

Факултет инжењерских наука Универзитета у Крагујевцу

Војна академија Универзитета одбране у Београду



Назив студијског програма: Војноиндустријско инжењерство

Ниво студија: Мастер академске студије

Модул: Наоружање

Предмет: Интеграција наоружања на мобилне платформе

Број индекса: 312/2017

Милан Д. Симоновић

**Анализа понашања мобилне платформе при
опаљењу**

Мастер рад

Комисија за преглед и одбрану:

1. пк доцент др Александар Кари, дипл. инж. – ментор

Датум одбране: _____

2. _____

Оцена: _____

3. _____

У оквиру овог мастер рада кандидат треба да:

1. Опише предмет и циљ рада и проблем интеграције наоружања на мобилну точкашку платформу и наведе постојеће начине интеграције различитих система наоружања на мобилне платформе и предности интеграције;
2. Дефинише све силе које оптерећују модел изабраног неоклопљеног возила, изврши УБ прорачун и израчуна максималне вредности оптерећења платформе;
3. Постави математичко – механички модел осциловања мобилне платформе под дејством силе опаљења;
4. Изради симулациони модел осциловања мобилне платформе и
5. Анализира добијене резултате и предложи даљи рад на овој теми.

Препоручена литература:

[1] Бродски противавионски топ 40 mm D.70 M.55 m и M.70 „Bofors“, Књига 1, Техничко упутство, 1975.

[2] др Александар Кари, дипл. инж. предавања из предмета „Интеграција наоружања на мобилне платформе“, Факултет инжењерских наука, Крагујевац, 2017.

[3] Љ. Танчић, Збирка задатака из унутрашње балистике, Сектор за школство, обуку, научну и издавачку делатност, Београд, 1999.

[4] Љ. Танчић, Унутрашње балистичко пројектовање, Уџбеник, Медија центар „Одбрана“ Београд, 2014.

[5] Ристић З. Јаковљевић М. „Основи наоружања – конструкција артиљеријског оруђа“, Књига, Војна академија, Београд, 2001.

Крагујевац, 2018.

Ментор:

пк доцент др Александар Кари, дипл. инж.

Садржај

1. Увод	1
1.1. Предмет и циљ рада	1
1.2. Постојећи начини интеграције различитих система наоружања на мобилне платформе	2
2. Оптерећење мобилне платформе под дејством силе опаљења интегрисаног наоружања	6
2.1. Војни теренски камион ФАП 2026 БС/АВ 6×6	6
2.2. Противавионски топ 40 mm Bofors L/70	8
2.1.1. Принцип рада ПА топа 40 mm Bofors L/70	10
2.3. Одређивање тежишта камиона ФАП 2026 са интегрисаним наоружањем 40 mm Bofors L/70	13
2.3.1. Статичка расподела тежине на осовине моторног возила	14
2.3.2. Координате тежишта моторног возила	15
2.3.3. Аналитички поступак одређивања тежишта моторног возила	15
2.4. Прорачун сила које делују на камион ФАП 2026 приликом дејства из аутоматског топа 40 mm Bofors L/70	17
2.4.1. Унутрашње балистички прорачун	17
2.4.2. Прорачун максималне силе трзања	28
2.4.3. Модел прорачуна силе отпора трзању	29
2.4.4. Сила хидрауличне кочнице	31
3. Математичко – механички модел осциловања мобилне платформе под дејством силе опаљења	34
4. Симулациони модел осциловања мобилне платформе	41
5. Закључак	47
6. Литература	49
Списак слика	50
Списак табела	51
ПРИЛОГ 1	52
ПРИЛОГ 2	57
ПРИЛОГ 3	59

Резиме

У овом раду описан је проблем интеграције наоружања на мобилну платформу, конкретно интеграција противавионског топа 40 mm Bofors L/70 на теренски камион ФАП 2026 БС/АВ. На почетку је приказано шта све садржи овај проблем, од чега треба поћи, шта све од података треба прикупити везаних и за возило и за наоружање и шта на крају треба очекивати пре него се изврши експеримент интеграције. Након тога представљени су начини интеграције различитих врста наоружања на платформе, где се може видети како се све може интегрисати неко ватрено средство било да је пешадијско или артиљеријско на возило. У наредном поглављу описан је камион ФАП и приказани неки основни подаци о њему, који ће касније послужити за симулацију понашања платформе приликом опаљења. Након тога описан је противавионски топ 40 mm Bofors L/70, дате су његове основне карактеристике и приказан је принцип рада.

На почетку прорачуна, постављене су једначине за статичку расподелу тежине на осовине моторног возила и приказан је аналитички поступак за израчунавање тежишта возила. Затим се приступило прорачуну сила које делују на возило приликом опаљења. При томе је извршен унутрашње балистички прорачун, израчуната максимална сила трзања, постављен модел прорачуна силе отпора трзању и приказани су дијаграми трзања и враћања са којих се може одредити вредност силе хидрауличне кочнице и силе отпора трзању.

У наредном поглављу представљен је математичко – механички модел осциловања мобилне платформе под дејством силе опаљења, који служи да математички представи кретање физичког система, обухватајући све утицајне параметре и задржавајући једноставност примене.

Након постављеног математичко – механичког модела представљен је симулациони модел осциловања мобилне платформе, где је прорачун извршен у програмском пакету MATLAB. Излазни подаци приказани су у виду дијаграма. На крају су описани добијени подаци и дат закључак о свему што садрже претходна поглавља.

Кључне речи: теренски камион ФАП 2026 БС/АВ, противавионски топ 40 mm Bofors L/70, интеграција наоружања, самоходна артиљеријска оруђа.

