

## Прилог теорији пројектовања актуатора за управљање вектором потиска ракетног мотора са флексибилним млазником

освајају се и композитни материјали за израду коморе ракетног мотора на бази стакло-угљо-пластике. Средином седамдесетих освојен је млазник типа дефлектор, конструкција које се може описати као телескопска, што значи да смо коаксијално добили више млазника и знатно повећали пречник млазника без знатног повећања тежине. Ова конструкција покретног млазника је прва коју је покренуо актуациони систем. Затим долази замена композита на бази стакло-пластике новим композитима на бази угљеника, што је знатно утицало на израду најважнијих делова ракетног мотора. Крај седамдесетих, је период када почиње и израда ракетних мотора на чврсто гориво великих габарита као алтернатива моторима на течено гориво за ракете носаче. Почетак осамдесетих година прошлог века се сматра периодом када почиње значајна употреба флексибилних млазника за управљање вектором потиска. (ране седамдесетде године се сматрају почетком развоја) **У претходно наведеном, кроз десет чињеница, изузетно кратким приказом историје развоја ракетних мотора на чврсто гориво који је преузет из литературе [1] види се да су проналасци покретног и флексибилног млазника у десет најзначајних догађаја у историји развоја ракетних мотора на чврсто гориво.**

## 1.2 Преглед литературе

Пројектовање актуатора за управљање вектором потиска флексибилним млазником у доступној литератури није обрађено целовито. Аутору овог рада није познато да постоји монографија која је ову тематику целовито обрадила, или није доступна информација да тако нешто постоји. Аутору, такође није познато да постоји уџбеник који третира ову проблематику детаљно. Једноставно, у оквиру других примарних разматрања, ова проблематика се анализира секундарно, најчешће ради комплетности излагања, најчешће у уџбеницима и монографијама где су предмет разматрања ракетни мотори на чврсто гориво.

Једино што постоји као интегрална целина која се примарно бави проблематиком пројектовања актуатора за управљање вектором потиска флексибилним млазником су два извештаја НАСЕ, **NASA SPACE VEHICLE DESIGN CRITERIA-SP 8114 SOLID ROCKET THRUST VECTOR CONTROL** и **NASA LIQUID ROCKET ACTUATORS AND OPERATIONS-SP 8090** која су у овом тренутку доступна. Али и овде проблематика није обрађена целовито у смислу комплетне технологије пројектовања актуационог система, јер нема разматрања управљачких алгоритама, математичког моделовања, избора серво разводника и слично. Постоји и више патетних пријава које се на свој начин баве проблематиком пројектовања актуатора, односно ради се о специфичним пројектним детаљима, чији су аутори хтели да их заштите као своју интелектуалну својину.

У завршном периоду израде овог рада, постао је доступан је и велики број радова (преко 20) у виду разних билтена који су настали из европског пројекта **Vega Launch System**, који дају потпуне информације о овом пројекту и где уз богате илустрације изведених система имамо на располагању доста практичних (квалитативних и квантитативних) информација о овој вишестепеној ракети и њеним моторима који имају флексибилне млазнике. То су мотори **P 80** и **Zafiro 40**. Ради се о реалним подацима. Такође на Интернету доступан је и одређен број докумената који нису ауторизовани, већ представљају делове неких других докумената, **Chapter 3-Design of flexible seal of large solid rocket motor, Chapter 1-Introduction**.

Треба поменути и следећа три рада, која су објављена у периоду 2011-2013: **Stability analysis using a coupled model of TVC actuator controlling and Structural dynamics of a Launch Vehicle, 4<sup>th</sup> European Conference For Aerospace Sciences** аутора из Француске, у коме се делимично приказује структура управљачког система за актуатор, **Dynamic Analysis and Identification of the Movable nozzle used on the Brazilian Satellite Launcher, 22<sup>th</sup> International Congress of Mechanical Engineering, 2013, Brazil** групе аутора из Бразила и **Finite Element Analysis of a Solid Booster Flexible Bearing Joint for Thrust Vector Control, Aerotecnica Missili & Spacio, The Journal of Aerospace Science, Technology and System**, групе аутора из Италије. Други рад се бави проблемом идентификације динамике флексибилне везе покретног млазника док трећи рад исту проблематику разматра технологијом моделовања и прорачуна коришћењем коначних елемента у одговарајућем софтверском алату.



## Прилог теорији пројектовања актуатора за управљање вектором потиска ракетног мотора са флексибилним млазником

Треба поменути и три нешто старија рада која се баве тестирањем и пројектовањем електро механичких актуатора за флексибилни млазник:

1. **Development and Test of Electromechanical Actuators for Thrust Vector Control, Rae Ann Weir and John R. Cowan, NASA-MSFC**
2. **Design of High Power Electromechanical Actuator for Thrust vector Control, J.R. Cowan and W. N. Myers, National Aeronautics and Space administration, Marshal Space Flight Center**
3. **D.E. Schinstock, D.A. Scott, T.A.Haskew, Modeling and Estimation of Electromechanical Thrust Vector Control of Rocket Engine.**

Даља анализа распложиве литературе ради се на основу следеће две групе претпоставки.

Прва група се заснива на следећим претпоставкама:

1. Предмет анализе је пројектовање електро хидрауличног актуатора за управљање вектором потиска ракетног мотора флексибилним млазником.
2. Ракетни мотор је са чврстим горивом.
3. Веза између коморе ракетног мотора и млазника је флексибилна, што условљава низ специфичности а посебно се наглашава еластична веза актуатора са ослонцем на структури ракете и са флексибилном структуром која представља позиционо оптерећење за актуатор.

Друга група претпоставки се односи на чињенице које нас интересују из доступне литературе у оквиру прве групе претпоставки:

1. Какав математички модел је довољан за ваљану анализу актуационог система.
2. У смислу прве чињенице је питање где је граница између моделоване и немоделоване динамике, и колико успешно ову другу можемо компензовати управљачким алгоритмом.
3. Када можемо рећи „Изабрали смо прави алгоритам управљања“.
4. Оптимални концепт и конфигурација електро хидрауличног система за референтни ракетни мотор са флексибилним млазником.
5. Да ли у почетним фазама избора алгоритма управљања предност дати алгоритму на бази математичког модела актуационог система или алгоритму који минимално користи податке или у опште не користи податке из математичког модела актуационог система.

Прва група претпоставки ближе одређује објекат управљања, док разматрање друге групе чињеница је предмет овог рада и истраживања у литератури. Иницијалне одговоре на ова питања тражимо у литератури која обрађује електро хидрауличне актуационе системе:

**Уџбеничка литература:** (преглед и навођење по редоследу је лично виђење аутора овог рада)

Као први уџбеник већина аутора наводи **Hydraulic control systems**, Meritt, 1967. Овај уџбеник је поставио основе модерне хидраулике, пре свега у техници

## Прилог теорији пројектовања актуатора за управљање вектором потиска ракетног мотора са флексибилним млазником

математичког моделирања, нелинерани модели и њихова линеаризација за стандардне компоненте електро хидрауличних система. У овом раду се користе ова достигнућа.

Други уџбеник је **Controlling Electrohydraulic systems**, Wayne R. Anderson, 1988, који први почиње да се бави алгоритамским решењима за електро хидрауличне серво системе односно комплетним структурним решењима за актуационе системе. Поред тога анализирају се и алтернативна конструктивна решења за одређене компоненте електро хидрауличних система, као што је серворазводник са два клипа. У овом раду се разматра применљивост неких општих решења из овог уџбеника у теорији пројектовања електро хидрауличног актуатора за управљање вектором потиска флексибилним млазником.

Трећи уџбеник је **Hydraulic Servo-systems, Modelling, Identification and control**, Mohieddine Jelali, Andreas Kroll, Springer, 2002, који први наглашава потребу да се проблематика математичког моделирања пребаци и на поље идентификације електро хидрауличних система, то јест експериментално одређивање најважнијих параметара електро хидрауличног система, односно његовог математичког модела. На основу ових приступа, проблем немоделоване динамике система, може бити решен експерименталном идентификацијом параметара. Неки од критеријума из овог уџбеника користе се и у овом раду.

Четврти уџбеник је **Control strategies for dynamic systems**, John H. Lumkers, 2002., разматра проблематику рачунарске имплементације управљачких алгоритама за електро хидрауличне актуационе системе и алтернативне конфигурације актуационих система, које разводник типа клип-кошуљица са четири разводне ивице замењује са четири разводника 2/2 са седиштем.

Као посебну уџбеничку литературу треба издвојити и низ ауторизованих предавања са универзитета Linköpings, IET, Karl-Erik Rydberg, Fluid and mechanical Engineering Systems из Шведске, која се разликују од остале уџбеничке литературе врло модерним и свеобухватним приступом. Најзначајнија предавања су: **Hydraulic Systems with Load Dynamics, Controller Design for Hydraulics Servo Systems** и **Feedbacks in Hydraulic Servo Systems**. У друго наведеном предавању дат је структурни дијаграм оптималног електро хидрауличног актуационог система.

На основу овог кратког прегледа уџбеничке литературе, јасно је да нема уџбеника који је интегрално обрадио све елементе пројектовања електро хидрауличног актуатора за различите примене па тако и за управљање вектором потиска флексибионим млазником.

### Радови:

Област електро хидрауличних серво система је дуго времена била предмет великог броја радова од стручних до оригиналних научних. Једноставно може се рећи да је период од 1980. године па до 1998-2000. године био златни период када је настао највећи број радова који су свеобухватно са свих аспеката разматрали

### 1.2 Преглед литературе

## Прилог теорији пројектовања актуатора за управљање вектором потиска ракетног мотора са флексибилним млазником

електро хидрауличне системе. Електро хидраулични системи су анализирани кроз готово све елементе теорије и праксе система аутоматског управљања. Оцена је аутора овог рада, да су ова разматрања била врло значајна и као таква су се задржавала на поједим детаљима и елементима теорије и праксе аутоматског управљања али нису добила следственост која би их интегрисала у једну ширу и свеобухватнију целину која би резултирала елементима интегралне и универзалне теорије пројектовања електро хидрауличних серво актуационих система. (У овом раду је то покушано кроз десет репрезентативних радова, који се посебно анализирају у табели која следи.) Ово је можда релативно успешно постигнуто у билтенима које је издавала америчка компанија MOOG у којима се дефинишу препоруке за пројектовање електро хидрауличних система. Компанија MOOG је светски лидер у области комерцијалних електро хидрауличних актуационих система, и оваква јавно доступна литература је очекивана од компаније чији је оснивач и власник пронашао и патентирао електро хидраулични серво разводник.

У радовима новијег датума, задњих десет година већа пажња се посвећује моделовању сложених оптерећења, раздвајању математичких модела на посебне целине, алгоритам управљања, склоп цилиндар и серво разводник и модел оптерећења са механичким делом објекта кога покреће електро хидраулични серво актуациони систем. Поред тога, после детаљне анализе применљивости ПИД алгоритма, ускладника, управљачких система у простору стања са и без обсервера, алгоритма управљања на бази ширинске модулације, адаптивних система и система са променљивом структуром и клизним радним режимом, који карактеришу период од 1980. године па до 1998-2000. године, у задњих десет година анализирају се нелинеарни управљачки алгоритми и њихова робусност за широки спектар оптерећења. У оквиру решења са нелинеарним алгоритмима управљања посебно се анализирају следећи:

1. Фази алгоритми управљања
2. Линеаризација у повратној спреси
3. Каскадни алгоритми управљања
4. Алгоритми променљиве структуре са клизним радним режимом.
5. Пратећи алгоритми управљања.

У новијем периоду независно од појаве пратећих алгоритма управљања на бази једног посебног новог концепта у теорији аутоматског управљања, а то је концепт праћења посебно се у литератури инсистира на особини праћења, односно праћењу стварне вредности одговарајуће жељене вредности. Концепт праћења се у овом раду посебно не разматра. Аутор овог рада се у својој магистартској тези (1994) међу првима бавио са практичном реализацијом пратећих алгоритма управљања. У каснијој фази развоја примена у пракси овог алгоритма издвојени су и следећи концепти пратећег управљања:

1. Концепт праћења у њапуновском смислу
2. Концепт практичног праћења
3. Концепт праћења к-тог реда
4. Концепт природно пратећег управљања

### 1.2 Преглед литературе

## Прилог теорији пројектовања актуатора за управљање вектором потиска ракетног мотора са флексибилним млазником

Задњи концепт природног праћења је био најкомплетнији пре свега што се могло говорити о времену достиживости, односно тренутку од када ће стварна вредност пратити жељену вредност и начина приласка стварне вредности жељеној, то јест да у тачки почетка праћења, имамо једнаке прве изводе, што говори о идеалном глатком, прилазу стварне вредности жељеној вредности. У периоду од 1994. године можемо рећи да је објављен одређен број радова о примени пратећег управљања за електрохидрауличне системе у оквиру концепата који су претходно наведени. Они су у списку литературе посебно наведени.

Велики број радова разматра проблематику рачунарске имплементације алгоритама управљања за реалне електро хидрауличне серво системе. У сваком случају то је проблематика примене  $Z$  трансформације, имплементације диференцијалних једначина и примена би-ленеране трансформације независно од изабраног алгоритамошког решења. Овај рад се бави и овом проблематиком као посебном целином у теорији пројектовања актуатора за управљање вектором потиска.

У литератури се електро хидраулични серво системи све више посматрају као системи у којима се конфигурационо и концептуално мора обезбедити такозвана ограничена радна способност или како је у оригиналу на енглеском језичком подручју зову „**Fault tolerant control of electro hydraulic actuators**“. Јасно је да за актуаторе који се користе за команде лета, а једна од таквих је и управљање вектором потиска да је ово неизбежна тема из разлога што је отказ у фази лета фаталан и да се он по дефиницији мора избећи. Овакав захтев не постоји када електро хидраулични серво систем управља роботом, механизмом на некој машини или испитном уређају.

У Табели 1 која следи, аутор по свом избору наводи 10 радова који приказују највреднија достигнућа у разматрању проблематике електро хидрауличног серво актуатора и у исто време имају потенцијал да чине целину у смислу да дају теоријску основу свеобухватне основне теорије пројектовања електро хидрауличног актуатора који се може применити за управљање вектором потиска флексибилним млазником.

Табела 1

	Пун назив рада	Аутори	Година	Напомена
1.	System Identification and Modeling of a High Performance Hydraulic Actuator	Benoit Boulet, Laeeque Daneshmend, Vincent Hayward, Chafye Nemri	-	Дата је једна процедура пројектовања, са посебним разматрањем пропусног опсега актуатора по сили у отвореном и затвореном колу.
2.	Programmable Servo Control-A New Approach	I M Whiting, N P Cottell	1994.	Најновије базе структуре управљања и проблематика ограничења сигнала у систему

### 1.2 Преглед литературе

**Прилог теорији пројектовања актуатора за управљање вектором потиска ракетног мотора са флексибилним млазником**

3.	Electro-hydraulic System Design: Making the right system choices	Peter Nachtwey	2010.	Анализа електро хидрауличних система са свих аспеката везаних за имплементацију управљачких алгоритама
4.	Friction Models in Servo drives	Ivo Pazdera	-	Детаљан преглед различитих модела трења
5.	Limit Cycle Analysis For Electro-Hydraulic Systems with Friction	Ying-Jeh Huang, Yuan jay Wang	2002.	Показује се утицај трења на појаву граничног круга у систему, што значи појаву стабилних или нестабилних аутоосцилација
6.	Non-linearities in flight control system	C.Fielding P.Flux	2003.	Дат је преглед свих значајних нелинеарности за хидрауличне актуаторе у ваздухопловству, даје се предлог њиховог разматрања и смањења утицаја на динамичко понашање система
7.	Special Features of Correcting Hydraulic Actuators on Flight Vehicle control	A.V.Mesropyan	2009.	Систематично наведене све могуће корекције, односно поправке у конструкцији електрохидрауличног актуатора
8.	Hardware-in-the loop simulator for research on the fault tolerant control of electro hydraulic actuators in flight control application	Mark Karpenko, Nariman Sepehri	2009.	Отворено је питање симулације отказа и посматра се како изабрани односно моделовани систем реагује на отказ одређеног дела конфигурације
9.	Comparison of Linear Controllers for A Hydraulic Servo System	T.Andersen, M.Hansen, H. Pedersen, F.Conrad	2005.	У раду се пореде различите варијанте имплементације линеарних закона управљања на основу експерименталних и симулационих резултата
10.	Experiments and Simulations on the Nonlinear Control of a Hydraulic Servo system	Garret A. Sohl, James E. Bobrow	1999.	Рад приказује теоријски приступ синтезе управљања преко Љапуновљеве функције, разматра се стабилност и

**Прилог теорији пројектовања актуатора за управљање вектором потиска ракетног мотора са флексибилним млазником**

				особина праћења за случај нелинеарног описа електрохидрауличног система
--	--	--	--	---

**Посебна литература:**

Овде би на првом месту навео зборник радова из 2000. године са семинара из Хамбурга, **Proceedings-1 FPNI-PhD Symposium, Technical University of Hamburg Institute for Aircraft Systems Engineering**, на коме су учествовали сви актуелни докторанти из области електро хидрауличних система укључујући и актуационе системе за ваздухопловство. Вредност радова у овом зборнику представља чињеница да је на једном месту обједињено у одређеном тренутку (септембар 2000. године) све у свету што је било предмет истраживања кроз израду докторских теза у области електро хидрауличних актуационих система. Велики број радова је приказао истраживања алгоритамских решења за управљање стандардних електро хидрауличних актуаторских конфигурација. Приметно је да су нелинеарни алгоритми знатно заступљенији од линеарних и линеаризованих решења. Овде треба посебно поменути следеће радове због изузетне актуелности:

1. **An Accurate tracking control of an Electro-pneumatic actuator**, Havier Brun, Daniel Thomasset, Eric Bidaeux and Serge Scavadra

У овом раду је дата табела која квалитативно пореди линеарни и нелинеарни алгоритам управљања преко више критеријума, као што су: статичка грешка, брзинска грешка, комплексност управљања, комплексност синтезе, број давача и слично. Сличан резултат аутор очекује и у овом раду.

2. **A Cascade Strategy Using Nonlinear Control Techniques Applied To A Hydraulic Actuator**, Mauro A.B. Cunha, Raul Guenther, Edson R. De Pieri and Victor J. De Negri.

Коришћени су структурно нелинеарни алгоритми управљања. Дати су прелози за дефинисање управљачког дејства за различите конфигурације управљачког алгоритма у оквиру каскадног приступа организације управљачког алгоритма.

3. **Design And Sensitivity Analysis Of A Single-Stage Electro-Hydraulic Servo Valve**, Saikat Mookherjee,

Дат је комплетан математички модел новог типа серво разводника који ће полако потиснути из примене традиционалну конструкцију која се разматра у овом раду, двостепени са механичком повратном спегом. Урађена је и анализа примене и једноставног серво разводника директног дејства за разматрани актуациони систем.

Пракса окупљања на скуповима овог типа је настављена сваке три године од 2000 године, али први скуп је био посебно значајан.

Потребно је поменути и монографију **Aircraft Flight Control Actuation System Design**, аутори Е.Т. Raymond и С.С. Chenoweth, која је штампана 1993. године и према мишљењу аутора овог рада представља до сада најкомплетнији преглед актуационих система у ваздухопловству са свих аспеката. Преглед развоја актуационих система дат је историјски али је поменута практично свака конструкција која је реализована у пракси што представља и највећу вредност ове монографије. У поглављу 4.0 о електричним командама лета, поглавље 4.1

## Прилог теорији пројектовања актуатора за управљање вектором потиска ракетног мотора са флексибилним млазником

посвећено је актуаторима за управљачке системе на ракетама. У овој монографији нема посебног поглавља о актуаторима за управљање флексибилним млазником ракетног мотора.

Совјетска (руска) литература је до 1990. године имала неколико сјајних класичних уџбеника и монографија које у општем смислу баве електро хидрауличним системима и у табели која следи они се наводе:

Табела 2

	Пун назив уџбеника-монографије	Аутори	Година	Напомена
1.	Проектирование следящих гидравлических приводов летательных аппаратов	Н.С. Гармын	1981.	Москва, Машиностроение
2.	Динамика и Регулирование Гидро-и Пневмосистем	Д.Н. Попов	1977	Москва, Машиностроение
3.	Динамика Быстродействующего гидравлического привода	Н.С. Гармын, Ю. К. Жданов А. Л. Клишамин	1979	Москва, Машиностроение

Од новије руске литературе посебно бих издвојио уџбеник **„Системы управления рулями самолетов“** И.С. Шумилова, 2009. МГТУ, Москва, где је систематизована теорија и пракса пројектовања актуационих система за путничке авионе у широком временском периоду.

### Докторске тезе:

Свакако да посебну класу распложиве литературе чине докторске тезе из области електрохидрауличних актуационих систему. У списку литературе цитирано је више докторских теза које разматрају проблематику електрохидрауличних актуационих система. Овде се не наводе посебно, али у сваком случају садрже значајне резултате. Углавном су предмети докторских теза предлози нових алгоритама за управљање електрохидрауличним актуационим системима.

Доступна литература из области пројектовања електро хидрауличних актуационих система у ваздухопловној техници је обимна и драгоцену за разумевање трендова у пројектовању зависно од класа управљачких органа. Аутор овог рада није пронашао међу доступним докторским тезама ни један рад који је приказао неки од могућих приступа пројектовању електро хидрауличног актуационог система за управљање вектором потиска ракетног мотора флексибилним млазником. Пронађена је само једна теза са Московског авиационог института, која се бави енергетским делом електро хидрауличног актуационог система, **„Разработка методики расчета газогидравлического источника питания рулевого привода управления поворотном соплом путем посторения эпюры сопряжения располагаемой и потребной мощностей“**. 2010, Прилипов Алексей Валерьевич То је додатни мотив за анализу ове проблематике.

### Литература на српском језику:

#### 1.2 Преглед литературе

## Прилог теорији пројектовања актуатора за управљање вектором потиска ракетног мотора са флексибилним млазником

Можемо рећи да постоји у јако скромном обиму, што је и релно очекивати обзиром да је проблематика пројектовања актуатора за управљање вектором потиска флексибилним млазником пре свега повезана са специјалним приступом.

Треба свакако поменути монографију, **„Пројектовање ракета“, 2005., Божидара Вучуревића**, која је као комплетан рад једног од најистакнутијих стручњака из праксе у Србији обухватила и проблематику управљања вектором потиска ракетног мотора флексибилним млазником у одређеном обиму, који је довољан за разумевање ове проблематике али без разматрања актуационих система за флексибилни млазник. Делимично, проблематика која је значајна за овај рад, на српском језику, третира се и у уџбенику за четврту годину војне академије, **„Горива за ракетни погон“, 1999., Милоша Чолаковића** и у краткој прегледној монографији, **„Основи ракетне технике“, 2005, Матеје Анђелковића**. Посебно треба нагласити и уџбеник, **„Аутоматско вођење објеката у простору“, проф. др Стевице Граовца** који се користи од 2005. године на Електротехничком факултету у Београду за истоимени предмет на дипломским и последипломским студијама. У овом уџбенику доступне су основне информације о актуационим системима као интегралним деловима аутопилота као управљачког хардвера, пре свега на ракетама. Историјски, прва монографија на српском језику која се бави проблематиком актуационих система на ракетама је **„Динамика система вођења и управљања пројектила“,** коју је написао **проф. др Србољуб Миновић**, први пут објављена 1970. године на Машинском факултету у Београду, значајна је пре свега што је на основу руске литературе презентovala технике увођења нелинеарности у математичке моделе актуационих система. На крају посебно је важно поменути и уџбеник за војну академију, **Ракетни системи вођење и управљање,** аутора **Слободана Тирнанића** и **Слободана Бурсаћа**. Њена посебна вредност је што најкомплетније описује ракету као објекат аутоматског управљања у оквиру расположиве литературе на српском језику. Треба поменути и уџбеник проф. др **Момчила Милиновића, Основи пројектовања ракета и лансера, Поглавља из пројектовања лансера,** Машински факултет Београд, 2002.

### Допунска литература:

Овде се наводи литература која се бави флексибилним оптерећењем актуатора а односи се на област примене актуатора као заштитних елемената при структурним оптерећењима и у роботизици.

**-Dynamic Force Control with Hydraulic Actuators using Added Compliance and Displacement Compensation Mettupayam V. Sivaselvan, University Colorado, Boulder, Andrei M. Reinhorn, Xiaoyun Shao and Scot Weinreber, University at Buffalo, October 2008.**

**-Displacement Control of Flexible Structures using Electro Hydraulic Servo Actuators, N. Harris McClamroch, Department of Aerospace Engineering, University of Michigan, Center for Robotics and Integrated Manufacturing, June, 1983**



### 1. 3 Актуатор као класа система аутоматског управљања

Актуатор је у техници широк појам и има више тумачења. Једно од најједноставнијих се наводи без превода на српски језик и гласи *drive and control technology*. Оваква дефиниција је готово и интуитивно јасна, јер говори о склопу који нешто може да покрене, а у техници су то разни механизми. Али то покретање односно кретање мора бити под дејством неког управљања да би имало смисла кретање механизма. Значи актуатор је механички систем који конверзијом енергије из једног облика у други може да доведе до кретања одређеног механизма које, да би имало смисла, мора одговарати жељеном потребном кретању тог механизма, односно управљање то мора да обезбеди.

Актуатор је интегрални и независни систем, чија је улазна величина жељено кретање, а излазна величина стварно кретање, то јест позиција извршног органа актуатора. Актуатор се посматра са механизмом који га оптерећује и тек тада чини одређену класу система аутоматског управљања.

Актуатор по свој природи је позициони систем а они су са дуге стране у оквиру теорије система аутоматског управљања, системи са интегралним дејством које доминантно одређује природу и перформансе овог система аутоматског управљања.

Када имамо систем са интегралним понашањем, оно што је посебно важно у теорији аутоматског управљања је да се не може одредити за номиналну позицију номинално управљање. Ово је врло важна особина која има значаја пре свега у селекцији могућих алгоритама управљања. У теорији аутоматског управљања развијен је велики број алгоритама који захтевају познавање номиналног управљања и захтевају да је оно различито од нуле. [2]

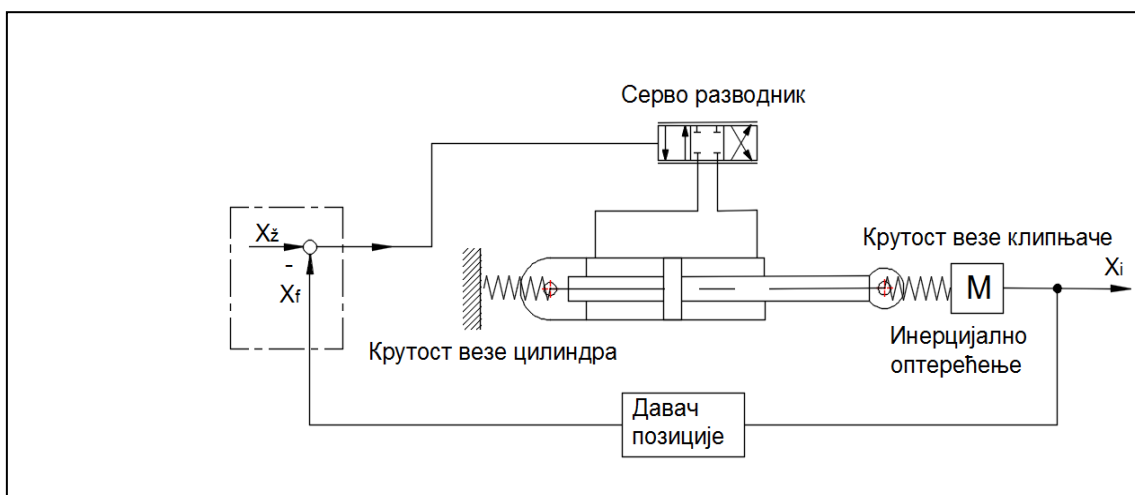
Узмимо на пример брзински систем. Једноставно за неку брзину цилиндра или хидро мотора, може се одредити управљање то јест проток радног флуида у јединици времена. Приликом позиционирања истих, хидрауличног цилиндра или ротационог хидрауличног мотора, да би он стао у некој позицији, управљање престаје са дејством када треба да стане клипњача цилиндра, значи номинално управљање је тада нула док код брзинског система постоји проток, значи управљање има ненулту вредност када је постигнута номинална брзина. Ово се односи и на електро механичке и на пнеуматске актуаторе као позиционе системи.

Поред претходне дефиниције да је актуаторски склоп позициони механизам, он може бити и управљан по брзини, сили и убрзању. Чињеница је да са две величине не можемо да управљамо истовремено. Управљање по брзини се најчешће захтева код механизма где има више цилиндара-актуатора и тражи се њихово синхронно кретање, између почетног и крајњег положаја механизма. Управљање по убрзању је доста ретко и највише се користи код платформи за земљотресна испитивања, јер је ту захтевана улазна вредност за актуациони систем убрзање.

## Прилог теорији пројектовања актуатора за управљање вектором потиска ракетног мотора са флексибилним млазником

Управљање по сили није еквивалентно управљању по убрзању, пре свега и због карактера давача са којим се затвара повратна спрега у актуатору. Давачи силе су најчешће интегрисани на крају клипњаче цилиндра пре везе са оптерећењем. У овом поглављу прво ћемо урадити основну анализу актуатора као позиционог система а затим као система за управљање по сили. Касније у овом раду показаће се у оквиру конфигурације каскадног управљања да је могуће у унутрашњој контури управљати по сили а у спољашњој по позицији, пошто су промене силе далеко брже од промене позиције при структурном оптерећењу. Ово се може схватити као опција где је повратна спрега по сили стабилизирајућа за спољну повратну спрегу по позицији. Као посебан резултат овог рада, у посебног поглављу о конфигурацији актуационог система за флексибилни млазник, дефинисаће се конфигурација где је спољашња повратна спрега по сили, али се компензација вршити и по брзини и по позицији, пошто ће давач силе мерити чисту силу која се предаје структури а давач позиције позицију клипњаче актуатора а не одговарајуће тачке на структури (конструктивно није могуће такву тачку обезбедити) да буде стварни репрезент померања.

Конфигурација актуатора се посматра у ужем и ширем смислу. У ужем смислу то је извршни део управљачког система, за класу електро хидрауличних актуатора то је разводник и извршни део објекта система, то је хидраулични цилиндар. Процесни или радни део објекта је механизам који покреће актуатор, даље ћемо овај део означавати као оптерећење актуатора. Корекциони орган управљачког система може бити у различитим извођењима али у овом раду има смисла говорити само о рачунарском блоку, који обавља и функцију задавача жељеног кретања, сабирача, јер рачуна грешку између жељене излазне позиције и стварне позиције и генерише интезитет управљачког сигнала који је улазна величина за електронски појачивач серво разводника. Из претходног је јасно да је у основној конфигурацији актуатора, структура приказана на слици 1.2.



Слика 1.2-Структура актуатора као система аутоматског управљања

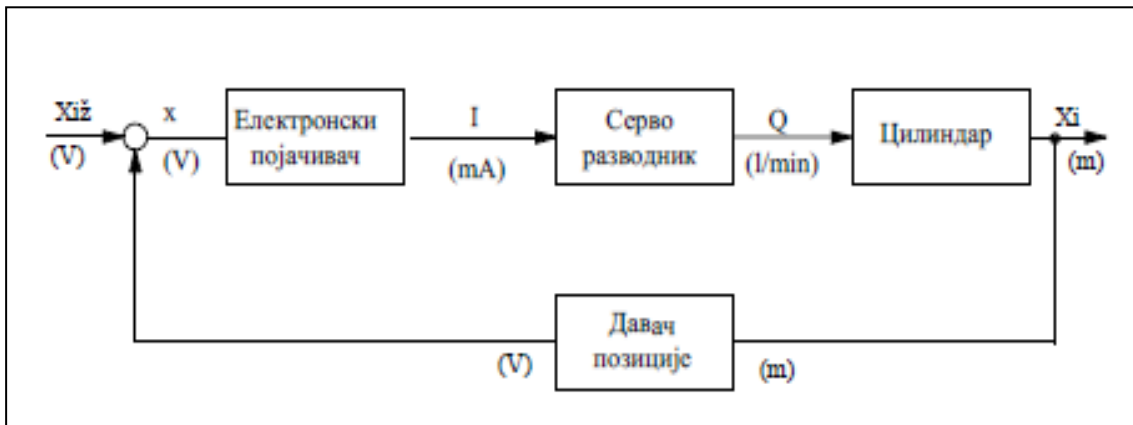
На основу претходног следи да је актуатор по свој природи позициони систем, у теорији аутоматског управљања систем са повратном спрегом по позицији. Та повратна спрега је обавезна да би се могло остварити позиционирање, а могуће су

### 1. 3 Актуатор као класа система аутоматског управљања

## Прилог теорији пројектовања актуатора за управљање вектором потиска ракетног мотора са флексибилним млазником

и друге повратне спреге, по сили, брзини и слично како би се поправило динамичко понашање излазног дела актуатора. У овом раду се посебно разматра проблематика и других повратних спрега и то у поглављу који говори о синтези управљачког система.

Структурно постојање повратне спреге у конфигурацији актуатора говори о томе да важе све специфичности које су везане за постојање повратне спреге у систему. Ово нам даје могућност да на почетку анализе система исти посматрамо као отворено коло система аутоматског управљања. Појачање које се одреди на бази анализе отвореног кола, почетна је вредност појачања за затворен систем са повратном спрегом и то је врло важна предност коју пружа чињеница о постојању повратне спреге.



Слика 1.3-Основни структурни дијаграм актуатора као система аутоматског управљања

Актуатор као позициони систем припада класи система аутоматског управљања са једним улазом и једним излазом. Основна, почетна анализа једног електро хидрауличног актуатора као система аутоматског управљања заснива се на сопственим фреквенцијама сваког дела разматране конфигурације актуатора: серворазводник, цилиндар, контролер, сензор позиције, веза цилиндра са окружењем. Универзално разматрање нас упућује на чињеницу да су две најниже сопствене фреквенције у систему присутне у комбинацији цилиндар-оптерећење и серво разводник. У поглављу о почетном и напредном димензионисању електрохидрауличног актуатора, ова проблематика се посебно разматра. Поред тога јасан је приступ да елементи конфигурације који имају за ред величине већу сопствену фреквенцију од најнижих у систему са сигурношћу не утичу на динамику актуатора. Такав елемент конфигурације је давач позиције, други елемент је рачунар, који се увек бира тако да буде за ред величине бржи од најниже сопствене фреквенције елемента у конфигурацији актуатора. Утицај брзине рада рачунара се у овом раду посебно анализира и симулационо.

Претходно наведено, омогућава нам да у генералном разматрању актуатора дефинишемо следећи приступ одређивања појачања отвореног кола. Појачање отвореног кола нам показује колико ћемо брзо процесирати грешку у позицији

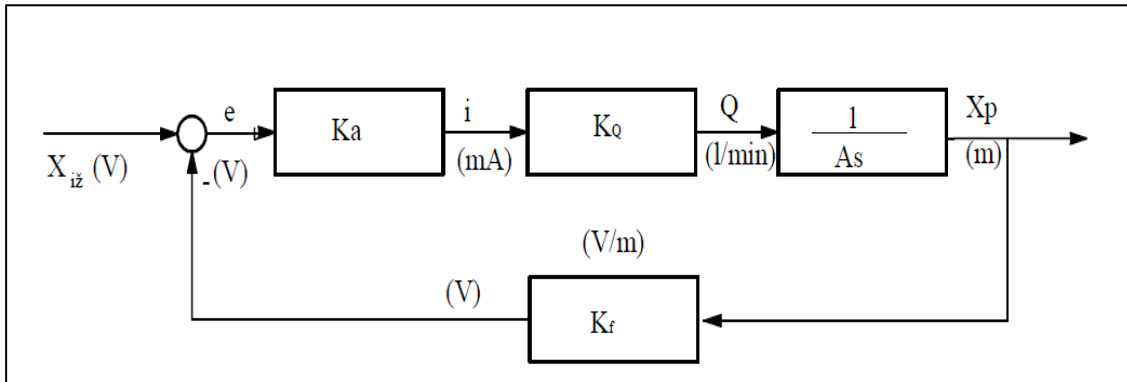
**Прилог теорији пројектовања актуатора за управљање вектором потиска ракетног мотора са флексибилним млазником**

између жељеног и стварног излаза актуационог система и може се на почетку дефинисати [3] као:

$$K_{open1} = 0.1\omega_{cil\_opt\_nat\_freq} \quad (1.1)$$

$$K_{open2} = 0.4\omega_{servorazvalnik\_nat\_freq} \quad (1.2)$$

На основу блок дијаграма на слици 1.4 који је најпростија могућа структура за електро хидраулични актуатор добијамо:



**Слика 1.4-Основни блок дијаграм електро хидрауличног актуатора**

$$K_{open} = \frac{K_a K_q K_f}{A} (1/s) \quad (1.3)$$

$$K_a = \frac{AK_{open}}{K_q K_f} (amp / volt) \quad (1.4)$$

Поступајући даље за најједноставнију структуру електро хидрауличног актуатора добојамо:

$$\frac{X_i(s)}{X_{iž}(s)} = \frac{G(s)}{1 + G(s)H(s)} \quad (1.5)$$

$$G(s) = \frac{K_a K_q}{As} \quad (1.6)$$

$$H(s) = K_f \quad (1.7)$$

**Прилог теорији пројектовања актуатора за управљање вектором потиска ракетног мотора са флексибилним млазником**

$$\frac{X_i(s)}{X_{iz}(s)} = \frac{\frac{1}{K_f}}{\frac{A}{K_a K_q K_f} s + 1} = \frac{\frac{1}{K_f}}{\frac{1}{K_{open}} s + 1} = \frac{1}{Ts + 1} \quad (1.8)$$

$$T = \frac{1}{K_{open}} \text{sec} \quad (1.9)$$

$$\frac{X_i(s)}{X_{iz}(s)} = \frac{1}{Ts + 1} \quad (1.10)$$

$$X_i = \frac{1}{K_f} X_{iz} \quad (1.11)$$

Претходно представља најједноставнији математички опис електро хидрауличног актуатора као система првог реда. Овде је најједноставније могуће описан позициони систем аутоматског управљања, какав је електро хидраулични актуатор.

Дејство поремећајне силе и њен утицај на тачност позиционирања:

$$I = K_a K_f x_{err} \quad (1.12)$$

$$X_{iz} = 0 \quad (1.13)$$

$$I = K_a K_f x_{doz} \quad (1.14)$$

$$x_{doz\_max} = \frac{0.05 I_N}{K_a K_f} \quad (1.15)$$

$$I_{ser\_raz} = 0.02 * I_N * \frac{F_{opter.}}{A * P_N} \quad (1.16)$$

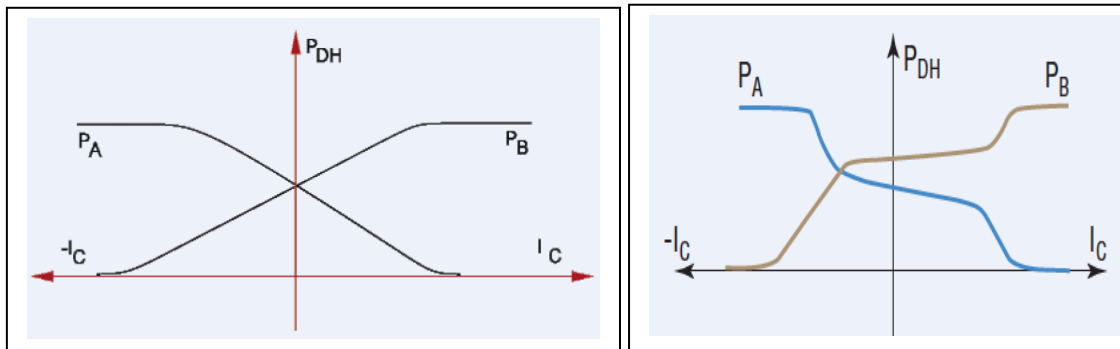
$$x_{doz\_max\_opter.} = \frac{I_{ser\_raz}}{K_a K_f} \quad (1.17)$$

$$x_{doz\_max\_opter.} = 0.02 * \left[ \frac{I_N}{K_a K_f} \right] * \left[ \frac{F_{opter.}}{A * P_N} \right] \quad (1.18)$$

Као што се види, већ после 2% управљачког сигнала, грешка позиције постаје функција спољњег оптерећења. Ово је важан детаљ, јер претходна вредност од 2% је у зависности од појачања по притиску серво разводника. Појачање по

**Прилог теорији пројектовања актуатора за управљање вектором потиска ракетног мотора са флексибилним млазником**

притиску је после појачања по протоку најважнија особина разводника која директно утиче на карактеристике актуационог система. Појачање по притиску показује колико је потребно померити разводни клип, да притисак на излазу из разводника достигне вредност напојног. Ова особина разводника зависи од преклопа разводних ивица, радијалног зазора као и геометријских карактеристика разводног клипа. На слици 1.5 је приказан карактер промене појачања по притиску у случају разводника са нултим и позитивним преклопом.



**Слика 1.5-лево, појачање по притиску за разводник са нултим преклопом, десно појачање по притиску разводник са позитивним преклопом**

Претходно отвара питање да ли се са клипним разводником може управљати и позицијом и силом на хидрауличном цилиндру. Као што видимо, електрохидраулични актуатор је по својој природи брзински, тако му је понашање у отвореном колу. Када затворимо повратну спрегу по позицији он постаје позициони, али када затворимо повратну спрегу и по сили он постаје управљан и по сили, ако повратна спrega нема стабилизирајућу улогу. На основу претходне особине разводника, а то је појачање по притиску, јасно је да управљачким сигнаlima до 2 % можемо клипним разводницима да управљамо по сили. То има смисла ако је проток у том случају довољан да компензује померање клипњаче хидрауличног цилиндра. Ако није, мора се поћи од израза за модул стишљивости у цилиндру, и укључењем површне цилиндра, доћи до формуле која се може искористити за управљање по сили. Значи ово је алтернативна опција управљању преко пропорционалних вентила за ограничење притиска.

Промена притиска у цилиндру у цилиндру мења запремину према (1.19):

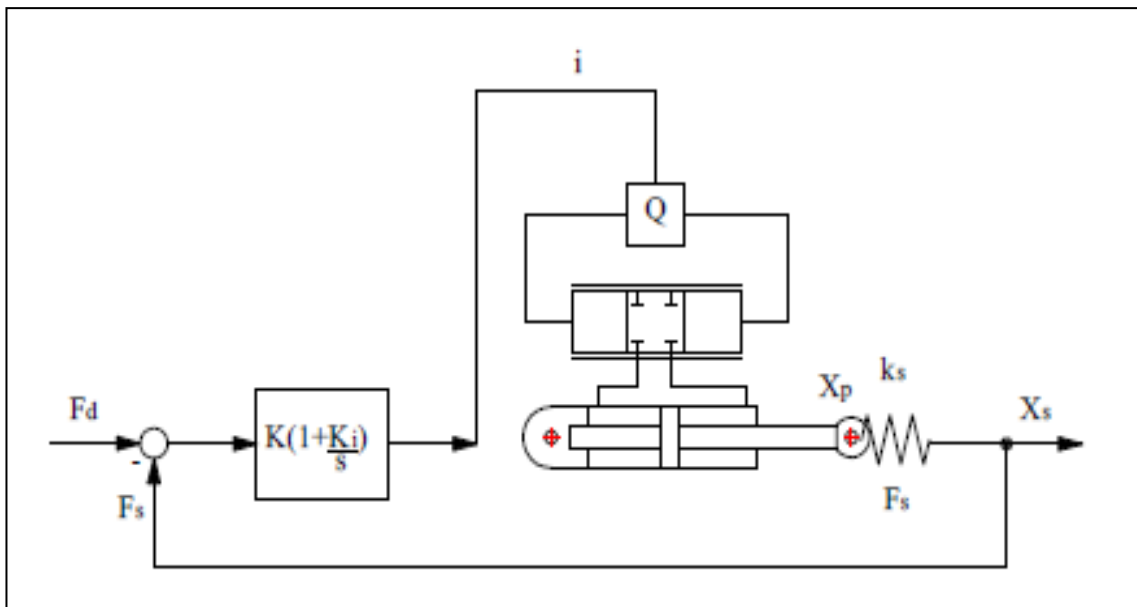
$$\Delta p = -\beta \frac{\Delta V}{V} \tag{1.19}$$

Ако претходни израз помножимо са радном површином цилиндра А,

$$\frac{dF}{dt} = A \times \beta \times \frac{Q}{V} \tag{1.20}$$

$$\frac{dp}{dt} = \beta \times \frac{Q}{V} \quad (1.21)$$

Из претходног се закључује да се силом може управљати познавањем модула стишљивости радног флуида, радне површине и запремине актуатора, прецизно управљаним протоком. Треба узети у обзир да се код овог управљања може постићи тачност реда величине до 0.05 % од максималне силе. Овде се пре свега може управљати прецизно брзином пораста силе, што се не може постићи коришћењем пропорционалног вентила за ограничене или смањење притиска где је максимална тачност 0.5 %. Управљање брзином пораста силе је у овом случају могуће само преко временске рампе промене притиска, а не директно протоком, према изразу (1.21). На следећи начин, кратким математичким моделирањем, [4],[5] на основу слике 1.6 показујемо утицај разводника на квалитет управљања силом:



Слика 1.6-Структура конфигурације електро хидрауличног актуатора по сили

$$Q(s) = \frac{k_v}{(Ts+1)} i \quad (1.22)$$

$$v_p = \frac{Q}{A} \quad (1.23)$$

$$X_p = \frac{K_v}{As(Ts+1)} i \quad (1.24)$$

$$i = K\left(1 + \frac{K_i}{s}\right)(F_d - F_s) \quad (1.25)$$

**Прилог теорији пројектовања актуатора за управљање вектором потиска ракетног мотора са флексибилним млазником**

$$F_s = k_s(X_p - X_s) \quad (1.26)$$

$$F_s = k_s\left(\frac{Q}{As} - X_s\right) \quad (1.27)$$

$$F_s = k_s\left(\frac{K_v}{As(Ts+1)}i - X_s\right) \quad (1.28)$$

$k_s$  је крутост еластичне везе. После краћег сређивања претходно наведених израза, добија се преносна функција за силу. Овде се јасно види да у сопственој фреквенцији која диктира и пропусни опсег, значајно утичу величине које зависе од избора серво разводника. Што је појачање веће, већи је и пропусни опсег, али истовремено је и већи ризик од шума, пре свега у мерењу силе. Не треба заборавити да експериментални резултати показују да се притисак у крутом систему мења за 0.001 с, што аргуменује као што је и претходно речено, да је пропусни опсег по сили увек већи од пропусног опсега по позицији.

$$F_s(s) = \frac{\left(\frac{s}{K_i} + 1\right)F_d(s) - \frac{A}{KK_iK_v}s^2(Ts+1)X_s(s)}{\frac{A}{k_sKK_iK_v}S^2(Ts+1) + \frac{s}{K_i} + 1} \quad (1.29)$$

Претходно речено се потврђује и у преносној функцији, (1.29) јер што је опруга крућа пропусни опсег по сили је већи.

**Управљачки систем актуатора:**

Ово је проблематика која је посебно анализирана у претходним годинама развоја теорије и праксе пројектовања управљачких система за електро хидрауличне актуаторе.

На први поглед, енциклопедијским прегледом распложиве литературе се може закључити да је претходни развој теорије и праксе пројектовања управљачких система за електро хидрауличне системе поставио јасне теоријске принципе који могу бити јасна смерница за пројектовање.

Детаљнијом анализом ове проблематике, аутор овог рада је дошао до закључа да има још отворених питања које теорија и пракса нису јасно одредиле. Навешћемо прво оно што по мишљењу аутора овог рада јесте решено у теорији и пракси, а затим оно што није, а неопходно је при пројектовању нових управљачких система за специфичне актуаторске системе:

Теорија и пракса је поставила следеће чињенице као полазне:

**1. 3 Актуатор као класа система аутоматског управљања**



## Прилог теорији пројектовања актуатора за управљање вектором потиска ракетног мотора са флексибилним млазником

1. Електро хидраулични системи су слабо пригушни и то представља највећи структурни проблем. Увођење повратне спреге по притиску као допунска опција је једно од најстандарднијих решења у пракси за практичну реализацију позиционих система а у смислу повећања пригушења у актуаторској конфигурацији.
2. Сопствена фреквенција актуаторског система као и сопствене фреквенције свих функционалних саставних елемената актуаторског система, зависе од покретних маса и од еластичних веза. То су први и најважнији подаци из математичког модела и имају одлучујућу улогу у почетној анализи комплетне динамике актуаторског система.
3. Симулационо тестирање математичких модела, треба радити за отворено и затворено коло синусним сигналом, значи у фреквентном домену и одскочном функцијом у временском домену. На основу ове провере долази се до првих података о појачањима у управљачком алгоритму, пропусном опсегу а у временском домену о брзини одзива система, прескоку и статичкој грешци система.
4. Постоје одређене препоруке, за које улазе сигнале у актуациони систем, се могу користити модели, другог, трећег реда а што захтева коришћење виших редова математичких модела.
5. Описна функција је класична технологија без алтернативе за укључивања једне нелинерности у математички модел система и на основу таквог модела синтезу и анализу управљачког система.
6. Неке од нелинеарности које се појављују у електро хидрауличном систему успешно се компензују хардверским решењем у електронском појачивачу серво разводника, пре свега зона неостљивости због преклопа у подклопу чаура-разводни клип и генерисање дитер сигнала који компензује, то јест поништава утицај трења разводног клипа серво разводника у клипној чаури.
7. Полазно алгоритамско решење је ПИД реализовано преко ускладника. Подешавање параметара није универзално решено, познати приступи се могу користити за дефинисање почетних вредности параметара, која се касније морају посебно експериментално и симулационо проверавати.
8. Повратна спрега по брзини као и повратна спрега по притиску утиче на поправку пригушења у актуационом систему, али додатно помаже за повећавање квалитета тачности позиционирања.

По мишљењу аутора следећа питања нису решена:

1. Не постоји алгоритамско решење за управљање које би могло довољно поуздано да тестира квалитет математичког модела.
2. Не постоји јасно решење за дилему да ли предност при употреби алгоритама управљања дати онима који користе математички модел електро хидрауличног актуатора или не.
3. Масовном применом линеаризованих математичких модела, акценат се ставља на коришћење репрезента математичког модела система преко преносне функције не узимајући у обзир „колико смета чињеница“ да се тада прихвата да су сви почетни услови нула, што намеће математички апарат који прати преносну функцију.

## Прилог теорији пројектовања актуатора за управљање вектором потиска ракетног мотора са флексибилним млазником

4. Особина праћења није једнозначно дефинисана као квалитет управљачког алгоритма. Није једнозначно дефинисан утицај амплитуда, односно ходова цилиндра.
5. Алгоритамска решења на нивоу селекције, нелинерни закон управљања или линеарни није систематизован већ се разматра од случаја до случаја, без обзира на степен нелинеарности у конструкцији склопа серво разводник – цилиндар-оптерећење. Раположиви резултати показују да кад је у питању стационарно стање актуатора бољи резултат дају линеарни алгоритми управљања док када је у питању квалитет прелазног процеса боље резултате дају нелинерни алгоритми управљања.
6. Параметарске методе подешавања система се користе у пракси али нису до краја верификоване.

Претходна анализа приказује актуатор као линеарни систем најнижег реда. У основи актуатор као систем аутоматског управљања, посматра се као систем који се састоји од три целине:

1. Управљачког дела-хардверски имплементиран алгоритам управљања.
2. Склопа разводник-цилиндар.
3. Склопа који оптерећује актуатор или краће-оптерећења.

И у овом раду разматраће се у пројектантском смислу свака од ових целина посебно, у следећем обиму:

У оквиру првог дела разматрају се могући алгоритми управљања, начин како изабрати адекватан алгоритам за конкретну примену актуатора односно радиће се синтеза различитих алгоритамских структура. Склоп разводник цилиндар се посматра и анализира у оквиру познатих математичких модела. Када је у питању разводник, драгоцен је чињеница да је практично референтни произвођач серво разводника у свету, MOOG, тестирао математичке моделе серво разводника до 8 реда и дао препоруке за које примене се може користи модел првог а за које модел другог реда, док је практично за све више редове примена у пракси врло рестриктивна. Ово је на посебан начин решење за један део проблематике која предмет овог рада, а то је немоделирана динамика у оквиру математичког модела серво разводника. На овај начин имамо прихватљиво решење које резултат експеримената на нивоу склопа електро хидраулични серво разводник. Без обзира на ову чињеницу у овом раду се посебно анализира утицај спољног оптерећења услед малих осцилација у систему на нелинеарну проточну карактеристику серво разводника.

Истраживање у овом раду је поред алгоритама управљања везано и за математичко моделирање пре свега оптерећења као и на одређене алтернативне варијанте за развођење радног флуида али према референтној динамици добро познатог двостепеног серво разводника са механичком повратном спрегом.

У оквиру разматрања актуатора као класе система аутоматског управљања, доминираће три основна питања:

### 1. 3 Актуатор као класа система аутоматског управљања

## Прилог теорији пројектовања актуатора за управљање вектором потиска ракетног мотора са флексибилним млазником

1. Немоделована динамика у смислу непознатих параметара и појава у систему.
2. Проблем линеаризације и ограничења која уводи линеаризација.
3. Проблем шта максимално можемо добити у конфигурацији актуаторског система а да не извршимо структурне промене.

Ово је најмање истражен део теорије пројектовања актуаторских система а индиректно се односи на питање када смо добили, то јест синтетизовали најбољи алгоритам управљања. У овом случају не дефинише се оптимални алгоритам, јер је нешто оптимално само по једном критеријуму, а све остало је компромис те оптималности. Када кажемо најбољи или адекватни, што се прихвата за синоним, проблем се разматра не кроз финални критеријум неке оптималности него као скуп више оптималних корака у различитим фазама пројектовања који се не могу синтетизовати у јединствени општи критеријум.

Математичко моделирање се овде посебно разматра у смислу одређивања оптималног реда система и структуре.

Користи се класичан приступ моделирању преко диференцијалних једначина и енергетски преко Бонд Графова. Нелинеарности ће се уводити директно у структуру модела поред математичких нелинеарности које су последица билансних једначина. Усвојен је принцип да су две главне нелинеарности у систему статичка карактеристика разводника и нелинеарност у оптерећењу, то јест хистерезис у гуми, то јест флексибилној вези. Нелинеарности типа засићења су битне у само једној фази моделирања када се одређују услови када наступа засићење по брзини и убрзању. Циљ је да се ови услови никада не достигну у раду система и у поглављу о синтези управљачког алгоритма, предложиће се једна методологија која може да постави ограничења, да утицај ових статичких нелинеарности никада не дође до изражаја, посебном симулационом провером, у првим фазама синтезе.

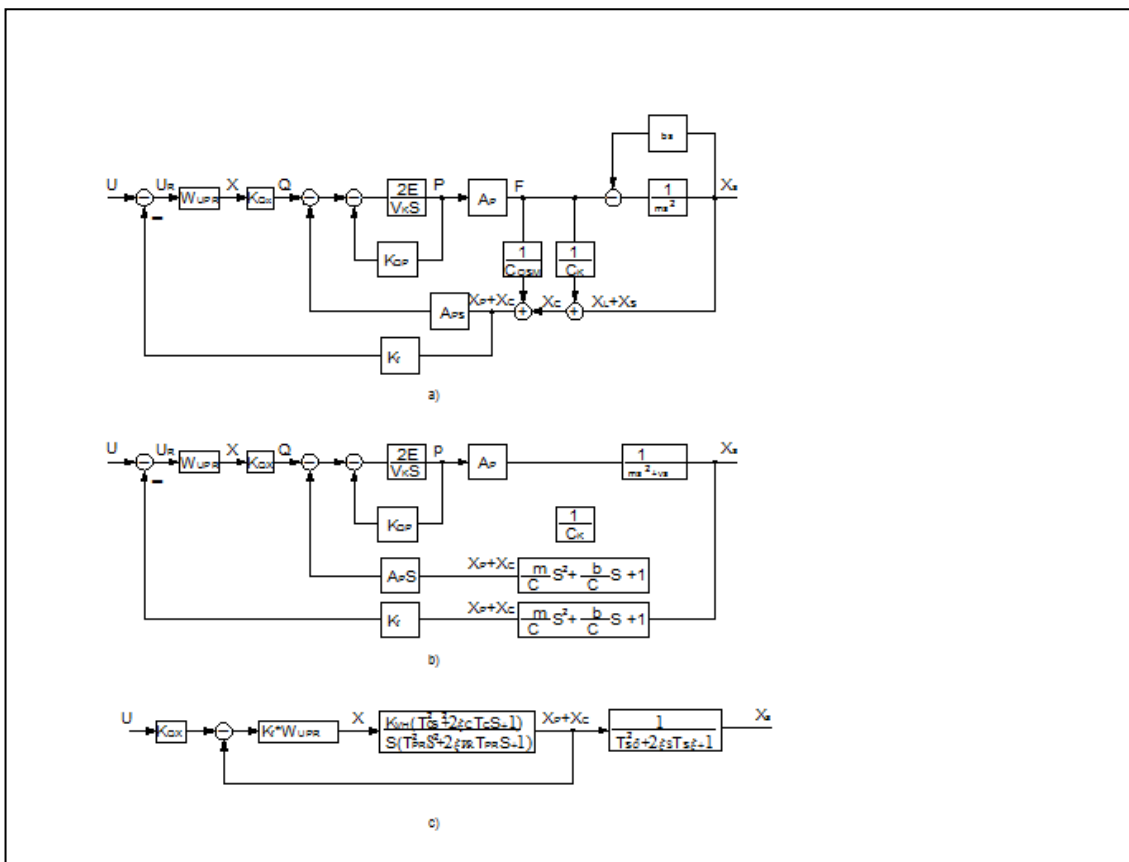
Када се говори о класи система аутоматског управљања неизбежна је проблематика стабилности и праћења. Када је у питању стабилност, у ранијем периоду се много већа пажња обрађала на ову особину. Ово је најважнија особина која се у данашње време далеко више структурно обезбеђује већ при пројектовању основне конфигурације актуаторског система тако да се на неки начин и подразумева. За праксу и квалитет актуационог система је много важнија особина праћења. Особина стабилности система не гарантује особину праћења и особина праћења не гарантује особину стабилности која је пре свега у теорији везана за равнотежно стање актуационог система. Особина праћења се релативно лако замишља као праћење улазне величине актуаторског система од стране излазне величине и њена квантификација се најчешће везује за што мању грешку праћења. Наравно пре свега да би се могло говорити о праћењу, предпоставља се да је жељена вредност улазне величине променљива у времену и да нема прекиде прве врсте, односно дискретне промене жељене вредности улаза актуационог система. Претходно наведено се у пракси сматра ниским квалитетом праћења; за виши квалитет праћења пред излазну величину актуационог система се постављају много строжији захтеви као што је праћење са унапред дефинисаним временом достиживости (временски тренутак од када стварна вредност прати

**Прилог теорији пројектовања актуатора за управљање вектором потиска ракетног мотора са флексибилним млазником**

жељену) или захтев да праћење почне тако што у тренутку почетка праћења обе криве, жељена и стварна вредност имају једнаке изводе, што гарантује изузетно гладак прилаз стварне вредности жељеној вредности у актуационом систему. У литератури се наводе радови када је ово теоријски и практично потвђено за неоптерећене електрохидрауличне актуаторе, док за оптерећење нема верификованих резултата.

**Блок дијаграми актуатора као класе система аутоматског управљања.**

Претходно је приказана методологија добијања најједноставнијег математичког модела. Почетни блок дијаграм се прави на основу дефинисаних једначина које описију понашање делова актуаторске конфигурације и он мора да тачно покаже све међусобне везе и интеракције. Када је он дефинисан, следећи корак је да се на основу правила алгебре блок дијаграма ураде сва могућа поједностављења у дијаграму. Такав блок дијаграм се назива еквивалентни. Његов значај је у томе, што је он основа за математичку симулацију и превођење у модел у SIMULINK-у (MATLAB). Да би блок дијаграм добио на значају да се може користити у прорачуну, ради се његова рачунска варијанта, која треба да покаже јединствену преносну функцију отвореног кола са јединичном повратном спрегом, што омогућава директну примену поступака у фреквентном домену за анализу и синтезу управљања за актуаторски систем. Претходно наведено се приказује на примеру који следи на слици 1.7. [6]



**Слика 1.7-Структурирање актуатора преко блок дијаграма [6]**

#### 1.4 Истраживачки циљеви дисертације

Истраживачки циљ је да се сагледа могућност унификације и систематизације технологије пројектовања електрохидрауличног актуатора за флексибилни млазник на основу познатих технологија пројектовања и да се паралелно са овом активношћу посебно сагледају одређене специфичности које су везане само за електрохидраулички актуатор који треба да закрене флексибилни млазник.

Наравно, претходна активност се одвија уз сва ограничења која постоје у теорији и пракси пре свега аутоматског управљања [7], односно у његовом делу који се бави пројектовањем електрохидрауличких сервосистема и који постоји као засебна техничка дисциплина коју зовемо пројектовање сервомеханизма.

Истраживање се реализује разматрањем технологија математичког моделирања а посебно технологијом моделирања флексибилног млазника и сви модели се користе за проверу симулационих резултата за претходно селектоване алгоритме управљања. У овом делу разматрају се сви потенцијали елементи такозване немоделоване динамике који стандардни модели не обухватају својим описом.

У оквиру дисертације посебна пажња се посвећује интеракцији актуатор-ракета (актуатор у подклопу који управља ракетом) и обратно, како би се комплетно сагледао утицај конструкције ракете на конструкцију актуатора и конструкције актуатора на динамичко понашање ракете.

Циљ је да се систематизује минимални број симулација за одређивање и селекцију адекватног алгоритма управљања али и да се дефинише одређен број симулација математичких модела који треба да одговоре и на нека друга пројектантска питања, као што су на пример, могућност упрошћавања конфигурације електро хидрауличног актуационог система и на могућност појаве кавитационог пада притиска у коморама хидрауличног цилиндра, односно симулационе провере нису везане за верификацију алгоритма управљања. Поред тога циљ је и да се јасно одреде захтеви за експерименталну проверу актуационог система који су неопходни за потпуну верификацију математичког модела (пројектовање симулатора оптерећења за актуатор).

У експерименталном делу рада, циљ је да се препознају одређени феномени који су битни за рад електро хидрауличног актуатора, а не уносе се директно у математички модел актуатора, али су саставни део управљања, као што је корекција симетрије појачања по притиску, одређивање стварне нелинеарности са зоном неосетљивости за оптерећен електрохидраулични актуатор.

Све претходно што је наведено као циљ, треба да дефинише правце даљег истраживања у теоријском и практичном заокруживању технологије пројектовања електрохидрауличног актуатора за флексибилни млазник.

#### 1.4 Истраживачки циљеви дисертације

## 1.5 Преглед садржаја дисертације

Пре првог поглавља дат је списак ознака и слика као и опис мотивације за израду овог рада. Прво поглавље је уводно. Садржи уводне напомене, детаљан преглед, доступне расположиве литературе и основни опис актуатора као класе система аутоматског управљања. Дефинисани су истраживачки циљеви дисертације и дат преглед садржаја дисертације. Посебно је размотрена и коришћена терминологија у раду.

Друго поглавље је посвећено конструктивном опису актуационог система и објекта управљања за тај актуациони систем. Природним редоследом у одређеном обиму, неопходном за целовитост овог рада, анализирана је ракета као објект управљања, технологија управљања вектором потиска ракетног мотора и специфичности конструкције флексибилног млазника за управљање вектором потиска. У другом делу овог поглавља разматрају се специфичности конструкције актуатора за флексибилни млазник, а посебно се разматра и разводник као елемент за развођење односно управљачки орган актуационог система.

У трећем поглављу дефинише се један начин систематизације технологије пројектовања актуаторског система за флексибилни млазник. Прво се разматра основно конструктивно решење, затим основни концепт и конфигурација актуационог система. После ових пројектантских радњи разматра се технологија почетног прорачуна као и одређени специфични елементи напредног прорачуна. Затим природно следи разматрање приступа математичком моделирању, израда нелинеарног математичког модела и линеаризација нелинеарног модела у виду општег приступа проблематици математичког моделирања. Даљи развој технологије математичког моделирања је у правцу додавања статичких нелинеарности као посебне класе нелинеарности у електро хидрауличком систему. Претходни математички модели урађени су за случај општих услова оптерећења. У посебном делу овог поглавља анализира се проблематика моделирања оптерећења актуатора, у разматраном случају то је флексибилни млазник. У оквиру овог поглавља које говори о базном пројектовању разматрају се и теме које употпуњавају комплетну технологију пројектовања актуационог система, као што су технологија експерименталне верификације пројектованог актуационог система, анализа расположивих алгоритама управљања и финални део овог поглавља је претходна синтеза управљачких алгоритама.

Четврто поглавље је посвећено конструктивној вези ракете и актуатора у оба смера, односно међусобној интеракцији. Први део разматра како конструкција ракете у почетној фази пројектовања утиче на почетак пројектовања актуационог система односно актуатора. Дефинисана је и механичка карактеристика актуатора као и утицај другог актуатора приликом управљања закретањем флексибилним млазником. Сопствена фреквенција ракете је посебан параметар који има директан и недвосмислен утицај на дефинисање динамичких параметара актуатора. У овом поглављу никако није могло бити изостављено како еластичност ракете утиче на пројектовање актуатора за управљање флексибилним млазником.

## Прилог теорији пројектовања актуатора за управљање вектором потиска ракетног мотора са флексибилним млазником

У петом поглављу овог рада, аутор је издвојио је четири дела у којима је систематизовао неке своје погледе на обавезне елементе пројектовања актуатора за флексибилни млазник. Први део разматра зависност појачања актуационог система од крутости позиционог оптерећења. У другом делу посебан значај се даје начину моделирања нелинеарне статичке карактеристике разводника и оптерећења у оквиру ризика за појаву самоосциловања. У трећем делу генерално се систематизује проблематика принудних осцилација и самоосциловања у актуационим системима. Четврти део је посвећен специфичном структурирању математичког модела за опис актуационог система за флексибилни млазник.

Шесто поглавље овог рада је посвећено дефинисању захтева за неопходне симулационе провере приликом пројектовања актуатора за флексибилни млазник. У овом поглављу је систематизован минимални број симулационих провера које су неопходне за напредну технологију пројектовања актуатора за флексибилни млазник. Одређен број симулација је приказан и у поглављу 3, као неопходна илустрација одређених разматрања. Посебна група симулационих провера везана је алтернативну опцију структурирања математичком модела, (Simscap-Simhydraulics) без преносних функција, статичких нелинеарности и увођења нелинеарних једначина, већ се моделирање обавља генерисањем функционалне шеме, где симбол прати комплетан опис једне компоненте, што обухвата и линеарни и нелинеарни део природе посматране компоненте. Такође посебна група симулационих провера односи се на различита алгоритамска решења за управљање, од класичних до одређених новијих и модернијих, са идејом симулационе провере применљивости за управљање флексибилним млазником.

Седмо поглавље разматра експерименталне резултате који су добијени у оквиру посебно конфигуриране електрохидрауличне инсталације, како би се размотрили одређени посебни феномени за неке од претходно синтетизованих закона управљања и захтеве за експерименталну идентификацију параметара. Дефинисано је неколико специфичних експерименталних провера које су посебно значајне када је у питању еластично оптерећење актуатора, односно флексибилни млазник ракетног мотора.

У осмом поглављу дат је закључак за извршене експерименталне и теоријске анализе у оквиру општег посебног приступа пројектовању актуатора за флексибилни млазник.

У деветом поглављу је наведена коришћена литература при изради овог рада.

Поглавље 10 садржи седам прилога. У првом прилогу описан је електрохидраулични система за експерименталну верификацију актуационог система, у другом прилогу дат је листинг основног кода за управљање у Ц језику, у трећем прилогу је дат блок дијаграм који показује све специфичности пројектовања актуационог система. У четвртном прилогу дати су нумерички подаци за линеарни математички модел у простору улаз-излаз и у простору стања. Пети прилог је о технологијама управљања вектором потиска, шести је о специфичностима конструкције флексибилног млазника, а у седмом је дата технологија извођења математичком модела-општи систематизовани приступ.

### 1.5 Преглед садржаја дисертације

## 1.6 Терминологија

Терминологија у свим гранама технике је посебно важна за међусобно разумевање и на разне начине се тежи њеној стандардизацији. У овом раду се користи стандардна терминологија и то прво ако постоји адекватан термин у српском језику, а ако не постоји, користи се оригинал из страног, пре свега енглеског језика. Категорија стандардна терминологија је оно што се користи у референтној литератури на енглеском, руском и српском језику.

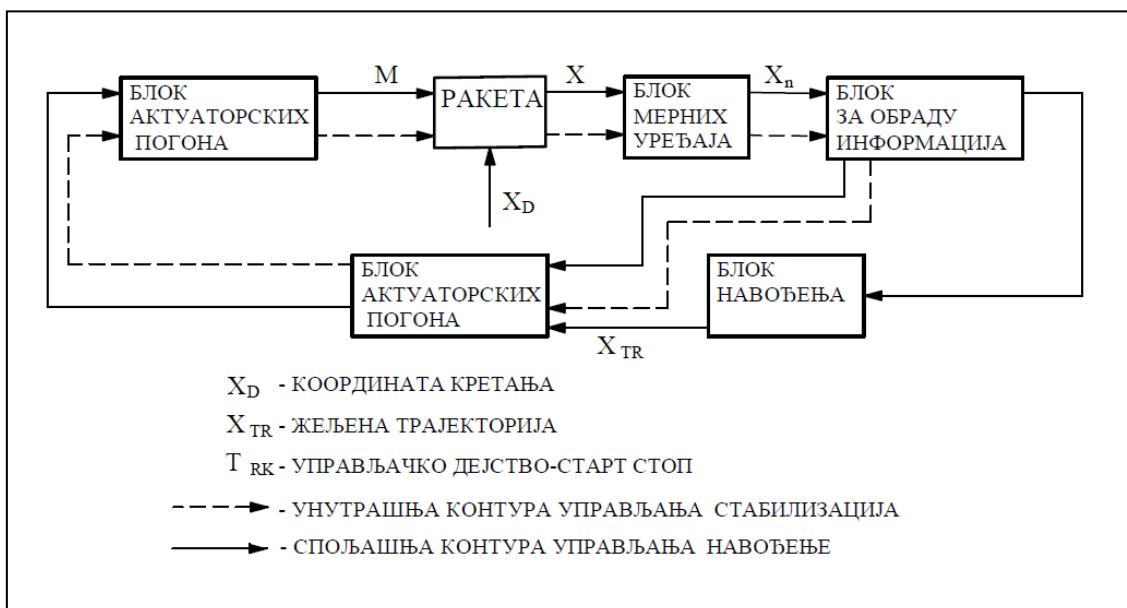
Посебно је потребно разјаснити термин актуатор и актуациони систем који се користи у овом раду. Актуатор је у ужем смислу када се ради о електро хидрауличном актуатору, склоп цилиндар-разводник и са пре свега интегрисаним давачем позиције у цилиндру. У оквиру термина актуатор су и сви остали давачи који су интегрисани у склоп цилиндар-разводник, као што су давачи притиска, силе, убрзања и брзине. Актуациони систем, обухвата све што је значајно за аутономију електро хидрауличног актуационог система, од хидрауличног агрегата који има задатак да обезбеди одређен проток хидрауличног уља на захтеваном притиску, преко електронског појачивача за пропорционални односно серво разводник до рачунарског хардвера са имплементираним алгоритмом управљања.

Наслов тезе је: “ Прилог теорији пројектовања актуатора за управљање вектором потиска ракетног мотора са флексибилним млазником “. У наслову је наведено актуатора, пре свега због компактног и смисленог наслова, али у раду се сва разматрања односе на комплетан актуациони систем у смислу претходне дефиниције, што је и једино могуће.



## 2.1 Ракета као објект управљања

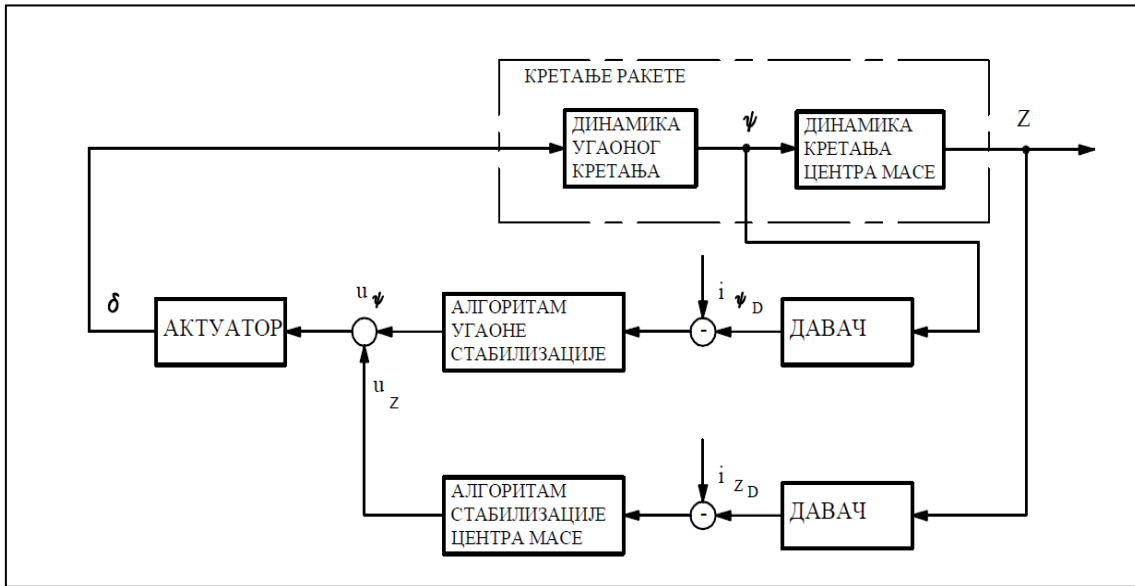
У овом раду анализира се теорија пројектовања актуатора за управљање вектором потиска. Значи рад се базира на директној анализи два елемента од претходно наведених пет главних подсистема ракете. То је ракетни мотор и систем за управљање. Индиректно се анализира и структура ракете, јер се мора знати да ли је ракета статички стабилна или нестабилна и утицај еластичности структуре као и извори енергије за подсистеме јер је потребно размотрити како је могуће обезбедити енергетско напајање актуационог система. На слици 2.1 дата је структурна шема система управљања ракетом. Јасно је назначено да постоји спољашња контура управљања која се зове вођење и унутрашња контура управљања која се зове стабилизација.



Слика 2.1-Структурна шема управљања ракетом [8]

Као и свако друго тело у простору, ракетом се управља преко три угла, углом пропињања, скретања и ваљања око сопствене осе. Једновременим управљањем са сва три угла, ракета, односно њено тежиште може заузети било који положај у простору. На слици 2.2 је приказана структурна шема управљања летом ракете преко једног канала (један угао). Јасно се види да један канал служи и за истовремено вођење, кретање тежишта ракете али и за стабилизацију ракете, кретање око сопственог тежишта.

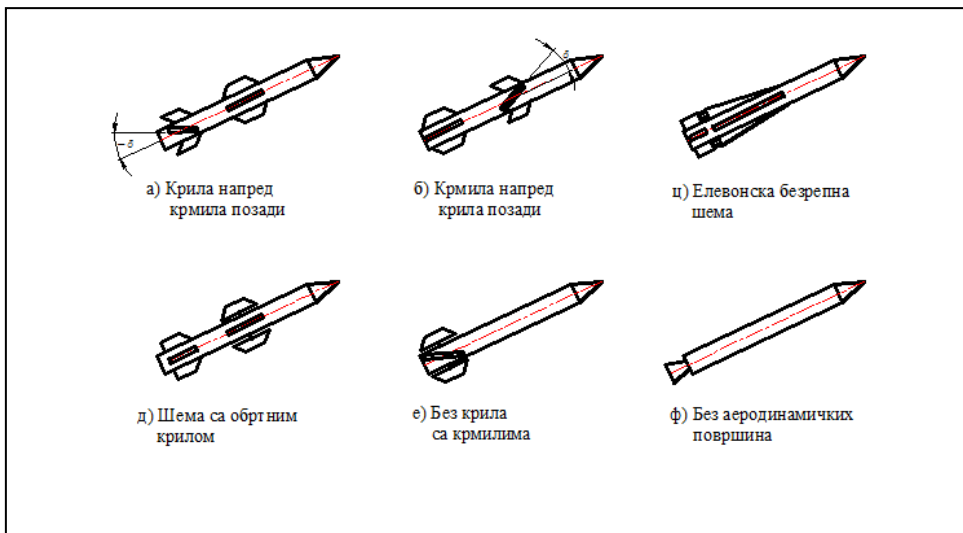
**Прилог теорији пројектовања актуатора за управљање вектором потиска ракетног мотора са флексибилним млазником**



**Слика 2.2-структурна шема управљања ракетом један канал [8]**

Свака ракета за управљање може користити као извршне органе аеродинамичке површине, гасодинамичке (управљање вектором потиска) или комбинацију једних и других извршних органа управљања.

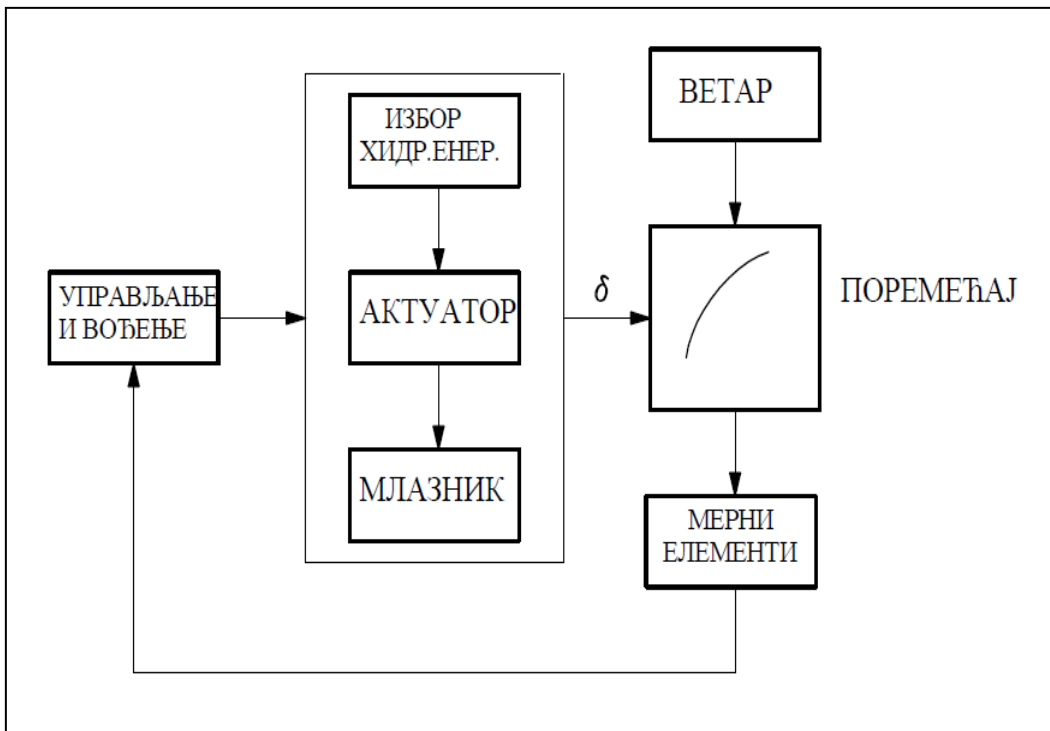
Постоје различите аеродинамичке шеме за управљање ракетом слика 2.3, а што се тиче управљања вектором потиска, постоји више технологија које зависе пре свега од тога да ли је ракетни мотор са чврстим или течним горивом, слика 2.4. Историјски, управљање ракетом се везује за V2 ракету која је имала комбинацију управљања вектором потиска и преко аеродинамичких површина, слика 2.5.



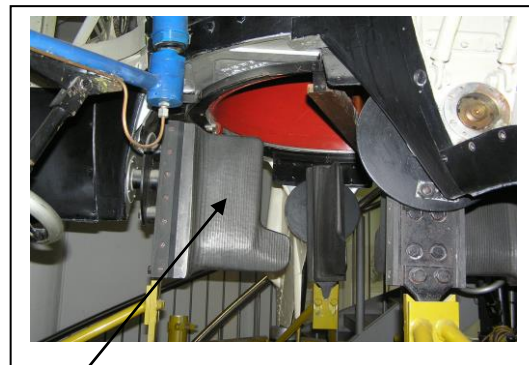
**Слика 2.3-Аеродинамичке шеме за управљање ракетом [9]**

**2.1 Ракета као објект управљања**

Прилог теорији пројектовања актуатора за управљање вектором потиска ракетног мотора са флексибилним млазником



Слика 2.4 Технологија управљања вектором потиска [10]



Аеродинамичка управљачка површина и графитно кормило (гасодинамичка управљачка површина) за управљање вектором потиска-фотографија аутора рада из Немачког музеја у Минхену

Слика 2.5-Ракета V2 управљање аеродинамичким површинама и вектором потиска

На слици 2.6 је дат шематски приказ шта је све предмет управљања код сва три угла која су битна за кретање ракете, односно наглашава се да је за сваки актуациони систем битна позиција, брзина и убрзање управљачког извршног органа без обзира на његово конструктивно извођење.

2.1 Ракета као објект управљања

**Прилог теорији пројектовања актуатора за управљање вектором потиска ракетног мотора са флексибилним млазником**

На основу једначине (2.1) види се да при управљању по углу пропињања (сва даља анализа управљања ракетом у овом раду биће по углу пропињања) долази до изједначавања аеродинамичког момента и управљачког момента. Ако се једначина (2.1) подели са моментом инерције за дефинисан угао кретања, добија се једначина (2.2) која преко одговарајућих коефицијената карактерише статичку стабилност ракете и ефикасност органа управљања.

$$J_z \frac{d^2 \vartheta}{dt^2} = Y(l_{cm} - l_{cp}) + Y_u(l_u - l_{cm}) = M_{zas} + M_{zu} \quad (2.1)$$

$$J_z \frac{d^2 \vartheta}{dt^2} = a_1 \alpha + a_2 \delta \quad (2.2)$$

где је:

$a_1 = \frac{M_z^\alpha}{J_z}$  -коефицијент који карактерише статичку стабилност ракете у функцији

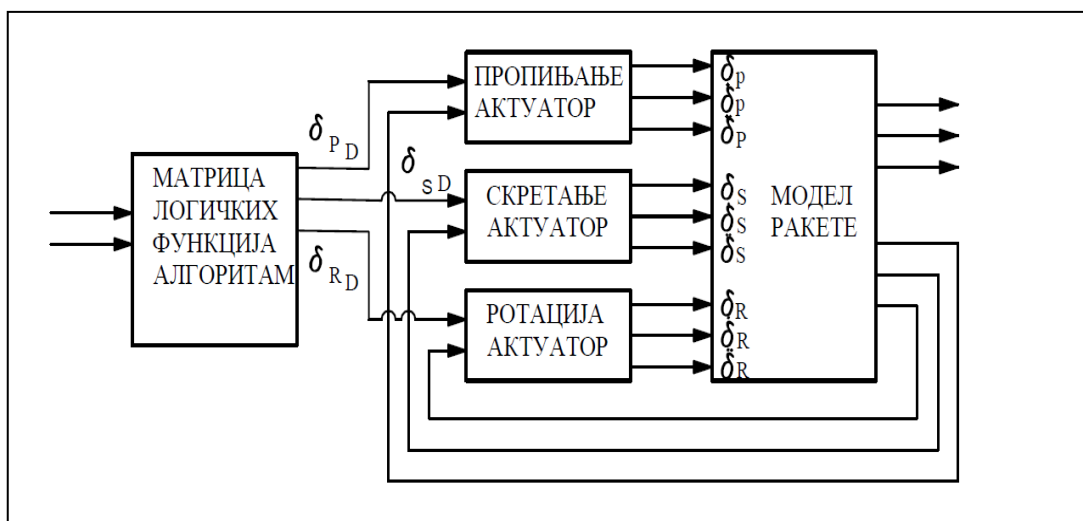
положаја тежишта према положају центра потиска

$M_{zas} = m_z^\alpha \times \alpha$  -аеродинамички статички момент је производ парцијалног извода коефицијента статичког момента по нападном углу и нападног угла

$a_2 = \frac{M_z^\delta}{J_z}$  -коефицијент који карактерише ефикасност органа управљања

$M_{zu} = m_z^\delta \times \delta$  -управљачки момент (производ парцијалног извода коефицијента управљачког момента по углу отклона управљачког органа и угла отклона управљачког органа)

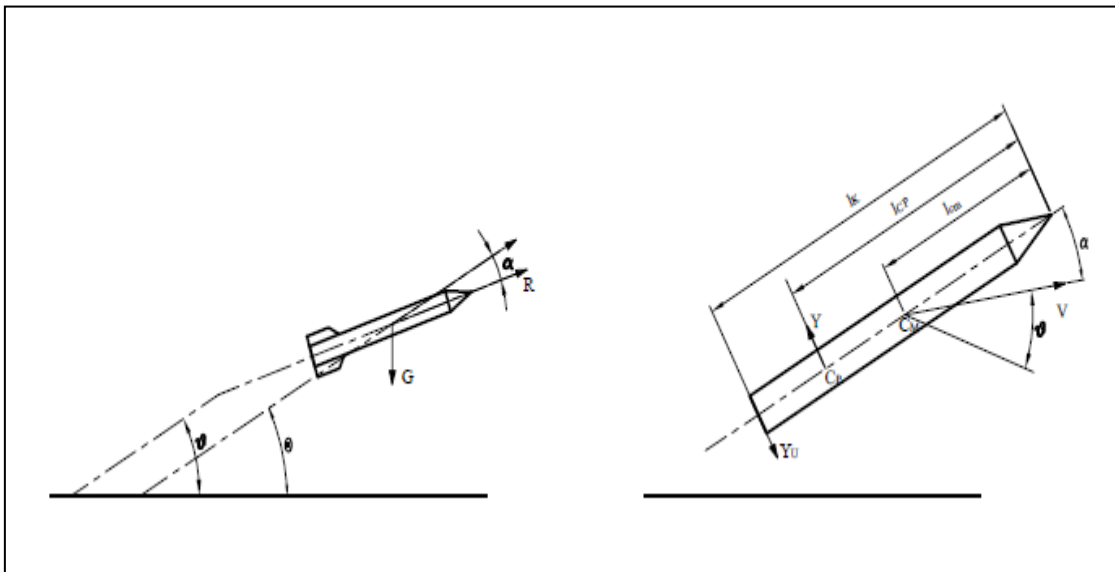
Оба претходно дефинисана коефицијента карактеришу управљивост ракете.



**Слика 2.6-Актуациони систем [8]**

**2.1 Ракета као објект управљања**

Посебно важно приликом основног описа ракете као објекта управљања је поменути све поремећаје који делују на њено кретање. Најзначајнији поремећај је хоризонтална брзина ветра. Овај поремећај је променљив у времену. Други по значају поремећај је ексцентричност вектора потиска, који је везан за прецизност израде ракете и квалитет монтаже ракетног мотора али и самог ексцентритета ракетног пуњења у мотору и он је од посебног значаја само код невођених ракета. Следећи значајни поремећаји су: реакција приликом раздвајања степена ракете, одступање масе ракете од номиналне масе, одступање интезитета потиска од номиналног, одступање густине атмосфере од номиналне као и поремећај који у лет уноси технологија лансирања. Сви ови поремећаји су компоненте укупне поремећајне силе у правцу осе  $Z$  како је то дефинисано на слици 2.7. [9], [10]



Слика 2.7-Уздужно кретање ракете

Ракета може имати програмско вођење или командно вођење. Програмско вођење значи да је трајекторија кретања ракете дефинисана пре лета и задатак управљања је да обезбеди да се ракета креће тако да се стварна трајекторија што је могуће више поклапа са референтном програмском трајекторијом. Командно вођење или навођење, значи да се референтна трајекторија ракете дефинише за време трајања лета према тренутном положају покретног циља.

Трајекторија ракете се може задати на разне начине, преко висине, брзине или нормалног убрзања. У пракси нормално убрзање је најпрактичније за задавање жељене трајекторије.

У основи приликом пројектовања ракете раде се бројне нумеричке симулације, како би се на основу динамичких једначина одредила жељена трајекторија кретања. У оквиру ових симулација анализирају се вредности управљачких момената на основу којих се могу дефинисати односно пројектовати актуациони системи.

## 2.1 Ракета као објект управљања

## Прилог теорији пројектовања актуатора за управљање вектором потиска ракетног мотора са флексибилним млазником

Практично, може се дефинисати такозвани шарнирни момент који је потребно да оствари актуатор како би се генерисало управљачко дејство. Главне компоненте шарнирног момента су:

- позициони шарнирни момент који генерише сила еластичног отпора кретању управљачког органа
- момент који зависи од угаоне брзине управљачког органа
- момент инерције управљачког органа
- збирни момент трења

Да би ракета као објекат управљања била разумљива за ниво пројектовања актуационог система за управљање вектором потиска, биће изведен релативно прост математички модел кретања у вертикалној равни, на основу литературе [1] који ће показати шта је у моделу линеарно а шта нелинерано, односно могуће је пратити механизам промена угаоних координата. На овај начин имаћемо довољно прецизно описану ракету као објекат управљања, (структурни дијаграм на слици 2.8).

$$m \frac{dv}{dt} = R \cos \alpha - X - G \sin \theta \quad (2.3)$$

$$mV \frac{d\theta}{dt} = R \sin \alpha + Y - G \cos \theta \quad (2.4)$$

$$J_z \frac{d^2 \vartheta}{dt^2} = M_z \quad (2.5)$$

$$\vartheta = \theta + \alpha \quad (2.6)$$

$$\frac{dH}{dt} = v \sin \theta \quad (2.7)$$

$$\rho = f_p(H) \quad (2.8)$$

$$c = f_c(H) \quad (2.9)$$

Прве две једначине се односе на силе које су тангенцијалне и нормалне на трајекторију лета, трећа једначина је једначина момента у односу на нормалну осу, четврта и пета једначина су кинематске везе између углова, висине и брзине лета. Задње две једначине приказују зависност густине ваздуха и брзине звука од висине лета. Маса ракете и момент инерције се мењају у току времена, односно за време трајања лета.

$R = R(\rho, v, \mu)$  -Потисна сила ракетног мотора, нелинеарна функција, густине, брзине и положаја потисне гасне струје

$F = \sqrt{X^2 + Y^2}$  -Резултујућа аеродинамичка сила

### 2.1 Ракета као објект управљања

**Прилог теорији пројектовања актуатора за управљање вектором потиска ракетног мотора са флексибилним млазником**

$X = c_x S \rho v^2 / 2$  - Сила бочног отпора где је

$c_x = c_x(\alpha, M)$  - бездимензионални коефицијент силе бочног отпора који зависи од нападног угла и  $M$  броја

$M = \frac{v}{c}$  - однос брзине ракете и брзине звука

$S$  - површина пресека ракете

$Y = c_y S \rho v^2 / 2$  - Сила узгона нормална на вектор брзине

$c_y = c_y(\alpha, M)$  - бездимензионални коефицијент силе узгона који зависи од нападног угла и броја  $M$

$M_z = m_z S b_A A^2 / 2$  - аеродинамички момент

$b_A$  - дужина ракете

$m_z = m_z(\alpha, \vartheta, M, \delta)$  - бездимензионални коефицијент момента, који зависи од нападног угла ракете, угаоне брзине, броја  $M$  и управљачког угла органа управљања у вертикалној равни.

Прихвата се да је сила узгона линеарно зависна од нападног угла, а момент од нападног угла, угаоне брзине и управљачког угла, што доводи до следећих зависности:

$$Y = Y^\alpha \alpha = c_y S \frac{\rho v^2}{2} \alpha \quad (2.10)$$

$$M_z = -M_z^\vartheta \dot{\vartheta} - M_z^\alpha \alpha + M_z^\delta \delta \quad (2.11)$$

у овој једначини општег модела ракете први пут фигурише управљачки угао

Узимајући у обзир задње две једначине и чињеницу да се брзина споро мења, могу се једначине упростити тако да се коначно добија:

$$\dot{\theta} = \frac{1}{T_1} \alpha - \frac{g}{v} \cos \theta \quad (2.12)$$

$$\ddot{\vartheta} + \frac{1}{T_2} \dot{\vartheta} + k_\alpha \alpha = k_\delta \delta \quad (2.13)$$

$$\vartheta = \theta + \alpha \quad (2.14)$$

Претходне једначине су добијене под претпоставком да за мале углове важи:

$$\sin \alpha = \alpha \quad (2.15)$$

## 2.1 Ракета као објект управљања

Док су претходни коефицијенти дефинисани:

$$\begin{aligned}
 T_1 &= \frac{mv}{R + Y^\alpha} & T_2 &= \frac{J_z}{M_z} \\
 k_\alpha &= \frac{M_z^\beta}{J_z} & k_\delta &= \frac{M_z^\delta}{J_z}
 \end{aligned}
 \tag{2.16}$$

Када искористимо једначину која повезује сва три значајна угла тако што ћемо је једном и два пута диференцирати па је увести у једначину где фигурише управљачки угао, добијамо:

$$\dot{\theta} = \frac{1}{T_1} \alpha - \frac{g}{v} \cos \theta
 \tag{2.17}$$

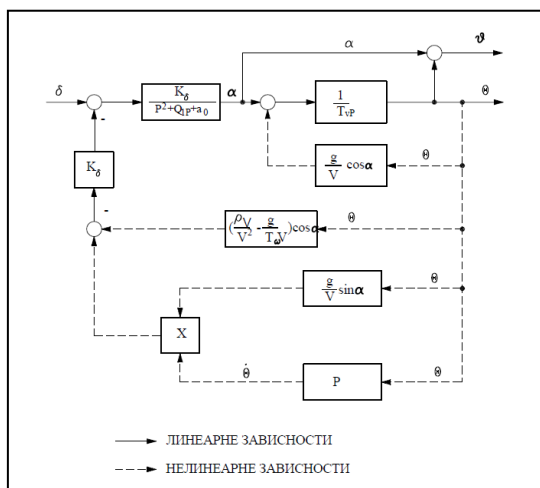
$$\ddot{\alpha} + a_1 \dot{\alpha} + a_0 = k_\delta \delta - \left( \frac{\rho v}{v^2} - \frac{\rho}{T_2 v} \right) \cos \theta - \frac{\rho}{v} \dot{\theta} \sin \theta
 \tag{2.18}$$

Коефицијенти су:

$$a_1 = \frac{1}{T_1} + \frac{1}{T_2}
 \tag{2.19}$$

$$a_0 = k_\alpha + \frac{1}{T_1} \times \frac{1}{T_2}
 \tag{2.20}$$

На основу претходних једначина могуће је направити структурни дијаграм који показује како се мењају величине везане за лет ракете у функцији промене управљачког угла. Посебно је назначена линеарна зависност између управљачког угла и нападног угла. Поред тога нападни угао је интегралном везом повезан са углом нагиба трајекторије односно вектора брзине у односу на хоризонт. Претходно аргументује посматрање динамике ракете преко линеарног система трећег реда, што ће се коритити у наредним поглављима.



**Слика 2.8-Структурни дијаграм управљања нападним углом и углом нагиба трајекторије ракете [1]**

**2.1 Ракета као објект управљања**



**Прилог теорији пројектовања актуатора за управљање вектором потиска ракетног мотора са флексибилним млазником**

Због различитих конструкција ракета у складу са наменама, тешко је дефинисати јединствене параметре ракете као објекта управљања, али у литератури је ипак могуће наћи одређене спецификације параметара ракете, које се могу сматрати универзалним. Једна од тих спецификација дата је у табели која следи:[11]

**Табела 2.1:**

Максимални угао отклона управљачког органа	30°
Максимална брзина отклона управљачког органа	300°/s
Дозвољена статичка грешка	1°
Управљачки момент	50-250 Nm
Пропусни опсег	10 Hz при фазном померају од 20°

Јасно је да се претходно наведено односи пре свега на аеродинамичке команде лета када је у питању управљачки моменат, док остали подаци могу бити универзални. Ако се такође погледају подаци који су доступни у литератури за ракете управљане вектором потиска:

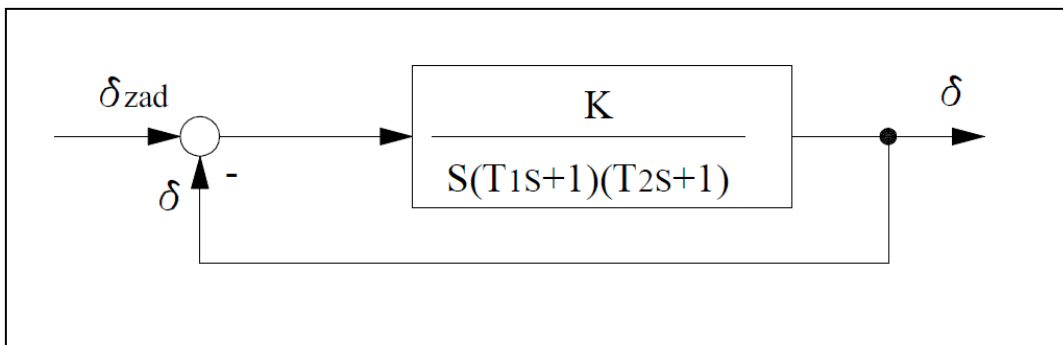
- Брзине отклона флексибилног млазника могу бити и до 762 °/с.
- Управљачки моменти могу бити и до 50 KNm.

Претходни подаци омогућавају да се одмах у старту према жељеној спецификацији параметара ракете, дефинише појачање актуаторског система:

$$W(s) = \frac{K}{s(T_1s + 1)(T_2s + 1)} \quad (2.21)$$

Сада можемо да одредимо преносну функцију актуаторског затвореног система, види слику 2.9:

$$W(s) = \frac{W(s)}{1 + W(s)} = \frac{K}{s(T_1s + 1)(T_2s + 1) + K} = A(s) \quad (2.22)$$



**Слика 2.9-Затворена структура актуаторског система, линеаризовани модел, трећег реда**

## Прилог теорији пројектовања актуатора за управљање вектором потиска ракетног мотора са флексибилним млазником

Ако сада нађемо преносну функцију по грешци:

$$W(s) = \frac{\delta_d(s) - e(s)}{\delta_d} = 1 - A_e(s) \quad (2.23)$$

Ако сада комбинујемо претходне две једначине:

$$A_e(s) = 1 - W(s) = \frac{1}{1 + W(s)} \quad (2.24)$$

Ако сада из претходног израчунамо грешку, добијамо:

$$e(s) = \frac{K(T_1s + 1)(T_2s + 1)}{s(T_1s + 1)(T_2s + 1)} \dot{\delta}_{\max}(s) \quad (2.25)$$

Посматрајмо сада стационарни радни режим:

$$e_{st} = \frac{\dot{\delta}_{\max}}{K_1} \quad (2.26)$$

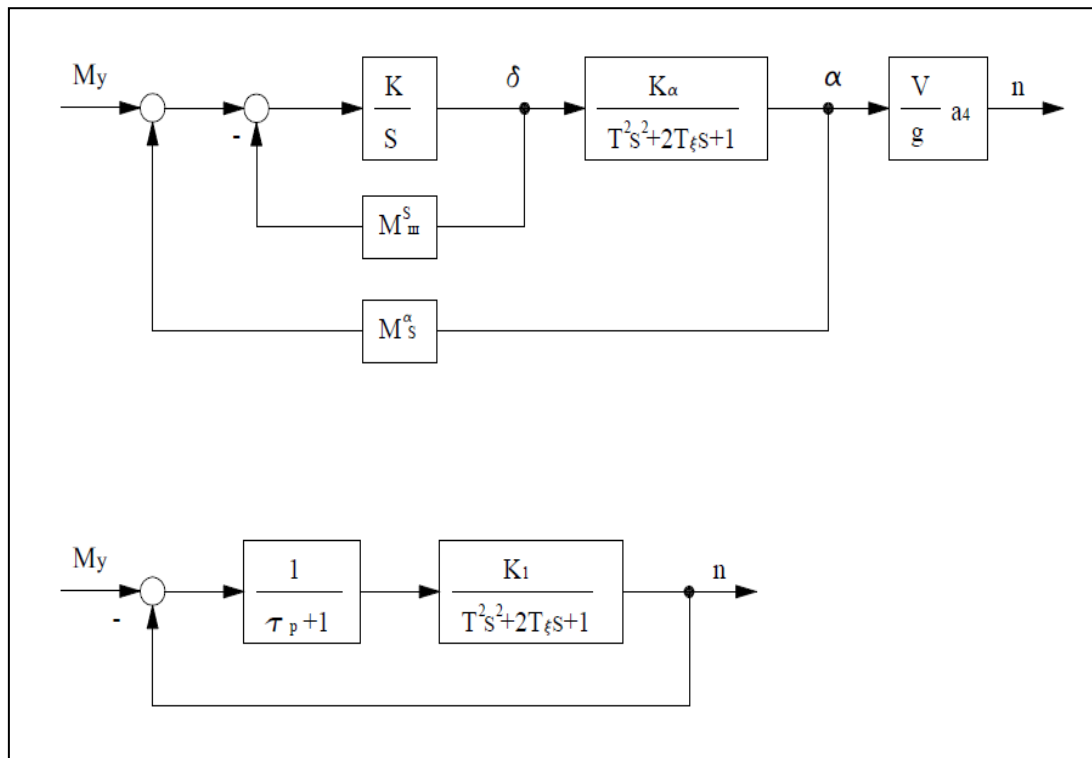
Пошто је позната максимална брзина отклона, као и грешка позиционирања, можемо израчунати појачање актуаторског система, за податак из Табеле 2.1

$$K_1 = \frac{\dot{\delta}_{\max}}{e_{st}} = 3001/s \quad (2.27)$$

Јасно је да када имамо систем трећег реда, који је усвојен као почетна апроксимација, можемо преко Хурвицовог алгебарског критеријума проверити да ли нам је систем за појачање које захтева тражена тачност актуационог система стабилан, под претпоставком да познајемо или предпоставимо динамику почетног модела актуатора, преко константи,  $T_1$  и  $T_2$ .

На овај начин познајући само основне параметре из спецификације ракете и радећи са линеарним моделом трећег реда, можемо установити да ли проблем решавамо са избором појачања или морамо додавати динамику компензатора, који ће поправити особину стабилности за дато појачање.

Главно оптерећење код ракете на управљачкој површини је позициони ли шарнирни момент. Ако посматрамо блок дијаграме на слици 2.10, видимо тренутну разлику у структури када имамо аутоплиот у контури управљања и када немамо.



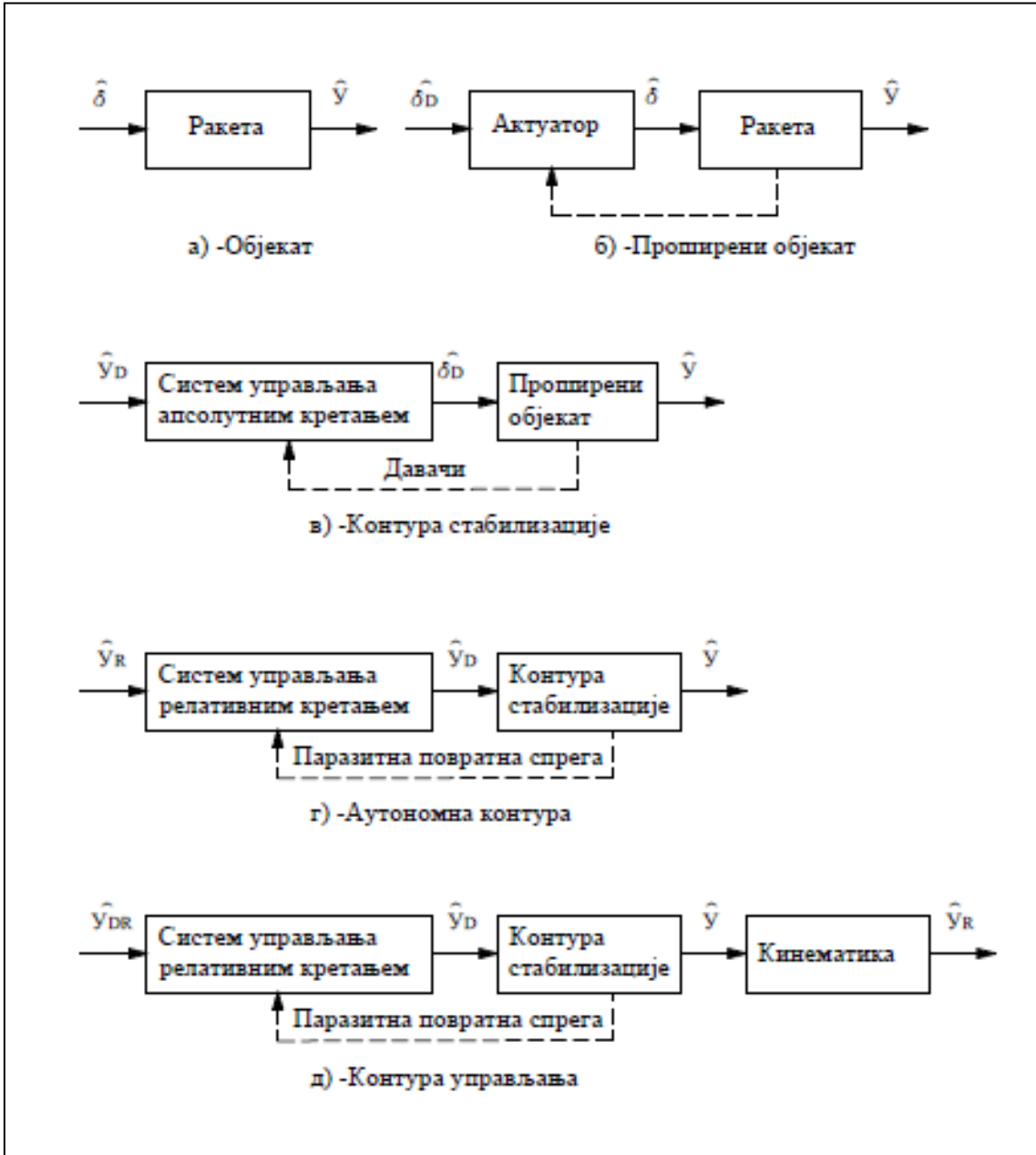
Слика 2.10-Основна структура управљања ракетом [6]

На слици 2.11 даје се структурни приказ ракете као објекта управљања. На слици 2.11а је најједноставнији структурни приказ ракете као објекта управљања. Улазна величина обухвата све компоненте положаја органа управљања, а излазна величина све параметре кретања. Нешто детаљнији структурни приказ је на слици 2.11.б где се издваја актуаторски систем. На слици 2.11, се види унутрашња повратна спрега од разних давача који учествују у процесу стабилизације кретања ракете око њеног тежишта.

Претходно показује да је ракета један од најсложенијих објеката управљања. За ову тврдњу има више разлога. Пре свега, то је математички врло сложено описивање кретања у простору када се узму сви фактори који утичу: драстична промена параметара у функцији висине-овде се пре свега мисли на отпоре кретања, сопствену фреквенцију која се мења у функцији промене више параметара, а посебно у функцији потрошње горива. Овде је то приказано знатно једноставније са циљем да се препозна актуаторски систем у унутрашњој структури ракете, слика 2.8, односно да се препозна ред математичког модела са којим ће бити повезан актуаторски модел. Даље у раду, одређена разматрања ће бити са актуатором према идеализованој динамици кретања ракете по одређеном каналу (преносна функција другог или трећег реда) а друга разматрања биће на нивоу актуатора који је повезан са флексибилним оптерећењем. На ово уводно поглавље у овом раду следи поглавље, <<4. Утицај конструкције ракете на избор основних параметра актуатора за управљање и дефиниција механичких карактеристика актуатора у почетној фази пројектовања >> које се детаљно бави

**Прилог теорији пројектовања актуатора за управљање вектором потиска ракетног мотора са флексибилним млазником**

како особине ракете у оквиру почетног развојног и балистичког пројектовања утичу на димензионисање и прелиминарни избор особина актуационог система. Овде је једначинама (2.23)-(2.27) дотакнута само особина појачања актуаторског система.



Слика 2.11-Структура ракете као објекта управљања [12]

## **2.2 Специфичности конфигурације и концепта електро хидрауличног актуатора флексибилног млазника за управљање вектором потиска ракетног мотора**

Дефинисање хидрауличне конфигурације актуаторског система без обзира што се често чини да се ради о стандардним конфигурацијама је знатно сложенији процес од прости пројектантске имплементације уобичајених структура електро хидрауличних актуаторских система, како је то приказано у уводном поглављу 1.3.

### **Енергетски део:**

Енергетски део обухвата функционални подсклоп који обезбеђује напајање разводног вентила одређеним протоком радног флуида под одређеним притиском. После дефинисања овог захтева потребно је наћи одређен компромис при избору коначног конструктивног решења према најважнијем критеријуму. За случај разматраног актуационог система у овом раду, постоји више алтернатива, за дефинисање најважнијег критеријума који представља критеријум за оптимизацију у датом случају:

1. У зависности од дужине рада ракетног мотора и реалних захтева за укупним протоком радног флуида, могуће је 100 % напајање из хидрауличног акумулатора, када он складишти енергију флуида, што представља пасивно напајање, јер је енергија претходно пре почетка рада ракетног мотора ускладиштена.
2. Ако је опредељење напајање са пумпом, онда треба анализирати да ли се користи само пумпа или пумпа плус хидраулични акумулатор.
3. Када се изабере варијанта између претходно понуђених опција у тачки 2, отвара се питање избора пумпе, у смислу да ли се ради о пумпи констатног протока или пумпи променљивог протока.
4. Претходно питање под 3 није без корелационе везе са избором погонске машине за пумпу. Ако се изабере DC мотор где се може управљати бројем обрта добијамо могућност да променљиви проток обезбедимо и са пумпом констатног протока. Пошто је тема овог рада везана за управљање вектором потиска преко флексибилног млазника, то по дефиницији значи да се ради о ракетном мотору на чврсто гориво тако да се тада отвара питање избора примарне енергије за погон пумпе. Једна од опција је да се користе врели гасови који би покретали турбину, а турбина пумпу. Друга опција је да се користи гасогенератор који би покретао турбину а она пумпу. Ако су мисије краће може се приступити и погону пумпе са DC мотором пошто тада електрични акумулатори односно батерије неће чинити значајни ставку у тежини.
5. Задња чињеница која је посебно битна при коначном избору сегмента актуаторске конфигурације који се односи на енергетски део је да ли се напаја један или више хидрауличних актуатора истовремено.

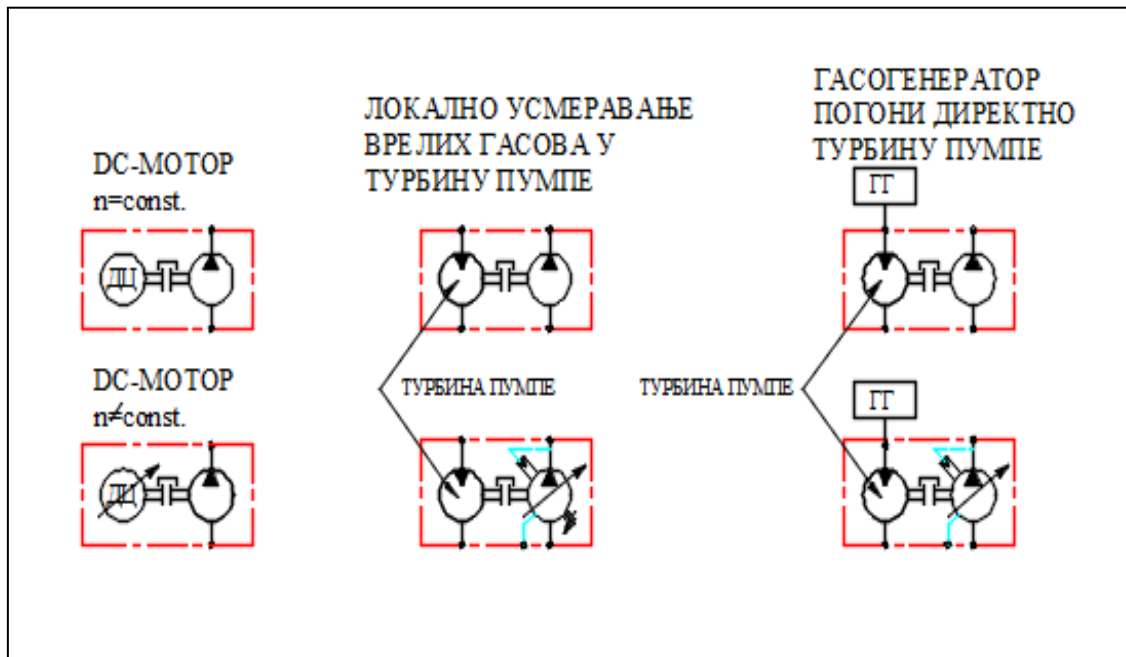
## **2.2 Специфичности конфигурације и концепта електро хидрауличног актуатора флексибилног млазника за управљање вектором потиска ракетног мотора**

## Прилог теорији пројектовања актуатора за управљање вектором потиска ракетног мотора са флексибилним млазником

Претходно наведено од 1-5, на слици 2.12, су концептуална питања формирања конфигурације електро хидрауличног енергетског дела актуатора која треба ставити у оквир следећа два критеријума:

-Лимитирана тежина и габарити слободног простора у претходној прелиминарној конструкцији ракете

-Да ли се може обезбедити жељена поузданост рада актуационог система која је такође претходно дефинисана



Слика 2.12-Преглед погонских варијанти за извор хидрауличне енергије у актуационом систему

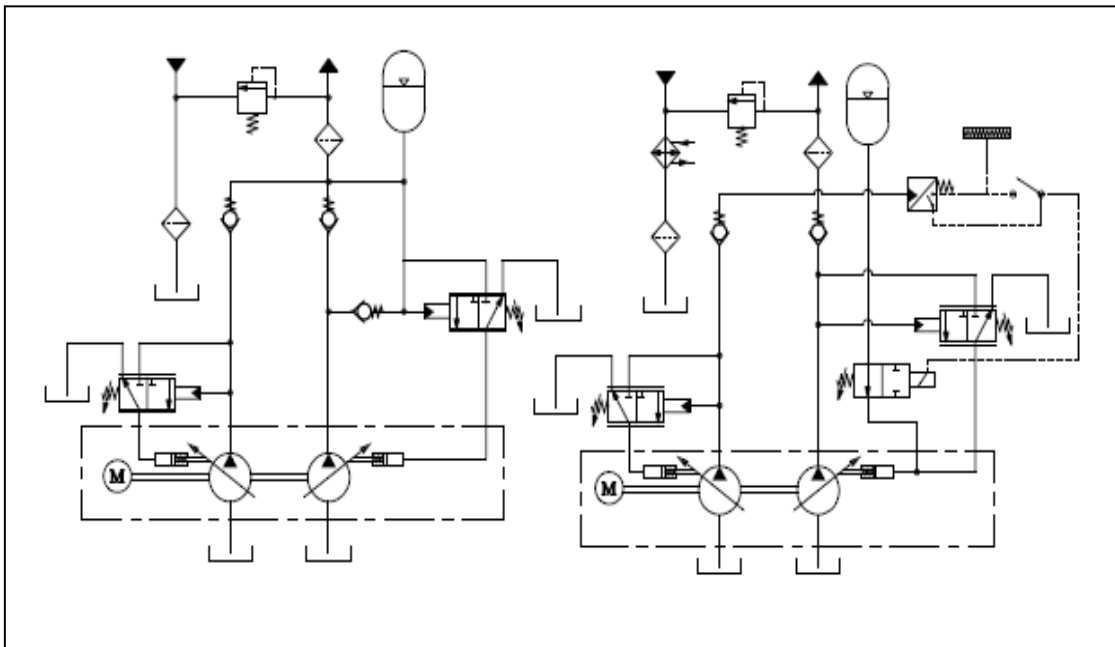
У овом раду размотриће се и једна релативно нова и у пракси мање заступљена конфигурација енергетског дела електрохидрауличног актуационог система, која се према пројектантском искуству аутора овог рада, може сматрати такође као опциона варијанта.

Основна идеја је да се користи двострујна клипнооксијална пумпа регулисана по притиску са хидрауличним акумулатором који нема примарну улогу складиштења хидрауличне енергије, већ само улогу, за коју нема алтернативног решења а то је ублажавање пулзација притиска и једну потпуно нову улогу која се може дефинисати као управљање укључењем односно искључењем друге клипнооксијалне пумпе у тандем вези, двострујна пумпа, једно кућиште и једно погонско вратило. Функционална шема предложеног решења дата је на слици 2.13 шема са леве стране, а на десној страни слике дата је верзија са давачем притиска и електронским укључивањем односно искључивањем пумпе.

### 2.2 Специфичности конфигурације и концепта електро хидрауличног актуатора флексибилног млазника за управљање вектором потиска ракетног мотора

У принципу за познату дужину рада ракетног мотора и управљачке захтеве који зависе од претпостављених поремећаја у кретању, може се дефинисати минимални и максимални проток за време трајања мисије ракете, део мисије док ради ракетни мотор.

Класичан приступ је да се тај захтевани максимални проток на одређеном притиску обезбеди оптималним балансом енергије из хидрауличног акумулатора и пумпе, на основу кога се одређује радни капацитет пумпе и хидрауличног акумулатора. Овакво пројектно решење по дефиницији подразумева опције са променљивим притиском напајања и са константним притиском напајања. Ако постоји вентил за смањење притиска, на излазу из акумулатора, разводни вентил ће се увек напајати константним притиском. У другом случају без овог вентила имамо варијацију радног притиска, чија амплитуда нам директно зависи од реалног капацитета хидрауличног акумулатора односно тежине комплетног енергетског дела актуаторског система.



Слика 2.13-Конфигурација две тандем клипноаксијалне пумпе са двопозиционим регулатором притиска

Решење које аутор предлаже у овом раду је двострујна пумпа, где су обе пумпе регулисане по притиску и са једним акумулатором, засновано је на ревизији сличног решења датог у литератури [13].

На овај начин се у сваком тренутку може обезбедити одређен проток са минималним губицима на максималном радном притиску и са компензацијом пулзација. Тада се динамика рада система не мења у току трајања мисије зависно од напајања хидрауличном енергијом. Једноставно, увек кад има захтева за радом актуатора ради једна пумпа, када су максимални брзински захтеви ради и друга

2.2 Специфичности конфигурације и концепта електро хидрауличног актуатора флексибилног млазника за управљање вектором потиска ракетног мотора

пумпа. Тренутак укључења односно искључења друге пумпе, као и искључења прве пумпе диктира хидраулични акумулатор у врло малом опсегу промене притиска, значајно мањи од онога који постоји при његовом пражњењу када складишти хидрауличну енергију.

Чињеница која је потпора оваком избору конфигурације енергетског дела електрохидрауличног актуатора је реалан напредак у конструкцији клипнооксијалних пумпи тако да пумпа може бити погоњена врло великим бројем обртаја и до 6000 о/мин, што се једноставно остварује применом гасних турбина које се покрећу директно од продуката рада ракетног мотора или независног гасо-генератора. Тада пумпе које чине тандем могу бити врло малих радних запремина, значи и пропорционално томе и малих тежина односно спољних габарита а да се и поред тога обезбеди врло широка промена протока. Напретка оваког карактера нема у конструкцијама хидрауличних акумулатора, далеко је мањи напредак композитна цев клипног акумулатора која може да смањи тежину до 50 % у односу на чињеницу да се променом погонског броја обртаја пумпе од некадашњих максималних 2000 о/мин стигло до 6000 о/мин, што је три пута повећало стварни проток за непромењен радни капацитет. Посебно треба нагласити да високи радни број обртаја и управљање са две дискретне радне запремине и константан број обртаја на улазу пумпе је прва варијанта овог решења, а друга варијанта овог решења је када је погонска машина за пумпу DC мотор где можемо регулисати број обртаја, тако да при различитим протоцима имамо додатно дискретну промену протока, што је комбинација континуалне и дискретне промене броја обртаја. У претходно поменутој првој варијанти дискретна промена радне запремине је према притиску у акумулатору или алтернативно преко запуњености на основу позиције клипа, чија промена може да се прати дискретно и аналогно. У другом случају потребно је алгоритамски дефинисати захтев за континуалну промену броја обртаја пумпе као и за дискретну. Једна од опција за генерисање промене броја обртаја је отвореност вентила за ограничење притиска. Пошто се ради о управљању где се користи пригушни систем, да би се гарантовала стабилност рада, потребно је да 15- 30 % протока буде одвођено преко вентила за ограничење притиска у резервоар у конфигурацији када се не користи хидраулични акумулатор. Тада се правилним избором вентила за ограничење притиска, и праћењем отворености вентила, преко мерења хода клипа или заптивног конуса, може генерисати сигнал на основу кога се дефинише тренутни проток. То значи да ако имамо минималне захтеве за протоком (актуатор ради око нулте номиналне тачке) пумпа може да буде погоњена минималним бројем обртаја, тако да се обезбеди само неопходни прелив преко вентила за ограничење притиска који треба да гарантује хидрауличну крутост система и компензацију цурења на разводнику. У овом случају вентил за ограничење притиска са интегрисаним мерењем хода је функционални еквивалент пројектном решењу са мерним хидрауличним акумулатором.

У поглављу 2.3 размотрена је технологија избора разводника према динамичким особинама. Овде се сада разматра избор разводника у контексту следећих захтева:

#### **2.2 Специфичности конфигурације и концепта електро хидрауличног актуатора флексибилног млазника за управљање вектором потиска ракетног мотора**



## Прилог теорији пројектовања актуатора за управљање вектором потиска ракетног мотора са флексибилним млазником

-да ли је избором главног управљачког разводника могуће решити неку од следећих експлатационих ситуација:

-механички квар (онемогућено кретање разводног клипа) – отказ разводника

-случај нестанка коадног сигнала

-алтернативна радна способност функције главног разводника

Мора се обезбедити начин за брзу и тачну детекцију механичког квара. То се најједноставније постиже на основу сигнала који генерише давач позиције на разводном клипу разводника.

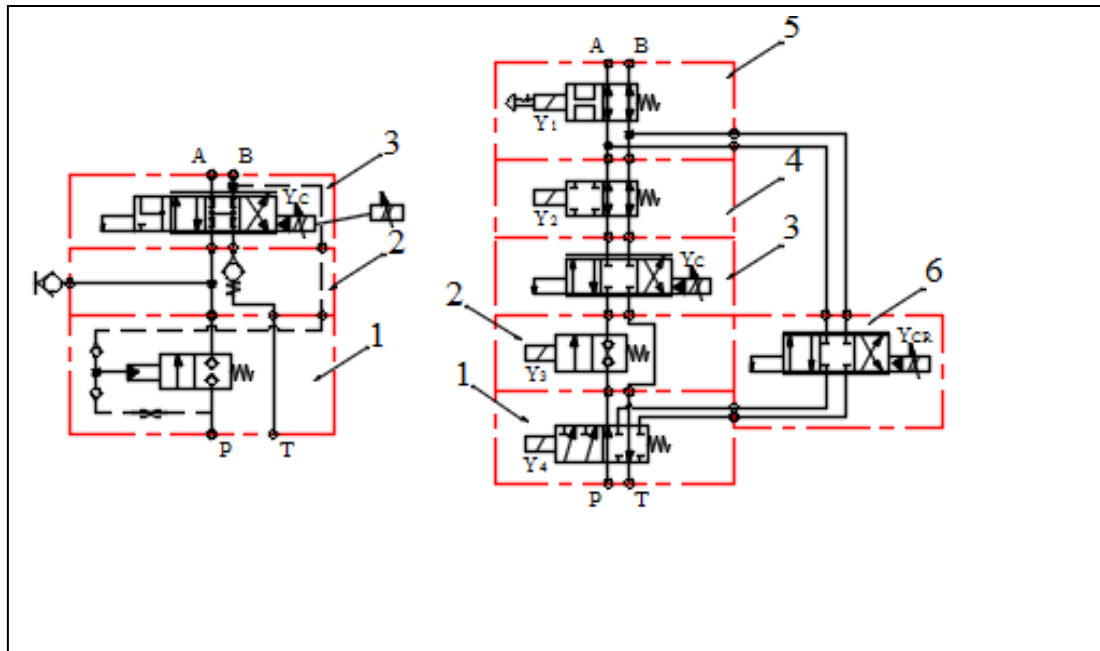
Нестанак коадног сигнала се најлакше решава у следећа два случаја:

-Ако се изабере серво разводник са покретним млазницама у првом степену и механичком повратном спрегом, тада при губитку коадног сигнала на разводнику обезбеђује се да разводни клип буде у средњем-неутралном положају дејством механичке еластичне повратне спреге. При овоме се зависно од тога колико је клипњача цилиндра била далеко од равнотежног положаја десити ситуација да флексибилни млазник остане под неким углом.