Abstract

This paper describes the problem of integrating armament into the mobile platform, specifically the integration of an anti – aircraft gun 40 mm Bofors L/70 into a field truck FAP 2026 BS/AV. At first it shows what all this problem contains, what should be done, what data should be collected, and in the end, what expected before an integration experiment is carried out. Subsequently, ways of integrating various types of weapons on platforms are presented, where we can see how one firearm, infantry or artillery, can be integrated on the vehicle. Next chapter describes the FAP truck and shows some basic information about it, which later will be serve as a simulation of the platform's behavior during the incursion. After that, an anti – aircraft top 40 mm Bofors L/70 is described, his basic characteristics and the operation principle.

At the beginning of the calculation are shown the equations for the static weight distribution on the axles of the motor vehicle and an analytical method for calculating the vehicle's gravity. Then, the forces acting on the vehicle are calculate. An internal ballistic calculation was performed, the maximum force of the twisting was calculated, the turbidity-force calculation model was set and there are shown diagrams of twitching and returning. From these diagrams, the value of the hydraulic brake force and the drag force can be determined.

Another chapter presents the mathematical – mechanical model of oscillation of the mobile platform under the influence of the force of infiltration, which serves to mathematically represent the movement of the physical system, including all the influential parameters and retaining the ease of application.

When the mathematical – mechanical model was set up, the simulation model of mobile platform oscillation can be presented, where the calculate is executed in MATLAB. Output data is displayed as a diagram. Finally, the obtained data are described, and a conclusion about everything that contains the preceding chapters.

Keywords: FAP 2026 BS/AV field truck, anti – aircraft gun 40 mm Bofors L/70, weapons integration, self – propelled artillery tools.

1. Увод

1.1. Предмет и циљ рада

Мобилне платформе, које се користе у војне сврхе, представљају сваки систем, на коме се може интегрисати наоружање. На пример, борбени авион представља платформу за интеграцију митраљеза, авио – бомби или аутоматских топова, док се на платформама камиона, хамера и разних других комерцијалних возила могу монтирати митраљеи, аутоматски топови, лансери ракета, минобацачи, топови, хаубице итд.

Циљ рада је упознавање са проблемом интеграције аутоматског топа калибра 40 mm на мобилну точкашку платформу. Као интегрисано оружје на мобилне точкашке платформе, које су најчешће мале масе, углавном се користе тешка аутоматска стрељачка оружја и аутоматски топови, па је проблем који се јавља при пројектовању везан за издржљивост конструкције комерцијалног возила, јер оно треба поред сопствених оптерећења да буде што отпорније на дејство сила насталих приликом процеса опаљења.

Да би комерцијално возило могло да се користи за интеграцију наоружања, неопходно је његове карактеристике претходно прилагодити оптерећењима која ће морати да издржи током свог века употребе, као што су: утицај масе оруђа на платформу, силе трзања и враћања, утицај масе борбеног комплета, осцилације оруђа након опаљења, кретање трзајућих маса итд. Један од главних проблема је конструисање система еластичног ослањања, који треба да има одговарајућу крутост, да би апсорбовао све силе које се на њега преносе и сведе осцилације на најмању могућу меру, како би се спречила појава резонанције. Резонанција је физичка појава, која настаје у систему који јако осцилује, када се на одређеној фреквенцији побуде постиже максимална амплитуда осциловања. Појава резонанције зависи од пригушења, тј. енергије губитака и укупне енергије система.

На почетку решавања проблема интеграције потребно је поставити и анализирати теоријски модел у коме се налазе улазни параметри за различите врсте експеримената, на основу којих ће се ти параметри проверити и доказати. За изабрано возило и наоружање неопходно је прикупити податке о њиховим перформансама. Један од битнијих корака при пројектовању је унутрашње балистички прорачун, којим се одређује расподела притиска у цеви у функцији времена и његова максимална вредност. Овим прорачуном се одређује и почетна брзина пројектила остварена на устима цеви. Веома је важно прорачунати силу трзања и силу отпора трзању оружја/оружја у току процеса опаљења, јер се она у великој мери преноси на мобилну платформу. На основу прорачуна претходно наведених сила и конструктивних карактеристика возила, које укључују и систем еластичног ослањања и изабрано место за интеграцију наоружања, поставља се динамички модел са одређеним упрошћењима.

Након овога поставља се математичко – механички модел осциловања платформе током процеса опаљења, који садржи диференцијалне једначине кретања. На основу добијених података и решавањем диференцијалних једначина могу се добити конкретне једначине осциловања платформе, односно промена генералисаних координата у току времена. Овакав систем се углавном не може решити аналитичким путем, те је због тога потребно његово нумеричко решавање коришћењем савремених рачунарских софтвера.

Решавање постављеног система једначина или једном речју симулација се може извршити у програмском пакету MATLAB, који даје и графички приказ добијених резултата.

На основу добијених резултата може се кориговати постављени математичко – механички модел, место интеграције, начин везе, карактеристике система еластичног осциловања, одговарајућа брзина паљбе, са циљем да се одреди конфигурација система возило – наоружање, који је у стању да издржи настала оптерећења.

Самоходна артиљеријска оруђа могу бити са предњим, средњим и задњим положајем борбеног одељења. Када је борбено одељење напред, наоружање и муниција су смештени у предњем делу возила, а погонска група и трансмисија у задњем. Средњи положај борбеног одељења се примењује код оруђа са кружном или секторски обртном куполом. Смештање борбеног одељења у задњи део возила условљава да погонска група и трансмисија буду смештени у предњи део возила, а основно наоружање у задњи. [1]

1.2. Постојећи начини интеграције различитих система наоружања на мобилне платформе

Интеграција наоружања на мобилну платформу је све чешћа, из разлога што се стално тежи повећању тактичке покретљивости, готовости за промену ватреног положаја и могућности заузимања што бољег положаја у односу на циљ, а то вучне варијанте оруђа не пружају. Самоходна артиљеријска оруђа могу бити потпуно или делимично оклопљена, са покретном или непокретном куполом, или могу бити откривена. Овакви системи могу имати гусеничну или точкашку конструкцију ходног дела, а некада и њихову комбинацију. Тешко стрелачко наоружање се интегрише као основно или допунско наоружање. [1]

На слици 1 се може видети самоходна топ – хаубица 155 mm Нора Б52 интегрисана на точкашку платформу камиона Камаз 8×8.



Слика 1 – Самоходна топ – хаубица 155 mm Нора Б52 [2]

Самоходна топ – хаубица 155 mm Нора Б52 има као основно наоружање топ калибра 155 mm смештен у делимично оклопљену и затворену куполу, на задњем делу возила, а као допунско наоружање користи аутоматски топ 20 mm М55, који је спрегнут са основним наоружањем и митраљез 12.7 mm са турелом. Погонски део се налази на предњем делу возила, а између кабине и куполе налази се контејнер за смештање борбеног комплета.

На слици 2 приказан је самоходни минобацач 240 mm Туулпан 2S4, интегрисан по принципу отворене уградње. Конструкциона решења минобацача отворене уградње обезбеђују већу покретљивост, могућност брзе промене ватреног положаја и погодан смештај борбеног комплета, као и бољу заштиту послуге у односу на вучне варијанте минобацача. За постављање у борбени положај вучених или преносивих минобацача је потребно доста времена, тако да су они доста рањиви.

Недостаци решења отворене уградње су свакако потпуно одсуство НХБ заштите, недовољна балистичка заштита послуге од дејства из ваздуха и најчешће пуњење преко уста цеви.



Слика 2 – Самоходни минобацач 240 mm Туулпан 2S4 [3]

На слици 3 приказан је тип интеграције митраљеза на оклопно точкашко возило Лазар 3, коришћењем даљински управљиве борбене станице (ДУБС). Погонска група је смештена у предњем десном делу возила у простору који је потпуно одвојен од простора посаде. Свих осам точкова су монтирани на независном вешању и обезбеђују висок степен мобилности возила. Када возило има ДУБС, број чланова посаде је 12, а у случају уградње куполе, број чланова се смањује на 11. Даљински управљива борбена станица са митраљезом 12.7 mm М15 је намењена првенствено за гађање циљева на земљи (лако оклопљена возила, логистичка возила, командна места и непријатељска жива сила), као и циљева у ваздуху (лаки нисколетећи авиони, хеликоптери и беспилотне летелице) и то на ефикасним дometима до 2000 m.



Слика 3 – *Оклопно возило Лазар 3* [4]

Још један од начина интеграције наоружања, конкретно митраљеза је тзв. „ swing mount “, приказан на слици 4, који омогућава лако покривање лука од 180°. Овај систем представља неколико повезаних осовина „ рука “ и може се монтирати на разним местима, као што су: изнад моторског простора, испред сувозачевог места, на разним ојачањима возила или на било ком другом месту, одакле чланови посаде могу да дејствују митраљезом. Најчешће се користи на хамерима и разним точкашким оклопним и неоклопљеним возилима. Како би се обезбедила ротација наоружања од 360°, примењује се турела, која се монтира на кров возила (слика 5).



Слика 4 – *Swing mount са интегрисаним митраљезом* [5]



Слика 5 – Митраљез интегрисан на возило помоћу туреле [6]

Који ће се од наведених начина интеграције наоружања применити, зависи од мобилне платформе која ће се користити и врсте самог наоружања. На пример, ДУБС се користи код извиђачких и командних возила за интеграцију митраљеза калибра 5.56 mm, 7.62 mm и 12.7 mm, затим аутоматских бацача граната (АБГ) калибра 30 mm и 40 mm и за интеграцију аутоматских топова калибра 20 mm, 25 mm и 30 mm. Мана овакве уградње је слаба заштита од непријатељске ватре. Одличну заштиту од непријатељске ватре пружа куполна уградња наоружања. Купола штити посаду, борбени комплет и оруђе од пешадијског наоружања и шрапнела. Ова два претходно наведена начина интеграције омогућавају ротацију наоружања за 360°. Интеграција наоружања помоћу туреле такође омогућава ротацију за 360°, али се углавном користи за митраљезе и артиљеријска средства малог калибра, као што су аутоматски топови калибра 20 mm и 30 mm. Отворени тип уградње омогућава да се гађање врши на два начина: са шасије возила и ослањањем преко подлоге на тло.

Интеграција артиљеријског оруђа на мобилну платформу омогућава следеће:

- могућност широког маневра (тактичка покретљивост),
- брза припрема или стална готовост за отварање ватре и промену ватреног положаја,
- способност да се заузме најповољнији положај у односу на циљ и
- мања осетљивост оруђа и посаде на парчадно дејство граната и дејство стрелачког оружја. [1]

2. Оптерећење мобилне платформе под дејством силе опаљења интегрисаног наоружања

2.1. Војни теренски камион ФАП 2026 БС/АВ 6×6

Војни теренски камион ФАП 2026 БС/АВ (слика 6) је домаћи војни теренски камион заснован на моделима „Mercedes – Benz“ серије NG, који је произвела фабрика аутомобила у Прибоју, током осамдесетих година двадесетог века. Првобитно је почетком седамдесетих година развијен модел 6х6 ФАП 2220 БДС/А за потребе понтонског моста ПМ М – 71 и прототипа Огња. Модел ФАП 2026 БС/АВ настао је даљим развојем претходно наведеног модела и коришћењем неколико решења узетих од Mercedes – Benz – а, пошто је ФАП у то време проширио лиценцу са Мерцедесом ради производње камиона „Нове генерације“ (серија NG). Тако је на камиону примењен Мерцедесов модел кабине за разлику од претходног војног модела, који је имао ФАП – ов модел кабине, као и мотор ОМ 402.