Много повољнија ситуација је ако изабрани разводник има четврти положај који одговара ситуацији када нема управљачког сигнала, који се може извести у неколико варијанти, слика 2.14, лево. У том случају може се обезбедити гарантовано враћање млазника у положај нултог угла отклоне, под дејством спољашње релаксационе силе која је настала услед деформације смицања, што је са становишта механике лета повољнији случај од претходно описаног.

Разматрање у овом поглављу се односи на електрохидрауличне актуационе погоне за веће ракетне моторе са чврстим горивом пре свега за ракете земља-земља где се актуациона снага креће до 50 kW.

### 2.2 Специфичности конфигурације и концепта електро охидрауличног актуатора флексибилног млазника за управљање вектором потиска ракетног мотора



Слика 2.14-Стандардне конфигурације разводника и помоћних вентила за електрохидраулични актуатор

Поред тога оваквим избором разводника, ако при стартовању мотора не доводимо одмах управљачки сигнал, омогућавамо једноставно померање клипњаче код аксијалног померања млазника ракетног мотора при његовом старту. У поглављу 1.3 је дато друго општије решење овог проблема, јер се не могу све конструкције разводника изводити са четвртим хаваријским положајем, нарочито не они у класичној ваздухопловној хомологацији са млазницама и моментним мотором у првом степену, на којима се најчешће инсистира у актуаторској технологији на ракетама.

Ако се тражи обезбеђење радне способности и у случају отказа разводника, постоје два приступа: Удвајање разводника идентичних перформанси и удвајање разводника тако да се обезбеде редуковане перформансе, слика 2.32 десно, позиција 6. За управљање флексибилним млазником адекватно решење је друга варијанта у смислу очекиване вероватноће отказа а и чињеница да алтернатива са редукованим динамичким квалитетом задовоља управљачке захтеве са одређеним губицима у квалитету али без нарушавања управљачког потенцијала. На слици 2.32, десна шема, приказана је потпуна конфигурација овог дела електрохидрауличног актуаторског система коју би сваки пројектант требао да има на уму када почиње да пројектује електро-хидраулични актуаторски систем и она обухвата:

-главни-основни разводни вентил, позиција 3

## 2.2 Специфичности конфигурације и концепта електро хидрауличног актуатора флексибилног млазника за управљање вектором потиска ракетног мотора

## **Прилог теорији пројектовања актуатора за управљање вектором потиска ракетног мотора са флексибилним млазником**

-изолациони вентил 1, у случају отказа главног разводног вентила, позиција 1, 2 и 4, с тим што позиција 2 има и улогу такозваног стартног вентила

-резервни главни разводни вентил, позиција 6

-хаваријски разводни вентил, позиција 5

Јасно је да у случају отказа главног разводног вентила у најрадикалнијем случају, заглављивање разводник клипа, он тада мора бити изолован. За то је потребан посебан разводник. Да би се одржала радна способност мора да постоји резервни главни разводни вентил идентичан радном или са умањеним перформансама. У случају хаваријског стања, (обухвата неки од отказа у конфигурацији електрохидрауличног актуатора или шире на ракети), главни управљачки разводник не мора имати екстремне перформансе које се тада могу тражити и то се онда решава посебним разводником који има хаваријску функцију и издвојен начин генерисања управљачког сигнала.

Претходно наведена конфигурација је максимална и она покрива 100 % обезбеђивање радне способности у случају било ког отказа на разводнику. У сваком случају доста често је оправдано да се ова конфигурација редуцира када за то постоји пројектантско оправдање.

Претходно описано су захтеви за потпуну електро-хидрауличну актуаторску конфигурацију. Свака конкретна примена даје могућност одређених редуција које се посебно разматрају у склопу пројектних захтева.

Извршни део актуационог система када је у питању флексибилни млазник је увек хидраулични цилиндар. Његово удвајање није рационално а није ни тако једноставно било да се ради о тандем цилиндру или два паралелна цилиндра. Код авионских команди лета то има смисла јер управљачке површине могу имати секцијски карактер и посебне полужне механизме који омогућавају физичко удвајање извршних делова актуатора-хидрауличних цилиндара. У случају управљања флексибилним млазником, кинематски се захтева директна веза за млазник у строго одређеном положају, два радна цилиндра морају бити један у односу према другом под 90 степени, тако да нема смисла размишљати о удвајању цилиндра. Због ограниченог уградбеног простора и техника тандем удвајања цилиндара (једна клипњача и два клипа) не може се рационално извести.

У условима кратких мисија до 200 секунди, не постоје разлози у пракси који би довели до тога да је могуће очекивати фатални отказ (типа лома) хидрауличног цилиндра односно потпуно губљење радне способности која би могла да угрози управљање вектором потиска преко флексибилног млазника. Такође и отказ типа постепеног губљења радне способности је нереалан у условина радног циклуса до 200 секунди.

### **2.2 Специфичности конфигурације и концепта електро хидрауличног актуатора флексибилног млазника за управљање вектором потиска ракетног мотора**

### 2.3 Конструктивна решења склопа за развођење радног флуида за актуаторски систем флексибилног млазника

Конструкција разводника суштински утиче на карактеристике електрохидрауличног актуационог система и неопходно ју је код сваког пројектовања детаљно анализирати.

Можда је најправилније рећи у смислу претходног наслова, прво је потребно извршити избор технологије развођења радног флуида под притиском приликом пројектовања електрохидрауличног актуатора. У пракси познато је развођење преко клипног разводника 4/3 и 4/2 и развођење преко разводника 2/2 и 3/2 са седиштем, као и развођење преко обртних разводника. Основа функција развођења подразумева, двосмерно развођење, што значи да клипни разводник треба да буду троположајни, неутрални положај и два смера развођења. (касније се показује и потреба за четвртим положајем у контексту анализе отказа у раду) Поред основне функције развођења, која се у динамичком смислу најједноставније изводи само променом два односно три положаја разводног клипа, (отворено, затворено и неутрални положај) она се може реализовати условно са бесконачним бројем различитих позиција клипа, тако да тада поред развођења управљамо и протоком радног флуида, односно различитим пригушењем у функцији од положаја разводног клипа односно проточне површине. Променом брзине кретања разводног клипа, додајемо и другу помоћну функцију развођења, а то је управљање променом брзине промене протока, односно убрзањем извршног дела актуатора. За практичну реализацију претходно наведене две додатне функције које реализује развођење радног флуида, потребан је електронски пропорционални претварач који управља пропорционалним електро механичким претварачима, који покрећу разводни клип, типа: пропорционални магнет, torque мотор, force мотор или voice coil. Да би се реализовало двосмерно развођење флуида реализовало, неопходно је да се користи:

- клипни разводник са две или више разводних ивица, или
- 4 разводника 2/2 са седиштем, или
- 2 разводника 3/2 клипни или са седиштем, или
- обртни троположајни разводник

Претходно наведено дефинише конвенцијалне технике развођења радног флуида под притиском. Поред технологије развођења, пресудно на динамичке перформансе разводника утиче конструкција претварача електричног управљачког сигнала у линеарно или обртно кретање, који омогућава померање разводног клипа или другог елемента развођења. Најбоље динамичке перформансе у претходном смислу могу да обезбеде клипни разводници. Они могу бити једностепени или више степени зависно од потребног протока. Повећавање броја степена развођења по дефиницији смањује брзину разводника. Зато је данас развој усмерен на израду електромеханичких претварача са што већим силама и брзинама померања радне котве како би се и за веће протоке могли користити једностепени клипни разводници или двостепени али тако да је први степен типа млазница-заслонка.

### 2.3 Конструктивна решења склопа за развођење радног флуида за актуаторски систем флексибилног млазника

## Прилог теорији пројектовања актуатора за управљање вектором потиска ракетног мотора са флексибилном млазником

За избор разводника када су у питању актуатори за ваздухопловну примену, посебно долази до изражаја стара првобитна конструкција серворазводника, двостепени разводник са разводним клипом и покретном заслонком (flapper pozzle) којом управља посебна конструкција електромеханичког претварача која се назива *torq* мотор, која између две фиксне млазнице својим померањем мења притисак на чеоним површинама главног разводног клипа, и тако доводи до његовог померања.

Данас, и ако ова конструкција потиче још из 1949., када је патентирана, где је власник патента, W. Moog, (умро 1984), основао и данас најпознатију светску компанију у области технологије актуационих система, предмет је даљих унапређења и нових модификација. Две су главне модификације на којима се тренутно ради. Прва, је да се направи серво разводник са два клипа а друга је да се користе пиезо електрични актуатори који би повећали брзину дејства тако што би они померали разводну чауру у супротном смеру од померања клипа чиме би се добило на брзини достизања максималног проточног отвора. Прва модификација решава један од недостатака клипног разводника који се назива „везане ивице“ код симетричних конструкција. То значи да за колико се отворио проточни отвор А толико се отворио и проточни отвор Б. За неке врсте примена захтева се да не буде ове једнакости, (како би се избегле додатне компоненте у конфигурацији електрохидрауличног актуатора) тако да тај проблем решава серво-разводник са два клипа. Даље повећавање брзине дејства како је претходно описано са допунским пиезо актуатором за померање разводне чауре у супротном смеру од разводног клипа је тренутно конструктивно решење које се развија на неким европским универзитетима и лабораторијама али још увек није у серијској производњи, за разлику од серво разводника са два клипа који је већ више година у серијској производњи. Постоје и два решења, где се разводни клип помера знатно сложенијим електромеханичким претварачима. Први користи корачни мотор и механички пар завојно вретено и навртка а други подразумева класични ДЦ мотор са адекватним механичким претварачем. Ова конструктивна решења се најчешће изводе у малим серијама. Јасно је из претходно наведеног да су проточни капацитет и брзина дејства две супротне ствари, порастом једне од њих друга опада. Овај проблем приликом конструкције хидрауличног актуатора са цилиндром, може се решити и на следећа два конструктивна начина, која се заснивају на коришћењу постојећих стандардних серво разводника:

-Прво решење подразумева да једним цилиндром управљају два серво разводника истих динамичких особина који морају радити синхроно.

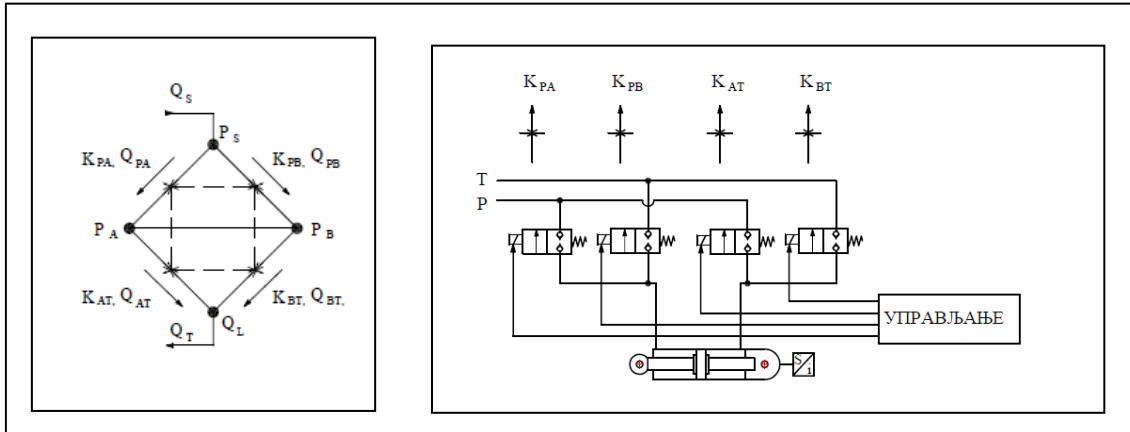
-Друго решење подразумева да једним цилиндром управљају два серво разводника различитих динамичких особина, један већег називног протока, спорији а други мањег називног протока а знатно бржи.

Претходно наведено дефинише посебне особине електрохидрауличних актуатора, а то су високи капацитет (high capacity actuator) и утиче на особину актуатора која га означава као актуатор високих перформанси (high performance actuator). У првом случају добијамо само актуатор веће брзине а у другом са два разводна вентила, чији номинални протоци могу да се разликују за 10 пута (ред величине), на пример ако користимо два разводника, један номиналног протока 40 л/мин, а другог 4 л/мин, јасно је да за тачност рада је важан хистересис разводника мањег

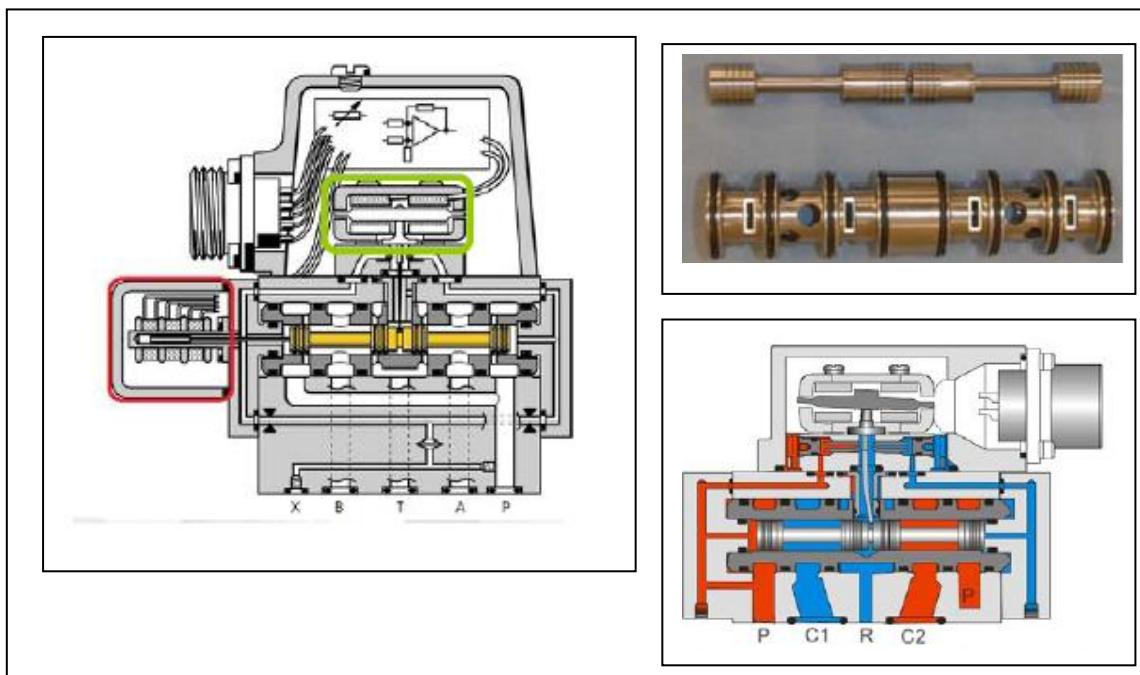
### 2.3 Конструктивна решења склопа за развођење радног флуида за актуаторски систем флексибилног млазника

## Прилог теорији пројектовања актуатора за управљање вектором потиска ракетног мотора са флексибилном млазником

номиналног протока, 1 % од 4 л/мин, је 0.04 л/мин, а до већег разводника је 0.4 л/мин, када су разводници бирају у истој класи тачности.



Слика 2.15-Преглед основних технологија развођења радног флуида под притиском



Слика 2.16-Класична конструкција серво разводника[14], [15], [16]

У оба претходно наведена случаја постоје захтеви за синхронизацију који се посебно обезбеђују, у првом случају један серво разводник мора бити са негативним преклопом а у другом постоје две опције управљања..

Директан избор разводника се врши на основу два критеријума, сваки обухвата неколико подкритеријума који се на крају уливају у јединствени критеријум.

Приликом избора разводника први критеријум је везан за димензионисање, где се одређује номинални проток и притисак као и номинални пад притиска. У

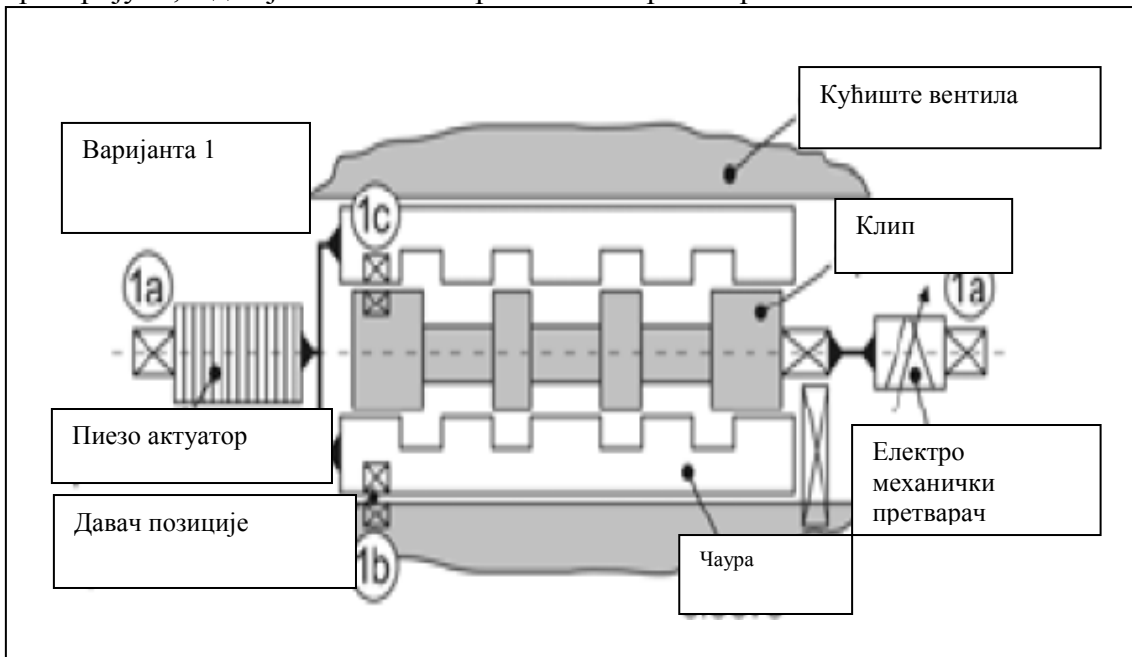
### 2.3 Конструктивна решења склопа за развођење радног флуида за актуаторски систем флексибилног млазника

## Прилог теорији пројектовања актуатора за управљање вектором потиска ракетног мотора са флексибилном млазником

окувиру овог критеријума разматрају се губици разводника у нули, то јест цурење у нули.

Друга група критеријума се односи да следеће чињенице: пропорционални разводник са два магнета, пропорционални разводник са једним магнетом (force мотор), серво разводник (flapper nozzle или jet type) са механичком или електричном повратном спрегом, види слику 2.15 и слику 2.16. Развођење може бити, са позитивним, негативним или нултим преклопом као тип статичке карактеристике померање разводног клипа-проток. Позитиван преклоп се не препоручује за позиционе системе, осим у случајевима када се тражи велика хидрауличка крутост система. Ту су и коефицијент појачања по протоку и коефицијент појачања по притиску, који директно зависе и од изабране конструкције разводног клипа. Поред претходно наведеног неизбежна је и проблематика положаја разводног клипа у случају губитка електричног напајања или управљачког сигнала, што се сматра основним отказима у раду серво разводника као и проблематика заглављивања разводног клипа. Претходно наведено се касније разматра у овом поглављу.

Из претходног се види да је у другој групи постоји велики број објективно важних критеријума, од којих се сваки мора пажљиво разматрати.



Слика 2.17-Класична конструкција серво разводника са додатим пиезо претварачем, [16]

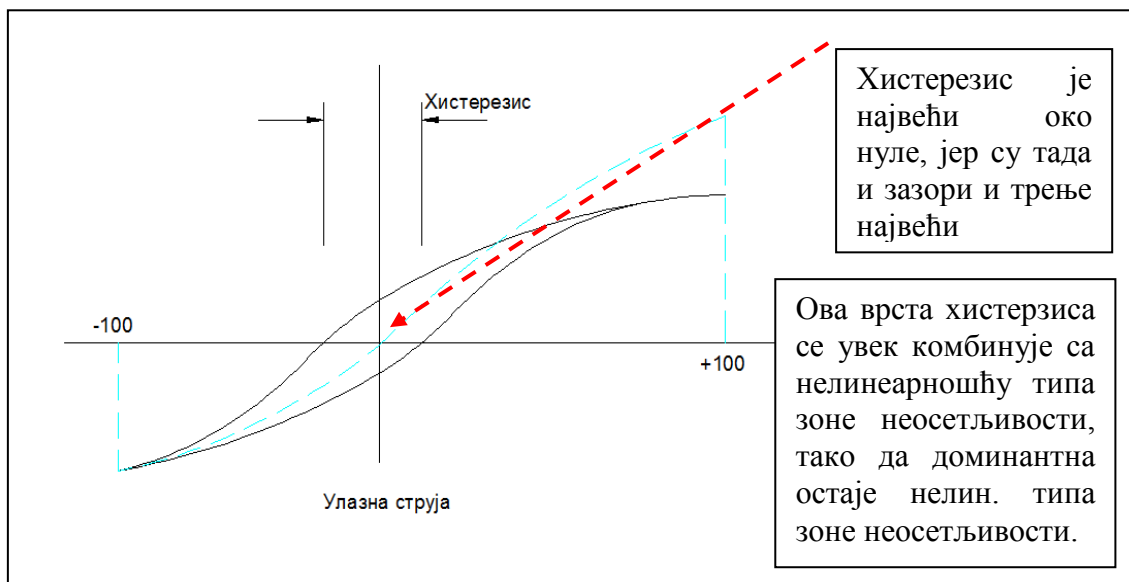
Прво морамо изабрати разводник који задовољава по брзини дејства за дефинисан номинални проток, затим се морамо одлучити за тип преклопа, у сваком случају најбоље је решење нулти преклоп, који гарантује линеарну статичку карактеристику, али ако се тражи већа статичка крутост актуационог система предност има разводник са позитивним преклопом.

Основни склоп који треба да помери разводни клип, је посебан актуатор (електро механички претварач) који треба да оствари позиционирање са одређеном

### 2.3 Конструктивна решења склопа за развођење радног флуида за актуаторски систем флексибилног млазника

брзином и силом. Данас ред величине сила иде до 4000 N, брзине до 300 мм/с а реални ходови за протоке до 100 л/минут од 500 до 800 микрона.

Питање избора разводника углавном се своди на избор готових пројектних решења из серијске производње, готово да не постоји потреба да се раде посебне модификације за оптимизацију примене. По мишљењу аутора овог рада, и ако је развој и пратећа производња у задњих 30 година имала огроман напредак, данас ипак не постоји таква понуда серијских конструкција разводника тако да могу да задовоље све евентуалне захтеве пројектанта актуационог система. Да парадокс буде већи, због високе цене нискосеријске производње и генералне глобализације и понуде на тржишту, пре 10-15 година је постојало више различитих типова свих врста разводника у домену пропорционалне и серво технике. Овај недостатак се данас решава само по једном критеријуму, а то је избор бржих разводника са потпуно линеарном карактеристиком и онда је тежиште пренето на решавање пројектантских проблема кроз синтезу управљачких алгоримата, а не да на пример постоје разводни клипови са више различитих појачања по протоку у функцији померања, што се рад решава кроз синтезу управљања. У основној спецификацији серво разводник има низ особина које се специфицирају и које су као такве већ делови најчешће делови војних и ваздухопловних стандарда. Овде се неће те особине посебно разматрати, детаљно су дате у литератури [14],[15],[17] али ће се нагласити да је најважнија особина хистерзис разводника, јер он у себи, својом графичком приказом обухвата више особина, од којих су главне, поновљивост и линеарност, тако да можемо рећи да нам хистерзис разводника приказује тачност његовог рада. Типична особина хистересиса је приказана на слици 2.18.



**Слика 2.18-Главна особине разводника, хистересис у коју је укључена поновљивост, симетрија и линеарност**

Избор разводника, пре свега његовог средњег положаја зависи да ли се више актуационих система напаја из једног извора или само један. У сваком случају најповољнији случај је један разводник - један извор хидрауличног напајања. Ово некада није случај, па можемо рећи да то није случај ни када је у питању

### 2.3 Конструктивна решења склопа за развођење радног флуида за актуаторски систем флексибилног млазника



## Прилог теорији пројектовања актуатора за управљање вектором потиска ракетног мотора са флексибилном млазником

електрохидраулични актуатор за флексибилни млазник. Пошто на једном млазнику, тада постоје два актуатора за два правца, (један за пропиње а други за скретање) а да би се обезбедила и ротација то јест ваљање, неопходан је још један актуатор на другом млазнику који би радили несиметрично. Значи по једној ракети, било да има један ракетни мотор са више млазика или више мотора са једним или више млазника, минималан број хидрауличних актуатора је 3, што значи због рационализације тежине, најчешће се три разводника се напајају из једног извора хидрауличне енергије, што диктира средњи положај разводника-затворен центар.

Једна новина која се данас разматра на нивоу развојних задатака а у принципу допуњава функцију развођења хидрауличног флуида је уградња одређеног броја пиезо актуатора на предњу и задњу страну разводног клипа, слика 2.17, који би својим малим померањем преко измене компресибилности уља, променом притиска у комори хидрауличног цилиндра, вршили корекцију позиције клипњаче хидрауличног цилиндра, другим речима поправљали резолуцију позиционирања. У сваком случају ова новина може бити актуелна за примену на актуаторима за флексибилни млазник пре свега из простог разлога јер постоји релаксациони момент у флексибилној вези, који изазива релативно брзу промену спољне силе на актуатору, што у оквирима постигнуте крутости комплетног актуационог система, може да изазове промену позиције клипњаче.

Технологија развођења радног флуида под притиском са 4 разводника са седиштем 2/2 је настала за потребе реализације склопова за развођење релативно великих протока уља, од 3000 до 5000 л/мин. Такви захтеви не постоје на актуаторским системима за ваздухопловне примене, али постоје код хидрауличних преса и хидрауличних чекића на машинама за обраду материјала. Ова технологија развођења сада добија и други смисао чињеницом да су развијени и изузетно брзи вентили 2/2 са седиштем за мање протоке, тако да се отвара питање њихове примене и за актуационе система у ваздухопловству из следећих разлога:

-Реализација двосмерног развођења са 4 вентила 2/2 са седиштем нема проблем са губицима типа цурења у нули који има сваки клипни разводник

-Дозвољава знатно дуже мировање актуационог система, је не постоји проблем такозваног „зарастања разводних ивица“ који постоји код клипних разводника као последица малог радијалног зазора где уљни филм у дужем мировању лепи клип за разводну чауру и онемогућава га да на први управљачки захтев дође до померања. Ово се делимично решава што мањим садржајем ваздуха у уљу који примарно утиче на особину уља да оксидише и тако добије лепљива својства.

-Не постоји проблем „везаних ивица“, тако да се може обезбедити несиметрично развођење уља.

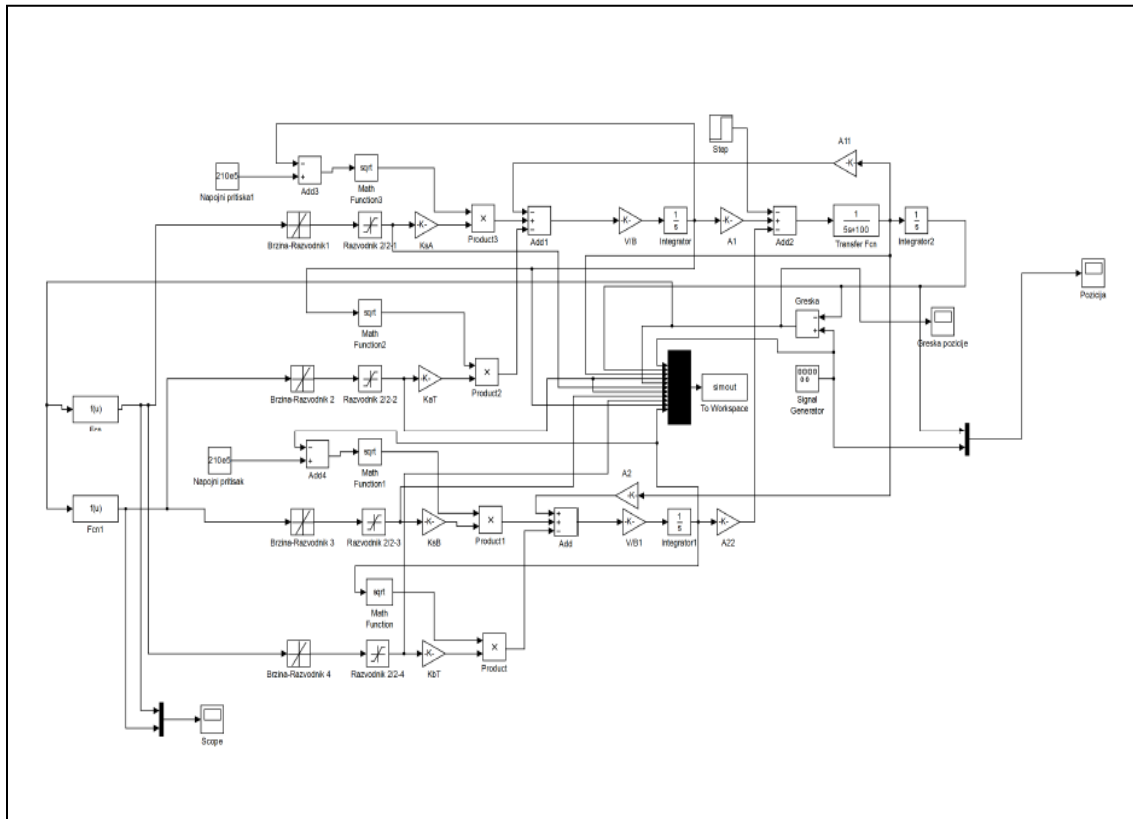
Поред тога обзиром да се у овом случају зависно од управљачких сигнала могу извести различите везе комора цилиндра у неутралном положају са напојним и повратним водом, може се решити проблем да у одређеном тренутку се може обезбедити кретање клипњаче цилиндра на извлачење приликом аксијалног померања флексибилне везе код почетка рада ракетног мотора. (претходно

### 2.3 Конструктивна решења склопа за развођење радног флуида за актуаторски систем флексибилног млазника

## Прилог теорији пројектовања актуатора за управљање вектором потиска ракетног мотора са флексибилном млазником

анализирано раскрућење цилиндра се на овај начин решава најједноставније могуће)

У сваком случају ради се и о знатно јефтинијој конструкцији разводника, тако ако су динамички захтеви до 2-3(10) Hz, у сваком случају има смисла анализирати и ово конструктивно решење за технологију развођења. У овом раду предлаже се да се дата анализа прво уради на симулационом моделу који је приказан на слици 2.19, а резултати обезбеђивања синусног кретања фреквенцијом од 1 Hz на слици 2.20 и са синусном побудом од 2 Hz, слика 2.21.

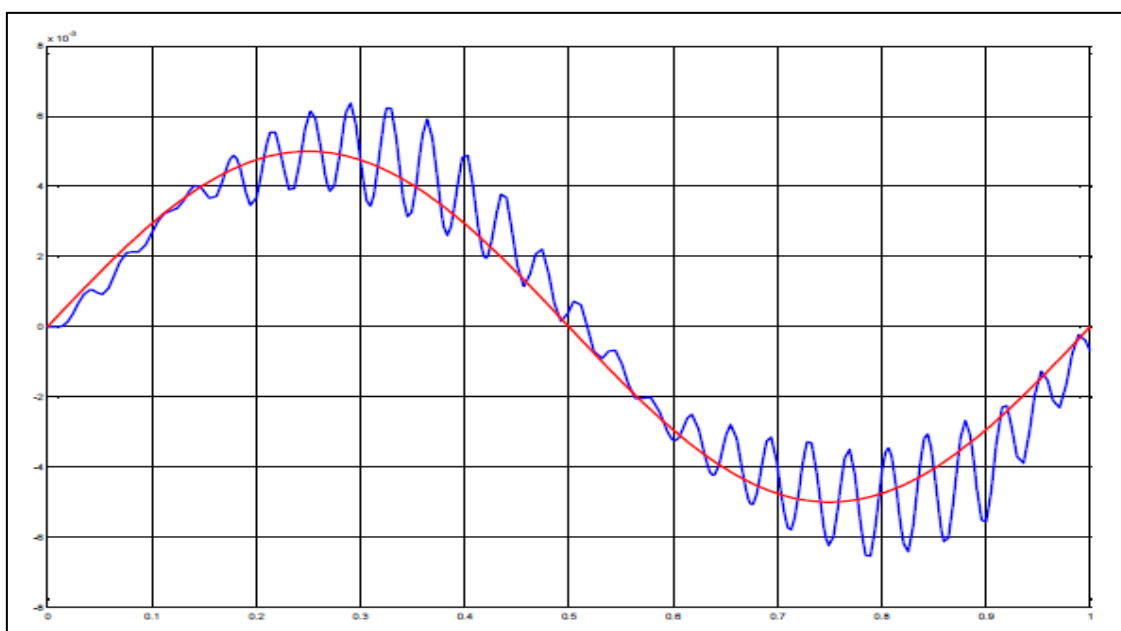


Слика 2.19-Симулациони модел у Матлабу (Симулинк)

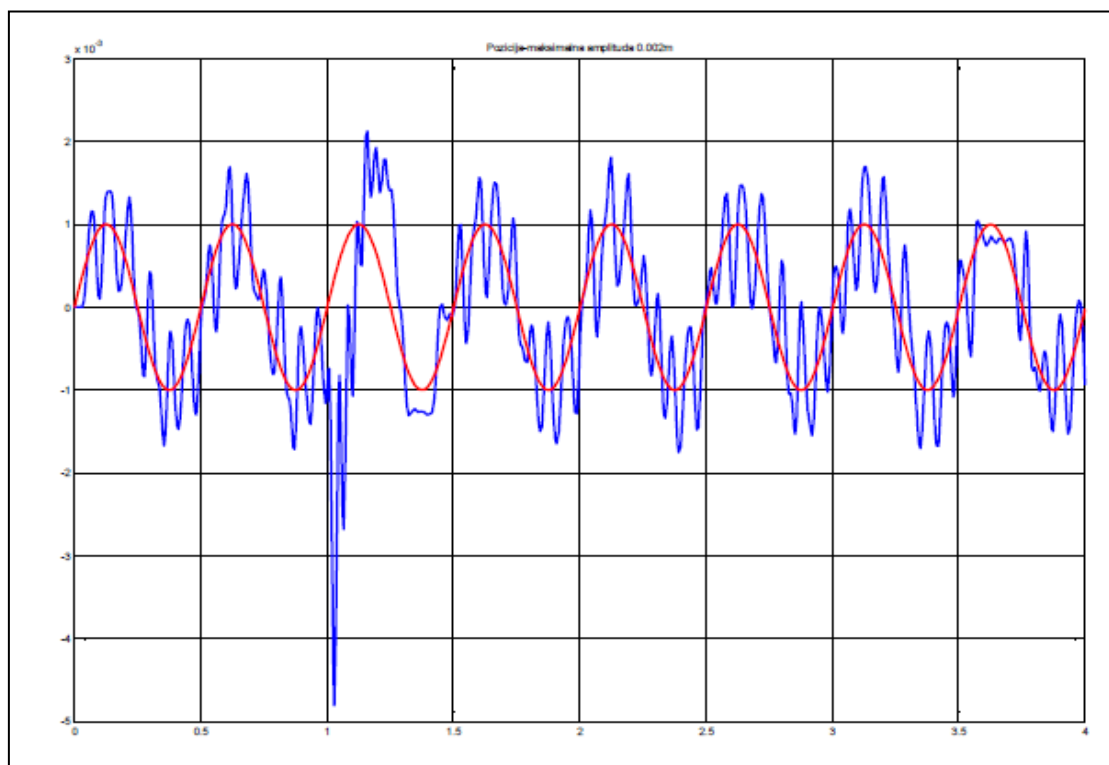
Слике које ислутрују синусни одзив у овој конфигурацији, показују високу нечлинеарну природу овакве конфигурације за развођење течности. Симулациони резултати да је фиксна симулациона структура веома осетљива на промену фреквенције и амплитуде улазног синусног сигнала. Да би се у овој конфигурацији за развођење течности добили знатно бољи резултати од овде приказаних, пракса показује да су неопходни нестандрдни, знатно бржи, нормално затоврени разводници 2/2.

### 2.3 Конструктивна решења склопа за развођење радног флуида за актуаторски систем флексибилног млазника

Прилог теорији пројектовања актуатора за управљање вектором потиска ракетног мотора са флексибилном млазником



Слика 2.20-Резултати симулација технологије развођења са 4 2/2 разводника са седиштем, 1 Hz, 0.005 м

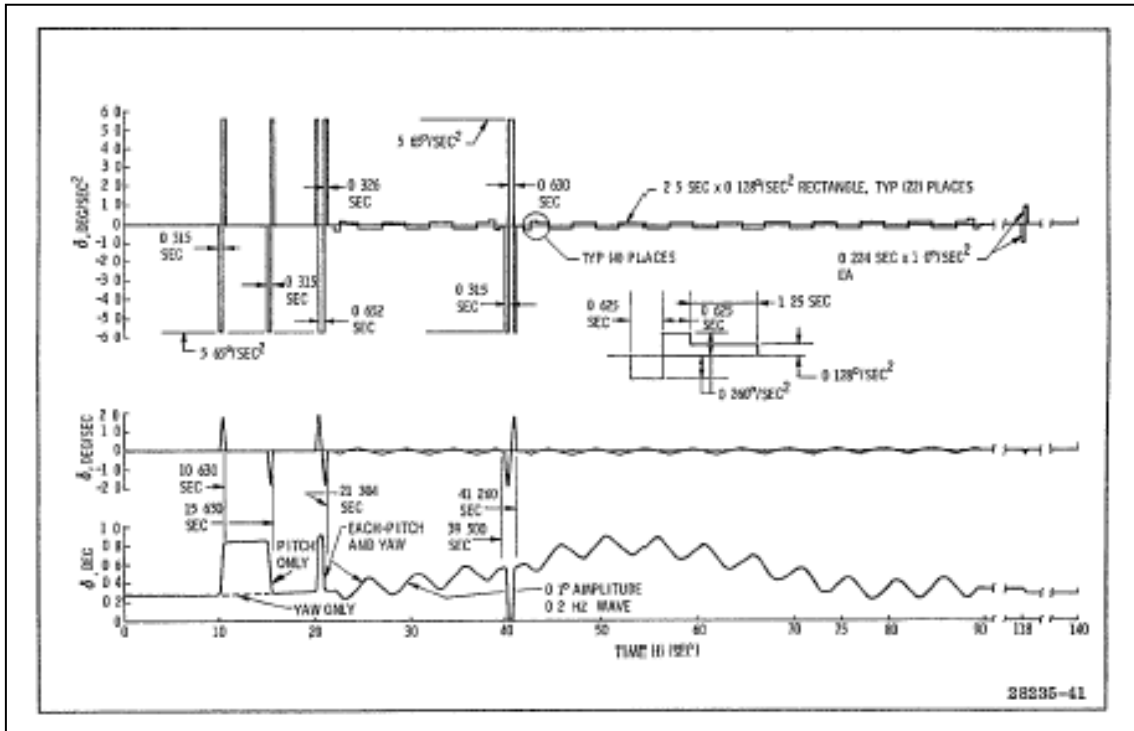


Слика 2.21-Резултати симулација технологије развођења са 4 2/2 разводника са седиштем, 2 Hz, 0.001 мм

2.3 Конструктивна решења склопа за развођење радног флуида за актуаторски систем флексибилног млазника

## 2.4 Спектар управљачких дејстава за актуациони систем управљања флексибилним млазником

У расположивој литератури нађен је само један реалан спектар управљачког сигнала за управљање углом закретања флексибилног млазника. Ово је драгоцено како би се могли дефинисати сигнали за екпериментални рад и за симулационо тестирање. Спектар сигнала је дад на слици 2.22:

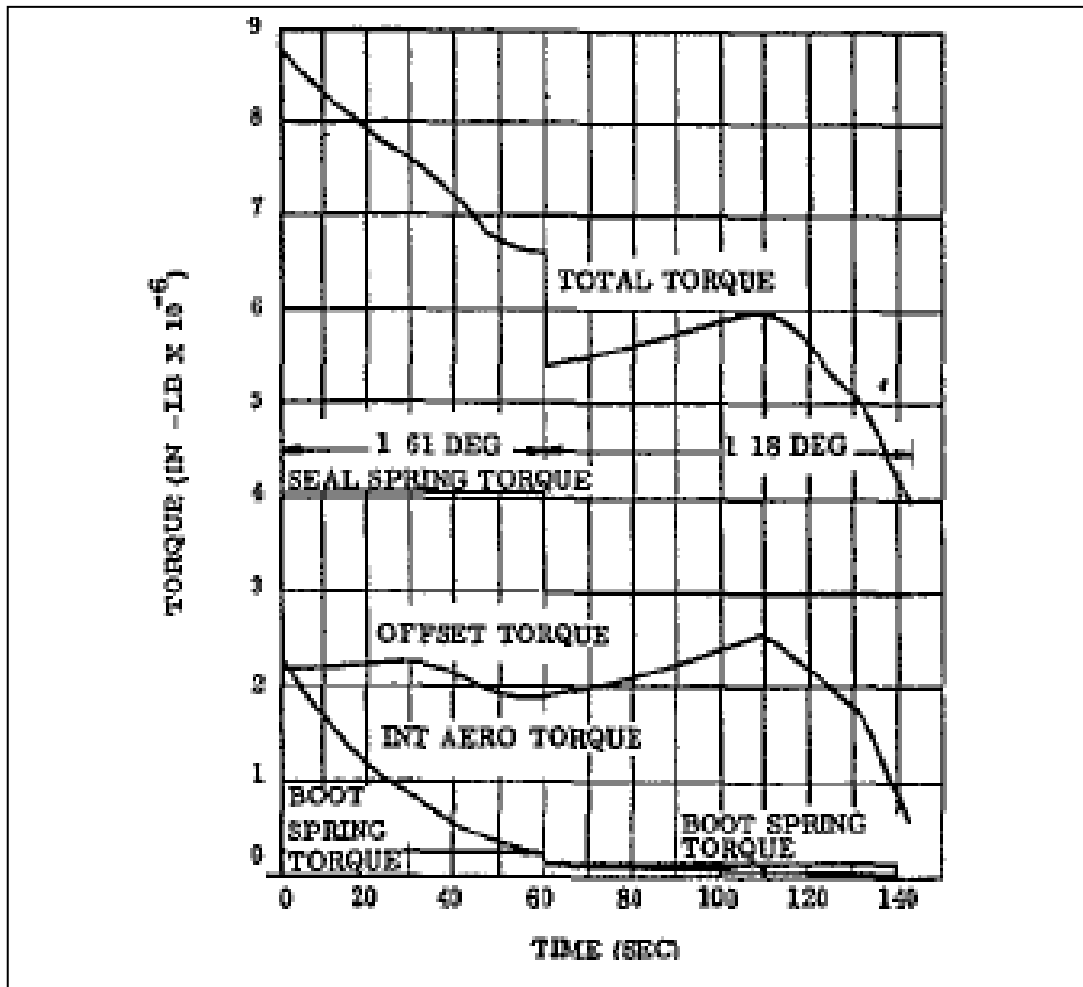


Слика 2.22 Спектар управљачког сигнала [18]

Оно што је важно запазити са претходне слике да се брзина мења по систему максималног убрзања па максималног успорења, значи нема стационарне брзине кретања приликом закретања флексибилног млазника.

Приликом тестирања актуатора, у сваком случају користи се сигнал одскочне функције, синусни сигнал и нагибни сигнал. То је стандард за управљање актуаторским системима док код процесног управљања једино има смисла користити улазни сигнал типа одскочне функције. Претходна слика показује да када имамо само дејство управљачког сигнала за пропињање а затим комбиновано и за пропињање и скретање, знатно су мање амплитуде, што јасно говори да се тада ради о стабилизацији а не о програмаском управљању. Из карактера убрзања, које има готово импулсни карактер јасно је да није лако говорити о директном управљању по убрзању, бар према горе наведеном спектру управљачког сигнала. Из истог извора [18] дат је и карактер момента оптерећења флексибилног млазника који приказује карактер промене управљачког момента, на слици 2.23:

## 2.4 Спектар управљачких дејстава за актуациони систем управљања флексибилним млазником

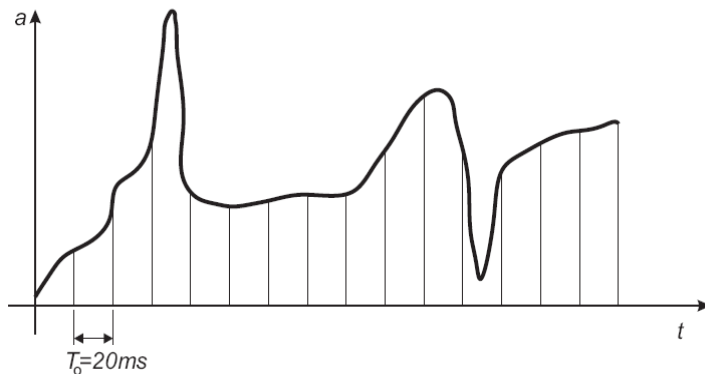


Слика 2.23 Моментно оптерећење од флексибилног млазника [18]

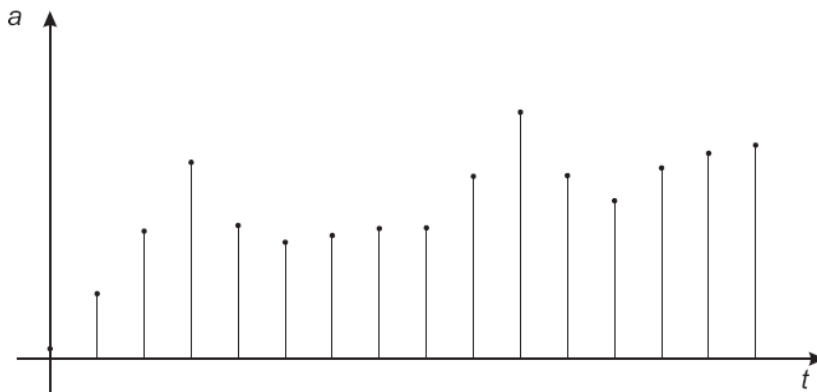
Претпоставимо да имамо запис жељене путање ракете у свакој стотом делу секунде. То значи да информацију о жељеном положају тежишта ракете из управљачког рачунара добијамо 100 пута у секунди и претпостављамо да су то временски еквиливатне тачке. На дијаграму на слици 2.24, приказан је теоријски пример жељене позиције актуатора која одговара жељеној путањи ракете. На слици 2.25 приказане су дискретне тачке. Ако претпоставимо да је пропусни опсег ракете до 2 Hz, да динамика актуатора са сигурношћу не би утицала на динамику лета ракете, сматраћемо да је пропусни опсег актуационог система 20 Hz. То значи да актуациони систем може да и до двадесет пута промени жељену вредност позиције актуатора. У том случају периода одабирања мора бити по Шенонској теореме бар два пута већа од најбрже промене сигнала који се дискретизује. То значи да би у претпостављеном случају морали минимално 40 пута у секунди да узоркујемо дискретни сигнал о жељеној позицији. Усваја се 100 пута у секунди пошто смо претходно навели да је 40 пута у секунди минимална вредност.

#### 2.4 Спектар управљачких дејстава за актуациони систем управљања флексибилним млазником

## Прилог теорији пројектовања актуатора за управљање вектором потиска ракетног мотора флексибилним млазником



Слика 2.24-Стварне вредности путање хидрауличног актуатора (пример)



Слика 2.25-Дискретне вредности позиције електро хидрауличног актуатора

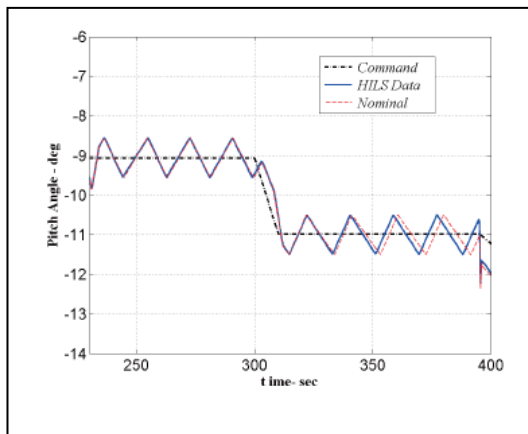
Претходно наведено говори да се мора прецизно дефинисати квалитет интерфејса између управљачког рачунара који задаје позиције актуационог система и рачунара који прима тај сигнал и генерише управљачки сигнал ка појачивачу серво разводника.

На слици 2.26 која дат је приказ једног реалног управљачког сигнала са тестирања актуационог система по технологији HILS (енгл: Hardware in Loop Simulation), а на слици 2.27 стварни сигнал снимљен у лету, преузето из рада [19]. Посебно су важне чињенице, дефинисане у литератури [19], а односе се на разматрање параметара лета ракете Вега, после обављеног лета:

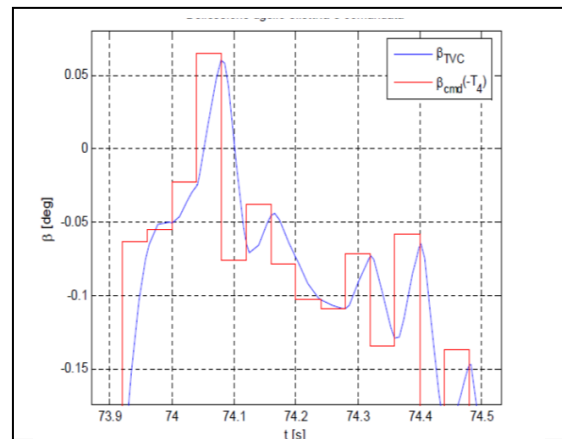
- Периода одабирања од 40 мили секунди није довољна у поређењу са динамиком ракете
- Математички модел управљања вектором потиска мора бити под филтером (улаз-излаз)
- Динамика управљања вектором потиска није довољно брза за дату периоду одабирања, али се за време периоде одабирања не може сматрати да је угао флексибилног млазника константан.
- Такође и за време периоде када се врши филтрирање сигнала, не може се сматрати да нема закретања млазника

### 2.4 Спектар управљачких дејстава за актуациони систем управљања флексибилним млазником

## Прилог теорији пројектовања актуатора за управљање вектором потиска ракетног мотора флексибилним млазником



Слика 2.26 Реални управљачки сигнал-тестирање у технологији HILS, [19]



Слика 2.27 Реални управљачки сигнал-снимак из реалне летне мисије, [19]

### 2.4 Спектар управљачких дејстава за актуациони систем управљања флексибилним млазником

### 3.1 Избор конструктивног концепта пројектног решења актуатора за флексибилни млазник

Приликом пројектовања актуационог система за неки објекат управљања па тако и за флексибилни млазник ракетног мотора, прво питање које се поставља је избор концепта конструктивног решења, између електро механичког, електро хидрауличног и електро пнеуматског. Зависно од улазних података, овај избор некада може бити лак и једнозначан без дилема, а некада практично одлучују финансије за које концепт актуационог система се одлучујемо.

Полазна претпоставка је да сваки концепт може да задовољи динамичке захтеве, брзину одзива, пропусни опсег и тачност у раду, тако да претходно наведено не улази у критеријуме за селекцију.

Критеријуми за селекцију се дефинишу на следећи начин:

1. Први критеријум је густина снаге: колико киловата излазне снаге добијамо по килограму тежине актуационог система. Врло често је цена корисног терета по килограму један од главних критеријума за избор ракете за одређену намену.
2. Други критеријум је могућност краткотрајног појачавања излазне снаге, односно разлика између номиналне снаге (снага према којој се актуациони систем димензионише) и краткотрајног преоптерећења.
3. Крутост система, статичка и динамичка, позициона као и крутост брзине према оптерећењу.
4. Могућност флексибилне интеграције, то јест лаког размештања елемената актуационог система приликом коришћења простора за уградњу.
5. Теоријска поузданост система.
6. Одржавање и радни ресурс.
7. Губици у систему.

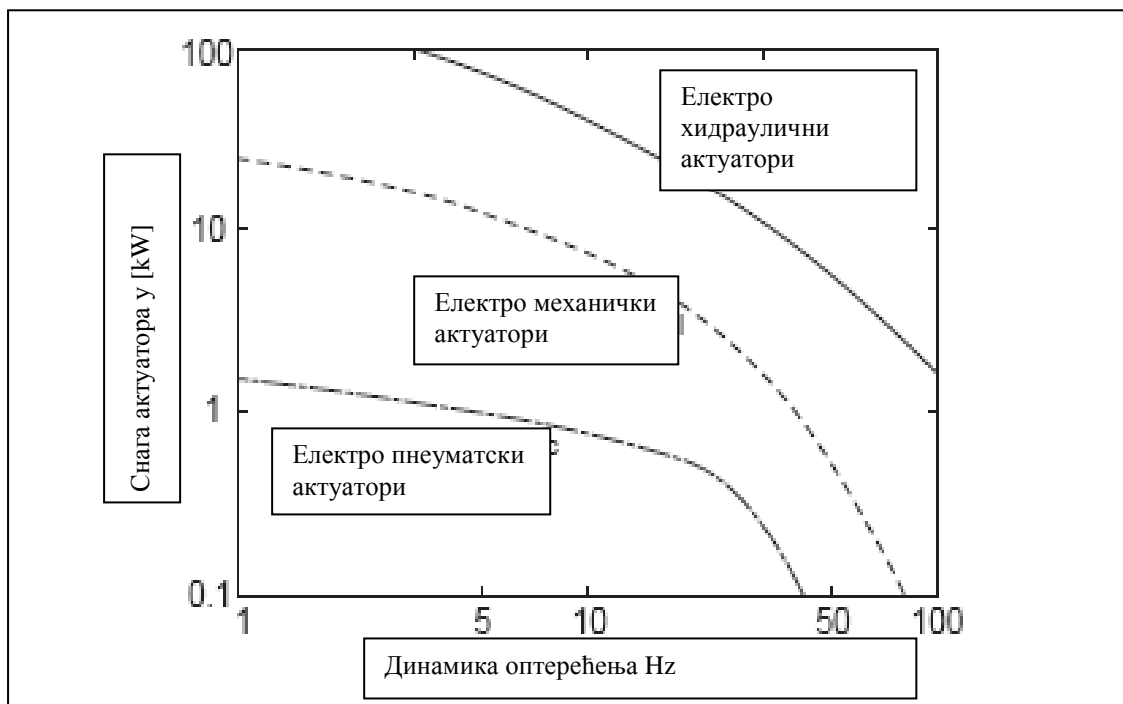
Први критеријум узима у обзир тежину система заједно са енергетским извором. У сваком случају електро хидраулични актуациони системи имају највећу густину снаге по јединици тежине. Електро механички системи за дуже мисије захтевају велики капацитет електро батерија док пнеуматски системи могу да најлакше (у најмањем простору и са најмање губитака) складиште напојну енергију за рад.

Други критеријум је најповољнији код електро хидрауличних актуационих система јер овај однос може бити и 1:3 док код електро механичких актуационих система је то знатно ниже. Код пнеуматских актуационих система је симболичка могућност краткотрајног повећања снаге. Јасно је да увек треба дефинисати што мању номиналну снагу а да се задовоље сви захтеви који се постављају пред актуациони систем. Једноставно, у пракси, електро мотори као елементи електро механичких актуатора се димензионишу на максимално оптерећење, док се хидрауличне пумпе, односно мотори који њих покрећу, димензионишу на просечно



оптерећење посебно када актуаторски систем има у конфигурацији и хидраулични акумулатор.

И трећи критеријум даје предност електро хидрауличним системима, јер су по питању крутости најприхватљивији. У овом критеријуму је још једна значајна предност електро хидрауличних актуатора: одржавање максималне силе са малом ангажованом снагом (пумпа регулисана по притиску, хидраулично забрављавање,...) док код електро механичких система је то могуће уз максималну снагу то јест потрошњу електро енергије. У овом случају долази до великог ризика од прегревања електро механичког актуатора, односно електро мотора. Да би се обезбедила крутост електро механичког актуатора потребно је систему додати одређене склопове за забрављавање или искористити конструктивну опцију самокочења редукторског склопа. Код електро хидрауличног актуатора то је решено разводником, опционо са позитивним преклопом или са допунском вентилском техником (обезбеђује се забрављавање без унутрашњег цурења) али уз чињеницу да запремина уља увек има особину компресибилности услед спољнег притиска односно повећања спољне силе. Овде се мора бити опрезан јер се често због ове чињенице прави грешка у димензионисању цилиндра. Увек је већа крутост цилиндара са мањим ходом а већим пречником клипа од варијанте са мањим пречником клипа и већим ходом. Поред тога прецизније управљање позицијом се остварује са цилиндром чији је ход мањи, а основни критеријум за одређивање максималног пречника цилиндра је остваривање убрзања према критеријуму који је посебно анализиран у поглављу овог рада који говори о напредном димензионисању електрохидрауличног актуатора. На слици 3.1 је дат графички приказ применљивости конструктивних концепата актуатора у функцији од фреквенције оптерећења:



Слика 3.1-Апликативни критеријум конструктивних концепата актуатора према критеријуму снага-фреквенција оптерећења [21]

Могућност флексибилне интеграције је присутна код сва три концепта актуаторских система, једино за различите капацитете снаге долази до значајних разлика. Али код електро механичких увек је присутна опција да су електро мотори јако близу осама кретања или у самој оси кретања. Код електро хидрауличних конфигурација, једино што се захтева је да ако постоји могућност у систему, хидраулични акумулатор буде што ближе разводнику, али никако на тако малим растојањима као електромотори према осама кретања. Разводник може а не мора бити интегрисан на хидрауличном цилиндру односно обртном хидромотору, што пре свега зависи од захтеване крутости.

Теоријска поузданост система је на страни електромеханичких система. Једноставно не постоји проблем херметичности који постоји и код електро хидрауличних и електро пнеуматских система, плус проблем чистоће радног флуида, изражен пре свега код електро хидрауличних актуационих система. У оквиру овог критеријум отвара се и питање потребе за решавање проблема дуплирања актуационог система како би се обезбедила радна способност у случају отказа као и такве организације актуационог система који обезбеђује оно што се у енглеској литератури назива, енгл: Fault tolerant control, односно задржавање потенцијала за управљањем у актуационом систему и у случају отказа у његовој конфигурацији. То значи да смо способни да пројектујемо систем који ће и у случају отказа задржати потпуну или делимичну радну способност тако да актуациони систем може да изврши свој пројектом дефинисан задатак. Проблем дуплирања система или обезбеђења да се не губи управљачка функција и при отказу се дефинише и пројектује према чињеници да ли се алтернативним управљањем на објекту, преко других органа то јест актуатора може обезбедити функција актуаторског система који је отказао. Код авиона, ово је практично случај за све примарне команде лета где постоји алтернативна могућност преко секундарних команди лета, док код ракета та ситуација је сасвим другачија-могућности за алтернативно управљање су знатно скромније, практично постоји само у ограниченом потенцијалу када имамо на ракети комбинацију аеродинамичког и гасодинамичког управљања. Сама техника дуплирања актуатора за исту управљачку површину се знатно компактније може извести када је у питању електро хидраулични концепт у односу на електро механички.

По питању захтева за одржавањем, електро механички актуациони системи имају предност која је значајна у односу на друга два расположива концепта.

Када се пројектује ракета одређује се максимална маса актуационог система као и запремина простора где се он смешта. Поред тога, у току развојног пројектовања, познате су и управљачке силе на основу којих се може димензионисати актуатор, тако да се једноставно може применити први критеријум који се односи на густину снаге, који се додатно верификује критеријумом конструктивне испуњености, који се дефинише на вредност од  $800 \text{ kg/m}^3$  опреме у простору ракете. [11], [8]

## Прилог теорији пројектовања актуатора за управљање вектором потиска ракетног мотора са флексибилном млазником

Узимајући у обзир јако велике силе које су потребне за управљање флексибилним млазником, што проистиче из самог конструктивног решења по првом критеријуму, предност даје електро хидрауличном актуационом систему. У овом раду се све даље односи само на електро хидрауличне актуационе системе. Поред првог и други и трећи критеријум су у случају примене гасодинамичког управљања афирмативни за електро хидрауличне актуационе системе.

Поред претходно критички разматраних критеријума за селекцију концепта актуационих система пре свега у ваздухопловним применама, не треба заборавити и чињеницу да се када је у питању директно ротационо кретање управљачке површине са механичком осовином предност даје електро механичком актуатору електро мотор и/или преносник, док у случају када је потребно реализовати линеарно кретање, као што је случај у конструкцији ракетног мотора са флексибилним млазником, предност се даје електро хидрауличном актуатору са цилиндром.

У оквиру концепта управљачког система потребно је размотрири и проблематику детектовања отказа (енгл. Fault detection) у раду електро хидрауличног актуационог система. Постоји један број отказа који се детектује непосредним мерењима као што је ниво уља у резервоару или радни притисак у систему. На овај начин детектују се директни откази у стадијуму када је није могуће увек обезбедити да систем задржи радну способност. У случају достизања минималног нивоа уља или пада притиска у систему примарни разлог може бити дехермеризација система. Ово су откази типа лома и прописаним квалитетом израде односно одређеним стандардима, вероватноћа за појаву оваквих ситуација се своди на минимум. У оквиру управљачког алгоритма поставља се задатак за рано отривање грешака у систему преко радних параметара. Два најважнија радна параметра су модул стишљивости и коефицијент вискозног пригушења. Ова два параметра су такозвани концентрисани параметри (енг. lumped) што значи да њихова промена може бити узрокована са више догађаја у актуаторском систему. Промена ових параметара утиче на стабилност радних параметара, значи потпуно супротно од отказа тима лома. Промена модула стишљивости директно утиче на сопствену фреквенцију актуаторског система, а то значи промену пропусног опсега система. Сама промена модула стишљивости је последица присуства ваздуха у хидрауличном делу актуационог система. Повећано присуство ваздуха може да буде последица неколико разлога, као што су неправилно прво пуњење система уљем (ваздух остао у такозваним „мртвим запреминама“), дехерметизација усисних прикључака на пумпи, постојање таквих брзина струјања да изазивају знатно издвајање раствореног ваздуха из уља и слично. Модул стишљивости је тешко мерити директно у актуаторском систему, практично се може мерити само у лабораториским условима.

Други параметар, коефицијент вискозног трења, је посебно битан јер он директно утиче на стабилност система. До његове промене долази услед оштећења динамичке заптивке на хидрауличном цилиндру актуатора или спољњег трења које оптерећује актуатор. Једноставно, већина актуаторских система може да оствари захтевану динамику када спољашње и унутрашње трење не прелази 25 %

спољњег оптерећења. Овај коефицијент се такође не може директно мерити. Као решење за праћење ове две величине предлаже се индиректно мерење, али и процењивање преко добро познатог Калмановог филтера, који процењује стања и тренутне вредности параметара актуационог система и тако помаже управљачком систему актуатора да у раној фази открије грешку нестабилности параметара и да реагује одређеним управљачким дејствима. Ово је важно јер модерна теорија и пракса система синтезе управљања захтева и проверу робустности управљачког алгоритма када се морају одредити границе очекиваних промена претходна два параметра и тек тада има смисла говорити о детекцији промене ових параметара преко претходно дефинисаних граница.

У оквиру овог рада се разматра управљање флексибилним млазником које као оптерећење има позициони карактер. Ово оптерећење се описује опцијама за опис неидеалне опруге односно његово понашање се може приказати у одређеној тачности преко неке од комбинација крутости идеалне опруге и вискозног пригушења, што ће се касније у раду видети кроз математичке моделе. Један од циљева овог рада је да прикаже све могуће варијанте описа флексибилног млазника као неидеалне опруге. Без обзира на кратко време очекиване мисије ракете, радна способност односно исправност понашања флексибилног млазника је критична, због драстичних промена оптерећења. Праћењем промене коефицијента вискозног пригушења у оквиру естимације параметара стања актуационог система може се добити рана информација о ризику наступања отказа до разарања млазника који може да изазове потпуни губитак функције управљања ракетом.

Приликом поређења електро механичких и електро хидрауличких актуаторских система, треба дефинисати још две значајне карактеристике. Први је да је пропусни опсег по сили електро хидрауличког актуатора око 100 Hz а пропусни опсег најбољег електро механичког актуатора је око 20 Hz, што одговара пропусном опсегу електро хидрауличког актуатора у отвореном колу. Овај закључак се доноси на основу расположивих математичких модела електро хидрауличких и електро механичких актуатора [22] као и на основу података из праксе. Други параметар је особина савлађивања пикова трења. Код електро механичких актуатора лако долази до наглог краткотрајног убрзања ради савлађивања сила трења (краткотрајно повећање струје) док код електро хидрауличких актуатора, знатна резерва по притиску за пикове убрзања се знатно теже остварује.

### 3.2 Избор концепта и конфигурације електро хидрауличног актуатора за флексибилни млазник

Када се бира, односно дефинише концепт и конфигурација електро хидрауличног актуационог система, постоје почетне дилеме које отварају следећа питања:

1. Отворен или затворен електро хидраулични систем.
2. Извршни орган са линеарним или обртним кретањем.
3. Потреба за механичким редуccionим склопом.
4. Елемент за развођење течности, разводник са клипом или неки алтернативни функционални склоп.
5. Извор хидрауличне енергије.

Прво питање (отворени или затворени електро хидраулични систем) је у ствари дилема: запреминско или пригушно управљање и то је концептуално питање. Главна предност пригушног управљања је већа тачност и брзина одзива, а запреминског-боља енергетска ефикасност, то јест бољи степен искоришћења. На основу задњег аргумента, јасно је да електро хидраулични системи са запреминским управљањем имају предност код великих оптерећења, пре свега код авиона са великим долетом и великим аердинамичким управљачким површинама. За актуаторе који се користе у ракетној техници, без обзира на величину ракете и дужину мисије, енергетска ефикасност не може бити доминантна према тачности и већој брзини одзива, такоа да електро хидраулични актуатори са пригушним управљањем имају апсолутну предност. Поред тога, електрохидраулични системи са запреминским управљања имају релативно сложене конструкције пумпи што повећава и тежину система у односу на варијанту са пригушним управљањем где зупчаста пумпа у преко 90 % примена може да задовољи захтеве система са пригушним управљањем.

Друго питање (извршни орган са линеарним или обртним кретањем) зависи пре свега од типа управљачке површине и момента сведеног на шарнирну осу односно осу ротације. У случају флексибилног млазника када не постоји класична шарнирна оса, извршни део актуатора је елемент са линеарним кретањем односно хидраулични цилиндар.

Потреба за механичким редуccionим склопом је питање брзине и момента који је неопходан за шарнирну осу. За ову дилему аутор овог рада, предлаже једну рачунску процедуру која узима у обзир комплетну динамику електрохидрауличног актуационог система која може математички аргументовано да реши потребу „да“ или „не“ механички редуccionи склоп, која је детаљно дата у литератури [23].

Елемент за развођење течности је најважнији управљачки склоп у сваком електро хидрауличном актуационом систему. Уобичајено је да се користе серво разводници по основу чињенице да имају готово потпуно линеарну статичку карактеристику улазна струја- излазни проток и велики пропусни опсег, који гарантује да динамичко ограничење у конфигурацији електро хидрауличног актуаторског система буде цилиндар са оптерећењем а никако управљачки склоп за развођење радног флуида. У овом раду анализирају се и две алтернативе

### 3.2 Избор концепта и конфигурације електро хидрауличног актуатора за флексибилни млазник

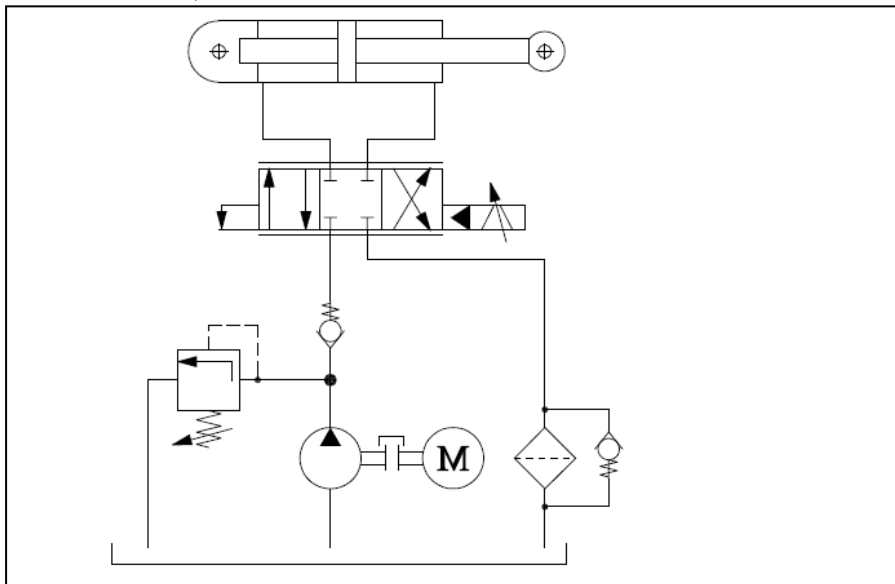
## Прилог теорији пројектовања актуатора за управљање вектором потиска ракетног мотора са флексибилним млазником

конфигурације као могућа пројектна решења за задовољење неких екстремних захтева које намеће управљање флексибилним млазником.

Извор хидрауличне енергије може бити пасиван или активан, као и комбинација. Активан извор хидрауличне енергије је пумпа, која може бити фиксног или променљивог протока. Пасиван извор хидрауличне енергије је хидраулични акумулатор и то је могуће када су у питању кратке мисије са малом потрошњом хидрауличке енергије, док комбинација активног и пасивног омогућава рационално димензионисање извора хидрауличне енергије за задати спектар оптерећења актуационог система. Потпуно је исправно користити комбинацију пумпа констатног протока и хидраулични акумулатор. У овом случају може се реализовати зависно од претпостављеног спектра оптерећења и растерећење пумпе или користити пумпа управљана по притиску где је растерећење аутоматско на претходно подешеном притиску. На тај начин може се оптимално димензионисати називна величина пумпе. Само постојање хидрауличног акумулатора, побољшава и брзину одзива разводника, када је управљачки сигнал 100 % од номиналне вредности.

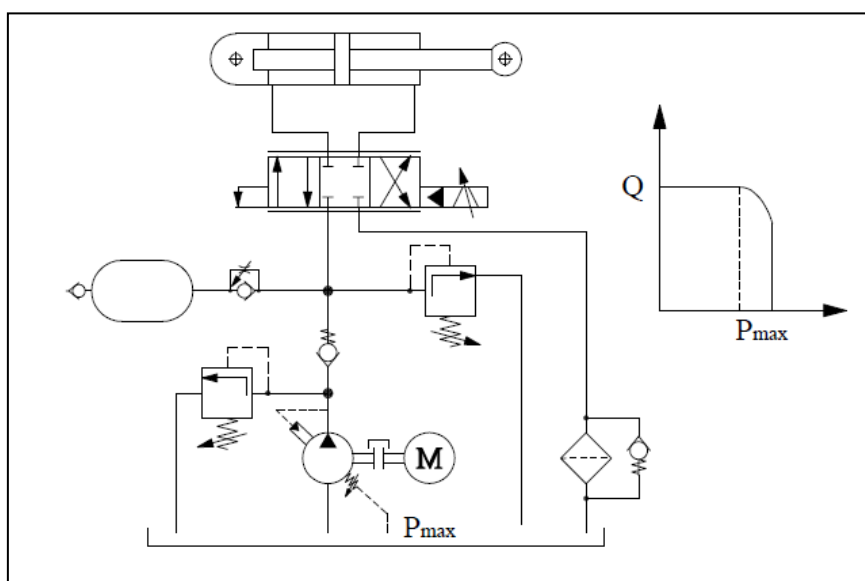
На слици 3.2 је приказана основна функционална шема електро хидрауличног актуационог система са серво разводником и пумпом констатног протока. Мана овог решења је што пумпа мора бити димензионисана према максималној потрошњи уља у систему, што значи да ће и губици у систему бити највећи.

На слици 3.3 је приказана функционална шема са концептуалним решењем, пумпа променљивог протока са регулатором притиска и са хидрауличним акумулатором. Предност овог решења је у чињеници да у тренуцима минималне потрошње уља, мала померања актуатора, напајање разводника може бити само из акумулатора и у чињеници да називна величина пумпе не мора бити изабрана према захтеву за највећом брзином цилиндра. Топлотни губици су знатно мањи него у систему приказаном на слици 3.2.



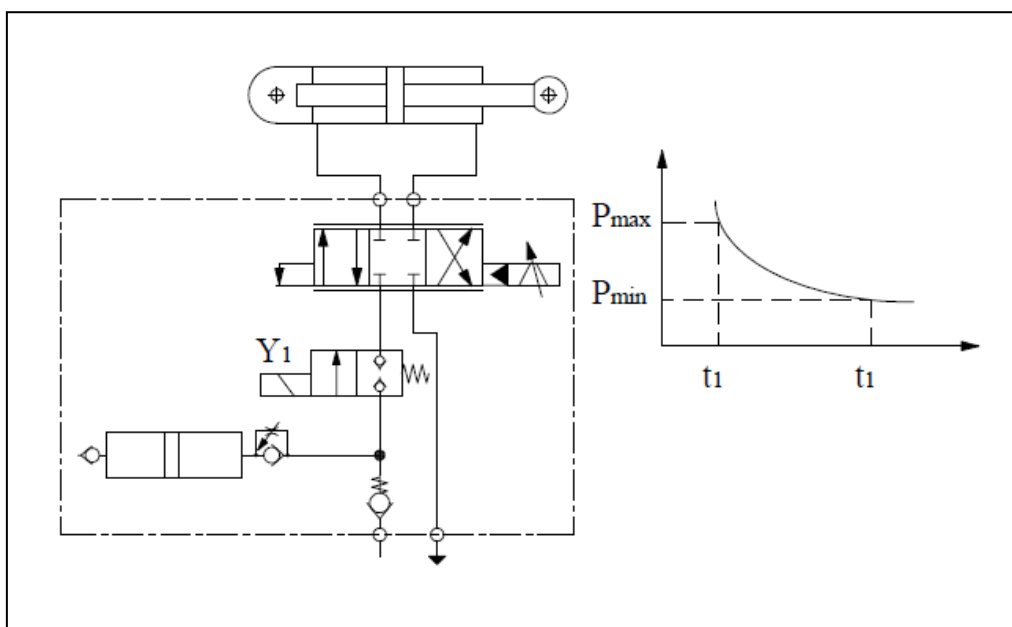
Слика 3.2-Основна шема, серворазводник и пумпа констатног протока

### 3.2 Избор концепта и конфигурације електро хидрауличног актуатора за флексибилни млазник



Слика 3.3-Основна шема, серворазводник и пумпа променљивог протока и хидраулични акумулатор

За ракетне системе са релативно кратким мисијама могуће је и напајање разводника само из хидрауличног акумулатора. Ово решење је приказано на слици 3.4. У овом случају нема топлотних губитака у систему од пригушења радног флуида, већ само од пада притиска на разводнику што се у датим условима може занемарити. У овој варијанти вентил за ограничење притиска је вентил сигурности и стално остаје затворен у експлоатацији актуаторског система.



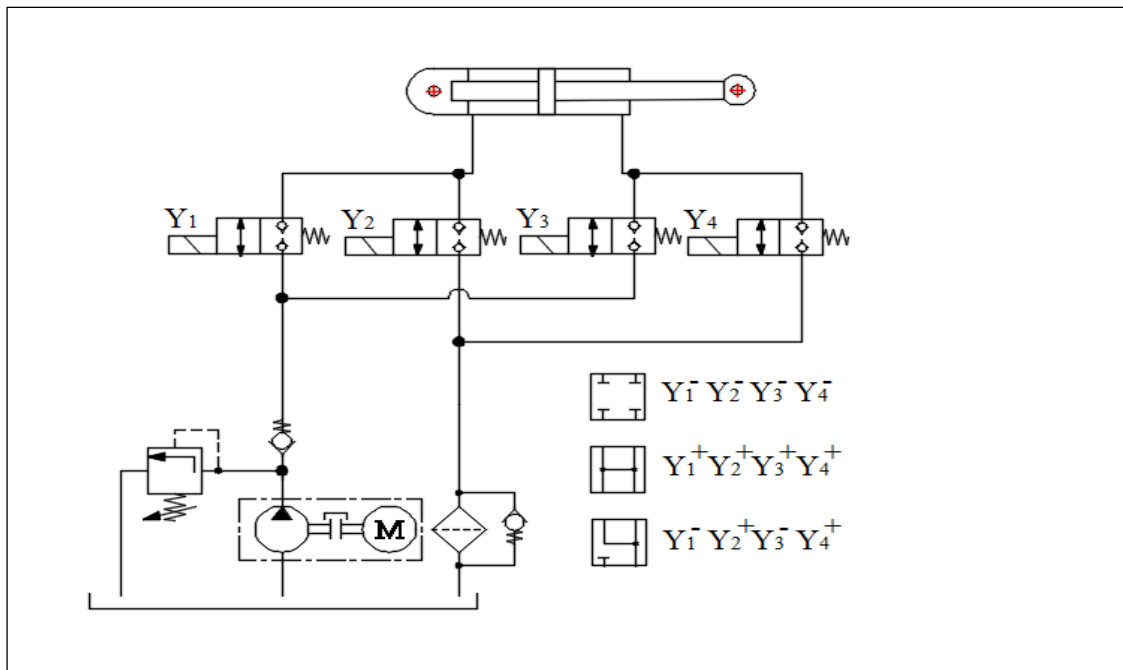
Слика 3.4-Конфигурација актуаторског система, напајање из хидрауличног акумулатора

## Прилог теорији пројектовања актуатора за управљање вектором потиска ракетног мотора са флексибилним млазником

На слици 3.5 је приказана варијанта актуаторског система са 4 разводника 2/2 седишног типа. Са овим бројем разводника, на основу управљачког софтвера за контролер могуће је дефинисати и емулирати рад разводника са клипом 4/3 за 3 различита неутрална положаја разводника. На овај начин можемо решити померање клипњаче због аксијалног кретања флексибилног млазника при почетку рада мотора, како би се избегло померање центра ротације. У овом случају у актуационом систему не постоје типичне нелинеарности које постоје за разводник са клипом. У посебном поглављу овог рада урађен је симулациони модел ове конфигурације.

На слици 3.6 је приказана варијанта такозваног диференцијалног управљања, где се кретањем управљања преко разлике притисака у коморама цилиндара. Врло је практична варијанта када треба са актуационим системом да постижемо одређене силе на одређеним ходовима. Нема склопа за развођење, захтева двострујну пумпу, и има ограничен пропусни опсег, не већи од 10 Херца.

Технологија дуплирања актуаторског система, као алтернатива отказу на некој од компонена ра актуационог система, предвиђа се као конструктивна могућност али и даље је најважније да постоји адекватна технологија укључења новог, резервног канала система и изоловање радног канала на коме је дошло од отказа и губљења радне способности. Ово значи да је актуаторски систем конструктивно обезбедио потпуну резерву радној конфигурацији. На слици 3.7 је дат један класичан пример конфигурације двоканалног актуационог система. Главно ограничење за примену у случају актуатора за флексибилни млазник је драстично повећање уградбене мере актуатора.

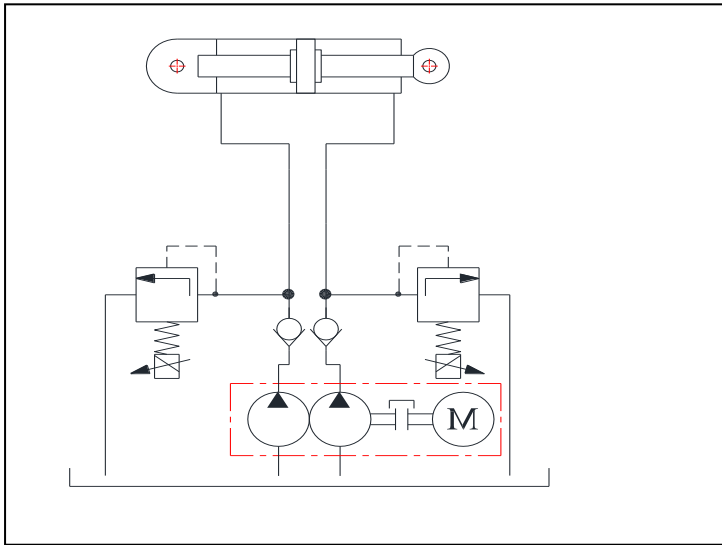


Слика 3.5-Електро хидраулични актуатор са 4 разводника 2/2 седишног типа

### 3.2 Избор концепта и конфигурације електро хидрауличног актуатора за флексибилни млазник



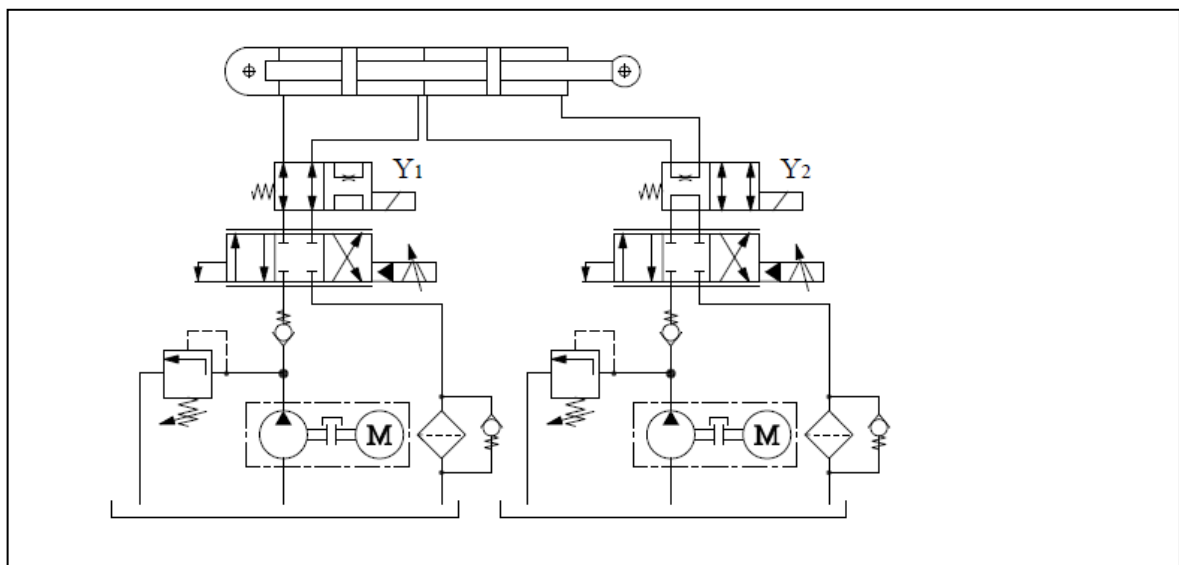
Прилог теорији пројектовања актуатора за управљање вектором потиска ракетног мотора са флексибилним млазником



Слика 3.6-Електро хидраулични актуатор са диференцијалним управљањем по сили

Други начин обезбеђења радне способности подразумева да се у оквиру једноструке конфигурације актуационог система обезбеде компоненте које ће омогућити алтернативно функционисање у случају отказа неке од компонената базне конфигурације. (енгл:Fault tolerant control). Узимајући у обзир чињеницу на једнократни карактер лета ракете, у стварности ипак кратко време мисије и чињенице да двоканални актуаторски систем знатно подиже масу комплетног актуаторског система заједно са проблемом уградбене мере, предност када је у питању конфигурисање електро хидрауличног актуационог система за флексибилни млазник има технологија одржавања радне способности у случају отказа неке компоненте осим извршног дела актуационог система, енгл:Fault tolerant control.

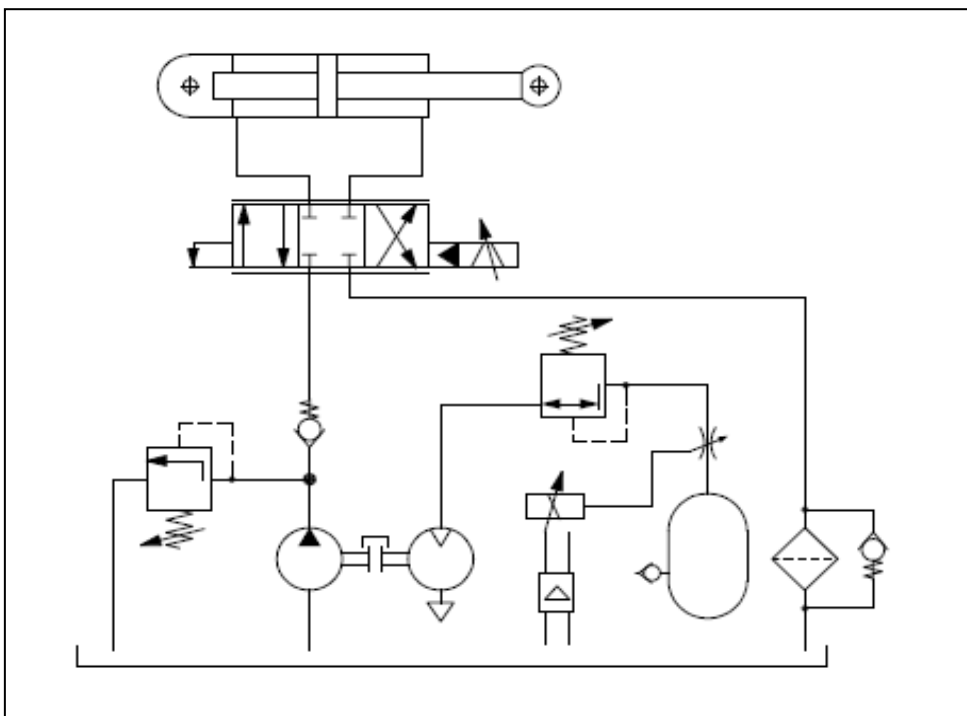
У поглављу о унапређеним конфигурацијама електрохидрауличног актуатора ова проблематика се разматра детаљније.



Слика 3.7-Електро хидраулични актуатор-двоканална конфигурација

3.2 Избор концепта и конфигурације електро хидрауличног актуатора за флексибилни млазник

Позната је још једна конфигурација, коју карактерише аутономност пумпно погона. То је специфична хибридна комбинација, где је погон хидрауличне пумпе преко пнеуматског обртног крилног мотора који се напаја ваздухом из резервоара под притиском сферног облика до 300 бара. Ефикасно складиштење енергије је најважнија позитивна особина пнеуматских система, а искоришћава се у конфигурацији електрохидрауличног система. Ово чини електро хидраулични систем високо аутономним од осталих подсистема на ракети. Директна аргументација за примену ове конфигурације не постоји, релативно мало је размотрена и у литератури. Стоји чињеница да у случају захтева за релативно великим електричним батеријама, где због других потрошача није лако одредити сигурни капацитет батерија, што захтева одређено предимензионисање, ова конфигурација може бити атрактивна за примену, слика 3.8. Ова конфигурација дозвољава да се променом броја обртаја утиче на проток пумпе како би се енергетски оптимизовали губици у актуаторском систему. Слично је ако се управља и бројем обртаја DC мотора који погони пумпу, где стабилан број обртаја који гарантује стабилан проток може да варира од 500 о/мин до 5000 о/мин, што омогућава да се секундарним управљањем, потроши знатно мање енергије, односно да знатно мање енергије буде изгубљено кроз топлотне губитке у електро хидрауличном систему.



Слика 3.8-Електро хидраулични актуатор са пнеуматском погоном пумпе

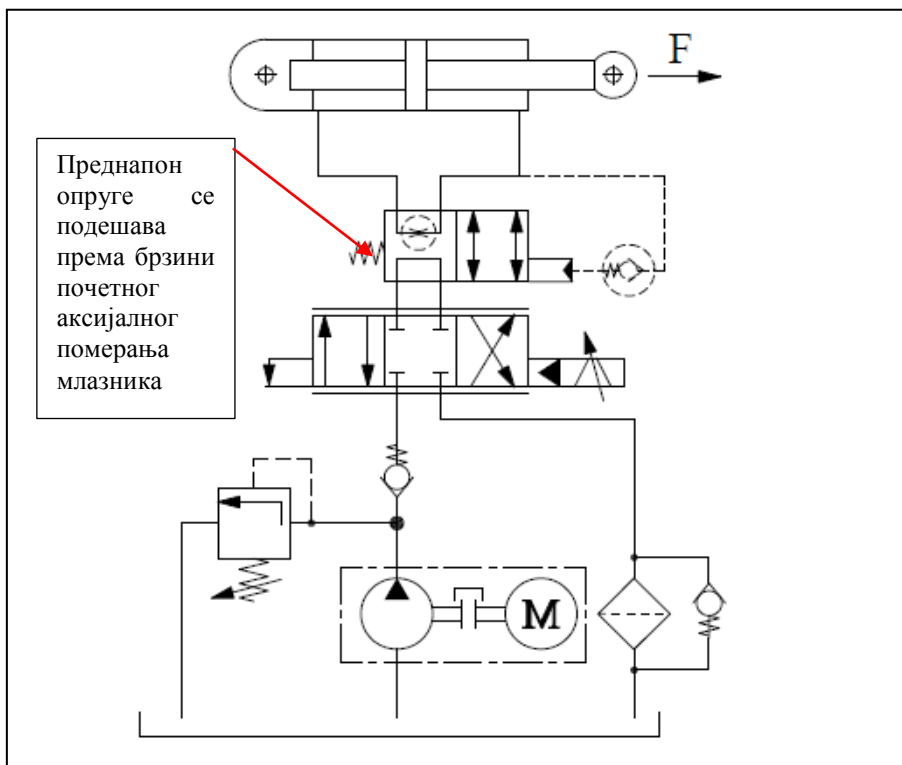
Претходно су приказане најзаступљеније стандардне конфигурације електрохидрауличног актуационог система у оквиру пригушног концепта управљања. Могуће су у претходно описаним варијантама одређене модификације, пре свега у смислу централизованог напајања хидрауличном енергијом. У оквиру претходног разматрања не анализирају се давачи у

### 3.2 Избор концепта и конфигурације електро хидрауличног актуатора за флексибилни млазник

## Прилог теорији пројектовања актуатора за управљање вектором потиска ракетног мотора са флексибилним млазником

конфигурацији. О структури система према расположивим повратним спрегама, говори се у посебном поглављу овог рада који је посвећен синтези управљачке структуре актуационог система.

За реални флексибилни млазник (за финални избор), предлажу се две варијанте које, да би се у потпуности могле упоредити, морају проћи комплетну процедуру пројектовања. Значи никада се не треба изабрати једна конфигурација већ две, на којима се спроводи комплетна процедура пројектовања-паралелно, до самог краја, то јест до верификације прототипског решења. Прва конфигурација која се дефинише приказана је на слици 3.9, и има допунски разводни вентил који служи за компензацију аксијалног померања млазника код почетка рада ракетног мотора. Уље из коморе цилиндра под притиском, коју вуче клипњача због аксијалног померања флексибилне везе, пролази кроз кратку везу у разводнику све до тренутка док траје кретање, без претензија да га ограничи и у тренутку престанка кретања, притисак се повећава и хидраулички се активира разводник 4/2 и прелази у положај који обезбеђује напајање. Приликом промене разводног положаја он се хидраулички брави преко неповратног вентила. Пошто нема опције за растрешавање, обезбеђено је сигурно напајање разводника за време трећања рада мотора. Као једну посебну варијанту (слика 3.10) приказује се и конфигурација са два актуатора која решава и питање аксијалног померања млазника, тако да он не може да заротира приликом почетка рада мотора јер га два цилиндра у равни приморавају на аксијално померање. Ово су према избору аутора могућа конфигурацијска решења електрохидрауличног актуационог система за управљање вектором потиска ракетним мотором преко флексибилног млазника.

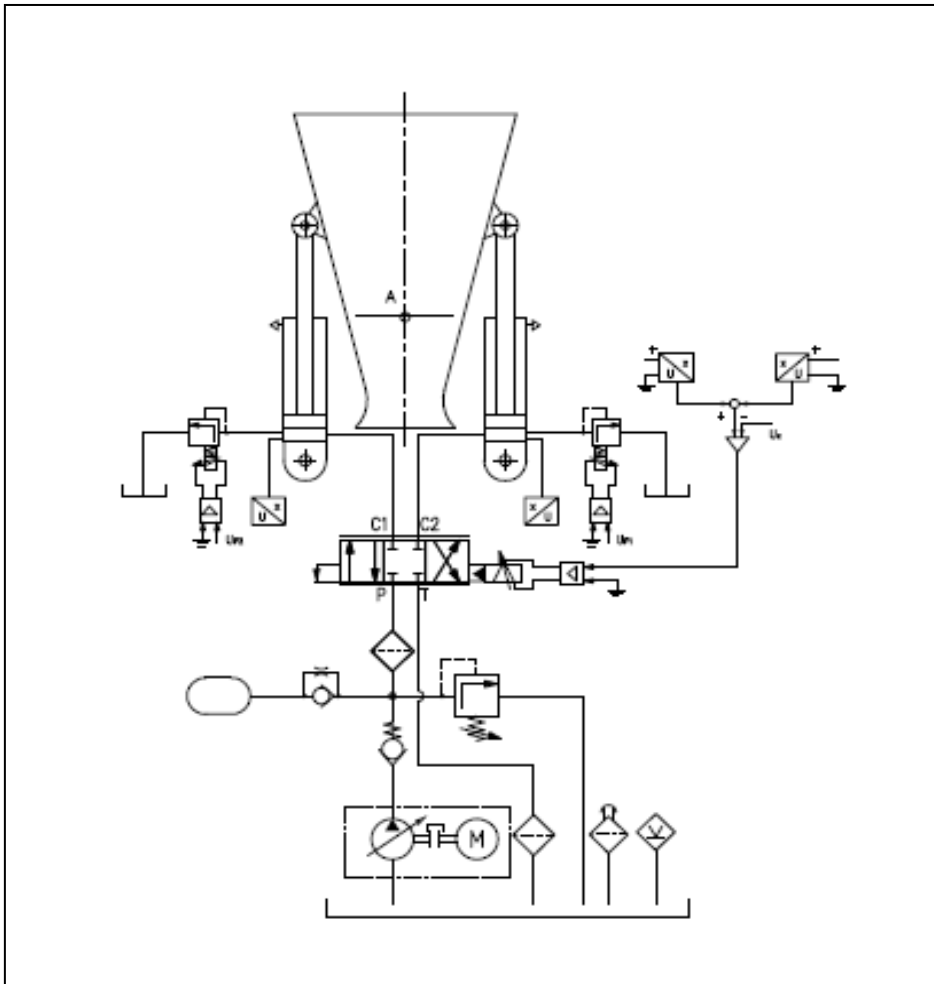


Слика 3.9-Електро хидраулични актуатор са вентилом за компензацију закретања млазника

### 3.2 Избор концепта и конфигурације електро хидрауличног актуатора за флексибилни млазник

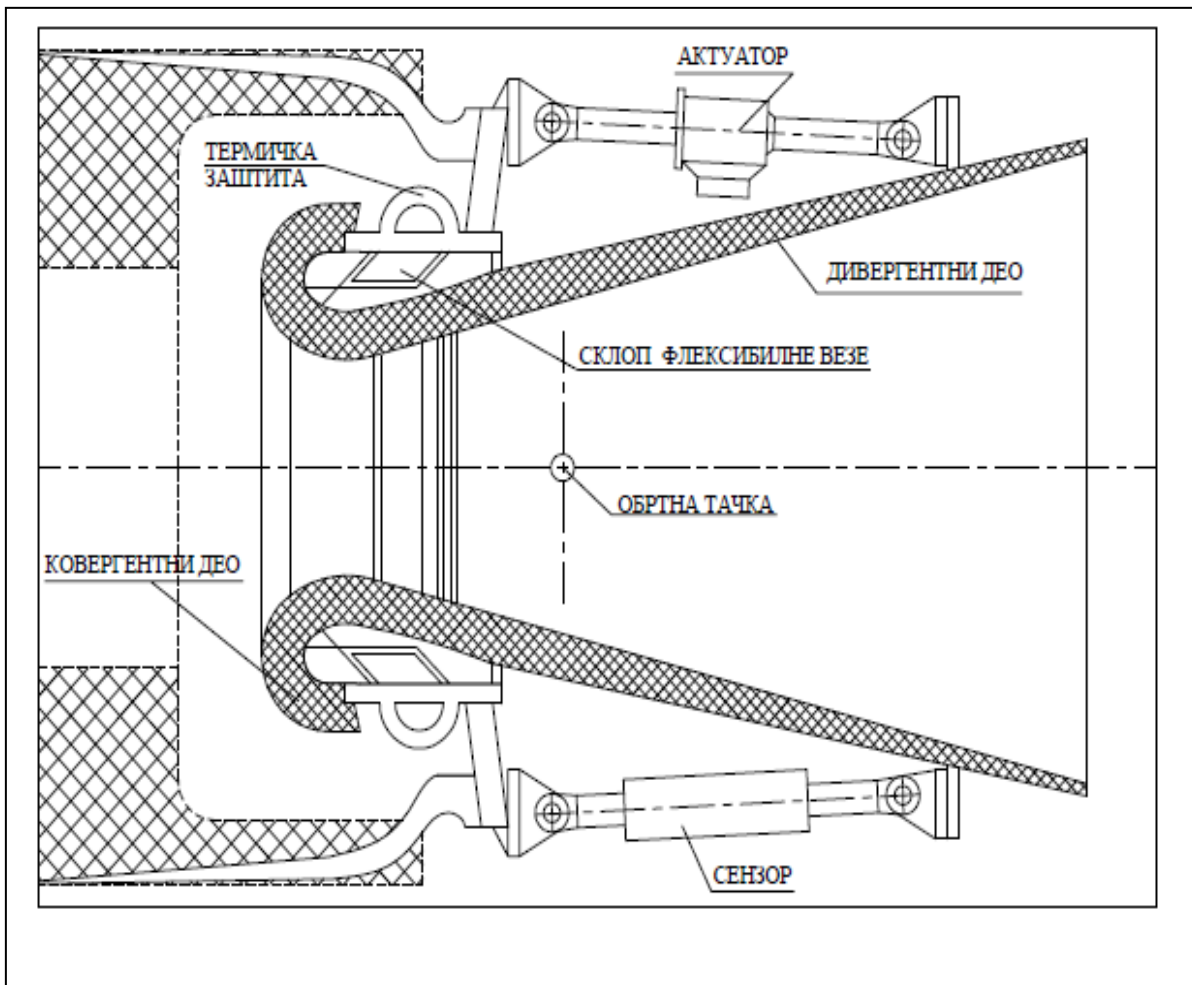
## Прилог теорији пројектовања актуатора за управљање вектором потиска ракетног мотора са флексибилним млазником

Конфигурација на слици 3.10 је у основи дефинисана и заштићена USA патентом, [24], али ју је аутор овог рада допунио пропорционалним вентилима за ограничење притиска са клипних страна у коморама цилиндра. На овај начин је добијен још један квалитет, а то је да при аксијалном кретању флексибилне везе можемо да ограничимо аксијално кретање флексибилне везе, а да не дође до ротације пошто постоје два цилиндра. Поред тога коришћењем два једносмерна цилиндра, имамо могућност да за сваки смер угла ротације користимо један цилиндар увек на притискивање (извлачење клипњаче), а да други потпуно буде растрећен преко додатих пропорционалних вентила за ограничење притиска. Ово може да повећа брзину дејства и силу за исте димензије цилиндра јер користимо комплетну површину клипа, а не површину клипног прстена. У том случају мерни систем у другом цилиндру може се користити за најпрецизније мерење закретања млазника, што не може преко цилиндра који директно делује. Другим цилиндром преко пропорционалног вентила за ограничење притиска може се вештачки обезбедити одговарајући степен пригушења структуре флексибилног млазника који је најпримеренији изабраном алгоритму управљања.



Слика 3.10-Управљање флексибилним млазником у једној равни са два цилиндра[24]

### 3.2 Избор концепта и конфигурације електро хидрауличног актуатора за флексибилни млазник



Слика 3.11-Конструкција флексибилног млазника са једним цилиндром и једном мерном полугом за позицију у истој равни [25]

Претходно су према избору аутора овог рада приказане стандардне конфигурације електрохидрауличних актуационих система где је извршни орган са линеарним кретањем-хидраулични цилиндар. Могуће су и додатне конструктивне модификације али оне сада нису предмет разматрања. Неке посебне конфигурације, биће описане у засебном поглављу овог рада, где се разматрају енергетски аспекти конфигурација електрохидрауличних актуатора. Претходно су конфигурације размотрене на нивоу функционалних шема, тако да се не разматра техника извођења интергације хидрауличних компонената. У шемама је изабран као репрезент двостепени серворазводник са моментним мотором, уградња на плочу, док извођење осталих вентилских компонената може бити у разним технологијама, али обзиром да се разматра ваздухопловна примена апсолутну предност има техника извођења у форми кетрица, по критеријуму уградбених мера и тежине и посебно се захтева да се све компоненте уврћу у блок односно у плочу тако да нема прикључака за унутрашње везе.

### 3.2 Избор концепта и конфигурације електро хидрауличног актуатора за флексибилни млазник

### 3.3 Почетно димензионисање електро хидрауличног актуатора

Ово је врло важан корак у пројектовању и без обзира што изгледа једноставан, мора му се прићи са великом пажњом јер може бити узрок многим грешкама које се касније тешко откривају или се у опште неоткривају. Да би се урадило почетно димензионисање актуационог система потребно је да су претходно дати одређени подаци који су дефинисани кроз развојно пројектовање ракете. Овде се не улази у анализирање могућих комбинација улазних података на основу којих се може димензионисати односно пројектовати актуатор за управљање флексибилним млазником, већ се у табели која следи наводи један пример спецификације актуаторског система са конкретним подацима који ће се користити у овом раду.

**Табела 3.1: (Подаци из једног комерцијалног пројектног задатка, Лема 2.0)**

	Карактеристика	Вредност
1.	Максимална линеарна сила	$F_{max} = 20 \text{ kN}$
2.	Максимална линеарна брзина	$V_{max} = 300 \text{ mm/s}$
3.	Максимални ход актуатора	$H_{ac} = 120 \text{ mm}$
4.	Максимални угао закретања млазника	$\Theta_{noz} = +/- 5^\circ$
5.	Максимална брзина закретања млазника	$\Omega_{max} = 0.75 \text{ rad/sec}$
6.	Инерција млазника	$J_{noz} = 204 \text{ kg m}^2$
7.	Растојање тачке везе актуатора од центра ротације млазнице	$L_{ac} = 837 \text{ mm}$
8.	Димензије у равни за уградњу	$A = 317 \text{ mm}$ $B = 450 \text{ mm}$
9.	Померање центра ротације млазника	$DR_c = 40 \text{ mm}$

Када се пројектује електро хидраулични актуатор, први корак је да се изабере радни притисак у актуационој систему. У принципу данас постоје четири нивоа стандардног притиска према коме се пројектују стандардне компоненте, као што су разводници и вентили. У пројектантском смислу не постоји ниједан разлог да се усвоји нестандардни притисак.

Први ниво је 210 бара, други ниво је 280 бара, трећи ниво је 315 бара и четврти ниво је 350 бара. Двостепени серво разводници, типа млазница-заслонка или џет типа (са покретном млазницом) се праве за радне притиске до 280 бара. Једностепени серво разводници се израђују и за радне притиске 315 и 350 бара. Обзиром да је примена серво разводника за команду лета, стандард је 210/280 и због чињенице да су то серво разводници минималне тежине односно да имају ваздухопловну хомолагацију.

Усвојићемо радни притисак 210 бара и одмах од овог притиска одузимамо пад притиска на управљачким ивицама за номинални проток, који је стандардно 2 x 35 бара, што значи да се за активно оптерећење и губитке притиска у систему остало 140 бара. Овакав приступ значи да смо предпоставили максималну брзину на максималној сили.

## Прилог теорији пројектовања актуатора за управљање вектором потиска ракетног мотора са флексибилним млазником

Сада се са овим притиском улази у прорачун максималне статичке силе на актуатору, односно израчунава се пречник клипа и клипњаче. На основу тога се проверава да ли постоји ризик од извијања и провера се дебљина цеви цилиндра како би се избегле такве деформације које би довеле до цурења, односно деформације које би изашле ван домена еластичних деформација цеви цилиндра.

Димензионисање преко статичке силе је једноставно:

$$\begin{aligned} \frac{p_s \times \pi(D^2 - d^2)}{4} = F &\Rightarrow (D^2 - d^2) = \frac{4F}{p_s \times \pi} = \frac{3D^2}{4} = \frac{4F}{p_s \times \pi} \Rightarrow D = \sqrt{\frac{16F}{3(p_s \times \pi)}} \\ &= \sqrt{\frac{16 \times 20000 \times 1.3}{3 \times 140 \times 10^5 \times \pi}} \\ D &= 0.0561m \end{aligned} \quad (3.1)$$

Ово димензионисање је урађено под претпоставком да је однос пречника клипа према пречнику клипњаче, приближно 2:1 и са осигурањем од 30 % по критеријуму највеће дозвољене силе. Општи је принцип да се за димензије актуатора усвајају прве веће стандардне вредности, тако да је изабран цилиндар  $\varnothing 63/36 \times 120$ . У свим даљим рачунским примерима радиће се са овом димензијом цилиндра. У овом случају активна површина за конструкцију цилиндра са пролазном клипњачом је  $21 \text{ cm}^2$  или  $0.00210 \text{ m}^2$ .

Посебно је важно нагласити да је једна од најчешћих грешака приликом димензионисања цилиндра што се оно ради преко брзине. То се може урадити само када цилиндар није оптерећен. За оптерећен цилиндар, свако димензионисање мора бити преко силе како би се обезбедио довољан капацитет за потребна убрзања. Општа формула која се примењује у овом случају је: [25]

$$A = \frac{(f \times 4)^2 \times \pi^2 \times H \times m}{g \times \beta} = \frac{(20 \times 4)^2 \times \pi^2 \times 0.120 \times 2000 \times 1.3}{9.81 \times 1.4 \times 10^9} = 0.00143 \text{ m}^2 \quad (3.2)$$

У зависности од апроксимације приликом усвајања стандардног пречника, некада горња вредност може бити већа од првобитно израчунате према (3.1). У сваком случају усваја се већа вредност, што гарантује што равномернији притисак у коморама цилиндра, што ће касније бити илустровано одговарајућом симулацијом.

Приликом димензионисања актуационог система поћи ћемо од једначине (3.3) којом дефинишемо максимално закретање млазнице. Ако нађемо први и други извод, једначине (3.4) и (3.5) добијамо вредности за брзину и убрзање.

$$\delta = \delta_0 + \delta_{\max} \sin(\omega t) \quad (3.3)$$

### 3.3 Почетно димензионисање електро хидрауличног актуатора

**Прилог теорији пројектовања актуатора за управљање вектором потиска ракетног мотора са флексибилним млазником**

$$\dot{\delta} = \omega \delta_{\max} \cos(\omega t) \quad (3.4)$$

$$\ddot{\delta} = -\omega^2 \delta_{\max} \sin(\omega t) \quad (3.5)$$

Ако сада пођемо од опште претпоставке да пропусни опсег ракете није већи од 2 Hz, у том случају пропусни опсег актуационог система се бира 10 пута већи како се не би утицао на динамику управљања ракетом. Ако претпоставимо да је максимални отклон флексибилног млазника +/- 5 ° можемо да одредимо максималну кружну фреквенцију.

$$\omega = 2\pi f = 2\pi 20 = 40\pi = 125.7 \text{ rad / s} \quad (3.6)$$

Пошто се претходно ради о синусној промени сигнала, два пута максимум и два пута минимум, а када посматрамо пропусни опсег система, ми разматрамо једну амплитудну промену, тако да је стварна вредност за кружну фреквенцију четири пута мања.

$$\omega_{po} = \frac{\omega}{4} = \frac{125.7}{4} = 31.4 \text{ rad / s} \quad (3.7)$$

Пропусни опсег је по дефиницији за промену сигнала од 10 % до 90 % амплитуде. У пракси се као репрезентативније решење користи промена амплитуде за +/- 10 %. На основу максималне вредности брзине и убрзања су за репрезентативне промене амплитуде:

$$\dot{\delta}_{10\%} = \omega_{po} \delta_{\max 10\%} = 31.44 \times 0.00872 = 0.27 \text{ rad / s} \quad (3.8)$$

$$\dot{\delta}_{100\%} = \omega_{po} \delta_{\max 100\%} = 31.44 \times 0.0872 = 2.7 \text{ rad / s} \quad (3.9)$$

На основу претходног добили смо максималне угаоне брзине за разматране пропусне опсеге. Аналогно се посматра и убрзање:

$$\ddot{\delta}_{10\%} = \omega_{po}^2 \delta_{\max 10\%} = (31.44)^2 \times 0.00872 = 8.6 \text{ rad / s}^2 \quad (3.10)$$

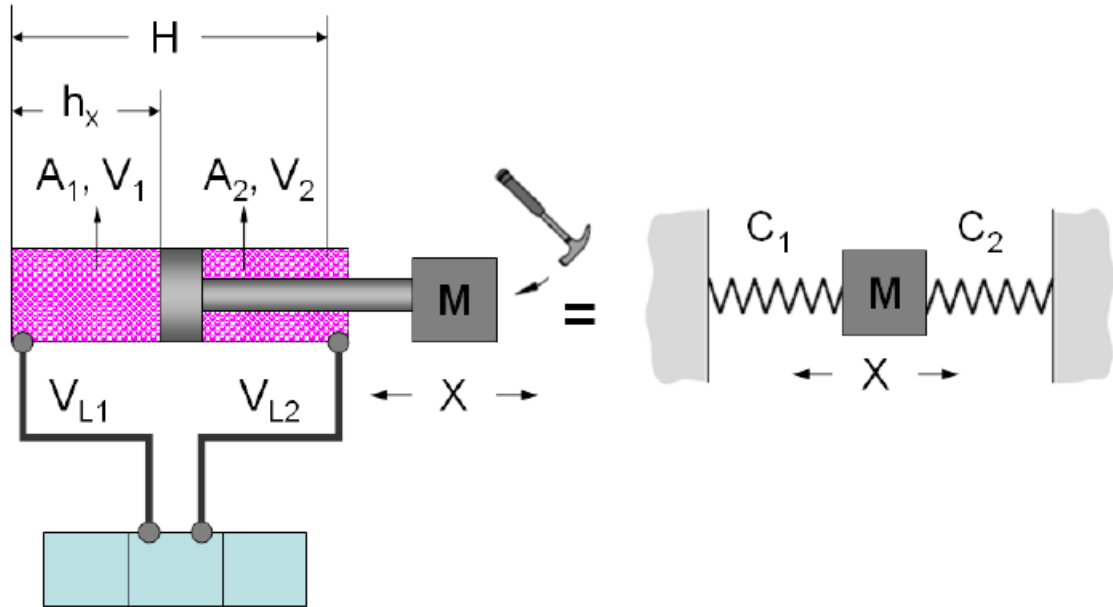
$$\ddot{\delta}_{100\%} = \omega_{po}^2 \delta_{\max 100\%} = (31.44)^2 \times 0.0872 = 86 \text{ rad / s}^2 \quad (3.11)$$

За претходно дефинисан цилиндар на основу статичке силе сада се израчунава сопствена фреквенција цилиндра која зависи од положаја клипњаче и стишљивости радног флуида, односно крутости цилиндра.

Општа дефиниција крутости заједно са дефиницијом модула стишљивости дају према слици 3.12



$$C = \frac{\Delta F}{\Delta X} = \frac{\Delta p \times A}{\Delta X} = \frac{\Delta p \times A^2}{\Delta V} = \frac{\beta \times A^2}{V} \quad (3.12)$$



Слика 3.12-Елементи крутости извршног органа актуатора [25]

У овој анализи изостављено је вискозно трење у цилиндру, односно пригушење пропорционално брзини, јер се ради о јако малим вредностима у нумеричком смислу. На основу претходне опште једначине, сада се дефинише крутост у коморама хидрауличког цилиндра као:

$$C_1 = \frac{\beta \times A^2}{V_1 + V_{L1}} \quad (3.13)$$

$$C_2 = \frac{\beta \times A^2}{V_2 + V_{L2}} \quad (3.14)$$

Укупна крутост се добија као збир појединачних крутости:

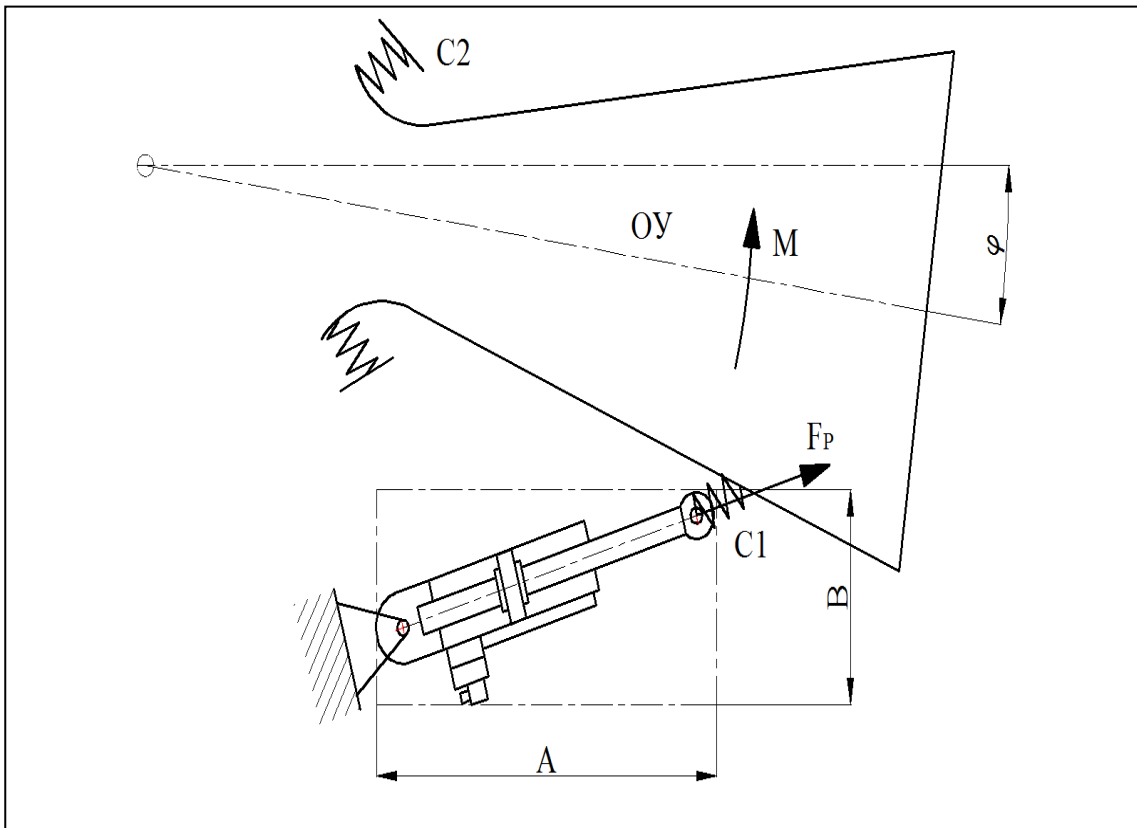
$$C_H = \beta \times \left[ \frac{A^2}{V_1 + V_{L1}} + \frac{A^2}{V_2 + V_{L2}} \right] \quad (3.15)$$

На основу претходног од интереса је израчунати промену крутости а самим тим и сопствене фреквенције у функцији хода цилиндра. Ово је промена параметра која постоји у сваком електрохидрауличном актуационом систему где је извршни орган хидраулични цилиндар.

Да би се претходна анализа урадила тачно потребно је дефинисати стварно инерцијално оптерећење актуатора. Врло ретко актуатор има на себи слободну концентрисану масу која није повезана са другим деловима конструкције. У

**Прилог теорији пројектовања актуатора за управљање вектором потиска ракетног мотора са флексибилним млазником**

случају који се разматра у овом раду маса није слободна и потребно је одредити такозвану еквивалентну или редуковану масу. Ово се може урадити под претпоставком да су везе круте преко једнакости кинетичке енергије у тачки везе цилиндра и млазника (кинетичка енергија ротационог кретања једнака је кинетичкој енергији виртуелне масе на крају клипњаче) или тачније узимајући у обзир еластичност система. Овде ће бити приказана оба приступа овом проблему. Први приступ на основу слике 3.13, дефинише се следећом једначином:



**Слика 3.13-Кинематика закретања флексибилног млазника**

$$\frac{m\dot{x}_p^2}{2} = \frac{J\omega^2}{2} \tag{3.16}$$

која показује једнакост кинетичке енергије у тачки везе цилиндра и млазника.

$$m\omega^2 r^2 = MR^2\omega^2 \tag{3.17}$$

$$m = M \frac{R^2}{r^2} \tag{3.18}$$

Минимална сопствена фреквенција је када је цилиндар на крају хода, било да је у питању увлачење или извлачење клипњаче:

**3.3 Почетно димензионисање електро хидрауличног актуатора**

**Прилог теорији пројектовања актуатора за управљање вектором потиска ракетног мотора са флексибилним млазником**

$$C_{H\min} = 4\beta \times \left[ \frac{A}{H} \right] \quad (3.19)$$

$$\omega_{N\min} = \sqrt{\frac{C_{H\min}}{M}} = \sqrt{\frac{4\beta A}{HM}} = \sqrt{\frac{4 \times 1.4 \times 10^9 \times 0.00209}{0.120 \times 300}} = 570 \text{ rad / s} \quad (3.20)$$

$$f = \frac{1}{2\pi} \omega_{N\min} = \frac{1}{2\pi} 570 = 90 \text{ Hz} \quad (3.21)$$

Ова фреквенција мора бити већа од претходно усвојене фреквенције од 20 Hz, што значи да актуаторски систем може да задовољи захтеве за пропусним опсегом. После ове фреквенције, проверава се пропусни опсег и преко минималног времена убрзања које се рачуна под следећом претпоставком:

$$t_{\min} = \frac{35}{\omega_{N\min}} = \frac{35}{570} = 0.061 \text{ s} \quad (3.22)$$

На основу овога, значи да у сталном режиму убрзања односно успорења можемо да поновимо 16, 39 пута у секунди, што значи да је по овом критерију пропусни опсег 16.37 Hz.

$$f = \frac{1}{t_{\min}} = \frac{1}{0.061} = 16.39 \text{ Hz} \quad (3.23)$$

Претходно не значи да по овом критеријуму није задржан критеријум пропусног опсега од 20 Hz, пошто се овде ради о приближној процени и претходна константа варира од 18 до 35, и узима у обзир разнолокост еластичних веза са околином као препорука која гарантује стабилност убрзања и успорења, односно претпоставка да је стабилно време убрзања и успорења инерцијалне масе, од 3 до 5 пута мање од сопствене фреквенције.

Потребно је да искористимо податак о сопственој фреквенцији како би могли да израчунамо максималну брзину под оптерећењем. Претпоставимо да је амплитуда односно највећи пут цилиндра у једну страну 60 мм (на основу захтева за максималним ходом актуатора). Ако претпоставимо да је 10 % амплитуде 6 мм и да је 10 % времена убрзања 0.0061s а да је за пропусни опсег од 20 Hz, укупно време кретања 50 мили секунди, (одговара пропусном опсегу система за промену жељене вредности потзиције) добијамо максималну брзину као:

### 3.3 Почетно димензионисање електро хидрауличног актуатора

**Прилог теорији пројектовања актуатора за управљање вектором потиска ракетног мотора са флексибилним млазником**

$$v_{\max} = \frac{H/2}{0.050 - 0.006} = \frac{0.006}{0.044} = 0.136 \text{ m/s} \quad (3.24)$$

Сада на основу овако израчунате брзине, израчунавамо проток без оптерећења:

$$Q_L = A \times v_{\max} = 0.00210 \times 0.136 = 0.0002856 \frac{\text{m}^3}{\text{s}} = 17.3 \text{ l/min} \quad (3.25)$$

Проток кроз разводник без оптерећења се рачуна:

$$Q_{NL} = Q_L \times \sqrt{\frac{P_s}{P_s - P_L}} \quad (3.26)$$

$$Q_R = 1.1 \times Q_{NL} \quad (3.27)$$

Претходна вредност одговара номиналном протоку кроз серво разводник, односно на основу овог протока се бира серво разводник. Објашњење за фактор 1.1 је резерва за преоптерећења.

Резонантна фреквенција актуационог система серво разводник-цилиндар се рачуна према:

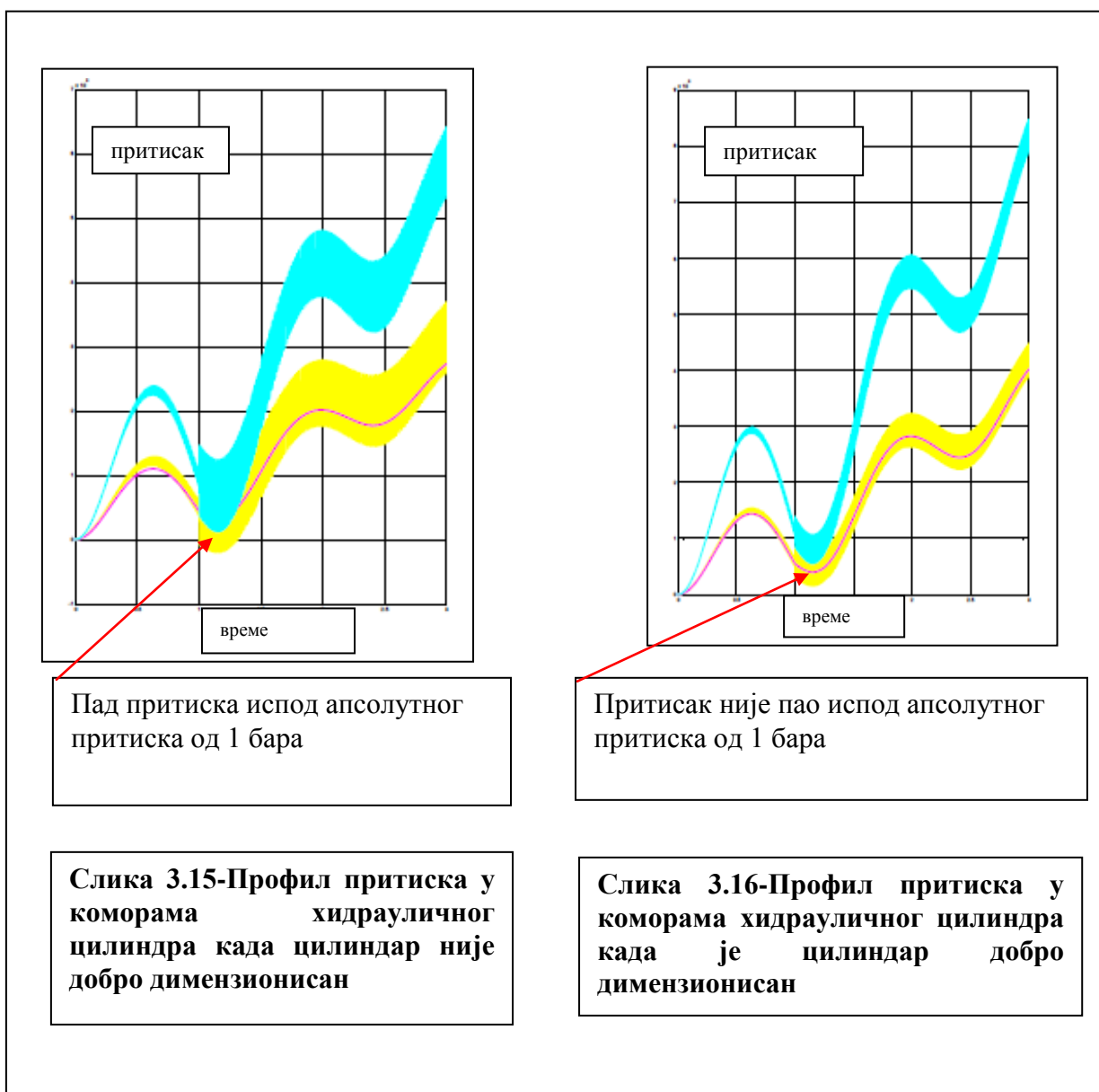
$$f_s = \frac{(f_p \times f_v)}{f_p + f_v} \quad (3.28)$$

Пошто смо претпоставили резонантну фреквенцију система, проверићемо рачунски потребну фреквенцију серво разводника, односно пропусни опсег, где је  $f_v$  резонантна фреквенција вентила:

$$f_s = \frac{(f_p \times f_v)}{f_p - f_v} = 20 \text{ Hz} = \frac{90 \times f_v}{90 - f_v} \Rightarrow 20 \times (90 + f_v) = 90 f_v \Rightarrow f_v = \frac{1800}{70} = 25.71 \text{ Hz} \quad (3.29)$$

Претходно смо добили минималну фреквенцију, односно пропусни опсег серво разводника.