Уведен је у употребу 1978. године. Производња је трајала интензивно током осамдесетих година, све до распада СФРЈ и током деведесетих у мањим серијама, за потребе Војске Југославије. Као напреднији модел, развијен је камион ФАП 2228 БС/АВ 6х6.

ФАП 2026 БС/АВ 6 х 6 поседује осмоцилиндрични, четворотактни, водом хлађени дизел мотор ОМ 402, са директним убризгавањем, уграђен уздужно испод кабине. Трансмисију овог возила чине: фрикциона спојница, шестостепени синхронизовани механички мењач, двостепени диференцијални разводник погона, који обезбеђује стални погон на све точкове, крути погонски мостови са гибњевима, допунским гуменим опругама и хидрауличким телескопским амортизерима.

Кочиони систем је пнеуматски са добош кочицама на свим точковима. Управљачки механизам је хидраулички са серво дејством. Рам је са два подужна и више попречних носача, а кабина трамбус. Возило има могућност механичке блокаде оба међуосна и сва три осна диференцијала. Опремљено је системом за централну регулацију ваздуха у пнеуматичима. [7]



Слика 6 – ФАП 2026 БС/АВ 6х6 [7]

Ово возило је намењено за превоз људства са комплетном опремом, транспорт материјалних средстава масе до 10 тона, вучу оруђа и превоз посаде са одговарајућим борбеним комплетом за оруђе масе до 6.7 тона. Назив возила има следеће значење:

- ФАП – назив произвођача,
- 20 – укупна маса основног аутомобила у тонама,
- 26 – снага мотора у коњским снагама ($26 \times 10 = 260$ КС),
- Б – ознака по стандарду ФАП – а за трембус кабину (кабина изнад мотора),
- С – погон на све точкове (6x6) и
- АВ – армијски тип са витлом.

Основна верзија је употребљена и за конструкцију бушача минских бунара (БМБ), цистерну за гориво капацитета 8000 литара и прототип самоходне хаубице 122 mm SORA. Табела 1 приказује техничке податке овог возила.

Табела 1 – Технички подаци камиона ФАП 2026 БС/АВ 6x6 [7]

Сопствена маса	11000 kg
Носивост, теренска/путна	6000 kg / 10000 kg
Максимална тежина приколице	7200 kg
Запремина мотора	12.76 l
Максимална снага мотора	188 kW при 2500 min ⁻¹
Дозвољено оптерећење мостова	6200 kg – предњи, 15370 kg средњи и задњи
Најмањи радијус окретања	22 m
Максимални момент мотора	834 Nm при 1600 min ⁻¹
Дужина	7720 mm
Ширина	2490 mm
Висина	3100 mm
Клиренс	375 mm
Међуосовинско растојање	4780 mm
Предњи прилазни угао	40°
Задњи прилазни угао	43°
Угао рампе	21°
Дубина воденог газа	1200 mm
Уздужни нагиб	60 %
Попречни нагиб	30 %
Максимална брзина	80 km/h
Аутономија кретања	600 km
Пнеуматици	15.0 – 21

2.2. Противавионски топ 40 mm Bofors L/70

Противавионски топ 40 mm Bofors L/70 (слика 7) је дизајниран и произведен од стране шведске компаније Bofors 1947. године. Прва верзија је прихваћена 1948. године под називом " 40 mm Ivakan M/48 ", а у војну употребу ушао је 1951. године. Модификација је претходне верзије топа L/60 калибра такође 40 mm. Користио је веће гранате 40×360R , које су носиле нешто лакше зрно, тешко 870 g, са почетном брзином 1030 m/s. Јавио се као потреба за већом брзином ватре и већим дометом. Брзина ватре је 240 метака у минути односно 4 метка у секунди, што је приближно немачком ПАТ Flak 43.

Додатне измене током година побољшале су брзину паљбе прво на 300 граната у минути (5 граната у секунди), а касније до 330 граната у минути (5.5 граната у секунди). Што се тиче покретљивости, задржана је вучна варијанта, исто као код L/60.

Назив L/70 се односи на дужину цеви, која износи 70 калибара односно 2800 mm. Максимални ефективни домет износи 12.5 km. Маса оружја је релативно велика и износи 5150 kg. Интервал углова по елевацији је од - 20° до + 80°, а брзина промене угла је 45° у секунди. Што се тиче покретања по правцу, има могућност обртања за пун круг, односно за 360°, брзином од 85° у секунди. [8]

Принцип рада се заснива на дугом трзању цеви, што омогућава сигурност дејства, малу могућност застоја, отварање затварача готово при атмосферском притиску и неосетљивост на нечистоћу. Један од недостатака оваквог принципа рада је велика инертност система због кретања великих маса.

Ово средство је постављено на шасију са четири точка, а може бити вучено од стране камиона са 4×4 или 6×6 точкова, који могу да носе додатну муницију и комплетну посаду. Коришћено је од стране многих западних земаља, затим у Азији, Африци, Јужној Америци и на блиском истоку.

Велика брзина гађања, велика брзина покретања по правцу и елевацији, беспрекорна опрема за даљинско управљање, заједно са лаким за руковање уређајем жиростабилизованог локалног управљања, сачињавају изванредне особине овог противавионског топа. Цев је типа моноблок, тј. израђена од једног комада. Повратна опруга је навучена на задњи део цеви. Цев, заједно са повратном опругом сачињава лако заменљиви склоп. Затварач је вертикално – клинасти, а отварање и затварање се врши потпуно аутоматски.