Димензионисање преко математичког модела:

Основне линеарне једначине математичког модела електро хидрауличног актуатора су:

$$Q = K_q x_v - K_p p_L \quad (3.30)$$

$$Q = A_p \dot{x}_p + \frac{V}{4\beta} \frac{dp_L}{dt} \quad (3.31)$$

## Прилог теорији пројектовања актуатора за управљање вектором потиска ракетног мотора са флексибилним млазником

У димензионасање у првом кораку крећемо тако што узимамо у обзир само инерцијално оптерећење:

$$\Delta p_L = \frac{m\ddot{x}_p}{A_p} \quad (3.32)$$

Заменом у претходну једначину добијамо:

$$A_p \dot{x}_p + \frac{V}{4\beta} m \frac{\ddot{x}_p}{A_p} = K_q x_v - K_p \frac{m\ddot{x}_p}{A_p} \quad (3.33)$$

Применом Лапласове трансформације добијамо:

$$A_p s x_p(s) + \frac{V}{4\beta} \frac{m}{A_p} s^3 x_p(s) = K_q x_v(s) - \frac{K_p m}{A_p} s^2 x_p(s) \quad (3.34)$$

Преносна функција отвореног кола:

$$\frac{x_p(s)}{x_v(s)} = \frac{\frac{K_q}{A_p}}{s \left( \frac{V}{4\beta} \frac{m}{A_p^2} s^2 + \frac{K_p m}{A_p^2} s + 1 \right)} \quad (3.35)$$

На основу претходног видимо да за склоп серво разводник (други степен)-цилиндар можемо да дефинишемо сопствену фреквенцију и степен пригушења као:

$$\omega_n = \frac{4\beta A_p^2}{mV} \quad (3.36)$$

$$\frac{2\xi}{\omega_n} = \frac{K_q}{A_p} \frac{m}{K_c} \quad (3.37)$$

Претходно је дефинисано под претпоставком да је дефинисан коефицијент проток- притисак као:

$$K_c = \frac{A_p K_q}{K_p} \quad (3.38)$$

Сада смо у прилици да напишемо преносну функцију затвореног кола као:

### 3.3 Почетно димензионасање електро хидрауличног актуатора

**Прилог теорији пројектовања актуатора за управљање вектором потиска ракетног мотора са флексибилним млазником**

$$\frac{x_p(s)}{x_v(s)} = \frac{\frac{K_q}{A_p}}{\frac{V}{4\beta} \frac{m}{A_p^2} s^3 + \frac{K_p m}{A_p^2} s^2 + s + \frac{k_{fb} K_q}{A_p}} \quad (3.39)$$

Овако дефинисана преносна функција нам омогућава да применом Хурвицовог алгебарског критеријума за стабилност дефинишемо стабилност затвореног кола електро хидрауличног актуационог система. Из услова стабилности дефинишемо једну важну зависност између параметара серво разводника, појачање по притиску и протоку са димензијама хидрауличног цилиндра, односно активне површине код двосмерног цилиндра са пролазном клипњачом, укључујући у ту зависност и појачање у повратној спрези, што отвара и питање значаја јединичне повратне спреге.

$$\frac{K_q}{K_p} < \frac{4\beta A_p}{k_{fb} V} \quad (3.40)$$

Претходно прво димензионисање је омогућавало да се дефинише пропусни опсег серво разводника, а кроз овај критеријум да се дефинишу и два најважнија параметра серво разводника, појачање по притиску и протоку.

Пошто код флексибилног млазника имамо доминирајуће еластично над инерцијом оптерећење флексибилне везе (за ово димензионисање се на овом нивоу димензионисања претпоставља да је типа идеалне опруге), извешћемо исти критеријум као претходно и према овом типу оптерећења:

$$\Delta p_L = \frac{1}{A_p} (c \times x_p) \quad (3.41)$$

$$A_p \dot{x}_p + \frac{V}{4\beta} c \frac{\dot{x}_p}{A_p} = K_q x_v - K_p \frac{c x_p}{A_p} \quad (3.42)$$

$$A_p \dot{x}_p + \frac{V}{4\beta} c \frac{\dot{x}_p}{A_p} + K_p \frac{c x_p}{A_p} = K_q x_v \quad (3.43)$$

Применом Лапласове трансформације добијамо:

$$A_p s x_p(s) + \frac{V}{4\beta} c s \frac{x_p(s)}{A_p} + K_p \frac{c x_p(s)}{A_p} = K_q x_v(s) \quad (3.44)$$

### 3.3 Почетно димензионисање електро хидрауличног актуатора



**Прилог теорији пројектовања актуатора за управљање вектором потиска ракетног мотора са флексибилним млазником**

Добија се преносна функција отвореног кола:

$$\frac{x_p(s)}{x_v(s)} = \frac{\frac{K_q A_p}{K_p c}}{\left(\left(A_p^2 + \frac{Vc}{4\beta}\right) / K_p c\right) s + 1} \quad (3.45)$$

Потребно је урадити и следећу модификацију претходне једначине:

$$\frac{x_p(s)}{x_v(s)} = \frac{\frac{K_c}{c}}{\left(\left(A_p^2 + \frac{Vc}{4\beta}\right) / K_p c\right) s + 1} \quad (3.46)$$

Преносна функција затвореног кола је:

$$\frac{x_p(s)}{x_v(s)} = \frac{\frac{K_c}{c} k_{fb}}{\left(\left(A_p^2 + \frac{Vc}{4\beta}\right) / K_p c\right) s + \frac{K_c}{c} k_{fb} + 1} \quad (3.47)$$

После превођења функције у адекватан облик за први ред, добијамо:

$$\frac{x_p(s)}{x_v(s)} = \frac{\frac{K_c}{c} k_{fb} / \left(\frac{K_c}{c} k_{fb} + 1\right)}{\frac{\left(A_p^2 + \frac{Vc}{4\beta}\right)}{\left(\frac{K_c}{c} k_{fb} + 1\right)(K_p c)} s + 1} \quad (3.48)$$

Претходни израз (3.48) нам омогућава да се сопствена фреквенција дефинише као:

$$\omega_n = \frac{\left(\frac{K_c k_{fb}}{c} + 1\right)(K_p c)}{A_p^2 + \frac{Vc}{4\beta}} = \frac{K_c k_{fb} K_p + K_p c}{A_p^2 + \frac{Vc}{4\beta}} \quad (3.49)$$

На основу претходног је јасно да претпостављањем репрезента крутости за дефинисане димензије цилиндра и познавањем карактеристика изабраног серво

## Прилог теорији пројектовања актуатора за управљање вектором потиска ракетног мотора са флексибилним млазником

разводника, појачања по притиску и протоку, можемо проверити пропусни опсег система по позицији са еластичним оптерећењем.

Димензионисање актуаторског система може се урадити и преко репрезента синусног оптерећења по сили ради провере максималног протока кроз серво разводник. Синусно оптерећење одмах даје информацију о пропусном опсегу по сили. Претходно је разматран пропусни опсег по позицији. Важно је да ова два пропусна опсега буду што већа, како би се могло говорити о динамичком квалитету актуатора за конкретно оптерећење.

За синусно кретање клипњаче цилиндра, проток можемо дефинисати према:

$$Q = 2\pi f A x_p \sin \alpha + \frac{V_0}{2} \frac{2\pi f}{2\beta} F_a \sin \alpha = 2\pi f \left( x_p + \frac{V_0 F_a}{2\beta} \right) \sin \alpha \quad (3.50)$$

$$x_p = \frac{F_a}{c} \quad (3.51)$$

Полазећи од претходно дефинисане једначине за стварни проток кроз серво разводник, добијамо:

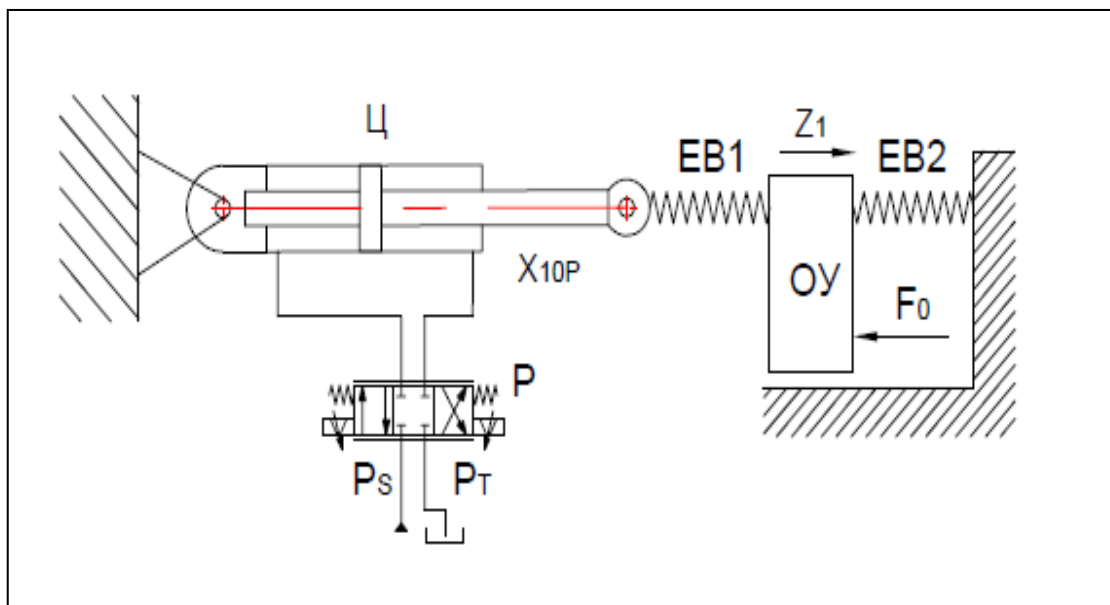
$$Q = Q_N \sqrt{\frac{\Delta P_v}{\Delta P_N}} \Rightarrow Q^2 = \frac{Q_N^2}{\Delta P_N} \Delta p_v = \frac{Q_N^2}{\Delta P_N} (p_s - p_m - p_a \sin \alpha) \quad (3.52)$$

$p_m$  - притисак који зависи од претходне силе код уградње цилиндра

### 3.4 Савремени, унапређени прорачун електрохидрауличних актуационих система

У поглављу о почетном димензионисању односно прорачуну електрохидрауличних система у овом раду дат је систематизовано основни приступ. Овде се даље разматрају могућа унапређења прорачуна у оквиру почетног димензионисања електрохидрауличног актуационог система. Унапређење прорачуна се разматра у четири дела. У првом делу се узима у обзир крутост везе цилиндра и млазника, у другом делу се анализира прорачунски утицај склопа за развођење преко проточних отвора на разводнику, трећи део разматра могућност побољшавања карактеристика актуационих система на основу резултата прорачуна а, четврти део разматра прелазне процесе без симулација.

Модел за прорачун је приказан на слици 3.17. Као што се са слике види, узета је у разматрање крутост везе цилиндра и инерцијалног оптерећења и посебно опружно, позиционо оптерећење. Специфичност овог прорачуна је што он претпоставља да није позната сила оптерећења и потребна брзина актуатора. Као што се на слици 3.17 види, разматра се оптерећење дефинисано преко једне опруге, EB2 (Еластична Веза 2), чија је крутост  $c_2$  и констатна сила  $F_0$ . Ово је врло чест случај у пракси и можемо рећи да потпуно одговара и актуационом систему када је у питању флексибилни млазник. Веза цилиндра и инерцијалног оптерећења (млазника) је такође приказана као еластична, EB1, са крутошћу  $c_1$ . Потпуно је јасно да систем мора да обезбеди адекватни одговор, позицију по задатом хармонисјком закону [26], [27].



Слика 3.17-Рачунска шема за избор параметара актуаторског система са пригушним управљањем

$$X_{1p} = X_{10p} + X_{ap} \sin(\Omega t) \quad (3.53)$$

## Прилог теорији пројектовања актуатора за управљање вектором потиска ракетног мотора са флексибилним млазником

Са индексом „10“ обележена је почетна координата, са индексом 1 текућа координата, а са индексом „a“ амплитуда осциловања. У анализи која следи не узима се у обзир инерција клипа и клипњаче актуатора као и радног флуида који се креће заједно са њима. Овај губитак енергије је знатно мањи од губитка пада притиска на управљачким ивицама разводника. На основу текуће кординате која одређује положај клипњаче имамо информацију колико се радног флуида налази у оптерећеној, а колико у неоптерећеној комори цилиндра. Јасно је да цилиндар представља еластични елемент у комплетној конфигурацији актуационог система и не постоји никакво ограничење да се он посматра као еквивалентна опруга одређене крутости  $c_c$ . Приликом промене спољне силе на цилиндру  $dF$  можемо написати једначине које описују промену притиска у оптерећеној и неоптерећеној комори хидрауличног цилиндра.

$$dp_1 = -\beta_L \frac{dV_L}{V_L} = \beta_L A \frac{dy}{V_L} \quad (3.54)$$

$$dp_2 = -\beta_{nL} \frac{dV_{nL}}{V_{nL}} = -\beta_{nL} A \frac{dy}{V_{nL}} \quad (3.55)$$

Ако претпоставимо случај максималног спољњег оптерећења тако да сила на клипњачи од притиска радног флуида буде једнака спољној сили:

$$F_p = A \times p_L \quad (3.56)$$

Тада можемо дефинисати:

$$F_p = F \quad (3.57)$$

$$dF_p = A(dp_1 - dp_2) \quad (3.58)$$

Еквивалентну крутост цилиндра можемо дефинисати ако узмемо у обзир једначине (3.54) и (3.55) као:

$$c_c = \frac{dF}{dx_p} = A^2 \left( \frac{E_L}{V_L} + \frac{E_{nL}}{V_{nL}} \right) \quad (3.59)$$

Ако претпоставимо да можемо упрошћено посматрати: (тако што претпоставимо да важи, зашта има практичног оправдања):

$$V_L = V_{nL} = V \quad (3.60)$$

$$\beta_L = \beta_{nL} = \beta \quad (3.61)$$

добивамо:

$$c_c = 2A^2 \frac{\beta}{V} \quad (3.62)$$

### 3.4 Напредни, унапређени прорачун електрохидрауличних актуационих система

**Прилог теорији пројектовања актуатора за управљање вектором потиска ракетног мотора са флексибилним млазником**

Једначина (3.62) дефинише крутост цилиндра и у прорачунској анализи где се посматра кретање клипњаче није битно где је у енергетском смислу постављен овај елемент али је битно да је дефинисан својом еквивалентном крутошћу. Пошто је крутост еластичне везе  $EB_1$ ,  $c_1$  у редној вези са хидрауличним цилиндром потпуно је оправдано дефинисати нову еквивалентну крутост као:

$$\frac{1}{c_{cv}} = \frac{1}{c_c} + \frac{1}{c_1} \quad (3.63)$$

Тада можемо текућу  $F$  вредност силе на клипњачи цилиндра дефинисати као:

$$F = c_{cv}(x_p - z_1) \quad (3.64)$$

Потпуна једначина сила за актуатор приказан на слици 3.17 сада има облик:

$$\frac{md^2z_1}{dt^2} + c_2z_1 + F_0 = F \quad (3.65)$$

Ако у једначину (3.65) унесемо једначину (3.64), добијамо:

$$\frac{md^2y_1}{dt^2} + (c_{cv} + c_2)y_1 + F_0 = c_{cv}y \quad (3.66)$$

У почетном тренутку једначина (3.66) се може написати у облику:

$$(c_{cv} + c_2)y_{10} + F_0 = c_{cv}y_0 \quad (3.67)$$

Ако претпоставимо да после почетног тренутка имамо следећу ситуацију за случај малих померања важе следеће релације:

$$\Delta x_p = x_p - x_{0p} \quad (3.68)$$

$$\Delta z_1 = z_1 - z_{10} \quad (3.69)$$

Онда се може написати на основу претходног:

$$\frac{md^2\Delta y_1}{dt^2} + (c_{cv} + c_2)\Delta y_1 + F_0 = c_{cv}\Delta x_p \quad (3.70)$$

На једначину (3.70) можемо применити Лапласову трансформацију за претпостављене нулте почетне услове:

**Прилог теорији пројектовања актуатора за управљање вектором потиска ракетног мотора са флексибилним млазником**

$$W(s) = \frac{\Delta z_1(s)}{\Delta x_p(s)} = \frac{\frac{c_{cv}}{c_{cv} + 1}}{\frac{s^2}{\Omega_c^2} + 1} \quad (3.71)$$

Претходна једначина (3.71) показје да однос померања масе са еластичном везом са клипњачом и позиционим оптерећењем, има облик осцилаторног елемента без пригушења. Ово је математичко оправдање за коришћење преносних функција другог реда при линеарном опису флексибилног оптерећења. Када располажемо преносном функцијом у облику како је то приказано у једначини (3.71) можемо потражити и фреквентну карактеристику:

Јасно је да важи израз за:

$$\Omega_c = \sqrt{\frac{(c_{cv} + c_2)}{m}} \quad (3.72)$$

Амплитудну карактеристику дефинишемо:

$$A(\omega) = \frac{1}{(1 + \frac{c_2}{c_{cv}})(1 - \frac{\omega^2}{\Omega_c^2})} \quad (3.73)$$

Фазна карактеристика се дефинише на следећи начин:

$$\varphi(\omega) = \begin{cases} 0, & \omega < 0 \\ -\pi, & \omega > 0 \end{cases} \quad (3.74)$$

Да би се маса кретала према жељеном закону, дефинисаном једначином (3.53), клипњача цилиндра (актуатора) се мора кретати на следећи начин када се узме у обзир израз преко кога се дефинише фреквентна карактеристика:

$$W(j\omega) = A(\omega)e^{j\varphi(\omega)} \quad (3.75)$$

$$x_p = x_{0p} + x_a \sin[(\Omega t - \varphi(\Omega)]/A(\Omega) \quad (3.76)$$

Ако сада брзину клипњаче цилиндра дефинишемо као извод позиције:

$$v = \frac{dy}{dt} = v_M \cos(\Omega t) \quad (3.77)$$

Тако да за амплитуду брзине важи:

**Прилог теорији пројектовања актуатора за управљање вектором потиска ракетног мотора са флексибилним млазником**

$$v_M = \frac{x_{pa} \Omega}{A(\Omega)} = \frac{y_a \Omega (1 + \frac{c_2}{c_{cv}})}{(1 - \frac{\Omega^2}{\Omega_c^2})} \quad (3.78)$$

Из претходне релације смо експлицитно добили зависност максималне брзине актуатора, односно клипљаче цилиндра, од крутости цилиндра и везе цилиндра и покретне масе (млазника), као и од опружног, позиционог оптерећења, које репрезентује флексибилну везу. Смањењем ове крутости повећава се максимална брзина. Овим изразом можемо ефикасно проверити максималну брзину хидрауличног актуатора када су нам познате крутости, пре свега крутост флексибилне везе.

Сада из једначине (3.64) можемо кренути да дођемо до релације преко које можемо да дефинишемо укупну силу:

$$F = F_M \sin(\Omega t) + F_o^u \quad (3.79)$$

Где вежи следеће:

$$F_M = x_{pa} (c_2 - m\Omega^2) \quad (3.80)$$

$$F_o^u = F_o + c_2 X_{p01} \quad (3.81)$$

На основу претходних једначина могуће је сада написати следеће (на основу основног тригонометријског закона):

$$\frac{v}{v_m} = \cos(\Omega t) \quad (3.82)$$

$$\frac{(F - F_o^u)}{F_M} = \sin(\Omega t) \quad (3.83)$$

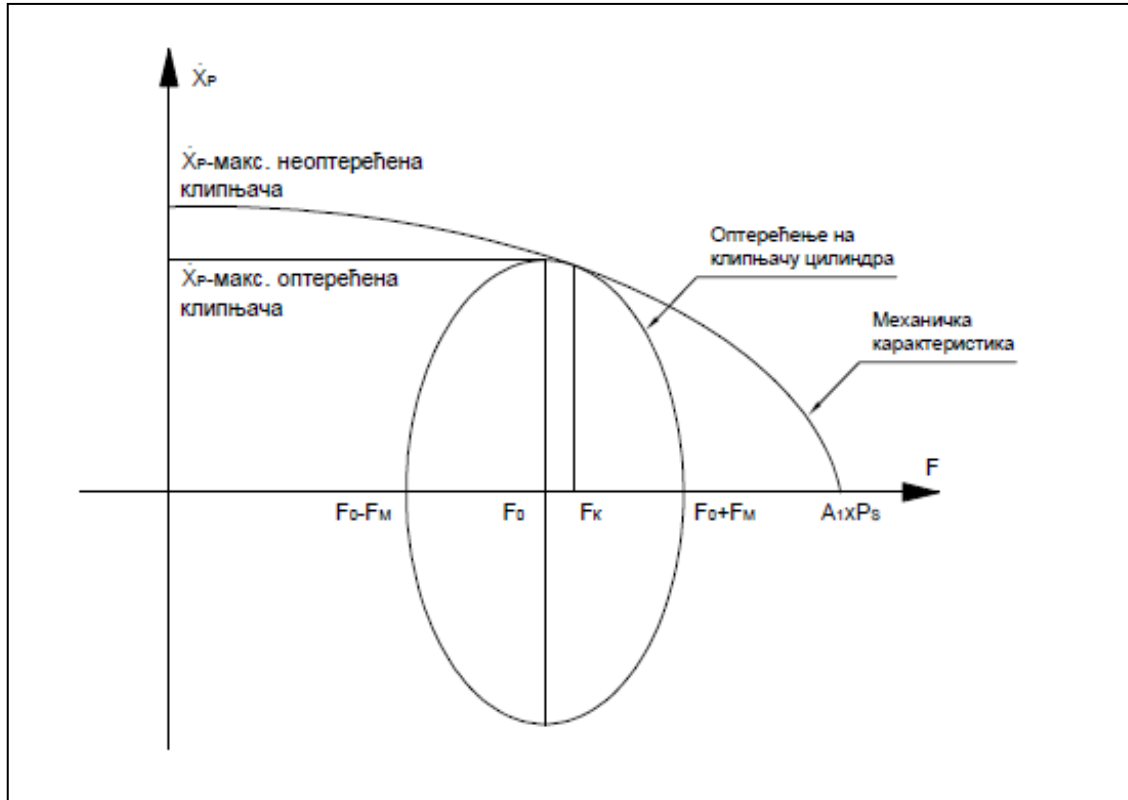
$$\left[\frac{v}{v_m}\right]^2 + \left[\frac{(F - F_o^u)}{F_M}\right]^2 = 1 \quad (3.84)$$

На основу једначине (3.84) добили смо дијаграм оптерећења у функцији од брзине, слика 3.18. Овај дијаграм се назива и елипса оптерећења. На основу овог дијаграма односно претходне релације могуће је најпрецизније израчунати снагу за реализацију претпостављеног закона кретања. Из претходне једначине (3.84) могуће је добити израз за брзину оптерећеног актуатора у следећем облику:

$$v = +/- v_M \sqrt{1 - \left[\frac{F - F_o^u}{F_M}\right]^2} \quad (3.85)$$

**Прилог теорији пројектовања актуатора за управљање вектором потиска ракетног мотора са флексибилним млазником**

На основу претходног израза и познавања интезитета укупне силе на инерцијалном оптерећењу могуће је израчунати потребну снагу актуационог система.



**Слика 3.18-График решења задатка избора параметара електрохидрауличног актуатора са пригушним управљањем и констатним притиском [27]**

Потребну снагу можемо израчунати сада једноставно:

$$N_{zdh} = F \times v \tag{3.86}$$

Максималну снагу израчунавамо за случај када се спољна сила супроставља кретању цилиндра:

$$N = F \times v_M \sqrt{1 - \left[ \frac{F - F_o''}{F_M} \right]^2} \tag{3.87}$$

Максималну снагу израчунавамо користећи први извод, као услов да постоји максимум функције:

$$\frac{dN}{dF} = 0 \tag{3.88}$$

Силу израчунавамо у овом случају као:



**Прилог теорији пројектовања актуатора за управљање вектором потиска ракетног мотора са флексибилним млазником**

$$F_{\max} = 3F_o^u / 4 + \sqrt{\left(\frac{3F_o^0}{4}\right)^2 - \left[\frac{F_o^u - F_M}{F_M}\right] / 2} \quad (3.89)$$

А одговарајућу брзину:

$$v_{F_{\max}} = v_M \sqrt{1 - \left[\frac{F_M - F_o^u}{F_M}\right]^2} \quad (3.90)$$

Претходно представља први део напредног прорачуна за актуатор флексибилног млазника.

Утицај проточне карактеристике разводника (коэффициента проводљивости) на димензионисање електрохидрауличног актуационог система, тј. избор називе величине разводника (за диференцијални цилиндар, проточна карактеристика мора бити симетрична):

$$v_{ras} = \frac{\sigma}{A} \operatorname{sign} x \sqrt{\left(p - \frac{F}{A} \operatorname{sign} x\right) / 2} \quad (3.91)$$

Претходна релација (3.89) назива се механичка карактеристика електрохидрауличног актуатора.

За диференцијални цилиндар можемо поставити следеће релације:

$$V_L = Ax_{p1} + V_{L0} \quad (3.92)$$

$$V_{nL} = A(H - x_{p1}) + V_{nL0} \quad (3.93)$$

$$x_{p1} = \begin{cases} y_{1r}, 0 \leq y_{1r} \leq 0 \\ 0, y_{1r} \leq 0 \\ H, y_{1r} \geq 0 \end{cases} \quad (3.94)$$

Тако да се може израчунати:

$$\sigma = \mu A_r \sqrt{\frac{2}{\rho}} \quad (3.95)$$

Претходна једначина приказују коефицијент пропустљивости кроз разводник. Можемо занемарити остале падове притиска у систему који су знатно мањи од пада на управљачким ивицама разводника, тако да важи једноставна релација за притисак оптерећења, односно пад притиска на цилиндру:

$$p_L = p_1 - p_t \quad (3.96)$$

**Прилог теорији пројектовања актуатора за управљање вектором потиска ракетног мотора са флексибилним млазником**

Где су:

$p_L$  – напојни притисак у актуационом систему

$p_1$  – напојни притисак у разводнику

$p_t$  – притисак у повратном воду

За даљу анализу претпостављамо да је адекватно разматрати дијаграм оптерећења тако да је у разводнику обезбеђен максимални коефицијент проводљивости

$$\sigma_M = \mu A_r \sqrt{\frac{2}{\rho}} \quad (3.97)$$

Сада се поставља један сасвим логичан захтев, а то је:

$$|v_{ras(M)}(F)| \geq |v(F)| \quad (3.98)$$

$A_r$  – максимална вредност проточне површине у разводнику

Из услова релација (3.98) следи да се овај захтев може остварити различитим притисцима напајања, различитим ефективним површинама проточног попречног пресека у разводнику и различитим различитим радним површинама у цилиндру. Идеја је да се претходни услов (3.99) оствари са најмањом могућом снагом:

$$N_{ras} = F \times v_{ras} \quad (3.99)$$

Јасно је из претходног да ће расположива снага имати максималну вредност при некој сили  $F$ :

$$N_{ras} = \frac{FG}{A} \sqrt{(p - \frac{F}{A})/2} \quad (3.100)$$

Претходна једначина је добијена под одређеним претпоставкама које не утичу на општост решења. Максималну снагу и сада налазимо преко првог извода распложиве снаге по сили:

$$\frac{dN_{ras}}{dF} = 0 \quad (3.101)$$

Уз претпоставку да је притисак напајања константан и да је константан коефицијент проводљивости кроз разводник добијамо вредност силе:

$$F_{ras\_max} = \frac{2Ap}{3} \quad (3.102)$$

Значење свих величина је приказано на слици 3.18. Има оправдања да се претходно израчуната максимална сила, релација (3.89) и израчуната сила, релација (3.102) сматрају једнаким- тада се добијају две врло значајне формуле преко којих се може проверити да ли је коректно димензионисан цилиндар

**Прилог теорији пројектовања актуатора за управљање вектором потиска ракетног мотора са флексибилним млазником**

актуационог система, диференцијална поврина и да ли је правилно изабран притисак напајања према максималној сили оптерећења на актуатору:

$$A = \frac{3F_{\max}}{2p} \quad (3.103)$$

$$p = \frac{3F_{\max}}{2A} \quad (3.104)$$

На крају остаје да се одреди и минимална вредност за максималну вредност коефицијента протока кроз разводник. Из дијаграма оптерећења то је тачка додира механичке карактеристике електрохидрауличног актуатора и дијаграма оптерећења ( $F_k$ ). Овај услов се математички представља на следећи начин:

$$v_{ras(M)}(F) \geq V(F) \quad (3.105)$$

$$dv_{ras(M)}(F)/dF = dv(F)/dF, F = F_k \quad (3.106)$$

Без губљења у општости може се тражити решење које одговара решењу у првом квадранту у складу са дијаграмом на слици 3.18.

$$v_{ras(M)} = \frac{\sigma_M}{A} \sqrt{(p - \frac{F}{A})/2} \quad (3.107)$$

$$v = v_M \sqrt{1 - [\frac{F - F_o^u}{F_M}]^2} \quad (3.108)$$

Решавајући (3.107) и (3.108) добија се за:

$$F_k = Ap - \sqrt{(Ap - F_o^u)^2 - F_M^2} \quad (3.109)$$

$$\sigma_M = \frac{2Av_M}{F_M \sqrt{A[Ap - F_o^u - \sqrt{(Ap - F_o^u)^2 - F_M^2}]} \quad (3.110)$$

На основу претходног из основне једначине са којом је дефинисан коефицијент проводљивости разводника, може се израчунати максимална вредност проточне површине у разводнику коју је неопходно остварити:

$$A_{r \max} = \sigma_M / (\mu A_r \sqrt{\frac{2}{\rho}}) \quad (3.111)$$

Релација (3.111) нам даје могућност да проверимо изабрани разводник, односно његову проточну карактеристику у функцији свих сила које делују као спољне

## Прилог теорији пројектовања актуатора за управљање вектором потиска ракетног мотора са флексибилним млазником

оптерећење на крај клипњаче актуатора. Ово је далеко тачнији и прецизнији критеријум од оног да се разводник усваја тако што максимални проток кроз неоптерећен актуатор треба да буде око 2/3 номиналног протока.

Дефинисање једначине кретања објекта управљања, сведено на крај клипњаче цилиндра актуатора као елемента погонског механизма користи се за коначне прорачуне актуаторских система.

У теорији се сматра да је врхунац Њутновске динамике динамике изражен преко Лагранжеових једначина. Коришћење ових једначина је јако важно у случајевима када не постоји концентрисана маса на крају клипњаче као репрезент инерцијалног оптерећења већ механизам са одређеним бројем ослонаца (веза) и са више концентрисаних маса. Лагранжове једначине се базирају на такозваном енергетском принципу, посматра се преко посебне променљиве разлика кинетичке и потенцијалне енергије. У овом раду се ради анализа актуационог система тако да се дефинише одговарајућа Лангражова једначина. Ради се о једној једначини пошто актуаторски систем флексибилног млазника има један степен слободe. Приступ који је овде приказује је посебно важан за разумевање алтернативног поступка за математичко моделирање преко Бонд Графова који се такође као и Лагранжеове једначине заснива на енергетског принципу кога је најједноставније дефинисати на следећи начин: Енергија у динамичком систему остаје константна све док на систем делују само спољашње силе.

Основни облик Лангранжове једначине је за конзервативне системе без спољашњих сила:

$$\frac{d}{dt} \left( \frac{\partial L}{\partial \dot{q}_i} \right) - \frac{\partial L}{\partial q_i} = 0 \quad (3.112)$$

$$L = T - V \quad (3.113)$$

За системе са спољашњим силама:

$$\frac{d}{dt} \left( \frac{\partial L}{\partial \dot{q}_i} \right) - \frac{\partial L}{\partial q_i} + \frac{\partial P}{\partial \dot{q}_i} = Q_i \quad (3.114)$$

Где је  $P$  функција губитка енергије у систему а  $Q$  генералисана спољна сила.

За рачунску шему актуационог система може се као почетна једначина Лагранжа дефинисати следећа релација:

$$d \left( \frac{\partial L}{\partial \dot{q}_s} \right) / dt - \frac{\partial L}{\partial q_s} = - \frac{\partial V}{\partial q_s} - \frac{\partial D}{\partial \dot{q}_s} - \frac{\partial P}{\partial \dot{q}_s} + Q_s \quad (3.115)$$

Са  $D$  смо означили функцију дисипације, и она узима у обзир вискозно трење које постоји у механичким везама.

### 3.4 Напредни, унапређени прорачун електрохидрауличних актуационих система

Можемо написати израз за кинетичку енергију у облику:

$$L = \frac{W_s \times \dot{q}_s^2}{2} \quad (3.116)$$

$W_s$  - има смисао редуковане масе на крају клипњаче

$$d\left(\frac{\partial L}{\partial \dot{q}_s}\right) / dt - \frac{\partial L}{\partial q_s} = \frac{d(W_s \dot{q}_s)}{dt} - \frac{\dot{q}_s^2}{2 \frac{\partial W_s}{\partial q_s}} = W_s \ddot{q}_s + \frac{\dot{q}_s^2}{2 \frac{\partial W_s}{\partial q_s}} \quad (3.117)$$

На основу претходних једначина (3.114) и (3.115) за случај када је  $q_s$  линеарна координата, што је случај када је актуатор хидраулични цилиндар:

$$m_{sved} \ddot{q}_s + \frac{\dot{q}_s^2}{\frac{\partial m_{sved}}{\partial q_s}} = Q_s \quad (3.118)$$

Ову једначину сада можемо превести у облик:

$$m_{sved} \ddot{z} + \frac{\dot{z}_1^2}{2} \times \frac{\partial m_{sved}}{\partial z} = F_e + p_L \times A \quad (3.119)$$

Претходна једначина (3.119) има текућу координату померање оптерећења у правцу осе клипњаче, компоненту брзине у истом правцу и масу која је сведена на клипњачу. У посебном поглављу овог рада, 3.10 дефинисан је начин за рачунање сведене (редуковане) масе. Убрзање и брзина у правцу клипњаче се могу релативно лако израчунати. Најкомплекснији део који треба дефинисати за претходну једначину је промена сведена масе у функцији координате и то захтева посебну рачунско-графичку анализу. Својим другим чланом и трећим чланом у претходној једначини лево ова једначина се разликује од класичне једначине за силе по другом Њутновом закону.

Посебна врста прорачуна, која се наводи, дозвољава нам да проценимо карактер прелазног процеса без класичног приступа моделовања система и коришћења одређених модела за симулационо посматрање понашања актуационог система, односно њихових прелазних процеса:

Аналізу изводимо преко почетне идеје да дефинишемо промену проводности разводника према хармонијском закону:

**Прилог теорији пројектовања актуатора за управљање вектором потиска ракетног мотора са флексибилним млазником**

$$\sigma = \sigma_a \sin(\omega t) \quad (3.120)$$

Оптерећење цилиндра ћемо посматрати да је само позиционо:

$$F_e = c \times \Delta z_1 \quad (3.121)$$

Из литературе је познато да се брзина цилиндра клипњаче може изразити у функцији промене амплитуде проводности разводника, притиска и позиционог оптерећења:

$$\dot{x}_p = \frac{\sigma_a}{A} \sqrt{\frac{1}{2} \left\{ p_s - p_2 - \frac{c \Delta z_1}{A} \text{sign}[\sin(\omega t)] \right\}} \sin \omega t \quad (3.122)$$

Услов да цилиндар ради као погонски члан-хидромотор је:

$$\Delta z_1 \text{sign}[\sin(\omega t)] = \Delta z_{1\max} \quad (3.123)$$

Тада је јасно да можемо дефинисати:

$$\Delta z_{1\max} = \frac{1}{c} \times A(p_s - p_2) \quad (3.124)$$

Претходно значи да ако је брзина клипњаче цилиндра нула,  $\dot{x}_p = 0$ , амплитуда хода задржава констатну вредност  $\Delta z_{1\max} \text{sign}[\sin(\omega t)] = \Delta z_1$ , синусна функција не мења свој знак.

Ако пођемо од једноставне дефиниције брзине:

$$\dot{x}_p = \frac{dz_1}{dt} \quad (3.125)$$

$$d\Delta z_1 / \sqrt{\frac{1}{2} \left\{ p_s - p_2 - \frac{c \Delta z_1}{A} \text{sign}[\sin(\omega t)] \right\}} = \frac{\sigma_a}{A} \sin(\omega t) dt \quad (3.126)$$

Претходни израз се не може интегралити као таблични интеграл али му се може тражити периодично решење, када се знак синусне функције не мења:

$$(n-1)\pi \leq \omega t \leq n\pi \quad (3.127)$$

Решење претходног израза (3.126), уз услов:

**Прилог теорији пројектовања актуатора за управљање вектором потиска ракетног мотора са флексибилним млазником**

$$|z_1| \prec \Delta z_{1\max} \quad (3.128)$$

Има облик:

$$\frac{-4A}{c\sqrt{(p_s - p_2 - c\frac{\Delta z_1}{A})/2}} = -\sigma_a \frac{1}{A\omega \cos \omega t} + C_1 \quad (3.129)$$

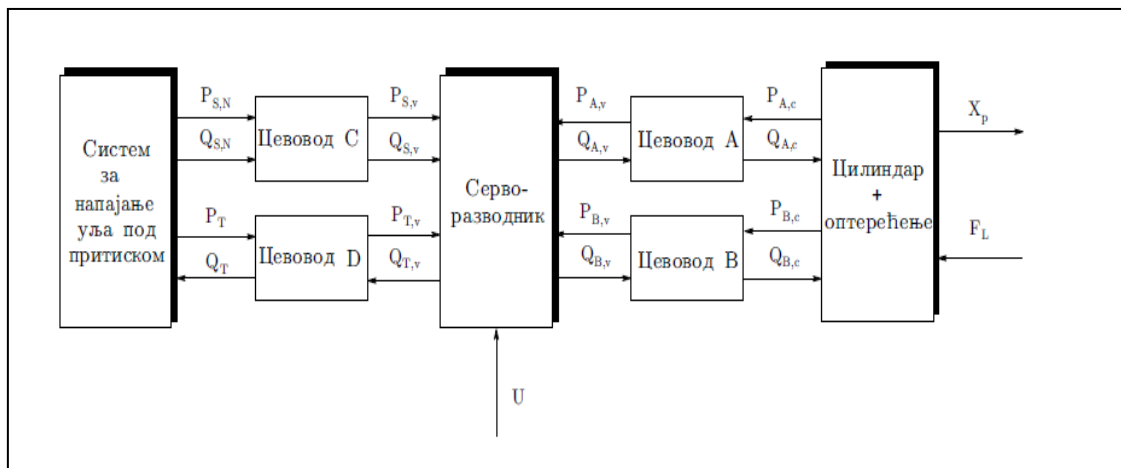
Константу интеграције можемо одредити из следећих почетних услова:

$\Delta z_1 = \Delta z_{1(n-1)}$  у тренутку  $t_{n-1} = (n-1)\frac{\pi}{\omega}$  и  $\cos \omega t = 1$ , из претходне једначине добијамо израз за константу интеграције:

$$C_1 = \frac{\sigma_a}{A\omega} - \frac{4A}{c\sqrt{(p_s - p_2 - c\frac{\Delta z_1}{A})/2}} \quad (3.130)$$

### 3.5 Математичко моделирање актуационог система-основни линеаризовани математички модел са додавањем статичких нелинеарности

У Прилогу 7 дат је општи приступ математичком моделирању. У овом поглављу из општег приступа изводе се математички модели који се могу ефикасно употребити за синтезу управљачких алгоритама. Поред тога, у овом поглављу се не користи техника писања диференцијалних једначина него директан приступ моделирању преко блок дијаграма и добро познатих, такозваних, идеалних преносних функција електрохидрауличног актуационог система (све једначине за добијање идеалних преносних функција наведне су у поглављу о општем приступу моделирању електрохидрауличног актуационог система). Блок дијаграм на овом нивоу моделирања је добар избор јер омогућава релативно једноставно праћење токова сигнала за моделе не посебно високог реда за сегменте система како је то приказано на слици 3.19:



Слика 3.19-Општи блок дијаграм електрохидрауличног актуатора за моделирање [28]

У сваком случају, први корак је добијање преносне функције у директној грани у факторизованом облику, где је реалтивно једноставно видети утицаје појединих величина на укупну динамику. Поред тога имамо могућност да у факторизованом облику када у преносној функцији у имениоцу видимо полове карактеристичног полинома, можемо одмах да проценимо њихов појединачни утицај на динамику система по томе колико се разликују у удаљености од координатног почетка у левој полуравни „ $s$ “ домена. Ово нам даје могућност да снижавамо ред система простим изостављањем најудаљенијег пола од координатног почетка. У овом раду дајемо предност једном другом критеријуму за снижавање реда који се у изворном облику изводи на следећи начин, а заснива се на чињеници да количник система вишег реда и система сниженог реда за један треба да буде 1. На основу овога не радимо просто уклањање једног пола из факторизованог полинома већ срачунавамо нове вредности полова када је ред снижен за 1.

### 3.5 Математичко моделирање актуационог система-основни линеаризовани математички модел са додавањем статичких нелинеарности



**Прилог теорији пројектовања актуатора за управљање вектором потиска ракетног мотора са флексибилним млазником**

Нека је дата преносна функција трећег реда која по облику одговара преносној функцији електрохидрауличног дела актуатора, склоп разводник-цилиндар у облику (3.131).

$$G(s) = \frac{K}{s(s+2)(s+40)} \quad (3.131)$$

Тада на основу претходно прво наведеног приступа, можемо да занемаримо најудаљенији пол од координатног почетка:

$$G(s) = \frac{K}{s(s+2)} \quad (3.132)$$

Преносна функција (3.132) је нижег реда за један од преносне функције (3.131). Јасно је из претходног да је сачувана вредност појачања у стационарним условима и у преносној функцији нижег реда.

Сада анализирамо други претходно поменути приступ снижавању реда преносне функције за 1.

Нека је систем описан преносном функцијом (3.133):

$$H(s) = K \frac{a_m s^m + a_{m-1} s^{m-1} + \dots + a_1 s + 1}{b_n s^n + b_{n-1} s^{n-1} + \dots + b_1 s + 1} \quad (3.133)$$

Преносна функција нижег реда, апроксимативна вредност може да се прикаже у облику:

$$L(s) = K \frac{c_p s^p + \dots + c_1 s + 1}{d_g s^n + \dots + d_1 s + 1} \quad (3.134)$$

На основу израза (3.133) и (3.134) видимо да је у обе преносне функције задржана иста вредност појачања, што је важно за стационарни радни режим, на исти начин како је то показано и у изразу (3.132).

$$\frac{H(j\omega)}{L(j\omega)} \approx 1 \quad (3.135)$$

Количник преносне функције вишег и нижег реда треба што мање да се разликује од 1 на целом фреквентном опсегу:

**3.5 Математичко моделирање актуационог система-основни линеаризовани математички модел са додавањем статичких нелинеарности**

**Прилог теорији пројектовања актуатора за управљање вектором потиска ракетног мотора са флексибилним млазником**

За одређивање коефицијената преносне функције нижег реда могу се користити следећи изрази:

$$M^{(k)}(s) = \frac{d^k}{ds^k} M(s) \quad (3.136)$$

$$\Delta^{(k)}(s) = \frac{d^k}{ds^k} \Delta(s) \quad (3.137)$$

Претходни изрази су полиноми бројиоца и имениоца у изразу (3.135). Из тероје полинома може се написати израз за:

$$M_{2q} = \sum_{k=0}^{2q} \frac{(-1)^{k+q} M^{(k)}(0) M^{(2k-q)}(0)}{k!(2k-q)!}, q = 0,1,2,\dots \quad (3.138)$$

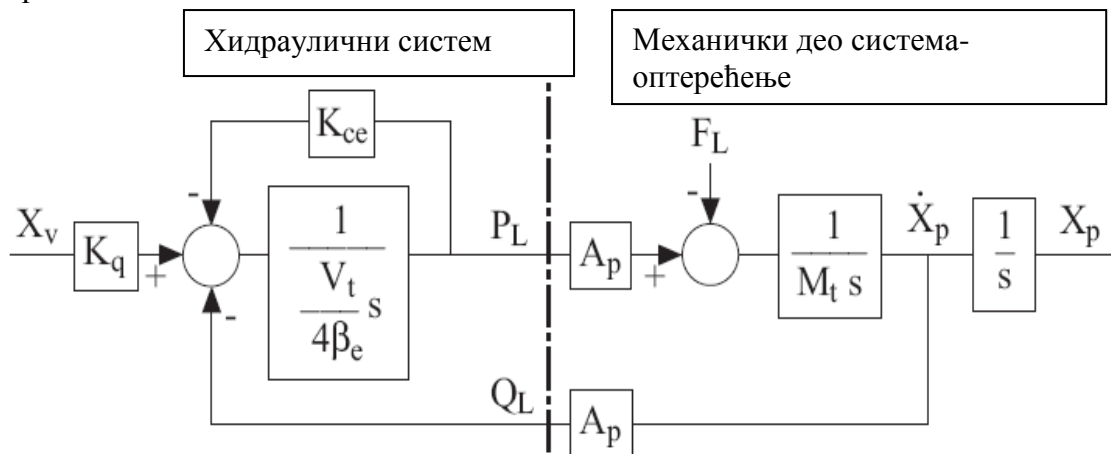
$$\Delta_{2q} = \sum_{k=0}^{2q} \frac{(-1)^{k+q} \Delta^{(k)}(0) \Delta^{(2k-q)}(0)}{k!(2k-q)!}, q = 0,1,2,\dots \quad (3.139)$$

Из услова:

$$M_{2q} = \Delta_{2q} \quad (3.140)$$

израчунавају се коефицијенти полинома, на основу којих дефинишемо преносну функцију сниженог реда за 1.

Почетни модел у виду блок дијаграма хидрауличног актуатора дат је на слици 3.20. Следећи корак је да у тај модел додамо крутост веза, актуатора и нови модел је приказан на слици 3.21.



**Слика 3.20-Блок дијаграм електрохидрауличног актуатора (разводник и цилиндар) са инерцијалном масом као оптерећењем**

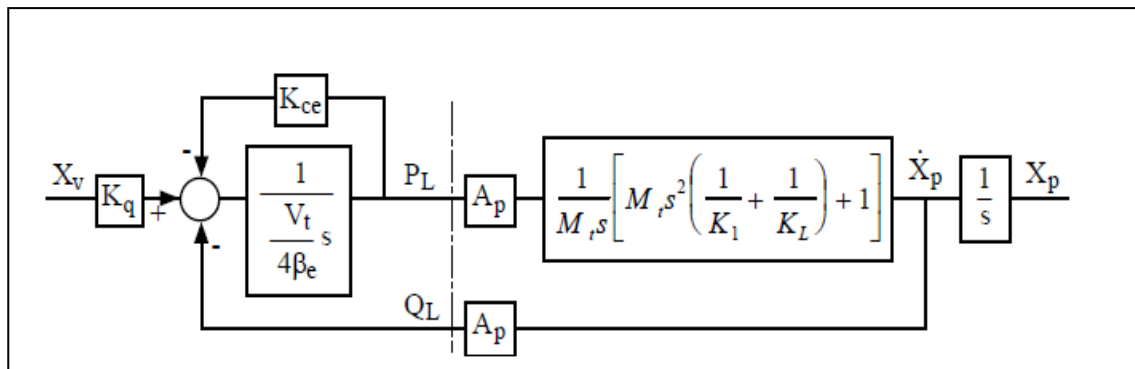
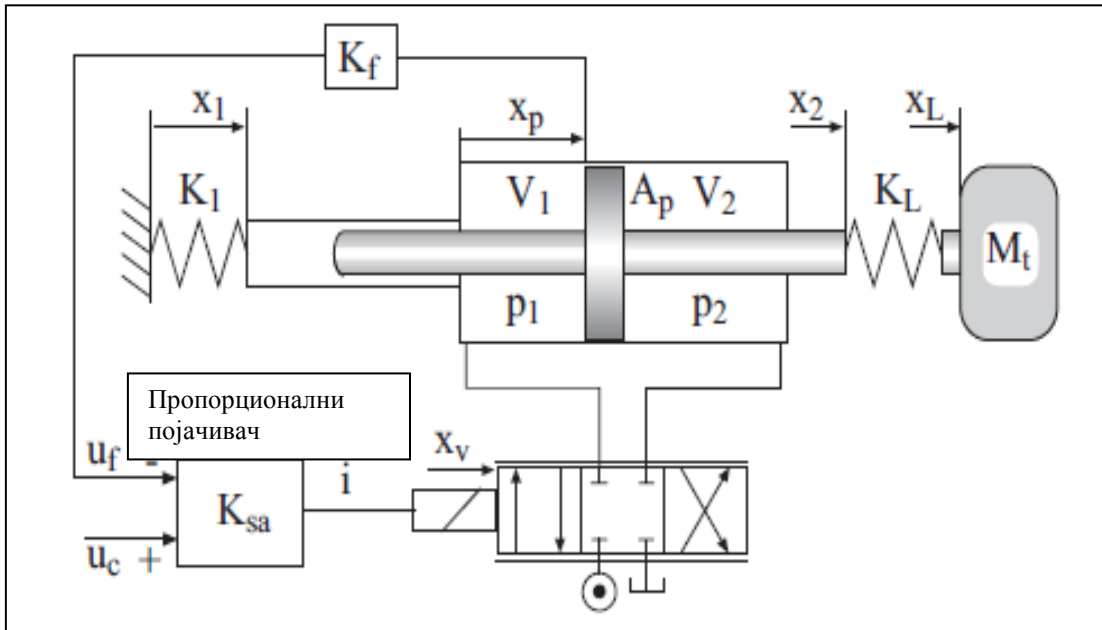
$$x_p = \frac{A_p P_L - F_L}{M_t s^2} \quad (3.150)$$

**3.5 Математичко моделирање актуационог система-основни линеаризовани математички модел са додавањем статичких нелинеарности**

**Прилог теорији пројектовања актуатора за управљање вектором потиска ракетног мотора са флексибилним млазником**

Ако предпоставимо и почетној фази да је актуатор неоптерећен, добијамо преносну функцију где смо узели у обзир механичко оптерећење:

$$F_L = 0 \Rightarrow G_m(s) = \frac{A_p^2}{M_t s^2} = \frac{1}{\frac{M_t}{A_p^2 s}} \quad (3.151)$$



**Слика 3.21-Блок дијаграм актуатора са моделованом крутошћу веза са ослонцем и оптерећењем [21]**

$$A_p p_L = M_t s^2 x_L = -K_1 x_1 = K_L (x_2 - x_L) \quad (3.152)$$

Проток оптерећеног цилиндра је:

$$Q_L = A_p S (x_2 - x_1) = A_p s x_p \quad (3.153)$$

**3.5 Математичко моделирање актуационог система-основни линеаризовани математички модел са додавањем статичких нелинеарности**

**Прилог теорији пројектовања актуатора за управљање вектором потиска ракетног мотора са флексибилним млазником**

На основу (3.152) и (3.153) можемо добити преносну функцију за механичко оптерећење:

$$G_m(s) = \frac{Q_L}{P_L} = \frac{A_p^2}{M_t s} [M_t s^2 (\frac{1}{K_1} + \frac{1}{K_L}) + 1] \quad (3.154)$$

Претходно наведени блок дијаграми приказују актуатор оптерећен само инерцијалним оптерећењем. Из претходних блок дијаграма видимо да постоји такозвана унутрашња повратна спрега по протоку, која узима у обзир оптерећење актуатора.

Сада се изводи нелинеарни математички модел у простору стања који ће се користити приликом синтезе управљачког алгоритма на бази линеаризације у повратној спреси (feedback linearization). [32]

Величине стања дефинишемо на следећи начин:

$$\begin{aligned} x_1 &= x_p \\ x_2 &= \dot{x}_p \\ x_3 &= p_A \\ x_4 &= p_B \\ x_5 &= x_v \\ x_6 &= \dot{x}_v \end{aligned} \quad (3.155)$$

На основу претходног, прве две величине стања су позиција и брзина цилиндра, трећа и четврта величина стања су притисци у коморама цилиндра, а пета и шеста величина стања позиција и брзина разводног клипа разводника. Сада можемо да означимо и управљачку и поремећајну величину на следећи начин:

$$\begin{aligned} u_1 &= u_v \\ u_2 &= F_L \end{aligned} \quad (3.156)$$

Без губитка у општем приступу посматраћемо одмах цилиндар са пролазном клипњачом:

$$\dot{x}_1 = x_2 \quad (3.157)$$

$$\dot{x}_2 = \frac{1}{m(x_1)} [(x_3 - x_4)A_p - F_f(x_2) - u_2] \quad (3.158)$$

$$\dot{x}_3 = \frac{E_A(x_3)}{V_A(x_1)} [Q(x_3, x_5) - x_2 A_p + Q_{Li}(x_3, x_4)] \quad (3.159)$$

$$\dot{x}_4 = \frac{E_B(x_4)}{V_B(x_1)} [Q(x_4, x_5) + x_2 A_p - Q_{Li}(x_3, x_4)] \quad (3.160)$$

**3.5 Математичко моделирање актуационог система-основни линеаризовани математички модел са додавањем статичких нелинеарности**

**Прилог теорији пројектовања актуатора за управљање вектором потиска ракетног мотора са флексибилним млазником**

$$\dot{x}_5 = x_6 \quad (3.161)$$

$$\dot{x}_6 = \omega_v^2 [u_1 - \frac{2D_v}{\omega_v} x_6 - x_5 - f_{hs} \text{sign}(x_5)] \quad (3.162)$$

Ако се узме у обзир нелинеарна карактеристика протока кроз разводник, типа квадратног корена може се написати трећа и четврта једначина у следећем облику:

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_3 \\ \dot{x}_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{E_A(x_3)}{V_A(x_1)} [-A_p x_2 + K_{Li}(x_3 - x_4)] \\ \frac{E_B(x_4)}{V_B(x_1)} [A_p x_2 - K_{Li}(x_3 - x_4)] \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{E_A(x_3)}{V_A(x_1)} c_{v1} \sqrt{p_s - x_3} \\ -\frac{E_B(x_4)}{V_B(x_1)} c_{v4} \sqrt{x_4 - p_T} \end{bmatrix} \quad (3.163)$$

Претходна једначина важи за позитивни управљачки сигнал. За негативни управљачки сигнал добијамо:

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_3 \\ \dot{x}_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{E_A(x_3)}{V_A(x_1)} [-A_p x_2 + K_{Li}(x_3 - x_4)] \\ \frac{E_B(x_4)}{V_B(x_1)} [A_p x_2 - K_{Li}(x_3 - x_4)] \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{E_A(x_3)}{V_A(x_1)} c_{v2} \sqrt{x_3 - p_T} \\ -\frac{E_B(x_4)}{V_B(x_1)} c_{v3} \sqrt{p_s - x_4} \end{bmatrix} \quad (3.164)$$

На слици 3.22 се приказује блок дијаграм оптерећеног актуатора, са инерцијалним и са позиционим оптерећењем и са узетом у обзир крутошћу везе оптерећења и цилиндра. Прво се приказје блок дијаграм са детаљним моделом разводника, а затим блок дијаграмом где је разводник приказан преносном функцијом првог реда. На основу овог модела, приказаног на слици 3.23, извешће се три нелинеарна модела са узимањем у обзир статичких нелинеарности у облику у коме је могуће проверити стабилност актуационог система, пре било каквог рада на синтези актуационог система.

Нелинеарни математички модели за електрохидрауличне системе су врло комплексни и нису јединствено дефинисани. Како је приказано у Прилогу 7 узета је у обзир примарно нелинеарна статичка карактеристика разводника и она је била предмет линеаризације за мала померања разводног клипа. Али када је потребно узети у обзир друге елементе нелинеарне природе, засићење по протоку и притиску, нелинеарност типа зоне неосетљивости, нелинеарности типа зазора или нелинеарности које описују трење, технологија моделирања је много сложенија. Ово су нелинеарности које се не могу увести директно у модел, јер се не може добити еквивалентна нелинеарност. Разлог да се не може добити еквивалентна нелинеарност је у чињеници да су нелинеарности међусобно раздвојене

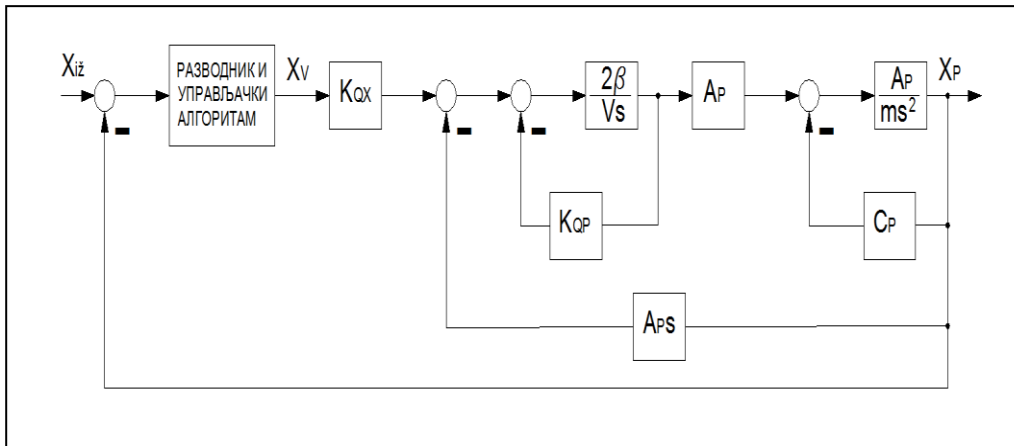
**3.5 Математичко моделирање актуационог система-основни линеаризовани математички модел са додавањем статичких нелинеарности**

## Прилог теорији пројектовања актуатора за управљање вектором потиска ракетног мотора са флексибилним млазником

линеарним деловима. Наведене нелинеарности парцијално ће се уводити у математички модел електро хидрауличног актуационог система. Провера стабилности са актуационог система преко математичког модела са више нелинеарности се не може практично разматрати, јер не постоји одговарајућа математичка подршка.

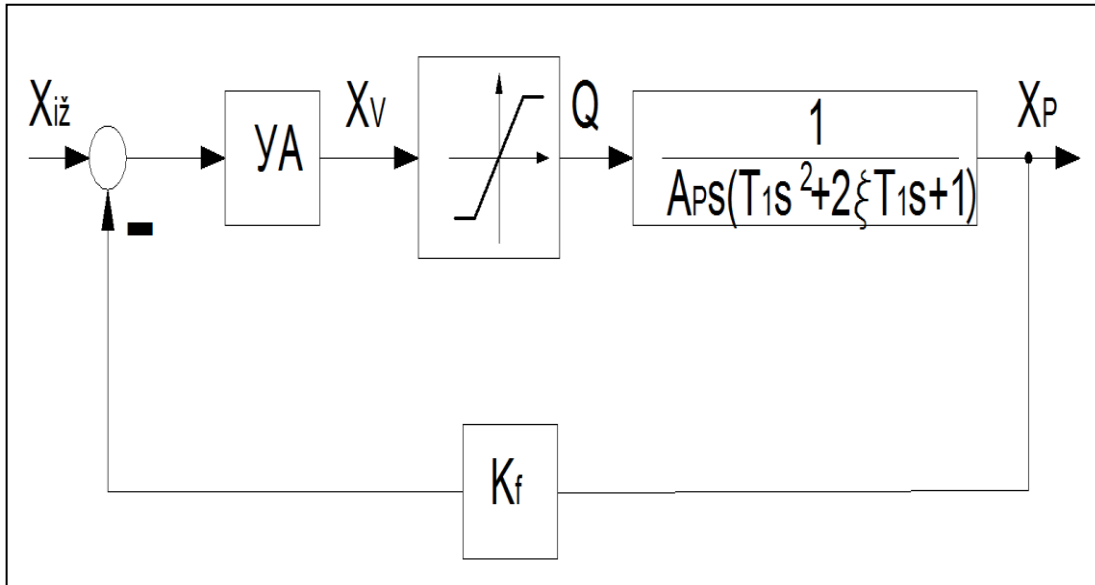
Неке од тих нелинеарности, могу се кориговати односно компензовати преко електронског појачивача разводника (трење на клипу преко дитер сигнала и нелинеарна статичка карактеристика са зоном неосетљивости), неке као трење у цилиндру преко посебних конструкцијама цилиндра са заптивкама минималног трења. У основи постоје одређене нелинеарности типа засићења по притиску и протоку које су последица реалних димензија система. Правилним димензионисањем електрохидрауличног система обезбеђује се да се систем стално налази у зони њихових линеарних делова. Без обзира на ову чињеницу потребно је сагледати и ризике које доноси и евентуална грешка у димензионисању када разводник може бити у таквом стању да је засићен по протоку или притиску. У сваком случају на основу блок дијаграма са слике 3.22, увођењем нелинеарности засићења по протоку добија се блок дијаграм на слици 3.23. Проток можемо описати нелинеарном функцијом на следећи начин: [33], [26], [27].

$$Q = \varphi(x) \quad (3.165)$$



Слика 3.22-Основни блок дијаграм актуационог система са инерцијалним и позиционим оптерећењем [26]

### 3.5 Математичко моделирање актуационог система-основни линеаризовани математички модел са додавањем статичких нелинеарности



Слика 3.23-Структурни дијаграм система са засићењем по протоку

$$\varphi(x) = \begin{cases} +Q_m, & x \geq x_m \\ k_{Qx}x, & -x_m < x < x_m \\ -Q_m, & -x_m \leq x \end{cases} \quad (3.166)$$

После хармонијске линеаризације, проток можемо изразити на следећи начин

$$Q = q(A)x \quad (3.167)$$

или

$$Q = k_{Qx} \bar{q}(\bar{A})x \quad (3.168)$$

$$\bar{q}(\bar{A}) = \frac{1}{k_{Qx}} q(A) \quad (3.169)$$

$$\bar{A} = \frac{A}{x_m} \quad (3.170)$$

$$\bar{q}(\bar{A}) = \begin{cases} q(\bar{A}) = 1, & \bar{A} < 1 \\ \arcsin \frac{1}{\bar{A}} + \frac{1}{\bar{A}} \sqrt{1 - \frac{1}{\bar{A}^2}}, & \bar{A} \geq 1 \end{cases} \quad (3.171)$$

Једначина (3.171) дефинише коефицијент хармонијске линеаризације, а  $A$  је амплитуда осциловања клипа. Преносна функција разводника и електронског појачивача разводника на основу претходног блок дијаграма на слици 3.22 је:

**3.5 Математичко моделирање актуационог система-основни линеаризовани математички модел са додавањем статичких нелинеарности**

**Прилог теорији пројектовања актуатора за управљање вектором потиска ракетног мотора са флексибилним млазником**

$$G_c(s) = \frac{k_1 k_2}{(T_1 s + 1)(T_2 s + 1)} \quad (3.172)$$

Сада можемо преносну функцију актуаторског система у директној грани написати у следећем облику:

$$G(s) = \frac{K(A)}{s(T_1 s + 1)(T_2 s + 1)(T_3^2 s^2 + 2\xi T_3 s + 1)} \quad (3.173)$$

$$K(A) = k_f k_1 k_2 q(A) \frac{1}{A_p} = K\bar{q}(\bar{A}) \quad (3.174)$$

Стабилност овог нелинеарног модела, који је линеаризован преко хармонијске функције, разматра се преко карактеристичног полинома. Тада можемо занемарити динамику разводника:

$$s(T_2 s + 1)(T_3 s^2 + 2\xi T_3 s + 1) + K(A) = 0 \quad (3.175)$$

Или када се изврши множење, добија се:

$$T_3 T_2 s^4 + (2\xi T_3 T_2 + T_3^2) s^3 + (T_2 + 2\xi T_3) s^2 + s + K\bar{q}(\bar{A}) = 0 \quad (3.176)$$

Сада према добро познатим правилима превођења у фреквентни домен можемо писати на следећи начин претходну једначину:

$$X(A, \omega) + jY(A, \omega) = 0 \quad (3.177)$$

$$X(A, \omega) = T_3^2 T_2 \omega^4 - (T_2 + 2\xi T_3) \omega^2 + K\bar{q}(\bar{A}) = 0 \quad (3.178)$$

$$Y(A, \omega) = \omega - (2\xi T_3 T_2 + T_3^2) \omega^3 \quad (3.179)$$

Из претходне једначине (3.179) добијамо једноставно израз за израчунавање фреквенције периодичног решења:

$$\omega = \frac{1}{\sqrt{2\xi T_3 T_2 + T_3^2}} \quad (3.180)$$

Сада израз (3.232) можемо увести у једначину (3.230) и добити израз за амплитуду периодичног решења:

**3.5 Математичко моделирање актуационог система-основни линеаризовани математички модел са додавањем статичких нелинеарности**



**Прилог теорији пројектовања актуатора за управљање вектором потиска ракетног мотора са флексибилним млазником**

$$K\bar{q}(A) = \frac{T_2 + 2\xi T_3}{2\xi T_3 T_2 + T_3^2} - \frac{T_3^2 T_2}{(2\xi T_3 T_2 + T_3^2)^2} \quad (3.181)$$

У претходном изразу (3.181) имамо производ појачања линеарног дела система и линеаризованог дела (нелинеарног дела) система.

Можемо повезати једначине (3.173) и (3.181) тако да добијемо:

$$K \frac{2}{\pi} \left( \arcsin \frac{1}{A} + \frac{1}{A} \sqrt{1 - \frac{1}{A^2}} \right) = \frac{2\xi T_3^2 + T_2^2 + 2\xi T_3 T_2}{T_3 (2\xi T_3 + T_3^2)^2} \quad (3.182)$$

Сада се из врло практичних разлога може написати:

$$K_{gr} = \frac{2\xi T_3^2 + T_2^2 + 2\xi T_3 T_2}{T_3 (2\xi T_3 + T_3^2)^2} \quad (3.183)$$

$$K_{kr} = \frac{K_{gr}}{\bar{q}(A)} \quad (3.184)$$

Израз (3.184) дефинише критично појачање нелинеарног система.

Даље се анализира нелинеарност засићења по притиску. У хидрауличном систему у основи максимални притисак који се остварује одговара напојном притиску. Само у посебним случајевима спољног оптерећења (инерцијално оптерећење) може доћи и до појаве већег притиска од напојног али то се не може десити када је оптерећења позиционог типа какав је и флексибилни млазник. Нелинеарност засићења по протоку је у геометријском смислу слична нелинеарности засићења по притиску, тако да можемо на почетку записати следеће:

$$p_C = \bar{q}(A) p_{teor} \quad (3.185)$$

$p_C$  – притисак у цилиндру који може бити у засићењу

$p_{teor}$  – теоријски притисак у актуационом систему без узимања у обзир засићења

Запис једначина понашања актуатора може бити у следећем облику:

$$\begin{aligned} m\ddot{x}_p &= p_C A_p \\ p_C &= f(p_{teor}) \\ k_{Qx} x - k_{Qp} p_C &= A_p \dot{x}_p + k_E \dot{p}_{teor} \end{aligned} \quad (3.186)$$

Сада можемо написати једначине управљачког дела актуаторског система:

**3.5 Математичко моделирање актуационог система-основни линеаризовани математички модел са додавањем статичких нелинеарности**

**Прилог теорији пројектовања актуатора за управљање вектором потиска ракетног мотора са флексибилним млазником**

$$T_2 \dot{x} + x = k_1 k_2 U_c \quad (3.187)$$

$$U_c = U_R - k_f x_p \quad (3.189)$$

Можемо да дефинишемо следећу преносну функцију:

$$W_{pQ} = \frac{P_C}{Q_D} = \frac{1}{k_{Qp} [T_G(\bar{A})s + 1]} \quad (3.190)$$

Ако се нађе еквивалентни блок дијаграм за унутрашњу контуру система, добијамо следећу преносну функцију:

$$W_{AM}(\bar{A}, s) = \frac{\frac{k_{Qx}}{A_p}}{s[T_G(\bar{A})T_M s^2 + T_M + 1]} \quad (3.191)$$

$$T_G(\bar{A}) = \frac{B}{C_G \bar{q}(\bar{A})} = T_G \frac{1}{\bar{q}(\bar{A})} \quad (3.192)$$

Означимо још:

$$T_k(\bar{A}) = \sqrt{T_M T_G(\bar{A})} = \frac{\sqrt{T_M T_G}}{\sqrt{\bar{q}(\bar{A})}} \quad (3.193)$$

Сада можемо једначину (2.191) написати на основу претходног у следећем облику:

$$W_{AM}(\bar{A}, s) = \frac{\frac{k_{Qx}}{A_p}}{s[T_k^2(\bar{A})s^2 + 2\xi(\bar{A})T_k(\bar{A})s + 1]} \quad (3.194)$$

Ако занемаримо динамику разводника и управљања, можемо на основу слике 3.24 написати следећу преносну функцију отвореног кола актуаторског система са засићењем по притиску:

$$W(\bar{A}, s) = \frac{K}{s[T_M T_G(\bar{A})s^2 + T_M s + 1]} \quad (3.195)$$

На основу (3.195) карактеристични полином се може написати у следећем облику:

$$b_0 s^3 + b_1 s^2 + b_2 s + b_3 = 0 \quad (3.196)$$

**3.5 Математичко моделирање актуационог система-основни линеаризовани математички модел са додавањем статичких нелинеарности**

**Прилог теорији пројектовања актуатора за управљање вектором потиска ракетног мотора са флексибилним млазником**

$$b_0 = T_M T_G(\bar{A}) = T_M T_G \frac{1}{\bar{q}(\bar{A})} \quad (3.197)$$

$$b_1 = T_M \quad (3.198)$$

$$b_2 = 1 \quad (3.199)$$

$$b_3 = K \quad (3.200)$$

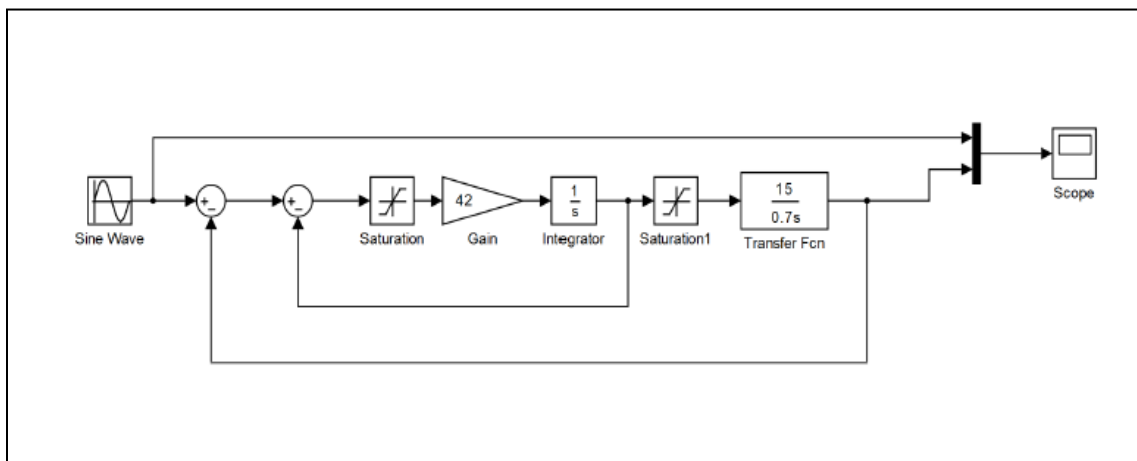
Сада понављамо идентичну процедуру преласка у фреквентни домен, као што је претходно урађено код нелинеарности типа засићења по протоку:

$$X(A, \omega) + jY(A, \omega) = 0 \quad (3.201)$$

$$X(A, \omega) = b_3 - b_1 \omega^2 = 0 \quad (3.202)$$

$$Y(A, \omega) = b_2 - b_0 \omega^3 = 0 \quad (3.203)$$

Централни део математичког описа актуатора са слике 3.24 може се приказати упрошћено на слици 3.25. Овај једноставни опис са слике 3.25 показује да повећањем интегралног појачања у унутрашњој и спољашњој повратној спрези повећавамо сопствену фреквенцију актуаторског система. Променом интегралног појачања спољашње повратне спреге смањује се пригушење, тако да у случају да је потребно да пригушење буде констатно, потребно је повећати интегрално појачање унутрашње повратне спреге. У смислу претходног посебно је важно видети како утичу нелинеарности типа засићења у спољашњој и унутрашњој повратној спрези.



**Слика 3.24- Основно структурно коло са нелинеарностима типа засићења по брзини и убрзању**

**3.5 Математичко моделирање актуационог система-основни линеаризовани математички модел са додавањем статичких нелинеарности**

## Прилог теорији пројектовања актуатора за управљање вектором потиска ракетног мотора са флексибилним млазником

Једна почетна-основна структура математичког модела актуатора за флексибилни млазник приказана је на слици 3.24. Јасно је да на овом моделу нема нелинеарности које описију трење.

Из претходног разматрања можемо дефинисати следећу препоруку јер нема универзалне теорије у области математичког моделирања са додавањем статичких нелинеарности у основну структуру математичког модела:

1. Најбоље је да се изврши директна компензација нелинеарности ако њу можемо добити из понашања система, пре свега идентификацијом. Ово је један од циљева у експерименталној идентификацији система.
2. Други приступ је да се минимизира утицај нелинеарности правилним пројектовањем актуационог система. Како је претходно и у овом поглављу наведено, пажљиво пројектовање значи следеће:
  - Механичка трења и зазоре свести конструктивно и технологијом израде на прихватљиви минимум, значи не разматрати опције за управљачку компензацију нелинеарности овог типа. Трења у цилиндру се компензују високо квалитетним заптивкама и квалитетом обраде унутрашњости цеви и спољне површине клипњаче. Вискозно трење у разводнику компензује се посебним сигналом високе фреквенције а мале амплитуде који генерише електронски појачивач серво разводника (дигитер сигнал)
  - Одређене нелинеарности које су овде поменуте, зона неосетљивости, засићење и ограничење брзине промене сигнала можемо назвати инхерентним, њих не можемо увек компензовати и за њих је потребна претходно описана анализа како би се утврдила ограничења за амплитуде улазних сигнала и фреквенцију, како би се остало у зони где се актуациони систем понаша линеарно.

На основу претходног можемо сматрати да је неопходно при сваком пројектовању електро хидрауличког актуатора направити упрошћену структуру са два интегратора и две нелинеарности типа засићења како је то приказано на слици 3.25, и радити симулацију за одређен број фреквенција и амплитуда како би се добио дијаграм приказан на слици 3.27, који јасно дефинише и раздваја област линеарног и нелинеарног понашања система на основу математичког модела. Види се и када се уради дијаграм за више различитих максималних брзина и убрзања да засићење на вишим фреквенцијама наступа прво по убрзању а затим по брзини, док је код нижих фреквенција обрнуто.

Дијаграм на слици 3.27 је нацртан преко једноставног скрипта у Матлаб-у.

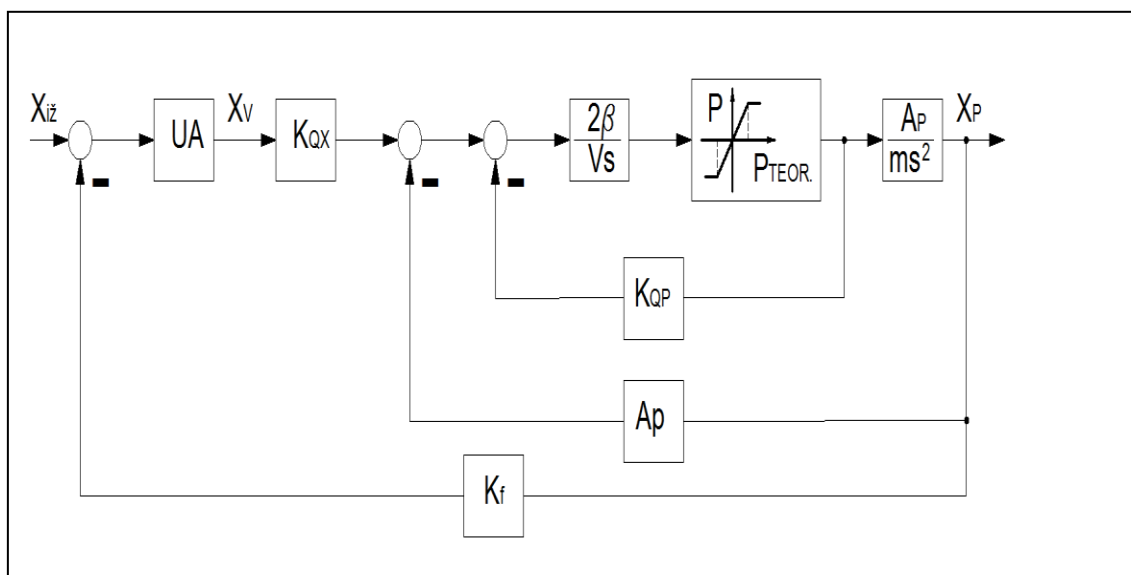
```
x=0:1:40
y1=60./x;
y2=120./x.^2;
figure;
plot(x,y1,x,y2);
```

### 3.5 Математичко моделирање актуационог система-основни линеаризовани математички модел са додавањем статичких нелинеарности

Ван ове анализе је проблематика нелинеарности структурног оптерећења, која се може описати на више начина и увести у симулацију. Али да би био јасан утицај инхерентних нелинеарности електро хидрауличног актуационог система, прво је потребно урадити претходно наведену структурну анализу математичког модела са статичким нелинеарностима а затим увести нелинеарност типа оптерећења у задњем кораку израде комплетног математичког модела.

У овом разматрању потребно је поменути и управљачке нелинеарности. За електро-хидрауличне актуационе системе има смисла разматрати две посебно значајне нелинеарности. Прво, које могу да дефинишу различита појачања у функцији грешке, а друга је управљачка нелинеарност типа хистерезиса. Јасно је да се појачање може приказати да буде променљиво у функцији грешке. Поред тога, друга група нелинеарности је такозвани управљачки хистерезис, чији је задатак да спречи појаву граничног круга у односу на праг грешке. То је ситуација када систем, чим евидентира грешку већу од прага грешке (вредност када се не генерише управљање), генерише управљачко дејство док грешка не падне испод прага. Ако је тенденција у актуаторском систему (такав карактер поремећаја) да се после корекције одмах појави поново грешка, доћи ће до такозваног „митраљирања“, у енглеској литератури дефинисано као „switching (chattering)“. Да би се ово избегло користи се нелинеарност типа хистерезиса, чијом ширином се прави зона неосетљивости то јест нултог појачања, када се не генерише управљачки сигнал. Предност хистерезиса је што обухвата управљачке сигнале мале и велике амплитуде. Поред тога хистерезис по својој природи (јер има универзалнио еквивалент у механичком зазору) уноси кашњење у управљачки систем. У сваком случају хистерезис је најкомплекснија нелинеарност и у случају флексибилног млазника описује карактер оптерећења, а зависно од управљачких захтева може бити истовремено и управљачка нелинеарност. Анализа у овом поглављу показује одвојено додавање статичких нелинеарности засићења по брзини и убрзању, преко нелинеарности које описују засићење по протоку и притиску, а затим се утицај ових нелинеарности посматра истовремено. Претходно сугерише да је неопходно да се изабере разводник са повратном спрегом по позицији клипа главног степена (унутрашња повратна спрега). Поред тога правилним избором појачања, у главној грани унутрашње и спољашње повратне спреге, на слици 3.24, вредности 42 и 15 стварају се услови за проверу актуационог система у условима засићења по брзини и убрзању. Засићење по брзини, смањује пропусни опсег и повећава пригушење. Засићење по убрзању смањује пропусни опсег и истовремено смањује пригушење.

**Прилог теорији пројектовања актуатора за управљање вектором потиска ракетног мотора са флексибилним млазником**



**Слика 3.25-Структурни дијаграм актуатора са нелинеарношћу типа засићења по притиску**

Сада израчунавамо:

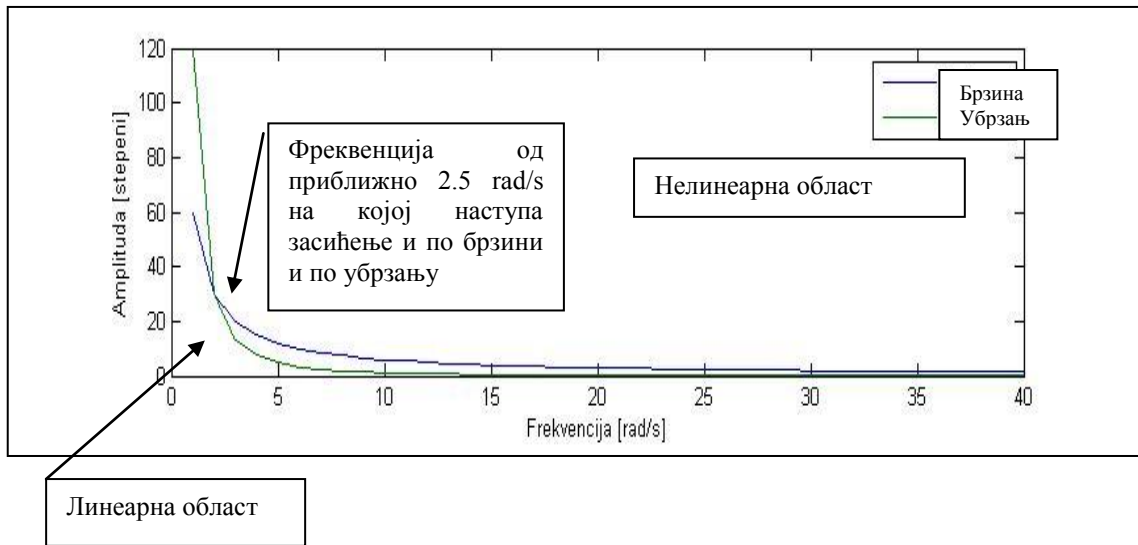
$$b_3 = b_1 \omega^2 \quad (3.204)$$

$$\omega = \sqrt[3]{\frac{b_2}{b_0}} \quad (3.205)$$

На основу (57) даље добијамо:

$$\omega = \sqrt[3]{\frac{q(A)}{T_M T_G}} \quad (3.206)$$

**3.5 Математичко моделирање актуационог система-основни линеаризовани математички модел са додавањем статичких нелинеарности**



Слика 3.26-Дијаграм који раздваја линеарну област система са делом где се манифестује нелинеарна природа система, по основу засићења по брзини и убрзању.

А из претходних једначина директно добијамо следеће:

$$K = T_M \omega^2 \quad (3.207)$$

Ако се узме у обзир (66) може се добити:

$$K = \frac{\bar{q}(\bar{A})}{T_G} \quad (3.208)$$

Ако сада последњу једначину унесемо у израз за коефицијент преносне функције:

$$KT_G = \frac{2}{\pi} \left( \arcsin \frac{1}{A} + \frac{1}{A} \sqrt{1 - \frac{1}{A^2}} \right) \quad (3.209)$$

Претходни израз дефинише критично појачање у систему.

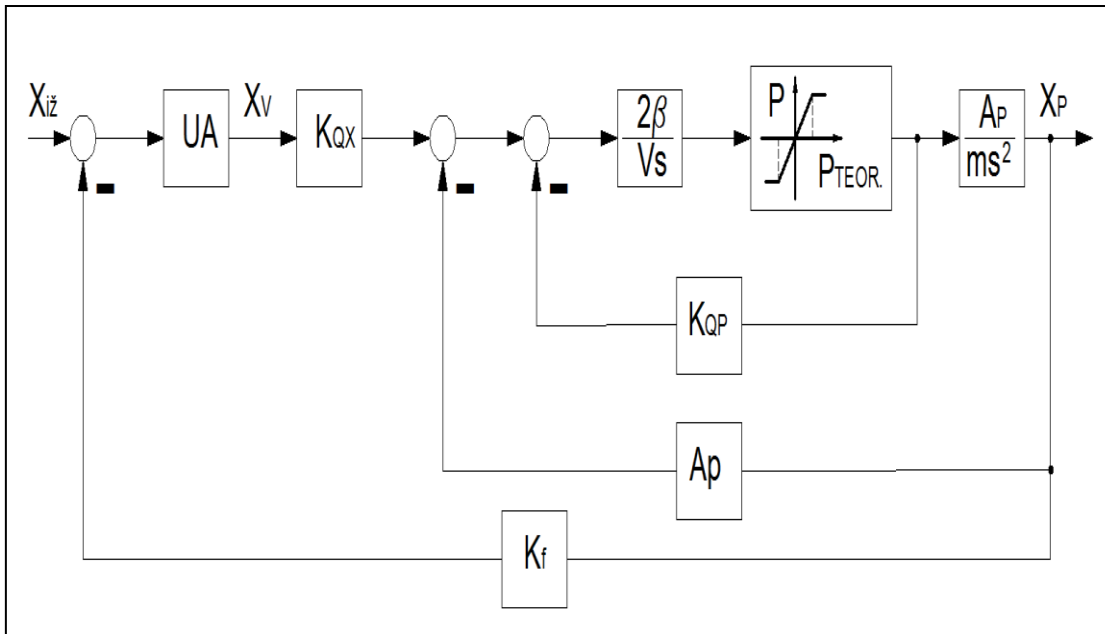
Изрази који су добијени хармонијском линеаризацијом за критична појачања за случај засићења по притиску и протоку корисно је употребити за проверу при пројектовању актуатора за одређене критичне управљачке амплитуде (минималне и максималне).

У основи сваки математички модел може бити описан диференцијалном или диференцијалном једначином са додатим статичким нелинеарностима.

Посебно важне нелинеарности су и нелинеарности типа зоне неосетљивости и оне су повезане са најкомплекснијом нелинеарношћу типа хистерезиса. У основи **3.5 Математичко моделирање актуационог система-основни линеаризовани математички модел са додавањем статичких нелинеарности**

**Прилог теорији пројектовања актуатора за управљање вектором потиска ракетног мотора са флексибилним млазником**

нелинеарност типа зоне неосетљивости се садржи у нелинеарности типа хистерезиса. Зона неосетљивости је феномен који настаје због преклопа у разводнику, трења у разводнику и због трења у цилиндру. Глобално посматрајући сви ови феномени се могу приказати једном нелинеарношћу типа зоне неосетљивости која се директно може добити из статичке карактеристике. На тај начин је добијена једна специфична врста идентификације система, где је доминантна нелинеарна природа приказана нелинеарношћу типа зоне неосетљивости.

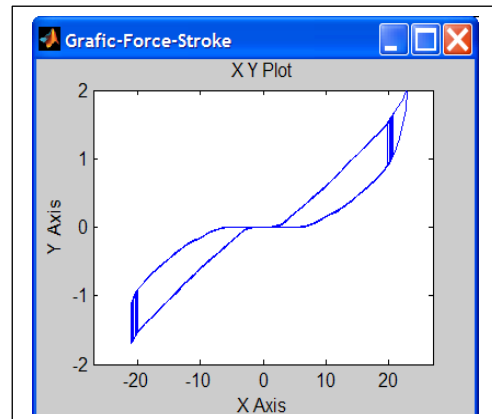
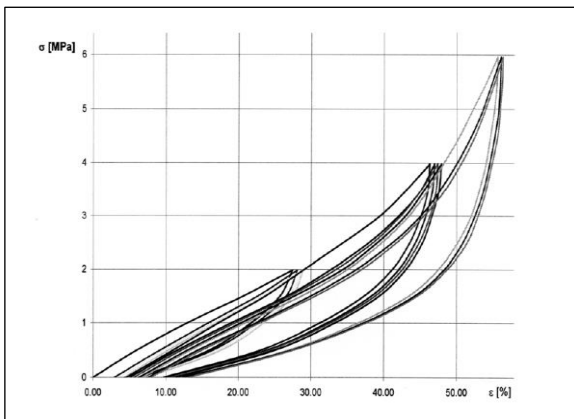


**Слика 3.27-Структурни дијаграм актуатора (еквивалентан дијаграм после хармонијске линеаризације) са нелинеарношћу типа засићења по притиску [6]**



### 3.6 Математичко моделирање флексибилног оптерећења

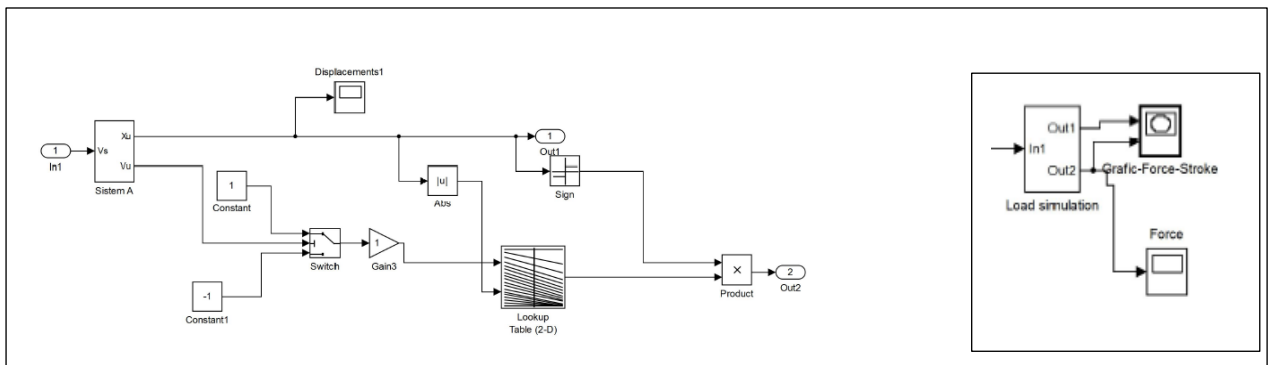
Овде се разматра проблематика која представља посебан истраживачки део овог рада. У раним фазама овог рада за моделирање флексибилног оптерећења коришћене су две опције из ресурса Матлаба, а то је коришћење функције LOOK UP и коришћење посебно дефинисаног описа за вискозно-еластично оптерећење такође из стандардних опција Матлаб-а. Прво моделирање је урађено преко LOOK UP функције полазећи од једноставног приступа, да су нам познати експериментални резултати понашања флексибилне везе снимљени на некој динамичкој кидалици, слика 3.28.



Слика 3.28-Експериментално понашање еластичног материјала, снимљено на динамичкој кидалици [58]

Слика 3.29-Дијаграм сила-ход после моделирања са LOOK UP функцијом [58]

На основу претходног дијаграма, ручним читањем вредности са дијаграма, дефинисана је LOOK UP функција, слика 3.30- блок дијаграм симулационог модела и резултат симулације, дијаграм слика ход на слици 3.29.

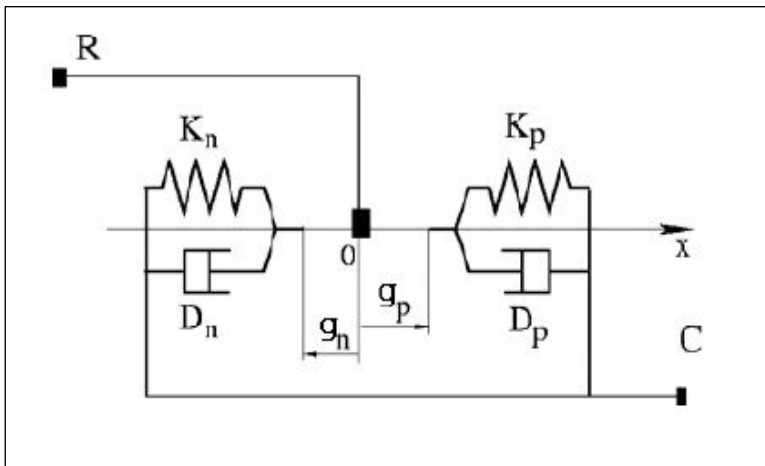


Слика 3.30-Симулациони блок дијаграм са LOOK UP функцијом

### 3.6 Математичко моделирање флексибилног оптерећења

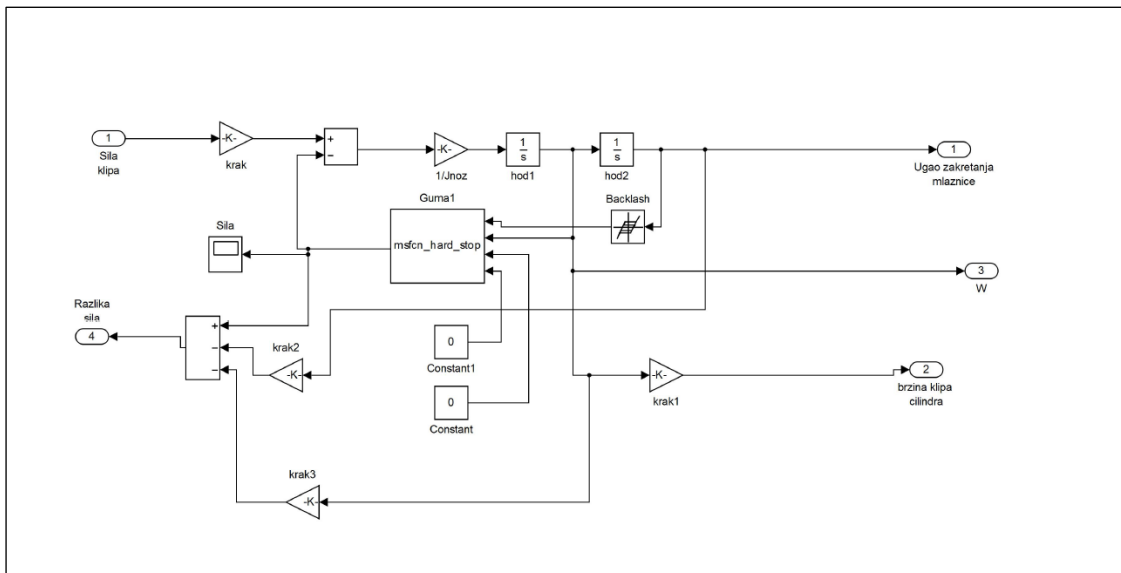
## Прилог теорији пројектовања актуатора за управљање вектором потиска ракетног мотора са флексибилним млазником

Касније у раду биће приказани симулациони резултати за управљачки систем са ПИД алгоритмом и Feedforward делом. Други начин моделирања који је даље истраживан је такође у оквирима ресурса Матлаб-а, где је коришћена готов блок који приказује серијску везу опружног и вискозног оптерећења, што је један од могућих начина приказивања гуме која има симетрично на притискање и истезање опружно-вискозно понашање, слика 3.31.



Слика 3.31-Simscape-Translation hard stop функција

На слици 3.32 је приказан део симулационог модела електрохидрауличног актуатора за флексибилни млазник.



Слика 3.32-Симулациони блок дијаграм са Translation hard stop функцијом

### 3.6 Математичко моделирање флексибилног оптерећења

## Прилог теорији пројектовања актуатора за управљање вектором потиска ракетног мотора са флексибилним млазником

Функцију **Translation hard stop** прати одређен Script фајл како би се могли задати параметри дефинисани на слици 3.29 која описује ову функцију.

```
function Output(block)

%redosled parametara gp,gn,Kp,Kn,bp,bn
gp= block.DialogPrm(1).Data;
gn= block.DialogPrm(2).Data;
Kp= block.DialogPrm(3).Data;
Kn= block.DialogPrm(4).Data;
bp= block.DialogPrm(5).Data;
bn= block.DialogPrm(6).Data;

xr=block.InputPort(1).Data;
vr=block.InputPort(2).Data;
xc=block.InputPort(3).Data;
vc=block.InputPort(4).Data;

x=xr-xc;
%Kp=1e+4;
%Kp=1e+4+1e10*x^2;
%Kn=0.5e+3;
%gp=0.2;
%gn=-0.2;

%bp=20;
%bn=20;

if x>=gp
    F=Kp*x+bp*(vr-vc);
elseif x<=gn
    F=Kn*x+bn*(vr-vc);
else
    F=0;
end

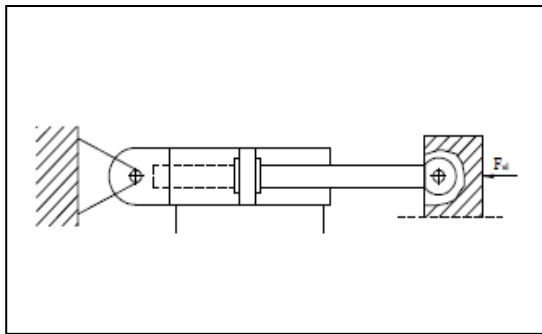
block.OutputPort(1).Data =F;
```

Претходно су наведене опције моделирања у Матлабу са познатим преносним функцијама за хидраулички део система. Даље се анализира проблематика моделирања инерцијалног оптерећења, обзиром да оно нема карактер концентрисаног оптерећења на крају клипњаче хидрауличног цилиндра, што је најједноставнија опција и како је то рађено у претходном приступу моделирању.

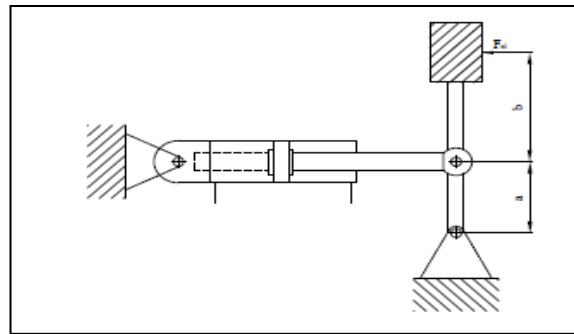
### 3.6 Математичко моделирање флексибилног оптерећења

**Прилог теорији пројектовања актуатора за управљање вектором потиска ракетног мотора са флексибилним млазником**

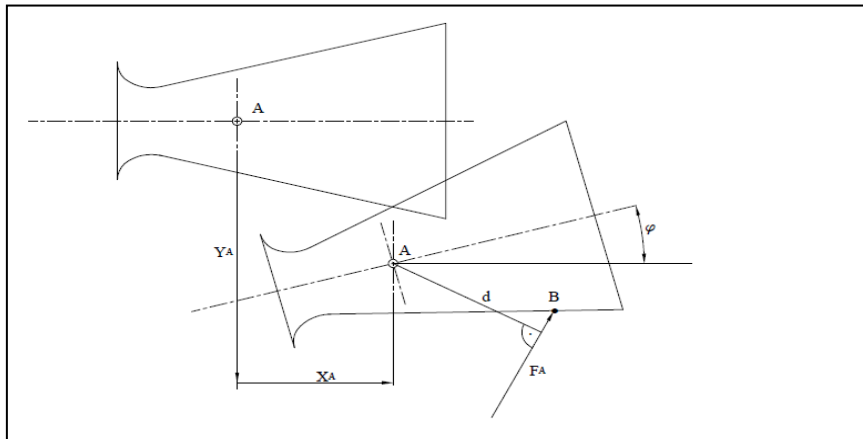
Оптерећење на актуатору се може задати као концентрисана маса на крају клипњаче (инерцијално оптерећење) са сведеном силом (која се се може дефинисати као максимална еластична сила), на крај клипњаче, слика 3.33. То је најједноставнији приступ који не одговара реалном оптерећењу. Други случај је приступ који се у пракси назива редукована маса, када се у основи структурно оптерећење актуатора представља као концентрисана маса на полузи са одређеним краком полуге што се приказује преко одређених математичких формализама који дефинишу такозвану редуковану масу која не одговара стварној маси млазника, слика 3.34. Трећи случај је израчунавање структурног редукованог оптерећења према следећој процедури (слика 3.35):



**Слика 3.33-Оптерећење актуатора-концентрисано на крају клипњаче**



**Слика 3.34-Оптерећење актуатора-редукована маса-полужни механизам**



**Слика 3.35 Оптерећење актуатора-редукована структурна маса**

На основу слике 3.33, могуће је поставити следеће полазне једначине:

$$m(x, y) \rightarrow M_A \tag{3.210}$$

**3.6 Математичко моделирање флексибилног оптерећења**

**Прилог теорији пројектовања актуатора за управљање вектором потиска ракетног мотора са флексибилним млазником**

$$\int_M m r_A^2 = J_{Az} \quad (3.211)$$

$$a_A^{F_a} = \frac{F_a}{M} \quad (3.212)$$

$$\ddot{\phi}_A = \frac{M^{F_A}}{J_{Az}} = \frac{F_a(t)d(t)}{J_{Az}} \quad (3.213)$$

$$a_B^{F_a} = a_A^{F_a} + \ddot{\phi}_A \times d = \frac{F_a}{M} + \frac{F_a \times d}{J_A} \times d \quad (3.214)$$

$$J_A = M_A \times r_j^2 \quad (3.215)$$

$$a_B^{F_a} = \frac{F_a}{M} \left(1 + \frac{d^2}{r_j^2}\right) = \frac{F_A}{m_R} \quad (3.216)$$

$$m_R = \frac{M_A}{\left(1 + \frac{d^2}{r_j^2}\right)} \quad (3.217)$$

Приликом сваког даљег моделовања електрохидрауличког актуатора за флексибилни млазник требало би израчунавати редуковану масу према претходном изразу. На тај начин имали би реално инерацијално оптерећење актуатора адекватно стварном, приликом прорачуна актуатора. Редукована или еквивалента маса у случају полужног оптерећења приказаног на слици 3.32, рачуна се преко једнакости кинетичке енергије ротације и кинетичке енергије кретања клипњаче у тачки где је цилиндар повезан са полужним механизмом.

$$\frac{m_R \times v^2}{2} = \frac{J_0 \times \omega^2}{2} \quad (3.218)$$

$$J_0 = m \times (a + b)^2 \quad (3.219)$$

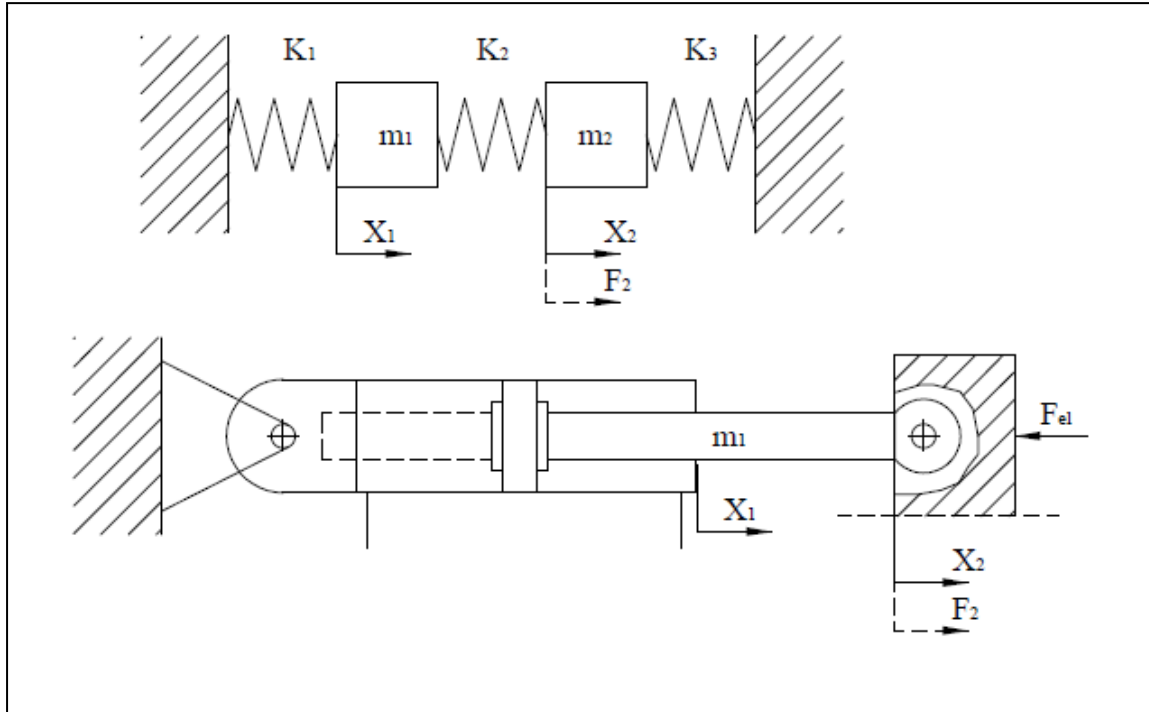
$$\omega = \frac{v}{a} \quad (3.220)$$

$$m_R = m \frac{(a + b)^2}{a^2} \quad (3.221)$$

### 3.6 Математичко моделирање флексибилног оптерећења

**Прилог теорији пројектовања актуатора за управљање вектором потиска ракетног мотора са флексибилним млазником**

Приказ који се сматра као најобјективнији је да се систем цилиндар (актуатор) са млазником представи као осцилаторни систем две масе и три опруге, како је то приказано на следећој слици 3.36.



**Слика 3.36 -Оптерећење актуатора-редукована структурна маса**

$$m_1 \ddot{x}_1 + (k_1 + k_2)x_2 - k_2 x_2 = 0 \quad (3.222)$$

$$m_2 \ddot{x}_2 - k_2 x_1 + (k_2 + k_3)x_2 = 0 \quad (3.223)$$

Претходне једначине описују најједноставнији случај. Опис се може допунити ако се узме у обзир да на другу масу делује сила и да има основа да паралелно трећој опрузи додамо и вискозно оптерећење, пошто тако добијамо приближнији опис понашања гуме која доминира у флексибилној вези (композит од гуме и алуминијумских плочица, слојеви у гуменом блоку). За даље извођење, опис је допуњен само силом која делује на другу масу, понашање гуме посматрамо као идеалну опругу.

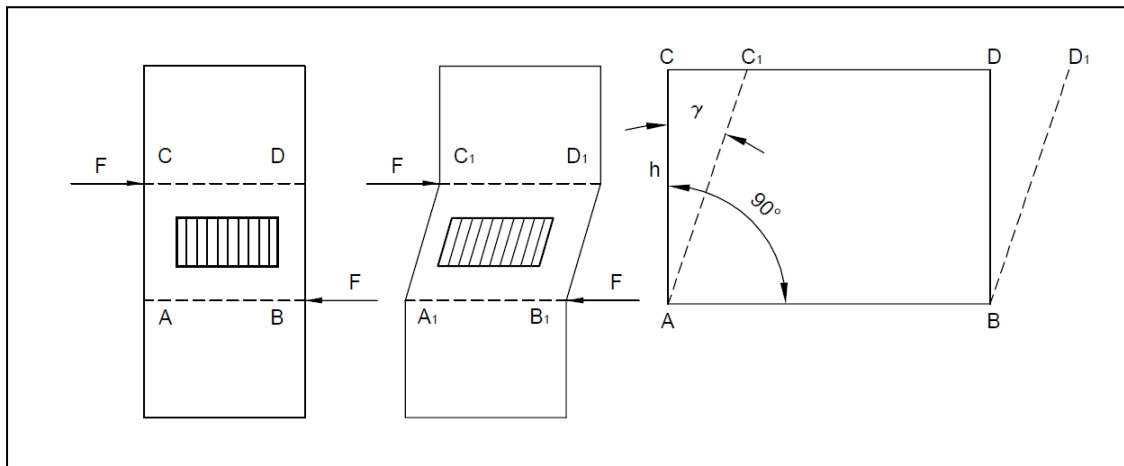
$$m_1 \ddot{x}_1 + (k_1 + k_2)x_2 - k_2 x_2 = 0 \quad (3.224)$$

$$m_2 \ddot{x}_2 - k_2 x_1 + (k_2 + k_3)x_2 = F_2 \quad (3.225)$$

**3.6 Математичко моделирање флексибилног оптерећења**

## Прилог теорији пројектовања актуатора за управљање вектором потиска ракетног мотора са флексибилним млазником

Пошто је цилиндар са пролазном клипњачом, маса  $m_1$  је констатна и непроменљива. Не постоји разлика у укупној запремини уља у коморама цилиндра по основу тренутног положаја клипњаче. Маса млазника је такође непроменљива. Овакав приказ система омогућава далеко комплекснију анализу оптерећеног актуаторског система од прости идентификације која се заснива на побуди система одскочном функцијом или неким другим стандардним улазним сигналом који је прихваћен у математичком апарату стандардних модела за идентификацију. Деформације при смицању, захтевају да се дефинише појам угла клизања, преко основне дефиниције смицања, као последице дејства две силе истог интензитета супротног смера које леже у две бесконачно блиске равни, како је то приказано на слици 3.37, на основу које угао клизања дефинишемо као тангенс.



Слика 3.37-Рачунски модел оптерећења на смицање [141]

У случају оптерећења у флексибилној вези млазника и коморе ракетног мотора која је изазвана радом хидрауличног актуатора како би се флексибилни млазник заротирао за неки угао, имамо чисто смицање, не постоје нормални напони затезања и притиска тако да можемо говорити само о тангенцијалним напонима смицања односно чистом смицању. Да би смо показали да смицање можемо да прикажемо у облику Хуковог закона, морамо анализирати зависност тангенцијалних напона и деформације при смицању. На слици 3.38 је приказан модел квадратне призме на који делују тангенцијални напони:

На основу модела са слике можемо записати:

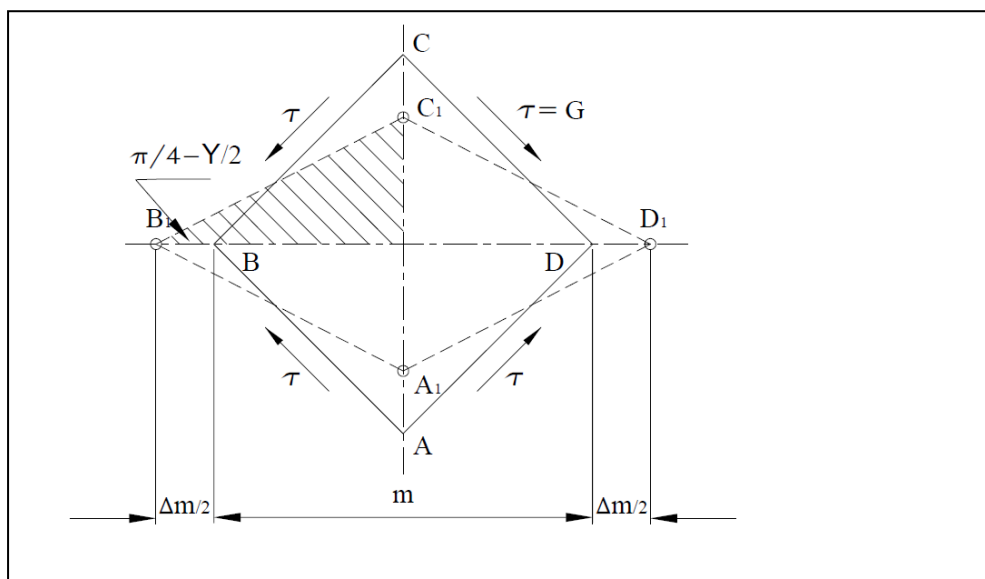
### 3.6 Математичко моделирање флексибилног оптерећења

**Прилог теорији пројектовања актуатора за управљање вектором потиска ракетног мотора са флексибилним млазником**

$$\operatorname{tg}\left(\frac{\pi}{4} - \frac{\gamma}{2}\right) = \frac{OC_1}{OB_1} = \frac{\frac{m - \Delta m}{2}}{\frac{m + \Delta m}{2}} \quad (3.226)$$

Ако развијемо тангес угла према адиционим формулама из математике, добијамо:

$$\operatorname{tg}\left(\frac{\pi}{4} - \frac{\gamma}{2}\right) = \left(1 + \operatorname{tg} \frac{\pi}{4} \times \operatorname{tg} \frac{\gamma}{2}\right) \frac{1 - \frac{\Delta m}{m}}{1 + \frac{\Delta m}{m}} = \frac{1 - \varepsilon}{1 + \varepsilon} \quad (3.227)$$



**Слика 3.38-Модел чистог смицања-на примеру квадратне призме**

Ако узмемо у обзир да је  $\operatorname{tg}\left(\frac{\pi}{4}\right) = 1$  и да је тангес малог угла приближно тај угао, добијамо  $\left(\operatorname{tg}\left(\frac{\gamma}{2}\right) \approx \frac{\gamma}{2}\right)$ :

$$\frac{1 - \frac{\gamma}{2}}{1 + \frac{\gamma}{2}} = \frac{1 - \varepsilon}{1 + \varepsilon} \quad (3.228)$$

Односно:

### 3.6 Математичко моделирање флексибилног оптерећења



**Прилог теорији пројектовања актуатора за управљање вектором потиска ракетног мотора са флексибилним млазником**

$$\frac{\gamma}{2} = \varepsilon \quad (3.229)$$

Дилатација  $\varepsilon$  је резултат дејства напона смицања и притискивања, па можемо написати из теорије главаних раванских напона израз:

$$\varepsilon = \frac{\sigma}{E} + \mu \frac{\sigma}{E} = \frac{\sigma}{E} (1 + \mu) = \frac{\gamma}{2} \quad (3.230)$$

Ако знамо да при чистом смицању постоје само тангенцијални напони:

$$\tau = \frac{E}{2(1 + \mu)} \times \gamma \quad (3.231)$$

део претходног израза можемо да означимо као:

$$G = \frac{E}{2(1 + \mu)} \quad (3.232)$$

и величина  $G$  се зове модул клизања. Тада можемо коначно написати:

$$\tau = G \times \gamma \quad (3.233)$$

Претходна једначина је Хуков закон при смицању и говори о томе да при постојању малих еластичних деформација, тангенцијални напони су пропорционални углу клизања. На основу претходног је потпуно оправдано користи модел оптерећења актуатора који је повезан са флексибилним млазником у конфигурацији две масе и три опруге.

Одређени феномени који се јављају у осцилаторним системима две масе и три опруге не могу се унети у математички модел преко стандардне технологије идентификације. Посматрајући основни модел и његов опис може се закључити да при одређеним фреквенцијама осцилаторне побуде, масе могу осциловати једна према другој или у истом правцу. Ово треба посебно разматрати при конкретном пројектовању као посебан елемент немоделоване динамике.

Следећи начин моделовања флексибилног млазника би било представљање структуре млазника преносном функцијом другог реда које у основи описују структурно оптерећење, у два облика:

За мало пригушене системе:

### **3.6 Математичко моделирање флексибилног оптерећења**

**Прилог теорији пројектовања актуатора за управљање вектором потиска ракетног мотора са флексибилним млазником**

$$W(s) = \frac{K}{s^2 + \omega^2} \quad (3.234)$$

За високо пригушене системе:

$$W(s) = \frac{K}{s^2 + 2\xi s + \omega^2} \quad (3.235)$$

Претходном анализом која показује да код смицања важи еквивалент Хуковом закону, потпуно је оправдано да прихватимо претходно описани модел флексибилног оптерећења актуатора описан са две масе и три опруге, који даље можемо искористити да дефинишемо један пројектни критеријум за однос крутости све три опруге, који је веома значајан већ у почетним фазама пројектовања и флексибилног млазника и актуатора. Прве две опруге у складу са претходном сликом 3.34, обухватају крутост везе цилиндра за комору ракетног мотора и млазник а трећа крутост везе клипњаче са флексибилним млазником. Трећа опруга приказује еластично оптерећење флексибилне везе млазника и коморе ракетног мотора на актуатор.

Пошто се ради о смицању, претходно је показано врло једноставним математичким формализмима да се и смицање може приказати као опруга у моделу за коју важи Хуков закон.

Овако моделирано оптерећење даће експерименталне и рачунске могућности да се одреди константа за трећу опругу-која репрезентује Хуков закон за смицање на основу познавања крутости везе цилиндра (актуатора) са млазником и комором ракетног мотора:

Претходни систем једначина можемо превести у матрични облик:

$$\begin{bmatrix} \ddot{x}_1 \\ \ddot{x}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{(k_1 + k_2)}{m_1} & \frac{k_2}{m_1} \\ \frac{k_2}{m_2} & -\frac{(k_2 + k_3)}{m_2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ F_2 \end{bmatrix} \cos \omega t \quad (3.236)$$

Претпоставимо партикуларно решење у облику:

$$x_p = -c \cos \omega t \quad (3.237)$$

$\ddot{x}_p = -c\omega^2 \cos \omega t$ , па овај израз уведемо у матричну једначину (3.236),

### 3.6 Математичко моделирање флексибилног оптерећења

**Прилог теорији пројектовања актуатора за управљање вектором потиска ракетног мотора са флексибилним млазником**

$-c\omega^2 \cos \omega t = Ac \cos \omega t + F_2 \cos \omega t$ , после елиминације израза за косинус:

$$-c\omega^2 = Ac + F_2 \quad (3.238)$$

Једначину је потребно решити по  $c$ :

$$(A + \omega^2 I)c = -F_2 \quad (3.239)$$

Из претходне једначине је јасно да сопствене вредности матрице  $A$  не смеју бити  $-\omega^2$ , јер сила  $F_2$  није једнака нули. Ово је врло важан детаљ при пројектовању актуаторског система за флексибилни млазник који се може видети само оваквим приступом моделирању и даље решавамо:

$$c = -F_2(A + \omega^2 I)^{-1} \quad (3.240)$$

Инверзну матрицу одређујемо према стандардном приступу за матрице нижег реда:

$$(A + \omega^2 I)^{-1} = \frac{\text{adj}(A + \omega^2 I)}{\det(A + \omega^2 I)} \quad (3.241)$$

Из услова да детерминанта није једнака нули, може се добити израз из кога се може одредити крутост у Хуковом закону за смицање (трећа опруга):

$$\begin{bmatrix} -\frac{(k_1 + k_2)}{m_1} & \frac{k_2}{m_1} \\ \frac{k_2}{m_2} & -\frac{(k_2 + k_3)}{m_2} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \omega^2 & 0 \\ 0 & \omega^2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{(k_1 + k_2)}{m_1} + \omega^2 & \frac{k_2}{m_1} \\ \frac{k_2}{m_2} & -\frac{(k_2 + k_3)}{m_2} + \omega^2 \end{bmatrix} \quad (3.293)$$

Детерминанта је дата следећим изразом:

$$\left[-\frac{(k_1 + k_2)}{m_1}\right] \times \left[-\frac{(k_2 + k_3)}{m_2}\right] - \frac{k_2}{m_2} \frac{k_2}{m_1} \neq 0 \quad (3.242)$$

$$\left[\frac{k_1 k_2 + k_1 k_3 + k_2^2 + k_2 k_3 - k_2^2}{m_1 m_2}\right] \neq 0 \quad (3.243)$$

Горњи израз се може трансформисати у:

### 3.6 Математичко моделирање флексибилног оптерећења

**Прилог теорији пројектовања актуатора за управљање вектором потиска ракетног мотора са флексибилним млазником**

$$k_3(k_1 + k_2) + k_1k_2 \neq 0 \quad (3.244)$$

$$k_3 \neq \frac{k_1k_2}{(k_1 + k_2)} \quad (3.245)$$

На основу претходног израза добијамо ограничење за избор крутости флексибилне везе млазника и коморе ракетног мотора у односу на крутост везе клипњаче цилиндра са флексибилним млазником и тела цилиндра (актуатора) са комором ракетног мотора.

Сада даље можемо израчунати вредност за  $c$  како би дефинисали партикуларно решење:

$$adjA = [\hat{a}_{ij}]^T = \begin{bmatrix} -\frac{(k_2 + k_3)}{m_1} + \omega^2 & \frac{k_2}{m_2} \\ \frac{k_2}{m_1} & -\frac{(k_1 + k_2)}{m_2} + \omega^2 \end{bmatrix}^T = \begin{bmatrix} -\frac{(k_2 + k_3)}{m_1} + \omega^2 & \frac{k_2}{m_1} \\ \frac{k_2}{m_2} & -\frac{(k_1 + k_2)}{m_2} + \omega^2 \end{bmatrix} \quad (3.246)$$

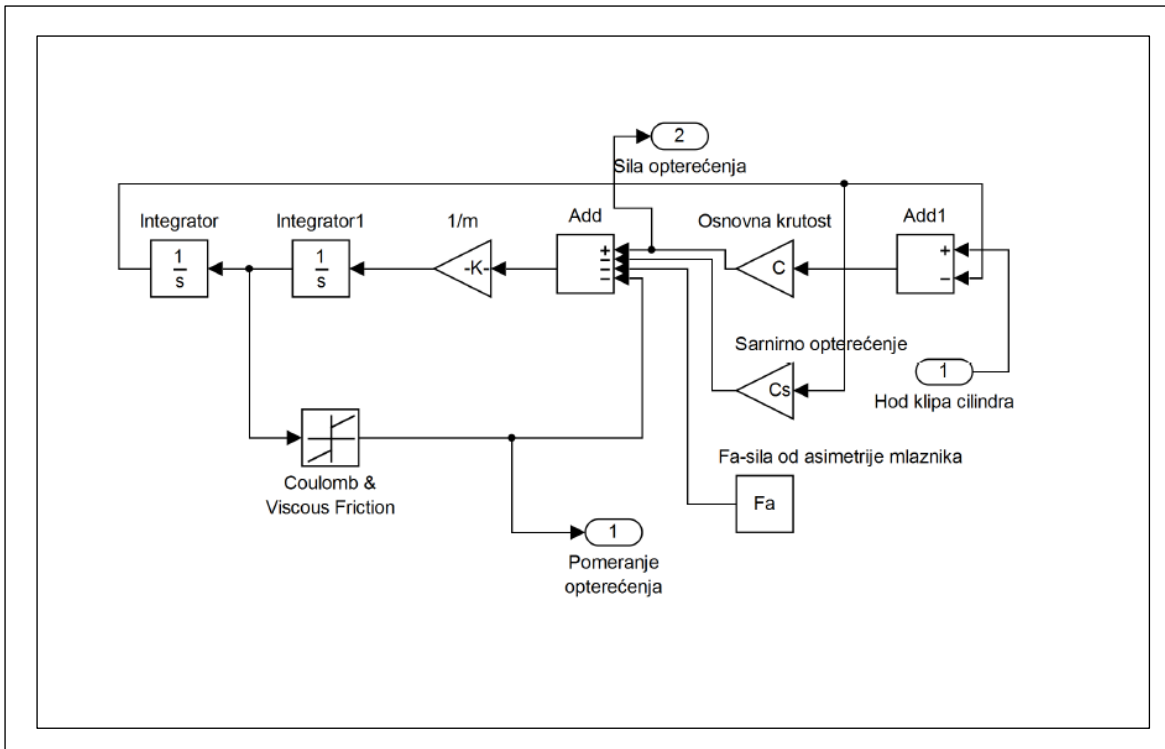
На основу претходне једначине (3.298):

$$c = -F_2(A + \omega^2 I)^{-1} = -F_2 \times \left[ \frac{k_1k_2 + k_1k_3 + k_2^2 + k_2k_3 - k_2^2}{m_1m_2} \right]^{-1} \times \begin{bmatrix} -\frac{(k_2 + k_3)}{m_1} + \omega^2 & \frac{k_2}{m_1} \\ \frac{k_2}{m_2} & -\frac{(k_1 + k_2)}{m_2} + \omega^2 \end{bmatrix} \quad (3.247)$$

На основу претходног могу се добити партикуларна и хомогена решења за позицију цилиндра и за деформацију флексибилне везе на смицање. Хомогено решење се добија под претпоставком да на масу млазника не делује сила. Ово решење није од значаја јер закретање млазника није могуће без дејства силе. У овом поглављу говорићемо о још једном начину моделовања флексибилног млазника који у себи садржи и силу од асиметрије и силу унутрашњег трења, који је преузет из литературе [144], у виду блок дијаграма на слици 3.39.

### 3.6 Математичко моделирање флексибилног оптерећења

Прилог теорији пројектовања актуатора за управљање вектором потиска ракетног мотора са флексибилним млазником



Слика 3.39-Структурни дијаграм оптерећења актуатора од флексибилног млазника[43]

Претходно је описан само један сегмент моделовања флексибилног оптерећења електрохидрауличног актуатора односно млазника. Посебна проблематика моделовања флексибилног млазника је приказивање његове нелинеарне природе преко нелинеарности типа хистерезиса, што ће бити анализирано у поглављу 5.4 о структурирању математичког модела са статичким нелинеарностима.

Нелинеарност типа хистерезиса је веома значајна и служи за опис многих феномена у техници. Од феромагнетних материјала, преко управљачких нелинеарности (релејна нелинеарност са хистерезисом) до описивања еластичних структура. Еластична структура флексибилног млазника на основу слике 3.26, експериментални резултати, показује да он има јаку нелинеарну природу типа хистерезиса. Еластични хистерезис се једноставно дефинише као изгубљена енергија која се не враћа у процесу када се еластична структура оптерети па растерети, односно дефинише се као максимална разлика између излазне величине у порасту и опадању за исту улазну величину, која представља деформацију. Деформација не зависи само од величине напона већ и од претходне историје промене напона. У основи хистерезис обухвата и мртву зону, када при промени силе односно напона нема промене деформације, што говори да у посебном случају нелинеарност типа хистерезиса садржи и нелинеарност зоне

**3.6 Математичко моделирање флексибилног оптерећења**

## **Прилог теорији пројектовања актуатора за управљање вектором потиска ракетног мотора са флексибилним млазником**

неостељивости. Поред тога у основном опису флексибилног млазника имамо и феномен трајне деформације и релаксације силе. Трајна деформација постоји при свакој еластичној деформацији, само је њена вредност минимална, а релаксација силе настаје врло брзо после постизања стационарне силе (одговара задатој позицији) на рачун унутрашњег вискозног трења. Поред тога ту је и такозвани температурски дрифт силе, који је код еластичне структуре млазника посебно изражен због високих температура продуката сагоревања у ракетном мотору. Све претходно наведене феномене тешко је директно моделовати, али сви они своје резултате приказују у оквиру стварног хистерезиса еластичне структуре, који је најбоље добити експериментално а после тога покушати описати познатим једначином, како је приказано у поглављу 5.4

Претходна дефиниција са становишта управљања актуатором говори да имамо промену силе и позиције у времену, односно хистерезис је елемент временске нестационарности у систему управљања актуатором која у сваком случају представља део директно немоделоване динамике, бар на нивоу овог рада.

### **3.6 Математичко моделирање флексибилног оптерећења**

### 3.7 Методологија експерименталне верификације пројектованог електрохидрауличног актуатора за управљање флексибилним млазником ракетног мотора

Симулатор оптерећења актуатора је технолошки гледано први корак у експерименталној верификацији претходно конструисаног актуационог система и њему синтетизованог адекватног управљачког система. Основни задатак симулатора оптерећења, како и сам назив каже, је генерисање адекватне силе која је поремећај односно оптерећење за електрохидраулички актуатор. После овог корака у експерименталној верификацији пројектованог актуационог система следи у конфигурисање HIL(Hardware In Loop) simulation. Ово би у конкретном случају значило да смо направили флексибилни млазник и у реалном окружењу уградили електрохидраулички актуатор. Када се каже реално окружење овде се пре свега мисли на стварне крутости и габарите млазника и ракетног мотора и на места где се актуатор повезује са структуром ракетног мотора или ракете. У овом случају мотор није у раду али је актуатор повезан са стварном структуром флексибилног млазника (стварна еластична својства конструкције флексибилног млазника). Задњи корак експерименталне верификације је везан за тестирање актуационог система на испитном столу са активним ракетним мотором. Претходно се односи на испитивања пре прототипског испитивања на нивоу највишег функционалног склопа односно комплетне ракете. Ако у неким другим конструкцијама остаје значајни део тестирања односно провере рада подсистема за ниво прототипског испитивања на нивоу функционалног склопа највишег нивоа, у овом случају, када је у питању електрохидраулички актуатор, то је минимални део. У пракси то се односи на динамику генерисања жељене позиције и одзива актуатора која је везана за еластична својства ракете у лету, и то у смислу повратних спрега од жирокопских уређаја и акцелерометара, чији сигнали утичу на генерисање жељене вредности актуаторског система а на њих су претходно утицала еластична својства ракете. Треба навести и један посебан корак који се односи на само тестирање синтетизованог управљачког система. Јасно је да се ради о софтверској имплементацији изабраног алгорита управљања. Тестирање апликативног софтвера пре било каквог покретања актуатора тим истим софтвером може се обавити једном технологијом која се назива софтверски симулатор. Потребно је написати софтвер који симулира динамичко понашање актуационог система заједно са оптерећењем. Он се извршава на једном рачунару, а управљачки софтвер за синтетизовани закон управљања се извршава на актуационом рачунару. Тада се оставрују и све реалне везе које преносе улазне и излазне сигнале (било да су дигитални или аналогни) између управљачког рачунара и рачунара који симулира оптерећење актуатора и рад свих мерних елемената који утичу на генерисање жељене вредности за актуациони систем флексибилног млазника.

Експериментална верификација актуационог система отвара још једно питање, а то је када се она може искористити за проверу квалитета математичког модела актуаторског система заједно са оптерећењем. Развијене су методе идентификације на основу одређених улазних сигнала после чега се може добити линеарни и нелинеарни модел. Јасно је да је апсолутно корисно упоредити коефицијенте математичког модела који је добијен као резултат класичног

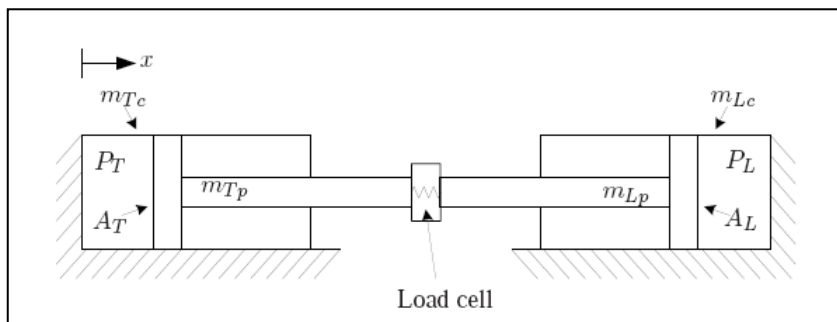
3.7 Методологија експериментална верификације пројектованог електрохидрауличног актуатора за управљање флексибилним млазником ракетног мотора

**Прилог теорији пројектовања актуатора за управљање вектором потиска ракетног мотора са флексибилним млазником**

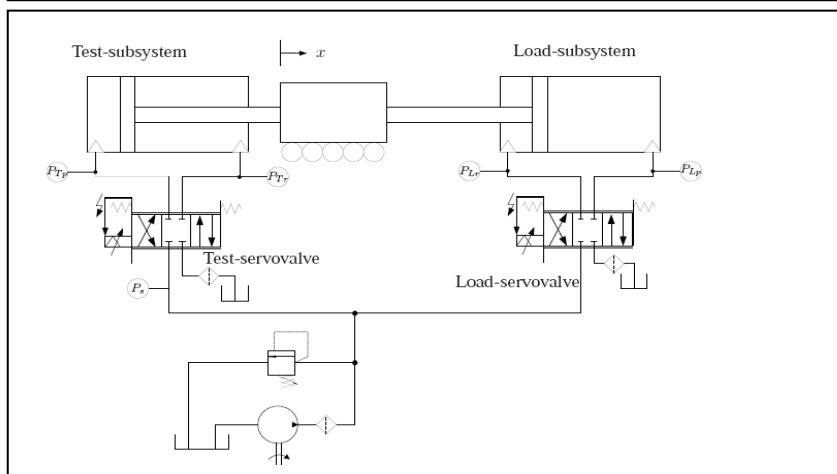
моделирања и коефицијенте математичког модела који су добијени на основу експерименталне идентификације. Идентификацију математичког модела за актуациони систем можемо урадити у оквиру претходно поменутог HIL (Hardware In Loop) simulation и у оквиру тестирања актуатора на пробном столу када имамо мотор у раду.

**Симулатор оптерећења електрохидрауличког актуатора**

Симулатор оптерећења, као и сам актуациони систем може бити изведен у технологији електромеханичког, електрохидрауличког или електропнеуматског система али и механичког система. У овом раду разматраће се само електрохидраулички симулатор и механички симулатор оптерећења. Основна идеја са симулатором оптерећења је да се актуатор оптерети што реалнијим еквивалентом оптерећења као да је директно везан за флексибилни млазник. Повољност у овом случају је што се програмски могу генерисати и већа оптерећења и оштрија промена тог оптерећења у времену, што није могуће када је актуатор повезан директно са реалним флексибилним млазником, тако да се тада могу проценити одређене резерве у динамичком понашању електрохидрауличног актуатора. На слици 3.40 је приказана основна идеја конструкције електрохидрауличног симулатора. У овом случају се ради о безинерцијалном испитивању актуатора, то јест нема инерцијалног оптерећења, већ се генерише еквивалентна сила по интезитету. Следећи корак је додавање инерцијалног оптерећења као константне вредности и симулирање силе хидрауличним цилиндром, слика 3.41.



**Слика 3.40** -  
**Симулирање оптерећења по интезитету без механичког инерцијалног дела**

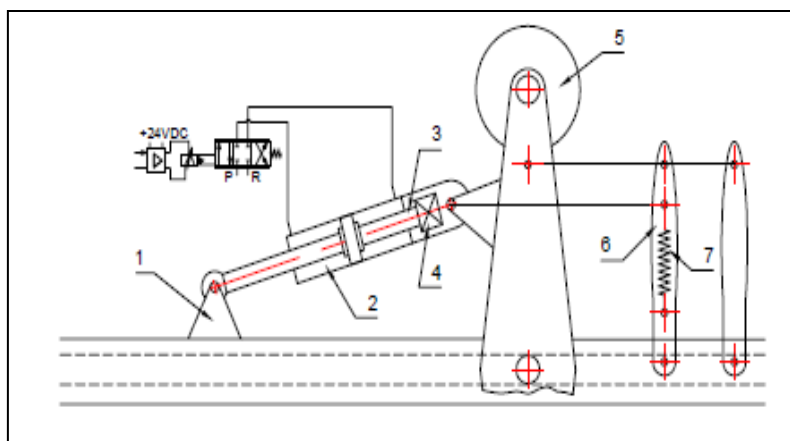


**Слика 3.41-**  
**Симулирање оптерећења по интезитету са механичким инерцијалним оптерећењем**

**3.7 Методологија експериментална верификације пројектованог електрохидрауличног актуатора за управљање флексибилним млазником ракетног мотора**

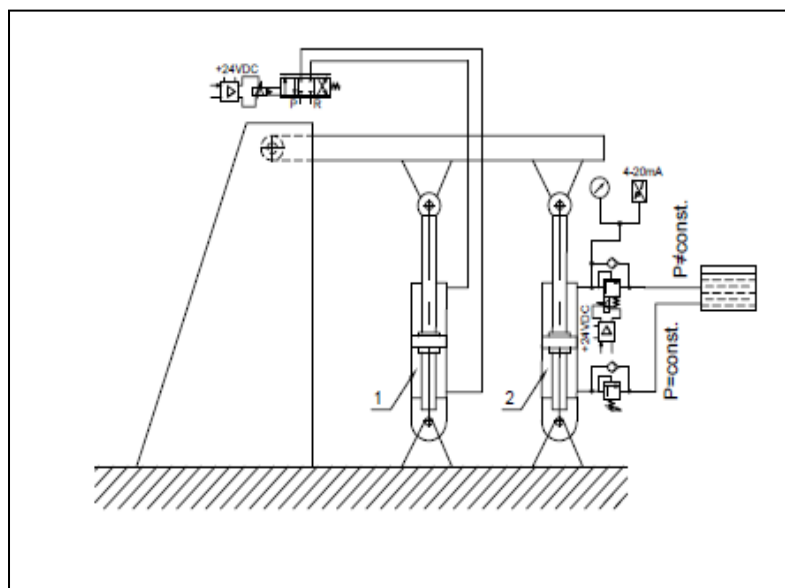


**Прилог теорији пројектовања актуатора за управљање вектором потиска ракетног мотора са флексибилним млазником**



**Слика 3.42а-Систем за проверавање крутости електро хидрауличног актуатора**

1. Еластични ослонац
2. Цилиндар
3. Давач хода
4. Интегрисани давач силе
5. Инерционо оптерећење
6. Опруга
7. Давач померања

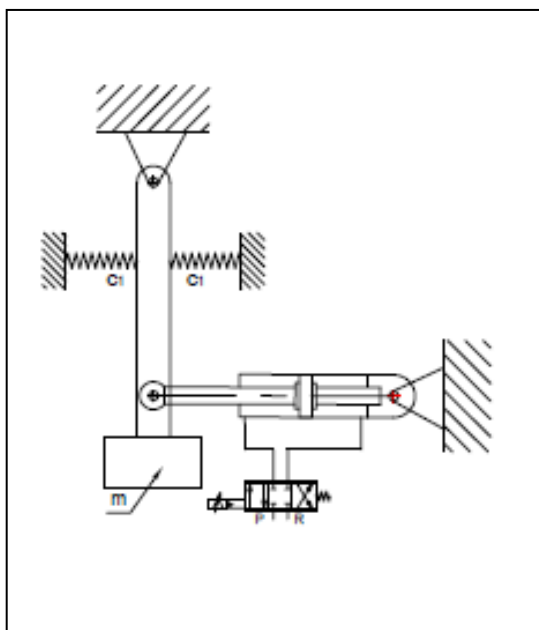


**Слика 3.42б-Систем за проверу актуатора са констатним или променљивим оптерећењем**

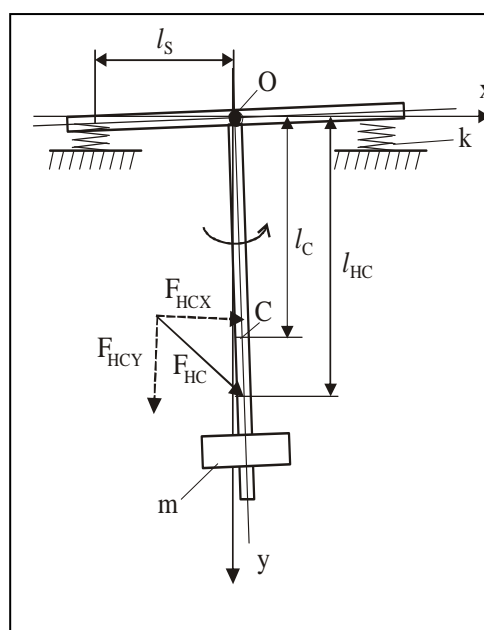
- 1-Цилиндар актуатора
- 2.Цилиндар за задавање оптерећења

На слици 3.42 је приказана варијанта са цилиндром који без директне механичке везе симулира констатно или променљиво оптерећење. На овај начин се проверава и сама механичка и хидраулична крутост актуационог система. Корак који следи, је еквивалентно оптерећење преко механичког модела клатна. Овде постоје две варијанте конструкције, прва приказана на слици 3.43, која се односи на механичко клатно са еластичним везама и друга, приказана на слици 3.44 која се односи на модел клатна са еластичним ослоњцима. У овом случају имамо клатно које је механички ослоњено на два еластична ослоњца, што одговара флексибилној вези и концентрисану масу на полузи клатна преко кога симулирамо инерционо оптерећење. Други случај је посебно погодан за математичко моделирање технологијом Бонд графова, што омогућава квалитетну претходну анализу при пројектовању али и математичко симулирање које треба да покаже очекивани квалитет рада симулатора у овој технологији. На овај начин се поред математичког моделирања саме

**3.7 Методологија експериментална верификације пројектованог електрохидрауличног актуатора за управљање флексибилним млазником ракетног мотора**



Слика 3.43-Клатно са еластичним везама



Слика 3.44 - Клатно са еластичним ослањањем

конструкције симулатора добија и један облик математичког моделирања оптерећења који се директно може увести у математички модел електрохидрауличког актуатора, односно у претходну синтезу управљачког алгоритма. На тај начин решава се проблем обезбеђења комплетног математичког модела, који је посебно битан у свим фазама пројектовања управљачког система, што се у овом раду посебно разматра у поглављима 3.5, 3.6 и 3.7.

По питању технологије рада на експерименталној верификацији у складу са претходно наведеним, дефинишемо следеће:

1. Прво се проверава рад неоптерећеног електрохидрауличног актуатора. Ово је посебно важно јер је део стандардних спецификација за актуаторске системе, максимална брзина неоптерећеног актуатора. Ово се провера за максимални интензитет управљачког сигнала и одговарајући проток напајања.
2. Као друго, проверава се крутост електрохидрауличног актуатора генерисањем силе оптерећења до 2.5 (одговара степенима сигурности који су коришћени при димензионисању актуатора) пута веће од прорачунске. Ово испитивање се спроводи преко конструкције описане на слици 3.42а, ручном пумпом статички, без управљачког сигнала за актуатор. Проверавају се деформације и цурења, како је то и назначено на слици 3.41а.
3. Као треће, проверава се рад актуационог система за различите нивое констатног оптерећења, слика 3.42б, али динамички, клипњача актуационог цилиндра се креће према некој задатој референци. Ниво констатног оптерећења не прелази максималну прорачунску силу.
4. Четврта провера актуационог система се изводи тако што се клипњача актуационог цилиндра повеже директно са цилиндром оптерећења преко

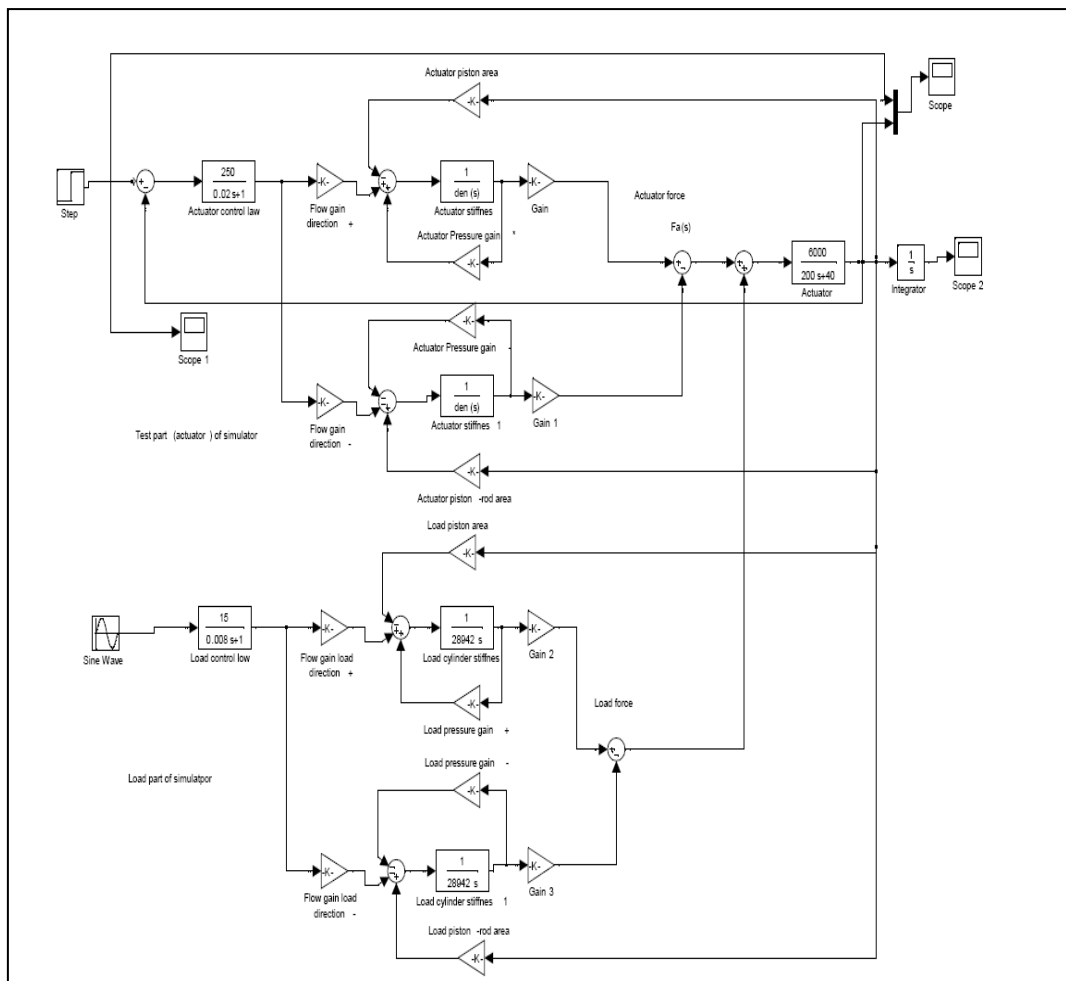
3.7 Методологија експериментална верификације пројектованог електрохидрауличног актуатора за управљање флексибилним млазником ракетног мотора

## Прилог теорији пројектовања актуатора за управљање вектором потиска ракетног мотора са флексибилним млазником

кога се генерише променљива сила у времену, али не већа од максималне захтеване.

5. Пета провера актуационог система се изводи тако што се дода инерцијално оптерећење према моделу везе као у претходној тачки 4.
6. Шеста провера се изводи симулирањем оптерећења механичким клатном са еластичним везама.
7. Задња, седма провера се изводи преко механичког клатна са еластичним ослонцима што је највернији еквивалент стварном млазнику.

Тачка 4 и 7 се даље детаљно анализирају преко математичких модела (за тачку 4, на слици 3.44 и за тачку 7 на слици 3.45).



Слика 3.45-Блок дијаграм математичког модела симулатора оптерећења са хидрауличким цилиндром

Математички модел на слици 3.45, развијен је према следећим једначинама: Математички модел је базиран на класичном приступу који је базиран на литератури [59] уз одговарајуће додатке. Важе ознаке према сликама 3.40 и 3.41:

### 3.7 Методологија експериментална верификације пројектованог електрохидрауличног актуатора за управљање флексибилним млазником ракетног мотора

**Прилог теорији пројектовања актуатора за управљање вектором потиска ракетног мотора са флексибилним млазником**

$$\begin{aligned} (m_{Tc} + m_{Lc}) \ddot{x} &= p_1 A_T - p_L A_L - F_{FT} - F_{FL} \Rightarrow \\ F_{FT} - F_{FL} &= p_1 A_T - p_L A_L - (m_{Tc} + m_{Lc}) \ddot{x} \end{aligned} \quad (3.248)$$

$$F_L = p_L A + F_{FL} \Rightarrow F_{FL} = F_L - p_L A_L \quad (3.249)$$

На основу једначина (3.248) и (3.249) добијамо следећу једначину сила:

$$\begin{aligned} F_{FT} + (F_L - p_L A_L) &= p_1 A_T - p_L A_L - (m_{Tc} + m_{Lc}) \ddot{x} \Rightarrow \\ F_{FT} &= p_1 A_T - (m_{Tc} + m_{Lc}) \ddot{x} - F_L \end{aligned} \quad (3.250)$$

Јеначине за проток гласе:

$$\begin{aligned} Q_1 - Q_{11} &= \frac{dV_{Tc1}}{dt} + \frac{V_{Tc1}}{\beta} \frac{dp_1}{dt}, V_{Tc1} = V_{Tc10} + A_T x \\ Q_2 - Q_{12} &= \frac{dV_{Tc2}}{dt} + \frac{V_{Tc2}}{\beta} \frac{dp_2}{dt}, V_{Tc2} = V_{Tc20} - A_T x \end{aligned} \quad (3.251)$$

Претходне једначине (3.248) – (3.251) могу бити упрошћена да не постоје унутрашња цурења у цилиндру актуатора ( $Q_{11}$  и  $Q_{12}$ )- можемо да претпоставимо да је констатни део запремине у цилиндру знатно већи од променљивог  $V_{Tc1(2)0} \gg A_T x$ , тако да једначине за математички модел добијамо у коначној форми:

$$\begin{aligned} \dot{p}_1 &= \frac{\beta}{V_{Tc10}} (Q_1 - A_T \dot{x}) \\ \dot{p}_2 &= \frac{\beta}{V_{Tc20}} (A_T \dot{x} - Q_2) \end{aligned} \quad (3.252)$$

Једначине (3.252) су имплементирани у блок дијаграму математичког модела актуатор-хидраулични симулатор оптерећења, слика 3.46.

Електрохидраулични актуатор се моделира на исти начин као и цилиндар оптерећења тако да долазимо до једначина (3.253) у коначном облику:

$$\begin{aligned} \dot{p}_{L1} &= \frac{\beta}{V_{Lc10}} (Q_{L1} - A_{L1} \dot{x}) \\ \dot{p}_{L2} &= \frac{\beta}{V_{Lc02}} (A_{L2} \dot{x} - Q_{L2}) \end{aligned} \quad (3.253)$$

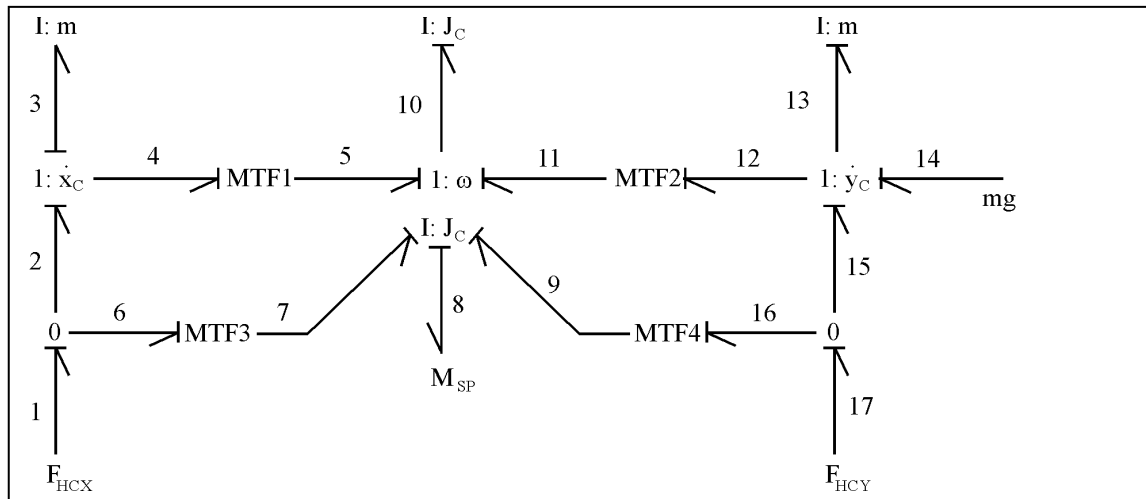
Заједничка једначина сила за актуаторски цилиндар и цилиндар за симулацију оптерећења дефинише се на основу (3.39) и из ње је добијен коначан облик блок дијаграма математичког модела на слици 3.45.

$$m_{eq} \ddot{x} = p_1 A_T + p_{L2} A_{L2} - p_2 A_T - p_{L1} A_{L1} - F_F \text{sign}(\dot{x}) \quad (3.254)$$

Даље се изводи математички модел у техници Бонд граф-ова. Детаљније у литератури [39].

**3.7 Методологија експериментална верификације пројектованог електрохидрауличног актуатора за управљање флексибилним млазником ракетног мотора**

**Прилог теорији пројектовања актуатора за управљање вектором потиска ракетног мотора са флексибилним млазником**



**Слика 3.46-Бонд граф симулатора оптерећења-механичко клатно са еластичним ослонцима**

Конститутивне једначине које описују Бонд граф на слици 3.46 су:

$$e_1 = e_2 = e_6 \quad (3.255/1)$$

$$f_1 = f_2 + f_6 \quad (3.255/2)$$

$$f_2 = f_3 = f_4 \quad (3.255/3)$$

$$e_2 = e_3 + e_4 \quad (3.255/4)$$

$$m\ddot{x}_C = e_3 \quad (3.255/5)$$

$$e_5 = l_C \cos(\phi) e_4 \quad (3.255/6)$$

$$f_4 = l_C \cos(\phi) f_5 \quad (3.255/7)$$

$$e_7 = \Delta l \cos(\phi) e_6 \quad (3.255/8)$$

$$f_6 = \Delta l \cos(\phi) f_7 \quad (3.255/9)$$

$$\Delta l = l_{HC} - l_C \quad (3.255/10)$$

$$f_{10} = f_5 = f_{11} = f_7 = f_8 = f_9 \quad (3.255/11)$$

$$e_5 + e_7 - e_8 - e_9 + e_{11} - e_{10} = 0 \quad (3.255/12)$$

$$\omega = \frac{1}{J_C} \int e_{10} dt \quad (3.255/13)$$

$$e_{11} = -l_C \sin(\phi) e_{12} \quad (3.255/14)$$

$$f_{12} = -l_C \sin(\phi) f_{e_{11}} \quad (3.255/15)$$

$$e_9 = \Delta l \sin(\phi) e_{16} \quad (3.255/16)$$

$$f_{16} = \Delta l \sin(\phi) f_9 \quad (3.255/17)$$

$$f_{15} = f_{16} + f_{17} \quad (3.255/18)$$

$$e_{15} = e_{16} + e_{17} \quad (3.255/19)$$

$$f_{12} = f_{13} = f_{14} = f_{15} \quad (3.255/20)$$

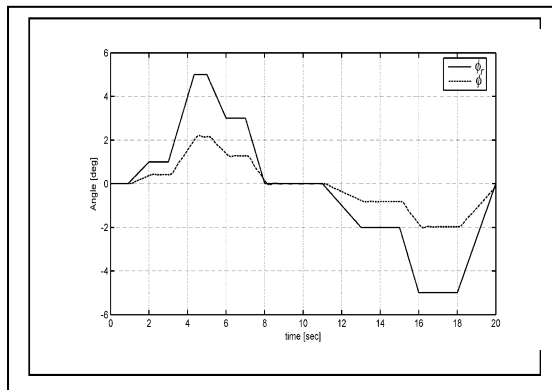
$$e_{15} + e_{14} = e_{26} + e_{13} \quad (3.255/21)$$

**3.7 Методологија експериментална верификације пројектованог електрохидрауличног актуатора за управљање флексибилним млазником ракетног мотора**

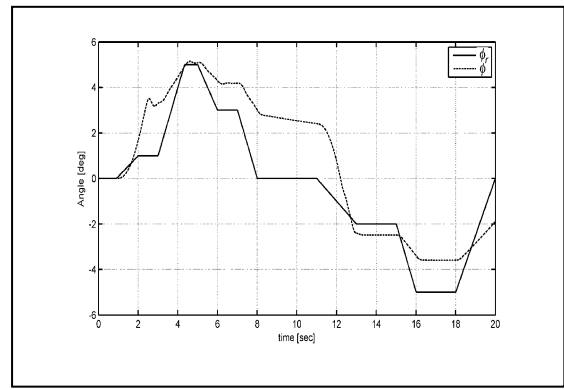
Прилог теорији пројектовања актуатора за управљање вектором потиска ракетног мотора са флексибилним млазником

$$m\ddot{y}_C = e_{13}$$

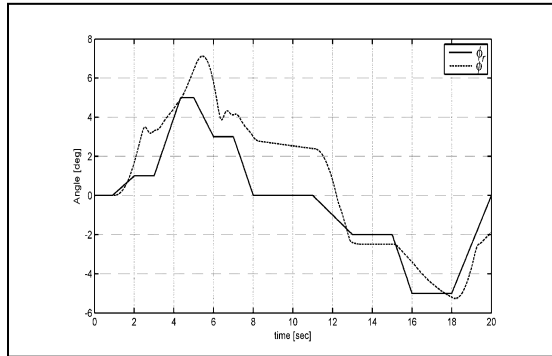
(3.255/22)



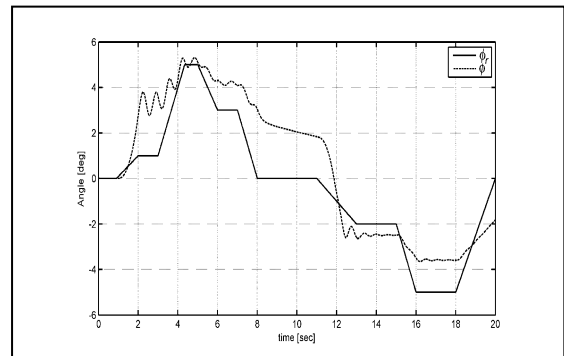
Модел оптерећења као идеална опруга



Одзив у случају када је присутна зона неосетљивости као карактеристика неидеалне опруге



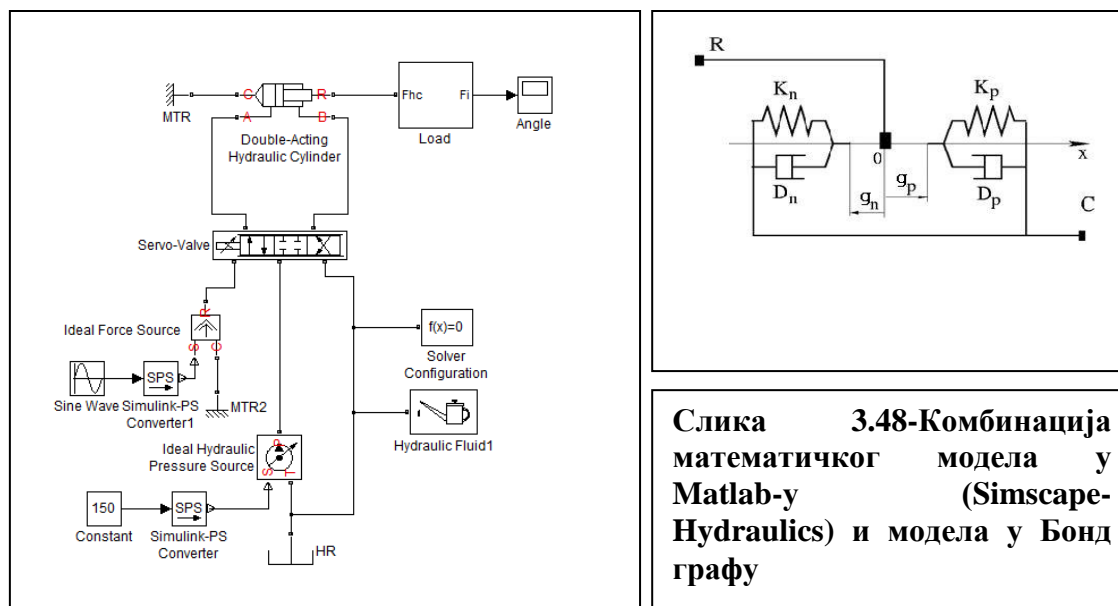
Одзив у случају када је опруга у засићењу



Одзив у случају када је смањена вискозна компонента неидеалне опруге

Слика 3.47-Одзиви за типичне случајеве моделирања неидеалне опруге [59]

## Прилог теорији пројектовања актуатора за управљање вектором потиска ракетног мотора са флексибилним млазником



Слика 3.48-Комбинација математичког модела у Matlab-y (Simcape-Hydraulics) и модела у Бонд графу

### HIL (Hardware In Loop) simulation

На овој технологији се данас посебно инсистира, посебно у пројектантским приступима који се дефинишу у Европи и Америци, као економично решење које знатно смањује обим прототипских испитивања а самим тиме и трошкове за те активности. Основна идеја је да се део комплетног система и његово дејство на реални подсистем који се испитује замени динамичким моделом који се реализује у пракси рачунарском имплементацијом и тако преноси на реални подсистем у овом случају флексибилни млазник, односно његов актуациони систем. Ако се разматра конструкција флексибилног млазника, она има одређена ограничења јер се са ње не прелази директно на прототипска испитивања, већ постоји додатна фаза, а то је рад ракетног мотора на вишекомпонентном столу. Није правилно сматрати да је ово 100 % прототипско испитивање актуатора за флексибилни млазник из претходно описаних разлога, који се односе на еластична својства ракете у лету. Може се разматрати приступ да и ово испитивање буде, други део технологије, HIL (Hardware In Loop) simulation, али врло је захтевно у математичком смислу обезбедити рачунарску симулацију еластичних својстава ракете у лету при постојању нормалних сила, као последице рада актуационог система преко флексибилног млазника ради управљања вектором потиска. Директно узети у обзир еластична својства ракете при деградацији сигнала од глобалних повратних спрега (жироскопи и акцелерометри) како би имали потпуно реалне сигнале од ових уређаја, није једноставно ни на данашњем нивоу техничког развитака, посебно у тренуцима када се пројектују ракете са великим маневарским способностима, што подразумева посебно значајан утицај еластичности конструкције ракете, на подсклоп за управљање вектором потиска преко флексибилног млазника. Како буде и даље била присутна тенденција сталног повећавања маневарских особина ракете, претходно разматрана опција HIL-а биће мање вероватна у пракси.

### 3.7 Методологија експериментална верификације пројектованог електрохидрауличног актуатора за управљање флексибилним млазником ракетног мотора

### 3.8 Преглед могућих алгоритама управљања за електро хидраулични актуатор и критеријуми за њихову селекцију

После избора конфигурације и димензионисања електро хидрауличног актуатора следећи корак у пројектовању електрохидрауличног актуатора је разматрање избора могућих алгоритама управљања. Тада већ постоји један део електрохидрауличног система који сматрамо да је неизменљив јер је настао као резултат енергетског прорачуна у оквиру димензионисања електрохидрауличног система. Практично, после енергетског прорачуна, дефинисани су параметри хидрауличног цилиндра и електро хидрауличног разводника. Цилиндар је дефинисан тако што се узима у обзир пре свега захтевана максимална сила. Тада се проверава максимална брзина за димензионисање цилиндра према максималној сили и долазимо до потребног протока који утиче на избор серворазводника. За протоке до 70 л/мин имамо на располагању разводнике основне конструкције, двостепене са моментним мотором и механичком и/или електричном повратном спрегом на главном разводном клипу. Ова конструкција има одређене директне предности када се ради о актуаторима који се користе у ваздухопловним применама пре свега због уградбених димензија и тежине. Динамика тих разводника (пропусни опсег) се данас постиже и другим конструкцијама, са магнетом типа force мотор или voice coil, али су димензије и тежина таквих разводних склопова у потпуности неодговарајући. Димензионисање цилиндра ограничено је на радне притиске до 280 бара, што одговара претходно поменутој конструкцији серво разводника, а истовремено одговара и некој рационалној дебљини зида цилиндра, што опет диктира прихватљиву тежину актуатора.

Веома је важно урадити правилну предселекцију и селекцију алгоритама управљања, тако да се могу рационално применити у конкретном случају. Рационалност се огледа у претпоставци да се синтеза управљања уради релативно једноставно сагласно критеријумима које дефинише пројектант система, а који су значајни за конкретну примену електро хидрауличног актуатора. Приликом избора алгорита управљања који ће бити предмет синтезе потребно је дефинисати групу критеријума за селекцију алгорита који су у теорији и пракси верификовани за електро хидрауличне актуационе системе. Почетни критеријуми су: карактер жељене вредности, очекивани пропусни опсег актуаторског система, тип спољашњег оптерећења, изменљивост параметара система и спољашњи поремећаји.

У оквиру претходно наведеног почетног критеријума може се дефинисати следеће:

-Жељена вредност се мења програмски, за компоненту управљања која се односи на вођење односно навођење и представља комбинацију више референтних вредности на које се прелази по контролисаној рампи

-Жељена вредност се мења у времену не непредвидив начин, за компоненту управљања која се односи на стабилизацију

-Очекивани пропусни опсег је добијен на основу претходног прорачуна ракете и он је познат

-Карактер оптерећења је структурни, комбинација инерцијалног и структурног еластичног оптерећења са знатним хистерезисом при деловању на структуру

### 3.8 Преглед могућих алгоритама управљања за електро хидраулични актуатор и критеријуми за њихову селекцију



## Прилог теорији пројектовања актуатора за управљање вектором потиска ракетног мотора са флексибилним млазником

-Оно што је посебно значајно, а провериће се и у симулацијама и у експерименталном делу рада је да хистерезис спречава самоосциловање и да утицај хистерезиса не зависи од фреквенције

Пошто после почетног димензионисања система познајемо сопствену фреквенцију разводника и цилиндра, по мишљењу аутора овог рада, први предселекциони избор алгоритамог решења треба да буде на основу критеријума који користи информације о сопственим фреквенцијама две најважније компоненте електрохидрауличног актуационог система, разводника и инерцијално оптерећеног цилиндра.

### Пред селекција управљачког алгорита:

У литератури [43] је познат следећи критеријум за избор основних алгоритама управљања електро хидрауличним актуатором. Употребљен је назив „основних“, јер је пројектантска идеја да се постигне почетни квалитет управљања и то са линеарним алгоритамог управљања. Критеријум за основне алгоритама управљања је дат у Табели 3.2.

**Табела 3.2:**

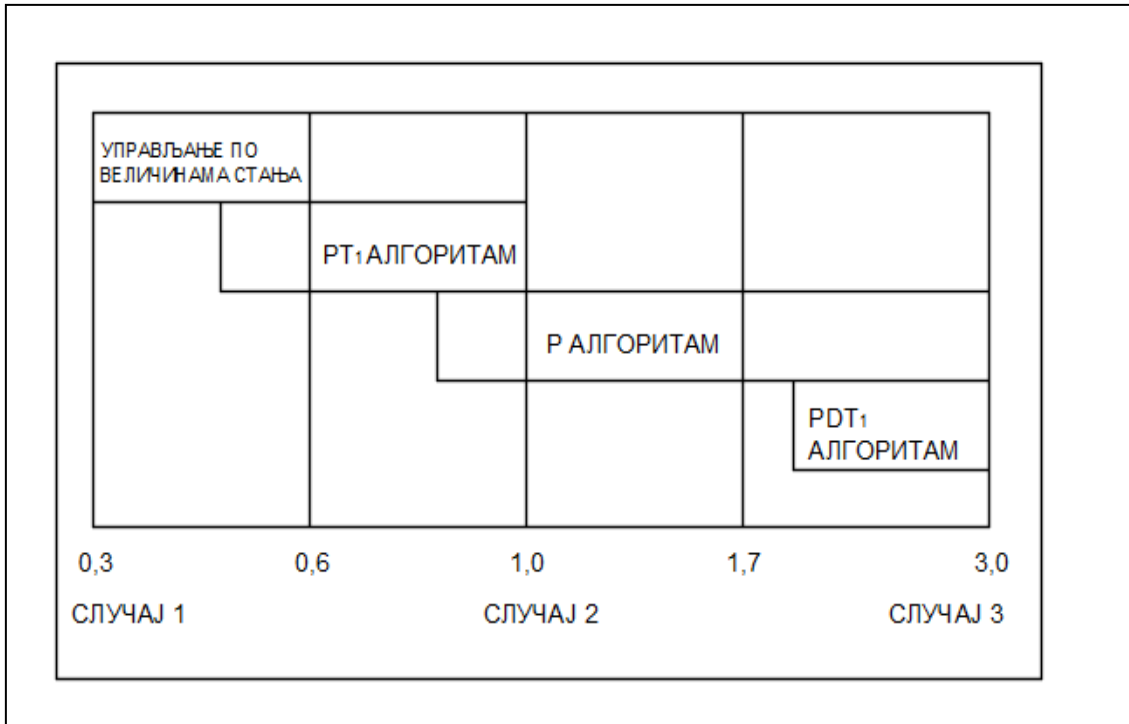
	Однос сопствене фреквенције цилиндра и сопствене фреквенције разводника	Препоручени алгоритама управљања	Напомена
Случај 1	$\frac{\omega_c}{\omega_R} \approx 0.3$	По величинама стања	Повратне спреге по притиску и протоку
Случај 2	$\frac{\omega_c}{\omega_R} \approx 1$	Пропорционално управљање	
Случај 3	$\frac{\omega_c}{\omega_R} \approx 3$	Пропорционално-Диференцијално управљање	

У претходно цитираној литератури овај критеријум је дат без објашњења и доказа. После детаљног разматрања, аутор дефинише своје објашњење и у потпуности потврђује исправност предложеног критеријума за почетну селекцију алгоритама управљања када је у питању електрохидраулични актуатор, слика 3.49.

Први случај је када је серворазводник три пута бржи од цилиндра према критеријуму сопствених фреквенција. Некада се мислило и у пракси давале препоруке да серво разводник треба од 3 до 5 пута да буде бржи од цилиндра. На први поглед то можда изгледа тачно и прихватљиво, али после детаљне анализе овог критеријума даће се предност једној другој препоруци, а то је да динамика серво разводника и цилиндра буду приближно једнаке.

### 3.8 Преглед могућих алгоритама управљања за електро хидраулични актуатор и критеријуми за њихову селекцију

**Прилог теорији пројектовања актуатора за управљање вектором потиска ракетног мотора са флексибилним млазником**



**Слика 3.49-Почетни избор алгоритма за синтезу управљања према критеријуму сопствених фреквенција [43]**

Ако је серво разводник бржи од цилиндра и ако он не може тренутно да изазове промену позиције или силе на цилиндру, долази до нестабилности одређених величина у актуаторском систему, пре свега ради се о притиску. Тада их треба стабилисати, а то се једино успешно може урадити преко регулатора стања, где су притисци величине стања, чим је ред система са којим је описан актуатор већи од 3. Када је ред система мањи од три, имамо фазне величине стања, позиција, брзина и убрзање, зато се и у критерију говори повратна спрега по притиску. То значи да ако је серво разводник вишеструко бржи од цилиндра, тада је регулатор стања адекватно решење. Пошто није увек једноставно радити у простору стања, прихватљивији избор може бити простор улаз-излаз који захтева приближно једнаку динамику цилиндра и серво разводника.

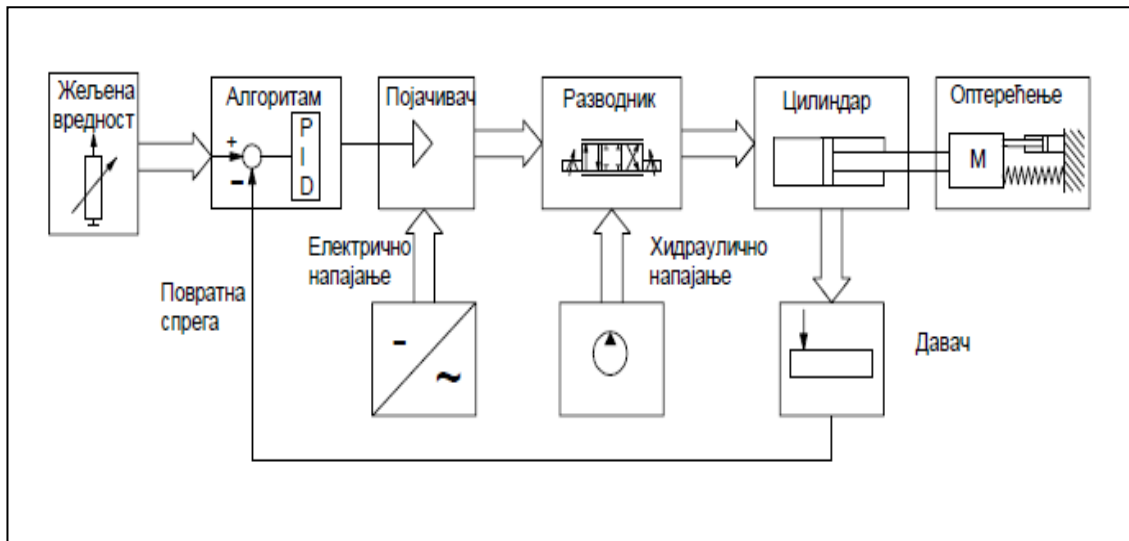
Када је динамика серво разводника и цилиндра приближно једнака, тада немамо претходно описани проблем дестабилизације и може се кренути са класичним П регулатором. П регулатор је добра основа за додавање разних алгоритамских решења која ће пре свега обезбедити тачност рада и друге перформансе у условима различитих поремећаја. Обзиром да како се касније објашњава, регулатор стања захтева познавање жељених вредности за све величине стања и њихово мерење, знатно је са становишта синтезе управљачког система повољнији приступ са П регулатором као почетним кораком у синтези управљачког система за актуатор.

**3.8 Преглед могућих алгоритама управљања за електро хидраулични актуатор и критеријуми за њихову селекцију**

## Прилог теорији пројектовања актуатора за управљање вектором потиска ракетног мотора са флексибилним млазником

Трећи случај разматраног критеријума је када је цилиндар бржи од разводника. Ово се у пракси актуатора који се користе у ваздухопловним применама не може десити јер би значило несразмеру између димензија цилиндра и разводника. Али јасна је препорука из критеријума која предлаже П дејство са додавањем диференцијалног дејства, јер оно може да убрза одзив серво разводника.

На слици 3.50 приказана је функционално-симболичким дијаграмом структура електро хидрауличног актуационог система.



Слика 3.50-Електро хидраулични актуатор са линеарним мотором (цилиндар) [43]

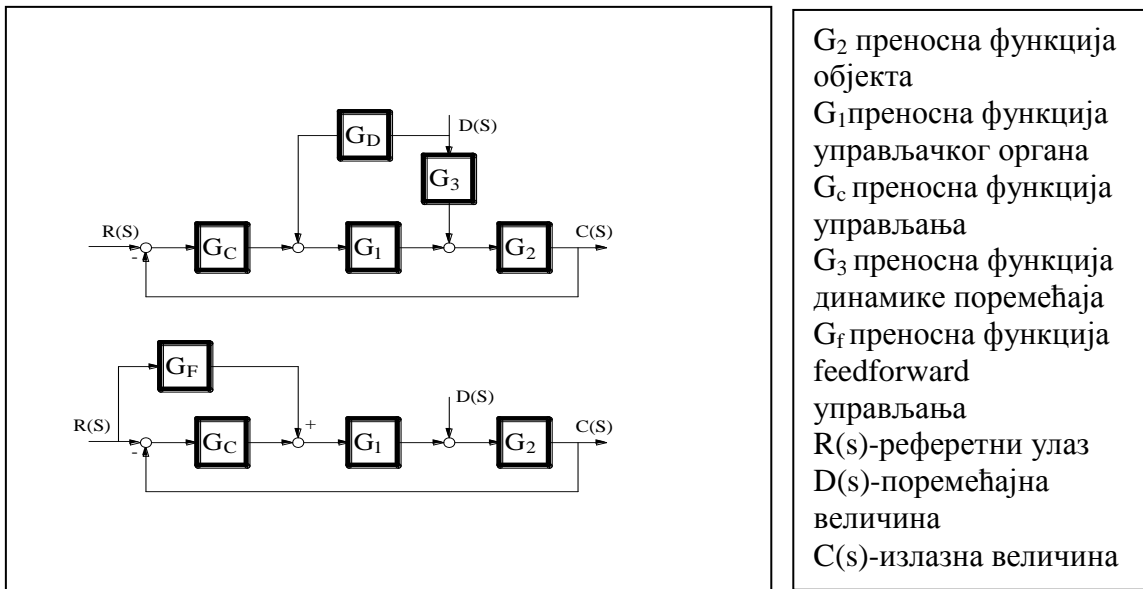
Отвара се и питање да ли је дефинисан идеалан алгоритам управљања у најширем значењу речи „идеалан“ и да ли се после селекције алгоритамског решења на основу претходно дефинисаних критеријума може јасно разумети зашто и због чега се одступа од идеалног. У пракси може се рећи уместо „идеалног“ и „оптималан“ алгоритам, али на крају после верификације селектованог алгоритма он ће бити назван „одговарајући“, пре свега према условима специфичног оптерећења актуаторског система, а то је флексибилни млазник.

У доступној литератури има врло мало радова који се баве проблематиком идеалног алгоритма управљања, када то и постоји, то је није урађено на директан начин. Интуитивно је јасно да је врло тешко рећи шта је идеалан алгоритам управљања и да га није лако дефинисати. У литератури [44], аутор је идеалан алгоритам управљања дефинисао на следећи начин: feedforward компензациона петља, добра повратна спрега и високо динамички управљачки елемент. Feedforward компензација по својој дефиницији компензује „поремећај“ који уноси промена улазне величине док високодинамички управљачки елемент обезбеђује да се практично максимално брзо реагује на дејство поремећаја, што на индиректан начин упрошћава динамичке захтеве које треба да испуни алгоритам управљања. Добра повратна спрега значи да сигнал у повратној спрези има

### 3.8 Преглед могућих алгоритама управљања за електро хидраулични актуатор и критеријуми за њихову селекцију

## Прилог теорији пројектовања актуатора за управљање вектором потиска ракетног мотора са флексибилним млазником

квалитет да се на основу њега може рачунати грешка и као такав има квалитет за индиректну компензацију поремећаја (немерљиви поремећаји). Да повратна спрега има квалитет значи да сигнал није „запрљан“ вишим хармоницима који могу да потичу од механичке несавршености конфигурације актуаторског система која се односи на суво трење и механичке зазоре у везама или шумовима који потичу од давача сигнала повратне спреге. На слици 3.51 приказана је структура feedforward управљања. Оваква дефиниција



Слика 3.51-Структура feedforward управљања, горњи дијаграм по поремећају, доњи дијаграм по управљачкој величини [40]

идеалног алгоритма управљања директно даје предност алгоритмима који су урађени на бази линеаризованог математичког модела. Ово у први план истиче и потребу да се уради што тачнији математички модел. И у случају да се при избору управљачког алгоритма за дефинисану структуру актуатора даје предност алгоритмима за које није потребно познавање математичког модела, математички модел је потребан за симулациону проверу такозваних робусних алгоритама управљања за чије одређивање није потребно познавање математичког модела. Математички модел је неопходан и за конструкцију симулатора оптерећења актуатора, што је једна од стандардних опција у експерименталној верификацији, која садржи и тестирање НПЛ-а пре тестирања и експерименталне верификације у потпуно реалним условима. Симулатор силе обезбеђује симулирање очекиваних нивоа силе оптерећења са различитом динамиком, нижом и вишом у односу на реалну која потиче од флексибилног млазника. НПЛ подразумева да је актуатор повезан са реалним млазником (флексибилна веза) али без рада ракетног мотора. Закључак је да се математичко моделирање актуационог система практично не може избећи осим у случају да се користи робусни алгоритам управљања тако да се он подешава и испитује одмах на реалном моделу што је у пракси изузетно редак случај. Математичко моделирање је врло сложена активност и основни проблем је шта све обухватити математичким моделом, односно стално је отворено питање шта је у моделованој а шта у немоделованој динамици. Поред

3.8 Преглед могућих алгоритама управљања за електро хидраулични актуатор и критеријуми за њихову селекцију

тога проблеми могу бити и одређени параметри модела који нису познати или се не могу довољно прецизно одредити. Ово су најтежи пројектантски задаци чије је решавање врло сложено и нема универзалног приступа решавању. У случајевима када је то могуће, неки аутори [32] предлажу да се пројектант ослони на идентификацију математичког модела система, али то је могуће и рационално само у неким случајевима. Флексибилни млазник као објекат управљања не обезбеђује рационалност примене теорије и праксе идентификације ради одређивања што тачнијег математичког модела, пре свега због недовољне поновљивости свог динамичког понашања које је одређено конструкциојом флексибилног млазника у оквиру чињенице да је конструкција оптимизирана за једнократну употребу. Ова проблематика се детаљно разматра у поглављу које говори о потреби израде симулатора оптерећења за електро хидраулични актуатор, где се овој експерименталној технологији верификације математичког модела и синтезе управљачког система даје предност.

Апстрактно посматрајући дефиницију адаптивних алгоритама управљања који могу да мењају и параметре и структуру управљачког алгорита са рачунарском ресурсима практично без ограничења, отвара се питање зашто они нису ближи дефиницији идеалног алгорита управљања. Разлог је у чињеници да је основни део структуре адаптивног алгорита управљања референтни модел који најчешће не може да се направи тако да буде довољно високог реда како би обухватио све елементе понашања електро хидрауличног актуатора. На слици 3.52 је приказана основна структура адаптивних управљачких алгоритама.

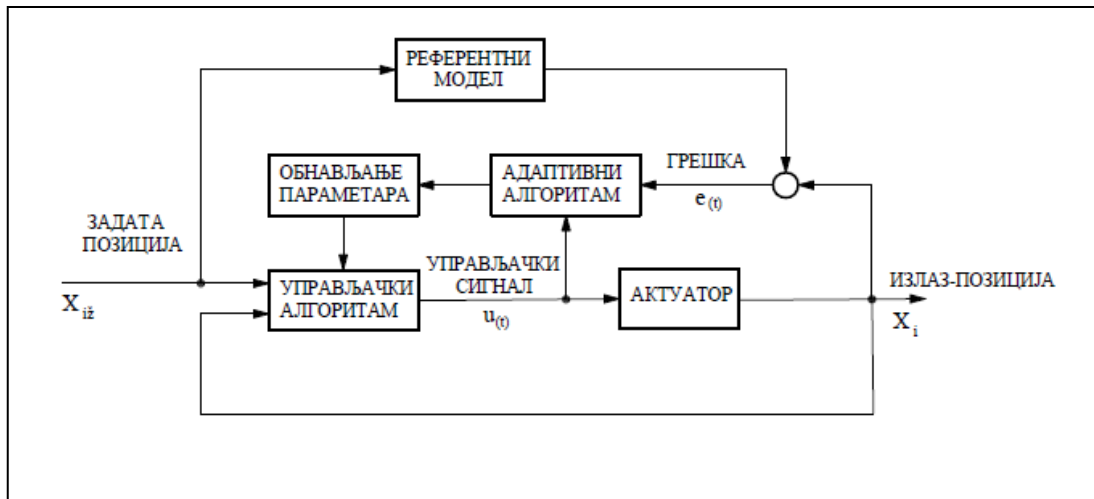
Разматрање идеалног алгорита управљања отвара и питање шта је то идеални одзив електрохидрауличног позиционог актуатора. У овом случају предност се даје брзом апериодичном одзиву са астатизмом, значи да се тражи обезбеђење да статичка грешка може бити једнака нули. Ово у теорији није аргументовано посебним математичким апаратом али се намеће као интуитивно решење јер сваки осцилаторни одзив је мање прихватљив од апериодичног.

### **Селекција алгоритама управљања за електро хидраулични систем [44]**

Интегрална природа електрохидрауличног актуатора је значајан ограничавајући фактор за примену одређених алгоритама управљања познатих у теорији система аутоматског управљања. Једноставно није могуће одредити номиналну позицију за одређена номинална управљања. То значи да није могуће користити математички модел по одступањима већ се користи запис математичког модела само у тоталним координатама. За примену неких алгоритама, посебно је важно да се може дефинисати математички модел по одступањима. У сваком случају ово ограничење је најизраженије код примене алгоритама променљиве структуре са клизним радним режимом. Природно пратећи алгоритми управљања су такође осетљиви на интегралну природу електрохидрауличног актуатора са хидрауличним цилиндром. Овај проблем је превазиђен увођењем посебног диференцијатора којим се обезбеђује услов природне пратљивости [49], [50]. Треба напоменути да природно пратећи алгоритми имају елемент претходно наведене дефиниције идеалног управљања, feedforward компензациона петља се остварује преко високог појачања насталог преко позитивне повратне спреге.

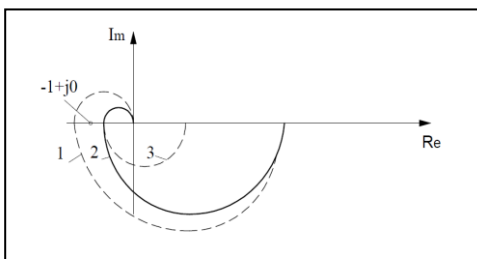
### **3.8 Преглед могућих алгоритама управљања за електро хидраулични актуатор и критеријуми за њихову селекцију**

## Прилог теорији пројектовања актуатора за управљање вектором потиска ракетног мотора са флексибилним млазником



Слика 3.52-Конфигурација адаптивног алгоритма са референтним моделом

Претходно наведена ограничења која знатно усложњавају примену одређених алгоритама, као и анализа дата у Табели 3.4 на следећи начин дефинишу даљи приступ избору алгоритамог решења под претпоставком да само у оквиру предселекционог критеријума усвојили опцију са П управљањем: прво се користи П управљачки алгоритам и са њим тестира актуациони систем са синусним сигналом фреквенције не веће од половине жељеног пропусног опсега (једна врста стабилизације). Овде је узета у разматрање половина пропусног опсега, јер се искуствено сматра да те вредности појачања не могу да утичу на нелинеарну природу система и можемо сматрати да је актуаторски систем добро конструисан у смислу избора серво разводника и цилиндра, нешто што би у пракси одговарало критеријуму „Инхерентно добро конструисан електрохидраулични актуациони систем“. После тога се додају интегрално или диференцијално дејство али преко корекционих органа типа ускладника, јер се класично додавање временских чланова (И и Д) ради само у процесном управљању док се у технологији пројектовања актуаторских система ради преко ускладника који су еквивалентни И и Д дејству али само на одређеним деловима фреквентног опсега, како је то приказано на слици 3.53.



Слика 3.53-Промена фазне карактеристике актуатора у функцији од пропусног опсега при компензацији

Следећи корак је додавање Feedforward члана. Основни приступ за ПИД алгоритам дат је у Табели 3.3. Ако се и тада не добију задовољавајући резултати, прелази се на синтезу управљања у простору стања. Основни разлог да ПИД

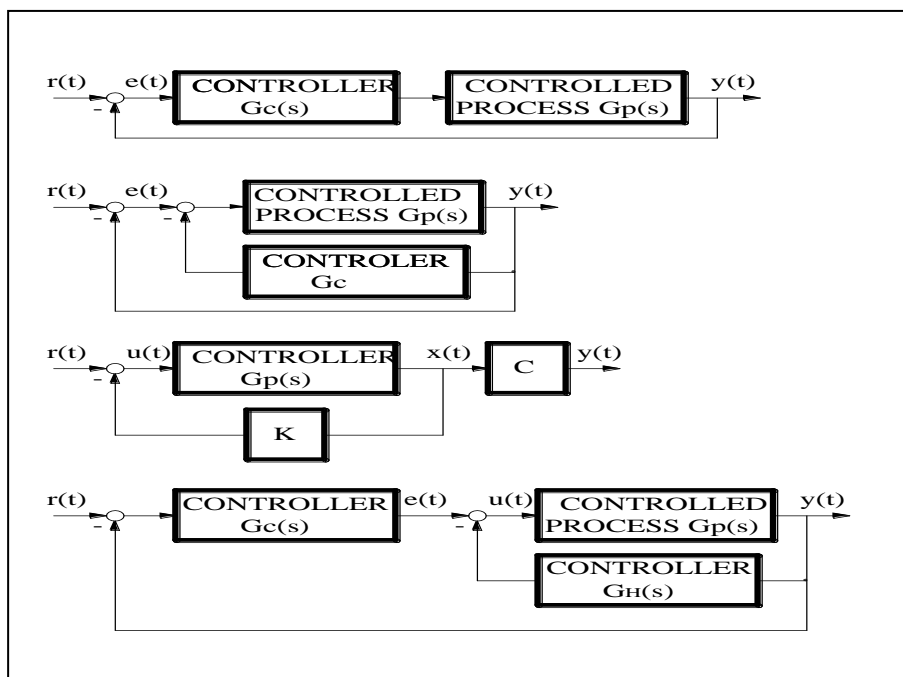
3.8 Преглед могућих алгоритама управљања за електро хидраулични актуатор и критеријуми за њихову селекцију

**Прилог теорији пројектовања актуатора за управљање вектором потиска ракетног мотора са флексибилним млазником**

алгоритам у неком свом облику не може да обезбеди задовољавајуће резултате је у чињеници да је изабран висок ред система (ПИД је прикладан избор када је систем до трећег реда и када пропусни опсег не прелази 50 Hz. У простору стања се даље отвара широк спектар пројекатнтских решења која настају као резултат великог броја могућих модификација основног алгоритма управљања. Поред избора саме структуре управљачког ПИД алгоритма посебно је важан и положај његових компонената у конфигурацији електро хидрауличног система. Управљачки алгоритам имплементиран софтверски у хардвер рачунара назива се контролер. Користи се и термин корекциони орган. Контролер је шири појам од корекционог органа, јер обухвата и елементе који нису директно везани за рачунарску имплементацију алгоритма, док корекциони орган обухвата само елементе који су директно везани за рачунарску конфигурацију. Раније се корекциони орган везивао и за друге технике физичке реализације, на пример пнеуматску.

Табела 3.3:

PD	- Повећава пригушење актуационог система и смањује прескок излазне величине (Improving damping and reducing maximum overshoot) - Смањује време одзива система (Reducing rise time and settling time) - Поправља претек фазе, појачања и резонатно издизање (Improving GM, PM and $M_R$ ) -Повећава пропусни опсег актуатора (Increasing BW)
PI	-Статичка грешка је нула (Zero steady state error)
PID	PD & PI
Phase-lead	Високо пропусни филтер (The high pass filter)
Phase-lag	Ниско пропусни филтер (The low pass filter)



**Слика 3.54-Различити положаји контролера у актуаторској структури [40]**

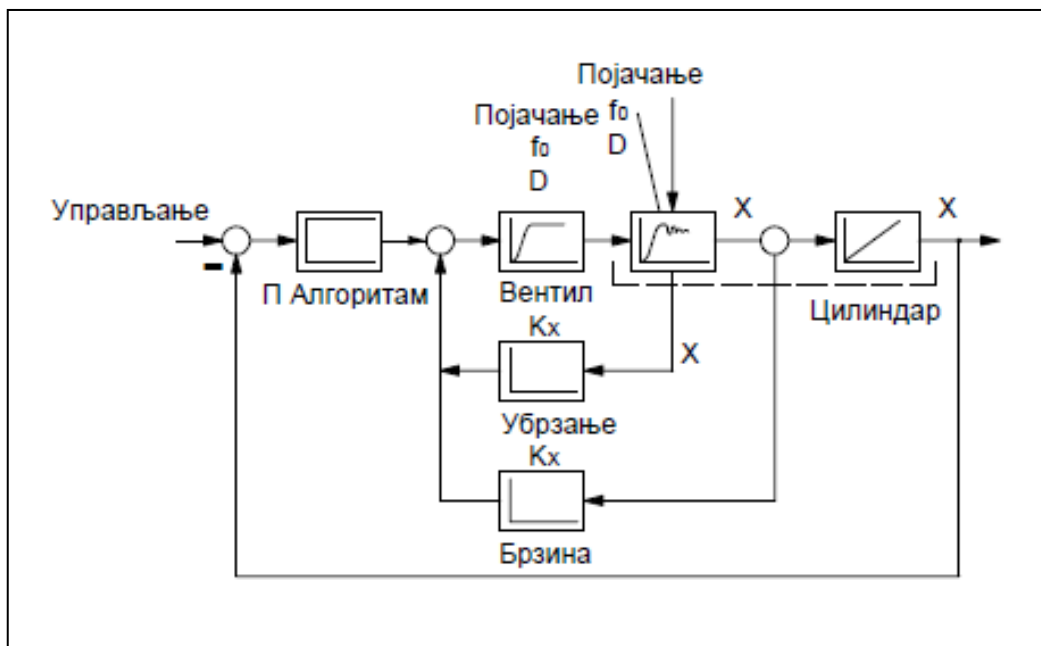
3.8 Преглед могућих алгоритама управљања за електро хидраулични актуатор и критеријуми за њихову селекцију

## Прилог теорији пројектовања актуатора за управљање вектором потиска ракетног мотора са флексибилним млазником

На слици 3.54, дати су основни положаји контролера, односно корекционог органа у који је имплементиран алгоритам управљања. Најчешће је улаз у контролер грешка између жељене и стварне вредности али како се на слици 3.54 види то може бити и стварна вредност излаза, жељена вредност излазне величине, у простору стања управљање које је формирано на основу повратне спреге по величинама стања и жељене вредности излазне величине. Један од основних принципа пројектантске праксе је да се на почетку изабере најједноставнија структура контролера која може да испуни тражене захтеве. Тек анализа понашања система са таквим избором може да усмери пројектанта на избор бољег и по неком критеријуму оптималнијег решења.

### Алгоритамска решења у простору стања

На слици 3.55 је приказана структура електро хидрауличног актуатора са линеарним мотором (цилиндром) у простору стања. Систем је описан трећим редом, величине стања су позиција, брзина и убрзање (три појачања у повратним спрегама) и П регулатор у директној грани.



Слика 3.55-Управљање у простору стања-систем трећег реда [46]

У теорији аутоматског управљања је доказано да избором концепта регулатора у простору стања имамо преко величина стања комплетну информацију о систему. На основу ове чињенице, овај алгоритам у математичком смислу би могао да буде идеалан алгоритам али у пракси га ограничава више фактора, од којих су најважнији потреба за мерењем свих величина стања, што за више редове математичког модела актуационог система могу бити немерљиве величине (виши изводи позиције, изводи притиска и слично) као и проблем подешавања више коефицијената појачања, у повратној спрези и у директној грани. Када имамо немерљиве величине стања, можемо користити нумеричко диференцирање или

**3.8 Преглед могућих алгоритама управљања за електро хидраулични актуатор и критеријуми за њихову селекцију**

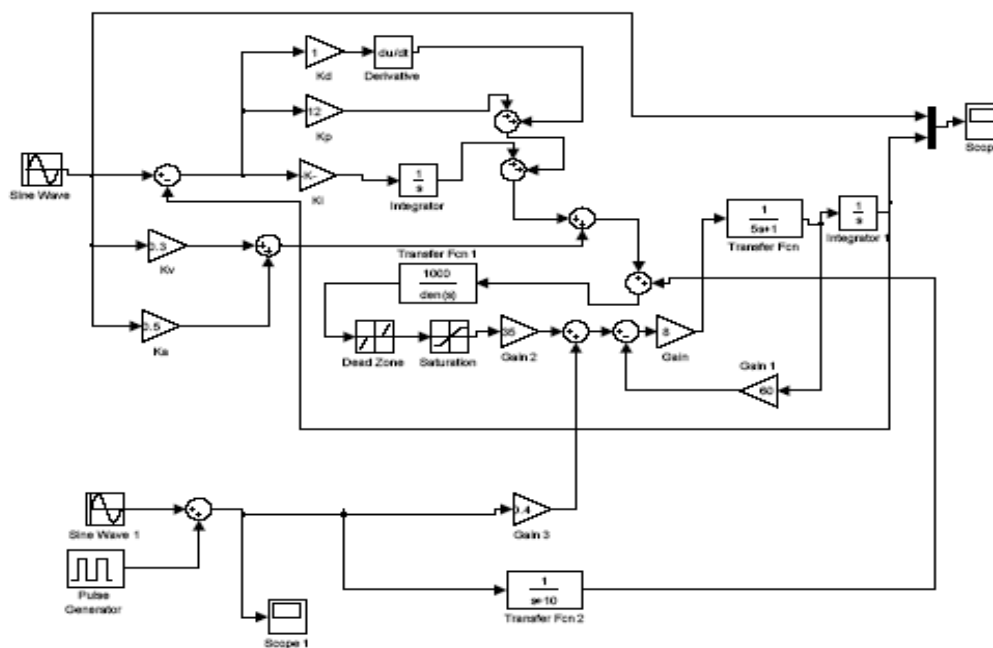


## Прилог теорији пројектовања актуатора за управљање вектором потиска ракетног мотора са флексибилним млазником

пројектовати посебан обсервер за те величине стања [20] што знатно усложњава управљање по величинама стања и отежава рачунарску имплементацију алгоритма. Из дефиниције величина стања могло би се помислити да је преко њих одређен ред система тако да нема немоделоване динамике, али та претпоставка није тачна јер не постоји јасан математички апарат за аргументацију ове тврдње. Неки аутори предлажу одређене методе за парцијалну верификацију ове тврдње [25], али без значајних аргументација из практичне верификације.

### Робусни алгоритам управљања

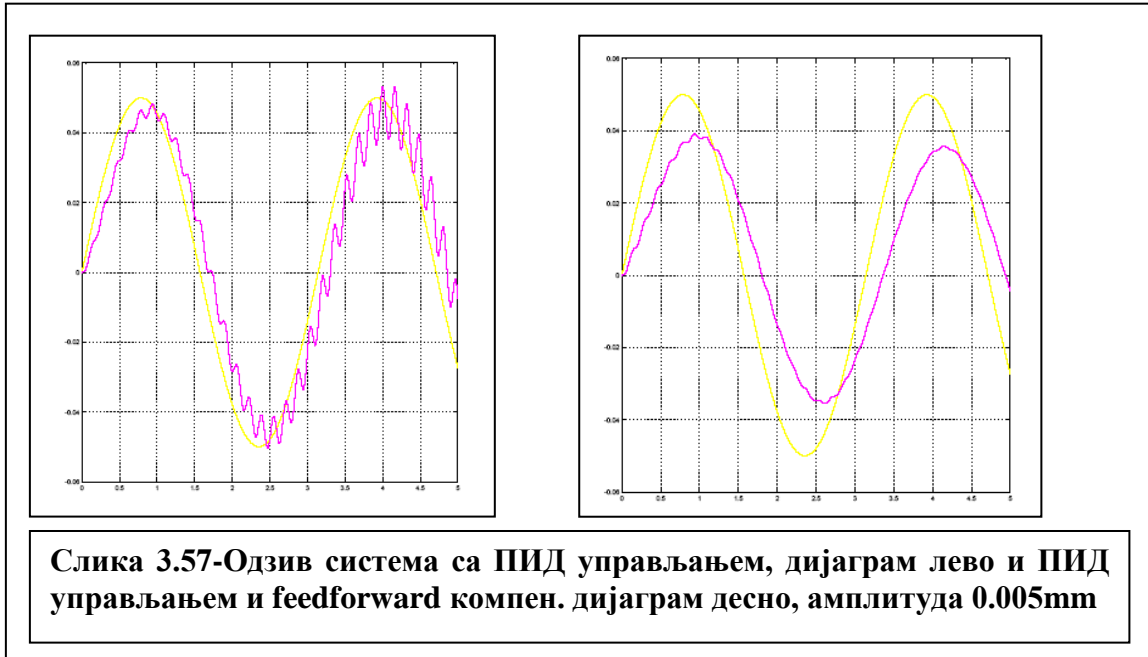
Генерално, управљачки алгоритам треба да обезбеди робусност система према промени параметара и дејству спољних поремећаја. Теоретски се може показати да повратна спрега по позицији у електро хидрауличном систему смањује утицај поремећаја и варијацију параметара али ово важи само у условима великих појачања која нарушавају стабилност рада електро хидрауличног актуатора. Поред већ претходно наведене дефиниције робустних алгоритама управљања у смислу да не захтевају познавање математичких модела, може се показати и следеће узимајући претходно речено о feed-forward компензацији. На слици 3.57 је дат одзив електро хидрауличног система са ПИД управљањем и са додатком ПИД-у у виду feedforward компензације. Јасно је према квалитету одзива да је много већи утицај нелинерности без feedforward компензације (виши хармоници у одзиву) него у случају са feedforward компензацијом.



Слика 3.56-Блок дијаграм математичког модела актуационог система са feedforward компензацијом и моделовањем флексибилног оптерећења

### 3.8 Преглед могућих алгоритама управљања за електро хидраулични актуатор и критеријуми за њихову селекцију

**Прилог теорији пројектовања актуатора за управљање вектором потиска ракетног мотора са флексибилним млазником**



**Табела 3.4: Преглед верификованих алгоритамских решења у пракси за актуаторске системе са основним карактеристикама**

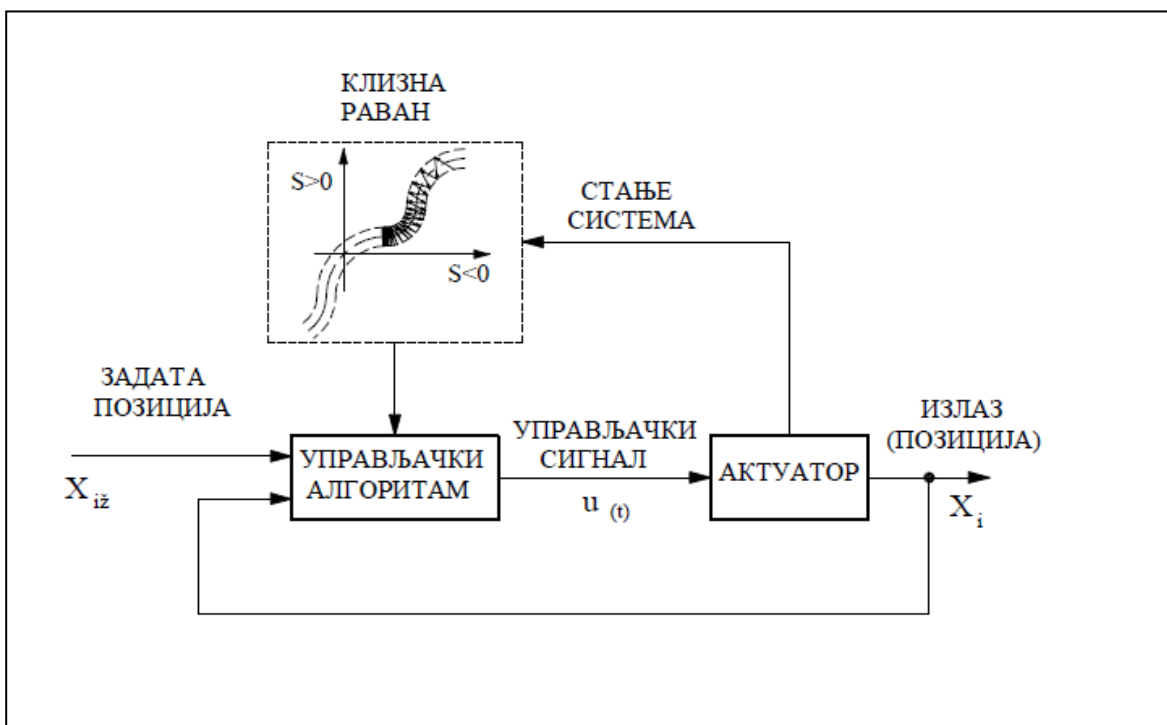
Управљачки алгоритам	Напомена
Управљање са повратном спрегом по излазној величини (Classic feedback control), [2], [47]	За веће пропусне опсеге, више од 100 Hz и више редове од 3 математичког модела, простор улаз-излаз није довољан за дефинисање адекватног управљања.
Регулатор стања (State feedback control), [2], [47]	По дефиницији овај алгоритам управљања користи потпуни опис система, комплетну информацију али има више практичних ограничења.
Управљање са предхођењем (Feedforward control), [54], [51]	Коректан алгоритамски приступ и у комбинацији са елементима ПИД према неким изворима у литератури решама 95 % захтева за квалитетом управљања актуационим системом.
Прилагодљиво управљање (Adaptive control) [47], [53]	Много различитих решења за промену, адаптацију параметара и структуре. Главни недостатак је чињеница да није лако обезбедити довољно висок ред референтног модела за једну класу ових алгоритама.
Променљива структура са клизним радним режимом (Variable structure sliding mode control) [54], [51], слика 3.58	За примену овог алгоритма ограничење је интегрална природа електро хидрауличног система, величине стања које описију систем не могу бити по одступањима јер се не могу израчунати номиналне вредности свих величина стања. Овај алгоритам има особину инваријантности, кад се једном управљане величине дођу на клизну раван, ту и остају.
Прородно пратеће управљање (Nature tracking)	Овај алгоритам има особину предикције преко

**3.8 Преглед могућих алгоритама управљања за електро хидраулични актуатор и критеријуми за њихову селекцију**

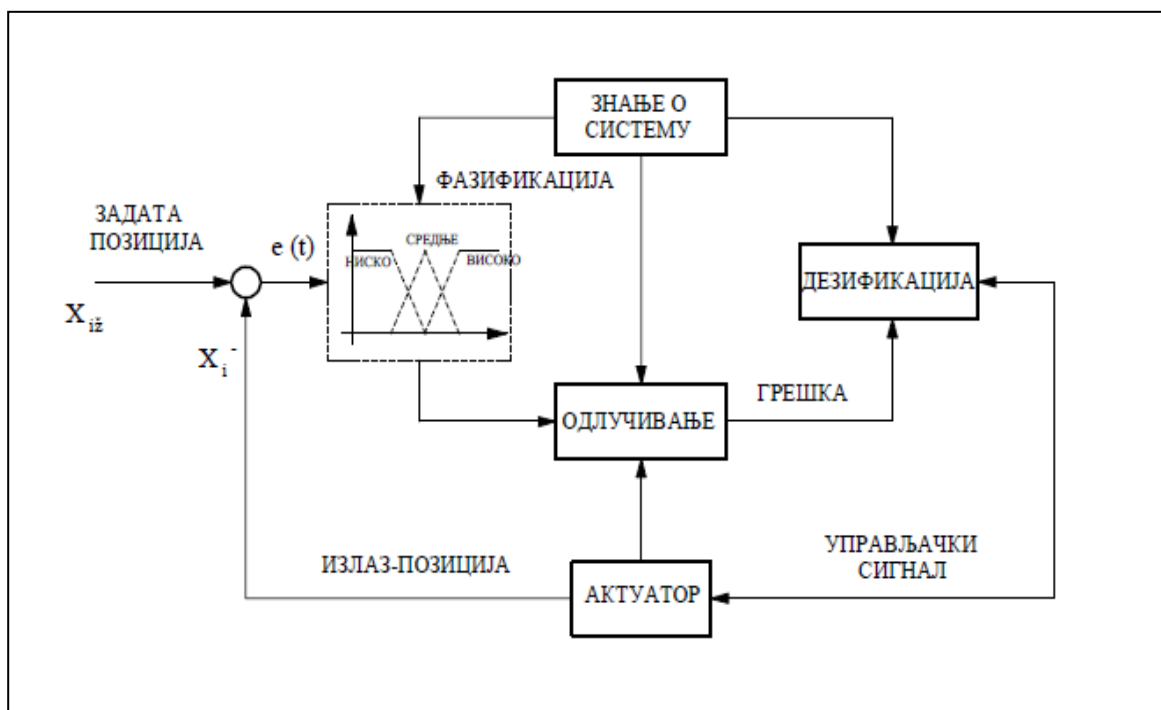
**Прилог теорији пројектовања актуатора за управљање вектором потиска ракетног мотора са флексибилним млазником**

control algorithm ) [16], [49], [50]	позитивне повратне спреге по управљању, али је врло осетљив на промене параметара у актуационом систему. Карактерише га врло високо појачање. За синтезу алгоритма потребно је делимично познавати математички модел актуационог система (вектор улаза и вектор излаза уматематчком моделу).
Feedback linearisation (Input output linearisation) [32], [40]	На основу доступне литературе задњих 20 година највише истраживања се ради на овом алгоритму. Основна идеја је да се користе ресурси рачунарске имплементације алгоритма, тако да се све нелинеарности алгебарски линеаризују и пребаце у управљачки систем и тако компензују реалне нелинеарности у конфигурацији актуаторског система. Главно ограничење је да се не могу све нелинеарности алгебарски линеаризовати, што доводи до грешака и немоделоване динамике у систему. Главна предност овог алгоритма је што се могу применити после успешне линеаризације у повратној спреси, све познате технике за синтезу и анализу линеарних система.
Fuzzy control [31], слика 3.59	Алгоритам се заснива на томе да се поседује база знања како систем ради и на основу ње се дефишу одређена правила за генерисање управљања. Ово је добар избор када постоји информација како систем ради. У случају електрохидрауличних система његова главна предност је што се нелинеарни карактер система компензује преко базе правила, тако да се манифестација високе природе нелинеарности се не може видети директно. За синтезу алгоритма није потребан математички модел актуационог система.
Neuro control [32], [62],	Алгоритам се заснива на познавању неуронских мрежа којима је пренето (оне су научене) како систем ради. Постоје алгоритамска решења у литератури али без посебно верификоване примене у пракси.
Bilinear control [32],	Релативно једноставно нелинеарно управљање, не користи се често у пракси.

**3.8 Преглед могућих алгоритама управљања за електро хидраулични актуатор и критеријуми за њихову селекцију**



Слика 3.58–Структурна шема алгоритма променљиве структуре са клизном равни [39]



Слика 3.59–Структурна шема алгоритма на бази Фази логике [123]

### Приступ структурном избору алгоритма управљања (повратне спреге и основно управљачко дејство) [26]

Претходно цитирани алгоритми не примењују се само за актуаторске системе већ и за управљањем притиском или темпертуром флуида у неком суду и сличним процесима. У анализи која следи разматраће се структурна решења приликом формирања алгоритама управљања које посебно важе за актуаторске системе. На првом месту то је принцип синтезе алгоритма на бази инверзне динамике система. Поред тога, математички се решава и дилема да ли је боље управљати по сили (убрзању) или по позицији. Математички се показују одређене предности управљања по убрзању односно по сили, посебна предност је да постоји одређена адаптивност и да се може ред система снизити за један, повећавањем појачања у повратној спрези по убрзању тако да се не наруши стабилност система. У формално математичком смислу ово је исправно, али најисправнији је приступ да се управља по позицији, а да се реализује повратна спрега по убрзању односно по сили као унутрашња контура. Разлог је практичан јер по убрзању односно сили је тешко управљати када су мала убрзања, што одмах отвара проблем шума а при већим пропусним опсезима реално постоје велика убрзања на врло малим ходовима, тако да је врло тешко прихватити приступ управљања убрзањем и у условима великих померања (мало убрзање) и у условима малих померања (велико убрзање). На основу претходног ова анализа има теоријски значај за размевање проблематике управљања актуаторским системима, посебно оним где је могуће изабрати фазне величине стања, позиција, брзина убрзања, а објекат управљања је приказан линеаризованим математичким моделом трећег реда. Електро хидраулични актуациони системи се често моделују на претходно описан начин:

$$\begin{aligned} \ddot{x} + a_1 \dot{x} + a_0 x &= bu \\ b_0, a_j &= \text{const} \end{aligned} \quad (3.256)$$

Дати су почетни услови:

$$\begin{aligned} x(0) &= x_0 \\ \dot{x}(0) &= \dot{x}_0 \end{aligned} \quad (3.257)$$

Управљање и стационарна стања се могу изразити као:

$$\begin{aligned} x &= x^0 = \text{const.}, \dot{x} = 0 \\ u &= u(x, \dot{x}) \end{aligned} \quad (3.258)$$

Еталон систем или референтни се може дефинисати:

$$\begin{aligned} \ddot{x}^* + \beta_1 \dot{x}^* + \beta_0 x^* &= \beta_0 x^* \\ \beta_0, \beta_1 &= \text{const} \end{aligned} \quad (3.259)$$

### 3.8 Преглед могућих алгоритама управљања за електро хидраулични актуатор и критеријуми за њихову селекцију

**Прилог теорији пројектовања актуатора за управљање вектором потиска ракетног мотора са флексибилним млазником**

Од претходних коефицијената зависе особине еталон система преко кога се задаје жељено динамичко понашање актуаторског система.

Једначина (3.257) се може написати у облику:

$$\ddot{x} = w(x, \dot{x}, u)$$

$$\begin{aligned} w(x, \dot{x}, u) &= b_0 u - a_0 x - a_1 \dot{x} = bu \\ x(t) &= x^*(t), t \geq 0 \end{aligned} \tag{3.260}$$

Претходна једначина је увек тачна када је убрзање реалног објекта једнако убрзању еталон модела. Сада можемо да напишемо:

$$\begin{aligned} w(x, \dot{x}, u) &= w^*(x, \dot{x}), t \geq 0; \\ w^*(x, \dot{x}) &= \beta_0(x^0 - x) - \beta_1 \dot{x} \\ x^*(t) &= x(t) \end{aligned} \tag{3.261}$$

Претходне једначине следе из еталон модела система (3.259). Сада можемо срачунати вредност управљања:

$$u^* = \frac{1}{b_0} \left[ \beta_0 x^0 + \sum_{j=0}^1 (a_j - \beta_j) x^{(j)} \right] \tag{3.262}$$

Претходни израз за управљање је компензационог типа. Овај алгоритам има смисла када су параметри познати и када се не мењају у широким границама.

Прва од једначина (3.261) може се решавати и на ефикаснији начин, тако да уведемо и повратну спрегу по убрзању:

$$\begin{aligned} u &= k(w^* - \ddot{x}), k = const; \\ signk &= signb_0 \end{aligned} \tag{3.264}$$

Претходни закон управљања (3.264) се назива диференцијални закон управљања првог реда.

Структурна шема претходног модела алгоритма управљања са затвореним повратним спрегама приказана је на слици 3.60.

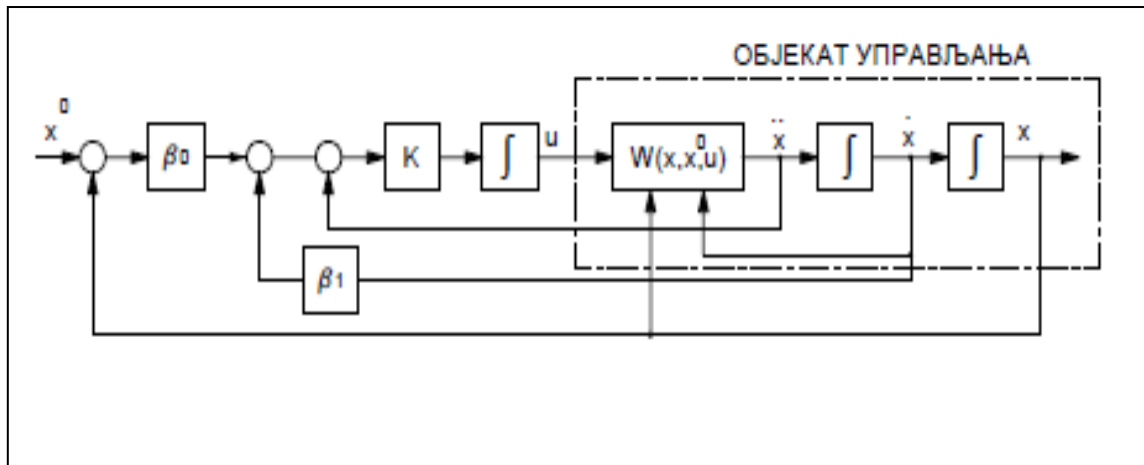
На структурној шеми се јасно види да је задата жељена величина која одговара стационарном стању  $x^0$ .

Можемо предпоставити према слици 3.50, да контура повратне спреге по убрзању знатно бржа од контуре повратне спреге по позицији. Јасно можемо уочити природну особину адаптивности претходног алгоритма ако смо у прилици да знамо убрзање односно да га меримо. Тада нам је позната и функција:

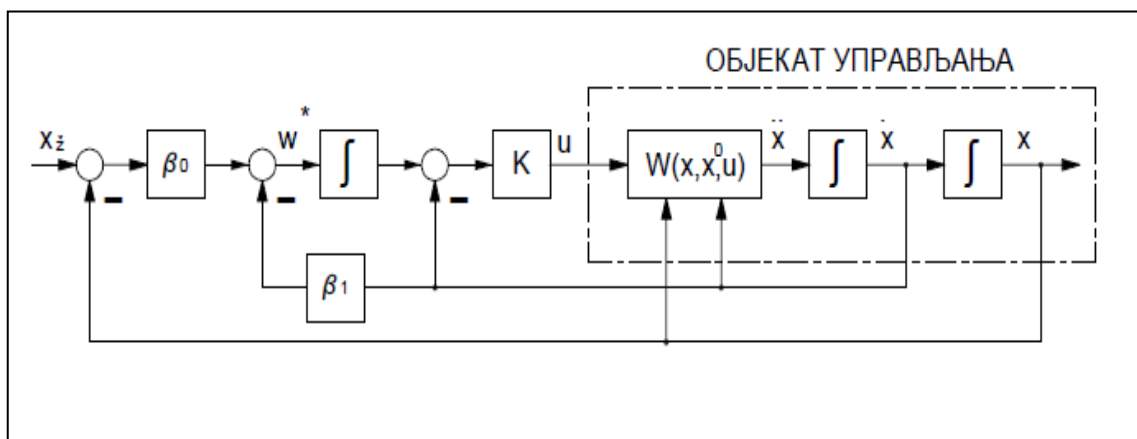
$$w(x, \dot{x}, u).$$

**3.8 Преглед могућих алгоритама управљања за електро хидраулични актуатор и критеријуми за њихову селекцију**

На слици 3.61 приказана је и структура претходног модела управљања са интегралним законом управљања:



Слика 3.60-Структурна шема система са диференцијалним законом управљања [26]



Слика 3.61-Структурна шема система са интегралним законом управљања [26]

Управљање по убрзању може се представити у интегралном облику:

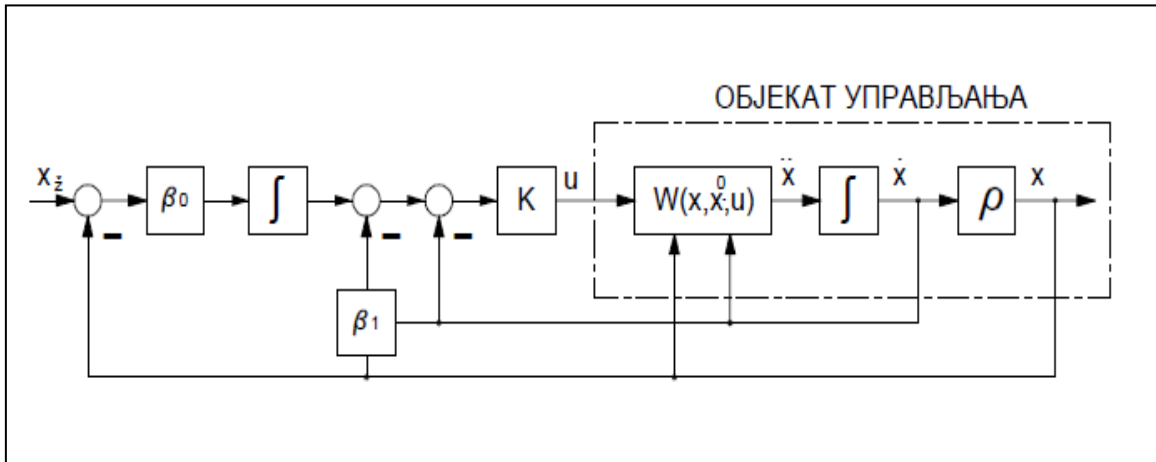
$$u = k \int_0^t (w^* - \ddot{x}) dt - k\dot{x} \quad (3.265)$$

Интегрални алгоритам управљања можемо приказати и у другом облику, ако користимо једначину (3.262) и (3.265):

$$w^*(x, \dot{x}) = k\beta_0 \int_0^t (x^0 - x) dt - k(\beta_1 x + \dot{x}) \quad (3.266)$$

### 3.8 Преглед могућих алгоритама управљања за електро хидраулични актуатор и критеријуми за њихову селекцију

Структурна шема система која одговара једначини (3.266) приказана је на слици 3.62.



Слика 3.62-Структурна шема са алгоритмом управљања [26]

Системи који су приказани на сликама 3.60, 3.61 и 3.62 имају идентичне динамичке особине јер су им једнаке одговарајуће преносне функције. На основу претходног може се написати за систем са диференцијалним законом управљања:

$$\begin{aligned} \ddot{x}(t) &= w(x, \dot{x}, u); \\ \dot{u}(t) &= k[w^*(x, \dot{x}) - \ddot{x}] \\ w^*(x, \dot{x}) &= \beta_0(x^0 - x) - \beta_1\dot{x} \end{aligned} \quad (3.267)$$

Елиминишемо из претходне једначине функцију управљања, тако што прву од претходних једначина (3.267) диференцирамо по времену а затим је укључимо у другу једначину из претходне групе и узимањем у обзир друге једначине из групе (3.260) добијамо следећу једначину:

$$\ddot{x} + (a_1 + kb_0)\dot{x} + (a_0 + k\beta_1b_0)x = k\beta_0b_0x^0 \quad (3.268)$$

Из претходног израза видимо да је затворен систем описан једначином трећег реда. Видимо да ако повећавамо појачање  $k$  без ограничења добијамо процес који постоји у еталон систему.

Ако претходну једначину поделимо тако, да је добијемо у новом облику, претходна тврдња се лако показује:

$$\begin{aligned} b_0(\ddot{x} + \beta_1\dot{x} + \beta_0x) &= b_0\beta_0x + \psi(\dot{x}, \ddot{x}, \ddot{x}) \\ \psi(\dot{x}, \ddot{x}, \ddot{x}) &= -\frac{1}{k}(a_0\dot{x} + a_1\ddot{x} + \ddot{x}) \end{aligned} \quad (3.269)$$

Јасно је да ако појачање повећавамо до врло великих вредности можемо да напишемо:

### 3.8 Преглед могућих алгоритама управљања за електро хидраулични актуатор и критеријуми за њихову селекцију



**Прилог теорији пројектовања актуатора за управљање вектором потиска ракетног мотора са флексибилним млазником**

$$\lim_{k \rightarrow \infty} \psi(\dot{x}, \ddot{x}, \ddot{\ddot{x}}) = 0 \quad (3.270)$$

Ако претходно применимо на прву једначину из групе (3.269) добијамо израз који у потпуности одговара опису еталон система, једначина (3.258).

$$\ddot{x} + \beta_1 \dot{x} + \beta_0 x = b_0 x^0 \quad (3.271)$$

Претходно нам показује да ако повећавамо појачање, можемо снизити ред једначине која описује управљање, тако да из трећег реда прелазимо у други ред система. Ова особина постоји код управљања убрзањем, повећавамо појачање а не губимо стабилност система.

Претходни доказ може се употпунити и преко Хурвицовог алгебарског критеријума, ако се једначина (3.268) напише у облику преносне функције:

$$K_x(s) = \frac{k\beta_0 b_0}{sA(s) + k\beta_0 \beta(s)} = \frac{x(s)}{x^0(s)} \quad (3.272)$$

За коефицијенте се може написати:

$$A(s) = s^2 + a_1 s + a_0$$

$$\beta(s) = s^2 + \beta_1 s + \beta_0 \quad (3.273)$$

Ако сада претпоставимо да је стање:

$$x^0 = const, \quad (3.274)$$

Можемо за излазну променљиву добити:

$$x(\infty) = \lim_{s \rightarrow 0} sK_x(s)x^0(s) = \lim_{s \rightarrow 0} sK_x(s) \frac{x^0}{s} = x^0 \quad (3.275)$$

Претходно значи да нема статичке грешке при констатном улазном сигналу. Можемо сада претходне величине дефинисати и на следећи начин:

$$x^0 = v_x t; x^0(s) = \frac{v_x}{s^2}; v_x = const \quad (3.276)$$

Преносна функција по грешци може се на основу претходног добити као:

$$e = x^0 - x$$

$$K_e(s) = 1 - K_x(s) = \frac{[A(s) + kb_0(s + \beta_1)]s}{sA(s) + kb_0 \beta(s)} = \frac{e(s)}{x^0(s)} \quad (3.277)$$

Потражимо сада статичку грешку као:

**3.8 Преглед могућих алгоритама управљања за електро хидраулични актуатор и критеријуми за њихову селекцију**

**Прилог теорији пројектовања актуатора за управљање вектором потиска ракетног мотора са флексибилним млазником**

$$e(\infty) = \lim_{s \rightarrow 0} sK_e(s) \frac{v_x}{s^2} = \frac{\beta_1}{\beta_0} v_x \quad (3.278)$$

На основу претходног видимо да можемо оставрити астатизам првог реда као што је дефинисано код еталон система. Видимо да коришћењем алгоритма уптављања по убрзању можемо оставрити задате динамичке карактеристике система чију синтезу вршимо. Из претходног нам је јасно да постоје три параметра које треба дефинисати за еталон систем,  $\beta_0, \beta_1, k$ .

За дефинисање претходно наведена три параметра, потребно је користити следеће почетне податке:

-време трајања прелазног процеса  $t^*, x^*(t) \rightarrow x^0$

-жељена вредност прескока  $\sigma^*$

Запишимо једначине (3.259) сада у облику:

$$\tau_0^2 \ddot{x}^* + 2\xi\tau_0 \dot{x}^* + x^* = x^0 \quad (3.279)$$

$$\ddot{x}^* + 2\xi\omega_0 \dot{x}^* + \omega_0^2 x^* = \omega_0^2 x^0 \quad (3.280)$$

$$\tau_0 = \omega_0^{-1}$$

Сада можемо да дефинишемо време идеалног прелазног процеса као:

$$t^* = 3\tau_0 \quad (3.281)$$

$$\sigma = 4.3\%$$

Из претходног је сада могуће израчунати параметре еталон система као:

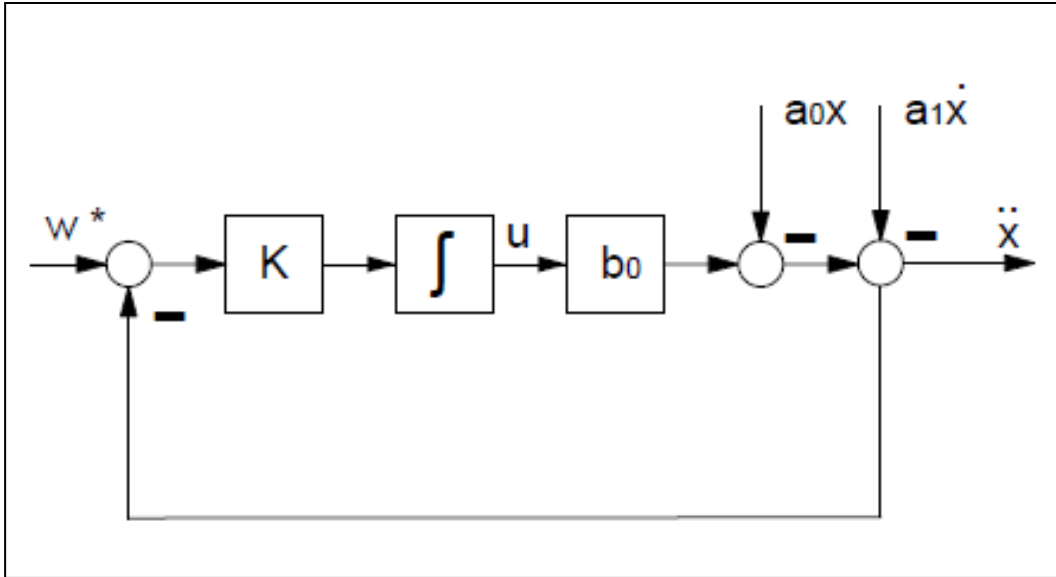
$$\beta_0 = \frac{1}{\tau_0^2}, \beta_1 = \frac{\sqrt{2}}{\tau_0}, \tau_0 = \frac{t^*}{3} \quad (3.282)$$

Јасно је да је остало још да се дефинише појачање  $k$ .

Основни захтев који се поставља у овој теоријској анализи је да појачање по убрзању мора бити знатно веће од појачања по позицији тако да важи однос за временске константе:

$$\tau_w \ll \tau_0$$

Потребно је да израчунамо временску константу убрзања. Да би то урадили искористимо структурни дијаграм на слици 3.63, који нам дефинише претпоставку да позицију и брзину можемо да посматрамо као спољни поремећај



Слика 3.63-Структурна шема контуре убрзања [26]

$$\ddot{x} = w \quad (3.283)$$

$$W_w = \frac{kb_0}{s} \quad (3.284)$$

Сада можемо написати преносну функцију затвореног система:

$$K_w = \frac{kb_0}{s + kb_0} = \frac{1}{\tau_w s + 1} \quad (3.285)$$

На основу претходног јасно је да важи израз за временску константу:

$$\tau_w = \frac{1}{kb_0} \langle \langle \tau_0 \quad (3.286)$$

Можемо сада урадити следеће, претпоставимо да је:

$$\tau_0 = N\tau_w, N \gg 1 \quad (3.287)$$

тада на основу претходне једначине (3.285):

$$\text{sign}k = \text{sign}b_0 \quad (3.288)$$

Ако на основу једначине (3.267) применимо Хурвицов критеријум стабилности, добијамо изразе које треба да задовољи фактор покачања:

$$(a_1 + kb_0)(a_0 + k\beta_1 b_0) \gg k\beta_0 b_0 \quad (3.289)$$

$$(a_1 + kb_0) \gg 0, (a_0 + k\beta_1 b_0) \gg 0, k\beta_0 b_0 \gg 0$$

### 3.8 Преглед могућих алгоритама управљања за електро хидраулични актуатор и критеријуми за њихову селекцију

## Прилог теорији пројектовања актуатора за управљање вектором потиска ракетног мотора са флексибилним млазником

Ако се узме у обзир претходно, (3.287) и (3.288) и ако је објекат управљања стабилан,  $a_0 > 0$  и  $a_1 > 0$  стабилност ће бити задовољена за сваку вредност коефицијента појачања  $k$ .

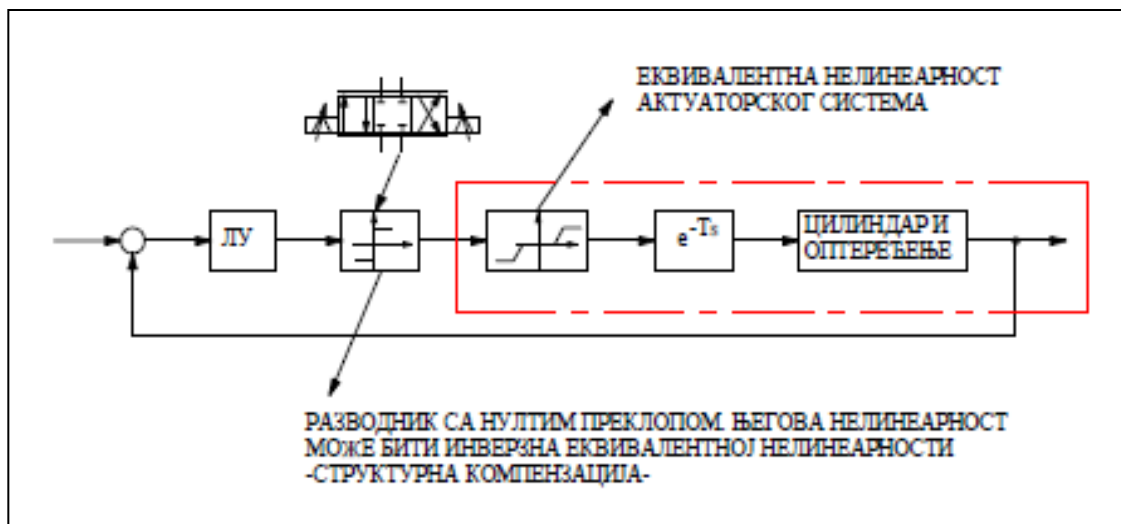
Посебно је могуће одредити вредност за коефицијент појачања  $k$  када је објекат нестабилан, што у пракси хидрауличних актуаторских система није случај.

Претходно наведена теоријска анализа има за циљ да оправда идеју примене каскадног управљања, спољна петља ће бити по позицији, а унутрашња по сили. Овде практично имамо могућност да излазом у петљи за управљање позицијом дефинишемо улаз за управљање силом. Ова проблематика је симулационо обрађена као и процедура математичког моделирања у поглављу 3.9 у овом раду које се односи на синтезу управљачког система.

У оквиру претходног, дефинисана је основа за поглавље у овом раду које се односи на синтезу управљања.

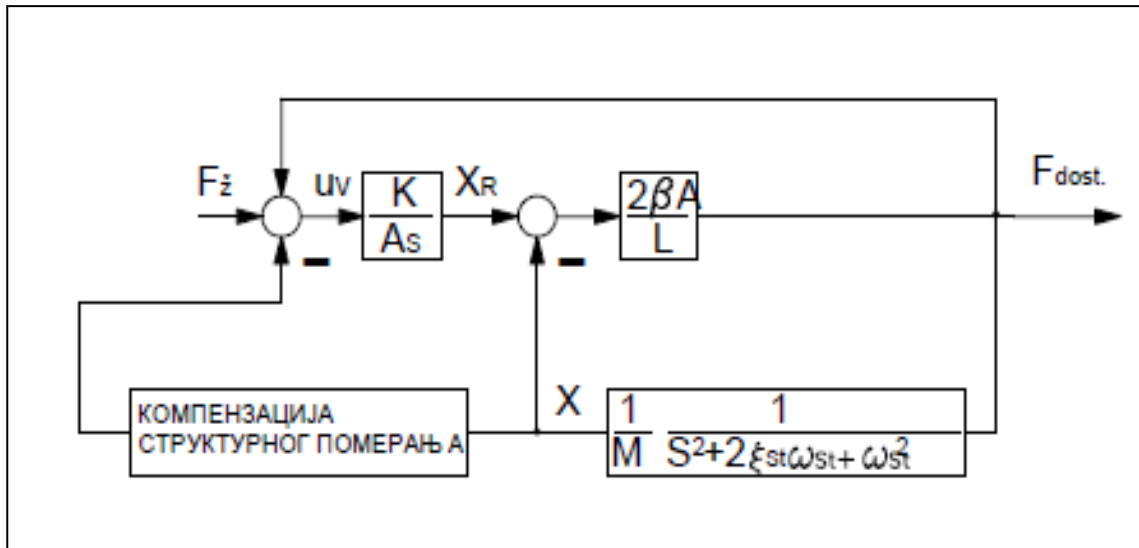
У посебном поглављу размотриће се још два начина синтезе управљања, односно избора управљачког алгоритма који се базирају на посебним структурним решењима алгоритма управљања која не припадају класичном или модерном приступу синтези управљања за електрохидраулични актуациони систем и које су резултат сопственог истраживања аутора о алтернативним управљачким алгоритмима.

Први се заснива на изради компензационе еквивалентне управљачке нелинеарности у структури пропорционалног управљања са под опцијом да та нелинеарност буде достигнута избором серво разводника, а друга се заснива на компензацији структурног померања у оквиру управљања силом. У сваком случају обе методе ће бити симулационо и експериментално проверене а илустроване су на сликама 3.64 и 3.65.



Слика 3.64- Структура актуационог система са еквивалентном нелинеарношћу система

3.8 Преглед могућих алгоритама управљања за електро хидраулични актуатор и критеријуми за њихову селекцију



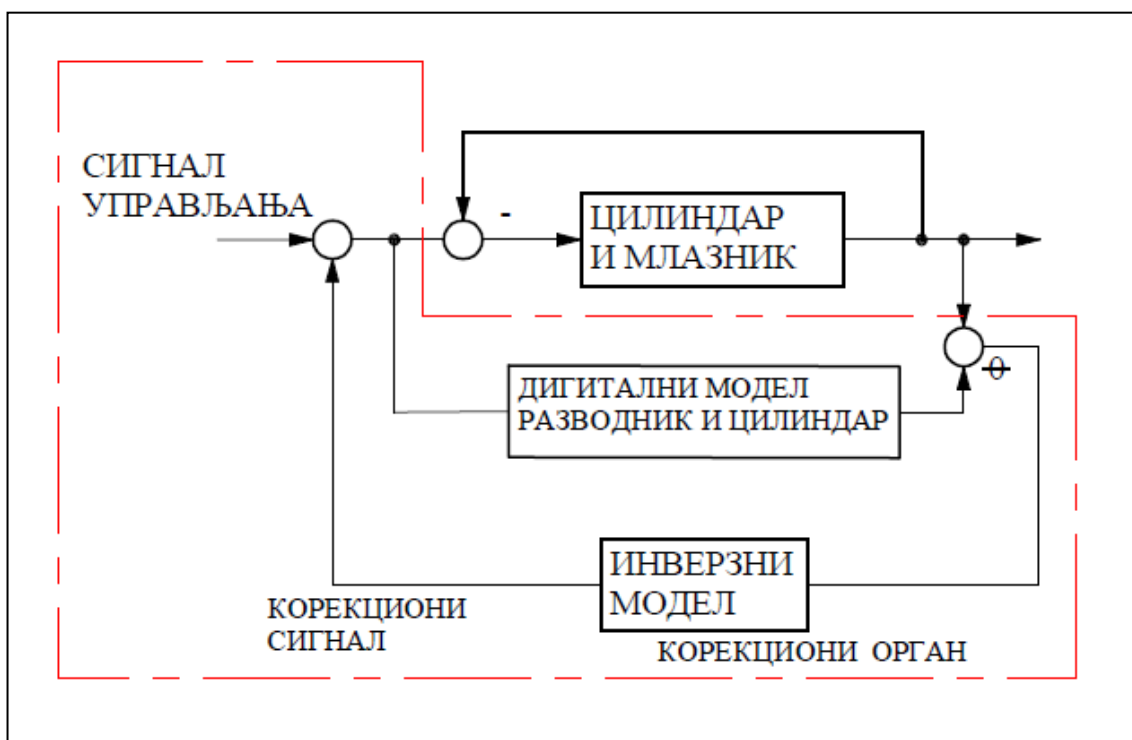
Слика 3.65- Структура актуационог система са компензацијом померања

У овом поглављу треба истаћи и једну посебну особину актуаторских система за ваздухопловне примене која у принципу важи и за актуатор флексибилног млазника а то је да се управља са изузетно малим амплитудама управљачког сигнала, врло често и мање од 0.2%.

Ово је код већине разводника у домену зоне неостељивости и реализација оваквих захтева представља проблем, јер на први поглед за решење овог проблема, захтева се изузетно повећање тачности и прецизности у изради електрохидрауличног актуационог система, пре свега разводника и електронског појачивача за разводник.

Алтернатива претходно дефинисаном проблему, то јест његовом решењу, је израда управљачког алгорита који се заснива на структури која је приказана на слици 3.65, а то значи увођење рачунског модела актуатора за област малих управљачких сигнала. При томе се не захтева повећање тачности израде компонената актуатора. Са слике 3.66 се види да се користи принцип инваријантности који се једноставно може софтверски реализовати. Са слике је јасно да је потребно дефинисати инверзну преносну функцију од преносне функције модела, према једначини:

Прилог теорији пројектовања актуатора за управљање вектором потиска ракетног мотора са флексибилним млазником



Слика 3.66-Структурна шема електрохидрауличног актуационог система са микропроцесорском имплементацијом модела система за мала померања [27]

$$W_{inv} = \frac{1}{W(z)_M} \quad (3.290)$$

### 3.9 Синтеза управљања за актуациони електрохидраулични систем флексибилног млазника-систематизација класичног приступа

#### 3.9.1 Увод-теоријско разматрање

Синтеза управљачког алгоритма је најважнија и најсложенија активност у пракси аутоматског управљања која је део и пројектовања актуационог система. Синтеза управљачког алгоритма није једнозначно одређена. У пракси се издвајају два приступа синтези. Први који после избора одређене структуре, користи традиционалне методе у фреквентном домену и који се заснива на принципу проба и корекција грешака (цртање Најквистове криве и Бодеових дијаграма) и други који се заснива на принципима инверзне динамике, где се полази од математичког модела неизменљивог дела актуаторског система (склоп разводник-цилиндар) и модела еталон система. У технологији синтезе управљачког алгоритма за актуациони систем флексибилног млазника користиће се оба претходно наведена принципа.

У основи постоје три категорије синтезе управљачког алгоритма. Прва категорија је када се користи познати алгоритам и када је потребно само дефинисати односно подесити параметре који се налазе у математичким формулацијама услова које треба да испуни управљачки систем. Ова категорија назива се параметарска синтеза. Друга категорија је када се првој категорији дода и структурни проблем, односно када је потребно модификовати структуру алгоритамског приступа. Ова категорија се назива и структурна синтеза. Трећа категорија је када дефинишемо све у синтези, од структуре односно типа управљачке структуре до израчунавања параметара алгоритма према условима динамичког квалитета рада актуационог система. Елементи треће категорије се разматрају у два поглавља. У поглављу 3.8 разматра се преглед могућих алгоритама са општом анализом карактеристика алгоритама а у поглављу 3.7 се разматрају елементи треће категорије, тако што структуру система дефинишемо у оквиру посебног начина моделирања оптерећења (структурно оптерећење) где имамо постојање такозване „природне повратне спреге по брзини“ и представљање структуре еластичног оптерећења преносном функцијом другог реда или генерисањем нелинеарности на основу експерименталних података о хистерзису флексибилне везе.

Даље постоје два приступа: пројектовање релејне нелинеарности за компензацију еквивалентне нелинеарности. Може се и специфичним избором разводника, покушати да се компензује еквивалентна нелинеарност у коју претходно није уведена нелинеарност која потиче од разводника. Ово је један од циљева који се жели истражити у овом раду преко теоријских разматрања и експерименталних резултата. Каскадно управљање се намеће као опција на основу чињенице која посебно важи за структурно оптерећење актуатора а то је да се у односу на максималну силу која је постигнута дејством актуатора спорије мења брзина а још спорије позиција. Тада је то јасна аргументација да се може разматрати опција да се посебно управља силом у унутрашњој петљи а у спољној позицијом. Претходно изнета чињеница је резултат анализе више структурних оптерећења актуатора методом коначних елемената која може успешно да покаже претходно

### 3.9 Синтеза управљања за актуациони електрохидраулични систем флексибилног млазника-систематизација класичног приступа

## Прилог теорији пројектовања актуатора за управљање вектором потиска ракетног мотора са флексибилним млазником

наведене разлике у брзини промене позиције и брзине према тренутку када је достигнута највећа сила на актуатору. Ово је дефинисано у литератури [70], где на примеру флексибилног млазника наводе и конкретне вредности, позиција касни 0.025 с а брзина 0.005 с у односу на тренутак максималне силе.

Поред претходно наведеног у синтези се и отвара питање примене принципа „самоподешавања параметара“ или у оригиналу „self-tuning“ који диктира посебан структурни део система. Свеобухватно разматрање пројектовања актуаторског система доводи до закључка да овај принцип није лако примељив у структурама за управљање актуаторима, другим речима у теорији сервомеханизма већ је много кориснији у процесном управљању где су промене параметара спорије, и у прецизније одређеним границама њихових промена и да су многи од њих далеко лакше мерљиви.

Синтеза управљачког алгоритма врло често је процес који захтева да једним делом утицај нелинеарне природе система компензујемо директно управљачким дејствима а да други део нелинеарне природе система избегнемо преко одређивања амплитуда и фреквенција улазних сигнала које не изазивају манифестацију нелинеарне природе електрохидрауличног актуационог система.

Даље, у разматрању синтезе управљачког алгоритма за разматрани актуациони систем полазимо и од следећих основних чињеница:

-Актуациони позициони системи се најчашће описују као системи трећег реда, прве врсте.

-Код система трећег реда, прве врсте, могуће је обезбедити статичку тачност (теоријски да статичка грешка буде нула) и да не зависи од појачања, односно да променом појачања утичемо само на стабилност актуационог система.

-Претходно наведено важи за одскочну промену улазне величине. Али у актуационим системима од посебног значаја је и нагибна функција јер се у конкретном случају промена позиције остварује убрзањем па стационарном брзином (некада и само у режиму убрзања) па затим успорењем, односно проток то јест управљачки сигнал на разводнику се мења по рампи.

-На основу општег теоријског приступа коефицијент брзинске грешке, односно његова реципрочна вредност одређује грешку у фази убрзања односно успорења.

-Овде се отвара питање да ли структури система додати још један интегратор, обезбедити тако услове да грешка буде нула и проверити одзив система. Додавање интегратора мора се извести кроз компензацију. У сваком случају овде треба проверити шта се дешава са стабилношћу система, пошто је преко алгоритамског интегратора унето додатно фазно кашњење за  $-90^\circ$ .

Претходно наведено дефинише правило да се при пројектовању сваког актуационог система на основу унапред познатих података може довољно тачном теоријском анализом изабрати структура и основа почетног идеалног алгоритма управљања који теоријски конвергира циљу синтезе и коме се пројектантским техникама требамо максимално приближити при пројектовању актуационог система за конкретно оптерећење, у овом случају флексибилни млазник. Ако ово

### 3.9 Синтеза управљања за актуациони електрохидраулични систем флексибилног млазника-систематизација класичног приступа



## Прилог теорији пројектовања актуатора за управљање вектором потиска ракетног мотора са флексибилним млазником

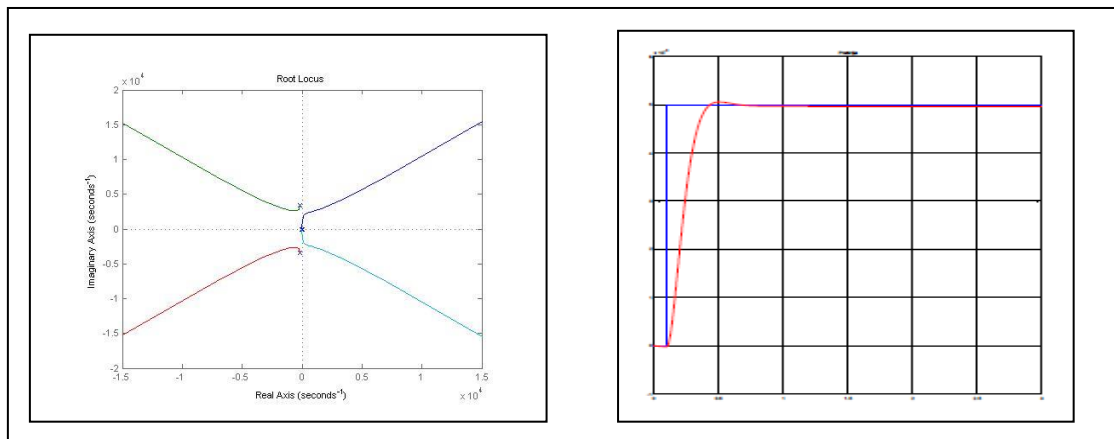
приближавање не може да се спроведе у пракси значи да имамо проблем са немоделованом динамиком система, односно да нисмо математички описали неку важну особину актуаторског система. У овом поглављу припремају се форме управљачких алгоритама који ће бити симулационо и експериментално верификоване [64], [2], [47], [48], [68].

### 3.9.2 Синтеза ПИД управљања

Приликом синтезе управљачког алгорита, поћи ћемо од основне структуре са пропорционалним управљањем и неоптерећеним актуатором.

Први анализу је најкорисније радити методом геометријског места коренова, јер се најбрже може одредити опсег појачања која се могу разматрати (то се без графичке представе може одредити и преко Хурвицовог алгебарског критеријума за стабилност) али предност ове методе је и у томе што се много лакше може анализирати осетљивост тог најједноставнијег контролера са П појачањем на промену параметара објекта, на пример инерцијалне масе и вискозног трења. Нумерички подаци за математички модел дати су у Прилогу 4.

На слици 3.67 је приказан је приказан изглед геометријског места коренова за дефинисану преносну функцију електрохидрауличног актуатора и одзив система за одређену вредност појачања, ( $K=2.5$ ), слика 3.68, на основу модела са лике 3.70.

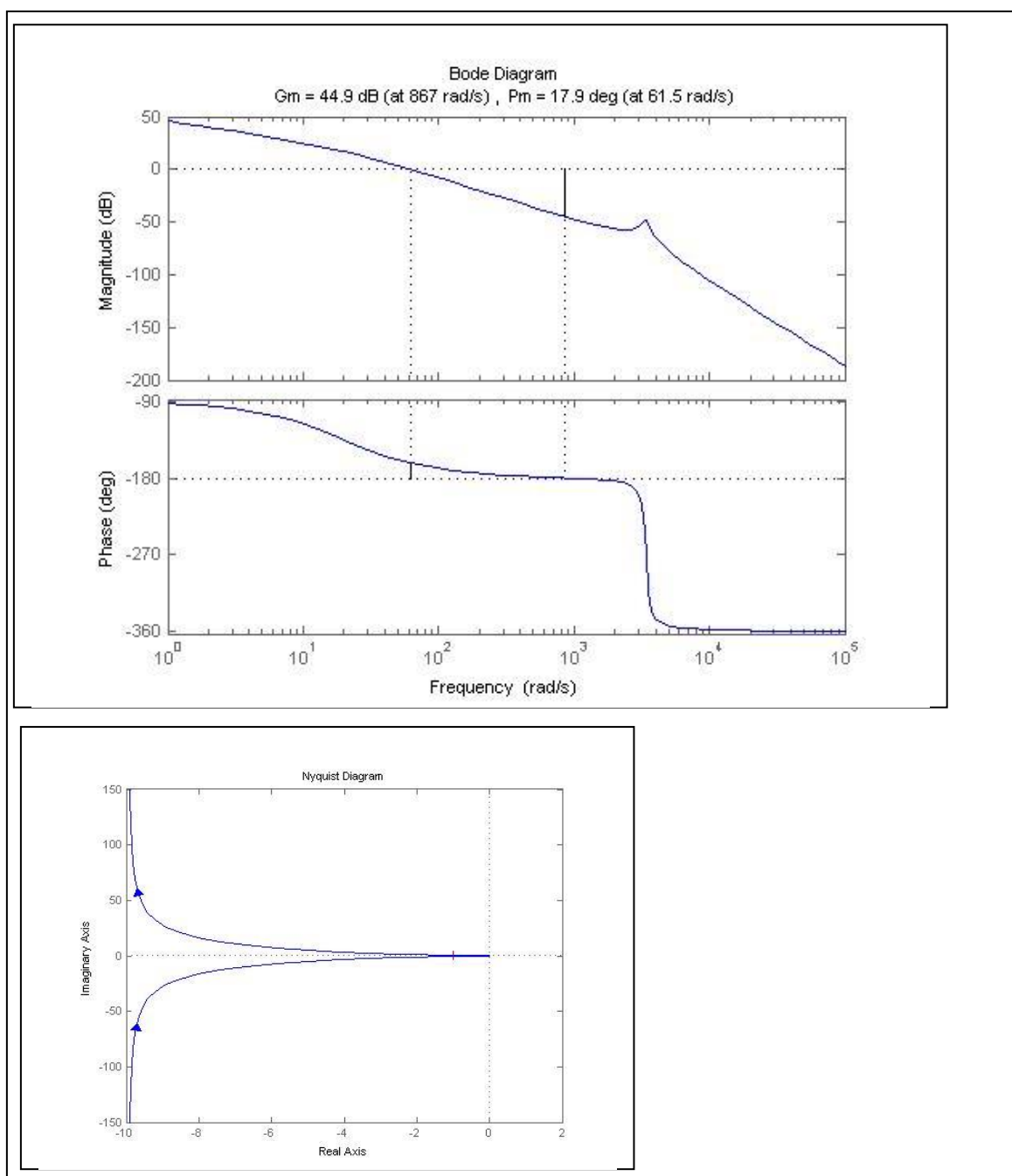


Слика 3.67-ГМК дијаграм

Слика 3.68-Одзив система са П управљањем

Боде и Најквистов дијаграм, отворено коло, дијаграм за гранично стабилни систем приказани су на слици 3.69.