Велика брзина гађања је постигнута аутоматским убацивањем метка за време враћања, док се избацивање празних чаура врши при крају трзања. Празне чауре се проводе кроз жлебасти одводник чаура и избацују кроз отвор на чеоном делу лафета. Што се тиче пуњења, два пуниоца стоје сваки са једне стране аутомата и пуне топ тако да оквири од којих сваки садржи четири метка стављају у уводник. Два бунара, у којима стоје пуниоци, предвиђена су да заштите исте од пада или других сметњи узрокованих великим убрзањем при покретању топа по правцу. Да би се повећао степен приправности против изненадних напада, уводник може бити пуњен тако да служи као магацин. То омогућава да се са топа може испалити рафал од 16 метака без интервенције послужиоца.

На задњем делу топовске платформе постављене су две муницијске полице, од којих свака може да садржи шест оквира са муницијом. Ове полице са спољне стране топа пуне додавачи муниције, а са унутрашње стране их празне пуниоци. Оваква организација омогућава пуно коришћење велике брзине гађања топа.

Изравњачи се супротстављају моменту који изазива тежина предњег дела цеви зато што су рамена колевке повучена уназад у односу на центар тежишта, као и промене положаја центра тежишта при трзању и тако врше изравнање топа код свих углова елевације за време циклуса трзања. [8]

Управљање може бити:

- даљинско,
- локално и
- ручно.

Код даљинског управљања, механизми за машинско покретање по елевацији и правцу који садрже електромоторе и хидрауличне варијаторе, управља се са артиљеријског командно – рачунарског уређаја (АКРУ). У Бофорсовом систему даљинског управљања користи се цевно (М.55 m) или транзисторско (М.70) појачало. Овај систем има велику тачност и због врло великих убрзања и брзина покретања топа, истовремено скраћује време потребно за пребацивање ватре са циља на циљ.

Код локалног управљања, Бофорсов жиростабилизирани систем локалног управљања, који садржи на лафет уграђени склоп управљача са сферно изведеним управљачким елементом, употребљава се у случају кvara на опреми за даљинско управљање или, ако она није уопште уграђена, као што је то случај на бродовима, уз примену рефлексне нишанске справе, која се поставља на носач учвршћен на колевку.

У случају прекида у напајању електричном енергијом, топ се може покретати по елевацији и правцу потпуно механички, помоћу две двоструке лактасте ручице, по једна на свакој страни лафета. При том први и други нишанција нишане сваки преко своје рефлексне нишанске справе. [9]



Слика 7 – Противавионски топ 40 mm Bofors L/70 [9]

У табели 2 приказане су карактеристике овог оруђа.

Табела 2 – Карактеристике противавионског топа 40 mm Bofors L/70 [9]

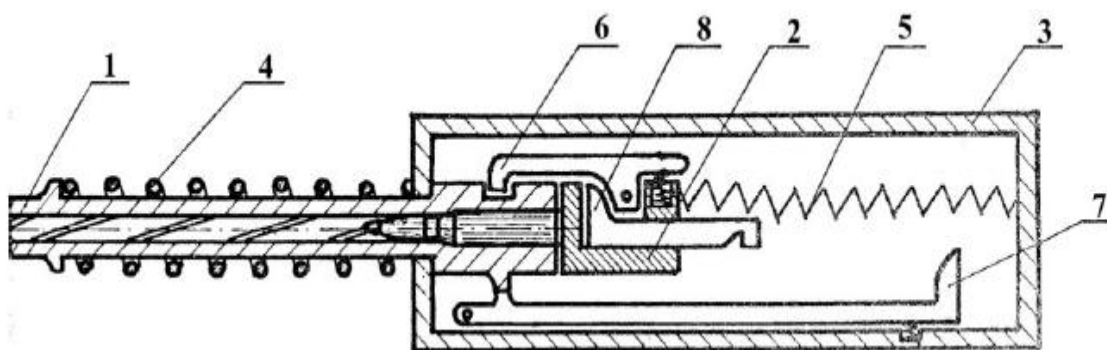
Назив	Bofors L/70
Калибар [mm]	40
Земља порекла	Шведска
Година производње	1947.
Маса [kg]	5150
Дужина у маршевском положају [m]	7.3
Ширина у маршевском положају [m]	2.23
Висина у маршевском положају [m]	2.35
Дужина цеви [mm]	2800
Домет [m]	12500
Брзина гађања [met/min]	240 – 330
Почетна брзина зрна [m/s]	1030
Капацитет добоша [број метака]	30
Поље дејства по елевацији [°]	- 20 + 80
Поље дејства по правцу [°]	360

2.1.1. Принцип рада ПА топа 40 mm Bofors L/70

Противавионски топ 40 mm Bofors L/70 ради по принципу дугог трзања цеви (слика 8). Функционисање система је једноставно. Од тренутка опаљења сви трзајући делови се крећу уназад сабијајући повратну опругу затварача и повратну опругу цеви све док полуга за одбрављивање не пређе крак задржача. При враћању трзајућих делова у предњи положај под дејством повратних опруга затварач се задржава посредством полуга, а цев самостално наставља кретање. Кад испуст на цеви наиђе на испуст задржача ослобађа се затварач који се под дејством повратне опруге враћа у првобитни положај.

При том кретању затварач захвата нови метак и уноси га у цев. Празна чаура се избацује приликом одвајања цеви и затварача. Приликом трзања затварач и цев су чврсто спојени и самим тим се крећу истим брзинама, а при враћању крећу се различитим брзинама.