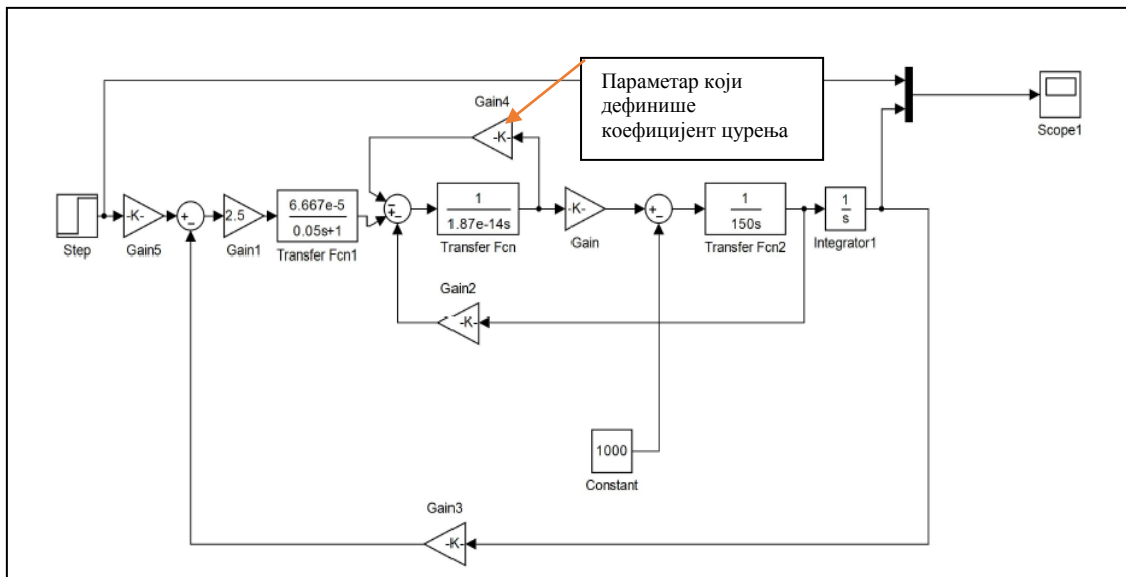
### 3.9 Синтеза управљања за актуациони електрохидраулични систем флексибилног млазника-систематизација класичног приступа



Слика 3.69-Боде и Најквистов дијаграм преносне функције отвореног кола актуатора, типично за гранично стабилан систем (интегрално понашање система)

### 3.9 Синтеза управљања за актуациони електрохидраулични систем флексибилног млазника-систематизација класичног приступа

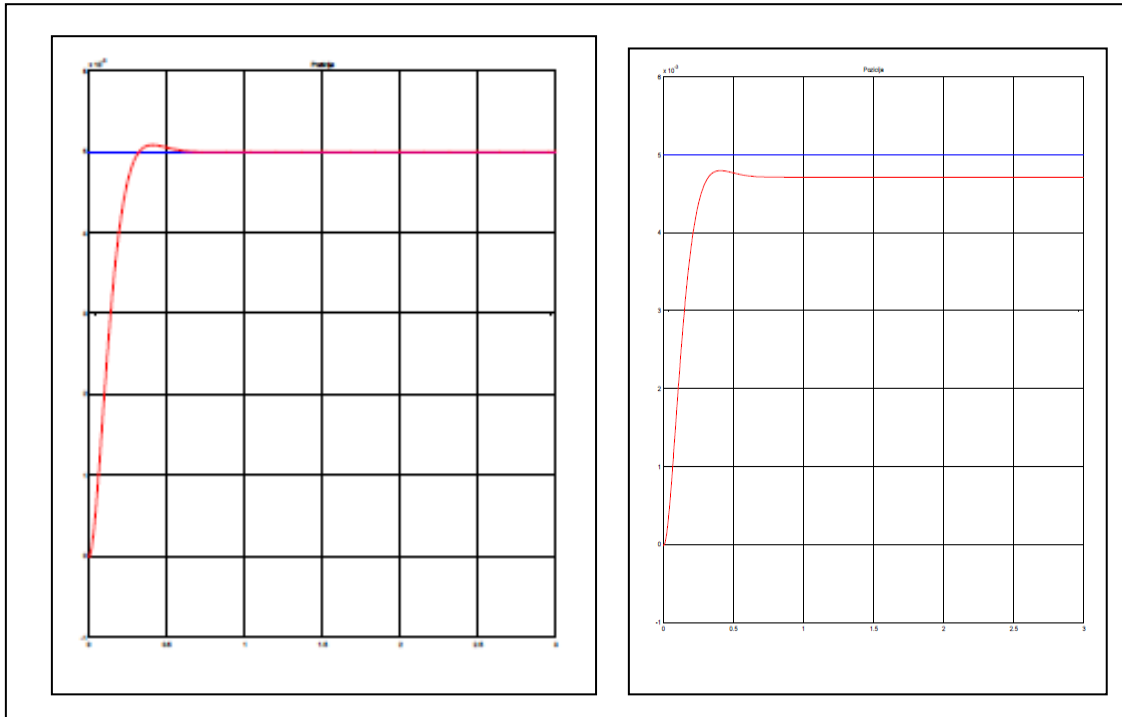
## Прилог теорији пројектовања актуатора за управљање вектором потиска ракетног мотора са флексибилним млазником



**Слика 3.70-Основна симулациона структура неоптерећеног актуатора**

На нивоу основног модела, важно је проверити, понашање система на промену два посебно важна параметра, коефицијента цурења (мења се знатно променом температуре односно вискозитета уља) и промену карактера одзива при промени инерцијалне масе (њен утицај се мења у функцији угла закретања), како је то описано у поглављу 3.7 које разматра проблематику моделирања структурне-редуковане масе. После ове две симулационе провере, долази се до закључка да ли се може радити са фиксним појачањем. На слици 3.71 је приказан одзив система при промени коефицијента цурења за 50 % што одговара условима очекиване промене температуре односно вискозитета уља, на претходном моделу, слика 3.70 то је параметар, Gain 4. Одзиви су приказани на слици 3.71. Када се повећа драстично коефицијент унутрашњег цурења, долази до успоравања и пригуешња одзива, како је и приказано на слици 3.71, дијаграм десно. Жељена позиција је 0.005 m.

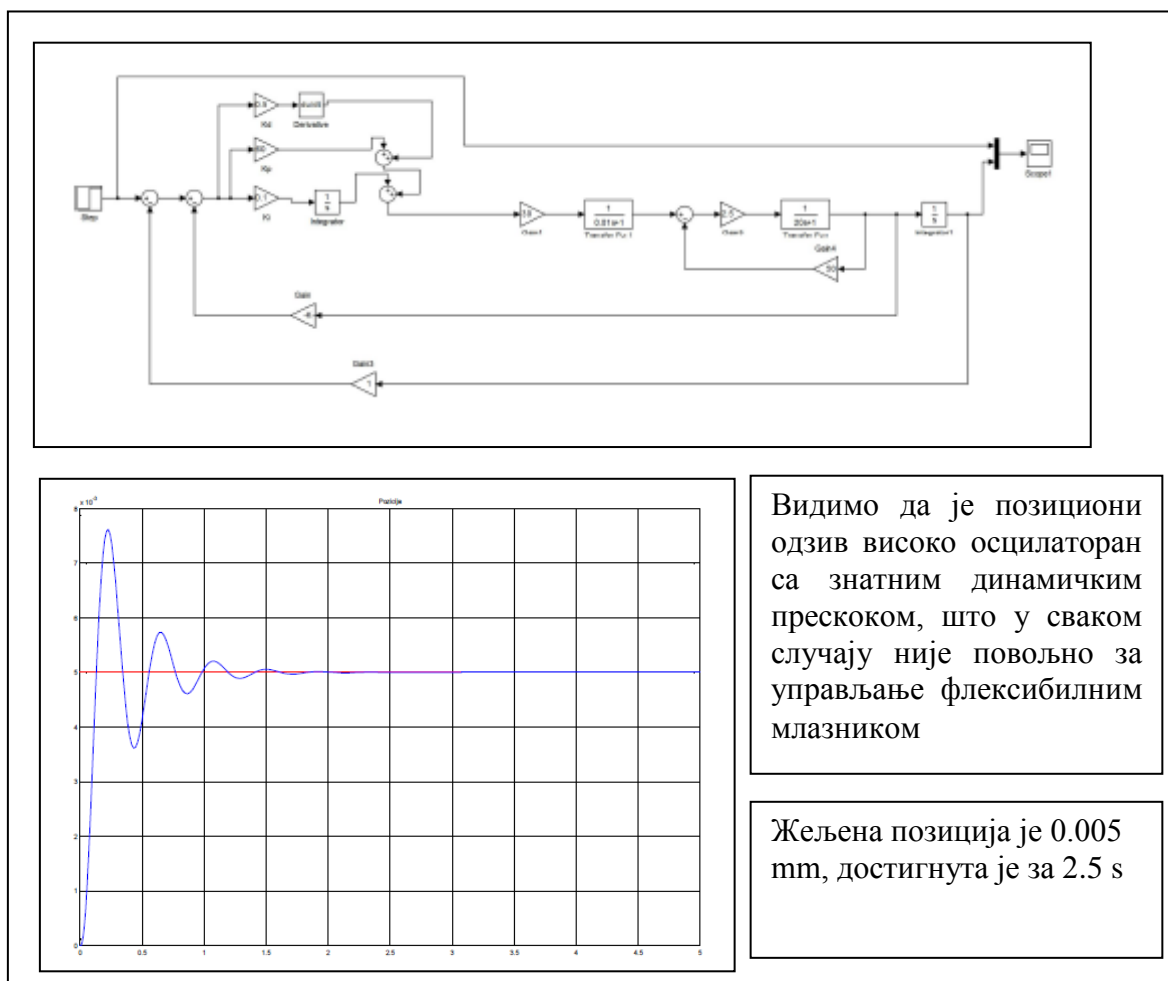
### 3.9 Синтеза управљања за актуациони електрохидраулични систем флексибилног млазника-систематизација класичног приступа



Слика 3.71- Промена одзива при промени коефицијента цурења

Следећи корак је додавање диференцијалног дејства, које је неопходно због квалитета одзива и стабилности. Диференцијално дејство може бити у директној грани система. На овом месту постоји ризик да системи са великим инерцијалним оптерећењем буду троми и да дође до ситуације да нема промене позиције а да одскачна функција прође кроз диференцијатор, и тада долази до парцијалног импулсног одзива који ће се видети у позиционом одзиву. Ова провера је неопходна при пројектовању актуатора и као таква се приказује на основу симулационих модела приказаних на сликама 3.72 и 3.73. На слици 3.72 је приказана структура када је диференцијално дејство у главној грани а на слици 3.73 када је диференцијално дејство у повратној грани, за различите масе структурног оптерећења.

## Прилог теорији пројектовања актуатора за управљање вектором потиска ракетног мотора са флексибилним млазником

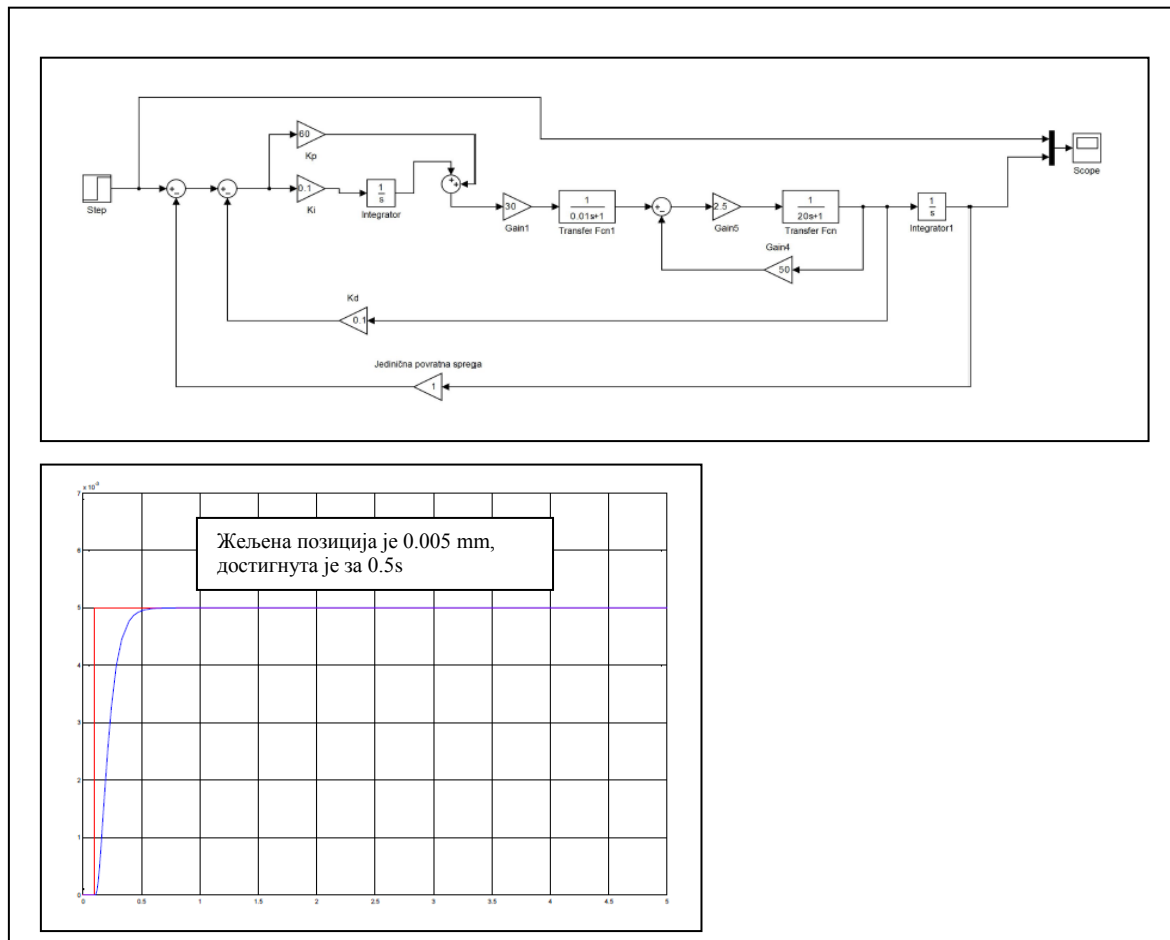


**Слика 3.72-Симулинк модел са положајем Д-диференцијалног дејства у главној грани**

Резултати симулација показују да је битан положај Д дејства у алгоритамској структури, како би се избегао осцилаторни одзив на основу импулсног утицаја од проласка одскочне функције кроз Д дејство. Овде треба водити рачуна да избором споријег разводника, уместо у моделу дефинисаног разводника (први ред), са временском константом 0.01s, постави се 0.05 s, нема утицаја позициони одзив. То значи да је разводник био тај који је успорио импулсну функцију, што нас наводи на практичан закључак да не треба бирати бржи разводник него што је потребно, а у складу и са критеријумом, из поглавља 3.8, о односу сопствене фреквенције разводника и цилиндра, избегава се потреба да алгоритам управљања врши стабилизацију, ако разводник није значајно бржи од цилиндра. На слици 3.73 видимо готово идеалан одзив система са ПИД управљањем, у случају неоптерећеног актуатора, али са бржим разводником у односу на онај који је унесен на структури модела слика 3.70. У сваком случају бржи разводник се може применити само код мањих маса, док код већих имамо такође увођење нестабилности коју треба „алгоритамски стабилисати“.

### 3.9 Синтеза управљања за актуациони електрохидраулични систем флексибилног млазника-систематизација класичног приступа

## Прилог теорији пројектовања актуатора за управљање вектором потиска ракетног мотора са флексибилним млазником



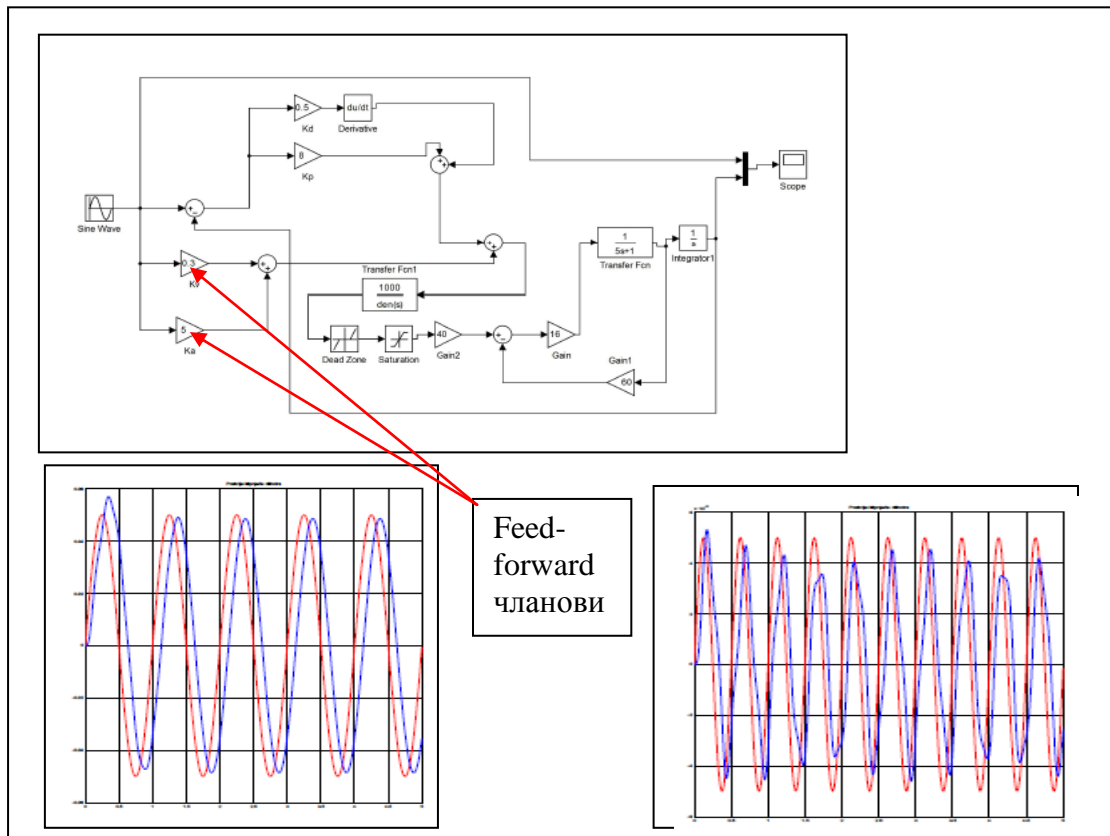
Слика 3.73- Симулинк модел са положајем Д-диференцијалног дејства у повратној грани

Претходна структура нам показује да смо добили повратну спрегу по брзини која нам систем дефинише као пропорционални позициони са брзинском регулацијом.

Ако нема оптерећења са ПД управљачким алгоритмом можемо добити одзив система са нултом статичком грешком. Поред тога може се показати да грешка зависи од периоде одабирања, што значи да смањењем периоде одабирања можемо знатно смањити статичку грешку. Али у пракси за случај актуатора за флексибилни млазник, претходно описан случај ПД управљања без оптерећења није интересантан, јер ће оптерећење бити променљиво, тако да се отвара питање увођења у анализу ПИД алгоритма који има интегрално дејство које обезбеђује и у условима променљивог оптерећења да статичка грешка буде једнака нули. Ако је променљивост оптерећења предвидљива, може се предност дати feedforward члану како би се избегли проблеми са ПИД структуром (пре свега ефекат засићења интегратора, који се назива у оригиналу wind up). Ова дилема се симулационо проверава, слика 3.74.

### 3.9 Синтеза управљања за актуациони електрохидраулични систем флексибилног млазника-систематизација класичног приступа

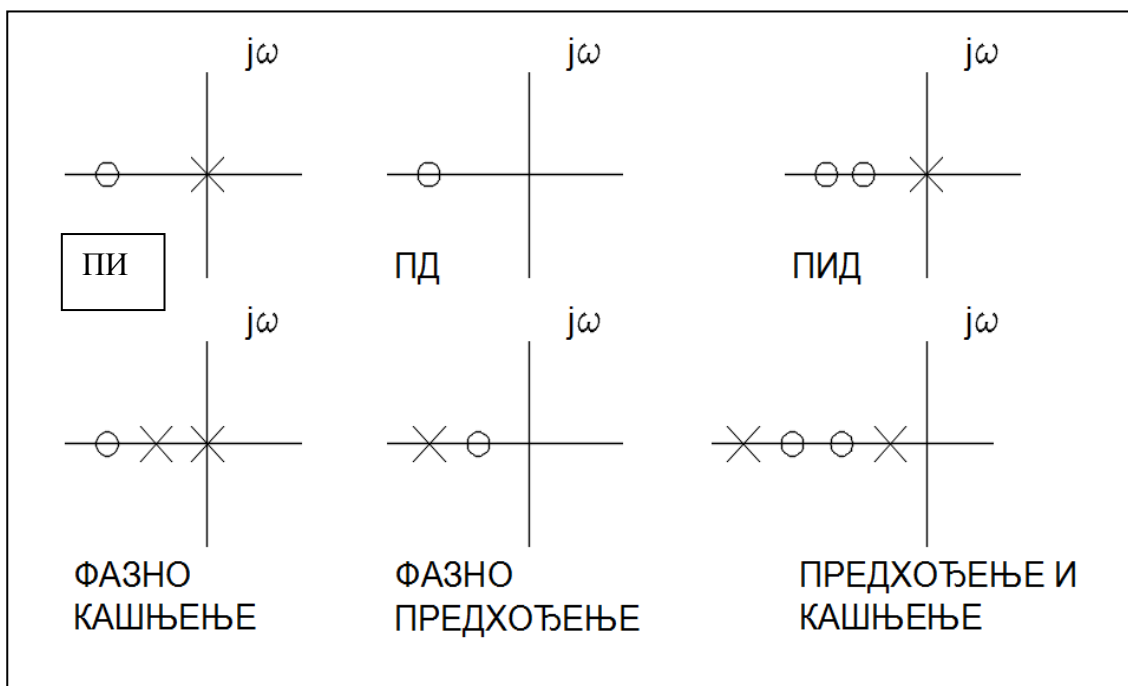
## Прилог теорији пројектовања актуатора за управљање вектором потиска ракетног мотора са флексибилним млазником



Слика 3.74-ПД-Управљање са Feedforward чланом, дијаграм лево, 1Hz , 0.005 mm и дијаграм десно, 2Hz , 0.005 mm

Са слике 3.74 је јасно да за алгоритам управљања са Feedforward чланом имамо велику зависност појачања од фреквенције улазног сигнала, што захтева одређену адаптацију појачања, ради обезбеђења управљања, али је обезбедио и мање фазно кашњење. У том смислу проверена је функционално структура овог алгоритма, и утврђено је да се не може радити са фиксним параметрима (појачања) ни у случају када актуатор није оптерећен флексибилним оптерећењем. Јасно је да код крајње селекције алгоритма управљања, апсолутну предност имају алгоритми где је у што ширем фреквентном опсегу појачање констатно и не захтева адаптацију. Поред тога овај алгоритам је и осетљив на промену инерцијалног оптерећења, што му смањује универзалност. Пројектовање ПИД структуре није исто за процесно управљање и за актуаторске системе. Прво код процесног управљања довољан је само одскочни улазни сигнал и елементи ПИД-а могу бити у основној структури, без да имају негативне утицаје један на други. Пошто су елементи И и Д, такозвани временски чланови, код структурирања алгоритма управљања мора се водити посебно рачуна о њиховом структурном положају, слика 3.75, што се у овом поглављу и анализира.

### 3.9 Синтеза управљања за актуациони електрохидраулични систем флексибилног млазника-систематизација класичног приступа

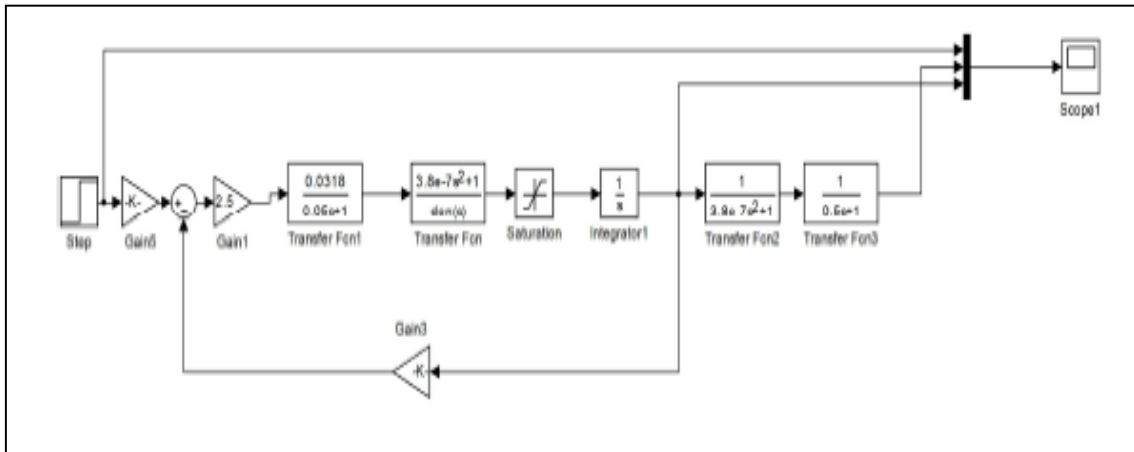


Слика 3.75-Сличности ПИД (ПИ, ПД и ПИД) управљачке структуре са компензацијом у  $s$  равни

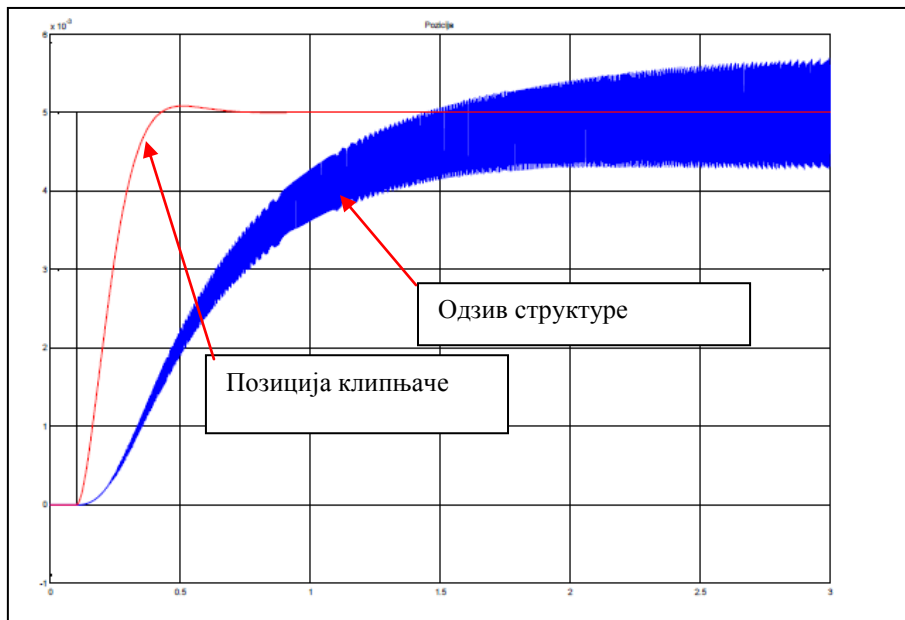
Прва анализа оптерећеног актуатора спроводи се тако, што се дефинише преносна функција другог реда која репрезентује еластичну структуру односно њен пригушни карактер. Врло је тешко тачно одредити сопствену фреквенцију и пригушење структуре флексибилног млазника, без доступне стварне конструкције, али и за произвољне претпостављене податке, показује се да касни одзив по позицији, (угао закретања), што се јасно види из симулационог дијаграма, слика 3.77. Било је неопходно као што се са блок дијаграма симулационог модела види, филтрирати одзив структуре. Постављена је и нелинеарност ограничења по брзини. Најважније је да и одзив структуре апериодичан, што је посебно важно да би се избегла додатна дестабилизација ракете. На сликама 3.76 и 3.77 приказан је блок дијаграм математичког модела, односно одзив структуре.



Прилог теорији пројектовања актуатора за управљање вектором потиска ракетног мотора са флексибилним млазником



Слика 3.76-Структура симулационог модела оптерећеног актуатора са П управљањем ( $K_p=2.5$ )



Слика 3.77, одзив актуатора и структуре на задату позицију од 0.005 mm

На основу претходно наведеног и основних постулата који су резултат претходне праксе и теоријских анализа, можемо поставити основе методологије пројектовања управљачког система кроз следеће тезе:

1. Пошто се задатак управљања састоји из два дела, стабилизација и обезбеђење тачности, као први корак, дефинише се задатак да се пропорционалним управљањем покуша извршити задовољавајућа стабилизација а да се даље разматра, додаток за поправку параметара прелазног процеса. Практика је показала да пропорционално управљање врши најбољу стабилизацију, тако да се овде не дефинишу алтернативне технике за стабилизацију. У сваком случају јасно је да се може одредити пропусни опсег актуационог система већ у почетним фазама

### 3.9 Синтеза управљања за актуациони електрохидраулични систем флексибилног млазника-систематизација класичног приступа

пројектовања ракете (разматрано у посебном поглављу 4.1) и пропусни опсег актуационог система на основу појачања које је извршило стабилизацију. У том случају у оквиру овог критеријума је и допунски критеријум да се стабилизација обезбеђује на половини пропусног опсега само са пропорционалним управљањем. Ако смо ово испунили, провера преко симулација и на експерименталном систему, то је потврда да је пропорционално појачање адекватно изабрано. Значи, актуациони систем ће имати одговарајући одзив за синусну побуду, чија фреквенција не прелази половину пропусног опсега актуационог система, који ће задовољити по амплитуди и фази излазног сигнала, то јест позицији клипњаче хидрауличног цилиндра.

2. Повећавањем пропорционалног појачања у сваком случају обезбеђујемо стабилност али истовремено смањујемо пропусни опсег актуационог система. Тада се мора отворити питање компензације, то јест додавањем ускладника у алгоритамску структуру како би се проширио пропусни опсег за онолико колико га је повећање појачања смањило. Ускладник се реализује искључиво софтверски. Ово је природни след у синтези управљања који води после параметарске на структурну синтезу типа ускладника, које се овде посебно разматра у поглављу које следи, 3.9.2, Синтеза компензатора.

3. Следећи кораци после фиксирања вредности за пропорционално појачање су усмерени на додавање осталих елемената ПИД-а, увођења предикције у управљачки алгоритам, као другог дела оптималног алгоритма. Јасно је из претходног да је главна нелинеарност основне актуаторске конфигурације, хидраулични цилиндар-разводник, статичка карактеристика разводника типа квадратног корена, а да су главне нелинеарности оптерећења, зазор, трење и елатичност. Прве две нелинеарности оптерећења су практично везане нелинеарности, ако повећамо трење смањујемо зазор и ако повећавамо зазор смањујемо трење. Еластичност је посебна нелинеарна природа система, она се генерално приказује преко нелинеарности типа хистерезиса или у линеарном домену преко преносне функције другог реда, али је важно да се лако може уочити приликом синусне побуде тако што се утицај еластичности види преко модова високе учестаности.

4. У сваком случају актуациони систем који се разматра ће имати пропусни опсег не већи од 10 Hz. ПИД управљачки алгоритам (први део дефиниције оптималног алгоритма управљања) се у пракси показао успешан за пропусне опсеге до 100 Hz, што значи да је потпуно оправдан приступ да основа управљачког алгоритма буде ПИД са одређеним додацима за синтезу управљања вектором потиска преко флексибилног млазника. Поред претходног препоруке за ПИД управљање су значајне и следеће две чињенице:

4.1 Објекат управљања има један пар доминантних полова.

4.2 Ред објекта управљања није већи од 3.

Претходно наведено у потпуности оправдава коришћење ПИД управљачког алгоритма као основе за почетну синтезу управљања. Модел цилиндар-разводник је трећег реда за најчешће примене у пракси. Такође у практичним применама

### **3.9 Синтеза управљања за актуациони електрохидраулични систем флексибилног млазника-систематизација класичног приступа**

(flight control) нису познати хидраулични актуациони системи са већим пропусним опсегом од 80 Hz. Већи пропусни опсег у пракси постоји само у случају специјалних тест машина са електрохидрауличним актуационим системом.

5. Додаци се заснивају на другом делу дефиниције оптималног алгоритма управљања а то је да треба да буде обезбеђена предикција за поремећаје који настају због промене интезитета управљања у реалном времену. Предикција се обезбеђује feedforward елементима или пратећим алгоритмима управљања.

6. Трећи део дефиниције идеалног алгоритма управљања се односи на његову брзину. Основна брзина се данас постиже једноставно јер је брзина рачунара на завидном нивоу. У одређеним ситуацијама, није довољна и проблем се може решавати на два главна начина. Први је да се пропорционално дејство реализује преко аналогног рачунара а други је да се ради са променљивим кораком интеграције који се подешава према управљачким захтевима. Овде две опције су поменуте због комплетности разматрања проблематике. Обзиром на реалне очекиване пропусне опсеге за електро хидрауличне актуационе системе за флексибилни млазник може се очекивати да ће брзина од 100 Hz, бити довољна.

Као посебан проблем је и захтев да се оствари најбржи могући апериодичан одзив. Ово је свакако у вези са брзином рачунара али и начином да се обезбеди да одзив буде апериодичан и најбржи могући. У сваком случају стоји чињеница да тада нема стационарне брзине у позиционирању, односно позиционирање се обавља у режиму сталног убрзања и успорења. [27] У пракси се ово изводи врло често и овде ће бити размотрено са теоријског становишта, тако да се могу дефинисати и услови за практично тестирање позиционог управљања са овом особином. Апериодичан одзив је императив код структурних оптерећења, јер не „побуђује“ нелинеарности типа зазора и еластичности (хистерезис). Већи императив за апериодичан одзив можда постоји само код управљања на алатним машинама, јер прескок директно може да доведе до лома и деформације радног предмета или алата којим се врши обрада, а на примеру флексибиног млазника не доводи до лома структуре али дестабилише кретање тежишта ракете по задатој путањи.

$$\begin{aligned}
 u(t) &= \left\{ a_{\max}, 0 \leq t \leq \frac{T_{\min}}{2} \right. \\
 u(t) &= \left\{ -a_{\max}, 0 \leq t \leq \frac{T_{\min}}{2} \right. \\
 u(t) &= \left\{ 0, t > T_{\min} \right.
 \end{aligned}
 \tag{3.291}$$

$$T_{\min} = \min t_1$$

Прелазни процес, односно одзив по позицији се може приказати:

$$x_p(t) = \frac{1}{2} a_{\max} t^2 h(t) - a_{\max} \left(t - \frac{T_{\min}}{2}\right)^2 h(t) \left(t - \frac{T_{\min}}{2}\right) + a_{\max} (t - T_{\min})^2 h(t) (t - T_{\min}) \tag{3.292}$$

### **3.9 Синтеза управљања за актуациони електрохидраулични систем флексибилног млазника-систематизација класичног приступа**

**Прилог теорији пројектовања актуатора за управљање вектором потиска ракетног мотора са флексибилним млазником**

$h(t)$ -јединична одскочна функција

Ако сада применимо Лапласову трансформацију добијамо:

$$x_p(s) = \frac{a_{\max}}{s^3} - \frac{2a_{\max} e^{-\frac{T_{\min}}{2}s}}{s^3} + a_{\max} \frac{e^{-T_{\min}s}}{s^3} = a_{\max} (1 - 2e^{-\frac{T_{\min}}{2}s} + e^{-T_{\min}s}) \quad (3.293)$$

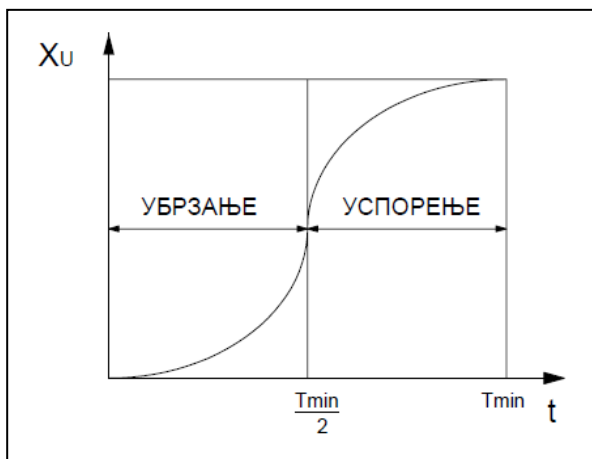
По теорији о одређеној вредности за бесконачно дуг временски период, дефинишемо да је управљачко дејство једнако:

$$x_p(s) = W_o(s) * W_G(s) = W_o(s) \frac{a_{\max} T_{\min}^2}{4} \quad (3.294)$$

На основу претходног израза добијен израз за управљање, што може да се уведе у једначину ( 3.342) и добијамо израз за преносну функцију:

$$W_o(s) = \frac{4}{T_{\min}^2} (1 - 2e^{-\frac{T_{\min}}{2}s} + e^{-T_{\min}s}) * \frac{1}{s^2} \quad (3.295)$$

Јасно је да систем има астатизам другог реда што може бити велики проблем за стабилност система.



**Слика 3.78 -Профил брзине приликом позиционирања хидрауличног актуатора за мала померања [27]**

Један од принципа је и да се алгоритмом управљања избегне подизање реда система, а да се при моделовању ради симулације и синтезе не диже ред система за више од 3 приликом моделовања оптерећења.

У литератури [32], [67], [68] постоји већ одређено систематизовано искуство са ПИД управљачким алгоритмима за различите опције управљања за хидраулични актуатор: по позицији, по брзини и по сили. Табела има градацију од 5 ступњева, два су негативна, један је неутралан и два су позитивна. Даље се приказује табела која чини основ за почетни корак пројектовања односно синтезе за електро хидраулички актуатор:

**3.9 Синтеза управљања за актуациони електрохидраулични систем флексибилног млазника-систематизација класичног приступа**

**Табела 3.6**

	Линеарни закон управљања						
	P	I	PI	PD	PID	PT <sub>1</sub>	PTT <sub>1</sub>
Преносна функција	$K_P$	$\frac{1}{T_1 s}$	$K_P(1 + \frac{1}{T_1 s})$	$K_P(1 + T_D s)$	$K_P(1 + \frac{1}{T_1 s} + T_D s)$	$\frac{K_{P1}}{1 + T_1 s}$	$K_{P1} + \frac{K_{P2}}{1 + T_1 s}$
Позициони систем	+	--	-/0	-	-/0	++	++
Брзински систем	-	+	++	--	++	+/0	
Управљање по сили	-	+	++	--	++		

Претходна табела даје предност структурној синтези и примени компензатора.

### 3.9.3 Пројектовање компензатора (основна структурна синтеза)

Пројектовање компензатора решава два главна недостатка при пројектовању било које ПИД структуре. Уместо чистог интегралног понашања, пол у координатном почетку и чистог диференцијалног понашања које је како је претходно показано неадекватно за случај инерцијалног оптерећења са улазним сигналом типа одскочне функције, два типа компензатора дефинисана су преко својих преносних функција:

$$W_{kas}(s) = K \left( \frac{T_2 s + 1}{T_1 s + 1} \right) \text{-компензатор или ускладник са фазним кашњењем}$$

$$W_{pre}(s) = K \left( \frac{T_1 s + 1}{T_2 s + 1} \right) \text{-компензатор или ускладник са фазним предхођењем}$$

Услов за претходно дефинисано је да  $T_1 > T_2$ , у случају који овде анализирамо, пројектујемо серијски компензатор са претхођењем, јер је  $T_1=110$ , а  $T_2=0.1$ . До ових величина долази се на основу одређених препорука из литературе и одређених проба.

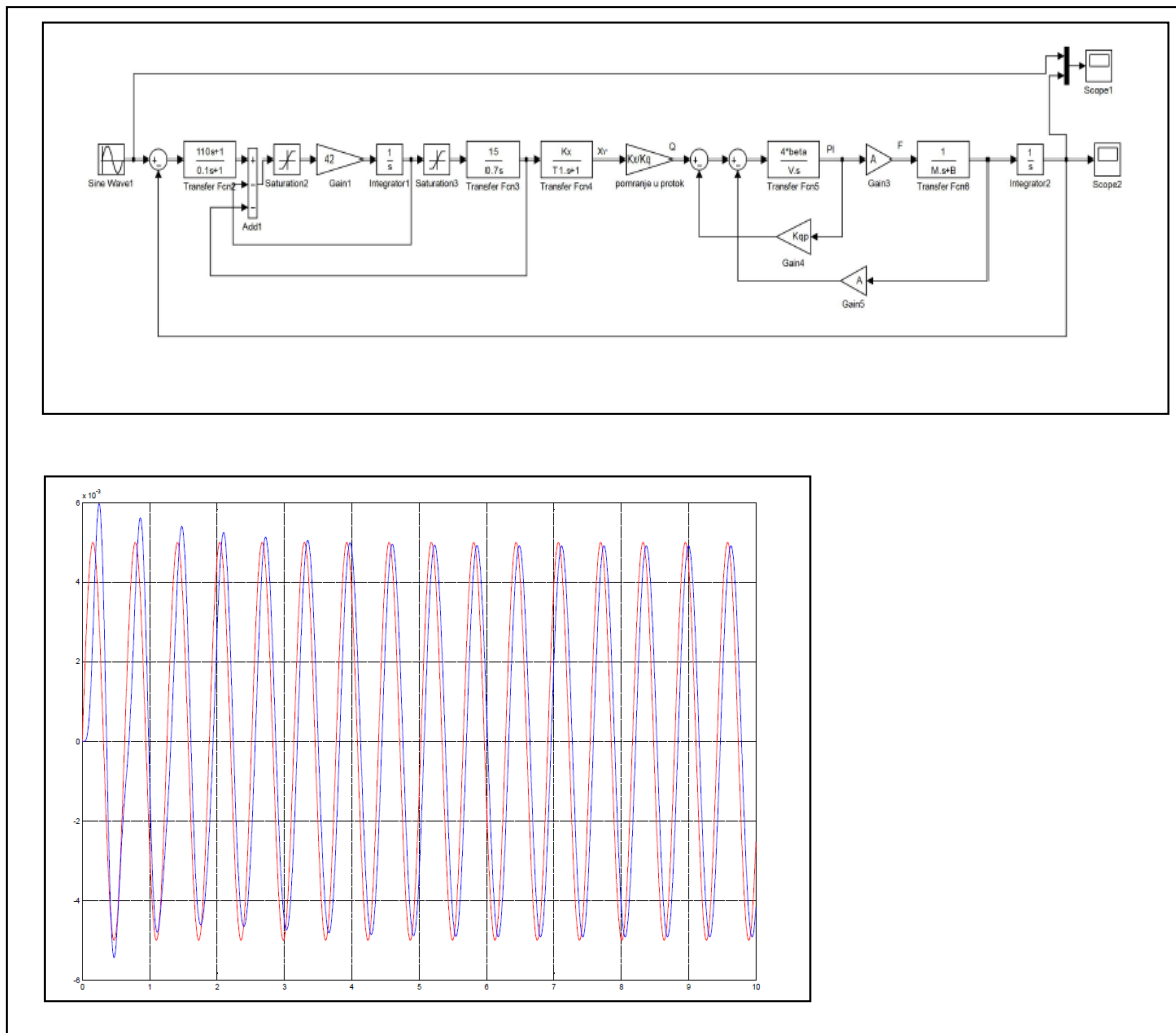
Из претходно наведених переносних функција, јасно је да као и код класичне ПИД структуре, имамо максимално три параметра за подешавање,  $K$ ,  $T_1$  и  $T_2$ .

На слици 3.79 приказана је симулациона структура за пројектовање компензације са претхођењем. Ова структура је нешто комплекснија од претходних, додате су и две важне инхерентне нелинеарности, засићење по брзини и по убрзању које су у складу са ограниченим димензијама разводника односно енергетске јединице која га напаја. Највећи напредак у компензацији види се за синусни улазни сигнал, пошто је могуће готово 100 % компензовати фазно кашњење, што је значајна особина алгоритма управљања. Када се заврши синтеза ПИД управљачких структура, следећи корак је прелазак на структуре за компензацију,

### 3.9 Синтеза управљања за актуациони електрохидраулични систем флексибилног млазника-систематизација класичног приступа

## Прилог теорији пројектовања актуатора за управљање вектором потиска ракетног мотора са флексибилним млазником

које се испитују да ли се може добити квалитетнији алгоритам управљања за референтне сигнале (задата амплитуда од 0.005 mm, преко одскочне и синусне функције). Сличну компензацију фазног кашњења евидентираћемо и код управљања са предхођењем (Feed Forward компензација).

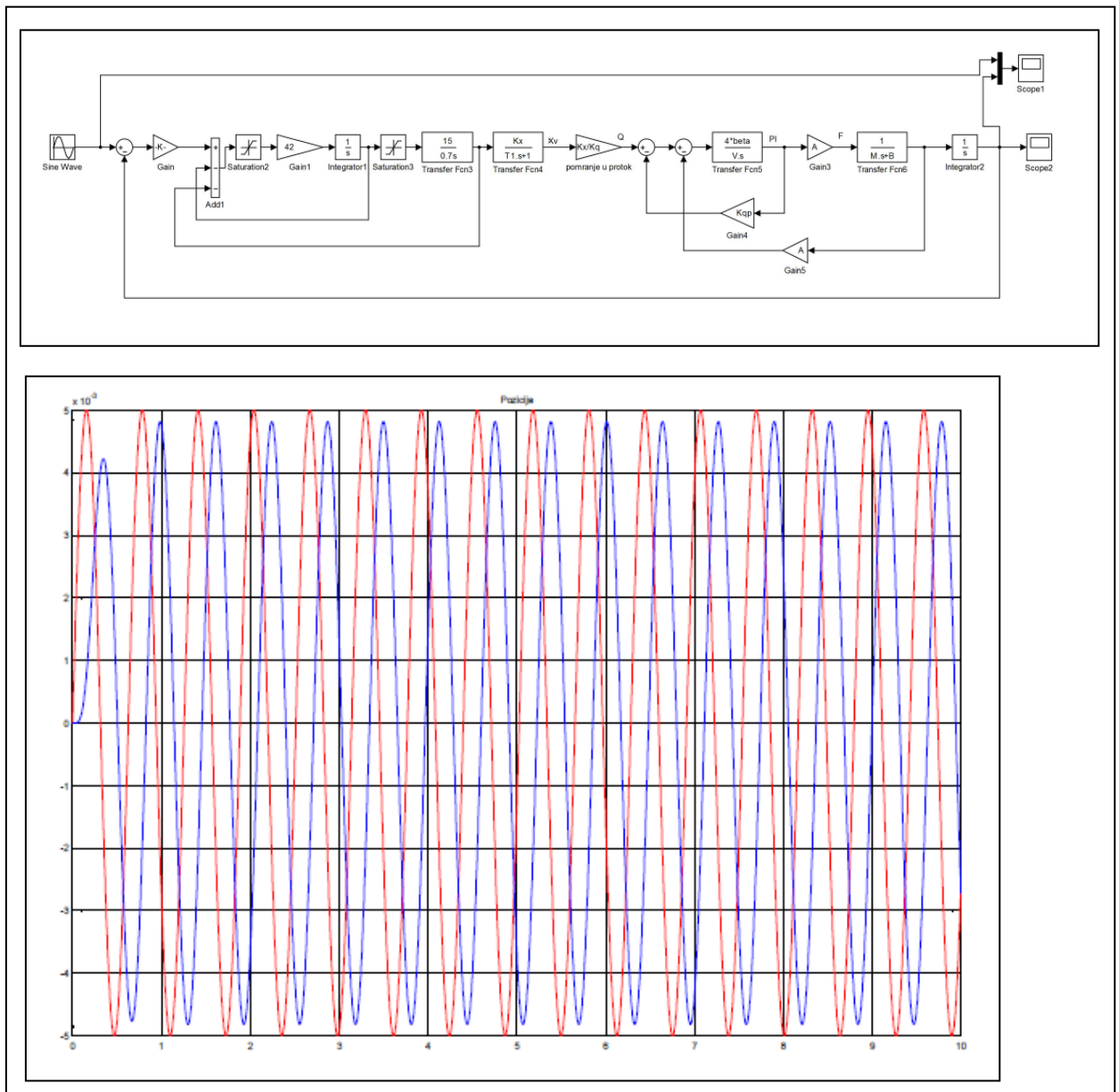


Слика 3.79-Синусни одзив усклађеног система, 3 Hz, 0.005 mm

### 3.9 Синтеза управљања за актуациони електрохидраулични систем флексибилног млазника-систематизација класичног приступа

## Прилог теорији пројектовања актуатора за управљање вектором потиска ракетног мотора са флексибилним млазником

На слици 3.80 дат је неусклађен систем, где се види јасно знатно веће фазно кашњење у актуационом систему у односу на актуациони систем са ускладником.



Слика 3.80-Синусни одзив неусклађеног система

### 3.9.4 Модификације ПИД управљачког алгоритма

Ово је настарији управљачки алгоритам. Има своју основну форму у аналогном облику али у пракси примена захтева низ модификација. У основи ПИД алгоритам има своје модификације које су неопходне за управљање процесима и за управљање актуаторима. Овде се разматра ова друга група и то оне модификације које су значајне за управљање електро хидрауличним актуационим системом где је извршни орган хидраулични цилиндар. ПИД управљачки

### 3.9 Синтеза управљања за актуациони електрохидраулични систем флексибилног млазника-систематизација класичног приступа

## Прилог теорији пројектовања актуатора за управљање вектором потиска ракетног мотора са флексибилним млазником

алгоритам се користи за релејно управљање (он-офф хидраулични разводник) који управља хидрауличним цилиндром, користи се за ширинско модулисано управљање такође када је у питању разводник са on-off управљање и за управљање пропорционалним (серво) разводницима, и то у такозваном моду задатих констатних жељених вредности и у моду праћења (у времену променљива жељена вредност), када су они заједно са електрохидрауличним делом историјски названи електрохидраулични сервомеханизми. ПИД има једноставну дефиницију, управљачко дејство је директно пропорционално разлици између задате и остварене величине којом се управља (у даљем тексту позиција), Д-диференцијално дејство је на неки начин предикција грешке, и оно генерише компоненту управљања која зависи од брзине промене грешке и И-интегрално дејство, где је управљање пропорционално дотадашњој грешци. Ово се интуитивно може назвати и алгоритмом како би човек реаговао као управљачки систем. У основи сваки ПИД алгоритам управљања има и своју нелинеарну природу, која се на различите начине уноси и манифестује у алгоритму управљања:

1. Прва нелинеарност је такозвани wind up, који се ресетује интегрално дејство. Овај феномен се касније посебно анализира када су у питању електро хидраулички актуациони системи.
2. Друга нелинеарност је везана за рачунарску реализацију управљачког алгоритма и односи се на дискретизацију по времену и по нивоу. У случајевима брзих рачунара и високе резолуције дискретизације аналогног сигнала, ова нелинеарност се може занемарити (показано у посебном поглављу где су приказане различити симулациони резултати).
3. Ако ПИД алгоритам управљања има елементе самоподешавања или адаптације параметара, математички њихова реализација уноси нелинеарну природу у ПИД алгоритам управљања.
4. Нелинеарности типа засићења су такође у ПИД управљачком алгоритму управљања, јер управљачка величина има коначну вредност.
5. Нелинеарна природа може да потиче и од директно дефинисаног закона управљања, изменом појачања и других параметара по законима нелинеарних функција зависно од тренутне грешке, односно одступања стварног излаза система у односу на жељени.

Посебна мотивација за експериментални рад у овом раду биће следећа чињеница коју је потребно експериментално истражити: интегрално понашање из управљачког алгоритма је основ за реализацију минималне особине праћења. Са друге стране, висока еластичност оптерећења може преко интегралног понашања да унесе додатне више хармонике у одзив, јер увођењем интегралног понашања мењамо пропусни опсег система преко фазног кашњења од  $-90$  степени, то јест повећавамо га. Тако да долазимо у ситуацију да ако постоје поремећаји посебно на оптерећењу актуатора у виду виших хармоника (релаксација еластичног оптерећења) да буду уведени у управљачки систем актуаторског система, што

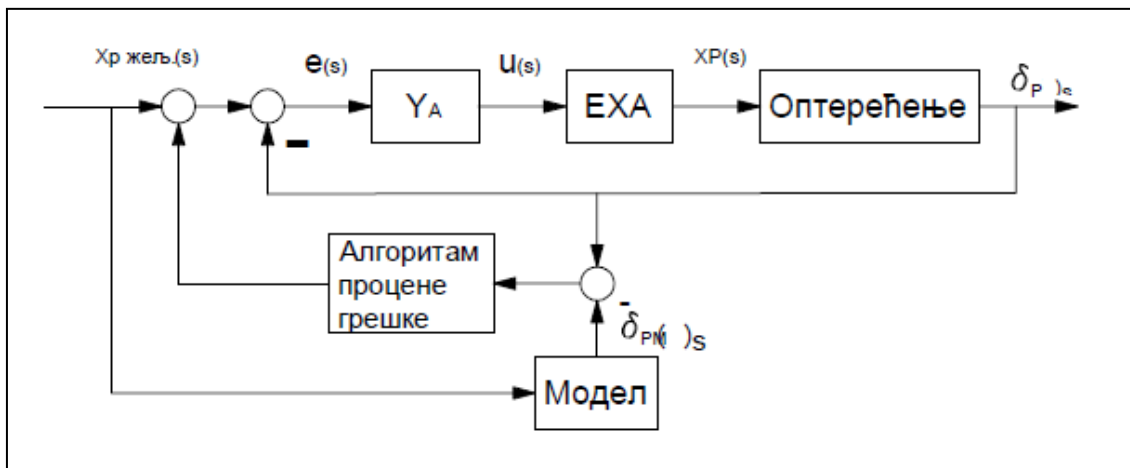
### 3.9 Синтеза управљања за актуациони електрохидраулични систем флексибилног млазника-систематизација класичног приступа



оправдава претходно посебно акцентирано, да се кроз структурну синтезу система треба да предвиде сви потребни филтери.

### 3.9.5 Алгоритамски додатак ПИД управљању ради обезбеђења дијагностике отказа у реалном времену

Основна идеја имплементације ове функције у управљачки алгоритам приказана је на слици 3.81 Зависно од реда изабраног модела и додавања логичког-експертског дела алгоритма који ће на основу карактера грешке проценити врсту и карактер отказа добија се алгоритамски додатак. Пропорционално својој сложености која одговара чињеници шта је све узето у обзир при дефинисању модела, одређује ниво квалитета дијагностике отказа у раду електрохидрауличног актуационог система. Ово је корисна могућност коју не треба пројектантски игнорисати и ослањати се само на отказе типа губитка улазно-излазних сигнала које хардверски може да препозна рачунар који реализује управљачки алгоритам. Јасно је да имплементација математичког модела захтева значајне рачунарске ресурсе у реалном времену за праћења грешке између стварне вредности израза и оне која је одређена моделом, тако да се не сме угрозити извршење управљачког дела програма. Ова опција се може користити у оној мери колико нам дозвољавају преостали рачунарски ресурси, које није искористио управљачки део алгоритма управљања.



Слика 3.81-Структура управљачког алгоритма са дијагностиком исправности актуационог система

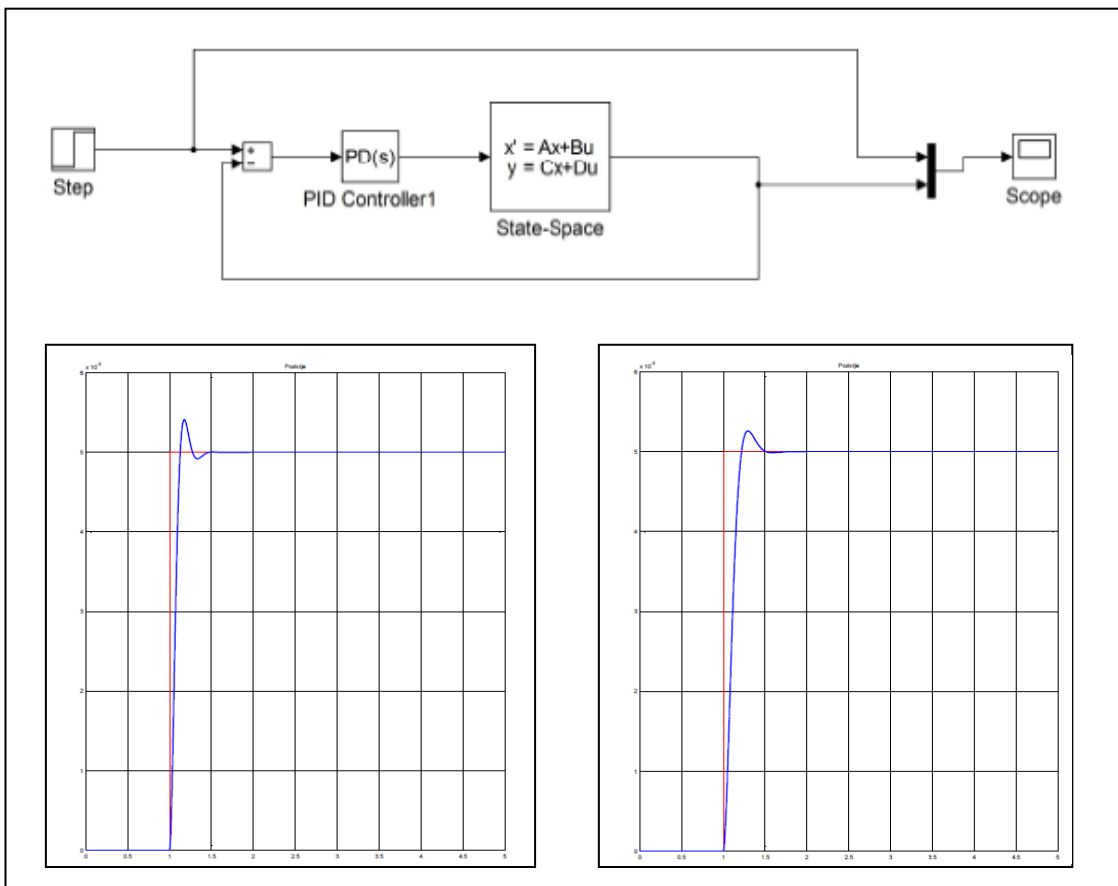
### 3.9.6 Управљање у простору стања

Јасно је из математичког модела приказаног у Прилогу 4 да постоје услови за синтезу управљања у простору стања. По дефиницији то је далеко комплетнији опис система од претходно разматраних, простор улазна-излазна величина. Као и у претходном делу о синтези система и овде се отвара питање моделоване и немоделоване динамике система, односно како смо усвојили минимални број величина стања, које дефинишу ред система и описују га потпуно и свака од њих је предмет управљачких дејстава. Регулатор стања оставља могућност и синтезе

## 3.9 Синтеза управљања за актуациони електрохидраулични систем флексибилног млазника-систематизација класичног приступа

## Прилог теорији пројектовања актуатора за управљање вектором потиска ракетног мотора са флексибилним млазником

потпуног или непотпуног обсервера. Ово може бити посебно корисно ако располажемо добрим моделом тако да угао закретања млазника процењујемо преко обсервера и тако добијемо величину коју тражимо а нисмо у прилици да је адекватно меримо. Аутор овог рада је посебно разматрао пројектовање обсервера за електрохидраулични актуациони систем у свом магистарском раду [51], где су прецизнио наведена сва ограничења која у пракси отежавају синтезу управљања са структуром обсервера, која се овде не наводе због обимности а на основу којих је направљен генерални закључак да је у пракси врло тешко реализовати алгоритамску структуру са коришћењем једначина које описују динамичко понашање обсервера. Матлаб у својим задњим верзијама нуди опцију аутоматског пројектовања регулатора стања, када се дефинишу матрице  $A, B, C$  и  $D$ , што је веома корисно при пројектовању актуатора, тако што се добија одзив система и параметри ПД алгоритма у складу са алгоритмом подешавања и оптимизације који је дефинисан у Матлабу. Ово нам у симулационом смислу може бити референца за перформансе актуационог система са дефинисаним математичким моделом.



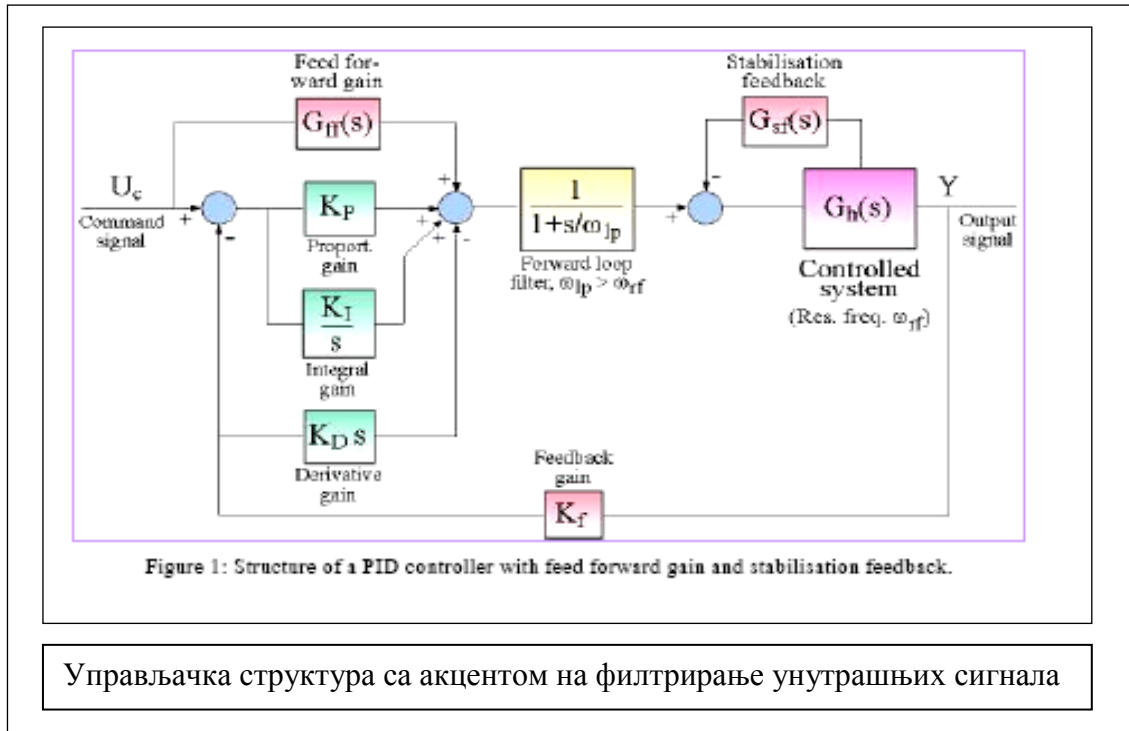
**Слика 3.82-Симулациони модел и одзив за управљање у простору стања са ПД алгоритмом дијаграм лево и П алгоритам слика десно**

Са слике 3.82 види се да није могуће избећи прескок у одзиву актуационог система са регулатором стања и то је чињеница која га не препоручује за управљање флексибилним млазником.

### 3.9 Синтеза управљања за актуациони електрохидраулични систем флексибилног млазника-систематизација класичног приступа

### 3.9.7 Идеална ПИД структура за хидрауличне актуационе системе

На слици 3.83 је приказана структура за управљачки алгоритам који је узео у обзир све специфичности електрохидрауличног актуационог система [33], које су претходно разматране и пре свега оне које се односе на филтрацију сигнала.



Слика 3.83-Општа структура електро-хидрауличног система [21]

До управљачке структуре на слици горе, долази се у синтези управљања постепено, тако што ће се ПИД управљање структурно анализира у свим варијантама за које има оправдања у актуационим системима.

### 3.10.7 ПИД управљачки алгоритам-облици за рачунарску имплементацију

Облици ПИД алгоритма за рачунарску имплементацију могу се одредити на више начина. Прво, могућа је директна синтеза дигиталног ПИД регулатора. Ово се ређе примењује, зато што је у аналогном домену, може се доста тога подесити и проверити и онда је само тај аналогни запис ПИД-а потребно пребацити у дискретну форму која одговара рачунарској имплементацији. Директна дигитална синтеза ПИД форме се користи онда када је ограничена брзина управљачког рачунара, како би се избегао утицај на тачност управљања вредности периоде одабирања.

Први приступ је преко три главна облика дискретизације диференцијалног и интегралног дејства, једначине (3.299)-(3.313). Значи директна дискретизација диференцијалне једначине ПИД-а и њено превођење у диференцијални облик. Други начин, који је обезбеђен и софтверским алатима (пре свега Матлаб) преко неке од метода користећи Z трансформацију. Различите трансформације, различити

### 3.9 Синтеза управљања за актуациони електрохидраулични систем флексибилног млазника-систематизација класичног приступа

**Прилог теорији пројектовања актуатора за управљање вектором потиска ракетног мотора са флексибилним млазником**

резултати. Закључак је једноставан, све методе за добијање дискретног записа управљања су приближне и не могу се добити индентични резултати са две различите методе, али одступања нису таква да избор методе радикално утиче на квалитет дефинисаног управљања. Овде се даје препорука за следећу примену Z трансформације која се дефинише као:

$$z = e^{sT} \quad (3.296)$$

На основу претходног може се вредност за s домен написати у облику:

$$s = \frac{1}{T} \ln z \quad (3.297)$$

Апроксимација за s првог реда је:

$$s = \frac{2z - 1}{Tz + 1} \quad (3.298)$$

Претходну вредност за s треба заменити за преносну функцију управљачког система, ПД, ПИ и ПИД и тада добијамо директно диференцну једначину за рачунарску имплементацију у следћемо облику: (даје се пример преко ПИ управљачког алгорита записаног у облику)

Директно диференцирање и директна интеграције се могу извести на три начина, зависно од технике дефинисања коначних разлика:

$$\frac{e(k) - e(k-1)}{T} \text{ - диференцирање уназад} \quad (3.299)$$

$$\frac{e(k+1) - e(k)}{T} \text{ - диференцирање унапред} \quad (3.300)$$

$$\frac{e(k+1) - e(k-1)}{2T} \text{ - централно диференцирање} \quad (3.301)$$

$$Te(k-1) \text{ - интеграљење уназад по претходној вредности} \quad (3.302)$$

$$Te(k) \text{ - интеграљење унапред} \quad (3.303)$$

$$\frac{T}{2} [e(k) + e(k-1)] \text{ - трапезно правило интеграције} \quad (3.304)$$

На основу претходног, може се дефинисати ПИ-позициони и брзински алгоритам управљања који могу бити написани у следећем облику:

$$u(k) = K_p e(k) + s(k) \quad (3.305)$$

**3.9 Синтеза управљања за актуациони електрохидраулични систем флексибилног млазника-систематизација класичног приступа**

**Прилог теорији пројектовања актуатора за управљање вектором потиска ракетног мотора са флексибилним млазником**

$$s(k) = s(k-1) + K_i \frac{T}{2} [e(k) + e(k-1)] \quad (3.306)$$

Претходни запис у два реда је неопходан како би се дати закон управљања могао правилно имплементирати у софтвер.

$$u(k) - u(k-1) = K_p [e(k) - e(k-1)] + K_i \frac{T}{2} [e(k) + e(k-1)] \quad (3.307)$$

За потребе програмирања претходни израз се може написати у следећем облику:

$$u(k) - u(k-1) = (K_p + K_i \frac{T}{2})e(k) + (K_i \frac{T}{2} - K_p)e(k-1) \quad (3.308)$$

Комплетан ПИД се према трапезном правилу за интегрално дејство и додатом коначном разликом за Д-дејство може записати у следећем облику:

$$u(k) = K_p e(k) + s(k) + \frac{K_d}{T} [e(k) - e(k-1)] \quad (3.309)$$

$$s(k) = s(k-1) + K_i \frac{T}{2} [e(k) + e(k-1)] \quad (3.310)$$

ПИД у брзинском облику се може записати као:

$$u(k) = u(k-1) + K_p [e(k) - e(k-1)] + K_i \frac{T}{2} [e(k) + e(k-1)] + \frac{K_d}{T} [e(k) - 2e(k-1) + e(k-2)] \quad (3.311)$$

Могућа је и следећа модификација када се интегрално дејство примени само на текућу вредност грешке:

$$u(k) = u(k-1) + K_p [e(k) - e(k-1)] + K_i \frac{T}{2} e(k) + \frac{K_d}{T} [e(k) - 2e(k-1) + e(k-2)] \quad (3.312)$$

За варијанту када смо само интегрално дејство оставили у главној грани, а пропорционално и интегрално пребацили у повратну грану, И-ПД алгоритам се у дискретној форми може записати као:

$$u(k) = u(k-1) + K_p [x_p(k) - x_p(k-1)] + K_i T [x_{iz}(k) - x_p(k-1)] + \frac{K_d}{T} [-x_p(k) + 2x_p(k-1) - x_p(k-2)] \quad (3.313)$$

### **3.9.8 Каскадно управљање-адекватна структура за управљање хидрауличним актуатором за флексибилни млазник**

#### **Унутрашња и спољашња контура управљања**

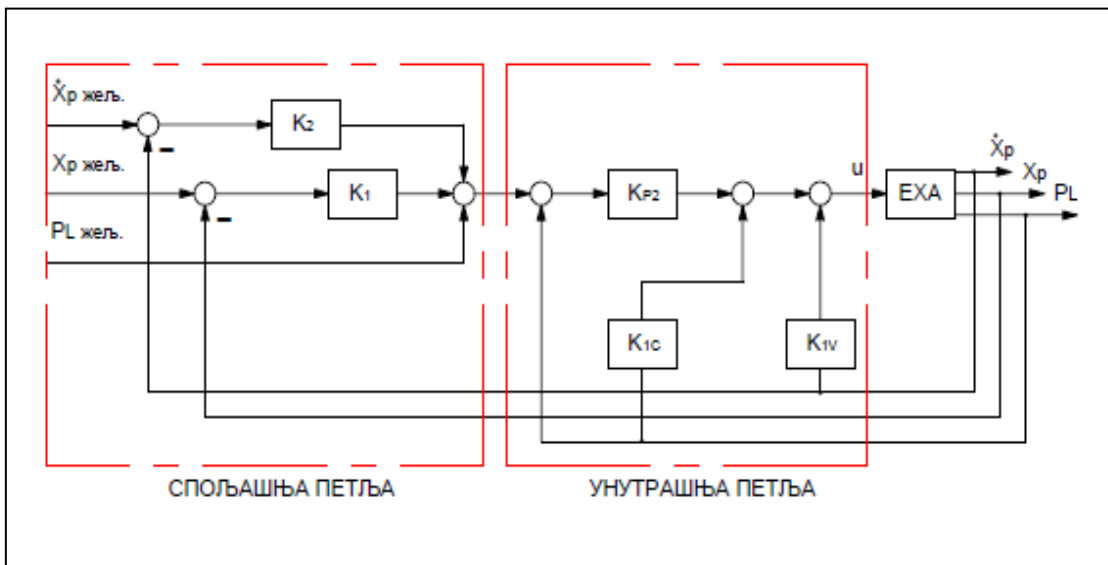
Ова структура је нешто између онога што се добија приликом синтезе система у простору улаз-излаз и у простору стања. Негде се ова структура у литератури

### **3.9 Синтеза управљања за актуациони електрохидраулични систем флексибилног млазника-систематизација класичног приступа**

## Прилог теорији пројектовања актуатора за управљање вектором потиска ракетног мотора са флексибилним млазником

дефинише као структура која је идеална у случајевима када постоји једна управљана величина и више мерених. У сваком случају ово је један од ретких суштинских новина у технологији управљања електро хидрауличним актуаторима у задњих 20 година.

Основа ове идеје је да спољна контура управљања буде позициона, а унутрашња контура управљања да буде по сили. Јасно је да су промене по сили односно убрзању знатно брже од промене позиције, јер је позиција репрезент стања система када промена силе изазове еластичне промене у кинематици оптерећења, пре стварне промене позиције, што је успорило промену позиције у односу на промену силе. Управљање силом у унутрашњој контури знатно поправља квалитет позиционирања [29]. У том смислу посебно је важна и особина разводника, која је дефинисана као појачање по притиску јер се на тај начин обезбеђује, у оквиру хидрауличног хардвера, брза промена активне силе на актуатору. Код управљања флексибилним млазником у идеалном случају имамо еластично оптерећење пропорционално ходу клипњаче цилиндра, а у стварном, ова промена је изразито нелинеарна. Јасно је да је каскадно управљање боља опција од предикције по поремећају, односно ове врсте поремећаја су тешко мерљиве у пракси, да би се могли ослонити на feed-forward по поремећају што је класичан приступ при пројектовању управљања за процесе. Структурни дијаграм актуационог система са унутрашњом и спољашњом контуром управљања приказан је на слици 3.84 и 3.85 и симулациони резултати на слици 3.86.



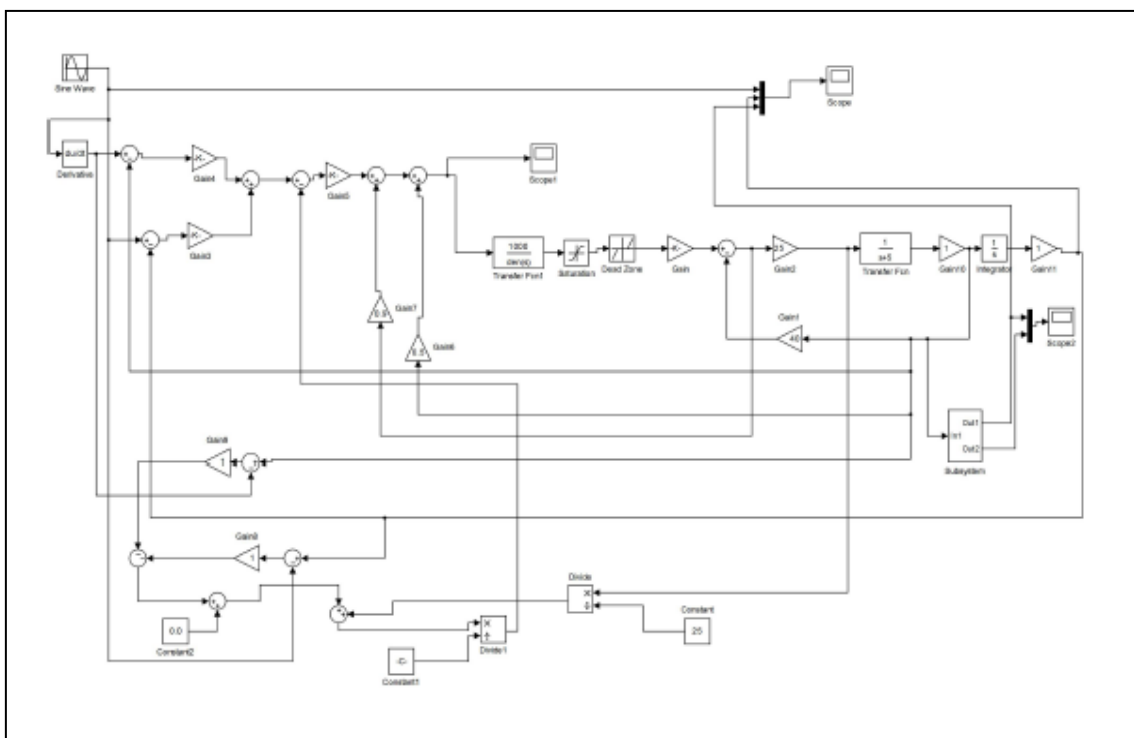
Слика 3.84—Структурни дијаграм управљања актуатора-каскадна структура

По дефиницији каскадно управљање је погодно за хидраулични актуациони систем. Јасно је са слике 3.84 да структура по дефиницији не даје никакве препоруке при избору управљања али све претходно поменуто за ПИД варијанте управљачког закона се могу применити при реализацији каскадног управљања. Симулациони структурни дијаграм приказан је на слици 3.85 који је дефинисан према слици 3.84 а симулациони резултати приказани су на сликама 3.86 и 3.87. Симулација је урађена за оптерећен актуатор, модел са функцијом Look up, на

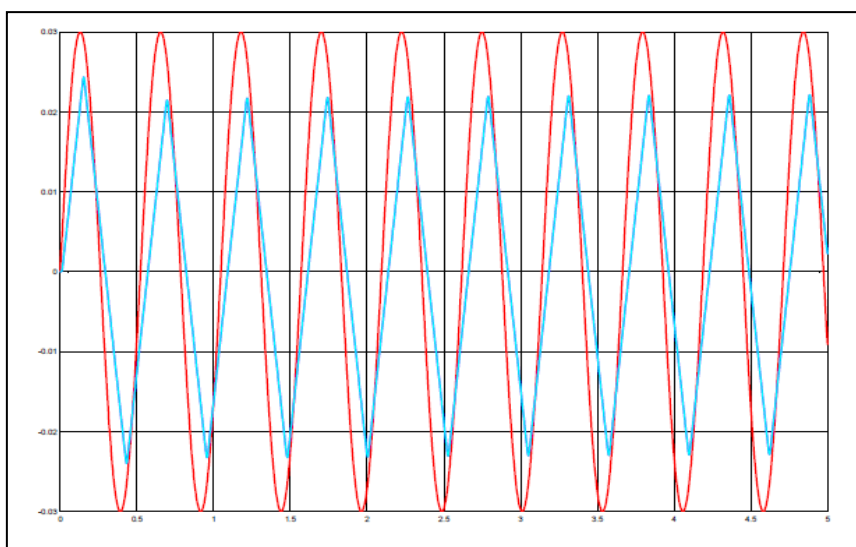
### 3.9 Синтеза управљања за актуациони електрохидраулични систем флексибилног млазника-систематизација класичног приступа

## Прилог теорији пројектовања актуатора за управљање вектором потиска ракетног мотора са флексибилним млазником

основу података са дијаграма. Подаци су били такви, да је морала да се користи већа амплитуда улазног сигнала која је на тај начин усклађена са стварним експерименталним подацима, како би се добио прихватљив симулациони одзив, 0.030 m. Експериментални подаци који су унети у Look up функцију снимљени су на динамичкој кидалици са реалним ходовима од 0.030 m.

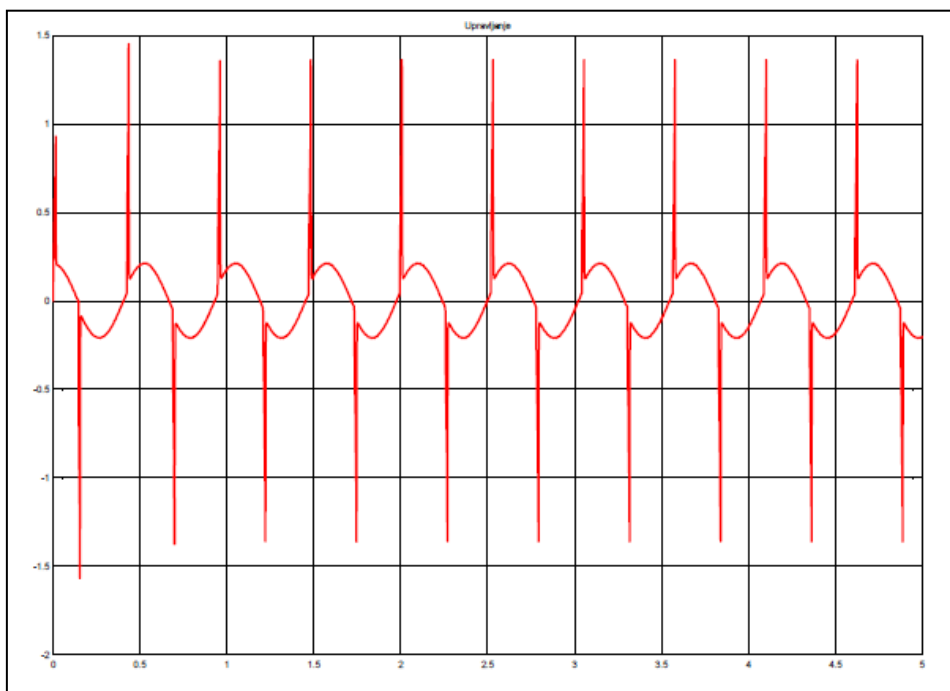


Слика 3.85–Симулациона структура за управљање актуатором-каскадна конфигурација



Слика 3.86–Одзив система за каскадну конфигурацију управљања на синусну промену жељене вредности позиције

### 3.9 Синтеза управљања за актуациони електрохидраулични систем флексибилног млазника-систематизација класичног приступа



Слика 3.87–Карактер управљања за каскадну конфигурацију управљања на синусну промену жељене вредности позиције



#### 4.1 Утицај конструкције ракете на избор основних параметра актуатора за управљање и дефиниција механичких карактеристика актуатора у почетној фази пројектовања

После основног димензионисања актуаторског система које узима у обзир захтеване статичке силе, брзину оптерећеног и неоптерећеног актуатора, профил притиска у коморама актуатора, расположиви простор за уградњу, тежину актуаторског склопа, као и енергетске ресурсе за напајање, изабрана актуаторска конфигурација постаје предмет посебних нових анализа. За те анализе, почетни податак је сопствена фреквенција актуаторског система, то јест пропусни опсег актуационог система за одређен управљачки орган. Ствар се може и упростити, пре свега потребно је знати сопствену фреквенцију склопа цилиндар-оптерећење на основу које се лако може одредити односно претпоставити сопствена фреквенција комплетне актуаторске конфигурације и пропусни опсег. Сопствену фреквенцију склопа актуатор-оптерећење можемо лако одредити и пре израде детаљног математичког модела комплетне актуаторске конфигурације. У посебном одељку је показано на који начин сопствена фреквенција електрохидрауличног разводника и цилиндра посебно, то јест однос ове две фреквенције, може да буде критеријум за адекватан избор алгоритма управљања.

На нивоу почетног, концептуалног пројектовања ракете, потребно је паралелно знати и основне особине актуаторског система (пре свега пропусни опсег односно сопствену фреквенцију), како би се могло проверити да ли динамика актуационог система може да наруши стабилност кретања ракете којом актуациони систем управља у оквиру изабране почетне аеродинамичке шеме.

#### Критеријуми за процену интеракције актуатор ракете

Неспорна нелинеарна природа хидрауличног актуатора по више различитих критеријума утиче на стабилност кретања ракете (главни нелинеарни елементи су засићење разводника по протоку и извршног органа цилиндра по ходу). На слици 4.1 је приказан блок дијаграм система са јединичном динамиком актуационог система и преносном функцијом где је улаз отклон органа управљања, а излаз нападни угао. Ако сада унесемо у исту структурну шему нелинеарност типа зоне неосетљивости и засићења извршног дела актуатора, слика 4.2, у разматраном случају то је хидраулични цилиндар, добијамо један врло груб опис нелинеарне природе актуатора и њен утицај на стабилност изабраног кретања ракете. Систем је нелинеаран, и за његово решавање потребно је применити неку од приближних метода, у овом случају идеално је применити хармонијску линеаризацију. У зависности од величине зоне неосетљивости и засићења, добијамо различите резултате за стабилност система према величинама управљачких амплитуда. Добијају се вредности амплитуда улазног сигнала за које систем није стабилан, што је у овом случају веома важно, јер оне морају бити избегнуте односно филтриране у синтези управљања актуатором односно у синтези управљања кретањем ракете (кретање тежишта и стабилизација око тежишта). Преносна функција, улаз, отклон управљачког органа а излаз нападни угао ракете обухватила је у почетној фази развоја основне елементе конструкције, израз (4.1).

4.1 Утицај конструкције ракете на избор основних параметра актуатора за управљање и дефиниција механичких карактеристика актуатора у почетној фази пројектовања

**Прилог теорији пројектовања актуатора за управљање вектором потиска ракетног мотора са флексибилним млазником**

$$W_{\delta}^{\alpha}(s) = \frac{KW_{\delta}^{\alpha}(s)}{1 - K_{\alpha}W_{\delta}^{\alpha}(s)}, \text{ где је } W_{\delta}^{\alpha}(s) = \frac{M_z^{\delta_p}(s)}{\Delta(s)} \quad (4.1)$$

Општа једначина за кратко периодично кретање ракете је:

$$s^2 + 2\xi\omega s + \omega^2 - M_z^{\delta}K_{\alpha} = 0 \quad (4.2)$$

Услов стабилности је јасно видљив из претходне једначине:

$$\omega^2 - M_z^{\delta}K_{\alpha} > 0 \text{ односно } K_{\alpha} > \frac{\omega^2}{M_z^{\delta_p}} \quad (4.3)$$

Јасно је да се разматра пример пропорционалног линеарног управљања:

$$\delta_p = K_{\alpha}\Delta\alpha \quad (4.4)$$

Много тачнија и кориснија информација о утицају актуаторског система на динамику ракете је приказана на структурној шеми, на слици 4.3, где је узета доминантна интегрална природа актуаторског система заједно са нелинеарном природом управљачког разводника.

Увођењем описне функције преко Фуријевог реда, добијамо нови члан у једначини (4.2) који је унео комплексно појачање после линеаризације:

$$K(\varepsilon) = \frac{1}{\pi A_{\varepsilon}} \int_0^{2\pi} F(\varepsilon) \sin \theta d\theta \quad \varepsilon = A_{\varepsilon} \sin \theta \quad (4.5)$$

Карактеристични полином затвореног система је приказан у следећој једначини:

$$s^2 + 2\xi\omega s + \omega^2 - M_z^{\delta}K_{\alpha}K_{\varepsilon} = 0 \quad (4.6)$$

На дијаграму се јасно види да вредност  $\Delta$  утиче на стабилност, односно када је

$$K(\varepsilon) = 0 \text{ систем је нестабилан. Ако је } A_{\varepsilon} > A_{\varepsilon_1} \text{ односно ако је } K(\varepsilon) > \frac{\omega^2}{M_z^{\delta_p}K_{\alpha}},$$

кретање ракете управљане по нападном углу је стабилно. Поред ове маргине постоји и друга маргина, која показује за које амплитуде улазног сигнала систем постаје поново нестабилан:

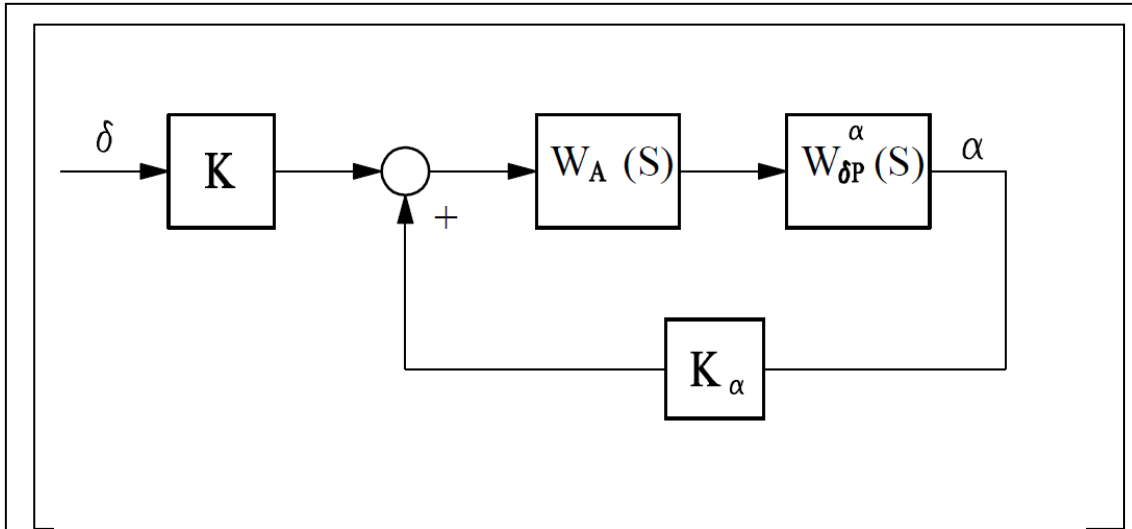
$$A_{\varepsilon} < A_{\varepsilon_1} \quad (4.7)$$

$$K(\varepsilon) < \frac{\omega^2}{M_z^{\delta_p}K_{\alpha}} \quad (4.8)$$

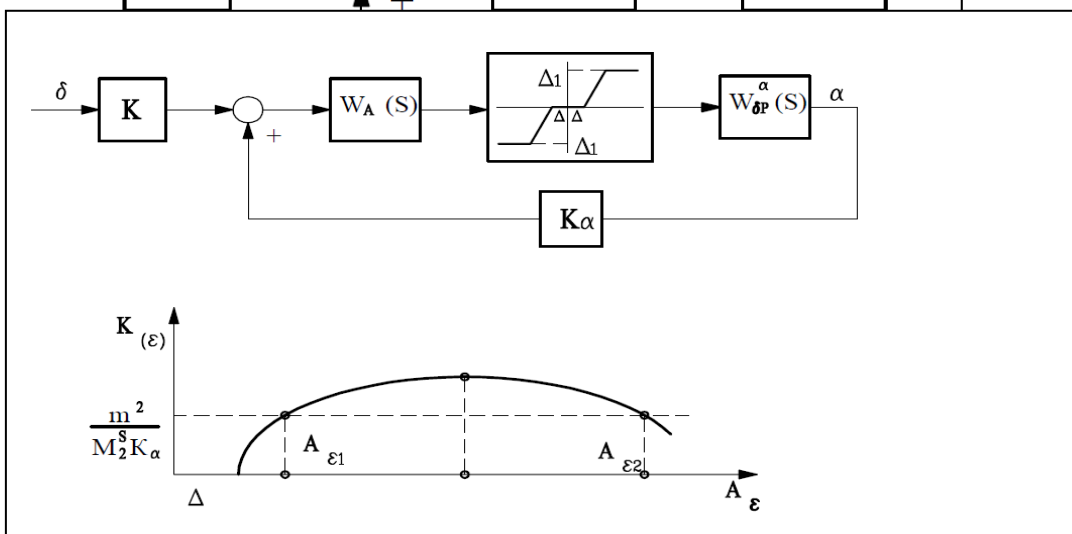
Претходно описано је део пројектне процедуре који одређује утицај најзначајније нелинеарне природе актуаторског система на стабилност кретања ракете. Све

**4.1 Утицај конструкције ракете на избор основних параметра актуатора за управљање и дефиниција механичких карактеристика актуатора у почетној фази пројектовања**

остале нелинеарности које ће се касније истраживати немају овако драстичан утицај на управљање кретањем ракете.



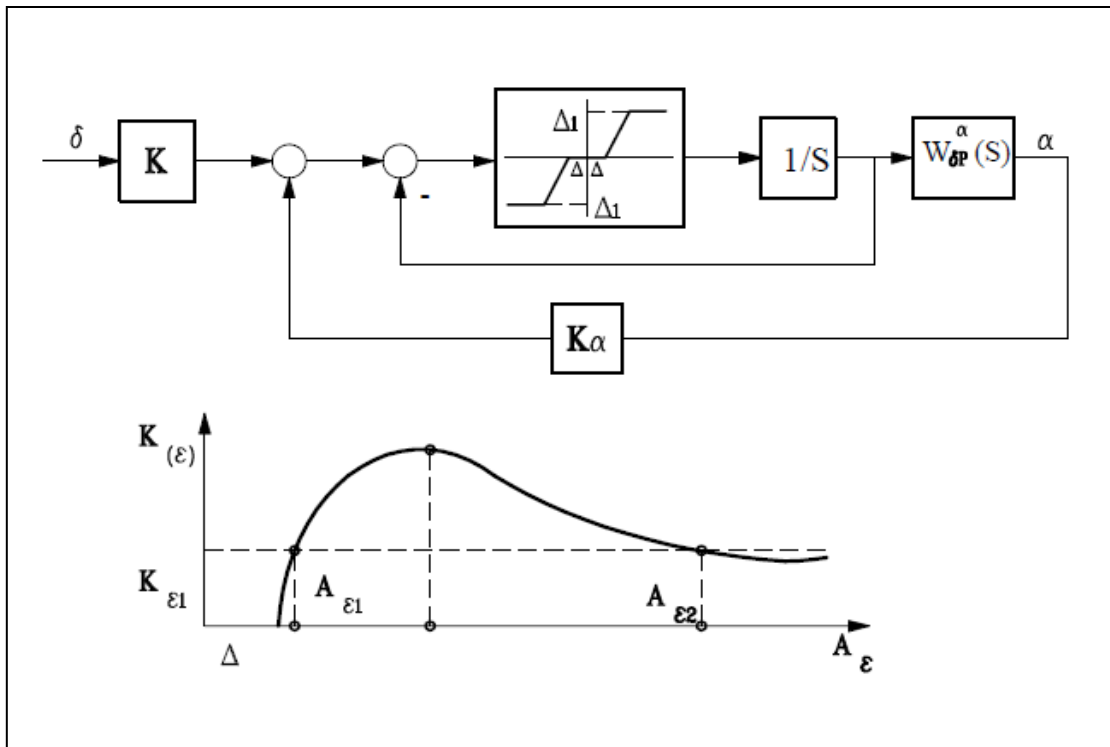
Слика 4.1 Структурна шема управљања кретањем ракете по нападном углу са јединичном динамиком актуационог система [89]



Слика 4.2 Структурна шема управљања ракетом по нападном углу са идеалним приказом нелинеарне природе актуационог система[89]

Анализа се понавља на сличан начин као и претходно користећи хармонијску линеаризацију, и сада добијамо тачнију информацију на којим вредностима амплитуде улазног сигнала губимо стабилност кретања ракете, у овом случају одржавање нападног угла.

#### 4.1 Утицај конструкције ракете на избор основних параметра актуатора за управљање и дефиниција механичких карактеристика актуатора у почетној фази пројектовања



Слика 4.3 Структурна шема управљања ракетом са унетом нелинеарном и интегралном природом актуационог система [89]

Интегрална природа хидрауличног цилиндра као извршног органа актуационог система показује се елегантно математички на следећи начин:  
Пропорционално померању клипа хидро цилиндра може се приказати и померање управљачког органа је

$$A * \frac{dx}{dt} = v * \frac{d\delta_p}{dt} \quad (4.9)$$

$v$  – се дефинише као промена запремине цилиндра при кретању клипа при отклону органа управљања за јединицу угла  $\delta_p$

$$v = \frac{dx}{d\delta} = \frac{A}{i_p} \quad (4.10)$$

Јасно је да овде дефинишемо:

$$i_p = \frac{d\delta}{ds} \quad (4.11)$$

На основу претходно написаног,

**4.1 Утицај конструкције ракете на избор основних парамастра актуатора за управљање и дефиниција механичких карактеристика актуатора у почетној фази пројектовања**

**Прилог теорији пројектовања актуатора за управљање вектором потиска ракетног мотора са флексибилним млазником**

$$Q = Q_{\max} * \bar{x}_v = v * \frac{d\delta}{dt} \quad (4.12)$$

Ако узмемо максимално, бездимензионално померање за разводни клип, 100 % (4.9), добијамо:

$$Q_{\max} = v * \dot{\delta}_{\max} \quad (4.13)$$

и

$$\frac{d\delta}{dt} = \dot{\delta}_{\max} \bar{x} \quad (4.14)$$

Из претходне једначине директно добијамо преносну функцију хидрауличног цилиндра:

$$W(s)_{cil} = \frac{\delta(s)}{\bar{x}(s)} = \frac{\dot{\delta}_{\max}}{s} \quad (4.15)$$

У посебном поглављу изводе се детаљни математички модел хидрауличног актуационог система, са узимањем пре свега у обзир компресибилности флуида и оптерећења.

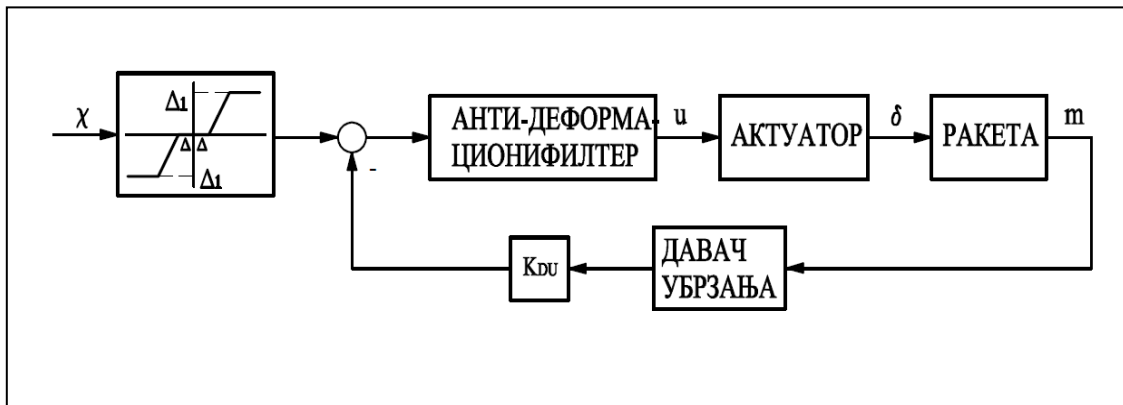
После стабилности кретања, други важан критеријум који говори о подобности претходно дефинисане актуаторске конфигурације за ракету су тонови првог и другог мода еластичног осциловања ракете. (ракета се посматра као проста греда). Јасно је да фреквенција првог и другог тона не смеју бити блиске, сопственој фреквенцији актуационог система. Ако имамо случај да су ове фреквенције блиске неопходно је на другачији начин димензионисати актуациони систем, како би се по овом критеријуму актуациони систем уклопио у конфигурацију ракете. Динамичко понашање ракете се поправља тако што се изима у обзир чињеница да ракета није круто већ еластично тело и чињеница да је ограничена снага актуационог система. Посебно се наглашава чињеница да се ракета на један начин понаша као еластично тело ако је побуда изведена аеродинамичким управљачким органима; да се на други начин понаша ако је побуда изведена гасодинамичким моментним управљањем (где спада и флексибилни млазник) и да се на трећи начин понаша када је побуда изведена гасодинамичким попречним управљањем (технологија са малим импулсним моторима који се налазе у телу ракете нормално на уздужну осу ракете).

Угаона брзина ракете се у претходно описаним случајевима је: [88]

**Прилог теорији пројектовања актуатора за управљање вектором потиска ракетног мотора са флексибилним млазником**

$$\omega(s) = - \left\{ -K_p \frac{1+T_1s}{1+2\xi_p T_p s + T_p^2 s^2} + \sum_{i=1}^2 \frac{s(k_{i1} + k_{i2}s^2)}{1+2\xi_i T_i s + T_i^2 s^2} \right\} \delta(p) + \left\{ K_{p1} \frac{1+T_1s}{1+2\xi_p T_p s + T_p^2 s^2} + \sum_{i=1}^2 \frac{k_{i3}s}{1+2\xi_i T_i s + T_i^2 s^2} \right\} n(p) + \left\{ \frac{K_{p2}}{1+2\xi_p T_p s + T_p^2 s^2} + \sum_{i=1}^2 \frac{k_{i4}s}{1+2\xi_i T_i s + T_i^2 s^2} \right\} \sigma(s) \quad (4.16)$$

Утицај еластичности ракете, врло често се у пракси компензује на један од следећа на два начина. Први је да се давачи аутопилота измештају из блока аутопилота на најповољнија места на структури ракете која трпе мањи утицај од еластичних осцилација у односу на еластичну линију. Други начин је постављање филтера који ће из сигнала повратних веза филтрирати фреквенције које су резултат еластичног понашања и на тај начин смањити утицај еластичности на квалитет управљања. Јасно је да постоји и трећи начин који подразумева повећање крутости тела ракете који одмах по дефиницији значи и повећавање тежине што се у сваком пројектовању избегава ако се проблем може решити на прва два претходно описана начина. Структурно, утицај еластичности је приказан на слици 4.4



**Слика 4.4 Структурна шема са система за стабилизацију са филтером за хармонике од еластичности ракете**

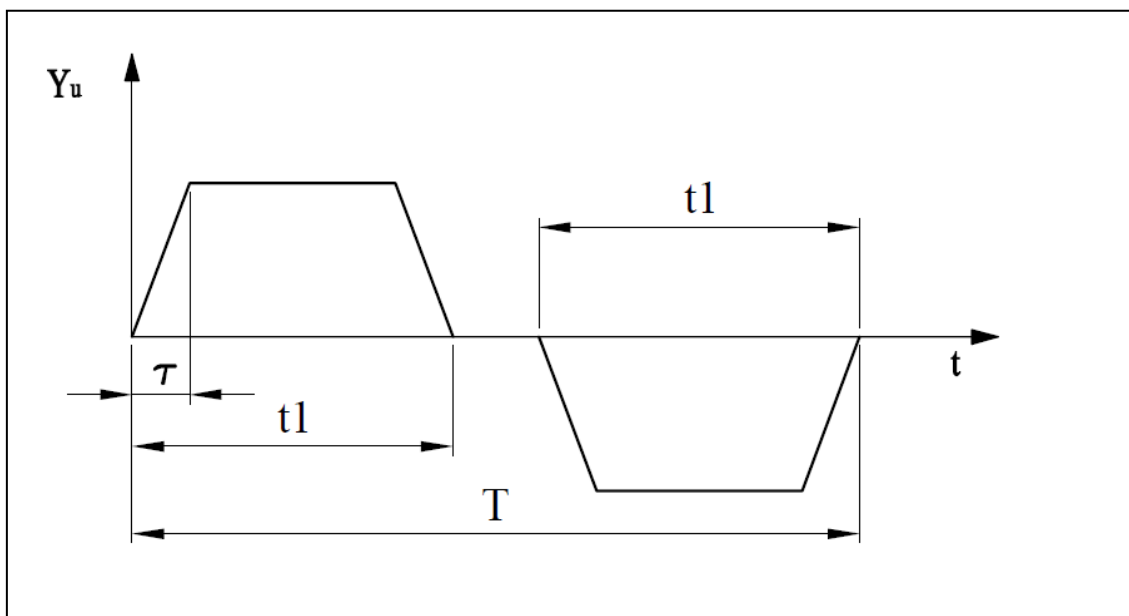
Трећи врло важан критеријум који потврђује почетно димензионисање актуационог система је чињеница да ли је ракета статички стабилна или не. За статички стабилне ракете лимитирана је динамика односно сопствена фреквенција актуационог система нижим вредностима, а за статички нестабилне ракете, сопствена фреквенција актуаторског система може бити знатно већа. Другим речима за статички нестабилну ракету потребан је два до три пута бржи актуациони систем него за статички стабилну за исто време реакције за промену жељеног елемента кретања.

**4.1 Утицај конструкције ракете на избор основних параметра актуатора за управљање и дефиниција механичких карактеристика актуатора у почетној фази пројектовања**

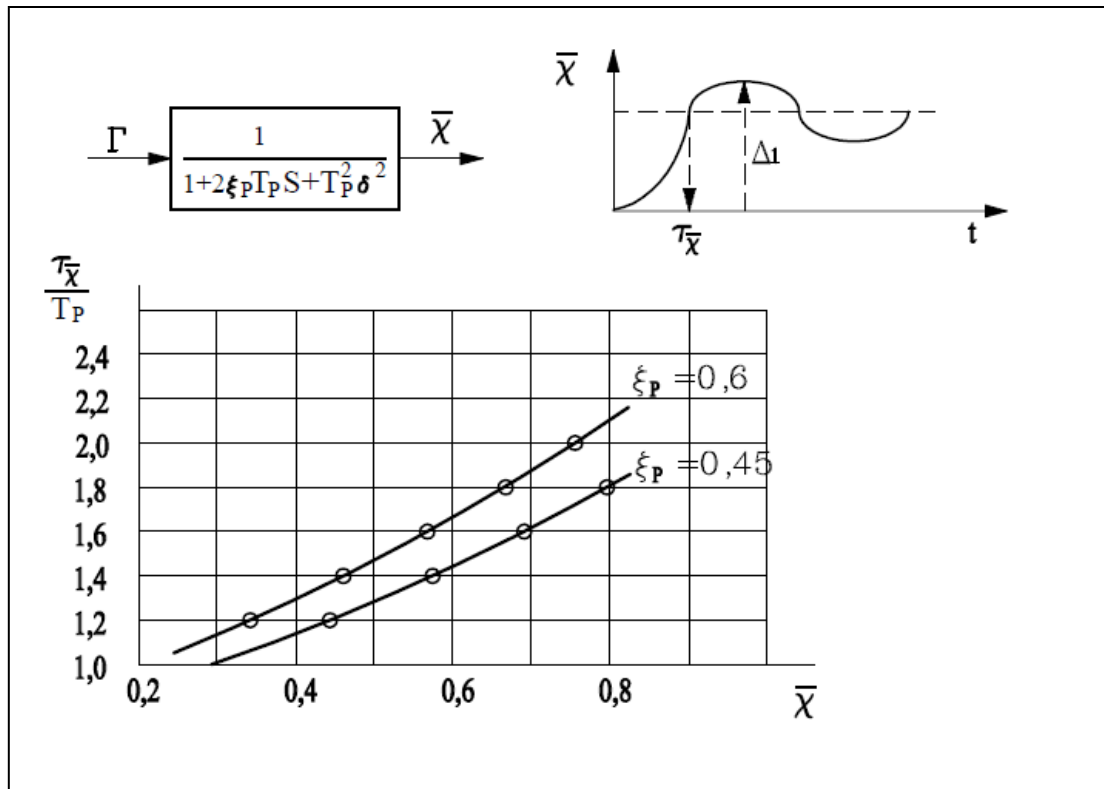
Степен статичке стабилности односно нестабилности се практично одређује у почетној фази пројектовања ракете. Овај параметар, како се касније показује у (4.52) има значајан утицај на сопствену фреквенцу ракете.

Када се провере ова три критеријума, конструктори ракете настављају после почетне фазе дефинисања ракете, развој конструкције, а конструктори актуационог система настављају развој актуатора у оквиру претходно потврђене динамике преко сопствене фреквенције која диктира и пропусни опсег актуационог система.

Претходно дефинисано приказује да је у почетној фази конструисања ракете, потребно дефинисати почетне параметре актуационог система и проверити како се уклапају у динамику ракете то јест објекта којим ће као извршни органи управљати. Овде је врло важно следеће. На слици 4.5 је приказан типски дијаграм управљања за ракету.[88] Време  $\tau$ , односно време постизања управљачке силе и време нестанка управљачке силе, је главни временски параметар у оцени квалитета управљања и оно се може израчунати са дијаграма чији је тип приказан на слици 4.6 Ова провера, да ли изабрани актуаторски систем одговара жељеном концепту ракете и обратно, заснива се на следећој једноставној математичкој процедури која на крају резултира стварањем дијаграма (модел приказан на слици 4.7), где апсцисна оса, представља вредност коефицијента који карактерише ефикасност органа управљања, а ордината показује вредности сопствене фреквенције актуационог система.



Слика 4.5-Типски дијаграм за управљачку силу [88]



Слика 4.6-Параметри управљачке силе [88]

Основна једначина за примену овог критеријума је:

$$J_{z_1} \ddot{\vartheta} = Y(l_{cm} - l_{cp}) + Y_u(l_u - l_{cm}) \quad (4.17)$$

$$Y(l_{cm} - l_{cp}) = M_{z_1} = m_{z_1}^\alpha \alpha \quad (4.18)$$

Први члан у једначини (4.17) је аеродинамички статички момент, а други је управљачки момент.

Управљачки момент је:

$$Y_u(l_u - l_{cm}) = M_{z_1} = m_{z_1}^\delta \delta \quad (4.19)$$

Једначину (4.3) можемо сада записати у облику:

$$\ddot{\vartheta} = a_1 \alpha + a_2 \delta \quad (4.20)$$

где је:

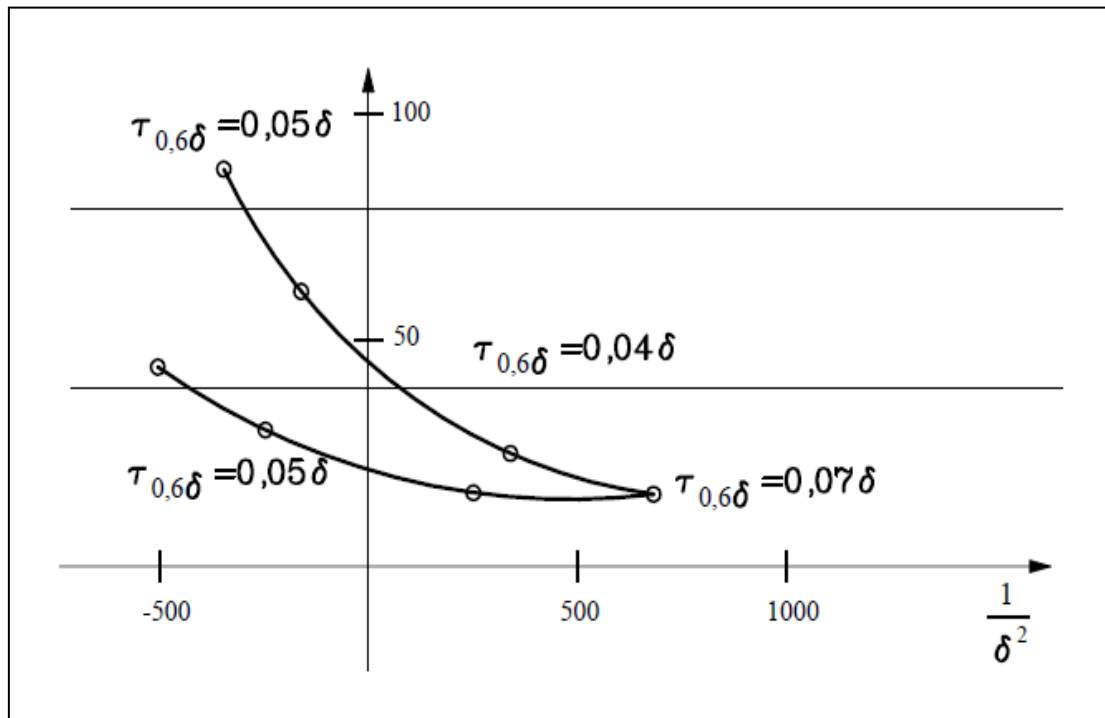
$a_1 = \frac{M_{z_1}^\alpha}{J_{z_1}}$  -коэффициент који карактерише статичку стабилност ракете

$a_2 = \frac{M_{z_1}^\delta}{J_{z_1}}$  -коэффициент који карактерише ефикасност органа управљања

Временске константе за управљачка дејства су приказане на слици 4.7.

**4.1 Утицај конструкције ракете на избор основних параметра актуатора за управљање и дефиниција механичких карактеристика актуатора у почетној фази пројектовања**





Слика 4.7-Графички приказ динамике управљачког дејства [88]

Управљана ракета је динамички стабилна, ако се њено угаоно кретање реализује под дејством два момента, аеродинамичког и управљачког. Управљачки треба да компензује аеродинамички, и тако омогући кретање по жељеној путањи. Само ако би се поклопило тежиште ракете и центар потиска, што је у пракси готово немогуће, ако не из других разлога онда из чињенице да се положај тежишта мења у функцији потрошње горива, имали би ситуацију да не постоји компонента управљачког момента за компензацију аеродинамичког момента, односно не би требало балансирати лет.

Горе наведено је универзални приступ, који не разматра тип управљачког органа. Пошто је предмет овог рада, управљање вектором потиска флексибилним млазником, где имамо случај еластичног оптерећења које драстично снижава сопствену фреквенцију актуаторског система, потребно је у почетним фазама пројектовања ракете где је предвиђено гасодинамичко управљање флексибилним млазником, урадити још једну анализу, која показује утицај еластичности оптерећења (флексибилна веза млазника и коморе ракетног мотора) на сопствену фреквенцију актуационог система преко еквивалентне крутости, која једноставно треба да потврди, да флексибилни млазник као специфична конструкција управљачког органа може бити за разматрану конструкцију ракете (почетни параметри) управљачки орган.

Ако прихватимо једначине линеаризоване (4.21-4.23) као једначине које дају општи опис актуационог система са флексибилним млазником, имамо:

#### 4.1 Утицај конструкције ракете на избор основних параметра актуатора за управљање и дефиниција механичких карактеристика актуатора у почетној фази пројектовања

**Прилог теорији пројектовања актуатора за управљање вектором потиска ракетног мотора са флексибилним млазником**

$$\dot{\delta}_R = \dot{\delta}_0 x_V - \frac{\dot{M}}{C_{cil}} \quad (4.21)$$

$$M = C_{ameh}(\delta_0 - \delta_p) \quad (4.22)$$

$$C_{ameh}(\delta_0 - \delta_p) = I_p \ddot{\delta}_p + b \dot{\delta}_p - M_L \delta_p \quad (4.23)$$

$\delta_R$  -ход цилиндра сведен на угао померања млазника

$\dot{\delta}_0$  -брзина неоптерећеног актуатора

$M$  -момент оптерећења

$C_{cil}$  -крутост цилиндра

$C_{ameh}$  -укупна крутост механизма померања флексибилног млазника

$\delta_p$  -угао отклоне флексибилног млазника

$I_p$  -Момент инерције актуатора и флексибилног млазника

$b$  -коэффициент вискозног пригушења

$M_L$  -момент оптерећења

Прва једначина је једначина цилиндра, друга једначина описује оптерећење цилиндра и трећа једначина описује кинематику актуатор управљачки орган:

После трансформације претходних једначина, добија се преносна функција „положај разводног клипа разводника-отклон управљачког органа“ у следећем облику:

$$\frac{\delta_p}{x_v} = \frac{\dot{\delta}_0}{1 - \frac{M_L}{C_\Sigma}} * \frac{1}{s(T_c^2 s^2 + 2\zeta T_c s + 1)} \quad (4.24)$$

$$T_c = \frac{1}{\omega_c} = \sqrt{\frac{I_p}{C_\Sigma - M_L}} \quad (4.25)$$

$$\zeta = \frac{b\omega_c}{2(C_\Sigma - M_L)} \quad (4.26)$$

$$C_\Sigma = \frac{C_{ameh} * C_{cil}}{C_{ameh} + C_{cil}} \quad (4.27)$$

Видан је значајан утицај збирне крутости цилиндра и кинематике актуационог механизма управљачког органа на сопствену фреквенцију цилиндра и на укупну динамику у преносној функцији „померање разводног клипа разводника-угао отклоне флексибилног млазника“.

Јасно је да је сада прецизније одређена сопствена фреквенција цилиндра оптерећеног флексибилног млазника и да се сада тачније може одредити

**4.1 Утицај конструкције ракете на избор основних параметра актуатора за управљање и дефиниција механичких карактеристика актуатора у почетној фази пројектовања**

## Прилог теорији пројектовања актуатора за управљање вектором потиска ракетног мотора са флексибилним млазником

сопствена фреквенција комплетног актуационог система према критеријумима да је:

$$\omega_{cil} = \frac{\omega_{as}}{\eta} \Rightarrow \omega_{as} = \omega_{cil} * \eta \quad (4.28)$$

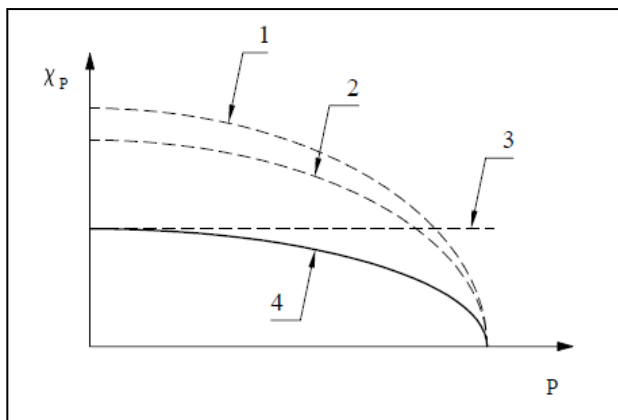
Фактор  $\eta$  се у пракси на основу до сада изведених конструкција креће од 0.4-0.6 [88] зависно од сложености актуационог система

На такав начин имамо могућност да прецизније уведемо динамику актуационог система у разматрање карактеристика ракете у почетном стадијуму пројектовања

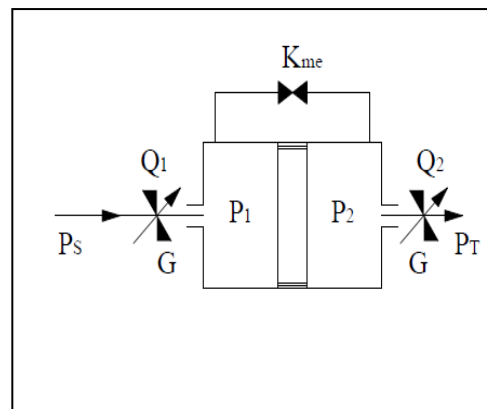
#### 4.2 Механичка карактеристика хидрауличног актуатора

Поред сопствене фреквенције ово је најважнија карактеристика актуационог система. На слици 4.8 су за разматрану актуаторску конфигурацију са пригушним управљањем, (конфигурација пропорционални разводник-цилиндар) приказане су четири карактеристике, где се свака односи на специфичну конфигурацију хидрауличног актуационог система са пригушним управљањем: Прва карактеристика, слика 4.8 се односи на систем са централизованом напајањем (посматрано изоловано, али где притисак у систему није константан због потрошње других актуатора на истом напајању, различити протоци). Друга карактеристика система, слика 4.8 је актуациони систем са пумпом константног протока. Трећа карактеристика, слика 4.8 је систем са пумпом променљивог протока. Четврта карактеристика, слика 4.8 је актуациони систем са значајним утицајем конфигурације водова на укупне отпоре у хидрауличном систему. Јасно је да је најповољнија карактеристика са пумпом променљивог протока али је познато да је ова конструкција најсложенија конфигурацијски, најтежа и најскупља и да се као таква промењује код авиона али не и ракетној техници због врло кратке мисије ракете која није дужа од неколико минута, што је јако кратко време према очекиваном ресурсу авиона који се мери хиљадама радних часова. За случај флексибилног млазника може се разматрати као реална прва и друга механичка карактеристика. Прва када је заједничко напајање за два актуатора који раде у пару на флексибилном млазнику и друга када сваки актуатор има свој пумпни агрегат са пумпом константног протока која ради на константном притиску. У овом раду разматра се детаљно друга варијанта конфигурације напајања електриохидауличног актуатора. Да би се одредила једначина механичке карактеристике актуационог система, потребно је решити систем једначина који дефинише протоке према слици 4.9.

Проток кроз симетричан разводник можемо написати преко нелинеарне карактеристике типа квадратног корена:



Слика 4.8-Механичка карактеристика актуатора у функцији од хидрауличног концепта система



Слика 4.9-Општи модел хидрауличног дела актуатора

На основу ознака са слике 4.10 може се писати:

**Прилог теорији пројектовања актуатора за управљање вектором потиска ракетног мотора са флексибилним млазником**

$$Q_1 = Q_2 = G * \sqrt{P_s - \Delta p_L - p_T} - k_{cur} * \Delta p_L \quad (4.29)$$

Са  $G$  глобално означавамо хидрауличну проводљивост која зависи од вискозитета уља и геометрије разводних отвора.

Ако се следеће величине дефинишу као:

$$Q_0 = G^{max} * \sqrt{P_s - p_T} \quad (4.30)$$

$$P_{max} = (p_s - p_T) * A \quad (4.31)$$

$$Q_{cur}^{max} = k_{cur} (p_s - p_T) \quad (4.32)$$

користећи претходне три једначине и једначину:

$$\dot{x}_p = \frac{Q}{A} \quad (4.33)$$

добија се једначина актуационог система са пригушним управљањем, пумпа константног протока која ради на константном притиску.

$$\dot{x}_{p\ max} = \dot{x}_{cil} \sqrt{\frac{P_{max} - P}{P_{max}}} - \frac{Q_{cur}^{max}}{A} * \frac{P}{P_{max}} \quad (4.34)$$

На основу једначине (4.34) одређује се максимална брзина актуатора под оптерећењем. Механичка карактеристика актуационог система у старту утиче на следеће важне особине актуационог система:

-преко ограничења максималне брзине утиче се на фазно кашњење актуационог система

-максимално спољно оптерећење извршног дела актуационог система (сведена сила на клипњачу хидрауличног цилиндра)

Поред претходно дефинисане једначине за механичку карактеристику хидрауличног актуационог система са пригушним управљањем, може се уз следеће претпоставке дефинисати и елипса оптерећења (зависност брзина под оптерећењем-сила на цилиндру, према максималним вредностима) која је такође један од облика механичке карактеристике актуационог система и оптерећења. Основна једначина положаја, односно угла отклона актуатора генерално и у случају флексибилног млазника, може се описати:

$$\delta_p = \delta_{bal} + \delta_A \sin \omega t \quad (4.35)$$

Када се посматра угао отклона управљачког органа (4.35), а када се посматра положај клипњаче цилиндра (извршни део актуатора) једначина (4.35) има исти облик:

$$x_p = x_{bal} + x_A \sin \omega t \quad (4.36)$$

Први члан је отклон управљачког органа (флексибилног млазника) који је неопходан за балансирање ракете, односно обезбеђење да сума аеродинамичких

**Прилог теорији пројектовања актуатора за управљање вектором потиска ракетног мотора са флексибилним млазником**

моментна буде једнака нули, а други део који се односи на управљање и стабилизацију, може се приказати у облику хармонијске функције.

Ако узмемо у обзир чињеницу да је утицај инерцијалног оптерећења у односу на утицај еластичног оптерећења дат са (4.37):

$$F_L = F_{L0} + C_{ameh} x_p \quad (4.37)$$

Можемо добити из (4.36) и (4.37):

$$\dot{x}_p = x_A \omega \cos \omega t \quad (4.38)$$

$$\cos \omega t = \frac{\dot{x}_p}{x_A \omega} \quad (4.39)$$

$$F_L = F_{L0} + C_{ameh} x_{pbal} + C_{ameh} x_A \sin \omega t \quad (4.40)$$

$$\sin \omega t = \frac{F_L - F_{L0} - x_{pbal} * C_{ameh}}{C_{ameh} * x_A} \quad (4.41)$$

На основу претходног добијамо елипсу оптерећења уз следеће дефиниције:

$$x_A \omega = \dot{x}_A^{\max}, \quad C_{ameh} * x_A = \Delta F_{\max} \quad \text{и} \quad F_{oL} + C_{ameh} * x_{bal} = F_{L0}' \quad (4.42)$$

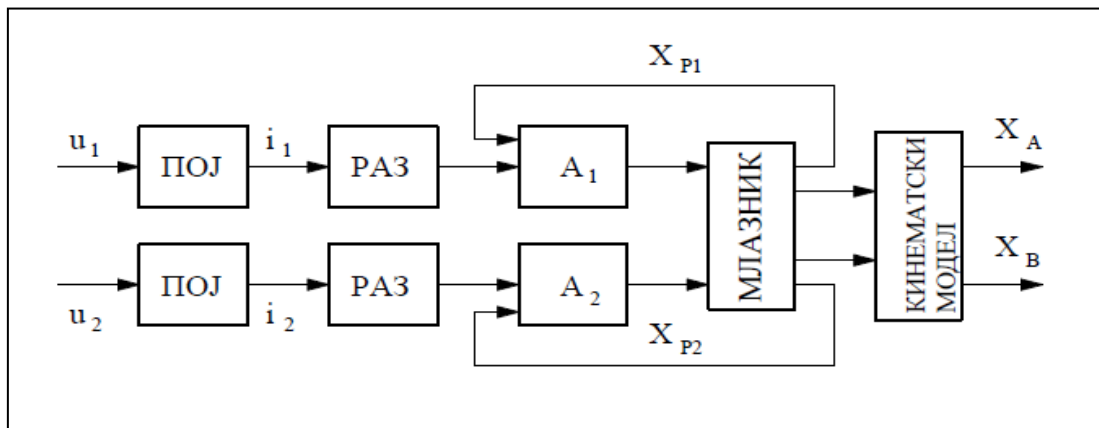
$$\frac{\dot{x}_p^2}{(\dot{x}_A^{\max})^2} + \frac{(F - F_{0L}')^2}{\Delta F_{\max}^2} = 1 \quad (4.43)$$

Уочава се да у једначини елипсе оптерећења има свих чланова из једначине механичке карактеристике актуатора (4.29) осим члана који узима у обзир цурење између комора цилиндара које је у пракси и најчешће занемарљиво. Јасно је да елипса оптерећења која је добијена преко хармонијске функције за положај актуатора описује понашање актуатора у режиму стабилизације док механичка карактеристика описује режим управљања кретањем центра масе ракете.

Може се отворити питање пресечних тачака механичке карактеристике и елипсе оптерећења за све рачунске случајеве оптерећења. Не морају се у свим режимима лета остварени пресеци али је јасно што је елипса оптерећења ближа механичкој карактеристици, то је у оквиру димензионисања снаге а самим тим и тежине актуационог система постигнут бољи резултат. Тако да се и на овај начин може проверити испуњеност ових критеријума оптималности конструкције актуационог система.

### 4.3 Утицај другог актуатора

Управљање вектором потиска у случају конструкције ракетног мотора са флексибилним млазником, за сва три угла која карактеришу кретање ракете, пропињање, скретање и ротација око сопствене осе, подразумева могућност истовременог рада два актуатора, који су постављени под углом од 90 степени. Истовремено, ракета може да скреће и да се пропиње, значи оба актуатора заузимају неки положај ван неутралног, нултог. То значи да постоји међусобни утицај један на другог, обзиром на природу флексибилне везе, слика 4.10а и 4.10б. Овај рад се не бави проблематиком истовременог рада два актуатора, али се као проблематика при пројектовању актуатора анализира то јест наглашава се да се њихов међусобни утицај не може занемарити при пројектовању тако што се посматрају заједно као систем са два улаза и два излаза. Систематизован приступ овој анализи се даље приказује преко следећих блок дијаграма који описују јединствени линеарни систем са два актуатора. Проблематика међусобног утицаја два актуатора је део који најчешће остаје у делу онога што дефинишемо као немоделивана динамика. [90]



Слика 4.10 а Структурни дијаграм рада два актуатора у пару

Истовремени рад два актуатора отвара питање дефиниције кинематског модела кретања неке репрезентативне тачке на млазнику али отвара и питање да ли се може користити приступ у моделовању на бази инверзне динамике.

Код директног кинематског модела, тражи се да познајемо функцију која на основу две позициј клипњача цилиндара одређује позицију референтне тачке:

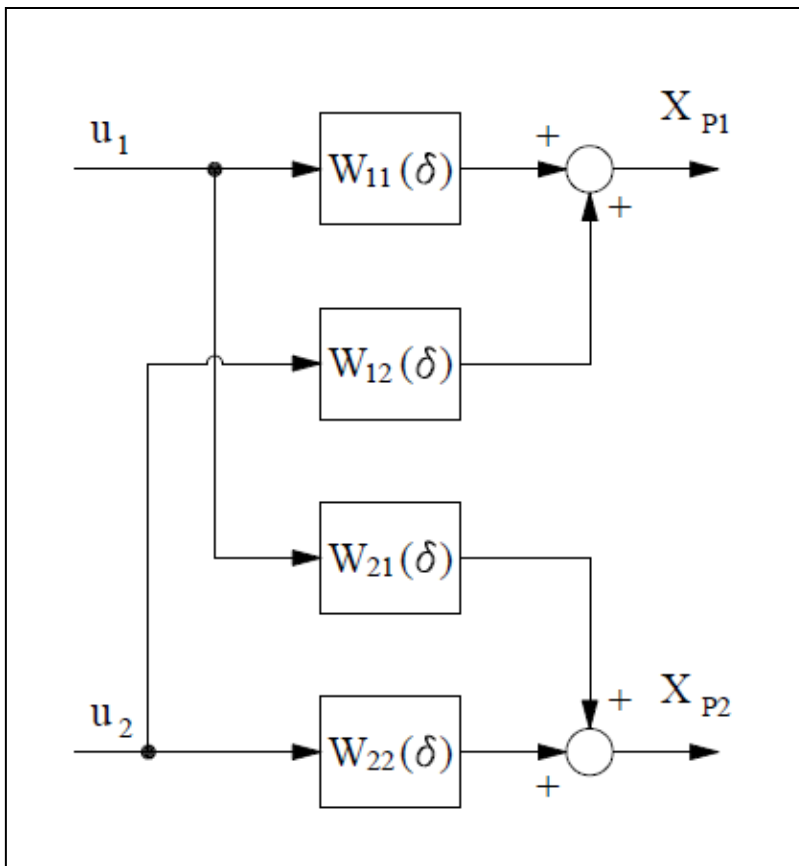
$$\bar{x} = [x_{p1}, x_{p1}]^T \quad (4.44)$$

Директни кинематски модел се дефинише као:

$$\bar{z} = \phi(\bar{x}) \quad (4.45)$$

$$\bar{z} = [x_A, y_B]^T \quad (4.46)$$

### 4.1 Утицај другог актуатора



Слика 4.10 б-Блок дијаграм рада два актуатора у пару

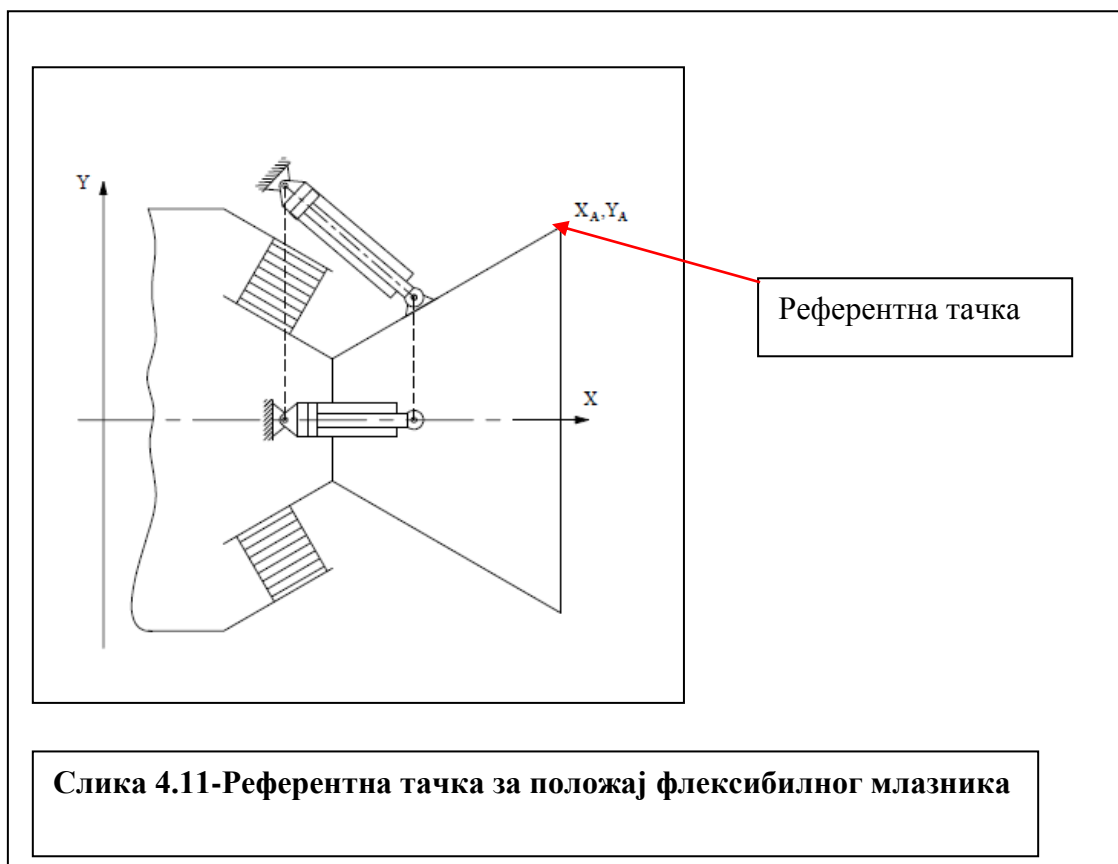
Проблематика избора референтне тачке је посебно комплексна код флексибилног млазника, али се условно може усвојити према скици на слици 4.11.

$$\begin{bmatrix} x_{p1} \\ x_{p2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} W_{11} & W_{12} \\ W_{21} & W_{22} \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \end{bmatrix} \quad (4.47)$$

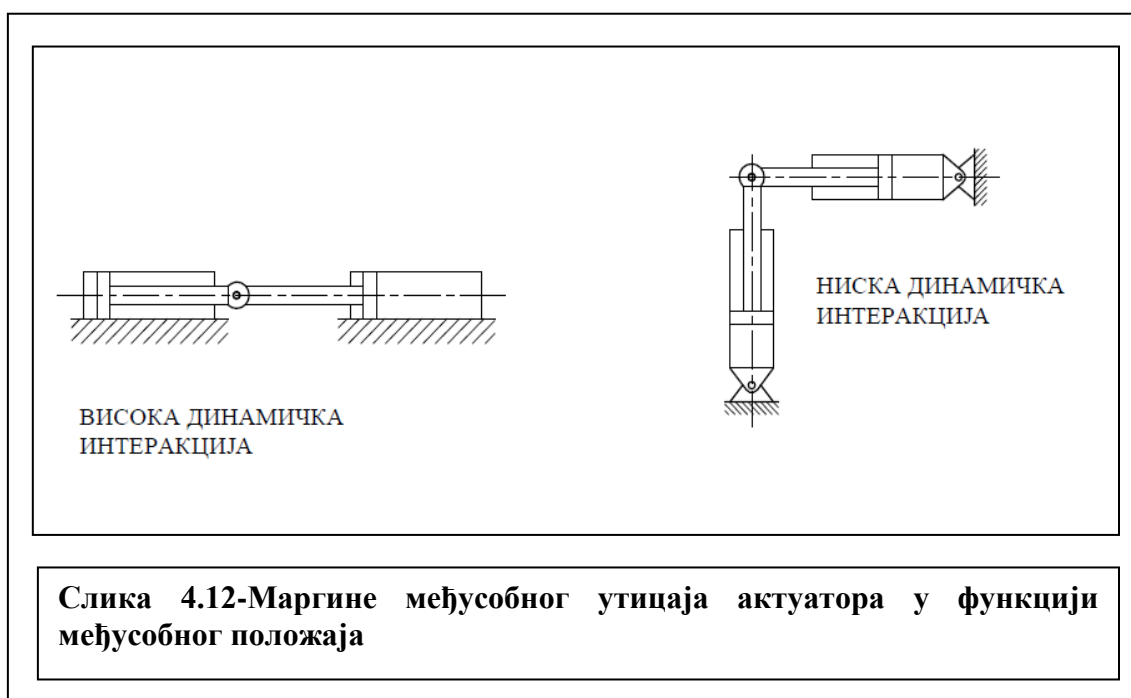
Јасно је да је на нивоу линеаризованих модела за један и други актуатор међусобна интеракција приказана преносним функцијама:  $W_{12}(s)$  и  $W_{21}(s)$

Главна питање у даљој анализи проблематике међусобног утицаја два актуатора је како квантификовати тај утицај. Слично и код једноструко преносних система међусобни утицај два хидраулична актуатора највише зависи од њихових пропусних опсега као и међусобног положаја. Слика 4.12 показује два екстремна случаја утицаја актуатора у функцији међусобног положаја.





утицај два хидраулична актуатора највише зависи од њихових пропусних опсега као и међусобног положаја. Слика 4.12 показује два екстремна случаја утицаја актуатора у функцији међусобног положаја.



**Прилог теорији пројектовања актуатора за управљање вектором потиска ракетног мотора са флексибилним млазником**

заснива на техници мерења излазне осетљивости која се дефинише на следећи начин:

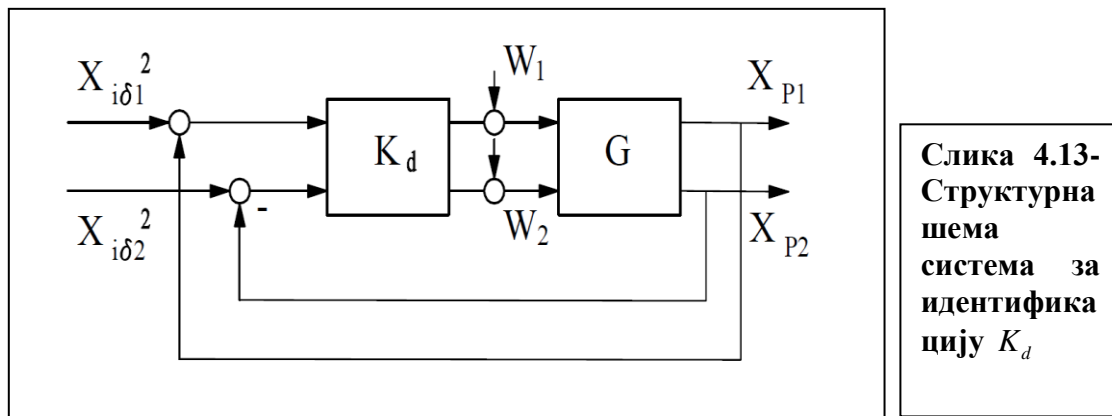
$$S = \begin{bmatrix} \frac{\partial \phi}{\partial \bar{x}} & \frac{\partial \phi}{\partial \bar{p}} \end{bmatrix} \quad (4.48)$$

Из горње једначине се види да је потребно одредити парцијалне изводе функције које одређује директни кинаматски модел, по позицијама клипњача цилиндара и по величинама које дефинишу геометрију између позиција и референтне тачке. Са познатом функцијом осетљивости у векторском облику, може се рачунати међусобна интеракција два актуатора:

$$S = (I + W(s)K_d)^{-1} \quad (4.49)$$

Елементе матрице преносних функција израчунавамо на основу дефинисаних вредности за:

$$K_d = \text{diag}\{k_i, i = 1, 2\} \quad (4.50)$$



**Слика 4.13- Структурна шема система за идентификацију  $K_d$**

Претходно подразумева да се при детаљном пројектовању актуатора, актуатори не посматрају одвојено већ само у оквиру система са два улаза и два излаза, или да се посматрају одвојено а да се дода одређен фактор који ће приказати интезитет међусобног утицаја, а то су дијагонални елементи матрице  $K_d$ , слика 4.13.

Постоји још једна ствар која се може решавати на почетном стадијуму пројектовања актуаторског система. Ако конструктори ракете дефинишу захтев за астатичком стабилизацијом за ротацију ракете око њене уздужне осе, једна од могућих опција за реализацију астатичког понашања, односно допунског интегралног елемента је да се одмах на почетку претпостави да ће се претходно остварити перко изодромне повратне спеге актуационог система. Значи поред круте повратне спеге, где је сигнал повратне спеге пропорционалан стварном померању управљачког органа ракете или померању извршног органа актуационог система, постоји и варијантра где се у повратној грани реализује, најчешће електронски или софтверски преносна функција која дефинише изодромну повратну везу следећим изразом.

**4.1 Утицај другог актуатора**

**Прилог теорији пројектовања актуатора за управљање вектором потиска ракетног мотора са флексибилним млазником**

$$W(s)_{ips} = \frac{K_{ps} * s}{T_s + 1} \quad (4.51)$$

Крута повратна спрега није осетљива на оптерећење, док код изодромне повратне спреге имамо следеће понашање:

-Сигнал повратне спреге није пропорционалан само својој реалној вредности него и свом интегралу.

-При малим фреквенцијама сигнала повратне спреге,  $s \rightarrow 0$  имамо ситуацију као да не постоји повратна спрега, актуатор има доминантно интегрално понашање, актуатор практично управља брзином управљачког органа ракете.

-При средњим и већим фреквенцијама сигнала повратне спреге имамо ситуацију да се изодромна повратна спрега понаша као крута повратна спрега.

Коначно све претходне анализе узимају у обзир сопствену фреквенцију актуационог система. Поставља се питање како обезбедити познавање сопствене фреквенције ракете, како би се могао прецизно анализирати утицај актуационих система за управљачке органе.

#### 4.4 Сопствена фреквенција ракете

У литератури [4] и [88] се даје емпиријска формула као доста тачна могућност за одређивање сопствене фреквенције ракете, на следећи начин:

$$\omega_{rak} = \sqrt{\frac{-57.3m_z^{c_y} c_y^\alpha q S b_A}{I_z}} \quad (4.52)$$

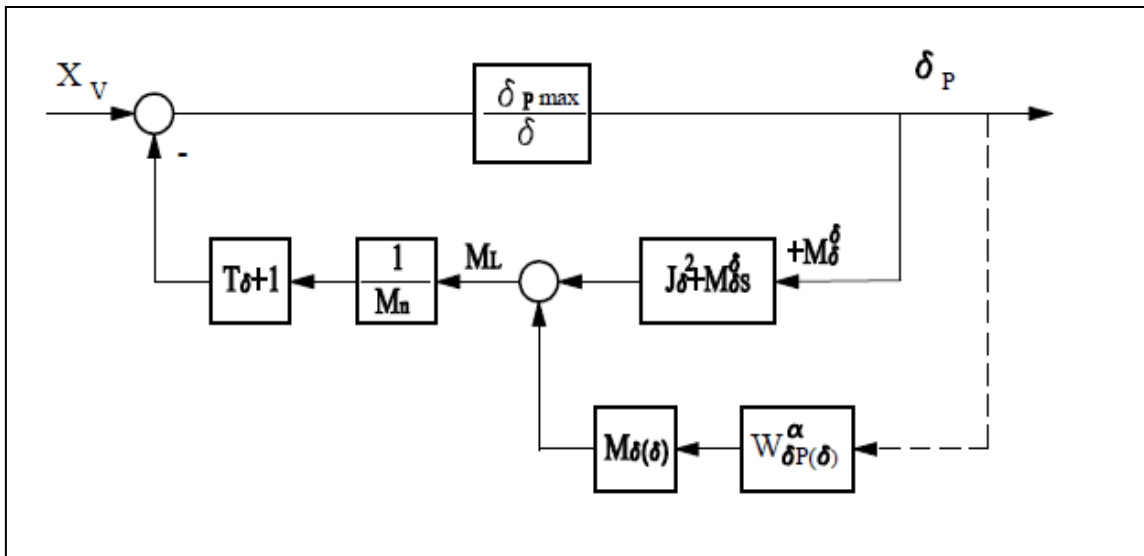
Из претходног се види да сопствена фреквенција ракете зависи од момента инерције, брзинског напора, геометријских параметара и степена статичке стабилности. Вредности сопствених фреквенција зависе од претходних величина и крећу се до 30 1/сек. Посебно важна чињеница која се види из претходног израза је да сопствена фреквенција ракете зависи од висине лета, тако да на великим висинама ова вредност може бити доста мала, 1-2 1/сек. То нам говори да није једноставно пренети критеријуме из теорије аутоматског управљања да сопствена фреквенција актуационог система треба минимално да буде три пута већа од сопствене фреквенције ракете.

Поред тога, актуациони систем треба да има један пропусни опсег у контури управљања кретањем тежишта ракете, а други када је у питању контура стабилизације. У пракси се предност даје критеријуму да актуациони систем задовољи захтеве управљања кретањем тежишта ракете, а да се у другом плану решава динамика стабилизације, јер ту постоје далеко више могућности да се контура стабилизације оптимизује преко аеродинамичких параметара ракете (повећавање степена пригушења и адекватно филтрирање сигнала). У случајевима када је мали пропусни опсег актуационог система (пропорционално сопственој фреквенцији) имамо релативно велике управљачке амплитуде, што може да отежа синтезу квалитетног управљања ракетом.

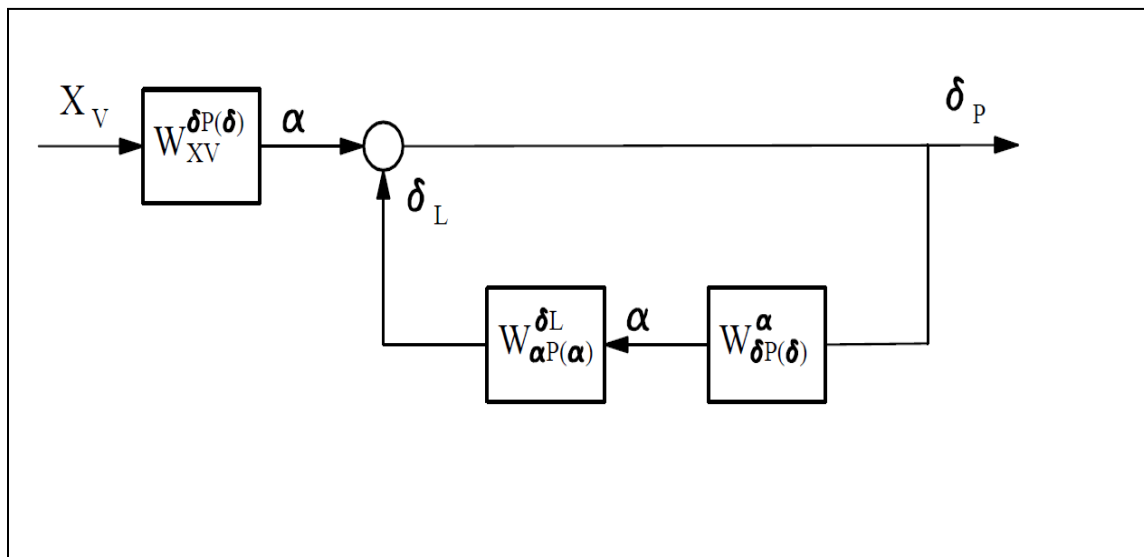
#### 4.5 Почетни ред система за опис хидрауличног актуатора и приказ оптерећења актуатора

У овом претходном анализи јасно је да је потребно одредити у којој динамичкој форми форми ће се приказати актуаторски систем у оквиру почетних анализа, које су претходно описане. Приказана је најједноставнија динамичка форма, једначина (4.15) и једначином (4.24) где је актуаторски систем приказан преносном функцијом трећег реда. Јасно је да оптерећење подиже ред система. Интересантна почетна анализа актуаторског система може да се уради тако што ће се оптерећење унети у повратне спреге и што се актуатор може приказати ван главне повратне спреге, како је то приказано на сликама 4.14 и 4.16. Преко алгебре блок дијаграма се овде једноставно показује како се може доћи до репрезента актуаторског система преносном функцијом првог реда, што се врло често користи у пракси када се пројектују контуре управљања и стабилизације, за кретање тежишта ракете или стабилизацију кретања око тежишта.

Прилог теорији пројектовања актуатора за управљање вектором потиска ракетног мотора са флексибилним млазником



Слика 4.14-Оптерећен актуатор, структура 1



Слика 4.15-Оптерећен актуатор, структура 2

Претходни приказ је дат преко инерцијалног и шарнирног момента оптерећења. У основи, ово је универзални приступ јер и у случају флексибилног млазника постоји инерцијално оптерећење и оптерећење типа шарнирног момента, односно еластично оптерећење је пропорционално померању актуатора као што је и шарнирни момент пропорционалан померању извршног органа актуационог система односно углу аеродинамичке управљачке површине у односу на неутрални положај. Знак повратних спрега на слици 4.15 се мења према томе да ли је ракета статички стабилна или нестабилна. Структура на слици 4.16 показује

## Прилог теорији пројектовања актуатора за управљање вектором потиска ракетног мотора са флексибилним млазником

да преносна функција актуационог система може бити записана у следећем облику:

$$W_{x_v}^{\delta}(s) = \frac{W_{x_w}^{\delta_o}(s)}{1 - W_{\alpha}^{\delta_L} W_{\delta_p}^{\alpha}(s)} \quad (4.53)$$

Специфичност структуре на слици 4.16 је у томе што се директно користи преносна функција неоптерећеног актуатора у блок дијаграму система, а сва оптерећења се налазе у повратној вези. Овде нема директно експониране интегралне природе система у актуаторској контури са повратном спрегом.

#### 4.5 Утицај еластичности структуре ракете на пројектовање електрохидрауличног актуационог система за управљање вектором потиска ракетног мотора

Ракета нема круту структуру то јест њена еластичност се не може занемарити. Утицај еластичности је посебно важан ако се узме у обзир да се користе глобалне повратне спреге за генерисање управљања за актуациони систем. Глобалне повратне спреге су на пример, угаони положај пропињања али и угаона брзина око тежишта приликом пропињања (посматра се раван лансирања) чији су мерни органи жироскопи. Ако претпоставимо ситуацију да се добија одређен сигнал од жироскопа зато што се најпростије речено ракета савила, а не зато што кретање тежишта ракете одступа од жељене путање, то значи да ће се генерисати додатна компонента управљања која ће изазвати бочну управљачку силу, а она ће нарушити задану трајекторију ракете. У овом случају посебну важност у експертском делу алгоритма преузима на себе рачунар аутопилота који има задатак да модификује жељену вредност управљачког сигнала за актуациони систем према очекиваним еластичним деформацијама структуре ракете. Поред тога, постоји и део управљања које има задатак да узме у обзир крутост цилиндра (актуатора) у односу на компресибилност хидрауличног уља, то јест да узме у обзир стишљивост радног флуида на различитим притисцима. Јасно је да ће део грешке између жељене и стварне позиције настати као последица компресибилности уља у коморама цилиндра. На слици 4.16 је приказан блок дијаграм у  $s$  домену (преко Лапласове трансформације) који показује динамику утицаја структуре ракете преко везе ракетног мотора са основном структуром кроз торзиони коефицијент крутости. Да би се потпуно разумео блок дијаграм на слици 4.16 неопходно је да се напише диференцијална једначина која описује померање млазника у односу на ракетни мотор односно структуру ракете. На структурном дијаграму је назначена корекција жељене вредности на основу еластичности структуре ракете.

$$I_e \ddot{\delta} + B_e \dot{\delta} + K_e \delta = K_a (\delta_a - \delta) \quad (4.54)$$

$K_e$ -торзиона константа за везу флексибилног млазника за ракетни мотор

$B_e$ -коефицијент вискозног пригушења

Управљачка референца за угао отклоне флексибилног млазника се на основу претходног дефинише као линеарна комбинација:

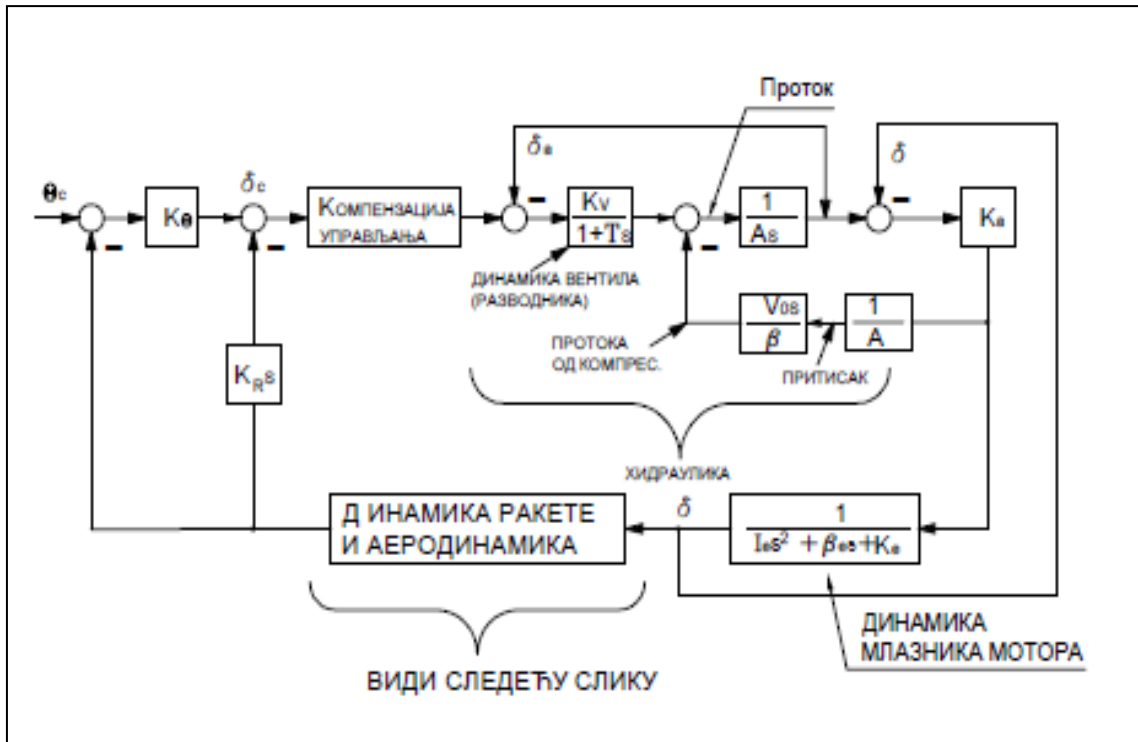
$$\delta_c = K_\Theta (\Theta_a - \Theta_{FB}) - K_R \dot{\Theta}_{FB} \quad (4.55)$$

На слици 4.19 је приказан блок дијаграм са детаљним интеракцијама еластичности реалне структуре ракете. Потпуно је јасно да и даље стоји идеја да се еластични феномени који се могу описати преко диференцијалних једначина повежу са елементима управљачког система у  $s$  домену што омогућава да се еластични феномени повежу са пројектовањем електрохидрауличног система. Структурна динамика ракете је битна за њену чвртсоћу, али повезана је и са управљачким системом тако да мора бити анализирана у оквиру једног посебног феномена, који се назива „граничне осцилације“ или „гранични круг“ и који настаје из дубоке нелинеарне природе електрохидрауличног актуатора.

4.5 Утицај еластичности структуре ракете на пројектовање електрохидрауличног актуационог система за управљање вектором потиска ракетног мотора

**Прилог теорији пројектовања актуатора за управљање вектором потиска ракетног мотора са флексибилном млазницом**

Фреквенција тих граничних осцилација, које зависе пре свега од конфигурације и структуре електрохидрауличног система не сме да се поклопи са модовима осциловања еластичне структуре ракете јер тада може доћи до трајних преоптерећења структуре, оштећења и губитка функције управљања.

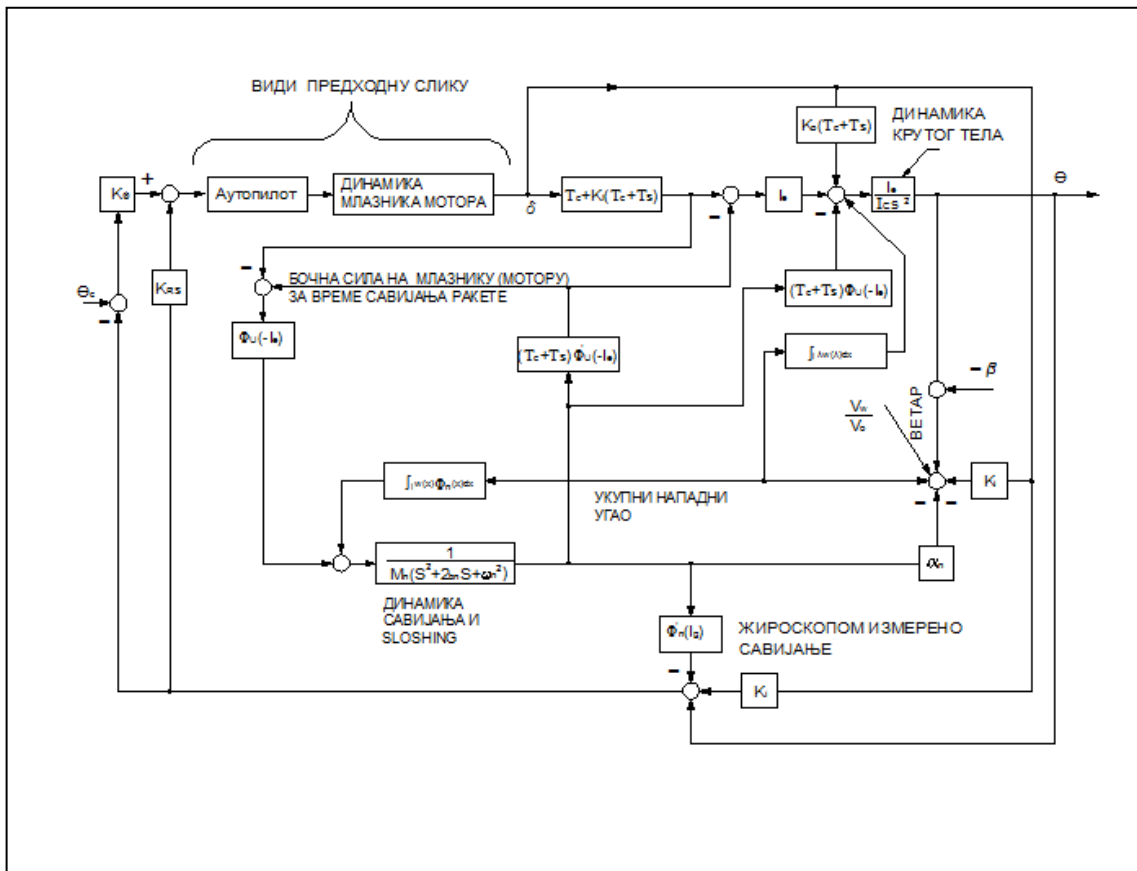


**Слика 4.16-Блок дијаграм-утицај структуре ракете на актуаторски систем [75], [76]**

У овом случају се или мора мењати структура ракете или актуациони систем. У пракси се више тежи модификацији структуре, јер се у основи конфигурација и нелинерана природа електрохидрауличног актуационог система не може променити. Манифестација овог проблема прво настаје када су поремећаји у систему велики тако да тада више нема оправдања за линеаризацију, односно више се не могу коректно сагледати особине система. Тада се као метод анализе нелинеарних система могу цртати фазне трајекторије, што представља решавање нелинеарног математичког модела у простору стања. Обзиром каквим се рачунарским ресурсима располаже, нема ограничења да се систем до три једначине реши и добије тродимензионални приказ који може да покаже специфичности нелинеарних система. Ово је важан феномен и његова анализа мора се укључити у технологију пројектовања актуационих система као обавезан корак јер може да угрози на самом почетку успех летних испитивања прототипа. Овај феномен посебно добија на вредности то јест захтева додатну пажњу у претходно описаном смислу јер се од нових конструкција ракета захтева што већа маневарбилност што посебно појачава манифестацију еластичних феномена структуре ракете.

**4.5 Утицај еластичности структуре ракете на пројектовање електрохидрауличног актуационог система за управљање вектором потиска ракетног мотора**





Слика 4.17-Блок дијаграм детаљних еластичних интеракција ракета-управљачки актуациони систем [7], [23]

Значи пројектантски задатак са једне стране је да се познају сви значајни модови осциловања структуре ракете, а са друге стране за реални актуациони систем треба проверити услове постојања граничних осцилација и одредити ту фреквенцију граничних осцилација. У овом раду се посебно говори о нелинеарној природи електрохидрауличног система преко више критеријума. У овом поглављу ће се ради комплетности разматране проблематике додати део који се односи на гранични круг. То је ефекат који се појављује код система са нелинеарном природом. Овај феномен се најчешће манифестује када постоји одређен механички зазор у структури управљачког система али и када управљање има релејни карактер. У сваком случају управљање које се синтетизује неће имати релејни карактер, а механички зазори се могу делилично избећи конструктивним решењима и одређеним подешавањима али ризик од појаве зазора у актуаторском систему се не може потпуно избећи. Најједноставније речено гранични круг је свака затворена трајекторија у фазној равни (кординате су две величине стања) којој се може прићи са унутрашње или спољашње стране асимптотски после одређеног времена. За ове трајекторије се мора рећи да су изоловане, манифестују се код неконзервативних система, где постоји енергетски дебаланс. Трајекторије око њих (граничних кругова) нису затворене, што је случај код конзервативних

#### 4.5 Утицај еластичности структуре ракете на пројектовање електрохидрауличног актуационог система за управљање вектором потиска ракетног мотора

система, где је најбољи пример идеални осцилатор, где су трајекторије једна унутар друге. Гранични круг је сингуларна трајекторија. У теорији нелинеарних система постоје развијени критеријуми преко којих се проверава постојање услова за егзистенцију граничног круга. Ови критеријуми су раније били делови стандардног курса из нелинеарних система и могу се наћи у литератури [78]. Ту се пре свега мисли на Бендиксонов критеријум и Поинкареов критеријум. Обзиром да се ови критеријуми врло тешко примењују у пракси и захтевају на посебан начин моделовање нелинеарне природе електрохидрауличног актуационог система, њихова примена се не може препоручити као део стандардне пројектантске технологије. Ризик од појаве стабилног или нестабилног самоосциловања може да се посматра на индиректни начин, како је то учињено посебно у овом раду, поглавље где се говори о ризицима самоосциловања од спољашње побуде преко поремећајне силе која делује на клипњачу актуационог система у функцији од геометрије механичког склопа разводника. Генерално, препоручује се да се прво дефинише нелинеарни опис система другог реда и да се нелинеарне једначине реше и графички прикаже решење у фазној равни. Ако добијемо изоловану затворену криву, значи постоји ризик од постојања феномена граничног круга. Препоручује се да се испита и уради модел релејног описа управљања преко серво разводника или on-off разводника како би се и са те стране анализирао могућа појава манифестације граничног круга. У неким случајевима он се прихвата као реалност када је стабилан али у том смислу морамо само проверити да се фреквенција осциловања граничног круга не поклапа са модовима осциловања еластичне структуре. Нестабилни гранични круг, односно његова егзистенција не може бити прихватљиво пројектантско решење. Опис нелинеарног система диференцијалним једначинама другог реда није могућ када су присутне статичке нелинеарности, што је и случај са нелинеарношћу типа зазора, чија је природа таква да може да изазове постојање граничног круга. Тада је једино решење урадити што више симулација са датом нелинеарношћу и покушати да се процени на основу одзива присуство граничног круга.

Цртање граничног круга, као посебног фазног портрета не зависи од фреквенције и податак о фреквенцији осциловања, променама величина стања, није директно доступан у фазној равни. Само цртање граничног круга као изоловане затворене трајекторије показује његово присуство. Зато је потребно урадити одређен број симулација динамичког понашања које ће показати стварну фреквенцу осциловања на граничном кругу ако претходно покажемо, решавањем нелинеарних једначина, односно цртањем у фазној равни, његову егзистенцију.

Даље, се приказују реални подаци из литературе [76] који илуструју ниво преоптерећења која настају када се актуациони систем налази у режиму граничног осциловања. У табели 4.1 су дати односи тоталних момената савијања са и без присуства граничног круга.

Табела 4.1

$\frac{X}{L}$	$\frac{M_{LC}}{M_D}$
0.0	1.0
0.1	1.06
0.2	1.12
0.3	1.20
0.4	1.27
0.5	1.30
0.6	1.32
0.7	1.28
0.8	1.04
0.9	1.01
1.0	1.00

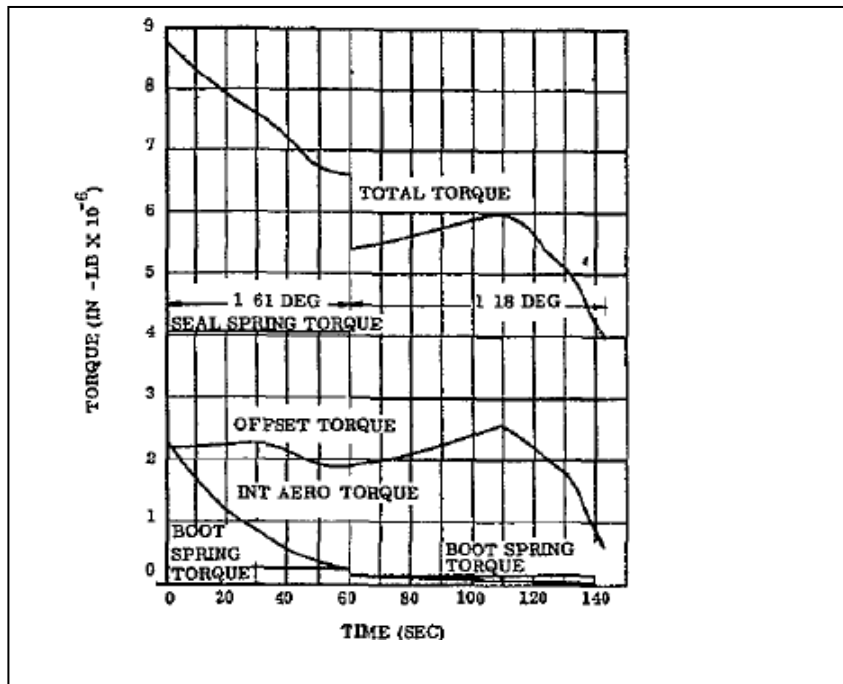
$\frac{X}{L}$ -релативна дужина ракете мерена од врха $M_{LC}$ -тотални момент савијања ракете уз присуство граничног круга $M_D$ -тотални момент савијања ракете без присуства граничног круга
--

Постоји и алтернативни приступ претходном а то је да се преносна функција за случај летелице као крутог тела у паралелној вези коригује преносном функцијом која узима у обзир само први хармоник (ако би хтели и други, морамо додати и другу преносну функцију у паралелној вези. На овај начин везу актуаторског система и динамику летелице коју посматрамо, повезујемо у оквирима линеарног система, тако што летелицу посматрамо као уздужну греду са слободним крајевима променљиве уздужне крутости. У овом случају морамо занемарити унутрашње отпоре и аксијално оптерећење и посматрати само трансверзално осциловање које се може описати парцијалним диференцијалним једначинама. Еластичне осцилације се најчешће доминантно јављају услед аеродинамичких сила при лету.

Пример преузет из литературе, а приказан у Табели 4.1 има посебан значај јер показује динамичко оптерећење на ракети, момент савијања по моделу просте греде, који такође изазива еластичне деформације, које је генерисао гранични круг као последица управљачког система за електро хидраулични актуатор.

### 5.1 Зависност појачања актуационог система од крутости позиционог оптерећења

При синтези управљања, потребно је анализирати утицај еластичног оптерећења на промену појачања. Пропорционално управљање је први корак у синтези комплетног управљања и овде се аналитички анализира утицај еластичности на промену појачања. Еластичност флексибилне везе (говоримо генерално, ради се о смицању) мења се према дијаграму који је преузет из литературе [18] и зато има смисла спровести претходно дефинисану анализу. [80], [81]



Слика 5.1-Стварни карактер флексибилног оптерећења [18]  
 опадање момента који карактерише крутост флексибилне везе. Опадање је због релаксационог момента (BOOT SPING TORQUE) који настаје као последица рада ракетног мотора.

За ову анализу користиће се најједноставнији математички модел:

$$m\ddot{y} = A p - C_1 y$$

$$k_{Qx}x - k_{Qp}p = A\dot{y} + \frac{V}{2E} \frac{dp}{dt} \tag{5.1}$$

$C_1$  -коэффициент позиционог оптерећења

Изрчунавањем притиска из једначина 5.1а и његовим диференцирањем и увођењем у једначину 5.1б у диференцираном и недиференцираном облику добија се:

**Прилог теорији пројектовања актуатора за управљање вектором потиска ракетног мотора са флексибилним млазником**

$$\frac{m}{C_1} \ddot{y} + \frac{m}{B} \dot{y} + \left(\frac{C_1}{C_2} + 1\right) \dot{y} + \frac{C_1}{B} y = k_{vx} x \quad (5.2)$$

$$C_2 = \frac{2A^2 E}{V} B = \frac{A^2}{k_{Op}}, k_{vx} = \frac{k_{Ox}}{A}$$

Из једначине два добија се лако преносна функција отвореног кола електрохидрауличног актуатора са хидрауличним цилиндром као извршним елементом:

$$W(s) = \frac{y(s)}{x(s)} = \frac{k_{vx}}{a_0 s^3 + a_1 s^2 + a_2 s + a_3} \quad (5.3)$$

$$a_0 = \frac{m}{C_2}, a_1 = \frac{m}{B}, a_2 = 1 + \frac{C_1}{C_2}, a_3 = \frac{C_1}{B} \quad (5.4)$$

Факторизацијом преносне функције добија се облик преносне функције из којег се једноставно може препознати део који незнатно зависи од флексибилног оптерећења и део који у потпуности описује флексибилно оптерећење.

$$W(s) = \frac{y(s)}{x(s)} = \frac{k_{vx} T_1}{(T_0 s + 1)(T_1^2 s^2 + 2\xi_1 T_1 s + 1)} \quad (5.5)$$

У случају рачунања фреквентних карактеристика повољнији облик записа преносне функције је:

$$W(s) = \frac{y(s)}{x(s)} = \frac{k_{vx}}{s(T_1^2 s^2 + 2\xi_1 T_1 s + 1)} \frac{T_1 s}{(T_0 s + 1)} = \quad (5.6)$$

$$W_1(s) \times W_2(s)$$

Када занемаримо масу, добијамо безинерцијални опис, где видимо да маса не утиче на флексибилно оптерећење:

$$W_1(s) = \frac{k_{vx}}{s} \quad (5.7)$$

$$W_2(s) = \frac{T_1 s}{(T_0 s + 1)} \quad (5.8)$$

У зависности од крутости позиционог оптерећења може се видети и утицај истог на појачање и стабилност електрохидрауличног актуационог система. Комплетирањем математичког модела за потпуну конфигурацију електрохидрауличног система добијамо преносну функцију отвореног кола у следећем облику:

$$W(s) = \frac{K}{s(T_1^2 s^2 + 2\xi_1 T_1 s + 1)(T s + 1)(T_2 s + 1)} \frac{T_{el} s}{(T_0 s + 1)} \quad (5.9)$$

**5.1 Зависност појачања актуационог система од крутости позиционог оптерећења**

**Прилог теорији пројектовања актуатора за управљање вектором потиска ракетног мотора са флексибилним млазником**

Карактеристични полином затвореног електрохидрауличног система, занемарујући динамику електронског појачивача је:

$$(Ts + 1)(T_0s + 1)(T_1^2s^2 + 2\xi_1T_1s + 1) + KT_{el} = 0$$

$$b_1s^4 + b_2s^3 + b_3s^2 + b_4s + b_5 = 0 \quad (5.10)$$

После једноставног сређивања једначине (5.10) добија се:

$$b_1 = T_1^2 * T_0 * T$$

$$b_2 = T_1^2 * T_0 + T_1^2 * T + 2 * \xi_1 * T_1 * T_0 * T$$

$$b_3 = T_1^2 + 2 * \xi_1 * T_1 * T_0 + T + T_0$$

$$b_4 = 2 * \xi_1 * T_1 + T_0 + T$$

$$b_5 = 1 + K * T_{el} \quad (5.11)$$

За добијање фреквентне карактеристике потребно је:

$$X(\omega) - jY(\omega) = 0$$

$$X(\omega) = 0 \quad (5.12)$$

$$Y(\omega) = 0$$

или:

$$K = \frac{1}{T_e} (b_3 \omega^2 - b_1 \omega^4 - 1)$$

$$\omega = \sqrt{\frac{b_4}{b_2}} \quad (5.13)$$

**Табела 5.1-реалне вредности параметара за софтверску симулацију**

T	0.02s
T <sub>0</sub>	0.0480s
T <sub>1</sub>	0.0456s
ξ	0.0475
T <sub>el</sub>	0.0465s
B	16 4000Ns/m
C <sub>2</sub>	360 000 N/m
A <sub>1</sub>	3e-4m <sup>2</sup>

Вредности параметара у претходној табели одговарају стандардном електрохидрауличном актуатору. За серворазводник је дефинисан пропусни опсег 50 Hz, што одговара свим претходним анализама динамичких параметара актуатора. Крутост је претпостављена.

Приближне вредности динамичких параметара (временских константи могу се добити из релација које следе:

**Прилог теорији пројектовања актуатора за управљање вектором потиска ракетног мотора са флексибилним млазником**

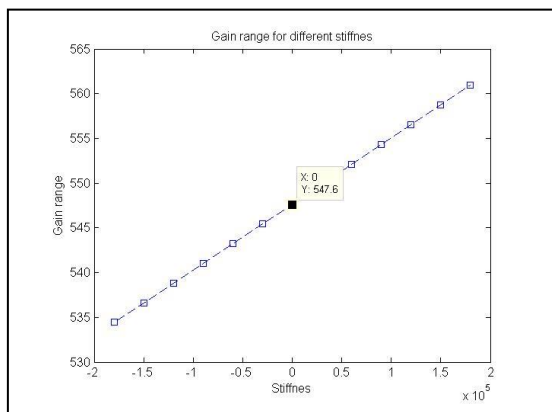
$$\begin{aligned}
 T_O &\cong T_{el} + T_H \\
 T_{el} &= \frac{B}{C_1} \\
 T_H &= \frac{B}{C_2} \\
 \xi_1 &= \frac{\sqrt{mC_2}}{2B} * \frac{C_2}{C_1 + C_2} \\
 T_1 &= \sqrt{\frac{m}{C_1 + C_2}}
 \end{aligned}
 \tag{5.14}$$

Узимајући стварне вредности за претходне параметре, добија се дијаграм на слици 5.2 који показује вредности појачања и опсега фреквенција за дату крутост еластичног оптерећења актуатора. Ово су врло важни подаци који показују значајне зависности између одређених величина у математичком моделу електрохидрауличног актуатора. Дијаграм на слици 5.2 добијен је као функционална зависност појачања од крутости флексибилног оптерећења:

$$K = f(C_1) \tag{5.15}$$

Дијаграм на слици 5.2 приказује мали утицај крутости на промену појачања у систему. Веће крутости незнатно више утичу на промену појачања. Ово је важно разматрање јер због процеса рада ракетног мотора долази до промене крутости флексибилне везе у току мисије. На основу овог разматрања не би требало да се користи прилагођавање појачања у току рада ракетног моторља.

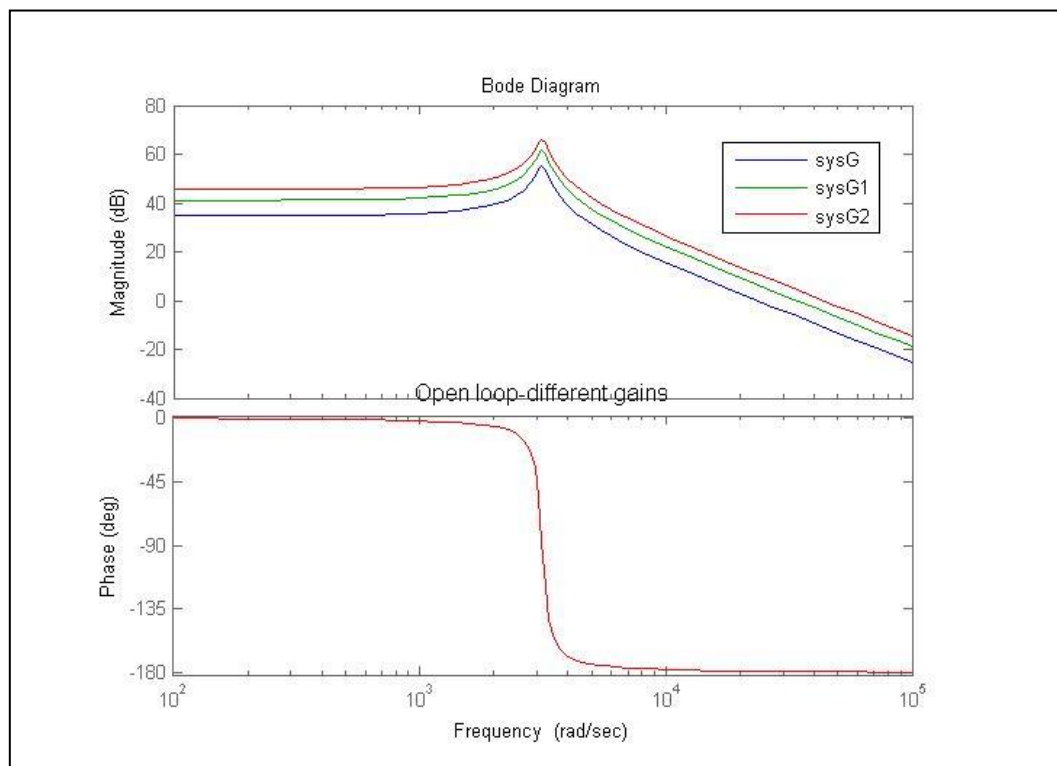
Поред дијаграма на слици 5.2 значајно је нацртати и Бодеев дијаграм за отворено коло актуаторског система, слика 5.3, из кога се види мала промена фреквентне карактеристике за драстичне промене појачања са утицајем флексибилног оптерећења. Види се минимални утицај позиционог оптерећења на пропусни опсег и резерву стабилности.



**Слика 5.2-Зависност појачања од крутости флексибилног оптерећења**

**5.1 Зависност појачања актуационог система од крутости позиционог оптерећења**

Прилог теорији пројектовања актуатора за управљање вектором потиска ракетног мотора са флексибилним млазником



Слика 5.3 Утицај позиционог оптерећења на фреквентну карактеристику отвореног кола актуатора ( $G_1, K=120, G_2, K=250, G_3, K=420$ )



## 5.2 Утицај начина моделирања нелинеарне статичке карактеристике разводника и оптерећења актуатора на појаву самосциловања у електрохидрауличном актуаторском систему

Самосциловање актуаторског система може да потиче и од његове природе, то јест унутрашње структуре и за манифестацију овог феномена није увек потребна спољна сила. Ове осцилације када настану могу бити стабилне и нестабилне. Чињеница је да линеарни елементи не могу да подрже самосциловање, може да се употреби у идентификацији актуаторског система тако да се чврсто може одредити граница за које амплитуде и фреквенције неће настати самосциловање. То је један од врло ефикасних начина да се препозна за која управљања смемо да актуаторски систем опишемо линеарним моделом. То је један од начина да се избегне односно компензује нелинеарна природа система, тако што ће се ограничити управљачке амплитуде и брзина њихове промене. Овде се даље анализира појава самосциловања без управљалког сигнала, само на основу ризика од појаве малих осцилација на клипњачи цилиндра од неког спољног извора, у овом случају од рада ракетног мотора на чврсто гориво и то само од пулзација притиска при сагоревању, јер не постоје никакви покретни механички делови. У сваком случају, осцилације се у систему ретко моделирају директно, али се могу анализирати на начин који следи. Поред тога у смислу претходног о препознавању понашања система са доминантном линеарном и нелинеарном природом треба поменути и резонантни скок, који се на један начин манифестује код линеарне, а на сасвим други начин код изражене нелинеарне природе актуационог система.

Када се анализира разводник у конфигурацији електрохидрауличног система прво се разматрају нелинеарности које он уноси у систем. У принципу, треба водити рачуна о разликама да ли имамо велико или мало померање разводног клипа у разводнику у односу на максимални ход. За нелинеарни опис развођења биран је и тип преклопа између разводног клипа и чауре. Посебно битно за пуну манифестацију нелинеарне природе је и чињеница да ли постоје спољне принудне осцилације на извршном органу актуаторског система. Другим речима, да ли има побуде на осциловање притиска у коморама цилиндра преко клипњаче цилиндра која је директно повезана са млазником. Енергија која је унета у систем мора бити негде у систему и пригушена-апсорбована у други вид енергије. Анализа која следи заснива се на објашњењу феномена без присуства улазног сигнала. Тада можемо да спроведемо следећи математички опис на бази претпоставке да је померање клипа позитивно,  $x_i > 0$ , за случај инерцијалног оптерећења на основу основних поставки у литератури [146].

$$\begin{aligned} Q &= k_{Qx} x \\ x &= -K_f \times x_i \end{aligned} \tag{5.16}$$

$$x_i = x_{io} \sin \omega t \tag{5.17}$$

## 5.2 Утицај начина моделирања нелинеарне статичке карактеристике разводника и оптерећења актуатора на појаву самосциловања у електрохидрауличном актуаторском систему

**Прилог теорији пројектовања актуатора за управљање вектором потиска ракетног мотора са флексибилним млазником**

$$Q = k_1 K_f x_{io} \sin \omega t \times \sqrt{\frac{p_s - p_R + p_L \text{sign} x}{2}} \quad (5.18)$$

И када је  $x=0$ ,  $p_L=0$ , за идеалан разводник важи:

$$K_{Qx} = k_1 \times \sqrt{(p_s - p_R) / 2} \quad (5.19)$$

Нови израз за проток је:

$$Q = -K_{Qx} \times K_f \times x_{io} \sin \omega t \times \sqrt{1 + \frac{p_s}{p_s - p_R}} \quad (5.20)$$

Сада се може израчунати рад за период осциловања као:

$$A_1 = 2 \int_0^{\frac{\pi}{\omega}} Q \times p_L dt \quad (5.21)$$

$$Q = 2 \int_0^{\frac{\pi}{\omega}} -K_{Qx} \times K_f \times p_L \times x_{io} \sin \omega t \times \sqrt{1 + \frac{p_L}{p_s - p_R}} dt \quad (5.22)$$

Сада можемо у анализи да прихватимо да је маса покретног млазника главни узрок инерцијалног оптерећења, а као алтернативно оптерећење разматрамо еластично позиционо оптерећење које одговара оптерећењу актуатора од флексибилне везе:

$$A \times p_L \approx m \frac{d^2 x_i}{dt^2} \quad (5.23)$$

или

$$A \times p_L \approx c_{el} \times x_i \quad (5.24)$$

$$p_L = -\frac{m}{A} a_y \times \omega^2 \sin \omega t \quad (5.25)$$

или

$$p_L = \frac{c_{el}}{A} x_{io} \times \sin \omega t \quad (5.26)$$

Изразе за притисак можемо сада увести у израз за интеграл рада. Прво за случај инерцијалног оптерећења узимајући у обзир (5.25) добијамо:

$$A_1 = \frac{2mK_{Qx}K_f a_y^2 \omega^2}{A} \times \int_0^{\frac{\pi}{\omega}} \sqrt{1 - \frac{m a_y \omega^2}{A(p_s - p_R)} \sin \omega t} \sin^2 \omega t dt \quad (5.27)$$

**5.2 Утицај начина моделирања нелинеарне статичке карактеристике разводника и оптерећења актуатора на појаву самосциловања у електрохидрауличном актуаторском систему**

**Прилог теорији пројектовања актуатора за управљање вектором потиска ракетног мотора са флексибилним млазником**

За случај са позиционим (опружним оптерећењем):

$$A_1 = \frac{2K_{Qx}K_f x_{io}^2}{A} \times \int_0^{\frac{\pi}{\omega}} \sqrt{1 - \frac{x_{io}}{A(p_s - p_R)} \sin \omega t} \sin^2 \omega t dt \quad (5.28)$$

Део претходног израза ван интеграла за инерцијално оптерећење може се написати у облику из којег је претходно издвојено:

$$\frac{2mK_{Qx}K_f a_y^2 \omega^2}{A} = 2Ka^2_y c_a \quad (5.29)$$

$$x_{ic} = A(p_s - p_R) / c_a \quad (5.30)$$

А део израза под интегралом може се написати у следећем облику:

$$\frac{ma_y \omega^2}{A(p_s - p_L)} = \frac{a_y c_a}{A(p_s - p_R)} \quad (5.31)$$

Претходним формализмом дошли смо до мере за померање клипњаче услед спољне силе (5.30).

Конечан израз за рад у случају инерцијалног оптерећења за актуатор може се написати у облику:

$$A_1 \approx \frac{2x_{io}^2 c_a K}{\omega} \int_0^{\pi} \sqrt{1 - \frac{x_{io}}{x_{ic}} \sin \theta} \sin^2 \theta d\theta \quad (5.32)$$

Рад сила можемо израчунати тако да сматрамо да проток линеарно зависи од померања разводног клипа без нелинеарности типа квадратног корена.

$$A_2 \approx \frac{2x_{io}^2 c_a K}{\omega} \int_0^{\pi} \sin^2 \theta d\theta \quad (5.33)$$

Решавањем интеграла добијамо:

$$A_2 = \frac{\pi x_{io}^2 c_a K}{\omega} \quad (5.34)$$

Корисно је за даљу анализу да нађемо количник извршеног рада са нелинеарним и линеарним описом разводника:

**5.2 Утицај начина моделирања нелинеарне статичке карактеристике разводника и оптерећења актуатора на појаву самосциловања у електрохидрауличном актуаторском систему**

$$\frac{A_1}{A_2} = \frac{2}{\pi} \int_0^{\pi} \sqrt{1 - \frac{x_{io}}{x_{ic}} \sin \theta} \sin^2 \theta d\theta \quad (5.35)$$

Из претходна два израза види се да рад који се догодио за период осциловања протока, се знатно разликује од начина како је описана статичка карактеристика разводника, линеарним, за мала померања или нелинеарним моделом, за велика померања разводног клипа. Да би јасно уочили ову разлику треба увести следеће бездимензионалне коефицијенте:

$$\alpha = \frac{x_{io}}{x_{ic}} \quad (5.36)$$

$$\beta = \frac{A_1}{A_2}$$

после чега се добија следећи облик зависности претходна два бездимензионална параметра:

$$\beta = \frac{2}{\pi} \int_0^{\pi} \sqrt{1 - \alpha \sin \theta} \sin^2 \theta d\theta \quad (5.37)$$

На слици 5.4 је приказан график решеног интеграла у Матлаб-у нумеричком интеграцијом. Може се запазити да је за  $\alpha=0.1$  разлика радова  $A_1$  и  $A_2$  приближно око 4%, што значи да при раду са тако малим осцилацијама не егзистирају значајне грешке. За веће вредности количника  $\alpha$  не може се занемарити разлика између радова  $A_1$  и  $A_2$ .

На основу претходног видимо да је  $\alpha$  ограничено до вредности 1 јер у супротном настају ефекти кавитације и неконтролисане промене смера протока, што значи потпуну деградацију електрохидрауличног актуационог система. Интеграл (5.37) не може се решити помоћу таблице елементарних интеграла и неопходно је било применити нумеричку интеграцију.

За случај са доминантним позиционим оптерећењем дефинише се следећа зависност и после примене идентичних математичких формализама као и у случају инерцијалног оптерећења, добија се:

$$A_1 = 2Kc_{el}x_{io}^2 \times \int_0^{\pi} \sqrt{1 - \frac{x_{io}c_{el}}{x_{ic}c_a} \sin \omega t} \sin^2 \omega t dt \quad (5.38)$$

У случају позиционог оптерећења, рад сила у случају линеарне статичке карактеристике разводника је:

## 5.2 Утицај начина моделирања нелинеарне статичке карактеристике разводника и оптерећења актуатора на појаву самосциловања у електрохидрауличном актуаторском систему

**Прилог теорији пројектовања актуатора за управљање вектором потиска ракетног мотора са флексибилним млазником**

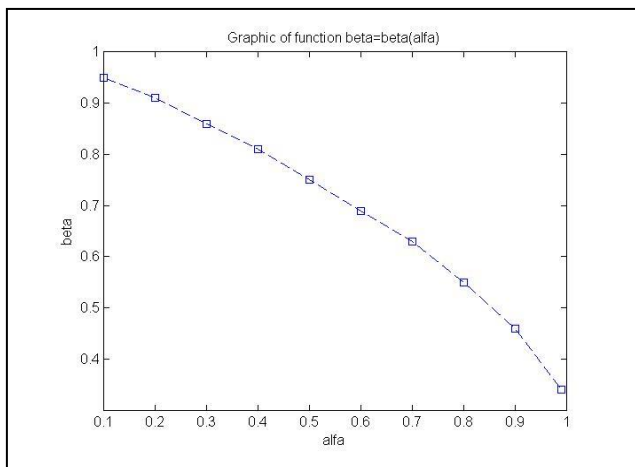
$$A_2 = \pi K c_{el} x_{io}^2 \tag{5.39}$$

Тражени количник сада има облик:

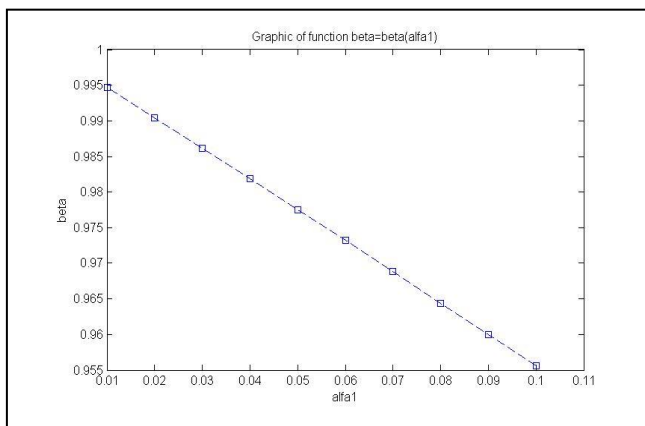
$$\beta = \frac{2}{\pi} \int_0^{\pi} \sqrt{1 - \frac{x_{io} c_{el}}{x_{ic} c_a} \sin \theta \sin^2 \theta} d\theta \tag{5.40}$$

$$\alpha_1 = \frac{x_{io} c_{el}}{x_{ic} c_a} \tag{5.41}$$

Који се такође може решити само нумерички у Матлаб-у, слика 5.5:



**Слика 5.4-График функције  $\beta = \beta(\alpha)$**



**Слика 5.5-График функције  $\beta = \beta(\alpha_1)$**

Претходно представља математичко истраживање утицаја статичке карактеристике разводника на динамичко понашање сисетма које се не моделира

**5.2 Утицај начина моделирања нелинеарне статичке карактеристике разводника и оптерећења актуатора на појаву самосциловања у електрохидрауличном актуаторском систему**

## **Прилог теорији пројектовања актуатора за управљање вектором потиска ракетног мотора са флексибилним млазником**

директно, а то је утицај спољних осцилација протока. У случају инерцијалног оптерећења само за мале амплитуде осцилација протока може се игнорисати чињеница како је моделован разводник. За веће амплитуде осцилација видимо да у случају инерцијалног оптерећења не можемо линеарним моделом описивати разводник већ то мора бити нелинеарни модел. Пошто су управљачки сигнали често малог интензитета за управљање вектором потиска, мањи од 1 %, често се користи линеарни опис, а занемарује се проблем манифестације нелинеарне природе у функцији од спољних осцилација. Оно што је посебно битно односи се на чињеницу да се претходни проблем далеко мање манифестује у случају позиционог еластичног оптерећења, практично разлика је за ред величине мања у односу на случај са инерцијалним оптерећењем. Зато при пројектовању актуаторског система за флексибилни млазник смемо моделовати за мала померања линеарним описом статичку карактеристику разводника. У литератури је била позната претходно наведена методологија само за инерцијално оптерећење а овде је примењена и на еластично-позиционо оптерећење.

### **5.2 Утицај начина моделирања нелинеарне статичке карактеристике разводника и оптерећења актуатора на појаву самосциловања у електрохидрауличном актуаторском систему**

### 5.3 Принудне осцилације, самоосцилације и комбинација принудних осцилација и самоосциловања

Неопходно је навести основне особине хармонијске линеаризације или описне функције. Ова метода се користи у анализи прве класе нелинеарних система која у себи садржи једну нелинеарност. Ако се на улаз нелинеарности доведе хармонијски сигнал

$$x = a \sin(\omega t) \quad (5.42)$$

на излазу нелинеарности ће доминантан бити први хармоник осциловања док ће виши хармоници имати малу амплитуду. Када ови хармоници прођу кроз линеарни део система, они ће имати још мању амплитуду према амплитуди основног хармоника. Линеарни систем има својство филтера, што је јасно ако се познаје референтна логаритамска амплитудно фреквентна карактеристика, посебно за системе трећег и вишег реда. Ово нам омогућава да приликом хармонијске линеаризације користимо само први хармоник. У систему практично постоји нелинеарност типа филтера. Излазна променљива (први хармоник) из нелинеарности тада има облик:[77]

$$x_i = N(x) = [q(a) + \frac{q'(a)}{\omega_1} s]x = 0 \quad (5.43)$$

Коефицијенти  $q(a) + q'(a)$  се одређују према једначинама:

$$q(a) = \frac{1}{\pi a} \int_0^{2\pi} N(a \sin \psi) \sin k \psi d\psi \quad (5.44)$$

$$q'(a) = \frac{1}{\pi a} \int_0^{2\pi} N(a \sin \psi) \cos k \psi d\psi \quad (5.45)$$

Условно, хармонијски линеаризована преносна функција статичке нелинеарности је:

$$W_H(a, s) = \frac{Y(s)}{X(s)} = [q(a) + \frac{q'(a)}{\omega_1} s]x = 0 \quad (5.46)$$

Фреквентна карактеристика се за  $s = j\omega$  се може написати као:

$$W_H = q(a) + jq'(a) \quad (5.47)$$

И као што се види из претходне једначине не зависи од фреквенције већ само од амплитуде.

Треба напоменути да претходно важи за симетричне статичке нелинеарности а да се математички могу хармонијски линеаризовати и несиметричне нелинеарности. Поред тога треба напоменути да код динамичких нелинеарности, коефицијенти имају следећу зависност:

$$q(a, \omega) + q'(a, \omega) \quad (5.48)$$

### 5.3 Принудне осцилације, самоосцилације и комбинација принудних осцилација и самоосциловања

што значи да зависе и од фреквенције и од амплитуде.

Детаљније је метода хармонијске линеаризације је дефинисана литератури [33], [78] и [79]. Важно је напоменути да за већину типских нелинеарности су одређени коефицијенти и систематизовани таблично и у даљим анализама у овом раду користе се табличне вредности. За одређивање самосциловања и његове стабилности у систему па тако и у актуационом систему користи се алгебарска метода, фреквентна метода и метода малог параметра. Ово су математички дефинисане процедуре и дате су у литератури [26]. У овом раду акценат није на изолованом посматрању самосциловања, већ на анализи рада актуаторског система у условима када постоји самосциловање и принудне осцилације. Поред тога анализа се ради за три најзначајнија случаја: када систем посматрамо као систем прве врсте, једна нелинеарност и еквивалентни линеарни део и то за две најважније нелинеарности (линеарни део са засићењем (статичка карактеристика разводника), линеарни део са зоном неосетљивости и засићењем (друга варијанта статичке карактеристике разводника са преклопом,); опција када се тражи повећана крутост и нелинеарност типа хистерезиса (описује се катактер оптерећења актуатора).

### Принудне осцилације актуационог система [26], [27],

Како је у претходном поглављу наведено, проблематика самосциловања је повезана са унутрашњом структуром система и унутрашњим енергетским стањима. Самоосцилације су стабилне непригушене сопствене осцилације. Њихова амплитуда и фреквенција не зависе од почетног тренутка. Јасно је да нелинеарна природа система не прихвата принцип супер позиције, тако да комбинација више осцилација ствара веома сложену ситуацију за пројектну анализу. У анализи понашања актуаторских система има смисла ову анализу радити само као опцију за нелинеарне системе прве врсте где се кроз математички опис дефинише само једна нелинеарност и линеарни део.

Ако претпоставимо да принудне осцилације имају коначан број виших хармоника можемо написати:

$$x = x_1 + \sum_{k=2}^n x_k \quad (5.49)$$

$$x_1 = a \sin(\omega t + \varphi) \quad (5.50)$$

Из претходног је јасно да је са  $x_1$  означен први хармоник, а  $x_k$  су означени виши хармоници. Може се написати:

$$x_k = \delta_k \sin(k\omega t + \varphi_k) \quad (5.51)$$

Јасно је да се претходна једначина односи на више хармонике. Свако спољно дејство можемо разложити преко Фуријевог реда:

$$f(t) = B_1 \sin \omega t + \sum_{k=2}^n B_k \sin(k\omega t + \nu_k) \quad (5.52)$$

### 5.3 Принудне осцилације, самоосцилације и комбинација принудних осцилација и самоосциловања



**Прилог теорији пројектовања актуатора за управљање вектором потиска ракетним мотором са флексибилним млазником**

Виши хармоници на излазу из нелинеарности  $N(x)$  се могу добити као:

$$F_r = a \sum_{k=2}^n (r_k \sin k\psi + s_k \cos k\psi) \quad (5.53)$$

$$\psi = \omega t + \varphi \quad (5.54)$$

Коефицијенти се израчунавају према познатим изразима:

$$r_k = \frac{1}{\pi a} \int_0^{2\pi} N(a \sin \psi) \sin k\psi d\psi \quad (5.55)$$

$$s_k = \frac{1}{\pi a} \int_0^{2\pi} N(a \sin \psi) \cos k\psi d\psi \quad (5.56)$$

Ако желимо да одредимо више хармонике на основу једначине (5.53), можемо написати више једначина следећег облика:

$$Q(s)x_k + R(s)a(r_k \sin k\psi + s_k \cos k\psi) = S(s)B_k \sin(k\omega t + \nu_k), k = 2, 3, \dots, n \quad (5.57)$$

Ако напишемо да је:

$$\sin(k\omega t + \nu_k) = \sin(k\psi - k\varphi + \nu_k) \quad (5.58)$$

и ово искористимо у једначини (5.53) добијамо изразе за амплитуду и фазу виших хармоника у следећем облику:

$$\Delta_k = \left| \frac{-R(jk\omega)}{Q(jk\omega)} (r_k + js_k) e^{jk\varphi} + \frac{S(j\omega k) B_k}{Q(j\omega k) a} e^{j\vartheta_k} \right| \quad (5.59)$$

$$\varphi_k = \arg \left| \frac{-R(jk\omega)}{Q(jk\omega)} (r_k + js_k) e^{jk\varphi} + \frac{S(j\omega k) B_k}{Q(j\omega k) a} e^{j\vartheta_k} \right|; k=2, 3, 4, \dots, n \quad (5.60)$$

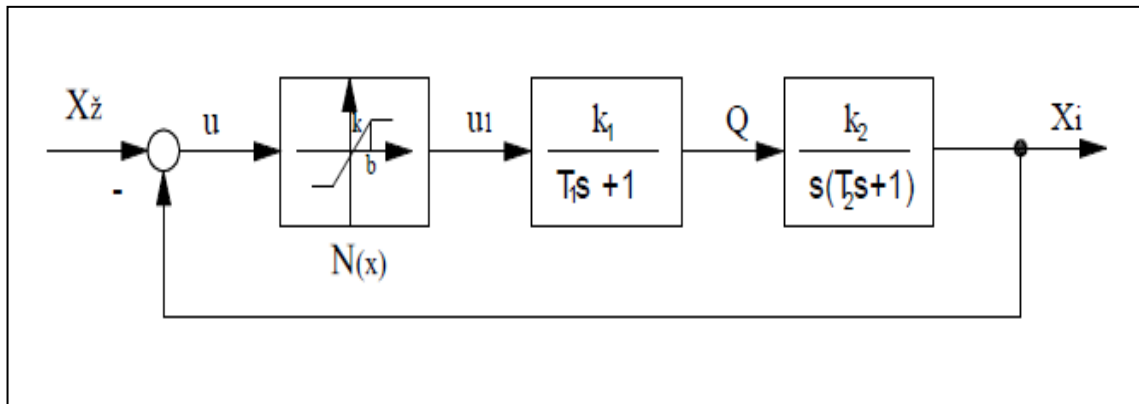
Јасно је да се претходна два израза знатно упрошћавају ако имамо чист карактер синусоидалних осцилација.

Из праксе је познато да је за анализу система аутоматског управљања довољно познавати највише трећи хармоник и за главне нелинеарности које постоје у електро хидрауличном актуатору они се израчунавају према формулама (5.59, 5.60). Ово је практично један виши хармоник од другог који се узима у обзир када се посматра еластична природа ракете.

**5.3 Принудне осцилације, самоосцилације и комбинација принудних осцилација и самоосциловања**

**Прилог теорији пројектовања актуатора за управљање вектором потиска ракетним мотором са флексибилним млазником**

У случају актуаторског система појава могућег самоосциловања се разматра на примеру нелинеарности засићења по управљању у складу са структурним дијаграмом на следећој слици 5.6.



**Слика 5.6-Актуаторски систем са засићењем по управљању-електрични сигнал [26]**

$$W_1(s) = \frac{k_1}{T_1s + 1} \quad (5.61)$$

је реносна функција разводника.

$$W_2(s) = \frac{k_2}{s(T_2s + 1)} \quad (5.62)$$

је преносна функција цилиндар-оптерећење

На основу слике 5.6 можемо даље писати:

$$\varepsilon = X_{iz} - X_i \quad (5.63)$$

$$u = N(x) \quad (5.64)$$

$$(T_1s + 1)Q = k_1u \quad (5.65)$$

$$(T_2s + 1)sX_i = k_2Q \quad (5.66)$$

Карактеристични полином за преносну функцију затвореног кола актуаторског система је:

$$T_1T_2s^3 + (T_1 + T_2)s^2 + s + k_1k_2q(a) = 0 \quad (5.67)$$

Врло лако прелазимо у фреквентни домен:

$$X(a, \omega) = 0, k_1k_2q(a) - (T_1 + T_2)\omega^2 = 0 \quad (5.68)$$

$$Y(a, \omega) = 0, \omega - T_1T_2\omega^3 = 0 \quad (5.69)$$

**5.3 Принудне осцилације, самоосцилације и комбинација принудних осцилација и самоосциловања**

Из друге, па затим из прве једначине, добија се:

$$\omega = \frac{1}{\sqrt{T_1 T_2}} \quad (5.70)$$

$$q(a) = \frac{1}{k_1 k_2} \left( \frac{1}{T_1} + \frac{1}{T_2} \right) \quad (5.71)$$

На основу таблице:

$$q(a) = K, \quad (5.72)$$

$$K k_1 k_2 \geq \left( \frac{1}{T_1} + \frac{1}{T_2} \right)$$

Израз (5.72) је услов за појаву самоосциловања у актуаторском систему када је  $K$ , коефицијент нагиба рампе промене управљачког сигнала. За случај релејне нелинеарне карактеристике:

$$q(a) = \frac{2c}{\pi b} q_0 = \frac{1}{k_1 k_2} \left( \frac{1}{T_1} + \frac{1}{T_2} \right) \quad (5.73)$$

$$q_0 = \frac{2b}{a} \sqrt{1 - \frac{b^2}{a^2}}$$

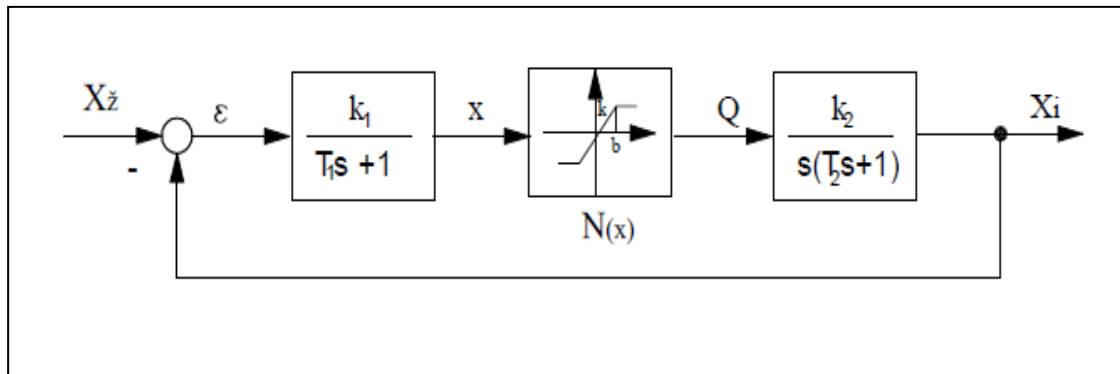
Из претходна два израза може се израчунати услов за појаву самоосциловања, према изразу:

$$c \geq \frac{1}{2} \pi b q_0 \frac{1}{k_1 k_2} \left( \frac{1}{T_1} + \frac{1}{T_2} \right), \text{ који представља вредност релејног сигнала.} \quad (5.74)$$

За коефицијент хармонијске линеаризације користимо табличну вредност за нелинеарност типа засићења са линеарним делом, која адекватно описује карактер засићења по управљању. Поред ње може се у овој анализи користити и нелинеарност типа троположајног релеа, која би хардверски одговарала on-off хидрауличном разводнику или релејном закону управљања.

Када је у питању актуаторски систем ништа мање није интересантно размотрити и ситуацију када се нелинеарност налази између два линеарна дела. То је случај засићења протока из разводника. Слично као и у претходном случају, али је положај нелинеарности сада између два линеарна дела и другачије изгледа карактеристични полином. Узима се да разводник има преносну функцију првог реда и иза њега се поставља нелинеарност типа засићења по протоку а оптерећење преносну функцију другог реда систем је приказан на слици 5.7

**Прилог теорији пројектовања актуатора за управљање вектором потиска ракетним мотором са флексибилним млазником**



**Слика 5.7-Актуаторски систем са засићењем по протоку [26]**

$$(T_1s + 1)(T_2s + 1)sx + k_1k_2N(x) = k_1(T_2s + 1)sg(t) \quad (5.75)$$

У условима стационарног радног режима, када је прелазни процес завршен, из литературе [146], користи се следећи израз у пару са изразом (5.75):

$$Q(o)x^0 + R(0)N^0(x^0, a) = C_f \quad (5.76)$$

Па се може добити:

$$k_1k_2N^0(x) = k_1g_1t \quad (5.77)$$

Ако сада узмемо табличне вредности за  $N^0(x^0, a)$ , на основу литературе [146],

добијају се изрази за:

$$N^0(x^0, a) = ka[\chi(\beta_1) - \chi(\beta_2)] \quad (5.78)$$

$$\beta_1 = \frac{b + x^0}{a} \quad (5.79)$$

$$\beta_2 = \frac{b - x^0}{a} \quad (5.80)$$

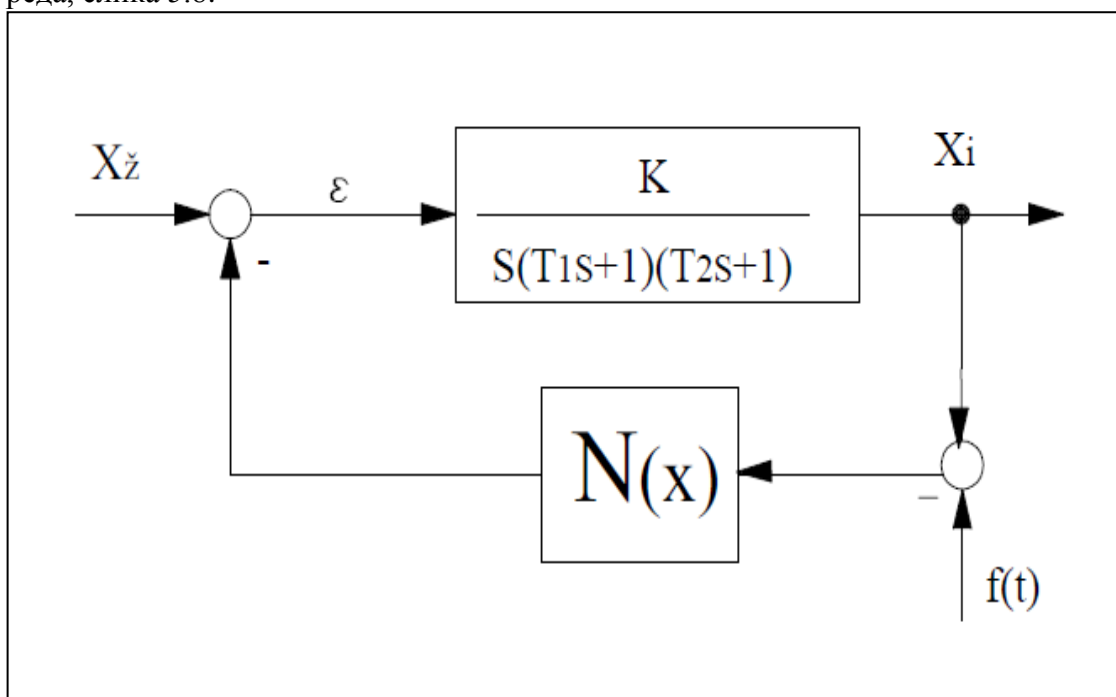
Такође у литератури [26], постоје табличне вредности, Табела 5.2 за  $[\chi(\beta)]$ , тако да могуће израчунати на основу (5.77) и (5.78) амплитуду самоосциловања (што је јако корисно) него њену вредност процењивати из симулационих модела.

Табела 5.2-нумеричке вредности за  $\lambda$  у функцији од  $\beta$

$\beta$	1.0	0.9	0.8	0.7	0.6	0.5	0.3	0.2	0.1	0.0
$\lambda$	0.500	0.459	0.439	0.401	0.373	0.359	0.344	0.321	0.318	0.318
	0	5	8	1	5	0	1	5	9	3

Поред претходно размотрених примера корисно је анализирати када је актуациони систем изложен осцилацијама које потичу директно од оптерећења:

Посматрајмо актуаторски систем који је описан преносном функцијом трећег реда, слика 5.8:



Слика 5.8-Оптерећење актуатора је изложено принудним осцилација [26]

$$(T_2^2 s^2 + T_1 s + 1) s X_i = k_1 X_i \quad (5.81)$$

$$x_i = N(x) \quad (5.82)$$

$$\varepsilon = f(t) - X_i \quad (5.83)$$

Карактеристични полином је у овом случају:

$$(T_2^2 s^2 + T_1 s + 1) s x + k N(x) = (T_2^2 s^2 + T_1 s + 1) s f(t) \quad (5.84)$$

Овде је корисно принудне осцилације описати преко развоја у Фуријев ред:

### 5.3 Принудне осцилације, самоосцилације и комбинација принудних осцилација и самоосциловања

**Прилог теорији пројектовања актуатора за управљање вектором потиска ракетним мотором са флексибилним млазником**

$$f(t) = \frac{8h}{\pi^2} (\sin \omega t - \frac{1}{9} \sin 3\omega t + \dots), \omega = \frac{2\pi}{T} \quad (5.85)$$

$$Q(s) + R(s) \left[ q(a, x^0) + \frac{\dot{q}(a, x^0)}{\omega_1} s \right] x^* = 0 \quad (5.86)$$

а на основу (5.86) решава се (5.84) користећи табличне вредности за познате нелинеарности. Затим одређујемо амплитуду осциловања у актуаторском систему, после побуде преко оптерећења и утицаја нелинеарности која описује карактер оптерећења.

**Принудне осцилације и истовремена појава принудних осцилација и самоосциловања**

Овде имамо случај када је велика разлика између фреквенција и када је мала разлика. Прво се анализира случај када је разлика фреквенција условно велика.

$$Q(s)x + R(s)N(s) = 0 \quad (5.87)$$

$$x = x^0 + x^* \quad x^* = a \sin \omega_1 t \quad (5.88)$$

$$x^0 = a^0 \sin(\omega_2 t + \varphi) \quad (5.89)$$

Ако сада претходне једначине (5.87)-(5.89) повежемо са (5.43), можемо добити

$$Q(s) + R(s) \left[ q(a, x^0) + \frac{\dot{q}(a, x^0)}{\omega_1} s \right] x^* = 0 \quad (5.90)$$

Карактеристични полином:

$$Q(\lambda) + R(\lambda) \left[ q(a, x^0) + \frac{\dot{q}(a, x^0)}{\omega_1} s \right] = 0 \quad (5.91)$$

Преласком у фреквентни домен добијамо:

$$X(a, \omega, x^0) = 0, Y(a, \omega, x^0) = 0 \quad (5.92)$$

На основу табличних вредности за разне нелинеарности може се написати:

$$N^0 = N(a(x^0), x^0) = \Phi(x^0) \quad (5.93)$$

**5.3 Принудне осцилације, самоосцилације и комбинација принудних осцилација и самоосциловања**

**Прилог теорији пројектовања актуатора за управљање вектором потиска ракетним мотором са флексибилним млазником**

Из претходне једначине видимо да смо добили другу нелинеарност, уместо почетне нелинеарности  $F(s)$  када је кроз њу проша сигнал  $x^0(t)$ .

Нова нелинеарна функција је обухватила оба осцилаторна сигнала и она се може линеаризовати једноставно:

$$\Phi = k_n x^0 \quad (5.94)$$

где је:

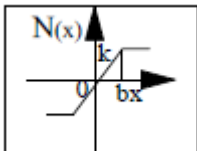
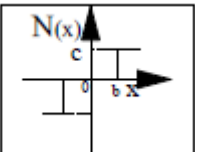
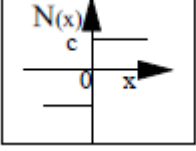
$$k_n = \left( \frac{d\Phi}{dx^0} \right)_{x^0=0} = \left( \frac{dN^0}{dx^0} \right)_{x^0=0} \quad (5.95)$$

Тада се претходна једначина (5.91), може написати:

$$[Q(s) + k_n R(s)]x^0 = 0 \quad (5.96)$$

Вредности коефицијента  $k_n$  се могу добити у таблицама, из литературе [26], и потпуно је јасно да вредност овог коефицијента зависи од амплитуде принудних осцилација и за важне нелинеарности у хидрауличном систему дефинисане су у следећој табели 5.3. Са познатим  $k_n$  и дефинисане хармонијске функције односно њених коефицијената може се израчунати амплитуда самоосциловања за обе фреквенције у нелинеарном актуаторском систему.

**Табела 5.3-Изрази за коефицијент  $k_n$  за највежњије нелинеарности у актуаторском систему [26]**

Нелинеарност	Вредност коефицијента $k_n$
	$k_n = \frac{2k}{\pi} \arcsin \frac{b}{a_c}$
	$k_n = \frac{2c}{\pi \sqrt{a_c^2 - b^2}}$
	$k_n = \frac{2c}{\pi a_c}$

Претходно опсује осциловање система са две сопствене фреквенце што је својствено нелинеарним системима. Фреквенце  $\omega_1, \omega_2$  могу бити обе од принудних осцилација, може прва бити од принудних а друга од самоосциловања и обрнуто, прва од самосциловања а друга од принудних осцилација. Претходни случајеви се даље могу детаљно теоријски разматрати. Посебно задња два случаја **5.3 Принудне осцилације, самоосцилације и комбинација принудних осцилација и самоосциловања**

**Прилог теорији пројектовања актуатора за управљање вектором потиска ракетним мотором са флексибилним млазником**

настају у условима егзистенције спољне силе са периодичном променом свог интензитета. У оквиру потпуне анализе рада актуационог система у окружењу принудних осцилација и самоосциловања) потребно је размотрити још два карактеристична случаја:

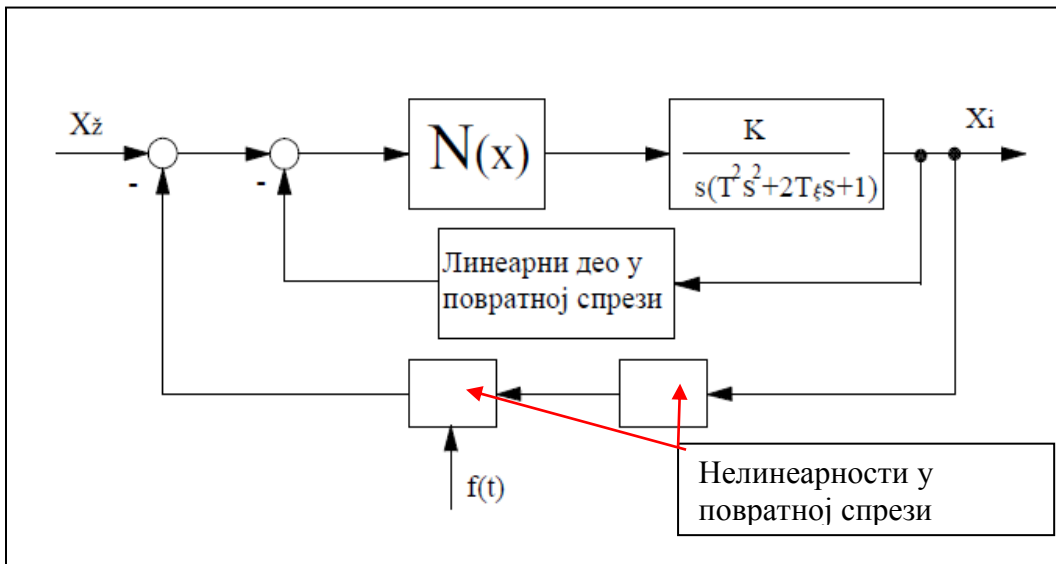
**Спољне вибрације и актуаторски систем [26]**

- Рад актуационог система при сталном постојању самосциловања
- Рад актуационог система када вибрације исправљају (пеглају) нелинеарности

Претходно наведени други случај је посебно важн да се анализира када се разматра проблематика актуационог система за флексибилни млазник, пошто су тада присутне вибрације од рада ракетног мотора (пулзације при сагоревању се преносе на флексибилну везу) и посебно би било корисно када би овај ефекат делимично компнезовао нелинеарну природу електрохидрауличког актуационог система. Треба овде нагласити да је исти ефекат могућ и са вибрацијама које потичу од самоосциловања.

**Понашање актуационог система када спољне вибрације исправљају пеглају нелинеарности:**

Хидраулични актуациони систем приказан је на слици 5.9. За ову анализу је посебно важно где се уносе спољне осцилације у структуру актуационог система. У овом раду интересантан случај је када вибрације долазе на нелинеарни елемент у систему, што се може описати следећим једначинама:



**Слика 5.9-Осцилације у актуаторском систему «пеглају» нелинеарности [26]**  
 $x = x^0 + x^*$  (5.97)

$$x^0 = x_1 - x_3$$

$$x^* = f(t) = B \sin \omega t$$
 (5.98)

**5.3 Принудне осцилације, самоосцилације и комбинација принудних осцилација и самоосциловања**



## Прилог теорији пројектовања актуатора за управљање вектором потиска ракетним мотором са флексибилним млазником

У овом случају анализе амплитуду и фазу принудних вибрационих осцилација задајемо:

$$a = b \quad \varphi = 0 \quad (5.99)$$

Претходно смо дефинисали нову нелинеарну функцију која описује двоструко осциловање:

$$\Phi(x^0) = N^0 = \frac{1}{\pi a} \int_0^{2\pi} F(x^0 + B \sin \psi) d\psi \quad (5.100)$$

Ако се ради о типској нелинеарности могу се користити готова таблична решења за  $N^0$  као и за коефицијент  $k_n$ .

Ново добијену нелинеарност, после линеаризације преко коефицијета  $k_n$  можемо назвати вибрационом линеаризацијом нелинеарности.

Да би се размотрила друга варијанта компензације нелинеарне природе система, потребно је затворити повратну спрегу око нелинеарности, кроз коју би пролазило самоосциловање високе фреквенце (разматрани проблем има смисла само у овом случају) како би се избегло да се овом повратном спрегом пренесу остале фреквенце у систему, што је и циљ.

Општи израз за претходно може се описати једначином:

$$Q_m(s)x + R_m(s)N(s) = N_1(s)x_{sis} \quad (5.101)$$

Претходну једначину као и у претходним анализама могуће је разделити на два дела:

$$Q_m(s) + R_m(s)[q(a, x^0) + \frac{q'(a, x^0)}{\omega_1} s]x^* = 0 \quad (5.102)$$

$$Q_m(s)x^0 + R_m(s)N^0(x^0, a) = N_1(s)x_{sis} \quad (5.103)$$

Слично као и у претходним анализама, из прве једначине на основу познатих коефицијената хармонијске линеаризације за стандардне нелинеарности, израчунава се амплитуда осциловања, и налажањем испеглане нелинеарности можемо извршити линеаризацију преко коефицијента  $k_n$  за који су нам познате табличне вредности.

#### 5.4 Идентификација и структура математичких модела за актуатор флексибилног млазника-доминантан опис хистерезиса

У раду је посебно поглавље посвећено моделирању флексибилног млазника. Овде желимо да ставимо акценат на чињеницу да структурни хистерезис који приказује еластичне особине материјала, може бити описан и посебном диференцијалном једначином (5.104). На тај начин идентификација добија и један потпуно нов задатак да одреди парамететре потребне за решавање такве диференцијалне једначине која описује еластични хистерезис. Једначина (5.104) која описује модел хистерзиса има значајне могућности да опише различите облике хистерзисне петље што се касније може укључити у Look Up функцију са симулациону проверу алгоритамских решења управљања или се подаци директно могу користити у симулационом моделу.

$$\frac{dz}{A - |z|^n [\beta - \gamma \operatorname{sgn}(\xi' z)]} = d\xi \quad (5.104)$$

Параметри из (5.104) јасно су назначени на слици 5.10. Једначина (5.104) је добро познати Bouc-Wen-ов модел хистерзиса.

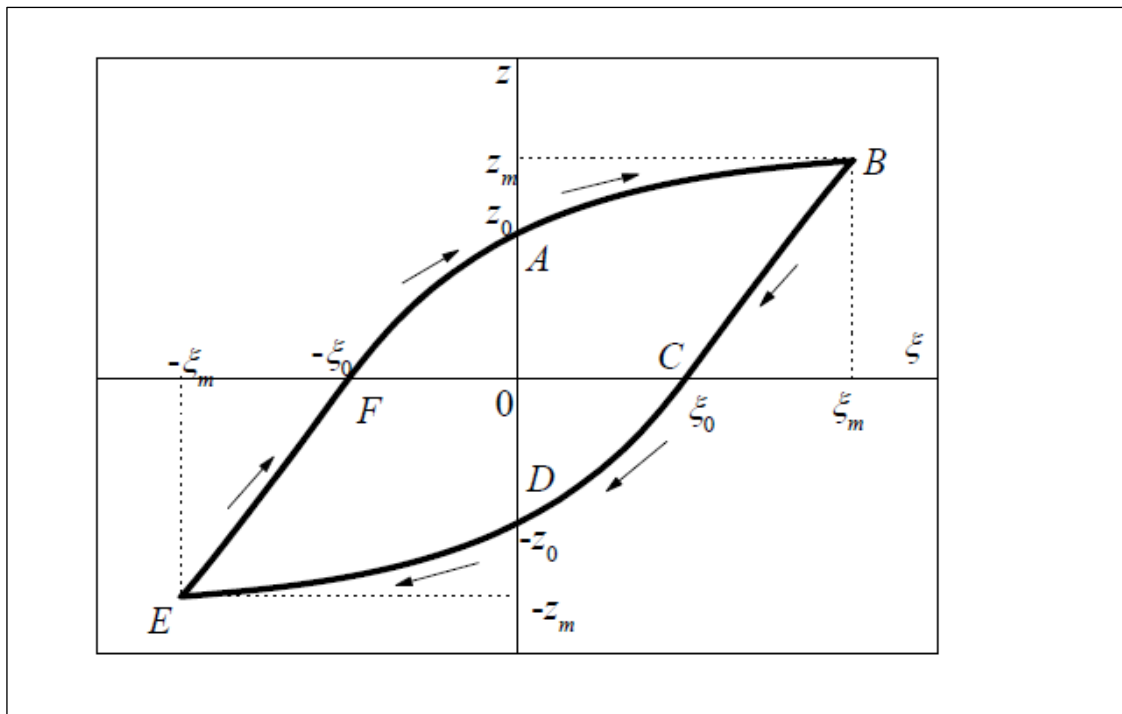
Претходно размотрено захтева да се идентификација динамике актуационог система флексибилног млазника посматра на посебан начин. Снима се статичка карактеристика оптерећеног актуационог система и из ње се могу дефинисати параметри за опис прма једначини (5.104) али и дефинисати нелинеарност актуационог система са зоном неосетљивост, која зависи од ширине хистерзисне петље оптерећеног актуаторског система и којој се додаје интегратор, који описује доминантну физичку и математичку природу електрохидрауличног актуационог система. Овај приступ се може прихватити као значајно боља опција од оне која се нуди у Матлабу, јер нисмо приморани да априори изаберемо тип модела (линеарни или нелинеарни) и ред система, па да затим добијемо преносну функцију актуаторског система или нелинеарни опис система преко полинома.

Треба посебно нагласити и да се комплетан опис оптерећеног и неоптерећеног актуационог система може приказати преко хистерезисне функције. На пример, ако посматрамо актуациони систем и генеришемо тачне управљачке вредности и посматрамо излазну позицију актуатора, дијаграм жељена вредност позиције и стварна вредност позиције има карактер хистерезисне петље. У ту хистерезисну петљу улазе сви зазори и трења у неоптерећеном актуаторском систему. Ширина ове хистерезисне петље дефинише квалитет актуатора у ширем смислу, односно ширина хистерезисне петње може одмах да се преведе у тачнот рада. Потпуно је логично да поред наведених особина: тачност, линеарност, симетрија, поменемо и поновљивост која је једнака половини хистерзиса код симетричних хистерезисних петљи каква је предмет разматрања и у овом раду.

Електрохидраулични актуациони систем је карактеристичан по томе, што је прва нелинеарност типа хистерезиса везана за електрохидраулични серво разводник. Тачност рада разводника, где је узета у обзир прво магнетна природа електро-механичког претварача, затим трење и зазори у одзиву, везана је за ширину хистерзисне петље. Та петља је даље индиректно у хистерисној петљи улаз-излаз

#### 5.4 Идентификација и структура математичких модела за актуатор флексибилног млазника-доминантан опис хистерезиса

актуационог система. Следећа хистерезисна петља је хистерезис оптерећења. Пошто није могуће директно мерити улаз–излаз актуационог система са флексибилним оптерећењем, већ индиректно, онда има смисла уместо позиције оптерећења, користити информацију о сили на актуатору која је директно пропорционална оптерећењу. Када се ова сила мери директно на клипњачи цилиндра, она практично одговара стварној сили која изазива еластично оптерећење. Координату померања на оптерећењу не можемо мерити али можемо узети у обзир позицију клипњаче цилиндра када је сила једнака нули, релаксирана еластична структура, тако да се може добити на тај начин основни актуаторски хистерезис са оптерећењем, пре свега експериментално.



Слика 5.10-График хистерзиса еластичног оптерећења [66], [80],

У смислу претходно наведеног у оквиру расположивог потенцијала за експерименталну проверу, дефинише се посебан експеримент којим треба да се добије дијаграм хистерзиса, позиција–сила, сила мерена и дијаграм који ће приказати зависност сила–позиција, тако што ће се сила рачунати и на основу мерења притиска у коморама цилиндра. У оба случаја извршиће се софтверска компензација несиметрије појачања по притиску у разводнику. Ова два дијаграма ће бити веома корисна у процени квалитета актуатора и могућности да се избегне коришћење давача силе. Генерално, квалитет актуатора се процењује на основу хистерзиса, жељена и стравна позиција, и то у случају оптерећеног и неоптерећеног актуатора.

На слици 5.11 приказан је модел симулационог коришћења Bouc-Wen-ов модела хистерзиса у оквиру провере динамике електрохидрауличног актуационог система за управљање вектором потиска флексибилним млазником, што је јединствено

#### 5.4 Идентификација и структура математичких модела за актуатор флексибилног млазника-доминантан опис хистерзиса



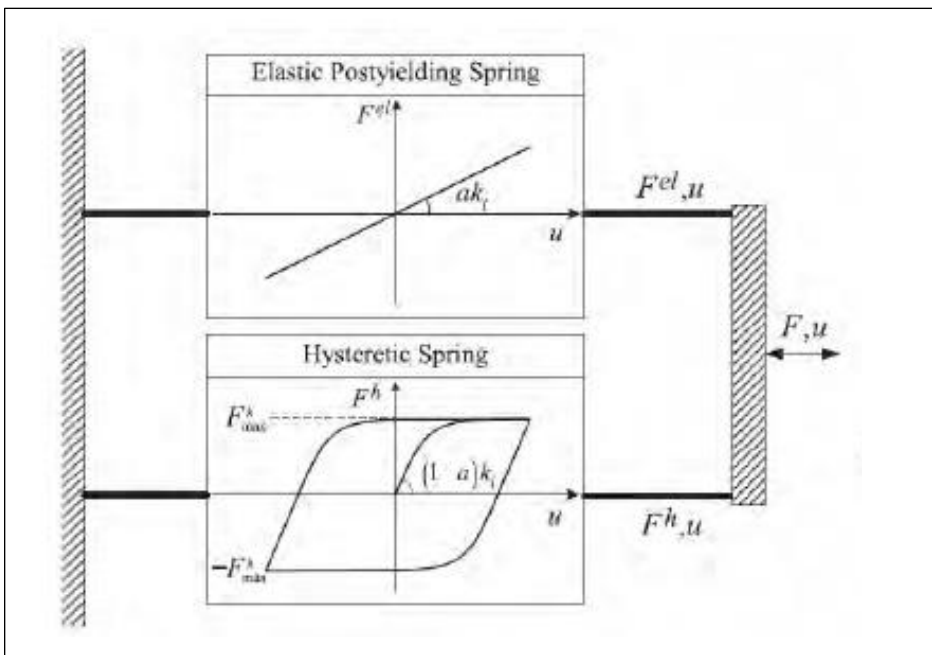
**Прилог теорији пројектовања актуатора за управљање вектором потиска ракетног мотора са флексибилним млазником**

модел прикаже преко две опруге у паралелној вези. Једна линеарна еластична опруга и једна нелинеарна са карактеристиком хистерезиса, слика 5.12

$$J\ddot{\beta}(t) + b\dot{\beta}(t) + k\beta(t) = \tau(t) \quad (5.105)$$

$$J\ddot{\beta}(t) + b\dot{\beta}(t) + M(t) = \tau(t) \quad (5.105a)$$

$$M(t) = ak\beta(t) + (1 - a)kz(t) = \tau(t) \quad (5.106)$$

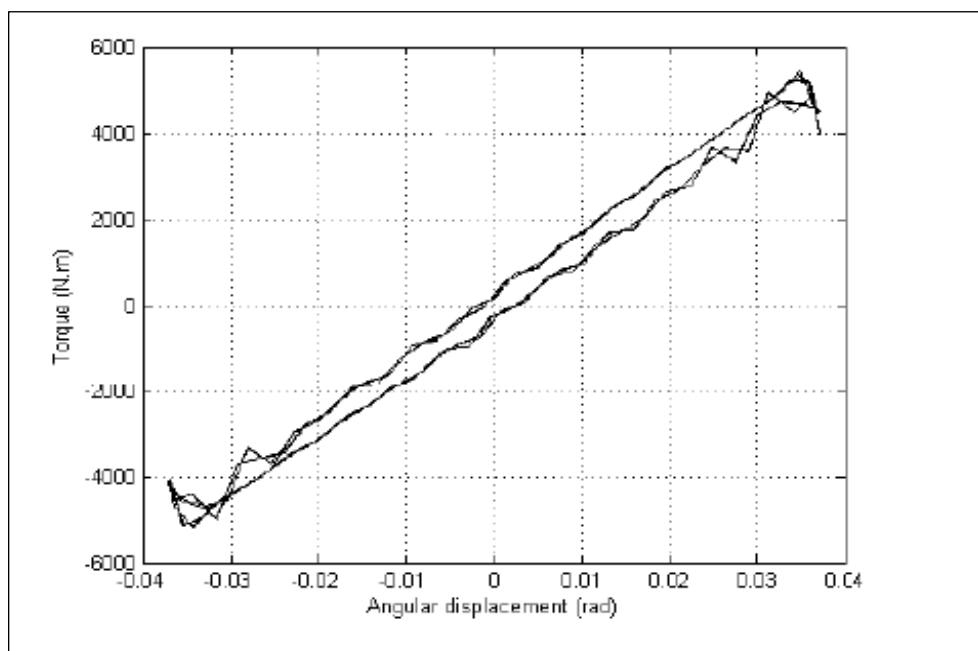


**Слика 5.12-Модификација Bouc-Wen-ов модела [81]**

Јасно је да је  $z(t)$  бездимензиона величина која репрезентује хистерезис у изразу (5.104) а да је  $a$  еластична константа такође дефинисна у претходном изразу (5.104).

Посебно би се могло нагласити изузетна сличност дијаграма хистерезиса који је експериментално добијен из литературе [150] за реални флексибилни млазник, слика 5.13 и дијаграма који је добијен приликом моделовања у Матлаб-у коришћењем функције Look Up, слика 3.27 у поглављу 3.7, што говори о успешности приступа моделирању флексибилног оптерећења коришћењем ове технологије.

**5.4 Идентификација и структура математичких модела за актуатор флексибилног млазника-доминантан опис хистерезиса**



Слика 5.13-Крива хистерезиса добијена експериментално [80]

Слика 5.13 приказује да у зони малих померања имамо најмање изражену природу хистерезиса, а то је очекивана радна тачка у случају управљања вектором потиска флексибилним млазником. Без обзира што је у зони малих померања најмање изражен хистерезис, на основу закључака из доступне литературе сматра се да овај нелинеарни феномен не треба занемарити пре свега у разматрању интеракције утицаја динамике актуатора на динамику ракете.

## 6.0 Симулациони резултати

У овом поглављу наводе се корисне симулационе провере које нису директно везане за верификацију синтетизованог алгоритма управљања али су корисна при пројектовању електрохидрауличног актуационог система.

### 6.1 Увођење у математички модел перформанси рачунарског система

Ово није директно увођење математичког модела у синтезу управљања, али је врло корисно да се провере перформансе система, када се управљачки алгоритам прикаже и у дискретном облику. Јасно је да дискретни системи садрже мању количину информације о систему од аналогног али је и потпуно јасно да дискретни запис пружа много веће могућности за реализацију управљачког алгоритма. Постоје разне препоруке за избор периоде одабирања код рачунарске имплементације управљачког алгоритма и оне су често произвољне.

Једна препорука је заснована на чињеници да се узме у разматрање ред система. За први ред, препорука гласи 4-10 пута мања вредност од временске константе. Ако је у питању систем другог реда, тада можемо да дефинишемо периоду одабирања према вредности која је око 10 пута већа од природне фреквенције за доминантан пар коњуговано комплексних полова система. Поред тога код избора периоде одабирања води се рачуна о брзини поремећаја који делују пре свега на објекат. Код хидрауличних система некада постоји и правило да се периода бира бар 10 пута већа од пропусног опсега серво разводника.

Све што је претходно наведено говори да нема једнозначног приступа. Даље се жели систематизовати приступ за избор периоде одабирања, посебно када је у питању управљање вектором потиска флексибилним млазником. Наравно, да је део аксиоматског приступа при овом избору, Шенонова теорема која говори о минималној периоди одабирања. У анализи ове проблематике отвара се питање да ли треба тежити највећој могућој периоди одабирања. Можда би се могло помислити да треба тежити, посебно ако се узме у обзир да је идеалан односно адекватан алгоритам управљања и онај који је и најбржи, што се и интуитивно може закључити.

У сваком случају код избора периоде одабирања у првом прилазу треба узети у разматрање динамику објекта, карактеристике актуатора и начин идентификације ако се користи математички модел добијен идентификацијом.

Највећи ризик код избора што мање периоде одабирања носе следеће две чињенице:

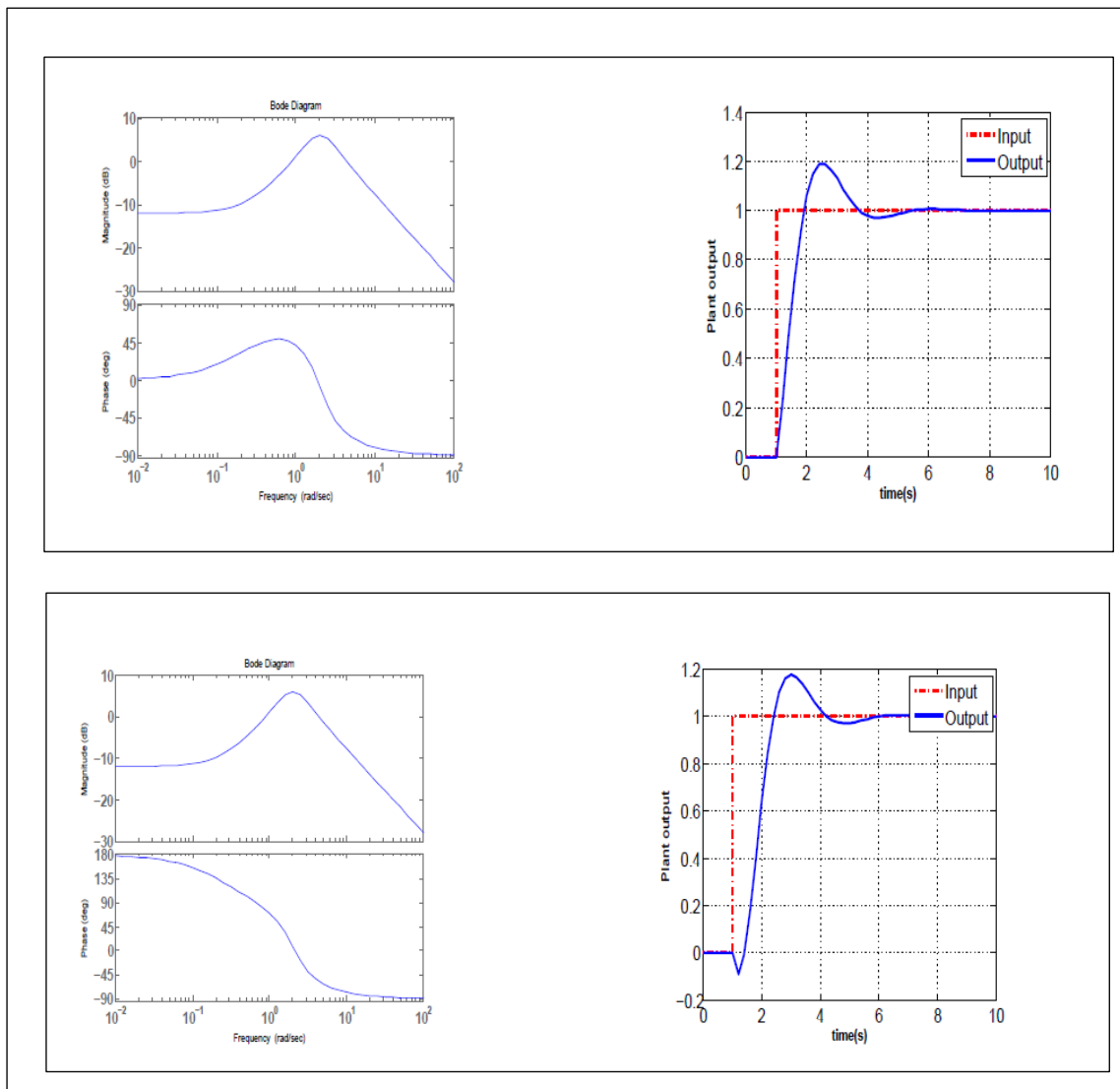
-Сувише мала периода одабирања омогућава да имамо утицај немоделоване динамике система преко шума.

-Може доћи, при преласку из аналогног у дискретни запис система до тога да од претходног система, кога можемо карактерисати као минимално фазни да добијемо неминимално фазни систем. Ово последње је много важније од прве чињенице јер тада се може добити одзив у облику као на слици 6.1, где прво одзив крене у негативну страну а затим у жељену страну. То у сваком случају није пожељно, и зато при избору периоде одабирања треба радити обавезну

## Прилог теорији пројектовања актуатора за управљање вектором потиска ракетног мотора са флексибилним млазником

симулациону проверу. Као што се види на слици 6.1, минимално фазни системи имају промену фазе од 0-180 степени и спорији су од неминимално фазних система.

У сваком случају, и флексибилно оптерећење када се описује преносном функцијом може да доведе до тога да актуациони систем више није минимално фазни. Овде се води рачуна о овом проблему, тако да се структурно оптерећење односно флексибилни млазник описују преносном функцијом другог реда која нема полове или нуле у десној полуравни. Јасно је да треба водити рачуна да је особина система да је минимално фазни или неминимално фазни везана за одговарајући опис у оквиру његовог математичког модела.



Слика 6.1-Бодев дијаграм и одзив минимално фазног (слика горе) и неминимално фазног линеарног система (слика доле) [91]

### 6.2 Упоредивање аналогног и дигиталног управљачког система у математичком моделу

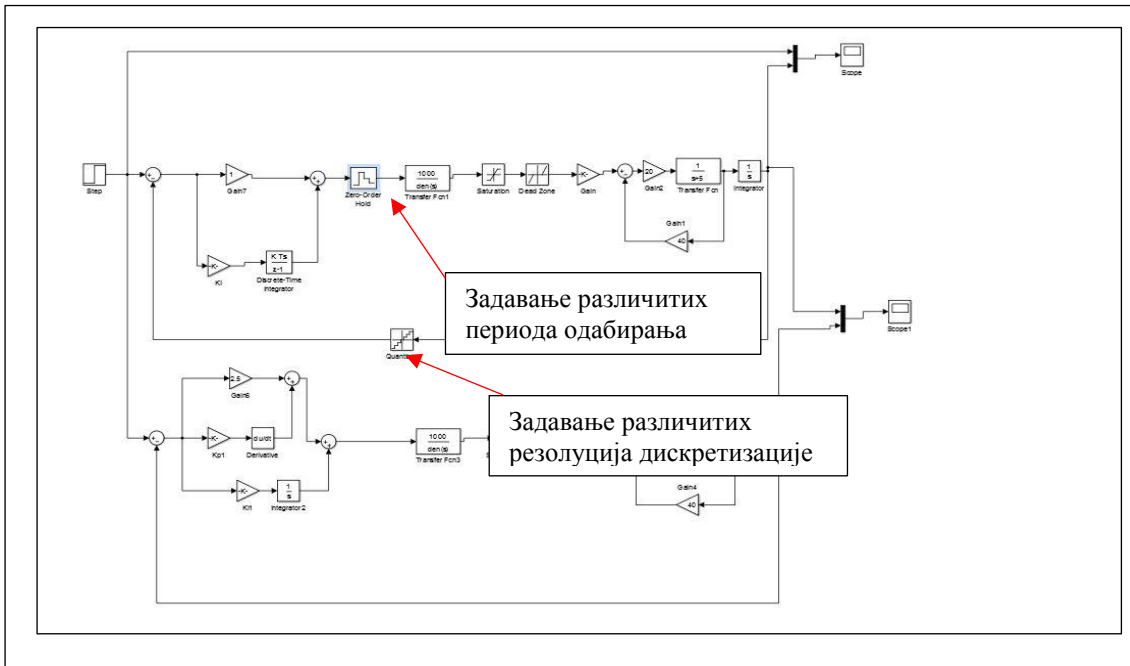
### 6.0 Симулациони резултати



## Прилог теорији пројектовања актуатора за управљање вектором потиска ракетног мотора са флексибилним млазником

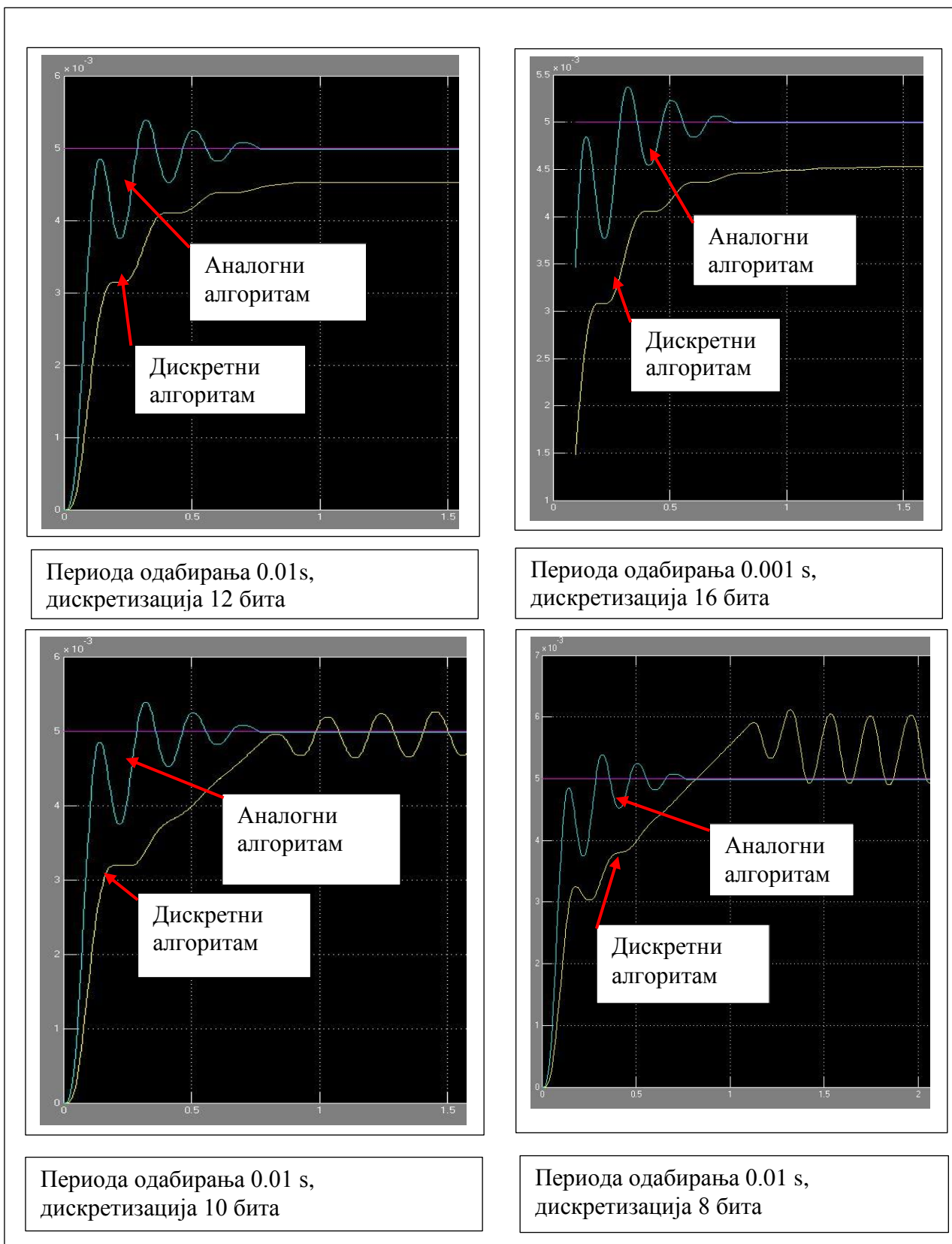
Претходно наведено најлакше је проверити преко упоређивања аналогног и дискретног записа управљачког алгоритма у оквиру математичког модела актуационог система у Матлабу. На слици 6.2 дат је математички модел у Симулинку а на слици 6.3 приказани су резултати симулације за различите периоде одабирања. У сваком случају овде треба поменути и још једну особину која се у оригиналу на енглеском назива *aliasing* која нема одговарајући превод у српском језику и терминологији која се на српском језику користи у области аутоматског управљања. У неком оквирном смислу овај енглески термин можемо превести као одступање у репродукцији сигнала после дискретизације.

На основу литературе [83] расположиве су врло корисне допунске информације код избора периоде одабирања. Дат је пример за случај ракете Вега, где је за периоду одабирања за актуациони систем усвојена вредност 40 милисекунди. То јесте довољно за актуациони систем, али није довољно према динамици саме ракете, јер у периоду од 40 милисекунди није константна позиција приликом закретања флексибилног млазника. На кретање ракете доминантан утицај има динамика флексибилног млазника, тако да је актуациони систем остављен, односно његов математички модел остао у оквиру филтера, који не приказује промене закретања млазника у одређеним временским периодима, који одговарају периоди одабирања рачунара који управља кретањем ракете. На слици 6.2 приказан је математички модел актуационог система са аналогним приказом ПИД управљачког алгоритма и са приказом преко  $Z$  трансформације са елементом држања сигнала нултог реда. Могућ је, поред  $Z$  трансформације и приказ преко диференцијалних једначина, што је приказано на блок дијаграму на слици 6.4. Поред ефекта на тачност рада система приликом дискретизације присутан је и ефекат утицаја на стабилност што се може уочити у графичком приказу одзива система максималном резолуцијом по временској оси.