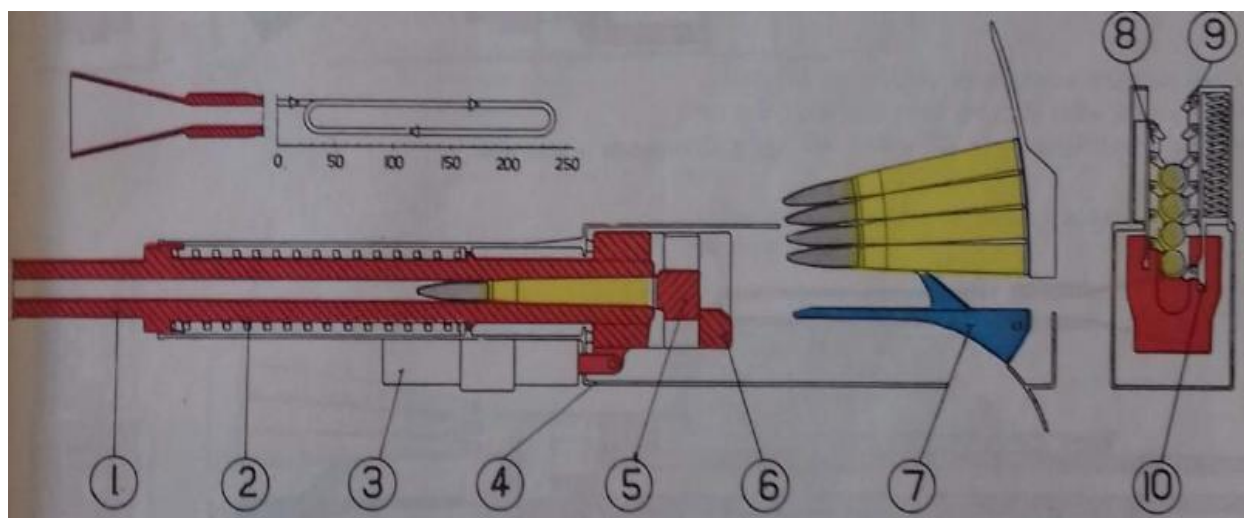
Предности овог принципа рада су: сигурност дејства, мала могућност застоја, отварање затварача готово при атмосферском притиску, неосетљивост на нечистоћу. Недостаци су: велика инертност система због кретања великих маса, мала брзина гађања, мртво време мировања затварача. Овај систем, управо због малих брзина гађања, нашао је примену код оруђа већег калибра, где су веће масе и погодније је зауставити их на дужем путу. [10]



Слика 8 – Дуго трзање цеви [10]

- 1) цев,
- 2) затварач,
- 3) сандук,
- 4) повратна опруга цеви,
- 5) повратна опруга затварача,
- 6) полуга,
- 7) крак задржача затварача и
- 8) полуга.

На слици 9 се могу видети делови топа у тренутку опаљења.

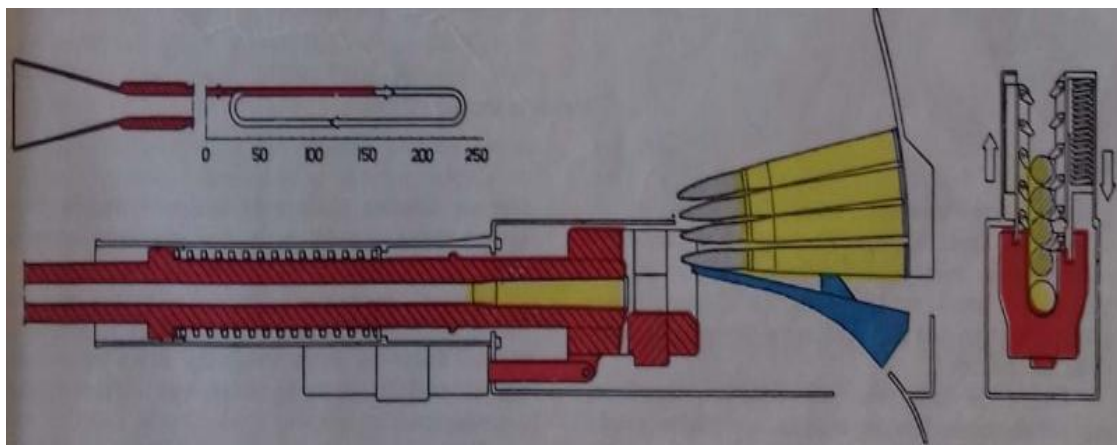


Слика 9 – Топ у тренутку опаљења [8]

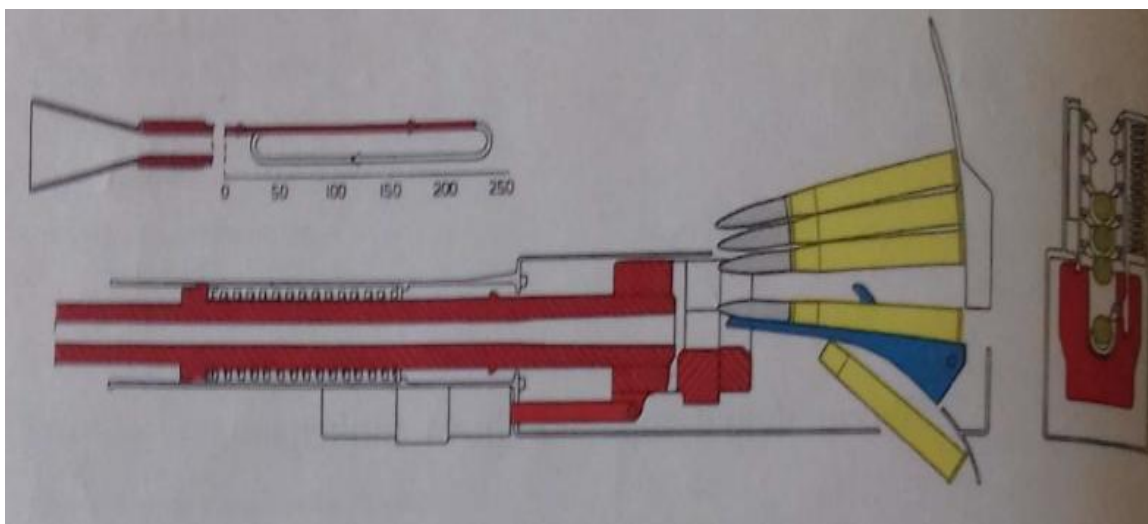
Бројеви на слици означавају следеће делове:

- | | |
|---------------------|--|
| 1) цев, | 6) задњак, |
| 2) повратна опруга, | 7) саоница, |
| 3) кочница, | 8) покретна летва уводника, |
| 4) колевка, | 9) зуби задржачи непокретне летве уводника и |
| 5) затварач, | 10) доносач. |

У овом тренутку је извршено опаљење и затварач је отпочео своје кретање уназад. Саоница се подигла и налази се у свом горњем положају. Покретна летва уводника се креће нагоре. Зуби задржачи непокретне летве уводника задржавају метке да се такође не крећу нагоре. Доносач је у међувремену извршио свој покрет нагоре и сад се његов зуб налази изнад најдоњег метка. Опруга доносача потискује доносач надоле, а последњи метак следи тај покрет. На слици 10 приказан је ток трзања, а на слици 11 његов завршетак.



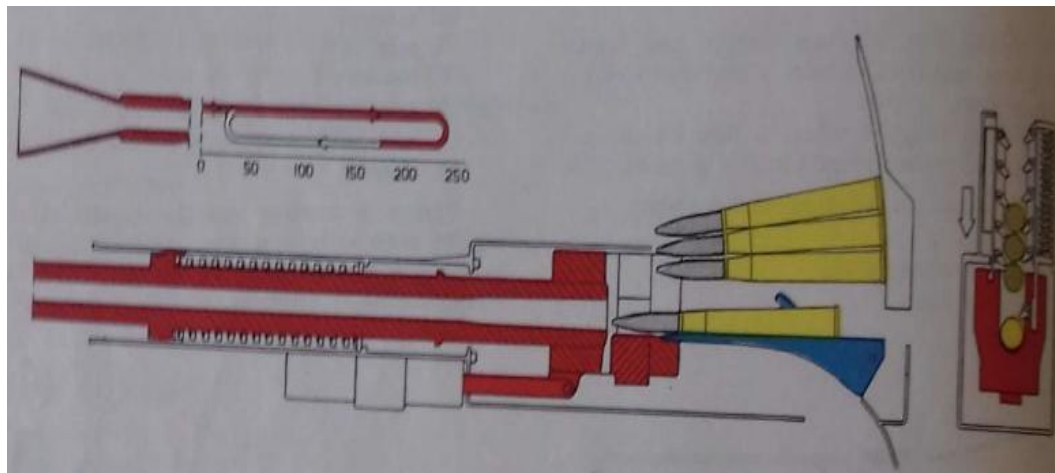
Слика 10 – Ток трзања [8]



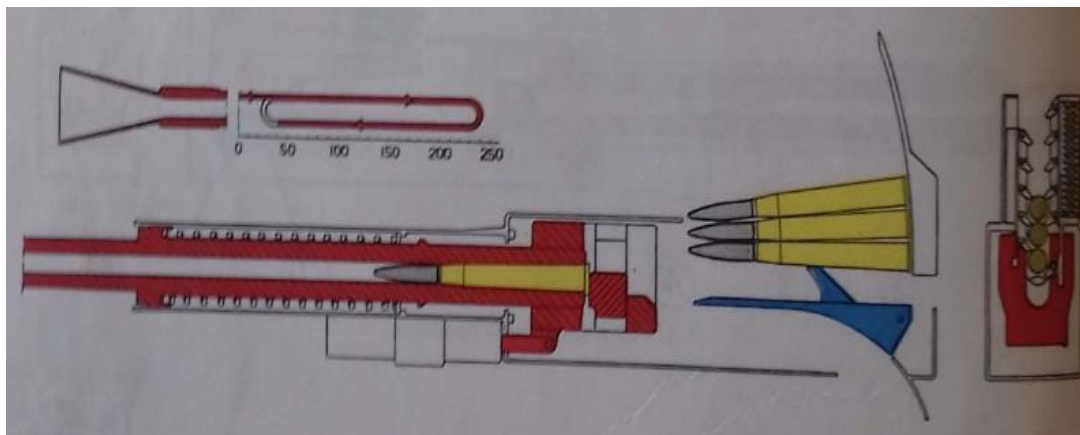
Слика 11 – Крај трзања [8]

Чаура се избацује ударцем о виљушкасти ослобађач, ослобађа саоницу и напушта оруђе, вођена доњим делом саонице. Доносач је наставио своје кретање надоле и гурнуо метак на саоницу. Саоница почиње да се креће надоле. Покретна летва уводника је достигла свој највиши положај. Саоница је извршила своје кретање и сад се налази у доњем положају. Сада почиње убацивање новог метка. Покретна летва уводника креће се према доле и повлачи при томе са собом остале метке у уводнику. Враћање је скоро завршено. Убачени метак ослобађа затварач, који се након тога покреће нагоре. [8]

Покретна летва уводника достигла је свој највиши положај, тј. завршено је увођење метка. Кад се затварач забрави, врши се аутоматско опаљивање, након чега се процес понавља. На слици 12 приказан је почетак враћања, а на слици 13 види се убачен метак у цев, односно крај циклуса.