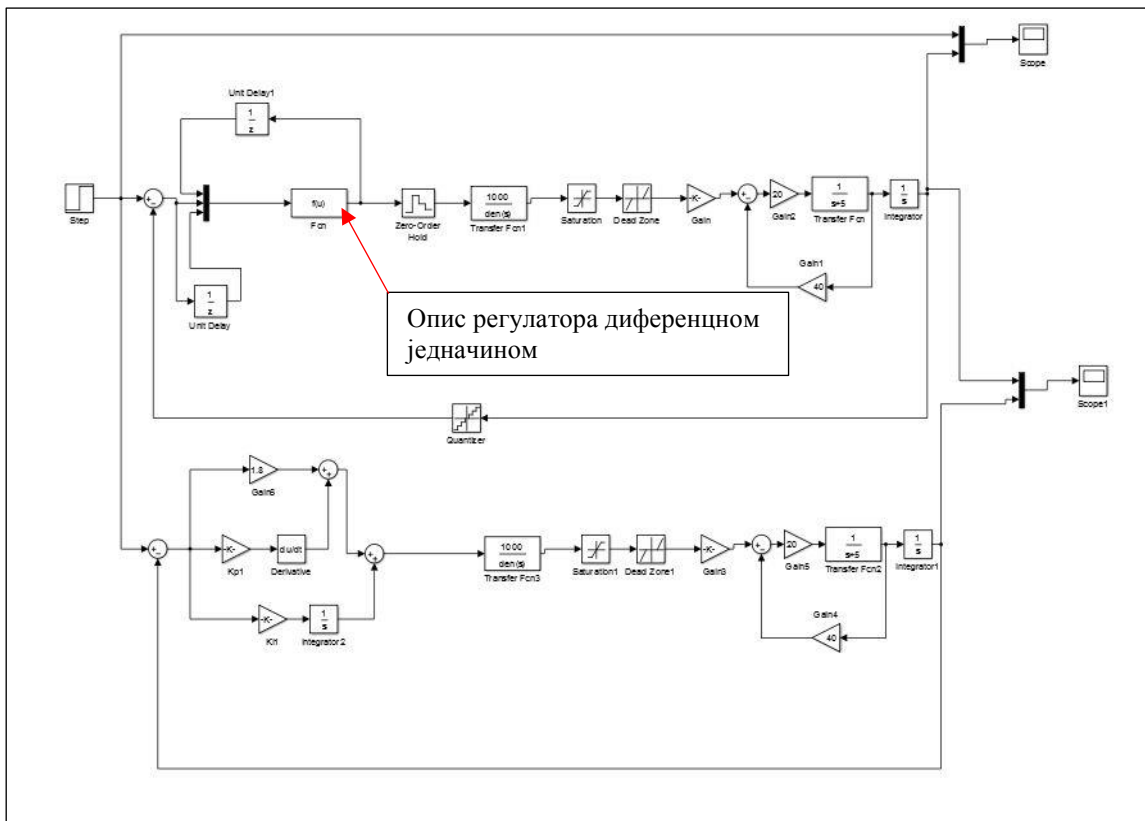
Слика 6.2-Симулинк модел актуационог система са дискретним ( $Z$  трансформација) и аналогним описом регулатора

Прилог теорији пројектовања актуатора за управљање вектором потиска ракетног мотора са флексибилним млазником



Слика 6.3-Одзиви за различиту резолуцију дискретизације по нивоу

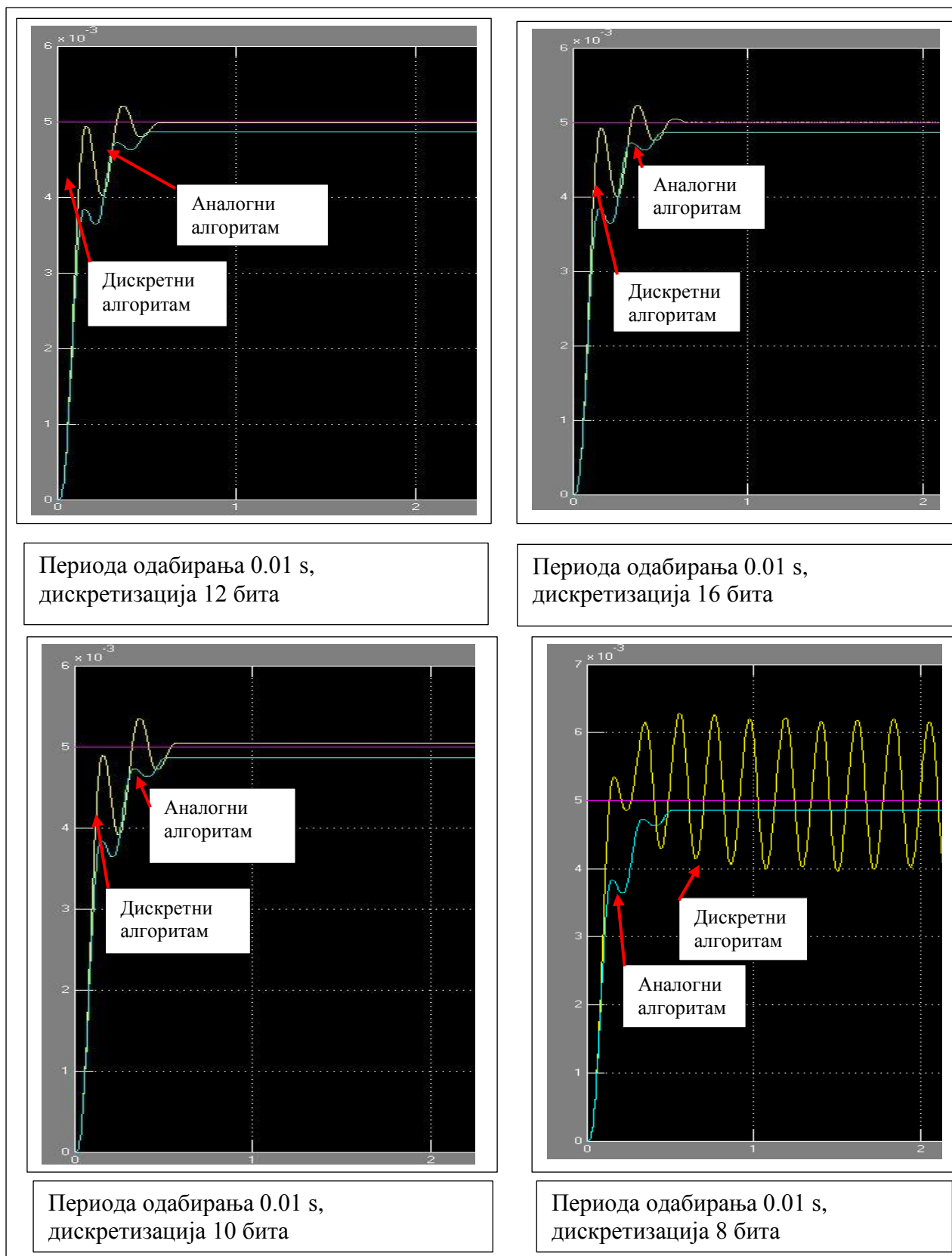
## Прилог теорији пројектовања актуатора за управљање вектором потиска ракетног мотора са флексибилним млазником



Слика 6.4-Симулинк модел актуаторског система где је управљачки алгоритам приказан диференцијалним једначинама

Не постоји директна пројектантска препорука када користити дискретизован математички модел а када континуални модел. Једна од препорука говори да кад је рачунар довољно брз, можемо без посебних проблема користити аналогни математички модел. Када је рачунар спорији, треба користити дискретни опис управљања, дискретизованим једначинама, диференцијалним једначинама као на моделу приказаном на слици 6.4, а на слици 6.5 су показани симулациони резултати када је управљање написано преко диференцијалне једначине. Као и при имплементацији управљачког алгоритма можемо користити једначине које нису дискретне, тако што не „синхронизујемо управљање по такту рачунара“, да га користимо за израчунавање управљања у датом тренутку, на основу вредности управљања и грешке у претходним дискретним тренуцима. Резултати симулација који се приказују по питању увођења у симулациона истраживања перформанси рачунара су практично школски примери који су адекватно систематизовани за разматрање елемената пројектовања који се односе на избор перформанси рачунарског хардвера. Даље се разматра моделовање које узима у обзир реалне крутости веза актуатора са комором ракетног мотора и флексибилног млазника, као и разматрање референтне актуаторске структуре за такозвану „бинарну“ или дискретну хидраулику.

Прилог теорији пројектовања актуатора за управљање вектором потиска ракетног мотора са флексибилним млазником

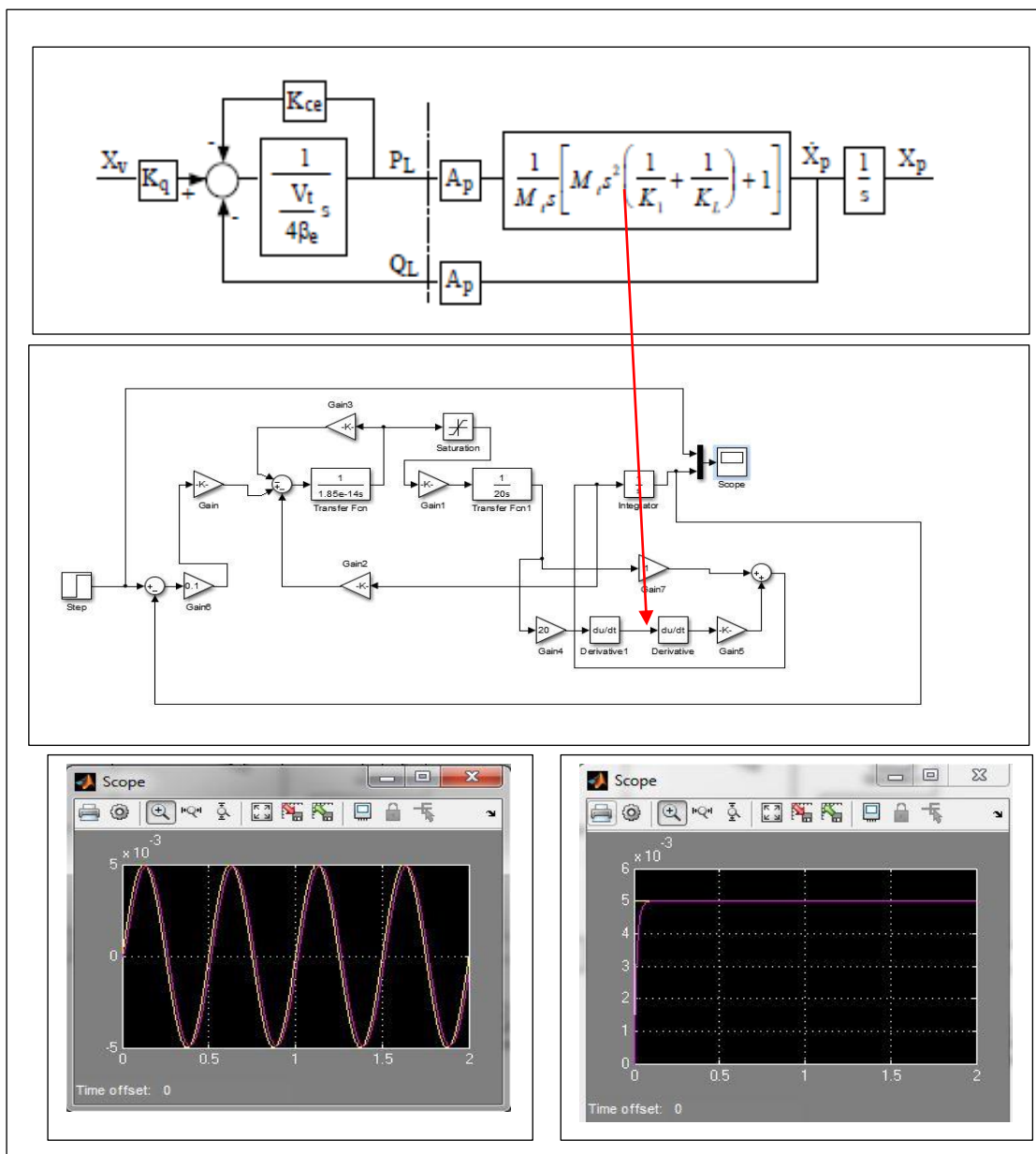


Слика 6.5-Симулациони одзив при периоди одабирања 0.005 с за различите резолуције дискретизације по нивоу

6.0 Симулациони резултати

### 6.3 Симулација математичког модела актуатора са уведеним крутостима веза актуатора

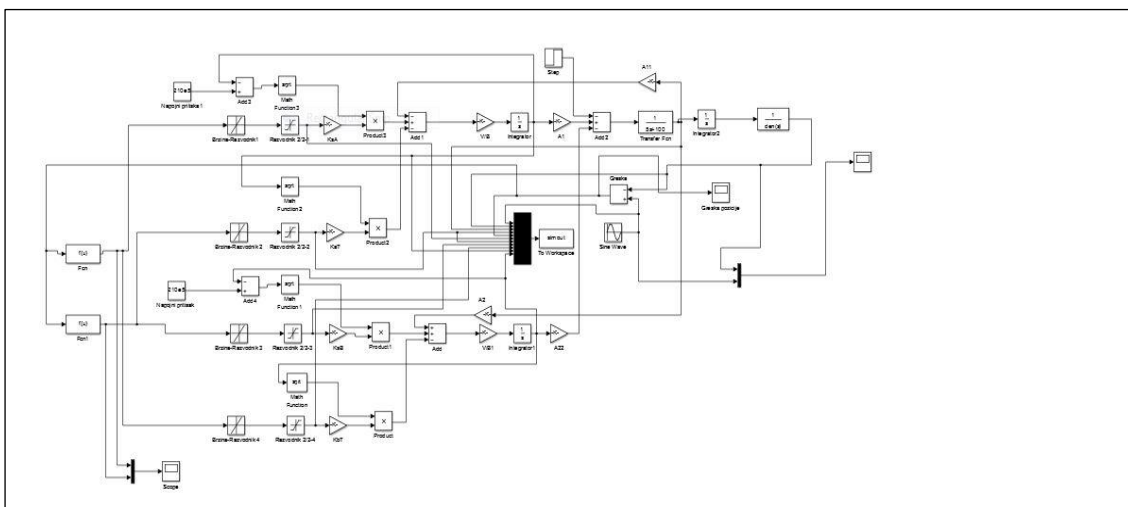
Ова симулациона провера се ради у групи почетних симулација актуационог система. Одзив система не мора бити дефинисан у коначном квалитету већ у одређеном квалитету који задовоља да се приметити негативан утицај крутости веза, што омогућава пројектанту актуационог система да дефинише минималне крутости везе актуатора са флексибилним млазником и са комором ракетног мотора. На слици 6.6 је дат симулациони модел као и резултати симулације, који показују да за изабране крутости ( $1 \cdot 10^9$ ) нема утицаја на одзив система.



Слика 6.6-Симулација неоптерећеног актуационог система, са узетим у обзир крутостима веза цилиндра

#### 6.4 Симулација посебне актуаторске структуре-развијање са четири 2/2 нормално затворена вентила

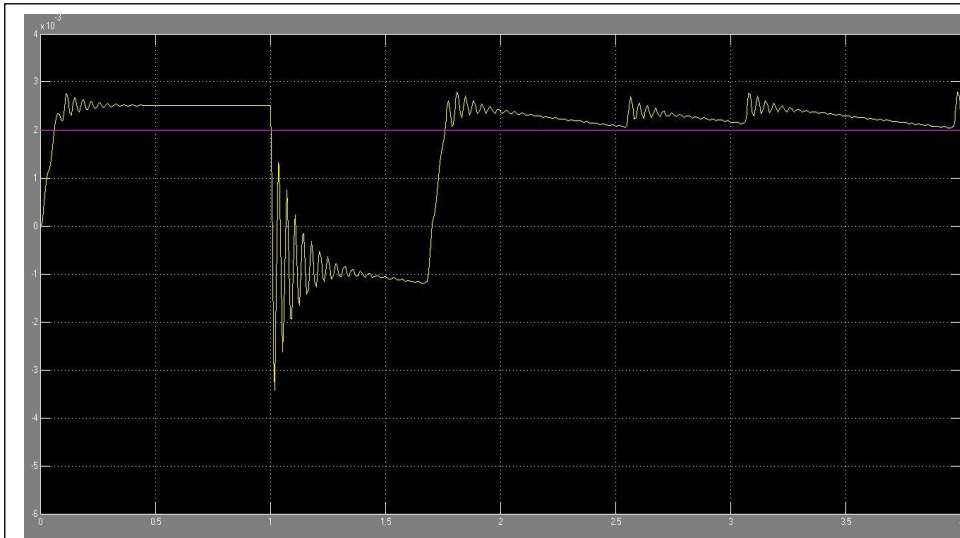
Пред пројектанта као део развојног пројектовања поставља се питање када се може користити конфигурација актуатора у такозваној дигиталној форми, када се управљање кретањем хидрауличног цилиндра остварује са четири 2/2 разводника са седиштем, конструктивно извођење нормално затворен. Ова конфигурација је поменута у поглављу о могућим хидрауличним конфигурацијама (поглавље 3.2, слика 3.5). Конфигурација са четири разводника 2/2 има одређене предности, пре свега у чињеници да се нису везане такозване разводне ивице као код клипног разводника што омогућава да софтверски изведу различите варијанте средњег неутралног положаја разводника (ово је посебно значајно јер може успешно да реши проблем аксијалног померања млазника при старту ракетног мотора и тиме омогући компензацију померања центра ротације коју изазива актуатор). Поред ове чињенице која има функционални значај, ту су и предности које се огледају и у чињеници да нема унутрашњег цурења. Ово је посебно важно када се актуациони систем напаја само из хидрауличног акумулатора. Неоспорно је да је овакав разводни склоп знатно јефтинији и да није подложен „лепљењу ивица“, феномену који настаје у радијалном зазору склопа разводни клип-чаура. Једини прави ограничавајући фактор је брзина разводника 2/2 која је већа за мање протоке, а мања за веће протоке. У овом раду урађена је симулациона провера овакве хидрауличне конфигурације разводне функције у оквиру актуаторског склопа како би се могле симулационо дефинисати максималне могућности за примену овакве конфигурације. Симулациона провера се врши за оптерећен и неоптерећен актуатор, за одсечно и синусну промену позиције. На овај начин могуће је врло брзо разјансити применљивост овакве конфигурације. Ово је битно, јер стандарно цурење разводника из клипног разводника (2-3 % од номиналног протока), може да повећа тежину актуационог система за флексибилни млазник и до 7 %, што је истраживачки резултат дат у литератури [37]. На слици 6.7 је приказан комплетан структурни симулациони модел.[84], [85], [86],



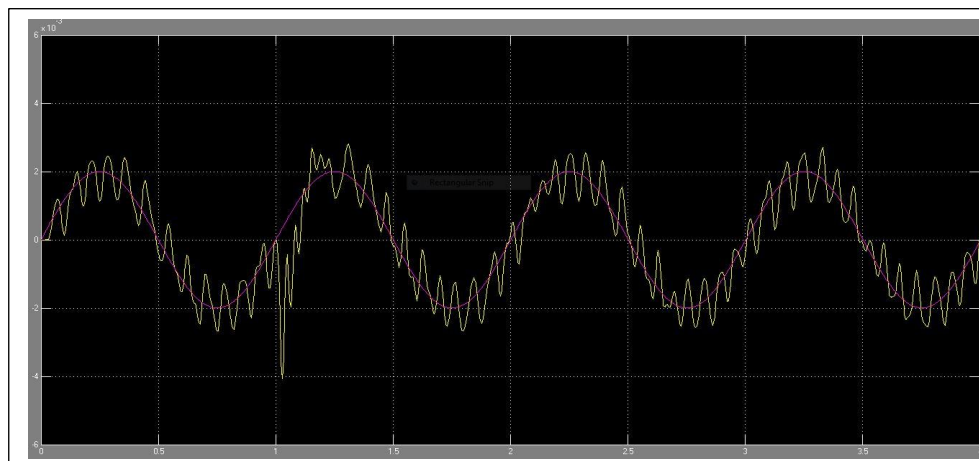
Слика 6.7 –Структура симулационог модела где је функција развијања остварена са четири 2/2 нормално затворена вентила са седиштем

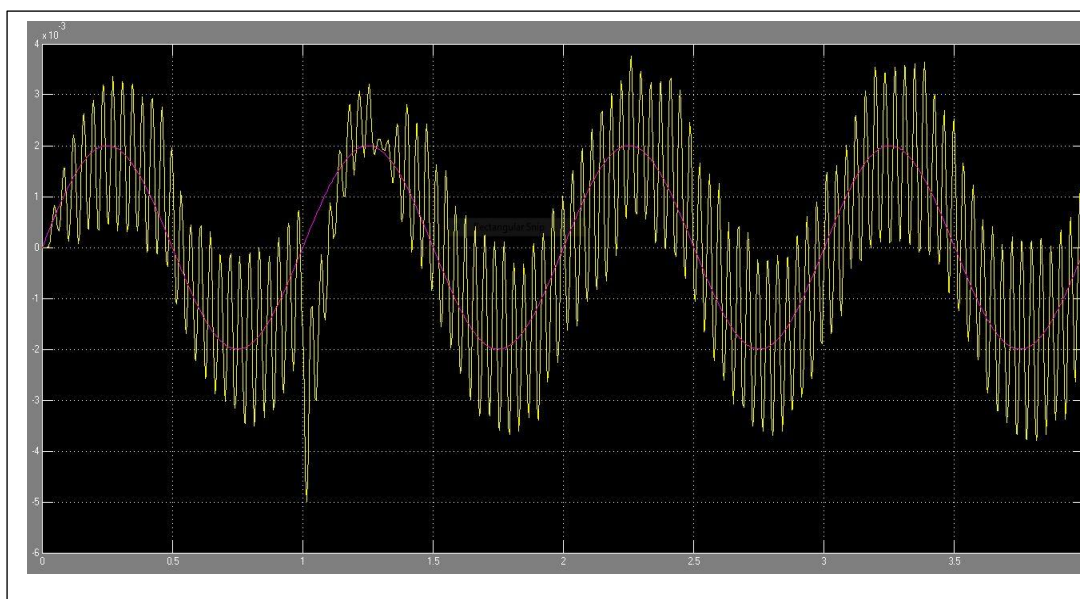
Структура математичког модела на слици 6.7 дефинисана је за напојни притисак од 210 бара, димензије цилиндра  $\phi 63/36 \times 100$  mm, за разводник 2/2 који се активира за 0.15 s а деактивира за 0.20 s.

На слици 6.8 приказан је одзив неоптерећеног на актуатора одскачну промену улазне величине за 2 mm, а на слици доле, приказан је одзив оптерећеног актуатора (преносна функција другог реда) на синусну промену улазне величине за 2 mm. На слици 6.9 горе је приказан одзив неоптерећеног актуатора на синусни улаз 1Hz, амплитуда 2 mm, а на слици 6.9, доле, приказан је одзив оптерећеног актуатора на синусни улаз 1 Hz, амплитуда 2 mm. На позиционим одзивима оптерећеног и неоптерећеног актуатора јасно се види пригушни акарактер оптерећења. На слици 6.10 приказан је утицај величине амплитуде на синусну промену. Већ при два херца, систем нема основни квалитет одзива у временском домену и на тај начин показује ограниченост примене овакве конфигурације електрохидрауличног актуатора.

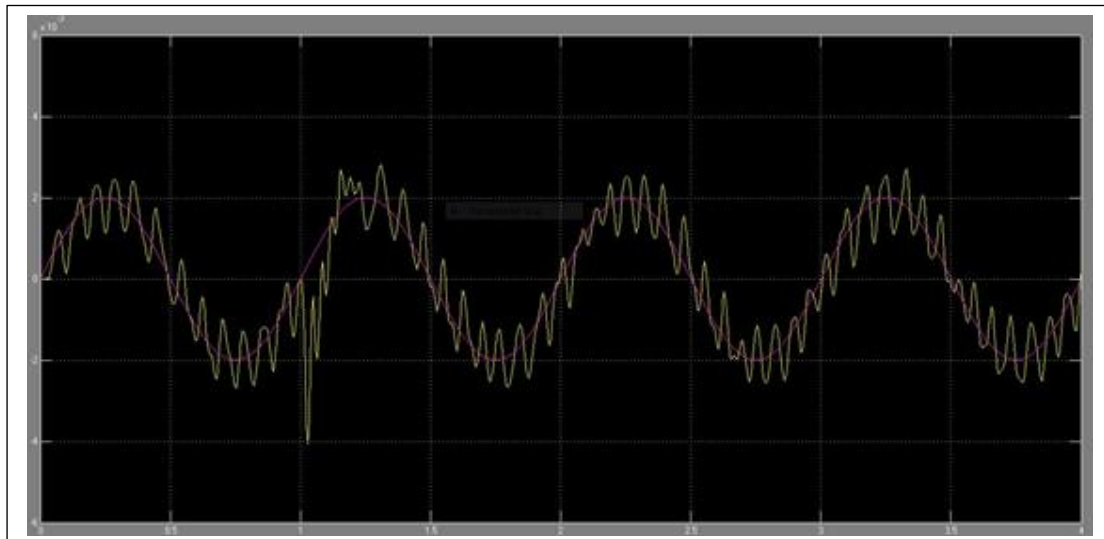


**Слика 6.8 горе-Неоптерећен хидраулични актуатор, одскачна улазна функција 2 mm; доле-неоптерећен хидраулични актуатор, синусна улазна функција, амплитуда 2 mm, фреквенција 1 Hz**



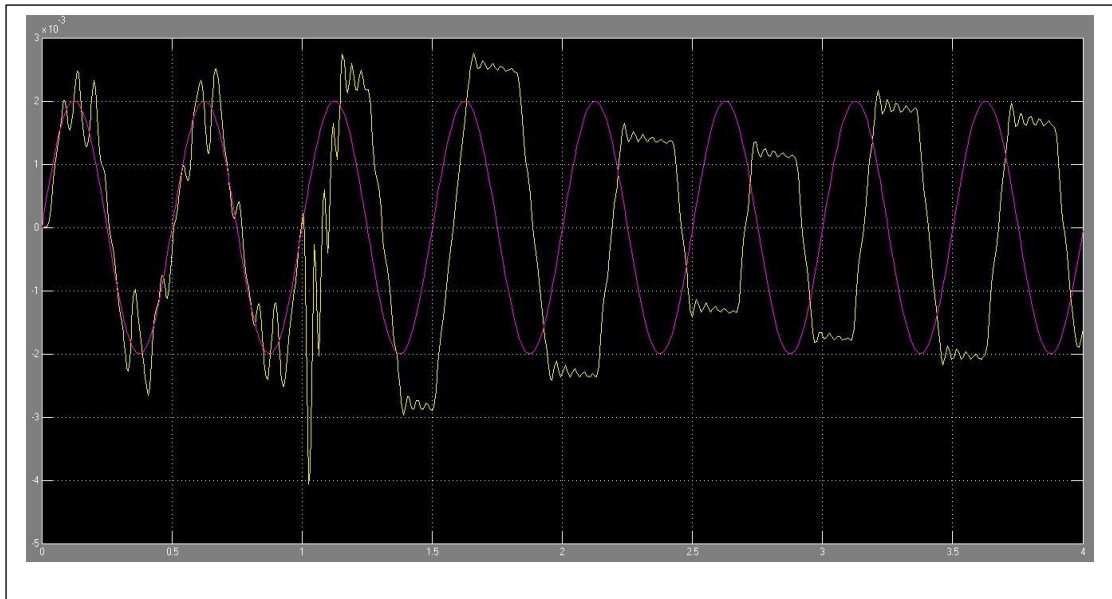


Слика 6.9 горе-Неоптерећен хидраулични актуатор, синусна улазна функција, амплитуда 2 mm, фреквенција 1 Hz; доле-оптерећен хидраулични актуатор, синусна улазна функција, амплитуда 2 mm, фреквенција 1 Hz



Претходна слика 6.9 приказује да је у пракси најтеже анализирати неоптерећен актуациони систем (без инерцијалног или флексибилног оптерећења), а са знатним утицајем трења. Резултати неоптерећеног актуатора немају посебног значаја при пројектовању актуационог система, осим чињенице да прикажу прави утицај оптерећења на динамику актуационог система.

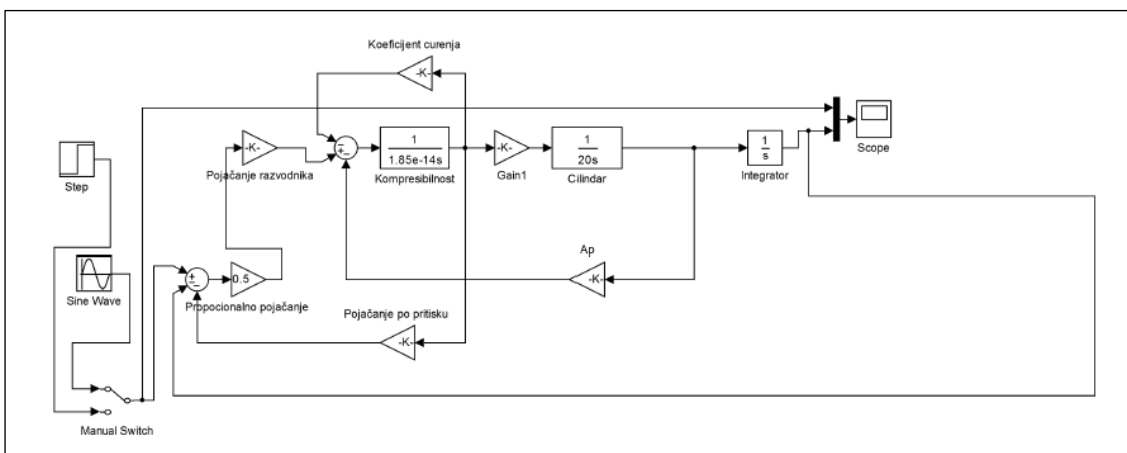




Слика 6.10-Оптерећен хидраулични актуатор, синусна улазна функција, амплитуда 2 mm, фреквенција 2 Hz

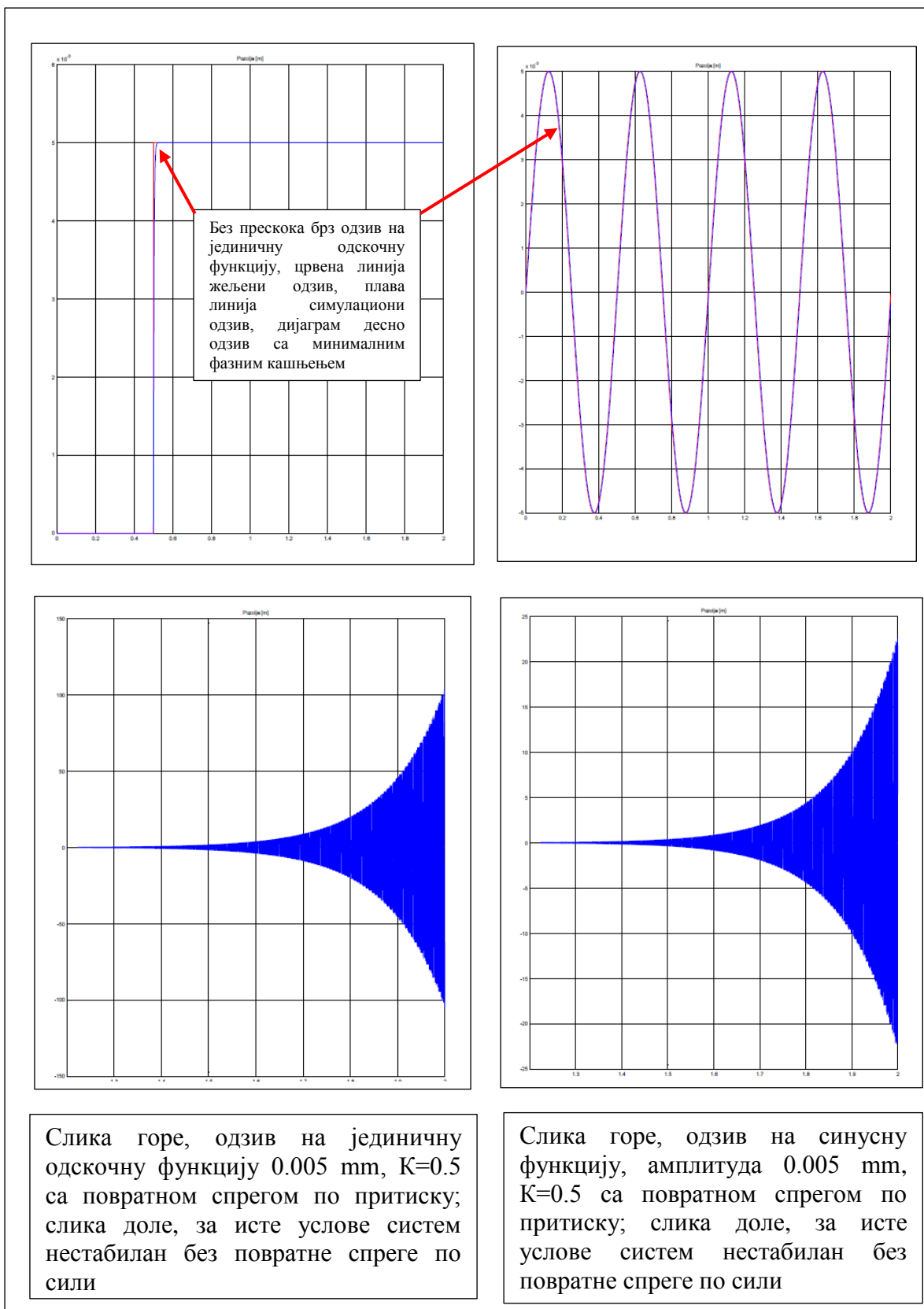
### 6.5 Повратна спрега по притиску

Повратна спрега по притиску или повратна спрега по оптерећењу је посебно значајна у електро хидрауличним актуационим системима. Пре коначно дефинисања структуре актуационог система корисно је симулациони проверити ефикасност ове повратне спреге пре свега у повећању степена пригушења, што значи да су нам тада дозвољена већа појачања, а то значи да у динамичком смислу разматрани актуациони систем има већи пропусни опсег што је у сваком случају позитиван резултат при пројектовању актуационог система. На слици 6.11 је приказан линеарни математички модел који је послужио за анализу потребе за увођењем повратне спреге по притиску, а на слици 6.12 су симулациони резултати.



Слика 6.11 –Симулациони модел са повратном спрегом по притиску

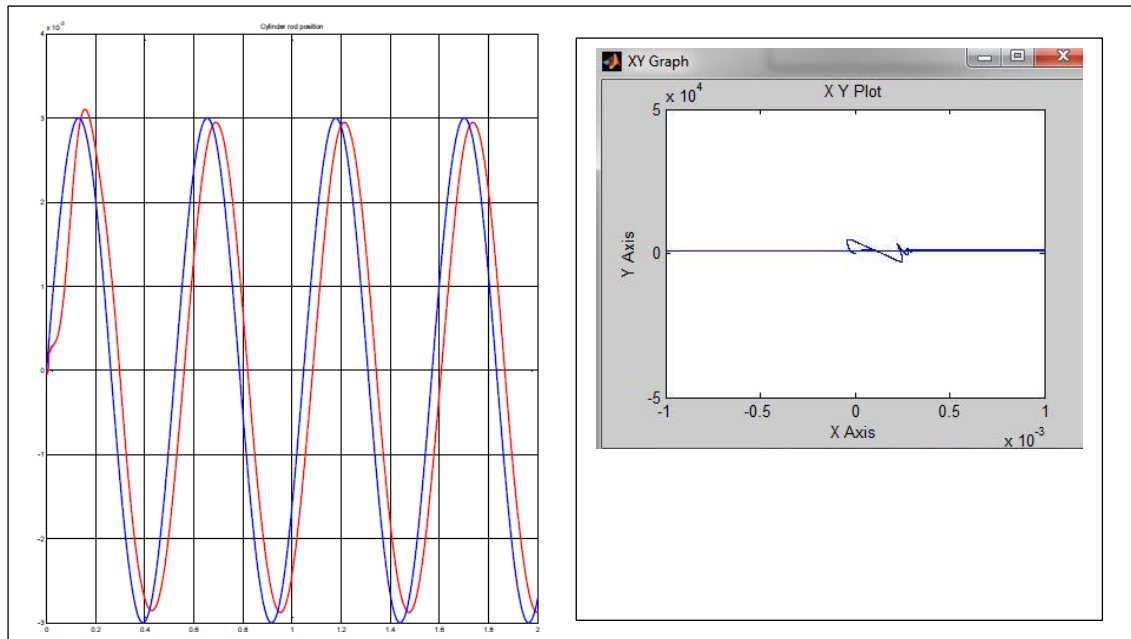
**Прилог теорији пројектовања актуатора за управљање вектором потиска ракетног мотора са флексибилним млазником**



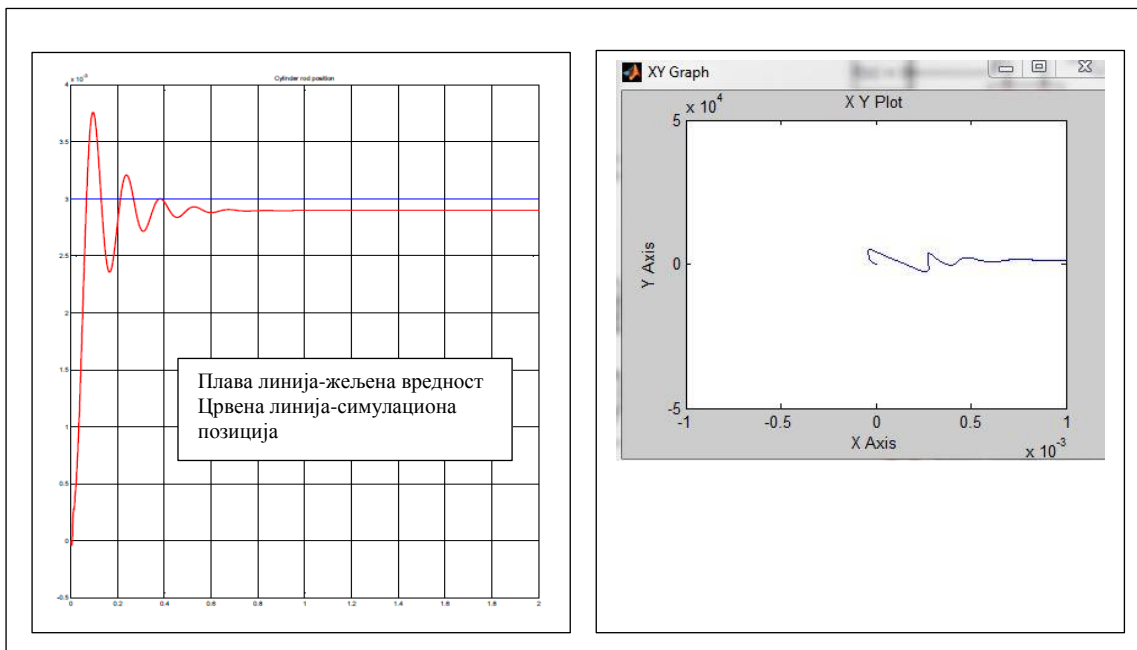
**Слика 6.12-Резултати симулације са повратном спрегом по притиску**



## Прилог теорији пројектовања актуатора за управљање вектором потиска ракетног мотора са флексибилним млазником



Слика 6.14-Одзив актуаторског система на синусни улаз, 0.003 мм, 2Hz и П управљање и дијаграм сила-ход



Слика 6.15-Одзив актуаторског система на одсечни улаз, 0.003 мм, 2Hz и П управљање и дијаграм сила-ход

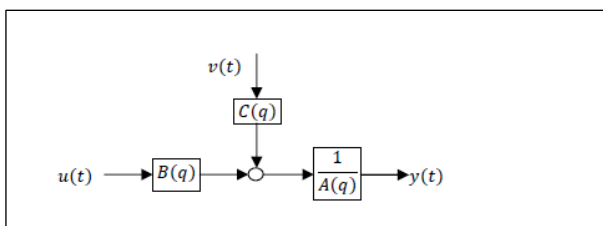
Претходна симулациона анализа урађена је са П управљачким алгоритмом. Синусни одзив је без слабљења, одзив на одсечну улазну функцију је осцилаторан са прескоком и променом појачања и није се знатно променио. Код синусног одзива дефинисан је и хистерезисни дијаграм за везу сила-ход, док код одсечног одзива он има другачији карактер.

### 6.0 Симулациони резултати

## 7.0 Експериментални резултати

Ова дисертација која је посвећена унапређењу пројектовања актуационог система за флексибилни млазник, није настала из одређеног пројекта или неке друге шире организоване активности (како је на почетку било планирано), већ као резултат апсолутно индивидуалног рада и то су пресудни услови који су ограничили потенцијал ресурса за експеримент и евентуалне посебне експерименталне резултате. Ово се огледа пре свега у чињеници да изостају дијаграми који упоређују директно симулационе резултате и експерименталне резултате, јер у експерименту не постоји флексибилни млазник, већ динамички модел смицања. Експериментална инсталација је детаљно описана у поглављу 10, у Прилогу 1. Није направљен функционални модел флексибилног млазника и актуатора, али је направљен динамички еквивалентан модел конструкције флексибилног млазника повезан са актуатором, који обезбеђује суперпозицију променљивог инерцијалног оптерећења и позиционог оптерећења типа смицања. Не можемо говорити о стандардном експерименту типа НИЛ (Hardware In Loop-Simulation), али можемо рећи да имамо еквивалентан експеримент који нам дозвољава да проверавамо утицај величине инерцијалног оптерећења према констатном оптерећењу на смицање на квалитет управљања (изменом тегова који симулирају инерцијално оптерећење) што није могуће са конструкцијом стварног млазника. На тај начин се могу поставити ограничења у дозвољеној маси флексибилног млазника у почетним фазама пројектовања ракетног мотора са флексибилним млазником на основу експерименталних провера квалитета управљања електро хидрауличним актуационим системом према испитној конфигурацији дефинисаној у овом раду.

Експерименти у разматраном случају имају задатак да провере квалитет синтетизованог управљања за електро хидраулични актуатор и да дефинишу технологију идентификације, како би се експериментално дошло до математичког модела односно параметара модела, на основу којег би се тачније синтетизовало управљање и вршила анализа система. Овде се пре свега мисли на онај део математичког модела који се односи на еквивалентну нелинеарност. Класична технологија идентификације се данас заснива на приступу који има апликативну софтверску подршку у Матлаб-у, Toolbox MATLAB и Toolkit of LabVIEW. У Матлаб-у постоје опције које за улазни сигнал са три хармоника дају квалитетан линеарни модел другог и трећег реда на основу коришћења података о вредности улазног и излазног сигнала, у неколико тренутака уназад у односу на актуелни тренутак. Користи се стандардни ARMAX модел. На слици 7.1 приказана је структура линеарног модела за идентификацију, а затим се приказују математички формализми који доводе до диференчне једначине.



Слика 7.1- ARMAX- стандардна структура [81]

**Прилог теорији пројектовања актуатора за управљање вектором потиска ракетног мотора са флексибилним млазником**

$$y(k) = G(q)u(k) + H(q)v(k) \quad (7.1)$$

Даље можемо писати:

$$y(k) + a_1 y(k-1) + \dots + a_{n_a} y(k-n_a) = b_1 u(k-n_k) + \dots + b_{n_b} u(k-n_k-n_b+1) + c_1 v(k-1) + \dots + c_{n_c} v(k-n_c) + v(k) \quad (7.2)$$

Где је:

$y(k)$  - излазни сигнал у тренутку  $k$

$a_1 \dots a_{n_a}, b_1 \dots b_{n_b}, c_1 \dots c_{n_c}$  параметри који се оцењују

$n_a$  - број полова у систему

$n_b - 1$  број нула у систему

$n_c$  - број „с“ коефицијената у систему

$n_k$  - број периода одабирања које се догоде пре генерисања излазног сигнала

$y(k-1) \dots y(k-n_a)$  - број претходних излаза од којих зависи тренутни излазни сигнал

$u(k-n_k) \dots b_{n_b} u(k-n_k-n_b+1)$  - број претходних улаза од којих зависи тренутни излаз система

$v(k-1) \dots v(k-n_c)$  - сигнал белог шума који улази у модел

Типичан пример управљачког сигнала за идентификацију према претходно описаном моделу је:

$$U(k) = 2 \cos 0.3tk + 2 \cos 4tk + \cos 6tk \quad (7.3)$$

где је

$t$  - периода одабирања,

За хидрауличне системе она може бити 40 ms, број одабирања може бити око 5000 са претходно дефинисаним кораком од 40 ms. Претходно наведено спада у стандардну идентификациону процедуру за електро хидрауличне актуационе системе. [3], [92]

У овом раду предност се даје другачијем приступу идентификујући еквивалентне нелинеарности актуационог система типа зоне неосетљивости, која би обухватила доминантне нелинеарне феномене који се јављају у раду електро хидрауличког

**Прилог теорији пројектовања актуатора за управљање вектором потиска ракетног мотора са флексибилним млазником**

актуационог система за флексибилни млазник. Следећи задатак експерименталне провере је анализа структуре управљања актуатором са становишта постојања унутрашње и спољашње управљачке петље. Овај део експеримента је најважнији јер утиче на структуру управљачког система.

Познато је да данас у пракси постоји приступ који захтева да се направи што флексибилније управљање које ће моћи да поправи многе особине актуаторског система. Те особине јасно мора да евидентира експериментална провера. У табели која следи даје се преглед шта би све могло да се експериментално провери у конфигурацији динамички моделом флексибилног млазника и актуатор. Практично дефинише се све што би могло да се експериментално провери са експерименталном инсталацијом која одговара инсталацији која је направљена за потребе овог рада да постоје остали услови да она функционише у пуном капацитету.

Проблематика (питања) која би требало да буду предмет експерименталне анализе систематизована су у следећој табели: (у складу са стварним расположивим могућностима, урађен је само део експерименталних, чији се резултати приказују кроз дијаграме који следе уз пратеће коментаре)

Табела 7.1

	Питање	Опис	Коментар
1.	Утицај нелинеарности у актуационој систему зависи од фреквенције осим у случају хистерзиса	Ово се не може директно експериментално проверити, провера се ради тако што се статичка карактеристика актуационог система преводи у еквивалентну нелинеарност	Овде се приказује експериментални хистерезис актуационог система за фреквенцију 1 и 2 Hz
2.	Пропорционално управљање и члан са предхођењем су алтернатива повратној спрези по притиску	На основу података из симулационог модела потребно је одредити коефицијент појачања по притиску	Циљ овог експеримента је да се провери да ли може да се избегне повратна спрега по разлици притисака
3.	Хистерезис спречава самоосциловање	Оптерећење цилиндра ће се побуђивати релејном променом управљачког сигнала са и без додатог инерцијалног оптерећења	Пошто је хистерезис идентификован у структури оптерећења, провера се карактер одзива са инерцијалним и флексибилним оптерећењем са одзивом са само флексибилним оптерећењем

**Прилог теорији пројектовања актуатора за управљање вектором потиска ракетног мотора са флексибилним млазником**

4.	Нема фазног кашњења између промене позиције и промене силе приликом синусне промене у кретању клипњаче актуационог система. Утицај фреквенције на ову структурну „невидљиву“ нелинеарност	Ради се експериментална провера за корак промене фреквенце од 0.1 Hz	Овај експеримент нам даје одговор на питање да ли је неопходна каскадна структура управљања, унутрашња повратна спрега по сили и спољашња повратна спрега по позицији. Експеримент је изведен
5.	Виши хармоници у одзиву на жељену позицију и у одзиву силе	Показују утицај статичких нелинеарности у систему	Решава се питање да ли су потребни софтверски филтери у унутрашњој структури актуационог система
6.	Утицај појачања по притиску на квалитет управљања по позицији и сили	Проверава се у условима чистог флексибилног оптерећења и комбинације флексибилног оптерећења и инерцијалног оптерећења дефинисањем управљачког офсета	На овај начин утврђује се значај ове особине разводника и евентуалне компензације његове несиметричности у условима позиционог оптерећења. Експеримент је изведен
7.	Пропорционално управљање-квалитет за половину пропусног опсега	Провера синусног одзива за 1 Hz и амплитуду од 3 mm	Експеримент је изведен
8.	Управљање са ПИД структуром и додатним нелинеарним делом	Нелинеарност се дефинише за појачање у функцији грешке.	Овај експеримент показује да ли је неопходан разводник са „прогресивном „ статичком карактеристиком
9.	Реално упоређење повратне спреге по сили и по разлици притисака	Провера се реални квалитет сигнала у условима флексибилног оптерећења и укупне крутости система	У одређеним структурама актуационог система појачање повратне спреге и квалитет њеног сигнала има пресудан значај на квалитет рада актуационог система.

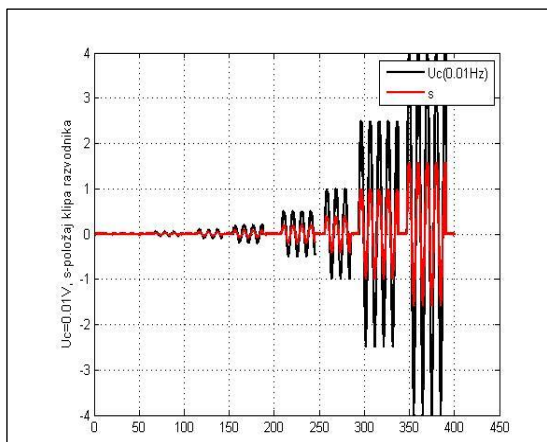


**Прилог теорији пројектовања актуатора за управљање вектором потиска ракетног мотора са флексибилним млазником**

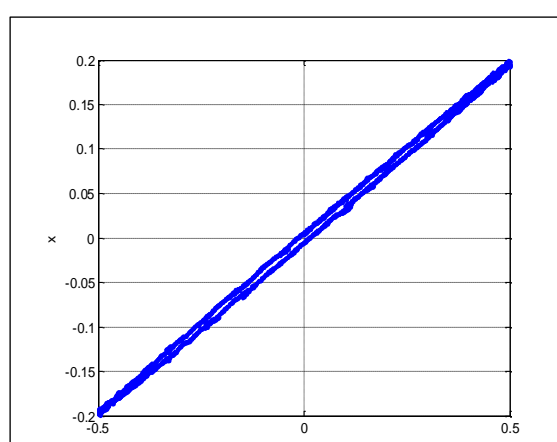
			Експеримент је изведен
10	Компензације у условима рада у оквиру зоне неосетљивости односно зоне хистерезиса	Проблематика рада са минималним управљачким сигнаlima	Обзиром да је важан управљачки захтев за флексибилни млазник стабилизација, ово је посебно важно да буде дефинисано кроз одређен критеријум, а не преко каталошких података за разводник. Експеримент је изведен

Кроз резултате експерименталне анализе који следе, приказују се одређени одговори на претходно наведене задатке експерименталне провере електро хидрауличног актуационог система као дела технологије пројектовања истог. У конфигурацији електрохидрауличног разводника приликом избора разводника, предност се даје разводнику са локалном електричном корективном повратном спрегом по позицији разводног клипа која смањује хистерезис разводника, односно повећава тачност рада разводника. У реалном извођењу користио би се двостепени разводник са електричном повратном спрегом, млазницама и торк мотором (ваздухопловна хомологација). На слици 7.2 приказани су подаци везани за разводник. Основно је да се провери да ли електрична повратна спрега на разводном клипу разводника омогућава праг осетљивости разводника у опсегу од 0.01 % до 0.1 %.

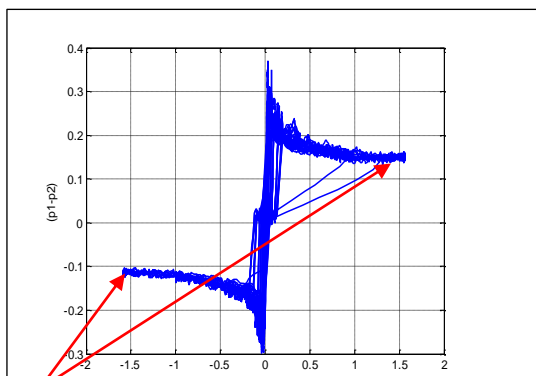
Прилог теорији пројектовања актуатора за управљање вектором потиска ракетног мотора са флексибилним млазником



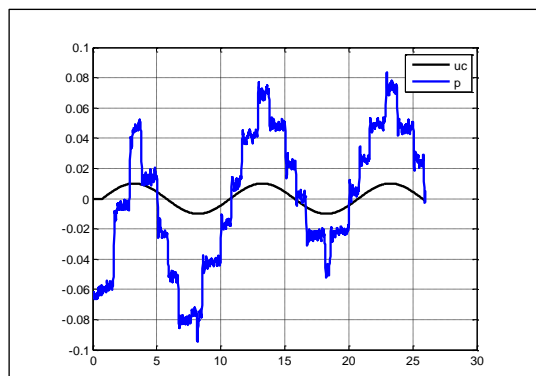
Управљачки сигнал је 0.01 %, 0.01Hz, слабљење по амплитуди позиције разводног клипа



„Линеарни хистерезис“ разводника



Несиметрија у појачању по притиску која је касније искоришћена за синтезу управљања

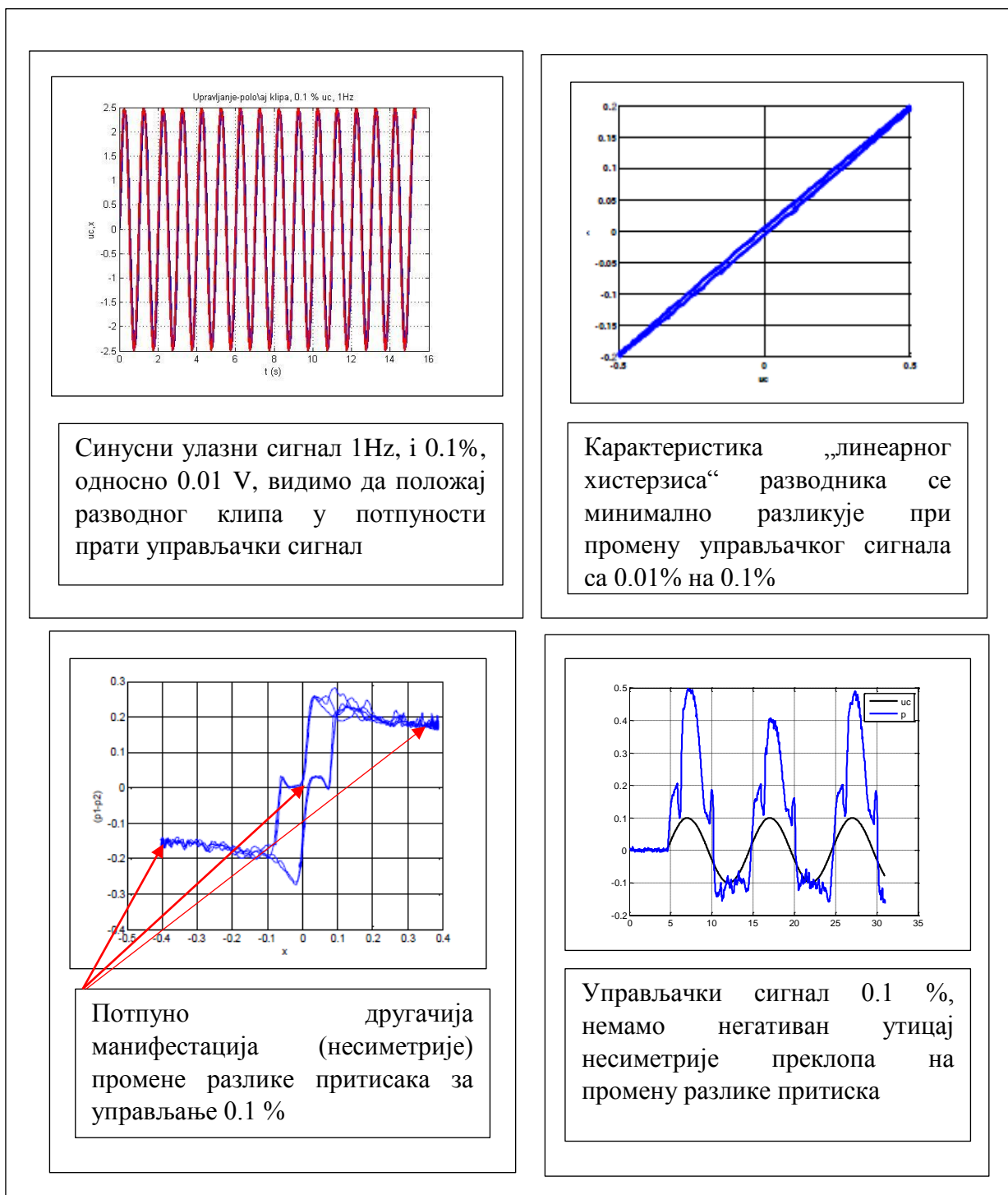


На промени разлике притиска за јако мале вредности управљачког сигнала 0.01% долази до изражаја несиметрија преклопа

Слика 7.2-Експериментално снимљене карактеристике разводника, управ. 0.01%

## Прилог теорији пројектовања актуатора за управљање вектором потиска ракетног мотора са флексибилним млазником

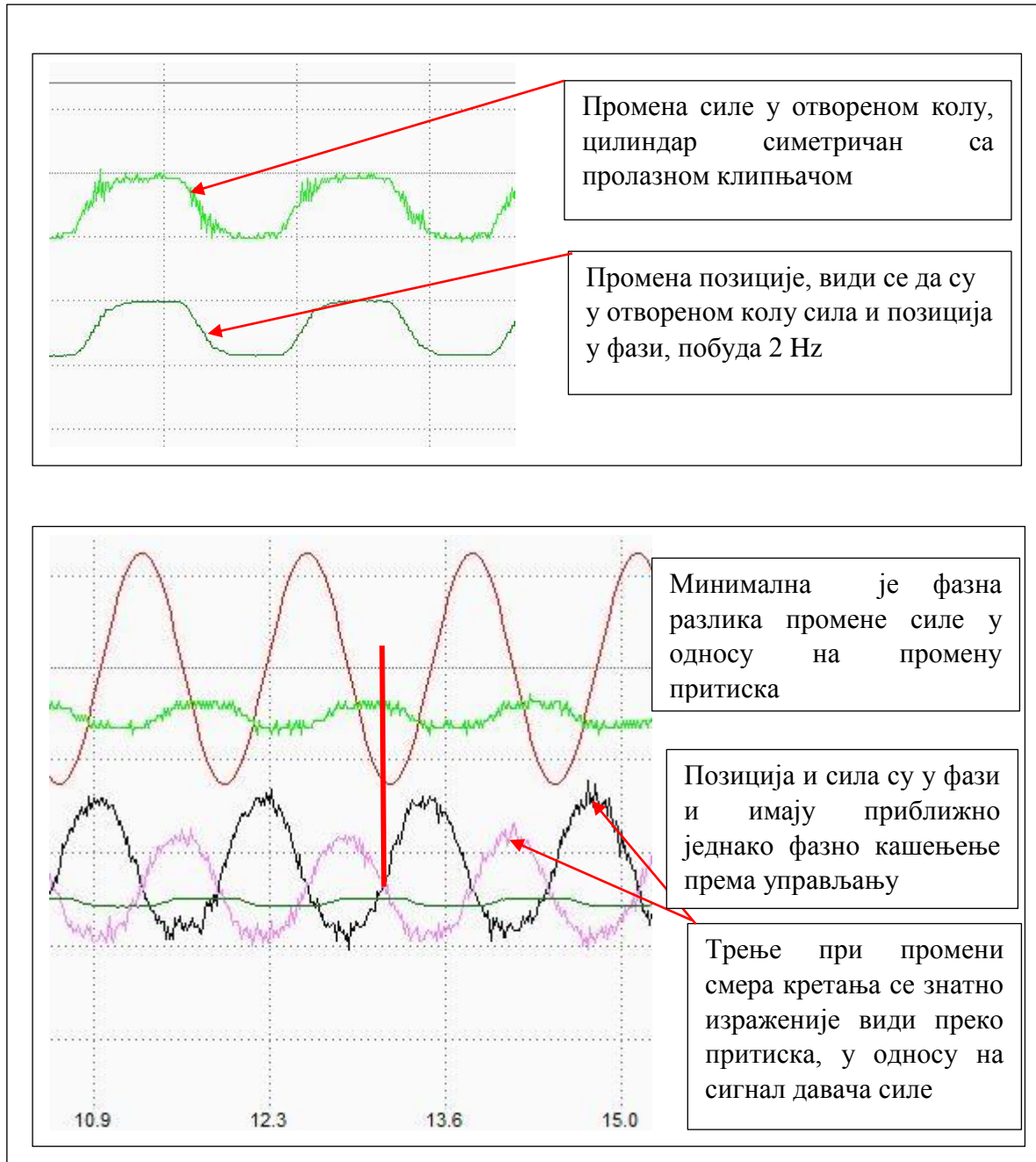
Експериментална анализа на слици 7.2 показује да није могућа резолуција управљања 0.01 %. На слици 7.3 дат је приказ резултата за управљање 0.1%.



Слика 7.3-Експериментално снимљене карактеристике разводника, управ. 0.1%

## Прилог теорији пројектовања актуатора за управљање вектором потиска ракетног мотора са флексибилним млазником

Са слике 7.3 је јасно да се може рачунати на управљање са резолуцијом 0.1 %, односно 1:1000. На слици 7.4 приказани су параметри управљања у отвореном колу, динамичким моделом флексибилног млазника.

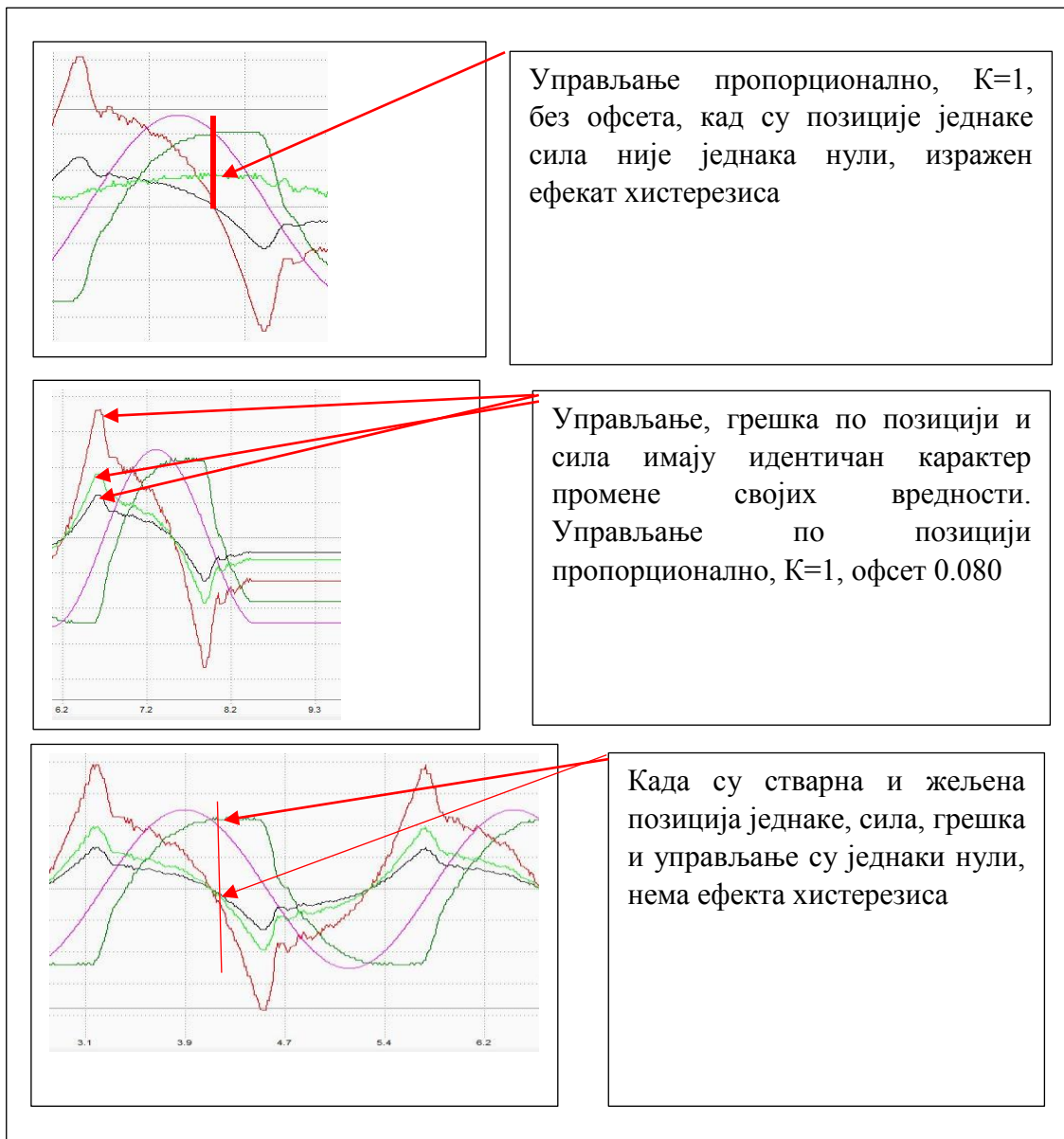


**Слика 7.4-Отворено коло управљања, оптерећење модел оптерећења флексибилним млазником**

Информација о карактеру излазних величина и величина стања у отвореном колу, слика 7.4, показује на првом месту величину фазног кашењења које је потребно у сваком случају смањити у затвореном колу са управљањем по позицији. Може се такође сагледати и квалитет повратних спрега, које су еквивалентне, у овом

## Прилог теорији пројектовања актуатора за управљање вектором потиска ракетног мотора са флексибилним млазником

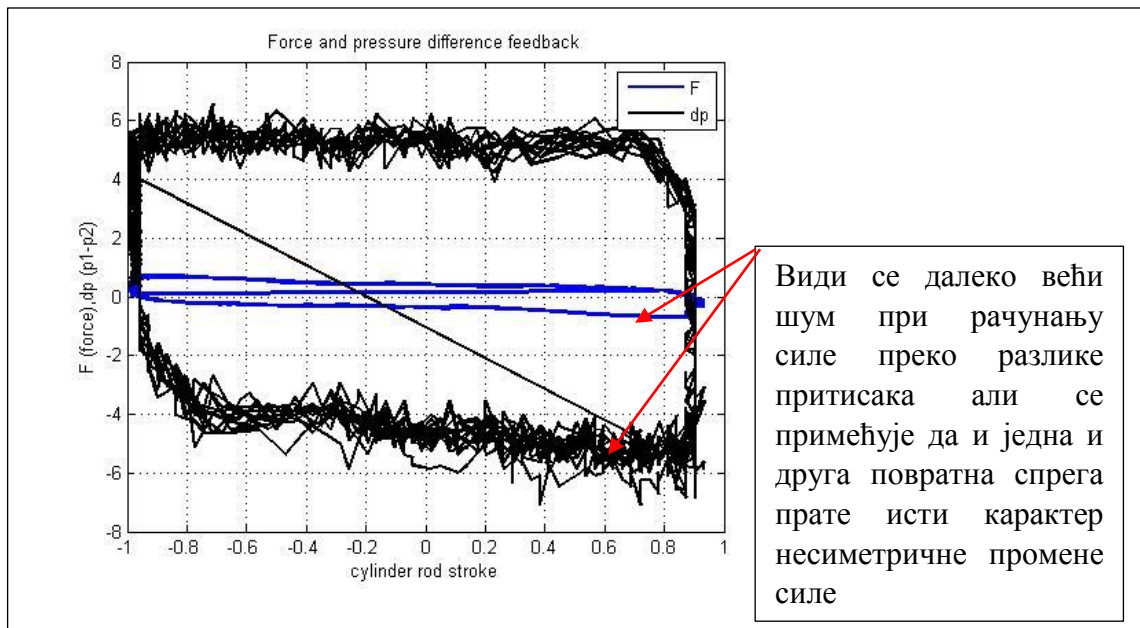
случају по разлици притисака и по сили. На слици се види да трење, знатно нарушава квалитет повратне спреге по притиску, присуством виших фармоника при заустављању које постоји код промене смера кретања при синусном улазном сигналу. Тешко је у потребном квалитету филтрирати утицај пре свега сувог трења при промени смера кретања, посебно у условима малих померања, тако да се за управљање даје предност коришћењу повратне спреге по сили, која подразумева директно мерење силе. На слици 7.5, приказан је карактер повратне спреге по притиску и сили на једном дијаграму.



Слика 7.5 Управљање по позицији, пропорционално са и без процењеним офсетом појачања по притиску

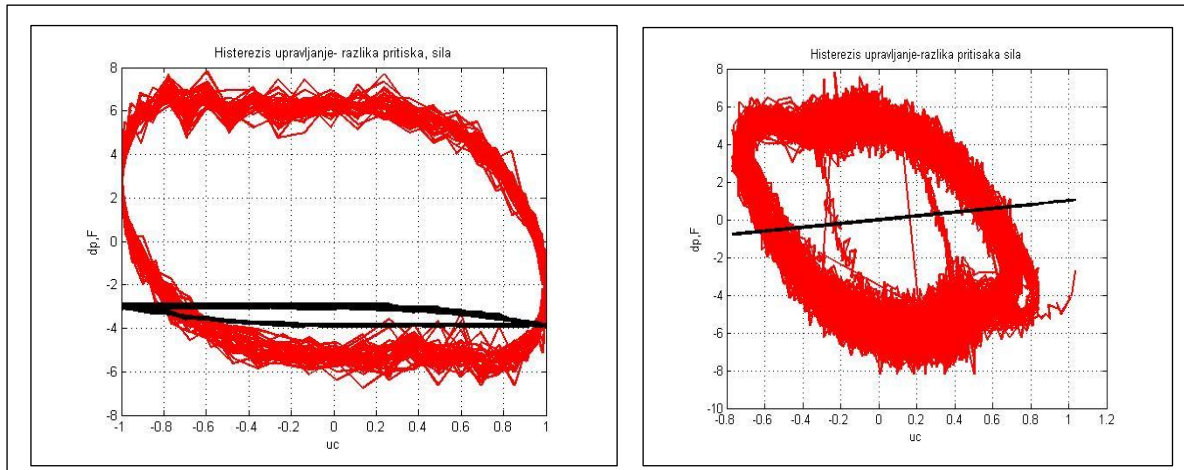
## Прилог теорији пројектовања актуатора за управљање вектором потиска ракетног мотора са флексибилним млазником

На основу графика са претходне слике 7.5, видимо да је исправан приступ синтези управљања, дефинисан у поглављу 3.10 овог рада, где је предложена компензација зоне неосетљивости инверзном нелинеарношћу, што је у датом случају релејна нелинеарност односно офсет, који се дефинише на основу несиметрије појачања по притиску. Повратне спреге по сили и притиску нису 100 % еквивалентне како се на први поглед може сматрати, пре свега због директног утицаја трења и других ефеката (убрзање и успорење радног флуида, струјни ефекти, ...) на промену притиска односно силе које се не виде ако се мери активна сила на крају клипњаче, слика 7.6.



**Слика 7.6 Повратна спрега по сили (директно мерење силе) и повратна спрега по сили (мерење разлике притисака)**

Још два хистерзиса су посебно битна за одређивање начина за компензацију еквивалентне нелинеарности система, што је у случају електро хидрауличног актуационог система, нелинеарност типа зоне неосетљивости.

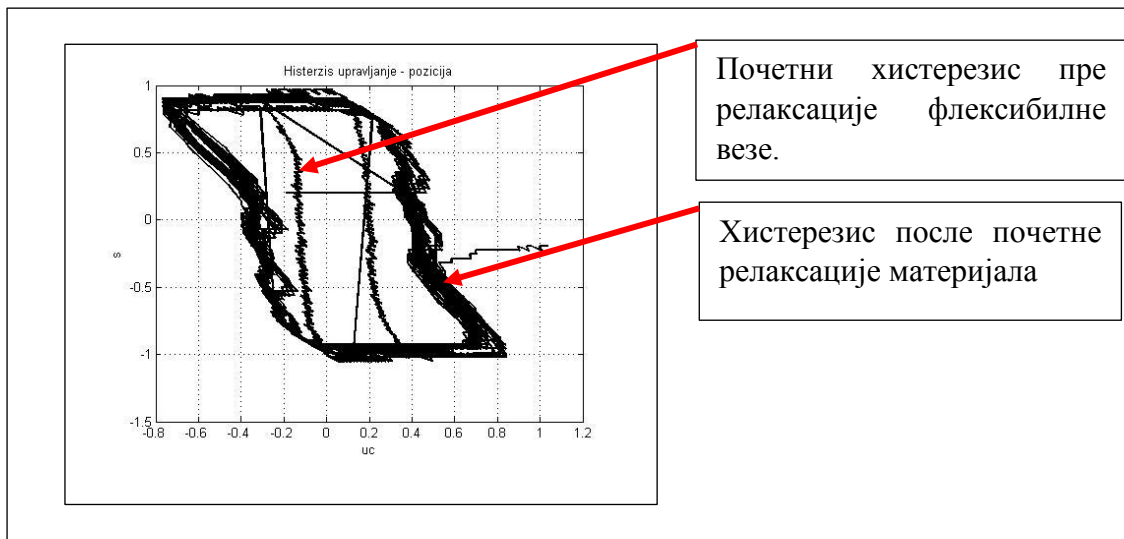


Слика 7.7 –Хистерзис управљање-разлика притиска, сила, отворено и затворено коло (десно)

На слици 7.7 потврђује се приступ да управљање у затвореном колу смањује хистерзис. Дијаграм десно на горњој слици приказује да у затвореној петљи хистерзис по сили минималан, готово невидљив, што значи да је изабрано управљање свело хистерзис система на минималну вредност. Ова провера је најзначајнија у експерименталном раду јер је „најачи критеријум“ да је управљање има неопходан квалитет. Хистерзис верификује другу по значају особину актуационих система, а то је тачност, ако усвојимо да је прва стабилност. Јасно је да у актуационом систему ми не управљамо по сили, али ако нам је мали хистерзис по сили, који обухвата много нелинеарних феномена, можемо очекивати и позитиван такозвани главни хистерзис система, управљање-према позицији. Претходно не значи да актуациони систем треба оптерећивати повратном спрегом по сили, али у фази пројектовања и испитивања са функционалним моделом и моделом оптерећења, не може се избећи ова провера.

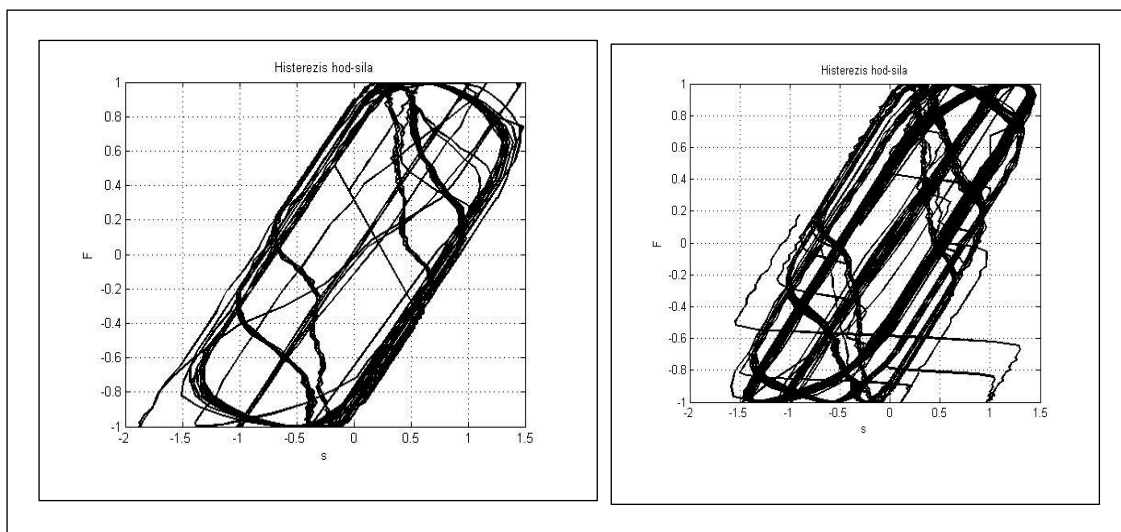
Главни хистерзис је позициони хистерзис према управљању на основу кога се оцењује квалитет актуатора. На слици 7.8 је приказан изглед овог хистерзиса, на коме је посебно интересантно да постоје практично два хистерзиса. Први, унутрашњи, који подсећа на релејну нелинеарност, која настаје пре релаксације флексибилног оптерећења и каснији хистерзис који знатно више подсећа обликом на такозвани „прави еластични хистерзис“. Ово би вероватно било још драстичније изражено да се располаже правим моделом флексибилне везе (стварни модел млазника), а не само моделом флексибилног оптерећења типа смицања. Стварни флексибилни млазник је оптерећен такозваним „boot“ моментом, који би одговарао унутрашњем хистерзису на слици 7.8 и који ишчезава након одређеног времена рада ракетног мотора, како је то приказано на слици 2.39 у поглављу 2.6 (слика која је преузета из литературе на основу испитивања стварног флексибилног млазника).

## Прилог теорији пројектовања актуатора за управљање вектором потиска ракетног мотора са флексибилним млазником



Слика 7.8 –Хистерзис управљање-позиција, затворено коло

На слици, 7.9 која следи приказује се утицај инерцијалног оптерећења на величину хистерзиса. У оквиру расположиве експерименталне инсталације нису постојали повољни услови да се снимају карактеристике хистерзиса за неоптерећен актуатор.

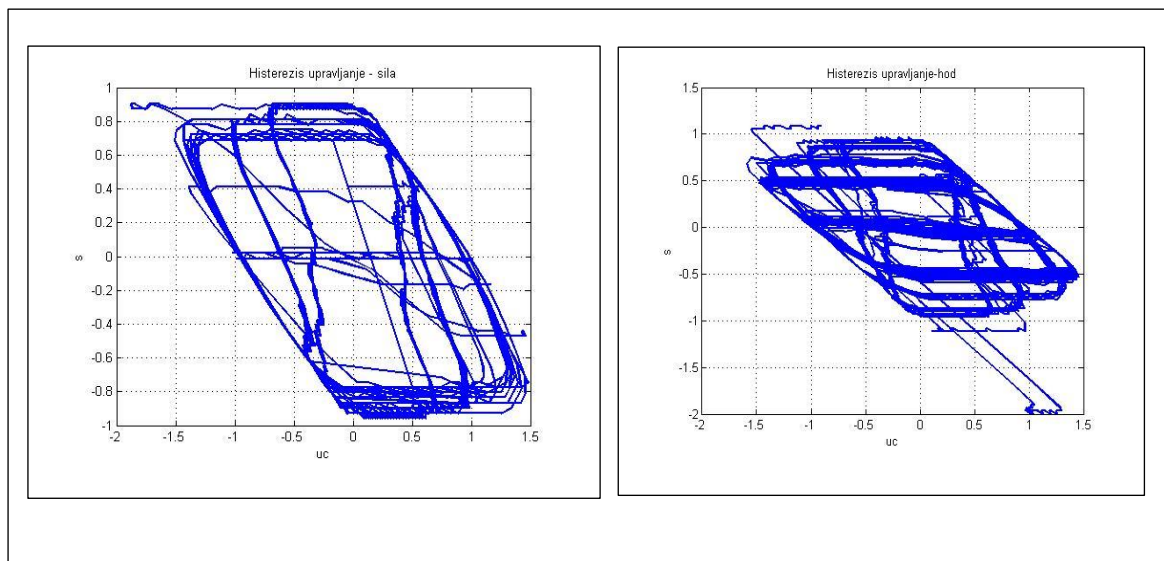


Слика 7.9 –Хистерзис позиција-сила, затворено коло, лево са и десно без инерцијалног оптерећења

Са претходне слике 7.9, јасно је да инерцијално оптерећење не утиче на померање (клизање) хистерзиса, пре свега тачке, нулти ход-сила за случај са и без посебног инерцијалног оптерећења (основно инерцијално оптерећење је маса клипа, клипњаче и припадајућих полука на експерименталном моделу, покретни делови, а посебно инерцијално оптерећење су тегови).



## Прилог теорији пројектовања актуатора за управљање вектором потиска ракетног мотора са флексибилним млазником



**Слика 7.10 –Хистерезис управљање-позиција, затворено коло, лево са и десно без инерцијалног оптерећења**

Са претходних дијаграма видимо да је хистерезис, управљање по позицији симетричан, као и хистерезис ход-сила који је такође симетричан, што је посебно важно за перформансе актуатора. Симетрија хистерзиса је обезбеђена управљачким сигналом са офсетом, који је добијен на основу несиметрије појачања по притиску.

## 8. 0 Закључак и могући даљи правци истраживања

Могуће је у одређеним границама систематизовати пројектантски приступ у пројектовању актуатора за флексибилни млазник ракетног мотора. Основа за систематизацију пројектантског приступа су позната практична искуства у оквиру пројектовања актуационих система за:

-аеродинамичке управљачке површине (комбинација инерцијалног оптерећења и аеродинамичког које делимично има карактер флексибилног оптерећења по аналогiji са идеалном опругом јер сила на актуатору зависи од хода актуатора односно угла закретања аеродинамичке површине)

-манипулаторске системе, где је флексибилна веза између одређених кинематских елемената

-вибро платформе јер је платформа због својих веза са фундаментом доминантно структурно оптерећење актуатора

Приликом пројектовања ове класе актуатора увек треба размотрити она техничка решења која су реализована и као таква позната али и сва техничка решења која су доступна да буду прегледана: патентне пријаве у својим различитим статусима, мали патент, признат патент и слично, што је данас доступно на глобалном нивоу.

Пројектовање оваког актуатора због својих специфичности (пре свега оптерећења актуатора) има компоненту развојног пројектовања које захтева и одређени истраживачки рад који се примарно састоји у што тачнијем опису флексибилне везе за конкретну конструкцију, где је од примарном значаја опис утицаја реалксационог момента који нестаје у оквиру 50 % времена мисије а који зависи од специфичности конструкције сваког ракетног мотора посебно. Ово је чињеница која се аргументује карактером хистерисне петље где амплитуда силе постепено опада. Карактер оптерећења је на смицање али се смицање, може превести на оптерећење типа издужења.

Оно што је обавезно проверити при пројектовању актуационог система за флексибилни млазник уз поштовање и следећих чињеница је:

1. На основу линеарног модела проверити да ли оптерећење од минимално фазног математичког описа актуатора не преводи систем у неминимално фазни опис. Неминимално фазни систем није прихватљиво решење за актуациони систем јер при задатом сигналу са одскочном функцијом можемо добити одзив који ће прво поћи у супротном смеру од очекиваног.
2. Због истог ризика који је наведен под 1, потребно је посебно бити опрезан код избора периоде одабирања за рад управљачког корекционог органа за актуатор јер приликом дискретног описа актуационог система, сувише мала периода одабирања (а томе се интуитивно увек тежи и у оквиру дефиниције идеалног односно адекватног алгоритма управљања) може да

## 8. 0 Закључци и могући даљи правци истраживања

## Прилог теорији пројектовања актуатора за управљање вектором потиска ракетног мотора са флексибилним млазником

- доведе да се актуациони систем глобално посматра као неминимално фазни.
3. Потребно је о нелинеарној природи актуационог система водити рачуна на следећи начин:
    - 3.1 Тежити да се дефинише еквивалентна нелинеарност и изврши њена компензација (у основи ова нелинеарност треба да узима у обзир зону неосетљивости комплетног актуационог система). Дефинисати еквивалентну нелинеарност у пракси значи урадити такву идентификацију оптерећеног актуационог система која то омогућава. У овом случају нису од значаја идентификације које на основу јединичног одскочног улаза дефинишу полином одређеног степена, којим дефинишемо ред система кога желимо да опишемо.
    - 3.2 Нелинеарна природа актуаторског система чије су манифестује као треће и механички зазор мора бити сведена на прихватљиву меру, конструктивним и технолошким решењима (лежајеви на цилиндру са компензацијом зазора, трећа у цилиндру минимална по основу квалитета заптивки и квалитета унутрашњих површина: не постоји могућност да се синтетизује управљање које може ове нелинеарности да компензује
    - 3.3 Група инхерентних нелинеарности мора бити адекватно симулационо испитана, како би се јасно издвојиле фреквенције а амплитуде улазног сигнала где се систем не манифестује нелинеарну природу ове групе нелинеарности.
    - 3.4 Нелинеарност флексибилне везе се мора моделирати на више начина, како је и приказано у овом раду и она има доминантан утицај на пројектовање управљачког система.
  4. Димензионисање актуатора има свој детаљни приступ који се мора користити како би се опис такозваног структурно неизменљивог система дефинисао што прецизније.
  5. Одвојен проблем за димензионисање је напајање електрохидрауличног разводника. У раду је дат и један сопствени предлог за дефинисање енергетског дела актуационог система. Не постоји управљање које може да поправи квалитет рада система чији је енергетски део поддимензионисан. Стабилизација кретања ракете је енергетски најзахтевнија у условима знатних спољних поремећаја, што су у пракси најчешће разне врсте ветрова. Ако захтевамо максимални квалитет стабилизације, а то значи потпуну компензацију спољашњих сила, онда свакако постављамо, пре свега пред енергетски део актуатора, максималистичке захтеве. У доступној литератури постоје подаци да се у одређеним конструкцијама ракета са ограниченим тежинским делом за актуациони систем иде и на један начин поддимензионисања енергетског дела актуационог система,

### 8. 0 Закључци и могући даљи правци истраживања

пре свега само у управљачком задатку који се односи на стабилизацију, што значи да ће конструкција ракета трпети већа динамичка оптерећења.

6. Кроз теоријске анализе у поглављима 3.7, 5.1 и 5.2 дошло се до следећих закључака:

- 6.1 Неопходан је симулатор оптерећења за флексибилни млазник и као такав је много кориснији од физичког модела флексибилног млазника јер се могу задати промене силе према жељи које су брже и са већим амплитудама од оних које би се појавиле директно на физичком моделу млазника. Ово аргументује и чињеница је да између два физичка модела истог млазника може доћи до разлике у силама и до 20 % и да се физички модел млазника после једног коришћења под реалним условима у времену трајања једне мисије (ракетни мотор у раду) више не може користити као функционални модел за симулацију силе.

- 6.2 Крутост флексибилног оптерећења не утиче знатно на пропорционално појачање у директној грани управљачке структуре актуатора.

- 6.3 Начин моделовања статичке карактеристике разводника у условима позиционог оптерећења не утиче знатно на појаву самосциловања у оптерећеном актуационом систему.

7. Синтеза управљања се обављена симулационо на основу различитих математичких модела оптерећеног и неоптерећеног актуационог система. Само управљање се синтетизује на реалтивно једноставном моделу, због једноставности математичког апарата. Испитивање тако синтетизованог управљања је на различитим формама математичког модела. Избор алгоритама управљања је дат у два прилаза. Први који је описао могуће опције са критичком анализом узимајући у обзир динамичке карактеристике серво разводника и цилиндра са оптерећењем (сопствене фреквенције) и други у поглављу о синтези који полази од одређених аксиоматских претпоставки за одређене алгоритме и проверава се симулационо (пропорционално управљање, ПИД управљање, feedforward управљање и каскадно управљање). После симулационе провере, провера је и на моделу флексибилног оптерећења актуатора. Модел флексибилног оптерећења актуатора је прво искоришћен за идентификацију нелиенарне природе система актуационог система.

8. Питање моделоване и немоделоване динамике је кључно за систематизацију пројектантских процедура. Јасно је да се мора проверити утицај инхерентних нелиенарности типа засићења по брзини и убрзању. У овој провери користи се идеална интегрална карактеристика, док код других симулација користи реална интегрална карактеристика, то јест у редној вези апериодични елемент и идеална интегрална карактеристика. Од једноставног добро познатог приступа, да се симулирају одзиви система са различитим описом објекта и да се онда упоређују, и да се тако дође до модела прихватљивог реда, у овом раду предност се даје приступу да се одреде амплитуде и фреквенције улазног сигнала на којима се манифестује

## 8. 0 Закључци и могући даљи правци истраживања

## Прилог теорији пројектовања актуатора за управљање вектором потиска ракетног мотора са флексибилним млазником

нелинерана природа преко виших хармоника приликом синусне промене улазне величине. Ово се допуњује и чињеницом да опис актуационог система у простору стања, односно избором броја величина стања у знатној мери коректно одређује ред система, односно математичког модела, посебно када је у питању фазни алгоритам избора стања, јер он прати све трансформације енергије у актуационој систему. Јасно је да се један систем може описати са више различитих величина стања, али да његов ред, односно број величина стања остаје непромењен. Ред система је једна компонента која одређује појам моделоване односно немоделоване динамике, друга компонента су елементи нелинеарне природе који не припадају базном опису у диференцијалним једначинама првог реда, већ статичке и динамичке нелинеарности. Трећа компонента су промене параметара и шумови у системима. Задња, четврта компонента су процеси и феномени који нису описани у математичком моделу. У овом раду третирају се прве две компоненте. За трећу компоненту се сматра да су довољна решења за филтрирањем одређених сигнала, што је посебно показано на општем структурном дијаграму електрохидрауличног актуационог система, док по питању четврте компоненте се сматра да на основу одређених практичних искустава није пропуштен ни један познат феномен или процес који утиче на понашање електрохидрауличног актуационог.

### Даљи правци истраживања:

Даља истраживања у области пројектовања актуатора за флексибилни млазник би могла да се одвијају у следећем правцима:

-Израда експертског дела описа флексибилног млазника који ће описивати његово закретања према реалном ходу.

-Поред првог приступа, други правац развоја је израда непотпуног обсервера, који би динамички био интегрисан у регулатор стања где би једна немерљива величина стања била закретање млазника. То би значило да се на основу модела оптерећеног актуатора у простору стања било могуће одредити стварно закретање млазника и та информација би се преносила у управљачки систем ракете као директну информацију што би била алтернатива индиректном прерачунавању закретања млазника на основу података са брзинских жироскопа и акцелерометра који прати кретање ракете око њеног тежишта. Једноставно, принцип да се искористе све локалне повратне спреге које су могуће у односу на глобалне које егзистирају на објекту управљања, треба прихватити као циљ у пројектовању сваког актуационог система.

Метода коначних елемената је у софтверском обезбеђењу толико напредовала да готово са сигурношћу може да обезбеди рачунске податке о понашању флексибилне везе, тако да се они врло успешно могу искористити у моделовању оптерећеног хидрауличног актуатора.

### 8. 0 Закључци и могући даљи правци истраживања

Отвара се одмах и питање, да ли су можда доступни и подаци о понашању флексибилне везе и у некој on-line идентификацији тако да се могу користити адаптивни или самоподешавајући алгоритми управљања. У постојећој, аутору овог рада доступној литератури, није пронађено ништа што би наводило да је неко предвидео неку врсту давача који ће узети у обзир понашање флексибилне везе у неком облику хистерезиса.

Постоје одређени радови који се баве коришћењем једног врло успешног модела хистерезиса (Bouc-Wen-ов модел) који је описан и у овом раду у поглављу 5.4 и где су развијене одређене методе за идентификацију одређеног броја параметара који описују хистерезис. На тај начин оставља се могућност израде компензационе релејне нелинеарности.

Из претходног следи да опис актуационог система не мора бити високо нелинеаран, већ се може описати еквивалентном нелинеарношћу типа зоне неосетљивости са засићењем. Тада, у том опису у зони неосетљивости имамо и највећу ширину хистерезиса. Идеално би било када би хистерезис био једнак зони неосетљивости односно резолуцији система, што би могли назвати „идеалном еквивалентном нелинеарношћу“ електро хидрауличног актуационог система. Тежити односно истраживати могућности да се пројектује систем код кога ће се нелинеарни феномени манифестовати у оквирима „идеалне еквивалентне нелинеарности“ у сваком случају мора бити правац даљег истраживања.

Као потенцијал за даљи истраживачки рад је и одређен развој методе Д разлагања, која за линеарни опис система, омогућава раздвајање параметара за чије је вредности систем стабилан, а за које је нестабилан. Ако би смо уместо директних параметара система, вредности временских константи или појачања, увела појачања после хармонијске линеаризације на пример за три нелинеарности имали би користан приказ у 3 Д дијаграму. То значи да би могле да се издвоје зоне дозвољених појачања и амплитуда које зависе од карактеристика статичких нелинеарности за које је систем стабилан. Тако да би тада било неопходно радити знатно мањи број симулационих провера, а могле би се користити експериментално идентификоване статичке нелинеарности за претходно већ изабране компоненте електро хидрауличног актуационог система.

Даљи истраживачки рад треба наставити и на развоју конструкције динамичког симулатора флексибилног млазника увођењем актуатора за симулацију вибрација, форсирањем грејања флексибилне везе, како би се обезбедила стварна промена модула смицања односно карактера флексибилног оптерећења у времену мисије. С друге стране, коришћењем претходно изабраних хидрауличних компонента, њихов математички модел би се могао радити идентификацијом стварних параметара за сваку компоненту посебно, што би био један високо тачан начин идентификације математичког модела актуационог система.

## **8. 0 Закључци и могући даљи правци истраживања**

**Литература:**

- [1] В.Анђелковић, Од ракете до ракетног система ПВО, Војноиздавачки завод, Београд, 2005.
- [2] Б.Милојковић, Љ.Грујић, Аутоматско управљање, Машински факултет, Београд, 1981.
- [3] М.Мaboodi, М.Larki, М.Shoorehdeli, Н.BoLANDi, An under Servo Actuator Identification, 18<sup>th</sup> IFAC World Congress, Milano, August 28-September 2, 2011
- [4]. Н.Harris Mc Clamroch, Displacement control of flexible structures using electro hydraulic servo actuators, Department of Aerospace Engineering, The University of Michigan, June 1983.
- [5]. David William Robinson, Design and analysis of series elasticis in closed loop actuator force control, PhD thesis, Massachusetts institute of technology, June, 2000.
- [6] Н.Гамынин, Проектирование следящих гидравлических приводов летальных аппаратов, Машиностроение, Москва, 1981.
- [7] Р.Петровић, Колективни поглед на изазове управљања, поводом семинара врхунских аутоматичара, САД, Санта Клара 1986, Аутоматика, 1-2, Загреб, 1987.
- [8] О.Вучуровић, Основи пројектовања ракета, Машински факултет, Београд, 2003
- [9] Р.Томовић, М.Вукобратовић, Р.Ракић, Увод у нелинеарне системе аутоматског управљања, Научна књига, Београд, 1974.
- [10] М.Милиновић, Основи пројектовања ракета и лансера, Поглавља из пројектовања лансера, Машински факултет, Београд 2012
- [11] Россииская Академия Ракетних и Артиллерииских наук, Твeрдотопливние регулируемие двигалние установки, Машиностроение, 2011, Москва
- [12] И. Шумилов, Системе управления рулями самолетов, МГТУ им. Н. Баумана,
- [13] А.Матвееенко, Методи проекириванија перспективних енергосистем силовога привода летальних аппаратов, МАИ Принт, Москва 2010.
- [14] MOOG № 122, Technical Bulletin, Moog Inc., East Aurora, New York
- [15] MOOG № 141, Technical Bulletin, Moog Inc., East Aurora, New York
- [16] Series Seismic Engineering Research Infrastructures for European Synergies, Work package WP/12JRA1, Report on evaluation of novel actuation systems for shacking table, pseudo-dynamic or field testing, University of Oxford, February, 2012.
- [17] MOOG № 126, Technical Bulletin, Moog Inc., East Aurora, New York
- [18] NASA CR-72727 (TWR 4037), THRUST VECTOR CONTROL (TVC), System Study Program, September 1970.
- [19] В. Carpentier, F. Pael, C.Cros, В. Pin and L. Gerbe, Stability analysis using a coupled model of TVC actuator control loop and structural dynamics of a Launch vehicle, 4<sup>TH</sup> European Conference For Aerospace Sciences (EUCASS), 2011.
- [20] М.Вернард, Vega Missionization and Post Flight Analyses, Ph.D Thesis, December, University of Roma, 2019.
- [21] К.Е.Rydberg, Feedbacks in Hydraulic Servo Systems, Linkopings university, 2008.
- [22] С.Вукосављевић, Дигитално управљање електричним погонима, Академска мисао, Београд, 2003.
- [23] Д.Катић, Рачунарски избор електрохидрауличких извршних органа манипулационих робота применом њихових комплетних динамичких модела, Аутоматика, 5-6, Загреб, 1985.
- [24] L.E.Kapinos, Control System for Flexible Movable Seal Nozzle, United States Patent, 60/232, 239/265.35, July, 1973.

- [25] Peter E.Nachtwey, A Guide to practical Design, Delta Computer Systems, INC., Second Edition, Hydraulic & Pneumatics, 2009.
- [26] К.С.Колесников, Машиностроение энциклопедия, Электропривод, Гидро и Виброприводы, Том I-4-2, Машиностроение, Москва, 2012.
- [27] М.Гойдо, Проектирование объемных гидроприводов, Машиностроение, Москва, 2009.
- [28] Н.Е. Merrit, Hydraulic control systems, Wiley, New York 1967.
- [29] Д.Аврамовић, Пројектовање хидрауличних уређаја, ОМО, Београд, 1982.
- [30] Д.Аврамовић, Пројектовање хидрауличних уређаја, ОМО, Београд, 1984.
- [31] Р. Јовановић, Синтеза фази пратећих алгоритама управљања електрохидрауличних сервосистема, Докторска теза, Машински факултет у Београду, Београд, 2011.
- [32] M.Jelali, A.Kroll, Hydraulic Servo-systems, Modeling, Identification and Control,
- [33] С.Миновић, Основе теорије самонавођених ракета, Војноиздавачки и новински центар, Београд, 1988.
- [34] В.Дьяконов, Матлаб, R2006/R2007/2008, SIMULINK 5,6,7, Основи применения, Салон Пресс, Москва, 2008.
- [35] D.Nauparas,D.Prasic,M.Milos, Design criterion to select adequate control algorithm for electro-hydraulic actuator applied to rocket engine flexible nozzle thrust vector control under specific load, FME Transaction, Belgrade, Accepted for printing, Vol. 41, No 1, March 2013, page 31-37.
- [36] Ј.Мандић, Отпорност Материјала, Научна књига, Београд, 1977
- [37] А.В. Прилипов, „Разработка методики расчета газогидравлического источника питания рулевого привода управления поворотном соплом путем посторения эпюры сопряжения располагаемой и потребной мощностей“. МАИ, Москва, 2010.
- [38] Д.Наупарац,Д.Пршић,М.Милош, Electro-hydraulic system for the Simulation of Dynamic Behaviour of Rocket Engine Flexible Nozzle Thrust Vector Control, 2<sup>nd</sup> International conference Manufacturing Engineering & Management 2012, Presov, Slovak Republic, 5-7 December, 2012.
- [39] D.Schinstock, D. Scott, Tim A.Haskew, Modeling and Estimation for Electromechanical Thrust Vector Control of Rocket Engines, Journal of propulsion and Power, Vol 14, No 4, July-August 1998.
- [40] J. H. Lumkers, Control Strategies For Dynamic Systems,Marcel Dekker, New Yor, Basel,2002.,
- [41] Pršić D., Nedić N., Dubonjić Lj., Djordjević V., "Bond Graph Modeling In Simscape", International Journal of Mathematics and Computers in Simulation, Issue 2, Volume 6, 2012, pp. 239-247
- [42] M.Karpenko, N.Sepetri, Hardware in the loop simulator research of fault tolerant control of electrohydraulic actuators in a flight control application, Elsevier, Mechatronics, 1067-1077, 2009.
- [43] B.Decker, D.Saaski, Design & Control of proportional and Servo systems, April, Bosch-Rexroth brochure, April 2008.
- [44] W. R. Anderson, Controlling Electrohydraulic systems, Marcel Dekker, 1988  
Springer, J.Powell, A.E.Naeini, Feedback Control of Dynamic Systems, Pearson Prentice Hall, Fifth edition 2009



- [45] Ж. Ђуровић, Б. Ковачевић, Системи аутоматског управљања, Академекса мисао, Београд, 2006.
- [46] D.Nauparac, The criteria for selection of control algorithms for electro-hydraulic power actuator, Heavy Machinery, Vrnjacka Banja, 2011,
- [47] М. Стојић, Континуални системи аутоматског управљања, Научна књига, 1985.
- [48] М. Стојић, Дигитални системи управљања, Научна књига, 1989.
- [49] Z.Ribar, D.Nauparac, Natural Tracking of pneumatic system, Conference "Fluid Power Systems", Book Of Ninth Bath International Fluid Power Workshop, Bath, 1996.
- [50] Z.Ribar, D.Nauparac, Position Control On Hydraulic servo system Using natural Tracking Low, International conference Hydraulic and Pneumatic, VOL 1, Timisoara Romania, 1995., pp160-166.
- [51] Д. Наупарац, Анализа теорије праћења на реалном електрохидрауличном сервосистему, Магистарска теза, Машински факултет, Београд, 1994.
- [52] Тугомир Шурина, Аутоматска регулација, Школска књига, Загреб, 1987.
- [53] F.Golnaraghi, В.С.Кuo, Automatic Control Systems, John Wiley & Sons, 2010 edition 2008.
- [54] З.Рибар, Синтеза континуалних система аутоматског управљања сталне и променљиве структуре са клизним радним режимом, Докторска дисертација, Машински факултет, Београд, 1985.
- [55] Зборник радова, Аутомат и Робот, "ОМО" и УСАУМ Београд, 1985.
- [56] Зборник радова, САУМ. 5 конференција, Нови Сад, октобар 1995.
- [57] Зборник радова, ЕТРАН, 40 Конференција, Будва 4-7 јун, 1996.
- [58] D.Lazic, M.Ristanovic, Electrohydraulic thrust vector control of twin rocket engines with position feedback via angular transducers, Control Engineering Practice, 15(2007), 583-594, ELSEVIER.
- [59] D.Nauparac, D.Prsic, M.Milos, Design Selection of Adequate Control Algorithm for Electro-hydraulic Actuator Applied on Rocket Engine Flexible Nozzle Thrust Vector Control, 14<sup>th</sup> ITI, Symposium, Dresden, October 2011. (на енглеском језику)
- [60] В.Ерыılmaz, Improved Nonlinear Modeling and Control of Electro Hydraulic Systems, Northeastern University, PhD Thesis, 2000.
- [61] I.Lee, T.Kim, S.Choi, Hydraulic servo system using a feedback linearization controller and disturbance observer (Sensitivity of system parameters), 7<sup>th</sup> JPFS International Symposium on Fluid Power, Toyama 2008, September 15-18, 2008.
- [62] T.Andersen, M.Hansen, H.Pedersen, F.Conrad, Comparison of linear controllers for a hydraulic servo system, 6<sup>th</sup> JPFS International Symposium on Fluid Power, Toyama 2005, November 7-10, 2005.
- [63] N.McClamroch, Displacement control of flexible structures using electro hydraulic actuators, Department of Aerospace Engineering, The University of Michigan, June 1983 (Research report)
- [64] Б. Милојковић, Д. Дебелковић, Пројектовање линеарних система, Машински факултет, Београд, 1981.
- [65] В.Вах, Applying and Analyzing Robust Modern Control On Uncertain Hydraulic Systems, Ms Thesis, University of Missouri, Columbia, 2006.
- [66] myBWMoD, Version 1.0, User Manual, Department of Civil Engineering, Institute of Structural Analysis and Aseismic Research, National Technical University of Athens (NTUA), April, 2009.

- [67] Nonlinear control for a class of hydraulic servo system, Journal of Zhejiang University, pp.1413-1417, 2004.
- [68] J.D'Azzo, C.Houpis, Feedback control system analysis & synthesis, McGraw-Hill International Book Company, 16<sup>th</sup> printing 1984
- [69] K.E.Rydberg, Hydraulic Systems with Load Dynamics, Linkopings University,
- [70] Љ.Грујић, Дискретни системи, Машински факултет, Београд, 1983.
- [71] М.Соколовски, В.Петренко, Управляемые энергитические установки на твердом ракетном топливе, Машиностроение, Москва, 2003.
- авиационных ракетных систем и комплексов, Машиностроение, Москва, 2011.
- [72] И.Голубева, В.Светлова, Проектирование Зенитных управляемых ракет, МАИ, Москва, 1999.
- [73] Y.Luo, System modelling and control design of a two stage metering poppet-valve system, PD Thesis, University of Missouri, Columbia, May, 2007.
- Москва, 2009. [74] Б.Т.Ерохин, Теори и проектирование Ракетных Двигателей, Санкт-Петербург, Москва, Краснодар, Лан, 2015.
- [74] M.Ristanovic, D.Lazic, I.Indjin, Experimental Validation of Improved Performance of an Electromechanical Aero-fin Control System with a PWM Controlled DC Motor.
- [75] М.Ненадовић, Стабилност и управљивост летелица (други део), уздужна стабилност авиона, Машински факултет Београд, 1985.
- [76] H.Harris Mc Clamroch, Displacement control of flexible structures using electro hydraulic servo actuators, Department of Aerospace Engineering, The University of Michigan, June 1983.
- [77]. NASA SP 8114, Solid Rocket Thrust Vector Control, December, 1974.
- [78] Љ.Грујић, Нелинеарни системи, неауторизована предавања, на Машинском факултету, Београд, 1985/1986
- [79]. D.G.Mitchell, E.J. Field, Nonlinearities and PIO with Advanced Aircraft Control Systems, Symposium on „ Active Control Technology for Enhanced Performance Operational Capabilities of Military Aircraft, Land Vehicles and Sea Vehicles“ held in Braunschweig, Germany May 2000.
- [80] H.Qin, N.Bu, W.Chen and Z.Yin, An Asymmetric Hysteresis Model and Parameter Identification Method for Piezoelectric Actuator, Mathematical problem in engineering, Volume 2014, 14 pages, Hindawi
- [81] T.Sieteanu, M.Giuclea, A.M.Mitu, An Analytical approach for approximation of experimental hysteretic loops by Bouc-Wen model, Proceedings of Romanian Academy, Series A, Volume 10, Number 1/2009., Romania, 2009.
- [82] К.Пупков, Н. Егупов, Том 3-Синтез Регуляторов Систем Автоматического управления, МГТУ, Москва, 2004
- [83] T. Vanthuynе, An Electrical Thrust Vector Control System For The Vega Launcher, 13<sup>th</sup> European Space Mechanisms and Tribology Symposium, ESMATS 2009, Austria, September, 2009.
- [84] H.Watter, Hydraulik und pneumatic, Grundlagen und Ubungen-Anwendungen und Simulation, Studium Technick, Vieweg, Wiesbaden, 2007
- [85] J.Dabney, T.Harman, Mastering SIMULINK 4, Prentice Hall, 2001.
- [86] А.Јакуповић, Р.Миловић, Turbo C, верзија 2.0, Computer book, Београд 1990.
- [87] С.Граовац, Аутоматско вођење објеката у простору, Академска мисао, Београд, 2005.
- [88] И.Голубева, В.Светлова, Проектирование Зенитных управляемых ракет, МАИ, Москва, 2010 (друго проширено издање).

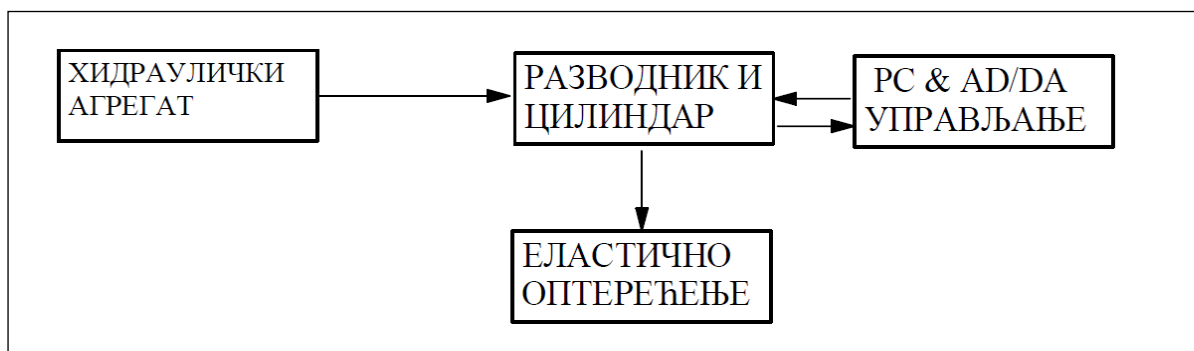
- баача ракета, Војнотехнички гласник, број 2, Београд, 2011
- [89] S.Gunnarsson, P.Krus, Fluid Power Control of a Flexible Mechanical Structure, CENIT, Linköping University, Report LiTH-ISY-R-1961, 2010.
- [90] В.Калугин, Аерогазодинамика органа управления полетом летальных аппаратов, МГТУ имени Н.Баумана, Москва, 2004.
- [91] М.Б.Наумовић, Неке препоруке за избор периоде дискретизације у системима аутоматског управљања, Електронски факултет Ниш, 2015, Ниш
- [92] N.Ishak, M.Tajjudin, H.Ismail, M.Rahimian, Y.Adnan, PID Studies on Position Tracking Control of an Electro-Hydraulic Actuator, International Journal of Control Science and Engineering 2012, 2(5), 120-126
- [93]. A.V.Mesropyan, Special Features of Correctiong Hydraulic Actuators of Flight Vehicle Controls, Aviatsionaya tekhnika, No 1, pp.27-31, 2009.
- [94], С.Тирнанић, С.Бурсаћ, Ракетни системи, Војно издавачки завод, Београд, 2001.
- [95] E. Barbosa, R. Machado, W.Filho, Dynamic Analysis and Identification of Movable Nozzle Used on the Brazilian Satellite Launcher, 22 International Congress of Mechanical Engineering (COBEM 2013), Ribeirao Preto, SP, Brazil, November 3-7, 2013
- [96] А.Коротеев, Газодинамические и теплофизические процессы в ракетных двигателях твердого топлива, Машиностроение, Москва 2004.

## 10. Прилози

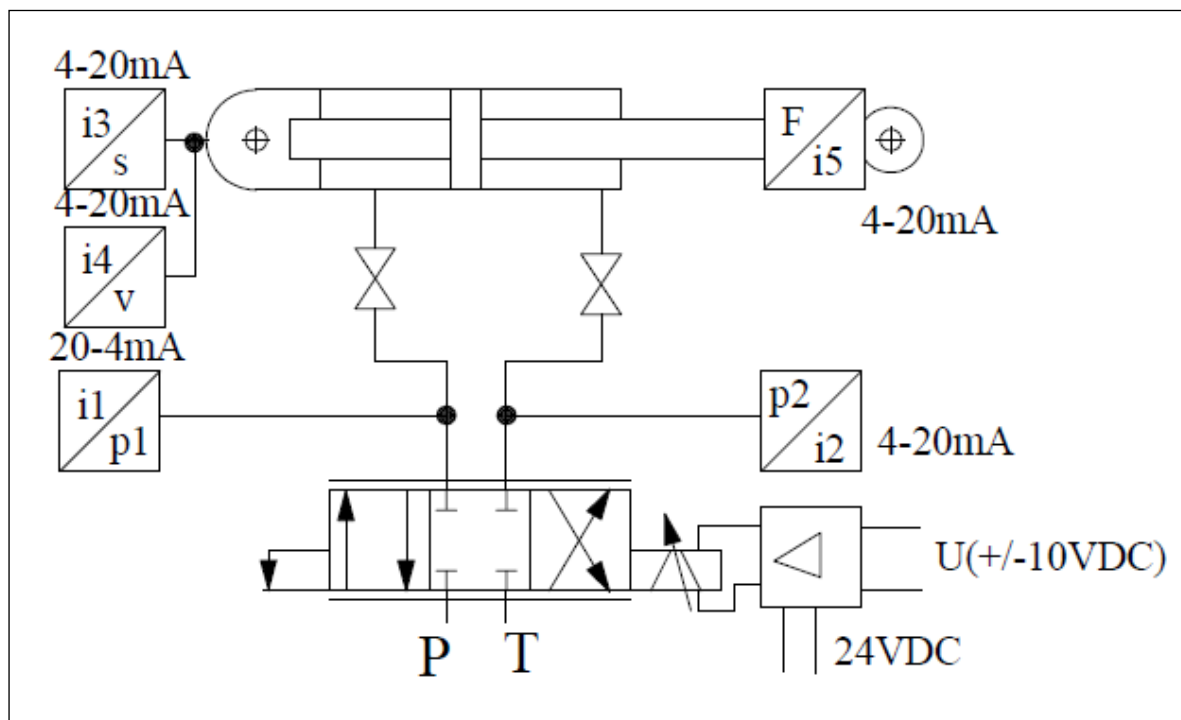
### 10.1 Прилог 1-Опис електрохидрауличног система за експерименталну верификацију управљачких алгоритама

Експериментални систем за симулациону проверу синтетизованог управљања и пројектно решење актуационог система приказан је на блок дијаграму (слика 10.1), на функционалној шеми (слика 10.2), цртеж цилиндра (слика 10.3), цртеж склопа за тестирање (слика 10.4) и фотографијима (слика 10.5).

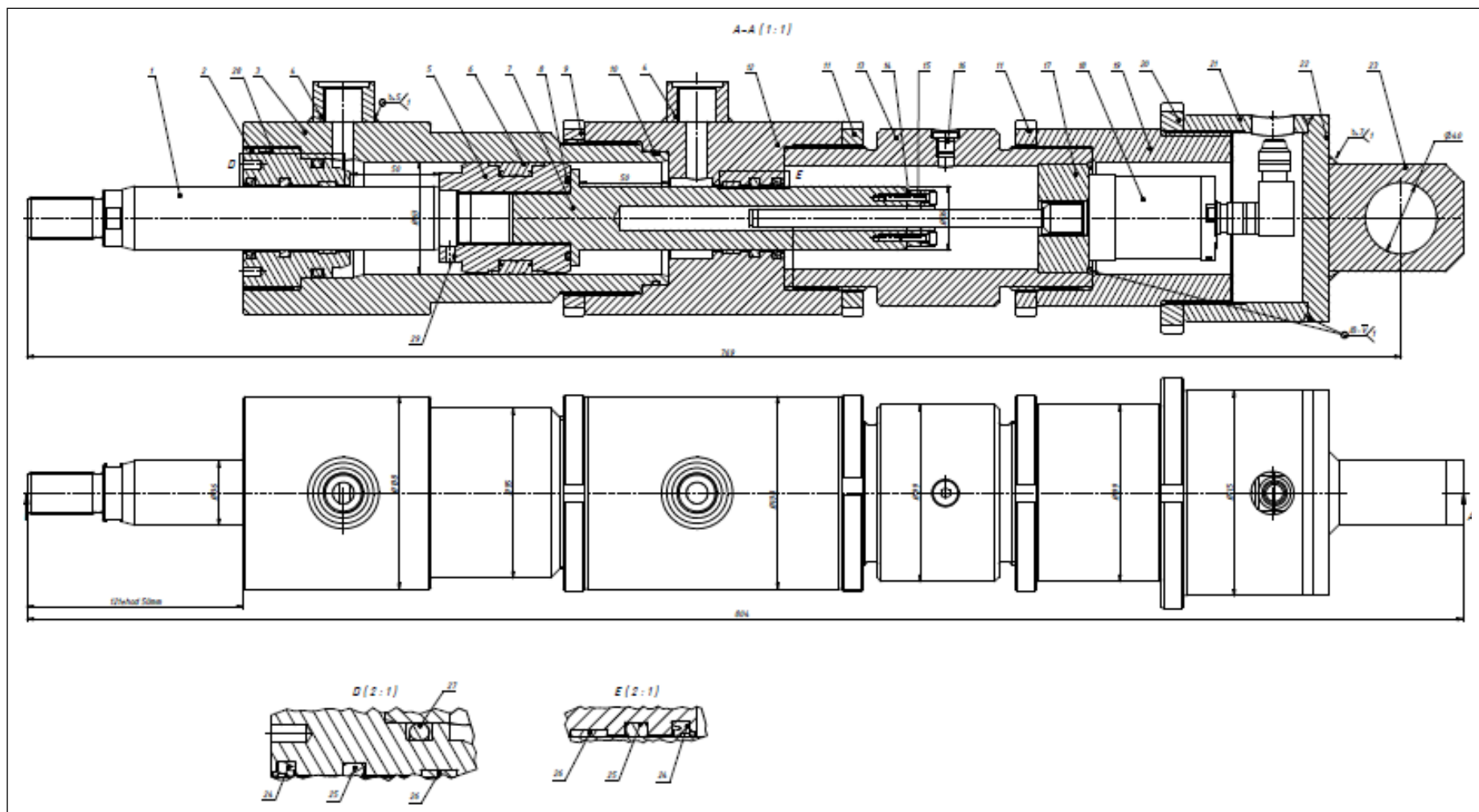
Основна идеја при пројектовању симулатора оптерећења је да се може раздвојити позиционо (флексибилно) оптерећење од инерцијалног. На тај начин је обезбеђено констатно флексибилно оптерећење преко два блока од гуме у којима се као посебно ојачање налази и 5 алуминијумских плочица као слојева за ојачање, што одговара стварној конструкцији флексибилне везе млазника и ракетног мотора. На слици 10.6 је приказан цртеж једног блока који симулира флексибилну везу, а на слици 10.7 је фотографија блока где се јасно виде рупе за чивије преко којих се преноси оптерећење.



Слика 10.1-Блок дијаграм система за експерименталну проверу



Слика 10.2-Функционална шема система за експерименталну проверу

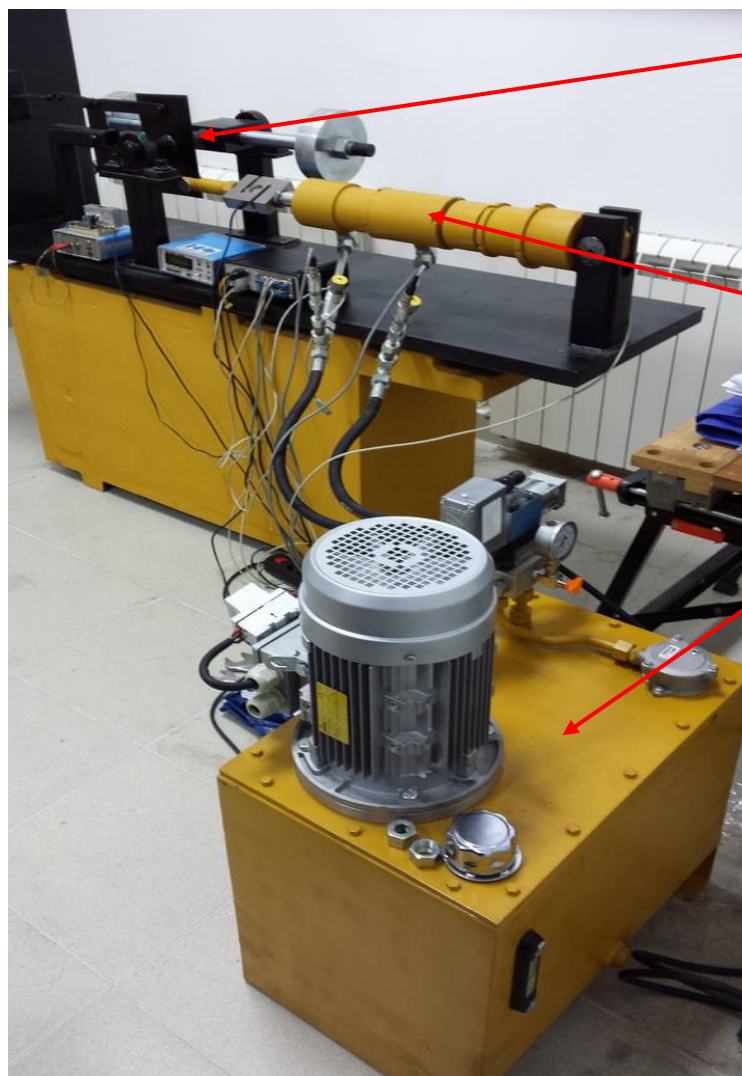


Слика 10.3-Хидраулични цилиндар-склоп, извршни део електрохидрауличног актуационог система





Слика 10.5а-Поглед са предње стране на комплетан систем актуатор, хидраулички агрегат и механички симулатор инерцијалног оптерећења и оптерећења на смицање



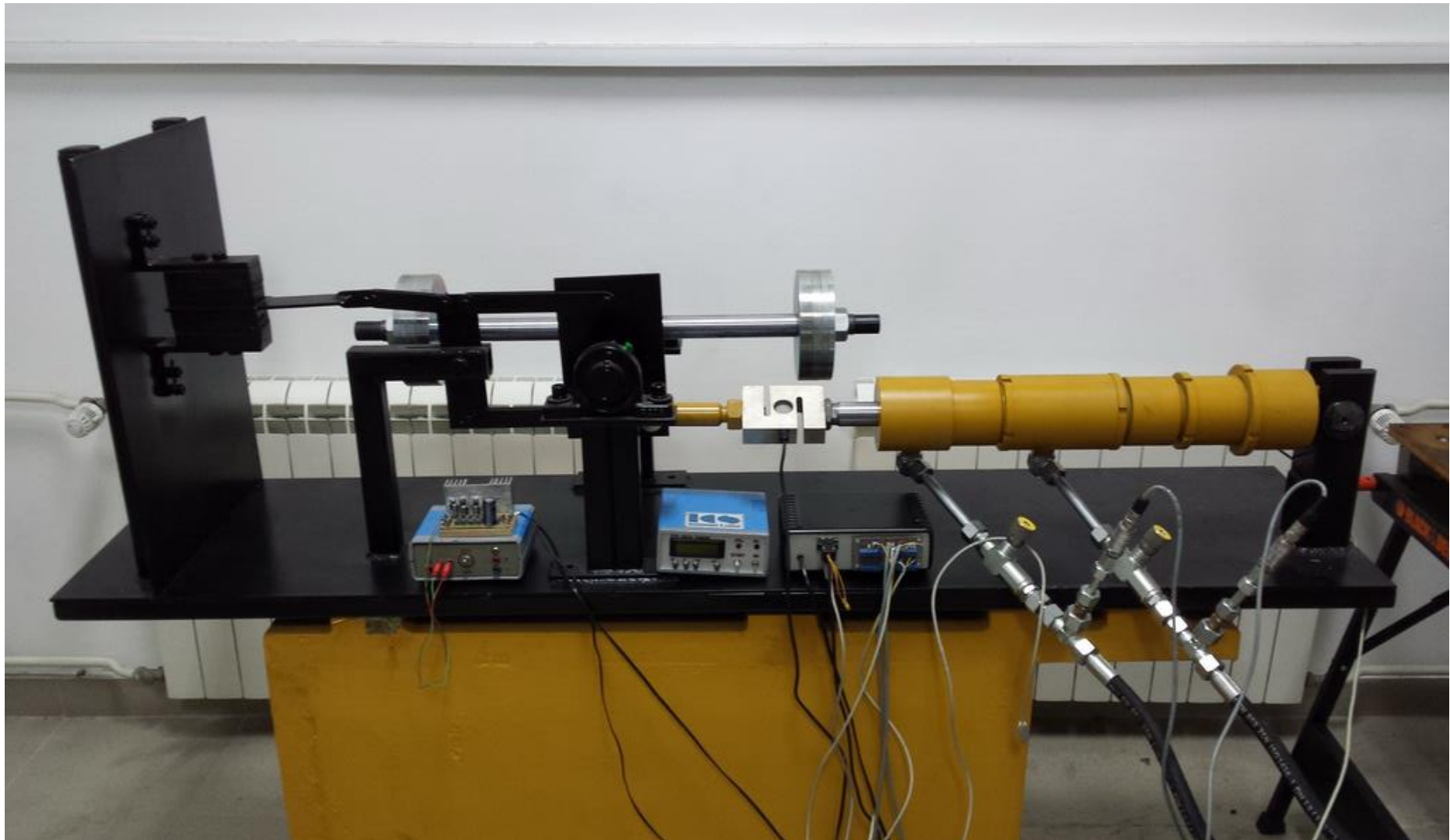
Механизам за инерцијално и еластично оптерећење

Хидраулични актуатор-цилиндар

Хидраулични агрегат, запремина резервоара 63 литра, снага електро мотора 4 киловата.

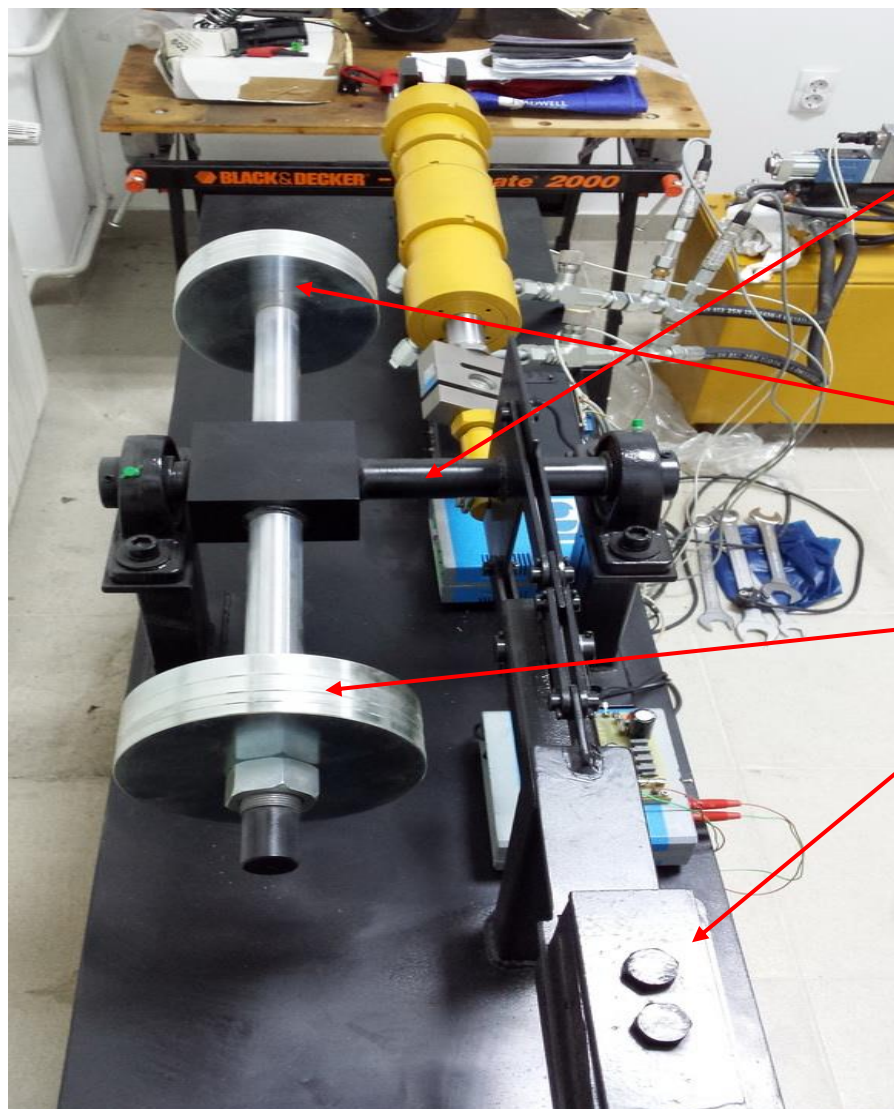
Слика 10.5b- Поглед из угла на комплетан систем актуатор, хидраулички агрегат и механички симулатор инерцијалног оптерећења и оптерећења на смицање





Слика 10.5с- Поглед на склоп механичког дела за задавање оптерећења и актуатора

10.Прилози

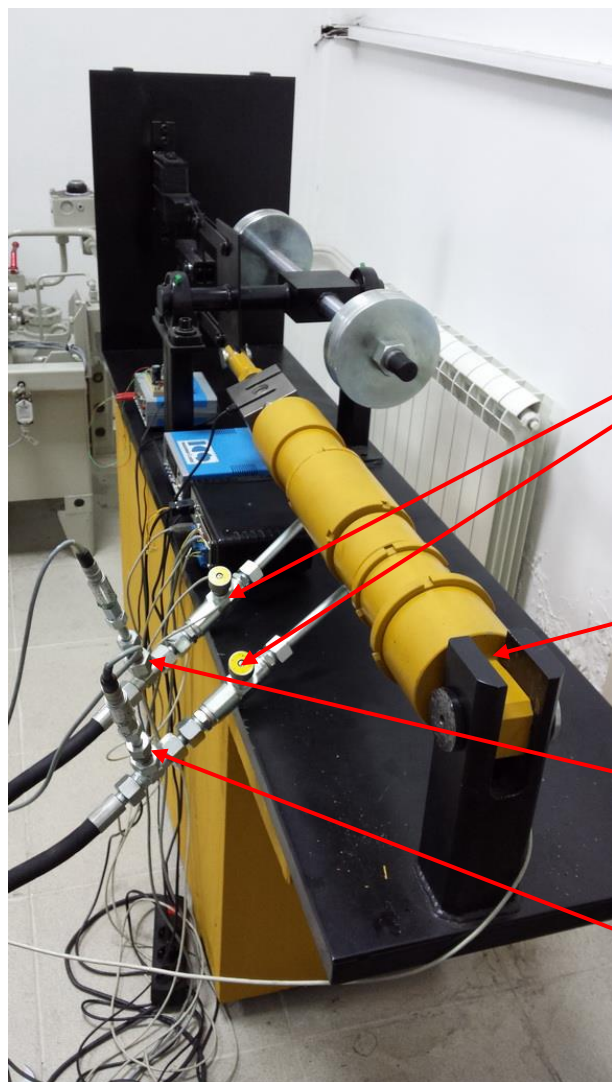


Заједничка осовина преко које хидраулични цилиндар уводи оптерећење на полужни механизам.

Тегови за симулацију момента инерције (масе) флексибилног млазника

Два блока, вулканизирана гума, ојачана алуминијумским лимовима, према цртежу на слици 10.6, постављени један изнад другог, оптерећење се уноси плочицом преко чивија.

Слика 10.5d- Поглед на склоп механичког дела за задавање оптерећења и актуатора са бочне стране

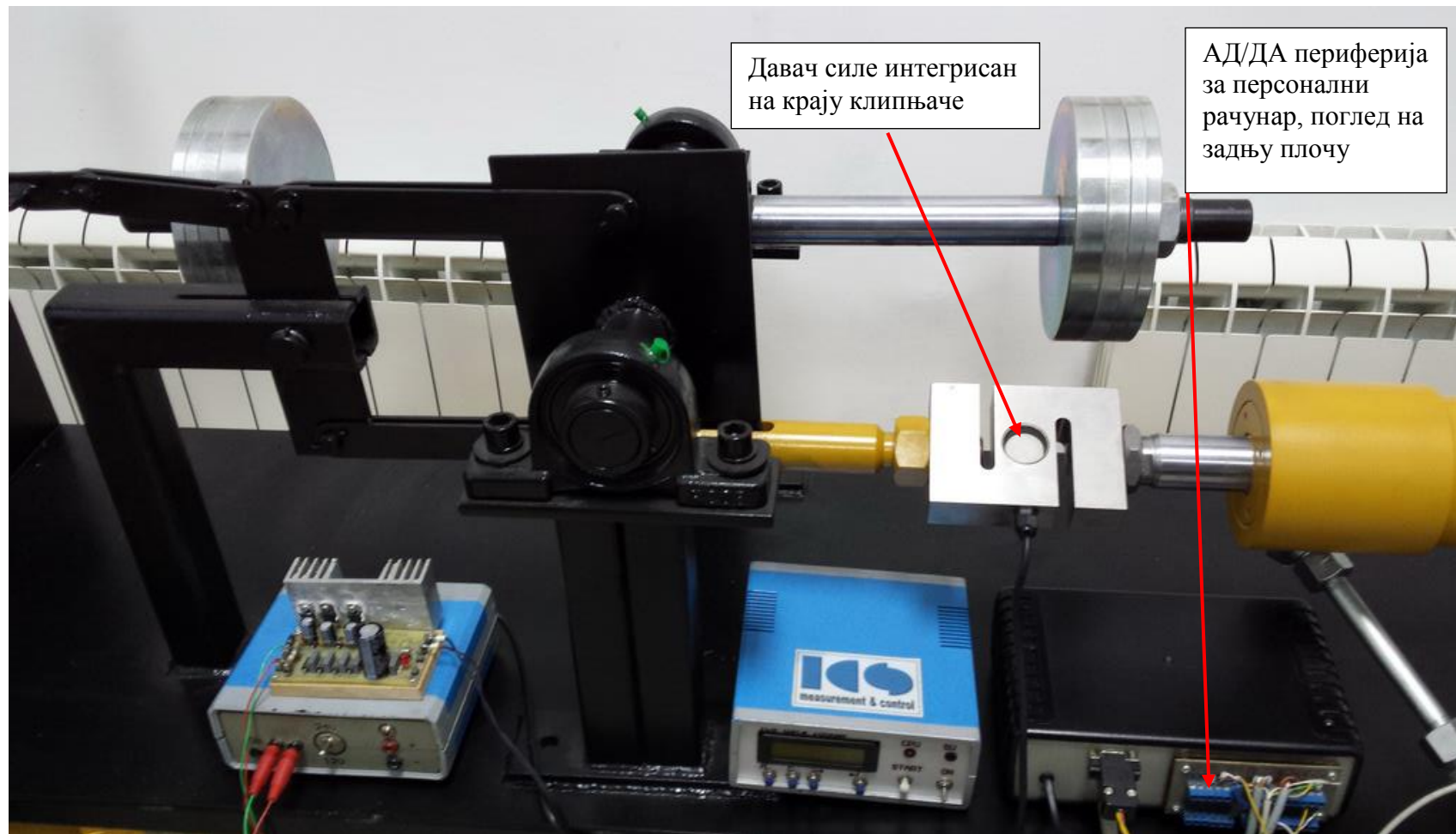


Неповратно пригушни вентили, уградња на цев, коришћени су да се затворе водови из разводника како би се снимило појачање по притиску у разводнику

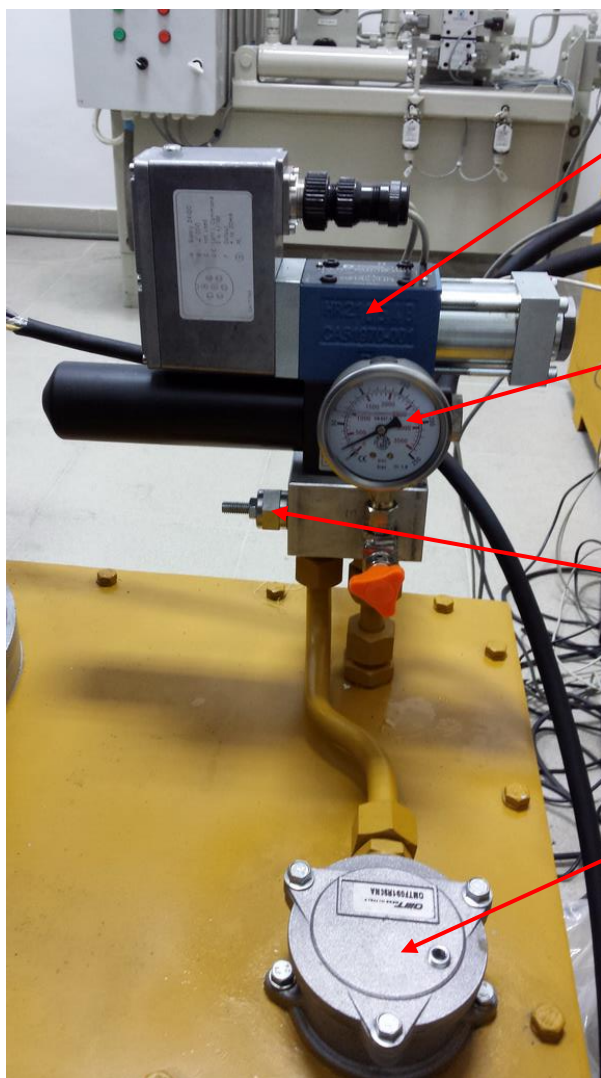
Задња глава цилиндра из које излази кабл од интегрисаног у клипњачу цилиндра магнетостриктивног давача позиције

Давачи притиска преко којих је сниман притисак у коморама цилиндра и на основу којих је израчуната разлика притисака као сигнал повратне спреге по оптерећењу

Слика 10.5е- Поглед на склоп механичког дела за задавање оптерећења и актуатора са задње бочне стране



Слика 10.5 f- Поглед на склоп механичког дела за задавање оптерећења и актуатора



Серво разводник, једностепени разводник, ход разводног клипа +/- 0.5 mm са електро механичким претварачем за померање разводног клипа, типа“ force motor“ и интегрисаном електроником (on board) и мониторингом положаја разводног клипа

Манометар са манометарском славином за праћење напојног притиска

Вентил за ограничење напојног притиска, кетриц типа, на њему се подешава максимални напојни притисак за серво разводник

Повратни филтер, повезан директно са повратним водом на подножној плочи серво разводника

Слика 10.5g- Поглед на серво разводник који је уграђен на подножну плочу у склопу хидрауличког агрегата

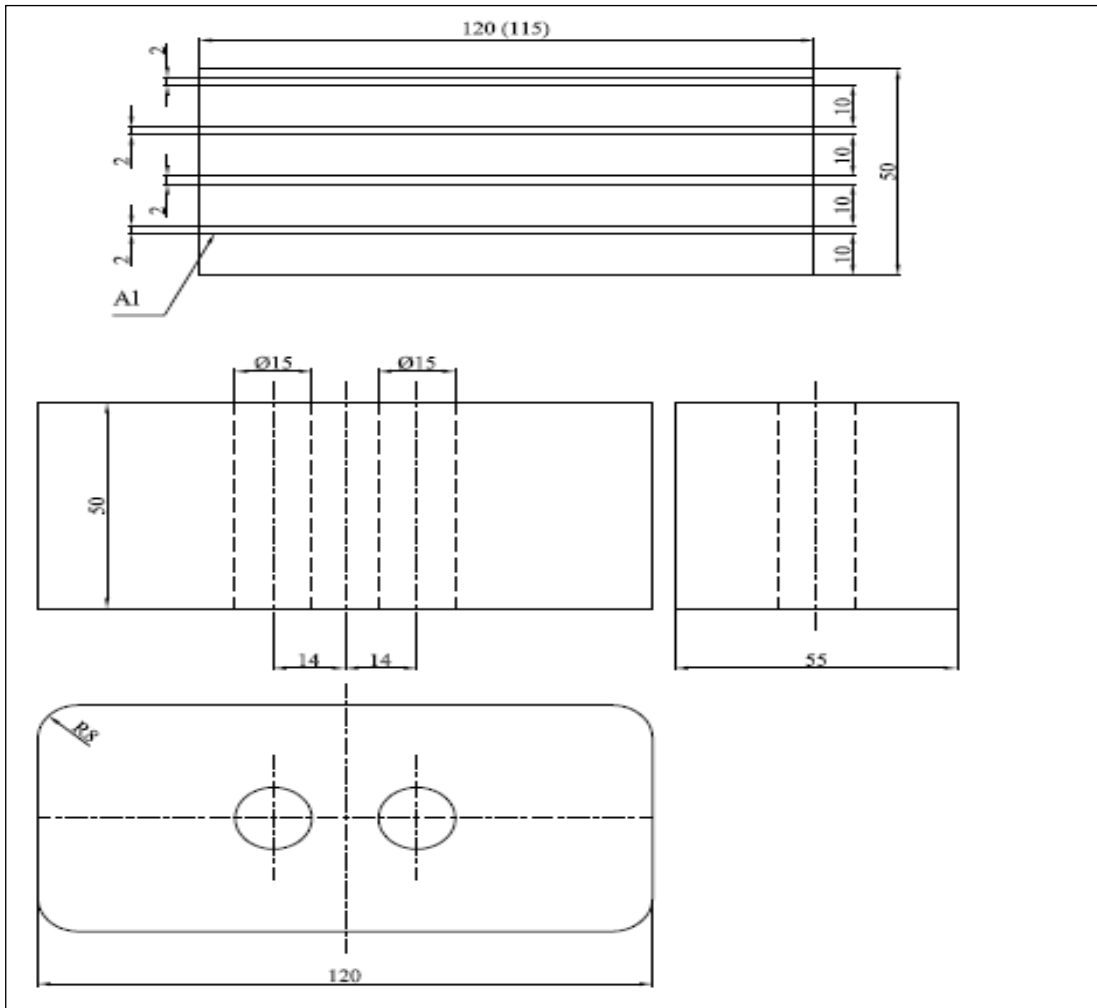


Потисни филтер-модуларна уградња, заштита серво разводника

Заштитна склопка за укључење и искључење електро мотора

Слика 10.5 h-Поглед на хидраулички агрегат са предње стране

Прилог теорији пројектовања актуатора за управљање вектором потиска ракетног мотора са флексибилним млазником



Слика 10.6-Цртеж гуменог блока за симулацију флексибилног оптерећења



Слика 10.7-Фотографија гуменог блока за симулацију флексибилног оптерећења-оптерећење на смицање

## Прилог теорији пројектовања актуатора за управљање вектором потиска ракетног мотора са флексибилним млазником

Блок је вулканизан од гуме у квалитету NBR тврдоће 80 Shr. Преко адекватног полужног оптерећења, у еластични блок (два у сендвичу) уноси се оптерећење на смицање које по свом карактеру одговара у потпуности стварном оптерећењу у флексибилној вези. На овај начин добили смо реалну симулацију еластичног оптерећења. Променом броја цилиндричних тегова дефинише се утицај тежине млазника односно димензије ракетног мотора.

Комплетан склоп за испитивање електрохидрауличног актуатора за флексибилни млазник дефинисан је тако да омогући реално оптерећење (еластично оптерећење типа смицања) за електрохидраулични актуатор. Ово је склоп знатно скромнијег обима од онога који би одговарао ономе што у савременој терминологији назвамо. HIL (Hardware In Loop Simulation). Пошто у Србији никада није пројектован и израђен флексибилни млазник за ракетни мотор (конструкција са ламинарним лежајем), нити се располаже верификованом технологијом за израду, ово је један од прилаза да се направи само стварно оптерећење то јест смицање, док остали елементи који утичу на понашање млазника нису могли да буду узети у обзир.

Стварно оптерећење је најзначајније при пројектовању односно испитивању актуатора за флексибилни млазник. Стварно оптерећење је структурни хистерезис, еластичног типа кога је врло тешко математички описати приликом моделирања, тако да је посебно значајна експериментална провера.

Без обзира што се сматра да је методом коначних елемената остварен огроман напредак задњих 20 година у структурним прорачунима, ниједан од познатих програмских пакета за прорачун коначним елементима нема опцију за одређивање хистерезиса. Ово је посебно тешко и условима када се то жели посебно урадити јер се захтевају подаци који врло прецизно описују материјал флексибилног млазника, који је у основи једна врста композитне структуре.

На следећој слици је приказана једна од ретко доступних фотрографија која показују уређај за испитивање флексибилног млазника у склопу са актуатором.



Испитивање управљања вектором потиска са флексибилним млазником, ракетни мотор P80, ракета Вега.

**Слика 10.8-Испитивање управљања вектором потиска за ракетни мотор P80, ракета Вега [139]**



## 10.2 Прилог 2 – Код управљачког софтвера (основни код за рад са интерпретером) за експерименталну верификацију управљачких алгоритама

```
#include <stdio.h>
#include <time.h>
#include <math.h>

#define NAPON_UPRAVLJANJA 0
#define PRESS_1 1
#define PRESS_2 2
#define BALLUF 3
#define KALEM 4
#define SILA 5

int main( int argc, char **argv )
{
    int brojac=0;
    double Ud, Um, err, Vc;

    while(m_nFLAGS[0])
    {
        scr_clr();
        scr_xy(0,0);

        m_dVals[NAPON_UPRAVLJANJA] = 5.0;
        m_dVals[PRESS_1]=(m_dADC[0]-1.0)*100.0;
        m_dVals[PRESS_2]=(m_dADC[1]-1.0)*100.0;
        m_dVals[SILA]=(-2.0*((int)m_nADC[7]-2030)/1760.0)*25.0;

        m_dVals[BALLUF]=-1.0*(m_dADC[3]-3.0)*25.0;
        m_dVals[6]=m_dSigs[0];
        Um = m_dVals[SILA];
        Ud = m_dVals[6];
        err = Ud - Um;
        m_dVals[7]=err;
        // uctavanja i dodeljivanja
        // obrada
        Vc = 2.0 * err; (Линија за дефиницију закона управљања)
        printf("br: %.2f \nSila: %.2f", (brojac++)/100.0, m_dVals[SILA]);
        // dodela hardveru
        m_dVals[NAPON_UPRAVLJANJA] = Vc;
        m_dDAC[0] = m_dVals[NAPON_UPRAVLJANJA];
    };
    m_dDAC[0]=0.0;
    return(0);
}

//-----
```

### 10.3 Прилог 3-Структура актуатора

За боље разумевање проблематике пројектовања актуатора, дијаграм на слици 10.9, показује све захтеве који се постављају пред пројектанта:[93]



Слика 10.9-Структура пројектног решења актуатора

## 10.4 Прилог 4-Математички модел актуаторског система са нумеричким вредностима параметара

### 10.4-1 Математички модел у простору улаз-излаз

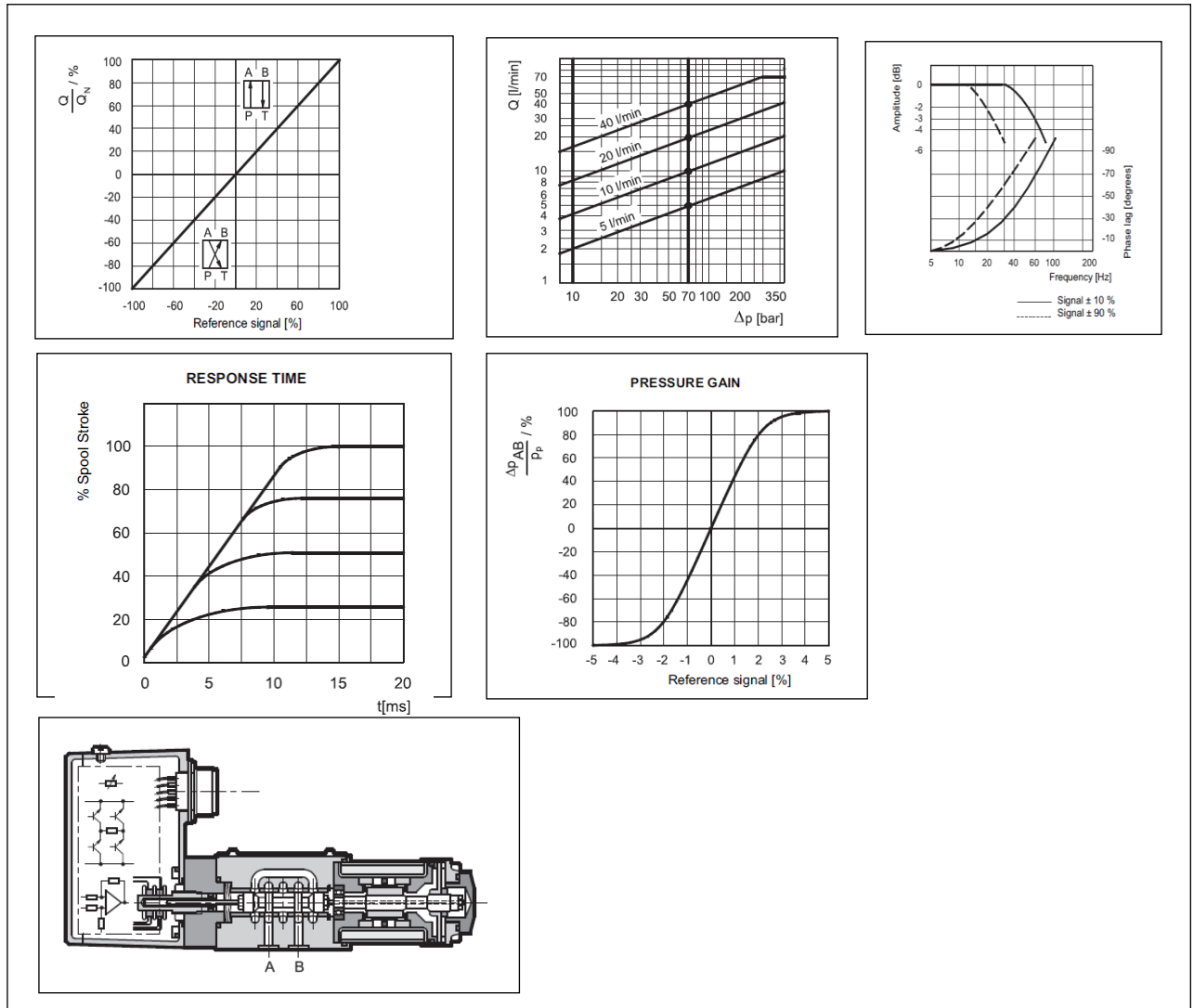
Овај математички модел дефинисан је на основу преносне функције облика:

$$W_o = \frac{K_v}{(T_v s + 1)} * \frac{1}{T_o s (T_h^2 s^2 + 2T_h \xi_h s + 1)} = \frac{0.03125}{(0.05s + 1)} * \frac{1}{s(1.30 * 10^{-11} s^2 + 3.92 * 10^{-9} s + 1.57 * 10^{-4})} = \frac{0.03125}{s(6.64 * 10^{-13} s^3 + 2.09 * 10^{-10} s^2 + 7.85 * 10^{-6} s + 1.57 * 10^{-4})}$$

Коефицијент	Нумеричка вредност	Напомена
$K_v$	$\frac{0.0005}{0.016} = 0.03125 \left[ \frac{m}{A} \right]$	Ход клипа разводника је 0.5 мм, управљачки сигнал струјни од 4-20мА
$T_v$	0.05 s	Пропусни опсег изабраног разводника је 20 Hz, слика 10.10
$K_q = \frac{\partial Q_v}{\partial x_v}$	$K_q = \frac{40 * 10^{-3} / 60}{0.0005} = 1.33 \frac{m^2}{s}$	Номинални проток разводника 40 l/min
$A_k = \frac{(D^2 - d^2)\pi}{4}$	$A_k = \frac{(0.063^2 - 0.036^2)\pi}{4} = 21 * 10^{-4} m^2$	Цилиндар је димензија ф63/36x100
$T_o = \frac{A_k}{K_q}$	$T_o = \frac{21 * 10^{-4} m^2}{1.33} = 1.57 * 10^{-4} s$	
$V_o = A_k * h$	$V_o = 21 * 10^{-4} * 0.05 = 1.05 * 10^{-4} m^3$	Запремина радне коморе цилиндра
$T_h = \sqrt{\frac{V_o M_t}{4\beta_e A_k^2}}$	$T_h = \sqrt{\frac{0.0001 * 20}{4 * 1.4 * 10^9 (21 * 10^{-4})^2}} = 2.91 * 10^{-4} s$	Претпостављена инерцијална маса покретних делова 20 кг
$K_c = \frac{\partial Q_L}{\partial p_L}$	$K_c = \frac{1l/min}{30bar} = \frac{1 * 10^{-3} / 60}{30 * 10^5} = 5.55 * 10^{-12} m^4 s$	Ред величине коефицијента цурења
$K_{ce} = K_c + C_u$	$K_{ce} = K_c + C_u = K_c$	Унутрашње цурење је нула

**Прилог теорији пројектовања актуатора за управљање вектором потиска ракетног мотора са флексибилним млазником**

$\zeta_h = \frac{K_{ce}}{A_k} \sqrt{\frac{\beta_e M_t}{V_0}} + \frac{B}{4A_k} \sqrt{\frac{V_0}{\beta_e M_T}}$	$\zeta_h = \frac{5.55 * 10^{-12}}{21 * 10^{-4}} \sqrt{\frac{1.4 * 10^9 * 20}{1.05 * 10^{-4}}} + \frac{50}{4 * 21 * 10^{-4}} \sqrt{\frac{1.05 * 10^{-4}}{1.4 * 10^9 * 20}} = 0.043$	Други сабирак практично не утиче на пригушење
---	--	---



**Слика 10.10** Основне динамичке карактеристике разводника и пресек разводника

**10.4-2 Математички модел у простору стања**

Општи облик математичког модела у простору стања је:

$$\dot{X} = AX + b_u U + b_z Z$$

$$X_i = cX$$

**10.Прилози**

**Прилог теорији пројектовања актуатора за управљање вектором потиска ракетног мотора са флексибилним млазником**

Вектор стања система: прва-величина је позиција разводног клипа, друга-разлика притисака у цилиндру, трећа-брзина и четврта позиција-клипњаче.

$$X = \begin{pmatrix} X_1 \\ X_2 \\ X_3 \\ X_4 \end{pmatrix} \quad \dot{X} = \begin{pmatrix} \dot{X}_1 \\ \dot{X}_2 \\ \dot{X}_3 \\ \dot{X}_4 \end{pmatrix}$$

$$b_U = \begin{pmatrix} \frac{K_v}{T_v} \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0.625 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} \quad b_Z = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ -\frac{1}{M_L} \\ 0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ -0.05 \\ 0 \end{pmatrix}$$

$$c = (0 \quad 0 \quad 0 \quad 1)$$

Матрица А се дефинише на следећи начин:

$$A = \begin{pmatrix} -\frac{1}{T_v} & 0 & 0 & 0 \\ \frac{K_c \beta_e}{V_0} & -(C_u + K_c) \frac{\beta_c}{V_0} & -\frac{2A_k \beta_e}{V_0} & 0 \\ 0 & \frac{A_k}{M_T} & -\frac{B}{M_T} & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{pmatrix}$$

$$= \begin{pmatrix} -\frac{1}{0.05} & 0 & 0 & 0 \\ \frac{5.55 * 10^{-12} * 1.4 * 10^9}{1.05 * 10^{-4}} & -(0 + 5.55 * 10^{-12}) \frac{1.4 * 10^9}{1.05 * 10^{-4}} & -\frac{2 * 21 * 10^{-4} * 1.4 * 10^9}{1.05 * 10^{-4}} & 0 \\ 0 & \frac{21 * 10^{-4}}{20} & -\frac{50}{20} & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{pmatrix}$$

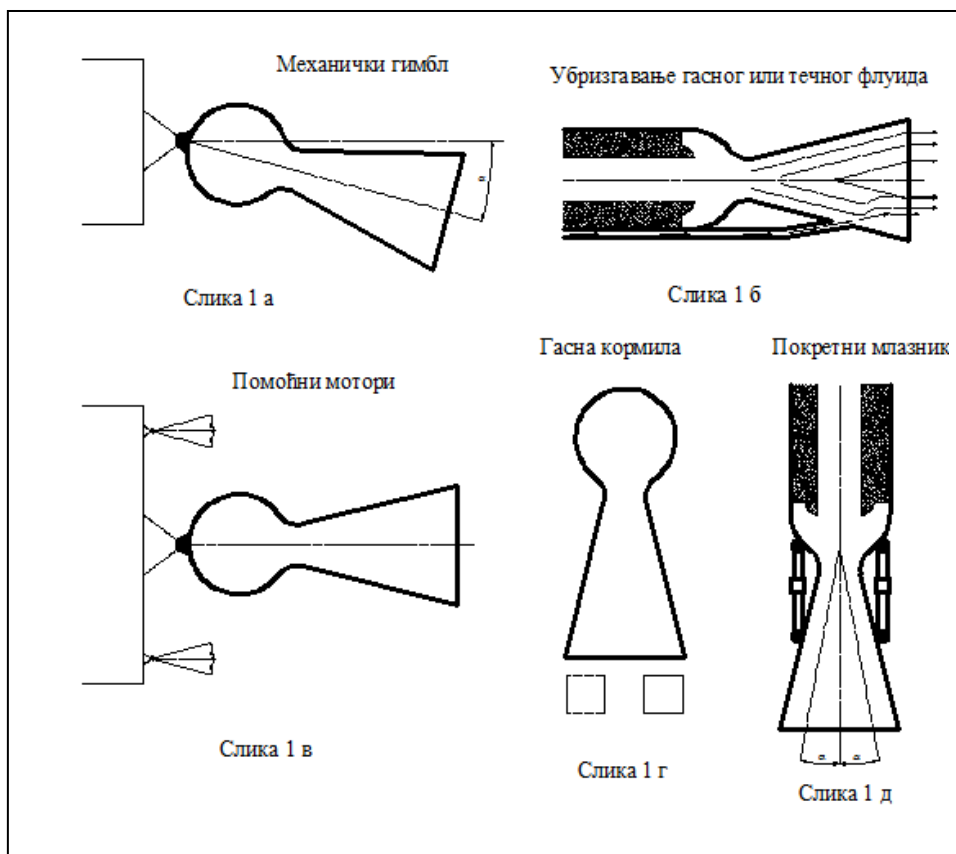
$$= \begin{pmatrix} -20 & 0 & 0 & 0 \\ 74 & -74 & -5.6 * 10^{10} & 0 \\ 0 & 1.05 * 10^{-4} & -2.5 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{pmatrix}$$

## Прилог 5-Управљање вектором потиска ракетног мотора

Ракета као објекат управљања може бити неуправљана или управљана. У даљем раду од значаја су само управљане ракете. Управљана, значи да се обезбеди кретање тежишта ракете по унапред задатој путањи (вођење или навођење) и управља њеним кретањем око сопственог тежишта (стабилизација). За реализацију задатка управљања потребно је да постоје аеродинамичке команде лета или да се управља вектором потиска. Управљање ракетом може се реализовати само аеродинамичким командама, само управљањем вектором потиска или комбинацијом обе претходно поменути технологије управљања.

Управљање вектором потиска има значајну предност у односу на аеродинамичке команде лета на великим висинама када је густина ваздуха врло ниска или при почетним фазама лета када је брзина ракете реалтивно мала, када такође аеродинамичке команде лета не могу бити ефикасне. Претходно наводи да је управљање вектором потиска од значаја пре свега за балистичке ракете свих класификација и за одређене класе ракета земља ваздух.

Постоји више начина да се реализује управљање вектором потиска. Може се прихватити следећа систематизација: (слика 10.11)



Слика 10.11-Управљање вектором потиска основна: принципско-технолошка подела

## Прилог теорији пројектовања актуатора за управљање вектором потиска ракетног мотора са флексибилним млазником

- Управљање вектором потиска померањем осе мотора (било да се ради о ракетном мотору на течном или чврстом гориву), Слика 10.11 (1а)
- Управљање вектором потиска удувавањем у комору сагоревања ракетног мотора флуида у гасној или течној фази, Слика 10.11 (1б)
- Управљање помоћу помоћних мотора са дискретним или континуалним дејством, Слика 10.11 (1в)
- Управљање вектором потиска гасним крмелима Слика 10.11 (1г)
- Управљање флексибилним млазником, Слика 10.11 (1д)

На основу претходног може се закључити да у основи постоје механички и гасодинамички начин управљања вектором потиска. Свака од претходно наведених технологија управљања вектором потиска има више конструктивних извођења у зависности од посебних захтева и конструкције саме ракете. Поред тога значајни критеријум приликом избора неке од технологија управљања вектором потиска је и цена реализације у пракси као и материјали и технологије који су потребни за практичну реализацију. У сваком случају ради се о технологијама које су познате од педесетих година двадесетог века (1956-1957) када СССР и САД лансирају прве балистичке ракете. Да би се управљало вектором потиска потребан је и актуациони систем, пре свега за прву, четврту и пету претходно наведену технологију управљања у смислу постизања механичке позиције управљачког органа. У случају друге технологије, постоје актуациони системи за вентиле који убрзавају гас или течност (актуатори за дозирање) у комору сагоревања док се управљањем помоћним моторима коригује правац потиска основног мотора.

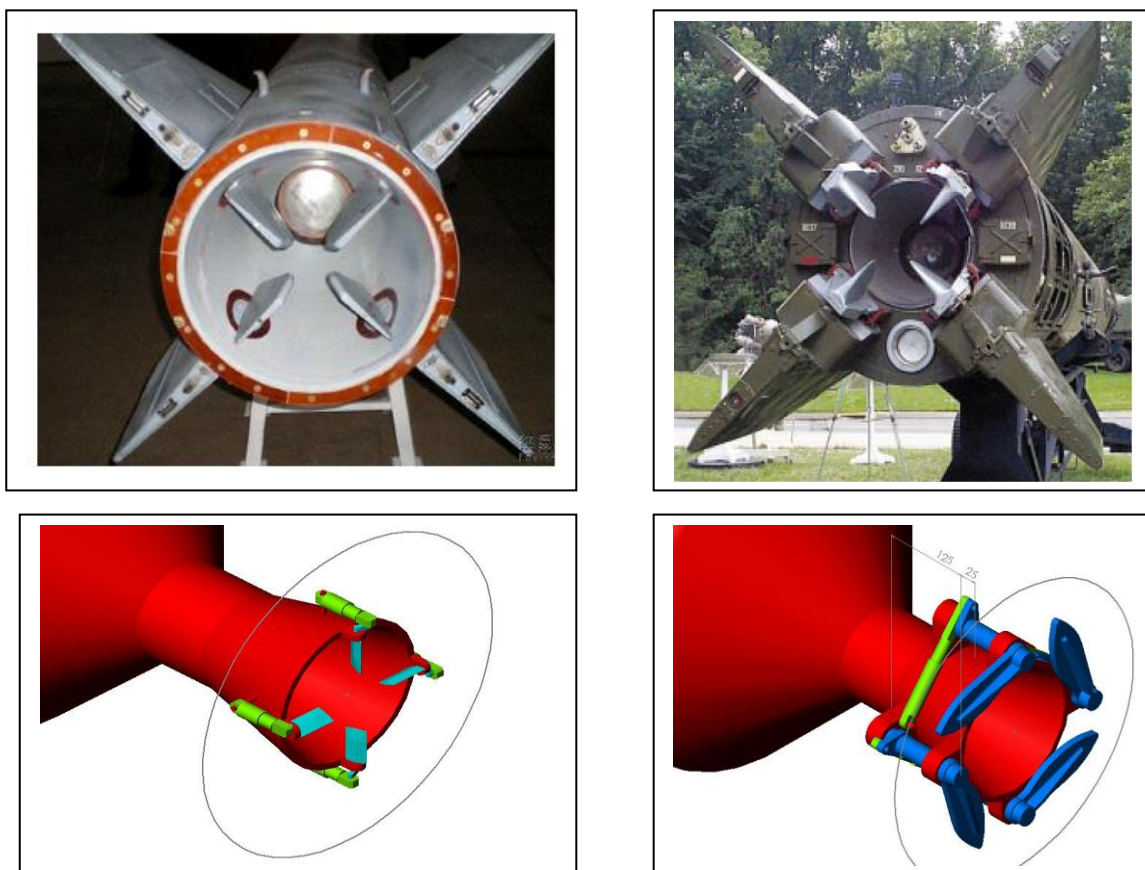
Управљање вектором потиска померањем осе мотора је пре свега применљиво на моторе са течним ракетним горивом. Постоји такозвани механички гимбл са одређеним степенима слободe који је истовремено и носач ракетног мотора на течном гориву. Ово практично значи да када су у питању ракетни мотори на чврстом гориву на располагању су за реализацију друга, трећа и четврта технологија. Друга технологија, убрзавање гасног или течног флуида је технолошки врло комплексна и може се реализовати само у технолошки најнапреднијим земљама. Трећа технологија је најстарија али има значаја само за највеће ракете.

Четврта и пета технологија у свом називу говори да се ради о технолошкој идеји управљања заснованој на механичком скретању потисне гасодинамичке струје ракетног мотора. На слици 10.12 која следи приказано је више конструктивних извођења гасних кормила. За све је заједничко да су изложена високим температурама и великој ерозији тако да за релативно кратко време рада ракетног мотора могу да значајно промене своје карактеристике. Ова ограничења која неповољно делују на сама гасна кормила готово истовремено неповољно делују и на конструкцију актуаторског система. Поред тога гасодинамичка кормила стварају и губитке потиска који нису занемарљиви. Једна од значајних предности управљања гасним крмелима је чињеница да су силе које се захтевају од актуатора релативно мале у односу на друга конструктивна решења, пре свега овде разматрано решење управљања вектором потиска са флексибилним млазником. Ова чињеница да су потребне мање управљачке силе и да се због ерозије кормила троше, преферира закључак да се ова конструктивна решења

## Прилог теорији пројектовања актуатора за управљање вектором потиска ракетног мотора са флексибилним млазником

примењују за ракете мањег домета чије мисије трају краће као и за ракете ваздух-ваздух, чији су габарити за ред величине мањи у односу на балистичке ракете (позната ракета, ваздух-ваздух, Р60 је дугачка око 2 метра, док је дужина балистичких ракета од 10 до 40 метара). Конструктивно извођење са флексибилним млазником, (слика 10.13), готово да не ствара губитак потиска приликом управљања његовим правцем. Главни разлог је што се скретање струје продуката сагоревања врши у дозвучном делу млазника. Поред тога, задржава се осносиметрични карактер струјања. Конструкција је таква да је флексибилна веза млазника и коморе сагоревања ракетног мотора таква да је актуационим системом могуће закретати млазник и тако утицати на правац вектора потиска. Ово конструктивно решење може се примењивати како за мале (по стартној маси и долету) тако и за велике балистичке ракете. Овакво конструктивно решење поставља додатне високе технолошке захтеве само код израде флексибилне везе. Флексибилна веза додатно усложњава управљање актуационим системом, јер се ради о оптерећењу са великом градијентом промене актуационе силе.

Проблематика управљања вектором потиска ракетног мотора флексибилним млазником са свим специфичностима се описује у Прилогу 7 овог рада.

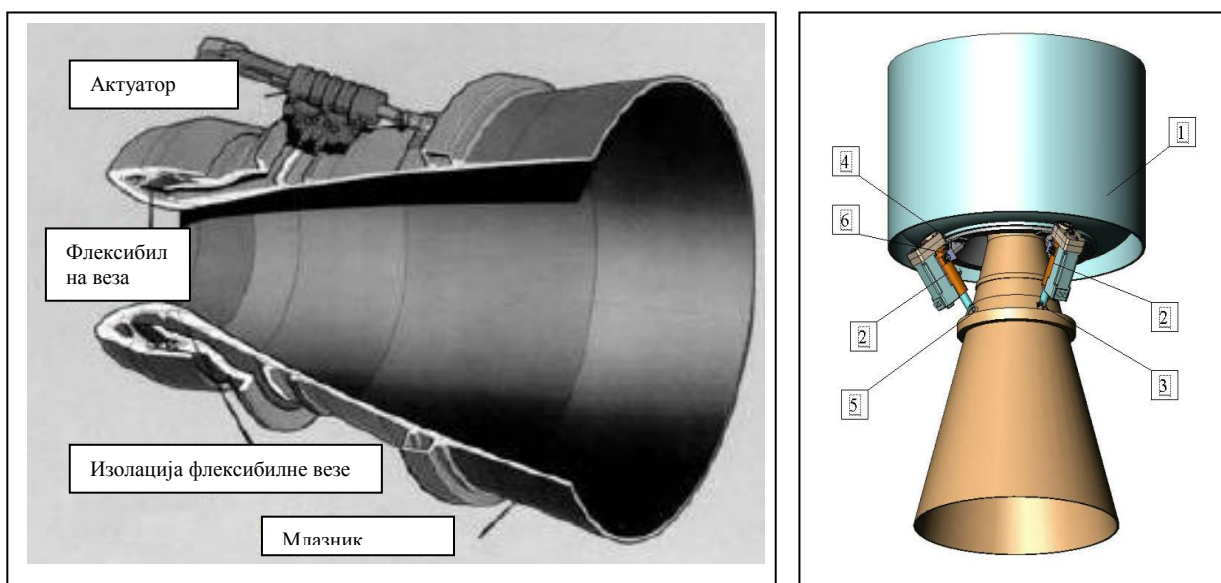


Слика 10.12-Конструктивна извођења гасних крмила која се могу налазити у дивергентном делу млазника или изван њега



## Прилог теорији пројектовања актуатора за управљање вектором потиска ракетног мотора са флексибилним млазником

Управљање вектором потиска петом технологијом, односно флексибилним млазником ако је оно једино на ракети, захтева да ракета има два мотора или један мотор са минимално два млазника како би могло да у потпуности буде реализовано управљање кретањем ракете по задатој трајекторији и стабилизација, односно троканално управљање. Један канал увек мора да ради управљање односно вођење и стабилизацију (пропињање у вертикалној равни лансирања) по жељеној трајекторији, док друга два канала раде у основи стабилизацију или такође и управљање у равни нормалној на равни лансирања (скретање) и стабилизацију ротације према захтевима вођења по жељеној трајекторији. Постоји још једна систематизација у оквиру управљања вектором потиска само на две групе: управљање вектором потиска са фиксним млазником и управљање вектором потиска са флексибилним млазником.



**Слика 10.13-Конструктивна решења управљања вектором потиска флексибилним млазником, слика лево [95]; слика десно: 1 комора, 2 актуатор, 3 млазник, 4 прстен коморе, 5 прстен млазника, 6 напајање актуатора**

Да би се могло говорити о било којој команди лета, односно актуационој систему за реализацију те команде лета на било којој летелици, потребна је веза између три техничке дисциплине:

- динамике лета
- управљања и стабилизације и
- теорије аутоматског управљања

Динамика лета нам дефинише жељену трајекторију лета као и поремећаје који делују на жељеној трајекторији лета. Из динамике лета следе захтеви за динамику актуационог система, пре свега пропусни опсег и тачност рада то јест позиционирања.

Управљање и стабилизација постављају захтеве на основу статичке шеме ракете, на шта примарно утиче положај тежишта према центру потиска у смислу статичке стабилности и нестабилности. Поред тога ту је и такозвано преоптерећење ракете, сила која ротира ракету око свог тежишта и обезбеђује квалитет стабилизације, што је неопходно како би се обезбедило жељено кретање тежишта ракете. Кретање тежишта ракете је програмског карактера и оно је унапред познато, тако да су позната и очекивана управљачка дејства, док управљачка дејства која су неопходна за стабилизацију зависе пре свега од стварних поремећаја у лету. Ово се пре свега односи на балистичке ракете, док код ракета земља ваздух и ваздух-ваздух то није случај. Доминантни поремећај су удари ветра који су предвиђени у одређеним границама.

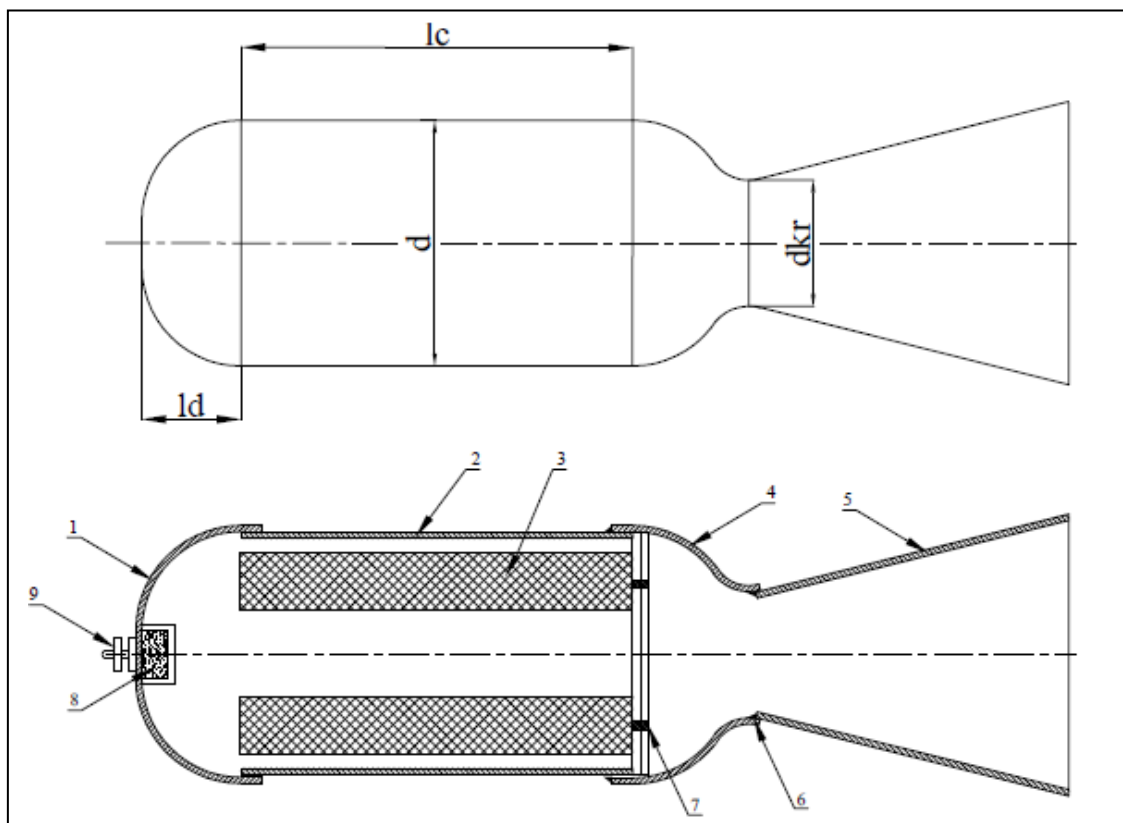
Теорија аутоматског управљања нам омогућава синтезу и анализу претходно дефинисаног захтева за управљањем (концепт и конфигурација) и димензионисање актуационог система. На бази теорије аутоматског управљања бира се алгоритам управљања за актуационим систем који ће испунити све захтеве управљања вектором потиска односно динамике лета то јест кретања жељеном трајекторијом која обезбеђује за дату масу ракете тражени долет и прецизност погодка у циљ.

Ракетни мотор на чврсто гориво је релативно једноставне базне конструкције, слика 10.14. Ракетно гориво је смештено у комори сагоревања.

Сила потиска је производ масеног протока продуката сагоревања и брзине њиховог истицања. У основи она је увек последица истицања продуката сагоревања кроз млазник..

Основни делови млазника су:

1. Конвергентни део, у коме се продукти сагоревања убрзавају до једног маха ( $M$ ).
2. Критични (најужи део), који одређује равнотежне услове функционисања ракетног мотора, истицање продуката сагоревања у количини која настане у комори сагоревања.
3. Дивергентни део, који даље повећава брзину истицања ( $M > 1$ )



Слика 10.14-Конструкција ракетног мотора на чврсто гориво (1 данце, 2 комора, 3 гориво, 4 млазник, 5 дивергентни део млазника, 6 графитна заптивка, 7 решетка, 8 припала, 9 електрични упаљач) [8]

Многи елементи утичу на конструкцију млазника: радни притисак у комори сагоревања, време рада ракетног мотора, природа гасовитих продуката сагоревања, температура сагоревања ракетног горива и геометријске карактеристике млазника, однос излазног пресека према критичном пресеку. Поред класичне геометрије (конични облик) млазника много боље је решење са профилисаним млазником, јер се не одваја гранични слој струје гаса.

Припала ракетног мотора има задатак да на површину ракетног горива доведе довољно енергије како би се започео процес сагоревања ракетног горива. Термичка заштита се пројектује према температури сагоревања ракетног горива са задатком да заштити зидове коморе ракетног мотора.

Масени проток кроз млазник зависи од коефицијента истицања за дати млазник, притиска у комори сагоревања и критичног пресека. Коефицијент истицања из млазника зависи само од природе продуката сагоревања и температуре и најчешће се одређује експериментално.

За основно познавање стварања вектора потиска, потребно је нагласити да у ракетном мотору мора постојати равнотежа између гасова који истекну кроз млазник и који се створе сагоревањем горива у јединици времена. Само у том

## Прилог теорији пројектовања актуатора за управљање вектором потиска ракетног мотора са флексибилним млазником

случају имамо ситуацију да је вектор потиска по интезитету константан тако да управљањем мењамо само његов правац.

Потисак ракетног мотора односно његов интезитет је један од основних параметара и дефинише ефикасност рада ракетног мотора:

$$P = \dot{m} \times v = \frac{\dot{G}}{g} \times v \quad (\text{П.5.1})$$

$$F = -P = -\dot{G} \frac{v}{g} \quad (\text{П.5.2})$$

Претходни знак минус значи да је сила потиска супротно усмерена од брзине струјања продуката сагоревања приликом напуштања млазника мотора. Претходна формула се може сматрати идеалном јер је предпостављено да је излазни притисак раван нули што у стварности најчешће није случај и тада се може написати:

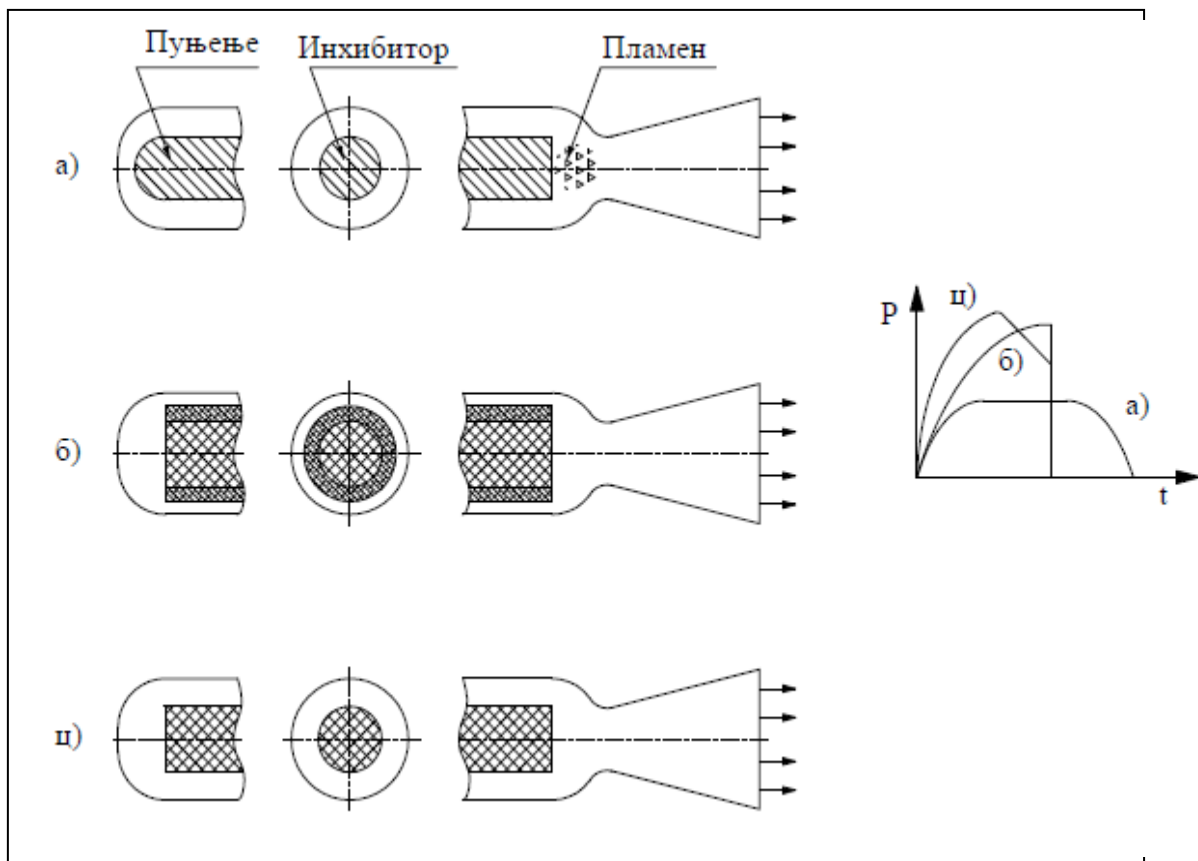
$$F = v \times \frac{\dot{G}}{g} + (p_x - p_{sp})A \quad (\text{П.5.3})$$

У ракетном мотору потисак се ствара дејством само унутрашњих сила. Вертикалне силе се међусобно поништавају док остају хоризонталне силе које зависе од геометрије млазника. Потисак се дефинише и као производ притиска сагоревања, површине критичног пресека млазника и коефицијента потиска.

После потиска друга важна карактеристика ракетног мотора је специфични импулс.

$$I_{sp} = \frac{F}{\dot{G}} \quad (\text{П.5.4})$$

За даљу анализу управљања вектром потиска преко флексибилног млазника, потребно је знати време рада ракетног мотора, слика 10.15 пошто је тренутак престанка рада мотора, када се управља вектором потиска и тренутак када се очекује максимални отклон правца потиска, како би ракета заузела правац за балистичку путању на којој лети без рада ракетних мотора. Претходно разматране величине су од кључног значаја за димензионисање максималне силе коју је потребно обезбедити на механичком излазу актуационог система.



Слика 10.15-Ефективни рад ракетног мотора [8]

Поред управља правцем потиска, управља се и интензитетом потиска, што је такође компонента векторске величине. Управљање интензитетом потиска је једноставније код течних ракетних мотора, јер се то просто ради адекватним дозирањем горивних компонената. Код ракетних мотора са чврстим горивом то је знатно комплексније, јер треба мењати притисак у комори сагоревања или површину горења. Постоји више техничких решења у пракси али у овом раду нису предмет разматрања. Управљање интензитетом потиска има смисла када је ракета у гушћим слојевима атмосфере, када је потребно савладати веће динамичке притиске, а онда се у ређој атмосфери може смањити потисак, што може да одговара оптималнијем раду ракетног мотора. У сваком случају претходно наведено јесте разлог за управљање интензитетом потиска. Из истих разлога се инсистира и на вертикалном лету у првој фази лета, како би се што краће времена трајао лет у гушћим слојевима атмосфере (већи динамички потисак) где су и поремећаји, пре свега ветар највећег интензитета. Претходно је поменуто и због једног програмског захтева управљања, а то је прекид или губитак потиска у тренутку када је ракета заузела позицију за реализацију балистичке путање. Код ракетног мотора на течном гориву то је такође у пракси једноставније јер се ефикасно могу затворити вентили који омогућавају контакт две горивне компоненте. Код мотора са чврстим горивом постоји више конструктивних варијанти али се ниједна није посебно доказала у пракси. Прва конструктивна варијанта подразумева бочно отварање коморе сагоревања, што подразумева врло

## Прилог теорији пројектовања актуатора за управљање вектором потиска ракетног мотора са флексибилним млазником

сложен механизам. Друга варијанта подразумева, хемијским средствима гашење основног горива. Као прихватљивије решење у пракси се примењује допунски маневар ракете, који смањује брзину ракете на прихватљив ниво, за заузимање положаја који је програмски одређен за почетак балистичке путање. Треба напоменути још једну специфичност управљања вектором потиска а то је да управљачка сила износи одређен проценат од номиналног потиска и да се разликује зависно од ступња ракете на којој се управља вектором потиска. Из литературе је познат следећи однос за тростепене ракете, што се приказује у табели која следи, а на слици 10.16 је приказан карактер измене управљачких сила за једну тростепену ракету, такође преузет из литературе.

Табела 10.[11]

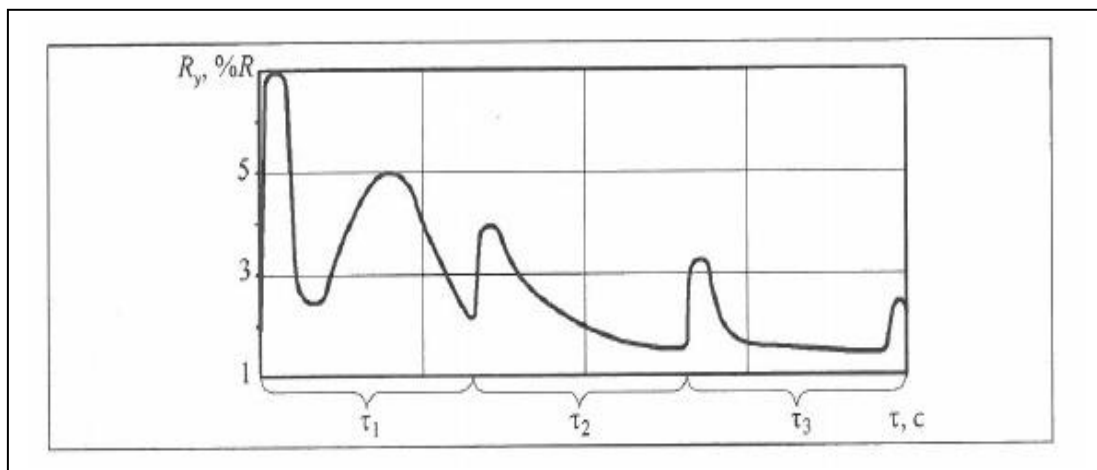
1 степен	$R_y(3.0\% \dots 7.0\%)$
2 степен	$R_y(2.0\% \dots 4.0\%)$
3 степен	$R_y(1.5\% \dots 2.5\%)$

Посебно треба нагласити да је управљачка сила практично линеарна према углу у дијапазону углова који су дати у претходној табели:

$$Y_{pm} = P \sin \delta \approx P\delta \quad (\text{П.5.5})$$

Јасно је из претходне табеле, да што је виши степен ракете у питању, то је мањи максимални угао одклона покретног млазника, јер је ракета пре тога већ прешла са вертикалне активне путање на закривљену активну путању. Најмањи углови одклона су увек за задњи степен ракете, као што се из претходне табеле и види.

Линеарност дефинисана у (2.32) је веома важна у синтези управљања кретањем ракете, јер би нелинеарни карактер био врло сложен за разматрање и на тај начин би знатно био усложен процес синтезе комплетног управљачког система. У сваком случају је посебно значајно да је промена потиска линеарна према углу закретања.



Слика 10.16-Карактер измене управљачке силе при раду вишестепене ракете [11]

**Прилог 6-Специфичности конструкције флексибилног млазника за управљање вектором потиска ракетног мотора**

Склоп флексибилног млазника карактеришу две стандардне конструкције:

1. Покретна млазница-конструкција флексибилни ламиниран лежај
2. Покретна млазница-конструкција са ротирајућом куглом и гасном заптивком

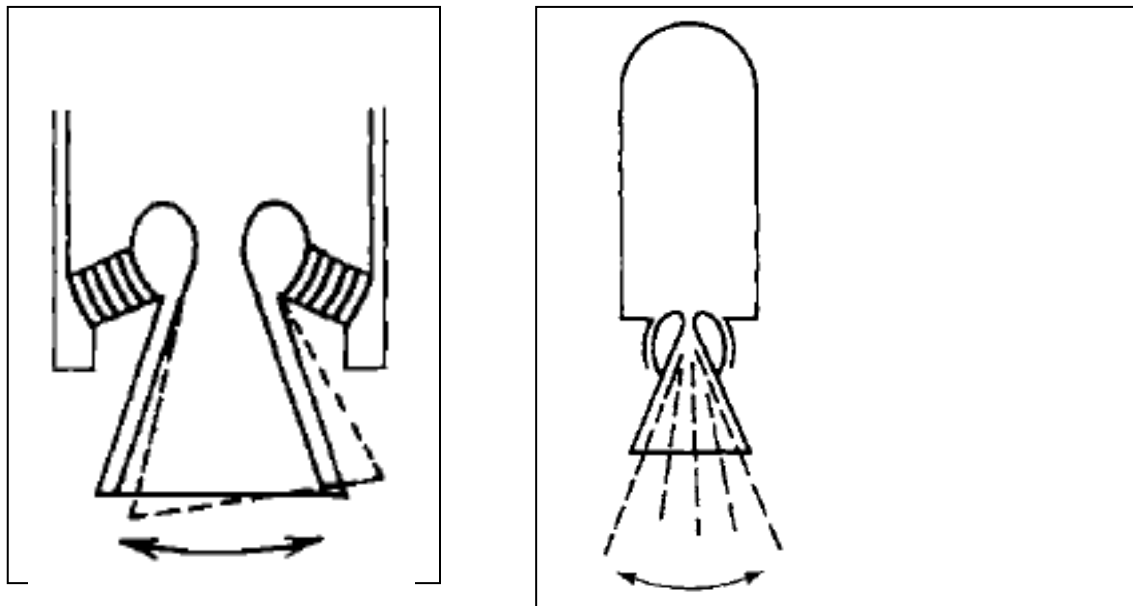
Основне добре и негативне особине приказане су у табели која следи:

**Табела П6.1:**

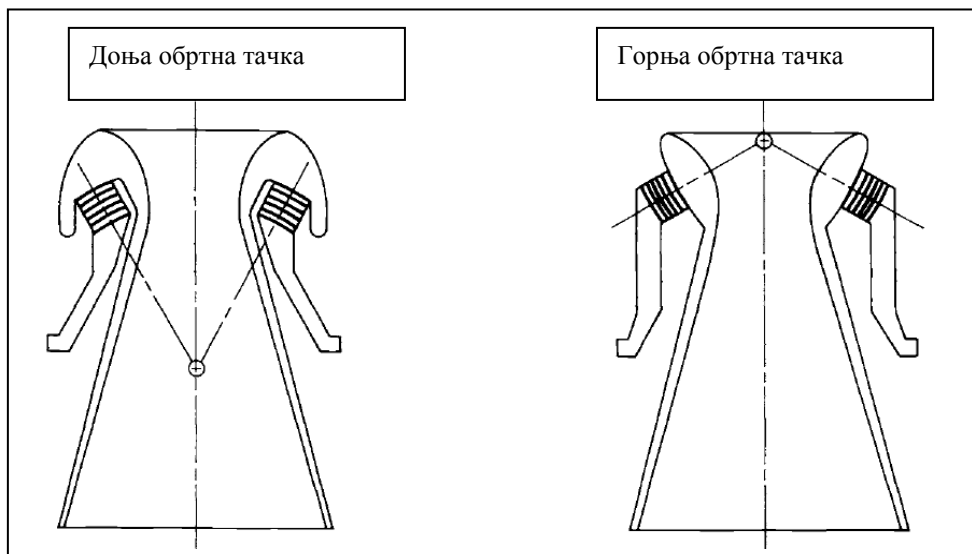
Тип	Добре особине	Лоше особине
Конструкција флексибилни ламиниран лежај	Доказана технологија, нема клизних покретних делова, предвидљива актуациона сила, управљачки угао +/- 12 степени	Велике актуационе силе, велики момент на ниским температурама, променљива актуациона сила
Конструкција са ротирајућом куглом и гасном заптивком	Доказана технологија, нема губитака потиска, управљачки угао +/- 20 степени	Клизни спојеви, велика промена актуационе силе, ограничен радни ресурс, за заптивање флексибилне везе потребно је константно оптерећење-велико трење

На слици 10.17, дат је шематски приказ за обе стандардне варијанте шематски

У даљим разматрањима у овом раду је заступљена само конструкција флексибилни ламинарни лежај. На слици 10.18 су приказана два кинематска решења у смислу положаја центра ротације. У опусу реалних конструкција постоји више конструктивних решења. Та конструктивна решења предмет су велики броја патетних пријава посебно у САД. У овом раду се не разматрају конструкције на том нивоу детаља. Важно је запазити да свака конструкција предвиђа електро хидраулични актуациони систем за управљање. Главни разлог су јако велике силе приликом деформације флексибилне везе односно закретања млазника. У том смислу интересантна је конструкција са две флексибилне везе или како се још назива конструкција са серво дејством. Ова конструкција користи две флексибилне везе, електро хидрауличним актуатором се деформише прва, са мањим силама а друга се деформише од гасодинамичког момента који је настао деформацијом прве флексибилне везе, како је то приказано на слици 10.19. Та конструкција је са становишта потребних сила прихватљива али са становишта идентификације оптерећења актуатора је знатно сложенија од конструкције са једном флексибилном везом и знатно тежа за опис крајњег утицаја на промену угла млазника односно величину нормалне силе која закреће тело ракете око њеног тежишта. У даљем раду разматра се само флексибилни млазник са једном флексибилном везом.



Слика 10.17-Конструкција са ламинарним лежајем; конструкција са ротирајућом куглом



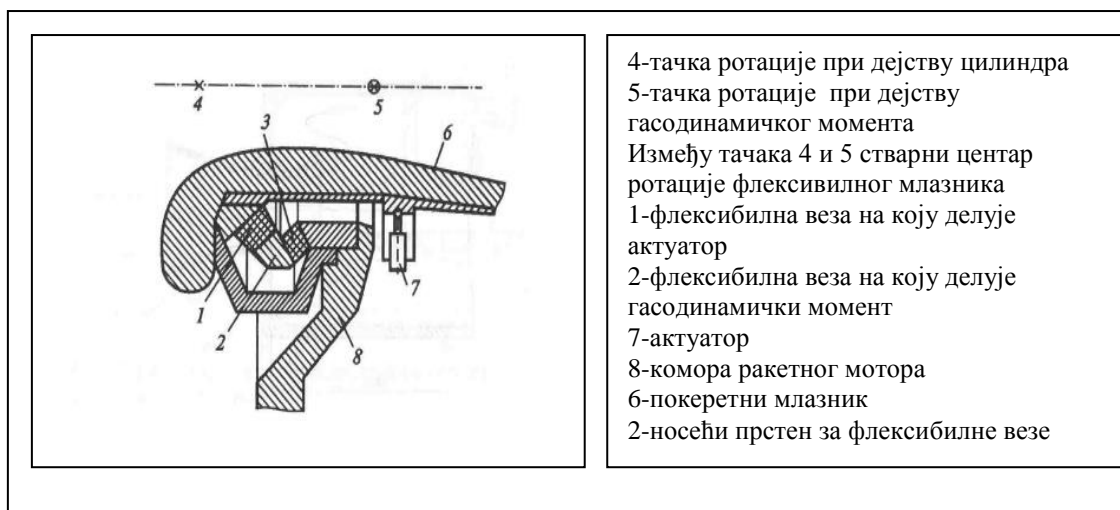
Слика 10.18-Положаји центра ротације у односу на карактер флексибилне везе-конструкција са ламинарним лежајем

Флексибилни млазник има више конструктивних извођења која се разликују у одређеном броју детаља. Једна од главних конструктивних разлика је да ли је конструкција флексибилног млазника таква да дозвољава један или два степена слободе. У сваком случају далеко је погоднија варијанта са два степена слободе, када је у питању ракета која има два мотора са по једним млазником, јер та конфигурација омогућава решавање комплетног задатка управљања, односно управљање са три угла у простору. Варијанта са једним степеном слободе је погодна за конструктивне варијанте ракетног мотора са чврстим горивом који има



## Прилог теорији пројектовања актуатора за управљање вектором потиска ракетног мотора са флексибилним млазником

четри млазника и тада ракета може имати само један ракетни мотор (слика 10.24). У сваком случају предности управљања вектором потиска флексибилним млазником нису мале, а то су поред основне предности мали губитак силе потиска и једноставност конструкције. Треба нагласити да у свим конструкцијама флексибилног млазника све промене правца струјања се дешавају у дозвучној области. Поред тога посебна предност је линеарна промена нормалне силе до разматраних углова који не прелазе  $\pm 10^\circ$ . Релативно ниска цена израде је компромис према са друге стране великом ризику да не дође до отказа флексибилне везе, прво у смислу губљења херметичности, а онда и свих осталих оштећења типа разарења флексибилне везе.



**Слика 10.19-Конструкција флексибилног млазника са две флексибилне везе односно серво дејством [90]**

Флексибилна веза млазника и коморе сагоревања има низ специфичности које се посебно морају уважити при пројектовању актуационог система за покретање флексибилног млазника ради управљања вектором потиска. Пре свега конструкција мора бити таква да је сопствена фреквенција свих делова флексибилног млазника већа од сопствене фреквенције актуатора. Поред тога, сопствена фреквенција делова мотора и самог мотора мора бити мања од сопствене фреквенције флексибилног млазника. Ако су фреквенције актуаторског система и флексибилног млазника приближно једнаке постоји ризик од нестабилности. У том случају, у актуаторском систему мора бити имплементиран такозвани енгл. notch филтер тако подешен да штити актуациони систем од побуде млазника на сопственој фреквенцији. Ово је посебно важно и у расположивој литератури [11],[72] и [90] се може приметити да пошто је реалтивно комплексан прорачун сопствене фреквенције флексибилног млазника да постоји инсистирање на неопходности провере сопствене фреквенције експериментално. То значи да се склоп ставља на вибро платформу и подизањем побуде долази се до сопствене фреквенције склопа флексибилног млазника односно фреквенције када почиње сопствено осциловање склопа. Опсег очекиваних фреквенција је према литератури од 50 до 100 Hz. Поред тога флексибилну везу карактерише знатно већи модул еластичности у аксијалном правцу у односу на модул клизања. Ова разлика је и до 15 000 пута. То значи да

## Прилог теорији пројектовања актуатора за управљање вектором потиска ракетног мотора са флексибилним млазником

постоји велика крутост флексибилне везе у аксијалном правцу на коју делује аксијално оптерећење.

Ова веза прво мора имати одређени зазор како би се омогућило аксијално померање млазника у односу на комору сагоревања што је последица паљења мотора и стварања унутрашњег притиска сагоревања у комори ракетног мотора. Друго, приликом овог померања имамо круту везу актуатора и флексибилног млазника која доводи до тога да се стварни геометријски центар ротације флексибилног млазника помери у односу на геометријски центар, што доводи и до закретања млазника у једну страну. Други разлог зашто долази до померања центра ротације је претходно поменуто смицање које даје могућност да дође до закретања млазника. На слици 10.21 је приказана основна кинематика флексибилне везе.

Флексибилна веза је оптерећена на следеће начине:

- од притиска који настаје приликом рада мотора
- од самог процеса векторисања потиска
- убрзања за време лета
- од начина производње и складиштења.

Флексибилна веза ствара и специфичне отпоре односно елементе шарнирног момента, када је потребно закренути флексибилни млазник.

### Момент од еластичне везе:

То је најзначајнији део момента и рачуна се према литератури [77]. Ово је емпиријски образац који је провераван у великом броју експеримената.

$$\frac{M_{fv}}{\delta} = \frac{12G_0 r_0^3 r_i^3}{r_0^3 - r_i^3} [I(\lambda_1) - I(\lambda_2)] \quad (\text{П.5.6})$$

$M_{fv}$  -момент еластичне везе

$\delta$  -угао закретања млазнице

$G_0$  -модул клизања

$r_0 = R_p + \frac{nt_e}{2}$  -полупречник дефинисан на слици 10.21а

$r_i = R_p - \frac{nt_e}{2}$  -полупречник дефинисан на слици 10.21а

$R_p$  -радијус ротације

$t_e$  -дебљина једног слоја гуме

$n$  -број еластичних прстенова

$\lambda_1, \lambda_2$  -унутрашњи и спољашњи угао еластичне везе

$I(\lambda)$  -интегралне вредности преузете из цитиране литературе

За флексибилне везе са металним ојачањима и природном гумом као базним еластичним материјалом важи и следећи емпиријски образац:

**Прилог теорији пројектовања актуатора за управљање вектором потиска ракетног мотора са флексибилним млазником**

$$\frac{M_{fv}}{\delta} = \frac{0.156Gr_0^3r_i^3}{r_0^3 - r_i^3} (\lambda_1 - \lambda_2) \quad (\text{П.5.7})$$

$$G = G_0 + A\sigma^2 \text{-ефективни модул клизања} \quad (\text{П.5.8})$$

$A$  -константа која зависи од челичног материјала за ојачање

$$\sigma^2 = \frac{P_c \sin^2 \lambda_2}{(\sin^2 \lambda_2 - \sin^2 \lambda_1) \cos^2 \phi} \text{-напон} \quad (\text{П.5.9})$$

$P_c$  -притисак у мотору

$\phi$  -угао конуса у °

Емпиријска формула (П.5.9) је много прикладнија од претходне јер узима у обзир притисак мотора који директно утиче на аксијалну деформацију флексибилне везе. Поред тога у разматрању је и угао конуса. За реалне конструкције флексибилног млазника вредности овог угла су од 15 ° до 50°. У литератури се налазе подаци да прорачуни по овој формули одступају од прорачуна методом коначних елемената када се геометрија флексибилног млазника узима много прецизније као и само задавање сила за око 8 %, што није значајна вредност за основно димензионисање актуационог система. Поред тога треба нагласити да подаци из литературе засновани на мерењу, говоре да за идентичну конструкцију код два различита флексибилна млазника имамо ситуацију да се моменти разликују максимално +/-20 %, што је веома важан податак када се при синтези управљања буду радиле математичке симулације или када се буде пројектовао и моделирао електрохидраулични симулатор силе, што је предмет посебног поглавља у овом раду.

### **Момент од трења:**

Практично у конструкцији флексибилног млазника коју разматрамо нема класичног трења клизања. Постоји вискозно унутрашње трење од саме вискозоелатичне природе флексибилне везе, то јест флексибилног оптерећења. Може се помислити да нема сувог трења али оно постоји када млазник мирује.

### **Инерцијални момент:**

Инерцијални момент флексибилног млазника зависи од убрзања које добија од актуатора. Обзиром да се ради о релативно малој маси и малим максималним убрзањима актуатора и када је убрзање и 300 °/s<sup>2</sup> овај момент у односу на центар ротације је занемарљив према моменту од флексибилне везе.

### **Гравитациони момент:**

Гравитациони момент је присутан зависно од убрзања која делују на флексибилни млазник приликом лета ракете. У зависности од положаја ракете постоје и

допунски моменти од инерцијалних сила, када она не заузима вертикални правац лета.

### Момент од офсета:

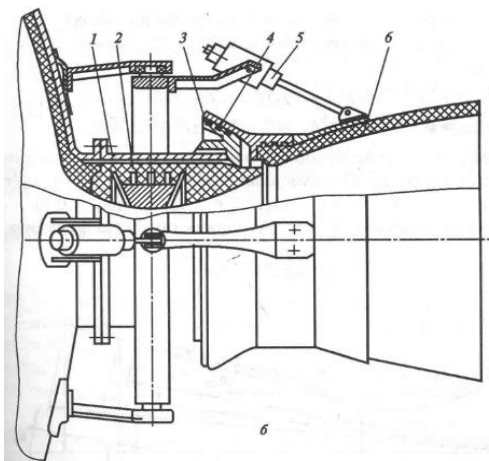
Момент од офсета је последица стварних толеранција приликом израде склопа флексибилног млазника као и стварних толеранција које су везане за остварени квалитет монтаже. Овај моменат постаје значајан само када су у питању велики пречници млазника и за претпостављени случај у овом раду може се занемарити.

Постоји још и спољни и унутрашњи аеродинамички момент чије величине нису значајне и у принципу се могу занемарити.

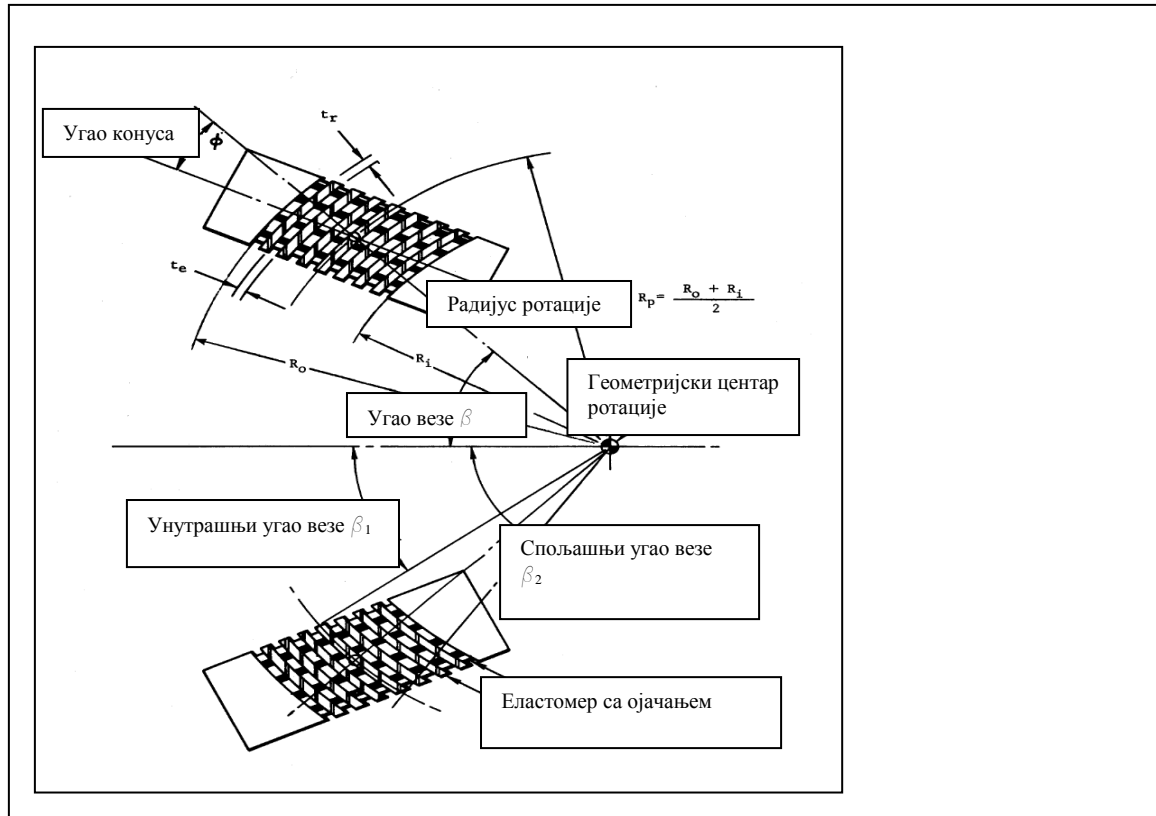
Без обзира на конструктивно извођење флексибилне везе, главни проблем за реализацију управљања флексибилним млазником је понашање гуме у процесу управљања. Гума је таква да њено унутрашње понашање у смислу еластичних особина представља комбинацију сувог и вискозног трења у вези са идеалном опругом. Поред тога приликом релаксације, односно када престане дејство силе актуатора, приметан је велики хистерезис, тако да актуатор неће заузети претходну позицију, при престанку управљачке силе на актуатору. Ово је велики пројектантски проблем, јер позицију је могуће мерити интегрисаним давачем у цилиндру за једну повратну спрегу по позицији, која је неопходна при синтези управљачког система актуатора. Угао заокрета флексибилног млазника је тешко мерити директно на ракетном мотору из више разлога од којих су главни адекватно кинематско место и локална температура амбијента. У пракси репрезент овог угла ће бити преко неког давача типа акцелерометра који ће на позицији ван ракетног мотора индиректно реаговати на промену угла покретног млазника, мерећи промену нормалне силе која има улогу управљачке силе и за кретање тежишта ракете, навођење и за стабилизацију тог кретања око тежишта. Хистерезис гуме није лако математички описати, зависи од температура и зависи од брзине еластичне деформације гуме односно брзине релаксације. Претходно описан феномен усложниће управљање више од било које друге типичне нелинеарности у комплетној конфигурацији актуационог система. Моделовање флексибилног оптерећења је посебно поглавље у овом раду.

Ова веза прво мора имати одређени зазор како би се омогућило аксијално померање млазника у односу на комору сагоревања што је последица паљења мотора и стварања унутрашњег притиска сагоревања у комори ракетног мотора. Друго, приликом овог померања имамо круту везу актуатора и флексибилног млазника која је узрок феномена да се стварни геометријски центар ротације флексибилног млазника помери у односу на геометријски центар, што доводи и до закретања млазника у једну страну. Ово је неповољно, пре свега што управљање мора ефикасно да компензује овај поремећај у првој фази лета. Аутор овог рада сматра да се ово може избећи на два начина. Први начин је уградњом посебног вентила, који ће омогућити померање клипњаче актуатора када долази до аксијалног кретања млазника у односу на комору мотора, тренутак постизања радног притиска у комори мотора, то јест да неактивран актуатор не буде крут елемент, што би изазвало померање тачке ротације из осе мотора, види слику 2.22б. На слици 10.22 је приказана функционална шема конфигурације

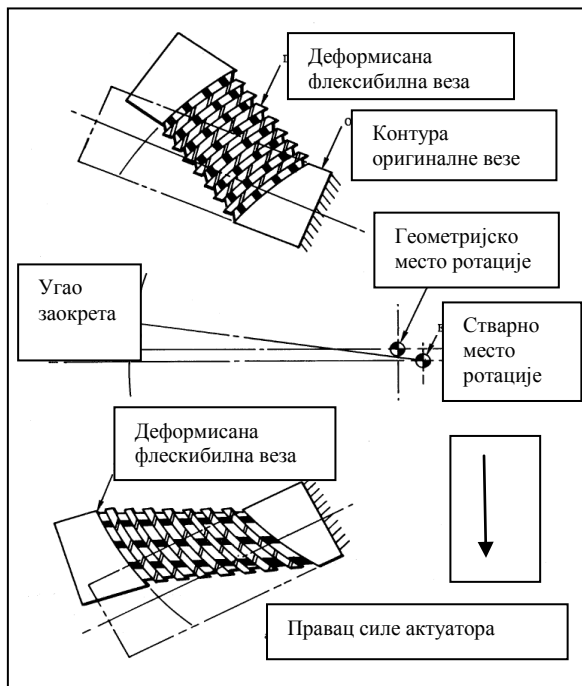
електрохидрауличног актуатора која омогућава претходно описано. Јасно је да је ово могуће док нема притиска напајања уљем актуатора, а после појаве притиска ова компензација више није могуће. Конструктивно је могуће синхронизовати избегавање закретања млазника и постизање притиска напајања за актуатор. Други начин да се ово избегне је везано за знатно усложњавање система, али оно поред тога што решава проблем померања тачке ротације млазника из осе, решава и низ других проблема па га је потребно посебно размотрити. За разлику од првог решења које предлаже аутор овог рада, и које је у основи „чисто хидраулично“, друго решење је базирано на једном америчком патенту из 1973. године које се односи на управљање флексибилним млазником. Ово решење подразумева уградњу два цилиндра у једној равни за закретање млазника ради обезбеђења нормалне силе за пропињање или скретање ракете. Основно решење приказано је на слици 10.24. Практично цилиндри раде као цилиндри једносмерног дејства на потискивање, док је увлачење клипњаче обезбеђено еластичном реакцијом флексибилне везе. Када дође до појаве аксијалне силе услед притиска у комори сагоревања, млазник креће транслаторно напред на рачун симетричног цурења у серво разводнику, чиме је спречено померање из осе млазника тачке ротације. Постављањем давача хода у сваки цилиндар, могуће је имати информацију о реалном хистерезису флексибилне везе и адекватне корекције на основу знака грешке, то јест разлике директно и индиректно активног хидрауличног цилиндра. Ово може знатно да повећа тачност рада и квалитет динамике рада актуатора, пре свега јер у варијанти са једним цилиндром није било могуће мерити угао закретања флексибилног млазника, већ се информација добијала индиректно преко утицаја на кретање ракете нормалне силе, која је резултат тренутног положаја млазника, што узима у обзир неколико флексибилних елемената структуре. У случају са два цилиндра, имамо директну корекцију положаја покретног млазника на основу разлике у позицији. У почетном тренутку, цилиндри морају имати идентичне позиције.



Слика 10.20-Флексибилни млазник са два актуатора чија флексибилна веза омогућава закретање у две нормалне равни [11]

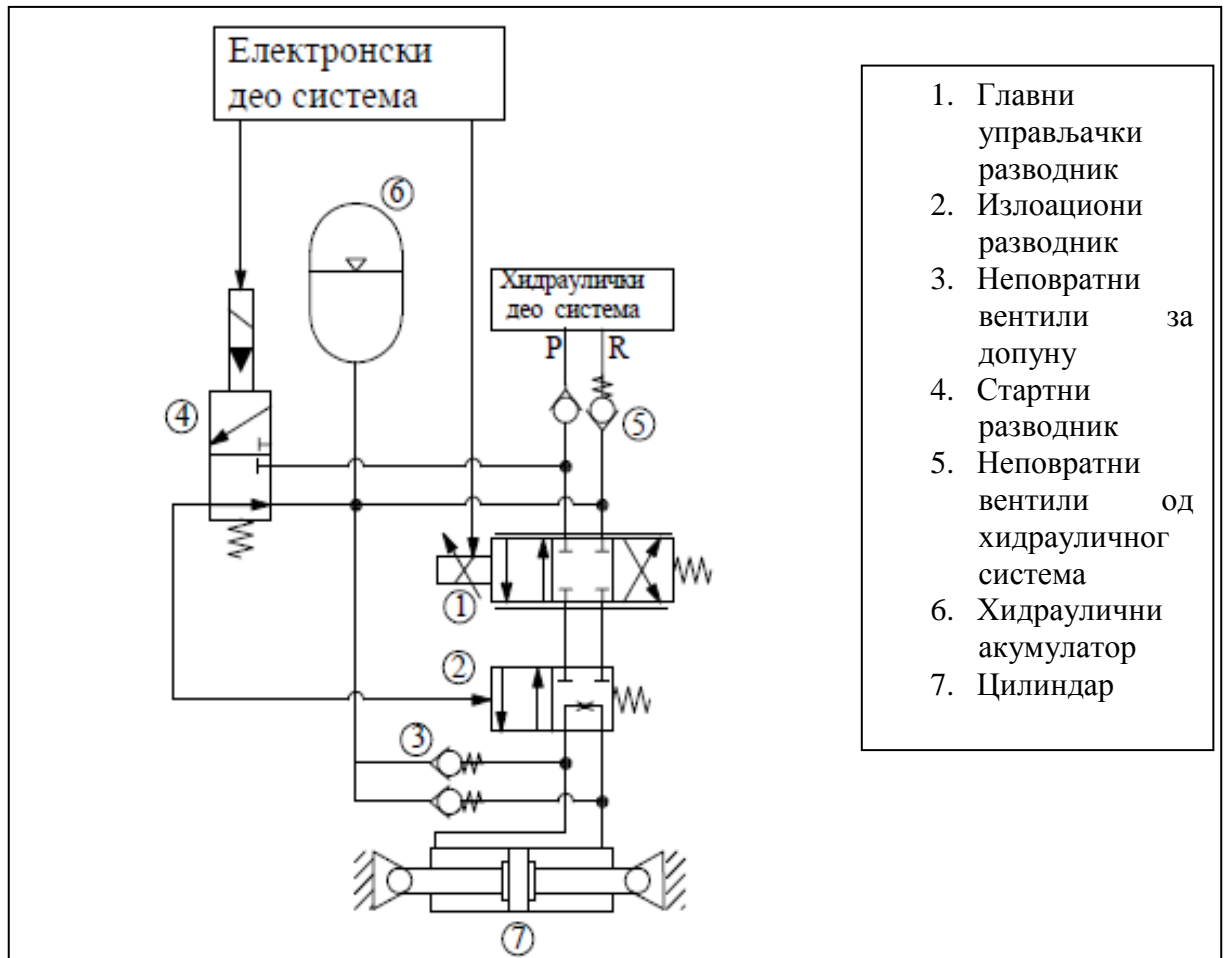


Слика 10.21а-Флексибилна веза у неутралном положају [77]

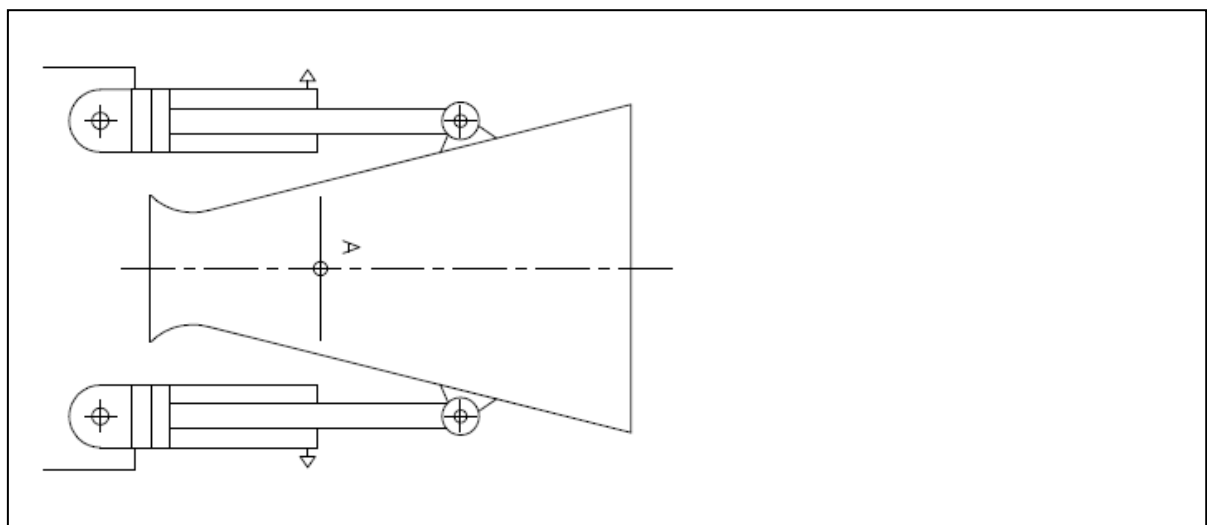


Слика 10.21б-Флексибилна веза у векторисаном положају [77]

Прилог теорији пројектовања актуатора за управљање вектором потиска ракетног мотора са флексибилним млазником

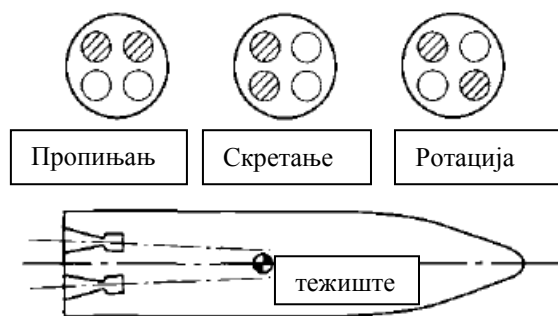


Слика 10.22-Функционална шема актуаторске конфигурације са вентилом за раскрућивање актуатора-стање после постизања притиска у комори ракетног мотора



Слика 10.23-Конструкција флексибилног млазника са два цилиндра у једној равни

## Прилог теорији пројектовања актуатора за управљање вектором потиска ракетног мотора са флексибилним млазником



Слика 10.24-Ракетни мотор са четири млазнице [72]

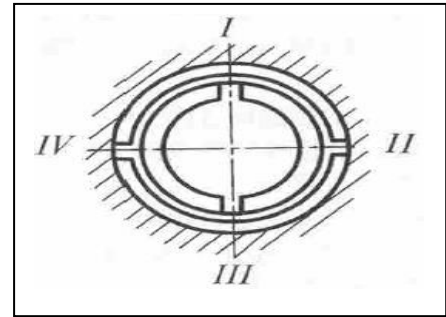
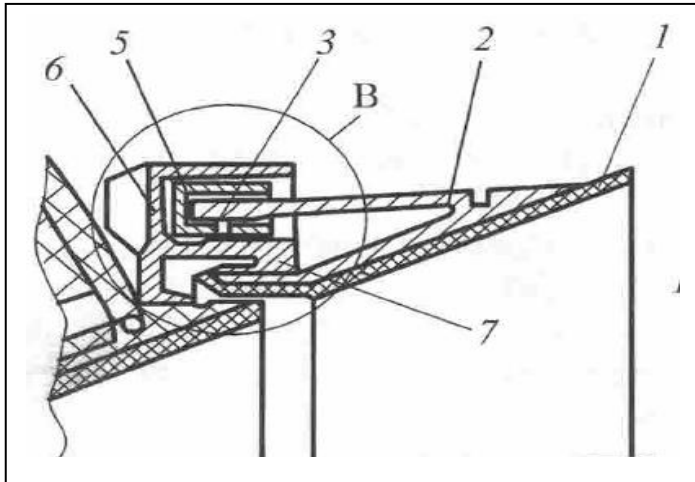
Претходно су шематски приказана различита конструктивна решења за управљање вектором потиска са флексибилним млазником. Сада се приказује неколико конструктивних технологија за практичну реализацију:

На слици 10.25 приказано је решење са карданом. Овде флексибилна веза нема структурну улогу везе коморе за сагоревање и млазника већ само заптивну функцију, док се структурна веза остварује преко карданске везе у две равни. Карданска веза је и главни недостатак ове конструкције јер је ограничена по капацитету оптерећења које може да пренесе. Овде треба нагласити да када се каже флексибилни млазник, мисли се истовремено да је млазник покретан и/или флексибилну везу. Конструкција која се приказује на слици 10.26 карактерише се чињеницом да је примарна флексибилна веза остварена преко флуида. Ову конструкцију карактерише релативно мали управљачки момент и велика осна крутост али истовремено негативно је то што је ова конструкција релативно скупа и проблематична за дуже складиштење, а знамо да је за конструкције ракета са флексибилним млазником то период од минимално 30 година. На слици 10.27 је приказана реална конструкција са такозваним ламинарним лежајем која се и разматра у овом раду као репрезент конструкције флексибилног млазника. На слици 10.28 је приказан сасвим други карактер флексибилне везе, који се у руској литератури назива силфон.

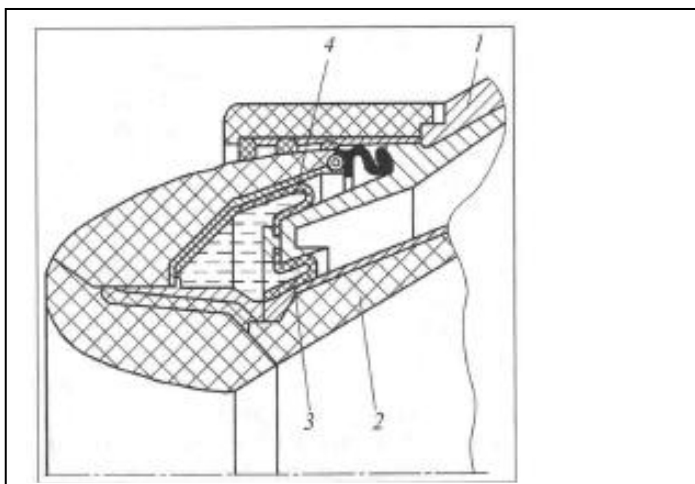
Конструкција ракетног мотора са флексибилним млазником (пре свега конструкција са ламинарним лежајем) и даље представља напредно техничко решење које не губи на својој актуелности. Тренутно расположиве технологије гарантују задовољавајући квалитет израде флексибилне везе који гарантује очекивану радну поузданост. Посебно треба истаћи да је основна конструкција флексибилног млазника за управљање вектором потиска примењена на сва 4 степена европске ракете Вега као и на америчкој ракети Посејдон, где су ракетни мотори пречника 4 м. У одређеној литератури [72] и [90] се наводи да флексибилна веза са серво дејством, како је то приказано на слици 10.20 због смањења максималне силе која се захтева од актуатора може да буде изведена тако да се примене и електро механички актуатори који знатно смањују цену и захтеве одржавања у условима дугог ресурса ракете пре једнократне употребе. Максимална снага актуационог система за флексибилни млазник са ламинарним лежајем може достићи 40-50 kW. То је снага где није рационално применити електро механички актуатор.



Прилог теорији пројектовања актуатора за управљање вектором потиска ракетног мотора са флексибилним млазником



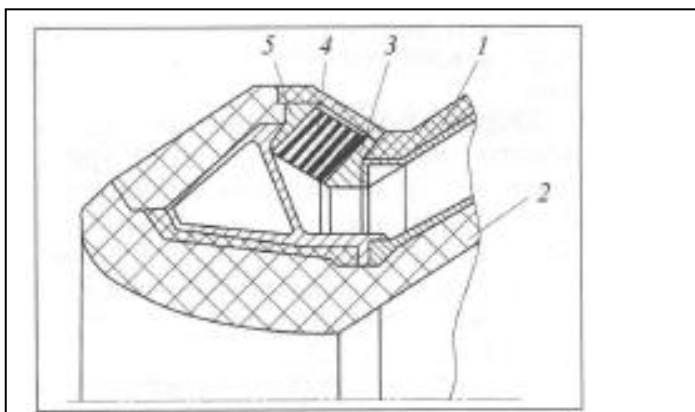
Слика 10.25-Конструкција са карданском везом млазника и коморе[11]



1-Покретни део  
2-Носач  
3.Лежај  
4-Оса, 5-Кардански прстен  
6.-Тело, 7-Дијафрагма

1-Покретни део млазника  
2-Непокретни део млазника  
3 и 4 дијафрагма

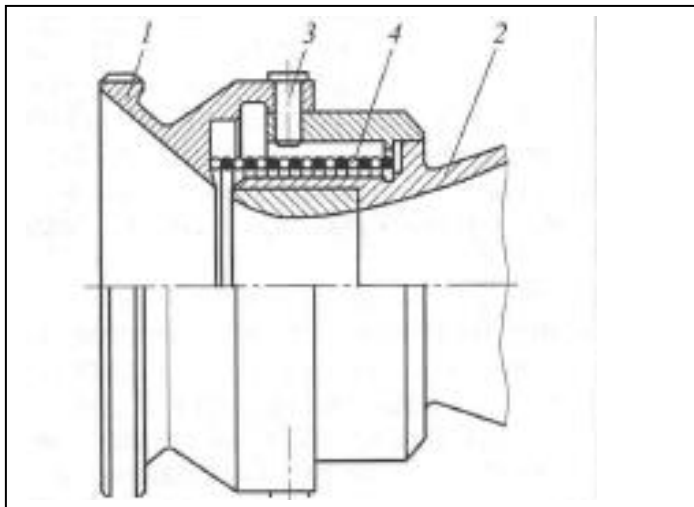
Слика 10.26-Конструкција са хидропрстеном [11]



1-Непокретни део млазника  
2-Покретни део млазника  
3 и 5 Ослони прстенови  
4. Шарнир

Слика 10.27-Конструкција са ламинарним лежајем[11]

Прилог теорији пројектовања актуатора за управљање вектором потиска ракетног мотора са флексибилним млазником



- 1-Непокретни део млазника
- 2-Блок млазнице покретни део
- 3. Осни штифт
- 4. Силфон

Слика 10.28-Конструкција са силфоном[11]

Флексибилни млазник као конструктивно решење примењује се на ракетама В-В, В-З, З-З. Код свих нових ракета императив је повећати маневарске способности ради избегавања пресретања али и због чињенице да је знатно повећане и маневарске способности циља за случај В-В. У неким случајевима маневарске способности се повећавају секундарним системима, од којих је најефикаснији систем са већим бројем малих дискретних мотора који су постављени под углом од 90 степени у односу на осу ракете по њеном ободу. Пројектовањем напреднијих управљачких система, пре свега електро хидрауличких актуационих, постоје и даље могућности повећања маневарских особина основним примарним системом управљања вектором потиска преко флексибилног млазника.

## Прилог 7-Математичко моделирање електрохидрауличног актуационог система-нелинеарни математички модел- општи систематизовани приступ

Моделирање електро хидрауличног актуатора има низ специфичности. Овде се тежи дефинисању универзалног приступа поштујући све посебности. Главни делови електро хидрауличног актуационог система су појачивач серво разводника, серво разводник и цилиндар. Извођење овог модела је на основу претпоставки дефинисаних у литератури [28]. Први корак у изради нелинеарног модела неће изгубити у општости ако се дефинишу почетне претпоставке:

### 1. Занемарује се притисак у резервоару за уље.

Ова претпоставка интуитивно није адекватна када је у питању актуатор за ваздухопловне примене али се усваја као почетна јер сам надпритисак који се обезбеђује у резервоарима је мали, реда величине неколико бара, тако да можемо сматрати да је притисак у резервоару нула.

$$p_0 = 0$$

### 2. Отвори на серво разводнику су једнаки.

Разматраће се само серво разводници са једнаким отворима. Не постоји оправдање за специјалне конструкције са неједнаким отворима.

$$\begin{aligned} A_1 &= A_1(x_v) = A_3 \\ A_2 &= A_2(-x_v) = A_4 \\ Q_I &= Q_1 - Q_4 \\ Q_{II} &= Q_3 - Q_2 \end{aligned} \tag{П.7.1}$$

### 3. Густина радног флуида је функција само притиска.

Ова претпоставка значи да се претпоставља да је температра уља у одређеним границама констатна и да густина зависи само од притиска.

$$\rho_k = \rho(p) = \rho_0 + \left(\frac{\partial \rho_k}{\partial p}\right)_T (p_k - p_0), k = 1, 2 \tag{П.7.2}$$

$$\rho_k = \rho_0 + \frac{\partial \rho_k}{\partial p} p_k, k = 1, 2 \tag{П.7.3}$$

$$\beta_e = \rho_0 \left(\frac{\partial \rho_k}{\partial p}\right)_T \tag{П.7.4}$$

$\beta_e$  -запремински модул еластичности течности (модул стишљивости)

$\rho_0$  -густина уља на атмосферском притиску

### 4. Бернулијева једначина са довољном тачношћу важи за нестационарно струјање кроз серво разводник.

$$Q_1 = C_d A_1(x_v) \sqrt{\frac{2(p_N - p_1)}{\rho_1}} = C_d A_1(x_v) \sqrt{\frac{2(p_N - p_1)}{\rho_0 + \frac{\rho_0}{\beta_e} p_1}} \quad (\text{П.7.5})$$

$$Q_2 = C_d A_2(x_v) \sqrt{\frac{2(p_N - p_2)}{\rho_2}} = C_d A_1(x_v) \sqrt{\frac{2(p_N - p_2)}{\rho_0 + \frac{\rho_0}{\beta_e} p_2}} \quad (\text{П.7.6})$$

$$Q_3 = C_d A_3(x_v) \sqrt{\frac{2(p_2 - p_0)}{\rho_2}} = C_d A_1(x_v) \sqrt{\frac{2p_2}{\rho_0 + \frac{\rho_0}{\beta_e} p_2}} \quad (\text{П.7.7})$$

$$Q_4 = C_d A_4(x_v) \sqrt{\frac{2(p_1 - p_0)}{\rho_1}} = C_d A_1(x_v) \sqrt{\frac{2p_1}{\rho_0 + \frac{\rho_0}{\beta_e} p_1}} \quad (\text{П.7.7})$$

**5. Отвори серво разводника су правоугани и констатне ширине.**

$$A_1(x_v) = wx_v$$

Овде се претпоставља да кретање клипа серво разводника није механички ограничено то јест да није у засићењу, односно да се максимални ход никада у радном режиму не остварује и да је претходна функција линеарна.

**6. Унутрашња цурења у серво разводнику се занемарују.**

Унутрашње цурење је последица радијалних зазора у конструкцији склопа клипчаура. Радијални зазори и ако мали не могу да елиминишу унутрашње цурење. Зато се може написати:

$$Q_I = C_d A_1(x_v) \sqrt{\frac{2(p_N - p_1)}{\rho_0 + \frac{\rho_0}{\beta_e} p_1}} - Q_4 \quad (\text{П.7.8})$$

$$Q_{II} = C_d A_1(x_v) \sqrt{\frac{2p_2}{\rho_0 + \frac{\rho_0}{\beta_e} p_2}} - Q_2 \quad (\text{П.7.9})$$

Цурења у серво разводнику постоје у нултом положају. Мало померање клипа доводи до тога да се оно може занемарити и то је први елемент не моделоване динамике који се прихвата априори и овај приступ оправдава експеримент.

**Прилог теорији пројектовања актуатора за управљање вектором потиска ракетног мотора са флексибилним млазником**

Сада можемо написати:

$$Q_I = CdA_1(x_v) \sqrt{\frac{2(p_N - p_1)}{\rho_0 + \frac{\rho_0}{\beta_e} p_1}} \quad (\text{П.7.10})$$

$$Q_{II} = CdA_1(x_v) \sqrt{\frac{2p_2}{\rho_0 + \frac{\rho_0}{\beta_e} p_2}} \quad (\text{П.7.11})$$

Претходне једначине важе за:

$$x_v \geq 0$$

Једначине, (П.7.10), (П.7.11) описују случај извлачења клипњаче цилиндра. За случај увлачења клипњаче:

$$Q_I = CdA_1(x_v) \sqrt{\frac{2(p_1)}{\rho_0 + \frac{\rho_0}{\beta_e} p_1}} \quad (\text{П.7.12})$$

$$Q_I = CdA_1(x_v) \sqrt{\frac{2(p_N - p_2)}{\rho_0 + \frac{\rho_0}{\beta_e} p_2}} \quad (\text{П.7.13})$$

Јасно је да можемо претходно написати у компактном облику који усложњава нелинеарност типа квадратног корена:

$$Q_I = CdA_1(x_v) \sqrt{\frac{(p_N - p_1)(1 + \text{sign}x_v) + p_1(1 - \text{sign}x_v)}{\rho_0 + \frac{\rho_0}{\beta_e} p_1}} \quad (\text{П.7.14})$$

$$Q_{II} = CdA_1(x_v) \sqrt{\frac{(p_2(1 + \text{sign}x_v) + (p_N - p_2)(1 - \text{sign}x_v))}{\rho_0 + \frac{\rho_0}{\beta_e} p_2}} \quad (\text{П.7.15})$$

Претходне једначине, (П.7.14) и (П.7.15) су нелинеарне једначине које се односе на цилиндар: ( слика 10.29)

Основа за даље опште моделирање је једначина континуитета:



Једначина континуитета за комору цилиндра у коју улази радни флуид под притиском:

$$\frac{dV_1}{dt} + V_1 \frac{\rho_0}{\beta_e \rho_1} \frac{dp_1}{dt} = Q_I - C_u (p_1 - p_2) \quad (\text{П.7.20})$$

Једначина континуитета за комору из које се излази радни флуид:

$$\frac{dV_2}{dt} + V_2 \frac{\rho_0}{\beta_e \rho_{21}} \frac{dp_2}{dt} = Q_{uk} - C_u (p_1 - p_2) - C_s - Q_{II} \quad (\text{П.7.21})$$

Запремине комора се мењају на следећи начин:

$$\begin{aligned} V_1 &= V_{10} + A_1 X_p \\ V_2 &= V_{20} - A_1 X_p \end{aligned} \quad (\text{П.7.22})$$

### 7. Спољашње цурење је нула.

То је реална претпоставка према данашњем квалитету израде хидрауличних цилиндара и заптивних елемената.

Сада се могу повезати следеће једначине:

$$\begin{aligned} & \left( \frac{dV_{10}}{\beta_e + p_1} + \frac{A_1 x_p}{\beta_e + p_1} \right) \frac{dp_1}{dt} + A_1 \dot{x}_p = \\ & = CdA_1(x_v) \sqrt{\frac{(p_N - p_1)(1 + \text{sign}x_v) + p_1(1 - \text{sign}x_v)}{\rho_0 + \frac{\rho_0}{\beta_e} p_1}} - C_u (p_1 - p_2) \end{aligned} \quad (\text{П.7.23})$$

$$\begin{aligned} & \left( \frac{dV_{20}}{\beta_e + p_2} + \frac{A_2 x_p}{\beta_e + p_2} \right) \frac{dp_2}{dt} - A_1 \dot{x}_p = C_u (p_1 - p_2) - \\ & - Cdw x_v \sqrt{\frac{(p_2(1 + \text{sign}x_v) + (p_N - p_2)(1 - \text{sign}x_v))}{\rho_0 + \frac{\rho_0}{\beta_e} p_2}} \end{aligned} \quad (\text{П.7.24})$$

После претходног можемо написати и једначину равнотеже сила:

$$m\ddot{x}_p + F_{tr} = A_1 p_1 - A_1 p_2 \quad (\text{П.7.25})$$

У општем случају сила трења у цилиндру се може записати као:

$$F_{tr} = \delta_0 \dot{x}_p + \delta_1 \text{sign} \dot{x}_p \quad (\text{П.7.26})$$

Претходне једначине се могу написати у компактној форми ако се изаберу следеће величине стања:

$$\begin{aligned} x_1 &= x_p \\ x_2 &= \dot{x}_p \\ x_3 &= p_1 \\ x_4 &= p_2 \end{aligned} \quad (\text{П.7.27})$$

$$\begin{aligned} \dot{x}_1 &= x_2 \\ \dot{x}_2 &= \frac{A_1}{m} x_3 - \frac{A_2}{m} x_4 - \frac{\delta_0}{m} x_2 - \frac{\delta_1}{m} \text{sign} x_2 \end{aligned} \quad (\text{П.7.28})$$

$$\dot{x}_3 = (Cdw_{x_v} \sqrt{\frac{(p_N - x_3)(1 + \text{sign} x_v) + x_3(1 - \text{sign} x_v)}{\rho_0 + \frac{\rho_0}{\beta_e} x_3}} - C_u(p_1 - p_2) - A_1 x_2) \left( \frac{V_{10}}{\beta_e + x_3} + \frac{A_1 x_1}{\beta_e + x_3} \right) \quad (\text{П.7.29})$$

$$\dot{x}_4 = (C_u(x_3 - x_4) + A_1 x_2 - Cdw_{x_v} \sqrt{\frac{x_4(1 + \text{sign} x_v) + (p_N - x_4)(1 - \text{sign} x_v)}{\rho_0 + \frac{\rho_0}{\beta_e} x_4}}) \left( \frac{V_{20}}{\beta_e + x_4} - \frac{A_1 x_1}{\beta_e + x_4} \right) \quad (\text{П.7.30})$$



**Прилог теорији пројектовања актуатора за управљање вектором потиска ракетног мотора са флексибилним млазником**

Да би се добио комплетан математички моделе електро хидрауличног актуатора треба увести и динамику првог степена серво разводника. У пракси је познато, што је доказао и референтни произвођач серво разводника, MOOG, [15], за пропусни опсег серво разводника до 50 Hz, може се описати први степен серво разводника преносном функцијом првог реда као линеарни модел:

$$W(s) = \frac{Q(s)}{i(s)} = \frac{K}{1 + Ts} \quad (\text{П.7.31})$$

Познавањем једначине која представља линеаризовану једначину протока у серво разводнику:

$$Q(s) = K_{q0}x_v(s) - K_{c0}p_L(s) \quad (\text{П.7.32})$$

Ако се занемари цурење услед оптерећења, добија се:

$$W(s) = \frac{x_v}{i(s)} = \frac{K}{1 + Ts} \quad (\text{П.7.33})$$

На основу претходне преносне функције добија се:

$$\dot{x}_v = \frac{K}{K_{q0}T}i - \frac{1}{T}x_v \quad (\text{П.7.34})$$

Преносна функција електронског појачивача, који управља серво разводником:

$$W(s) = \frac{i(s)}{U(s)} = K_i \quad (\text{П.7.35})$$

Рачунарски хардвер најчешће на улаз појачивача серво разводника поставља напон:

$$i = K_i U \quad (\text{П.7.36})$$

Сада можемо добити на основу претходног:

$$\dot{x}_v = \frac{KK_i}{K_{q0}T}U - \frac{1}{T}x_v \quad (\text{П.7.37})$$

Из претходног је јасно да у приказу приступа моделирању у овом раду не постоје амбиције да се изведе математички модел разводника вишег реда јер се при пројектовању актуатора серво разводник ипак посматра као стандардна компонента и његова динамика се прихвата онако како је дефинисао произвођач, тако да се пројектант не бави проблемом њене поправке или модификације. Акцент се ставља на онај део који се односи на извршни део актуатора, у овом случају хидраулични цилиндар.

На основу претходног може се написати општи нелинерни модел електрохидрауличног актуатора у оквиру претходно наведених претпоставки:

$$\frac{dp_1}{dt} = (Cdw_{x_v} \sqrt{\frac{(p_N - p_1)(1 + \text{sign}x_v) + p_1(1 - \text{sign}x_v)}{\rho_0 + \frac{\rho_0}{\beta_e} p_1}} - C_u(p_1 - p_2) - A_1\dot{x}_p) / \left( \frac{V_{10}}{\beta_e + p_1} + \frac{A_1x_p}{\beta_e + p_1} \right)$$

(П.7.38)

$$\frac{dp_2}{dt} = (C_u(p_1 - p_2) + A_1\dot{x}_p - Cdw_{x_v} \sqrt{\frac{p_2(1 + \text{sign}x_v) + (p_N - p_2)(1 - \text{sign}x_v)}{\rho_0 + \frac{\rho_0}{\beta_e} p_2}}) / \left( \frac{V_{20}}{\beta_e + p_2} - \frac{A_1\dot{x}_p}{\beta_e + p_2} \right)$$

(П.7.39)

$$m\ddot{x}_p + \delta_0\dot{x}_p + \delta_1\text{sign}\dot{x}_p = A_1p_1 - A_1p_2 \quad (\text{П.7.40})$$

$$\dot{x}_v = \frac{KK_i}{K_{qo}T} U - \frac{1}{T} x_v \quad (\text{П.7.41})$$

Општи нелинеарни модел претходно наведен може се упростити а да то има оправдања, претпоставком да је стишљивост уља непроменљива и да не зависи од притиска. Ово је оправдано у случајевима када су у питању мале запремине и мале промене притиска. Ово значи да у претходним једначинама нема израза у имениоцу под кореном облика:

$$\rho_0 + \frac{\rho_0}{\beta_e} \quad (\text{П.7.42})$$

већ се јавља само густина  $\rho$ .

**Прилог теорији пројектовања актуатора за управљање вектором потиска ракетног мотора са флексибилним млазником**

У претходном моделу величине стања су позиција, брзина, притисак једне и притисак друге коморе цилиндра.

Даља упрошћавања претходно датог модела односе се на притступ који је урадио Мерит (1967) [28] када је систем упроштио и скинуо ред модела за 1.

Приступ се заснива на дефинисању протока оптерећења и притиска оптерећења:

$$\frac{dV_1}{dt} + \frac{V_1}{\beta_{e1}} \frac{dp_1}{dt} = Q_I - C_u(p_1 - p_2) \quad (\text{П.7.43})$$

$$\frac{dV_2}{dt} + \frac{V_2}{\beta_e} \frac{dp_2}{dt} = Q_{uk} - C_u(p_1 - p_2) - Q_{II} \quad (\text{П.7.44})$$

Одуземањем претходних једначина добија се:

$$Q_I + Q_{II} - 2C_u(p_1 - p_2) = \frac{V_1}{\beta_e} \frac{dp_1}{dt} - \frac{V_2}{\beta_e} \frac{dp_2}{dt} + \frac{dV_1}{dt} - \frac{dV_2}{dt} \quad (\text{П.7.45})$$

Ако сада дефинишемо:

$$Q_L = \frac{1}{2}(Q_I + Q_{II}) \quad (\text{П.7.46})$$

$$Q_L = (C_u(p_1 - p_2) + -\frac{V_1}{\beta_e} \frac{dp_1}{dt} - \frac{V_2}{\beta_e} \frac{dp_2}{dt} + \frac{dV_1}{dt} - \frac{dV_2}{dt}) \quad (\text{П.7.47})$$

Када уврстимо изразе за запремине комора цилиндра

$$Q_L = C_u(p_1 - p_2) + \frac{1}{2} \left( \frac{V_{10}}{\beta_e} \frac{dp_1}{dt} - \frac{V_{20}}{\beta_e} \frac{dp_2}{dt} + \frac{A_1 x_p}{\beta_e} \frac{dp_1}{dt} + \frac{A_1 x_p}{\beta_e} \frac{dp_2}{dt} \right) + A_1 \dot{x}_p \quad (\text{П.7.48})$$

полазећи од претпоставке да се клип може центрирати:

$$V_{10} = V_{20} = V_0 \quad (\text{П.7.49})$$

и ако се узме у обзир линеаризована једначина протока кроз серво разводник:

$$Q_L = K_{qo} x_v - K_{co} p_L \quad (\text{П.7.50})$$

једначина равнотеже сила се дефинише као и претходно:

Прилог теорији пројектовања актуатора за управљање вектором потиска ракетног мотора са флексибилним млазником

$$m\ddot{x}_p + \delta_0 \dot{x}_p + \delta_1 \text{sign} \dot{x}_p = A_1 p_1 - A_1 p_2 \quad (\text{П.7.51})$$

Из претходне једначине се добија за:

$$p_2 = p_1 - \frac{m}{A_1} \ddot{x}_p - \frac{\delta_0}{A_1} \dot{x}_p - \frac{\delta_1}{A_1} \text{sign} \dot{x}_p \quad (\text{П.7.52})$$

$$\frac{dp_2}{dt} = \frac{dp_1}{dt} - \frac{m}{A_1} \ddot{x}_p - \frac{\delta_0}{A_1} \dot{x}_p - \frac{\delta_1}{A_1} \text{sign} \ddot{x}_p \quad (\text{П.7.53})$$

Уводећи потпуно оправдане претпоставке:

$$p_L = p_2 - p_1 \quad (\text{П.7.54})$$

$$p_N = p_2 + p_1 \quad (\text{П.7.55})$$

и користећи претходно као и линеаризовану једначину протока:

$$Q_L = K_{qo} x_v - K_{co} p_1 + K_{co} p_2 \quad (\text{П.7.56})$$

Користећи претходно као и аналогију за:

$$p_1 = \frac{A_1}{2A_p} p_N - \frac{m}{2A_p} \ddot{x}_p - \frac{\delta_0}{2A_p} \dot{x}_p - \frac{\delta_1}{A_1} \text{sign} \dot{x}_p \quad (\text{П.7.57})$$

$$\frac{dp_1}{dt} = \frac{m}{2A_p} \ddot{x}_p - \frac{\delta_0}{2A_p} \dot{x}_p - \frac{\delta_1}{A_1} \text{sign} \ddot{x}_p \quad (\text{П.7.58})$$

можемо добити нелинерану диференцијалну једначину понашања простору улаз-излаз:

$$\begin{aligned} & \left[ \frac{V_0}{2\beta_e} \frac{m}{A_1} \right] \ddot{x}_p + \left[ (K_{co} + C_u) \frac{m}{A_1} + \frac{V_0}{\beta_e} \frac{\delta_0}{A_1} \right] \dot{x}_p + \left[ (K_{co} + C_u) \frac{\delta_0}{A_1} + A_1 \right] x_p + \left( \frac{A_1 m}{2\beta_e} - \frac{m}{2\beta_e} \right) \ddot{x}_p x_p + \\ & + \left( \frac{A_1 \delta_0}{2\beta_e} - \frac{\delta_0}{2\beta_e} \right) \dot{x}_p x_p + \left[ (K_{co} + C_u) \frac{\delta_1}{A_1} \text{sign} x_p \right] + \left[ (K_{co} + C_u) \frac{A_1}{2} \right] p_N = K_{qo} x_v \end{aligned} \quad (\text{П.7.59})$$

Претходно моделирање се заснива практично на нелинеарном опису статичке карактеристике разводника проток-притисак и на повезивању модела разводника

са моделом цилиндра, што се може сматрати инхерентном структуром хидрауличног актуационог система. Види се да је у питању континуална нелинеарност која има изводе вишег реда, која у математичком смислу представља функцију квадратног корена. Поред ове нелинеарности постоје и такозване дисконтинуалне или статичке нелинеарности које се односе на друге врло важне особине пре свега разводника, као што су засићење по протоку, нелинеарност типа зоне неосетљивости која код разводника описује позитивни преклоп или нелинеарности типа хистерезиса које описују трење или зазор. У претходном моделирању нисмо могли ефикасно да унесемо нелинеарност типа зоне неосетљивости или засићења. На овај начин нам је јасно да смо претходним моделирањем обухватили у основи само континуалне нелинеарности, а да ћемо статичке односно дисконтинуалне нелинеарности унести у модел актуационог система у каснијим фазама моделирања кроз блок дијаграм. У сваком случају, у претходном моделу имамо једну дисконтинуалну нелинеарност која се може лако унети у диференцијалну једначину и односи се на опис трења преко функције  $\text{sign}$ . Поред тога у горњем моделу примећујемо и чисте математичке нелинеарности типа производа једне променљиве и њених виших извода. Претходно се односи на нелинеарности које називамо природне јер потичу од физичке природе система. У каснијим фазама комплетирања математичког модела и са математичким моделом алгорита управљања у прилици смо да унесемо и такозване вештачке нелинеарности које се уносе у комплетан математички модел актуационог система кроз закон управљања који се имплементира различитим математичким описима нелинеарних закона управљања. Претходно изведен нелинеарни математички модел служиће као основа за линеаризацију јер континуалне нелинеарности могу бити линеаризоване око дефинисаних радних тачака. Дисконтинуалне нелинеарности се не могу линеаризовати класичним методом преко Тејлоровог полинома и за њихову линеаризацију користимо технику описне функције. На овај начин можемо прво добити линеаризовани модел у који можемо да укључимо по једну или више нелинеарности за које можемо да добијемо еквивалентну и даље нам стоји на располагању техника описне функције или функција хармонијске линеаризације. Значи на крају процеса моделирања добијамо линеаризовани модел добијен двома технологијама линеаризације: око радне тачке преко Тејлоровог полинома и линеаризацијом преко описне функције. Тада је потпуно исправно користити термин линеаризован модел. Некада се каже и само линеарни, али ми само најпростије моделе добијамо од линеарних једначина. У сваком случају када је у питању моделирање склопа разводник-цилиндар можемо говорити само о линеаризованом моделу, јер не постоје линеарне једначине којима се може разводник описати, а да претходно нису биле нелинеарне а затим линеаризоване. Поред тога, претходна технологија моделирања се заснива на писању диференцијалних једначина које описују динамику актуационог система. Поред приступа преко диференцијалних једначина постоји и такозвани енергетски приступ који користи технологију моделирања засновану на Бонд графовима. Ову технологију користимо посебно само за моделовање неиделане опруге којом описујемо оптерећење за актуациони систем односно хидраулични цилиндар. У разматраном случају неиделна опруга треба да опише динамичко понашање флексибилног млазника. У посебном поглављу овог рада описана је техника моделирања флексибилног оптерећења преко Бонд графова. Основна

**Прилог теорији пројектовања актуатора за управљање вектором потиска ракетног мотора са флексибилним млазником**

идеја ове технике математичког моделирања заснива на праћењу протока снаге односно енергије у оквиру једне конструктивне целине. Претходни модел је направљен за случај моделирања цилиндра са концентрисаном масом на крају клипњаче, отпором кретања са спољним вискозним и унутрашњим трењем без спољашње силе као репрезента оптерећења актуатора.

## **Биографија кандидата**

Драган Б. Наупарац је рођен 23. септембра 1962. године, у Београду, Република Србија.

Основну школу ”Димитрије Туцовић” је завршио је у Краљеву, 1977. године.

Средњошколско образовање је завршио је у краљевачкој гимназији 1981. године, по усмереном програму за занимање математичко технички сарадник. Исте године је уписао Машински факултет Универзитета у Београду, али је на прву годину студија кренуо 1982., после одслужења војног рока. Дипломирао је 16.06.1987., на Катедри за Аутоматско управљање, одбранивши дипломски рад на тему „ Математички модели неких типова летелица“, са оценом 10, код ментора проф. Др Драгутина Дебељковића. Средња оцена кандидата за време студија на Машинском факултету без дипломског рада била је 8.47.

Последиломске студије је уписао 1987. године на Катедри за Аутоматско управљање, Машинског факултета у Београду. Магистарски рад са темом: „Анализа теорије праћења на реалном електрохидрауличном серво систему, кандидат је одбранио у фебруару 1994. године, пред комисијом, проф. Др Зоран Рибар ментор, проф. др Зоран Бучевац и проф. Др Новак Недић. Машински факултет у Краљеву.

Први радни однос кандидат је засновао 1988. године у предузећу Минел ФННА, затим 1989. године у предузећу Минел Институт за Аутоматику, а од краја 1989. до данашњег дана запослен је у предузећу ППТ-Инжењеринг АД, Београд, које се у претходном периоду налазило у саставу Индустрије хидраулике и пнеуматике, Прва Петолетка Трстеник, ППТ, а од 2012. године послује у саставу руског предузећа ТрестГидроМонтаж из Москве.

У предузећу ППТ-Инжењеринг кандидат је прошао пут од пројектанта сарадника до главног инжењера.

Од 1999. године кандидат почиње сарадњу са пројектном групом професора Др. Ђорђа Благојевића на пословима везаним за ракетну технику у оквиру међународне сарадње Машинског факултета у Београду са одређеним бројем земаља. Ови послови били су везани за пројектовање електро хидрауличних актуаторских система и система за тестирање у оквиру пројеката за управљање вектором потиска ракетног мотора.

Прилог 1.

## Изјава о ауторству

Потписани-а Драган Наупарац

број индекса \_\_\_\_\_

Изјављујем

да је докторска дисертација под насловом

ПРИХОД ТЕОРИЈИ ПРОЈЕКТОВАНЈА АКТУАТРА ЗА  
УПРАВЉАЊЕ ВЕКТОРОМ ПОТИСКА РАКЕТНОГ МОТОРА СА  
ФЛЕКСИБИЛНИМ МЛАЗНИКОМ

- 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.

У Београду, 27. V 2016.

Потпис докторанда

Драган Наупарац



Прилог 2.

## Изјава о истоветности штампане и електронске верзије докторског рада

Име и презиме аутора Драган Наупарац

Број индекса \_\_\_\_\_

Студијски програм \_\_\_\_\_

Наслов рада Прилог теорији пројектовања актуатора за управљање  
векторним полетним ракетним мотором са флексибилним  
механизмом

Ментор \_\_\_\_\_

Потписани/а Драган Наупарац

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, 27. V 2016.

Драган Наупарац

Прилог 3.

## Изјава о коришћењу

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

ПРИЛОГ ТЕОРИЈИ ПРОЈЕКТОВАЊА АКТУАТОРА ЗА УПРАВЉАЊЕ  
ВЕКТОРОМ ПОТИСКА РАКЕТНОГ МОТОРА СА ФЛЕКСИОТНУМ  
МАЗНИКОМ

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/ла.

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, 27. V 2016.

Потпис докторанда

Зоран Пауновић