Слика 12 – Почетак враћања [8]



Слика 13 – Крај циклуса [8]

2.3. Одређивање тежишта камиона ФАП 2026 са интегрисаним наоружањем 40 mm Bofors L/70

Под тежином моторног возила (G) подразумева се сила Земљине теже која делује у тежишту возила (T). Она се састоји од сопствене тежине возила (G_0) и тежине корисне носивости (G_{kn}), тј.

$$G = G_0 + G_{kn} \quad (2.1)$$

Овим тежинама одговарају припадајуће масе: укупна маса возила ($m = G_{kn}/g$), сопствена маса ($m_0 = G_0/g$) и маса корисне носивости ($m_{kn} = G_{kn}/g$), где је g убрзање Земљине теже. Укупна тежина G се користи као полазни податак за сва израчунавања везана за динамику кретања моторног возила. [11]

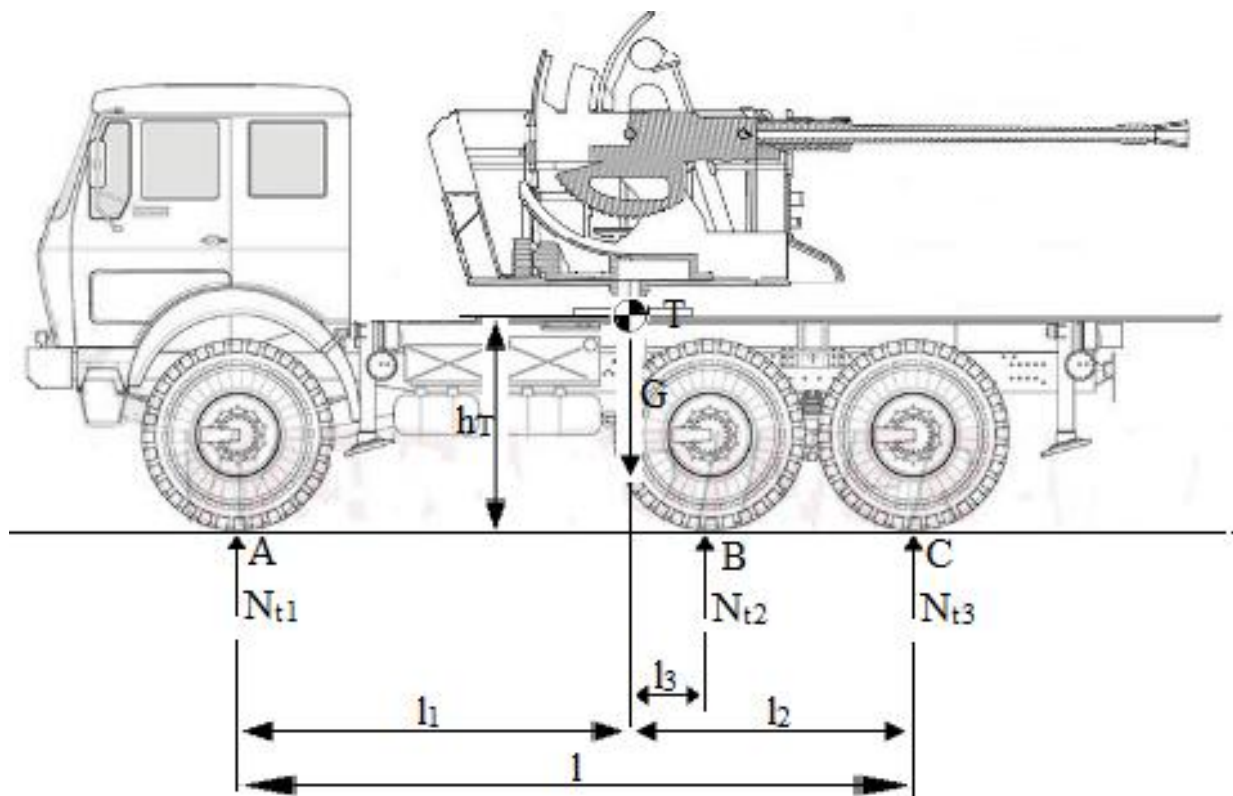
Однос корисне масе и сопствене тежине назива се коефицијент искоришћења масе:

$$e_g = \frac{G_{kn}}{G_0} = (0.5 - 2) \quad (2.2)$$

Мање вредности се односе на лакша, а веће на тежа возила. За камионе средње носивости овај коефицијент износи (1 – 1.1). [11]

2.3.1. Статичка расподела тежине на осовине моторног возила

Тежина возила се преноси на подлогу преко точкова предње и задње осовине. Подлога на њих делује нормалним реакцијама. Од величине ових сила умногоме зависе динамичке карактеристике возила (вучне силе, стабилност, управљивост, отпори котрљања, кочне силе...), па се њиховом одређивању поклања посебна пажња. При мировању возила на хоризонталној подлози нормалне реакције подлоге се одређују према слици 14. [11]



Слика 14 – Статичка расподела тежине

$$\sum M_A = 0 \quad N_{t2} * (l_1 + l_2) + N_{t3} * l - G * l_1 = 0 \quad (2.3)$$

$$\sum M_B = 0 \quad -N_{t1} * (l_1 + l_2) + N_{t3} * (l_3 - l_2) - G * l_2 = 0 \quad (2.4)$$

$$\sum Z = 0 \quad N_{t1} + N_{t2} + N_{t3} - G = 0 \quad (2.5)$$

Сређивањем ових једначина добијају се формуле за израчунавање реакција ослонаца:

$$N_{t1} = G * l_2 + N_{t3} * (l - l_1 - l_2) \quad (2.6)$$

$$N_{t2} = \frac{G * l_1 - N_{t3} * l}{l_1 + l_2} \quad (2.7)$$

$$N_{t3} = \frac{G * l_2 + N_{t1} * (l_1 + l_2)}{l_3 - l_2} \quad (2.8)$$

2.3.2. Координате тежишта моторног возила

Анализом претходних једначина уочава се да расподела оптерећења на осовине умногоме зависи од положаја тежишта Т у односу на осовине возила и подлогу (l_1 , l_2 , l_3 , h_t). Самим тим ове величине утичу како на активности током конструисања возила (избор потребне снаге мотора, избор димензије пнеуматика и притиска ваздуха у њима и сл.), тако и на проверу динамичких параметара при употреби возила (силе приањања при вучи и кочењу, стабилност возила при кретању у кривини и на бочном нагибу, управљивост, дозвољено оптерећење по осовинама итд.). Стога се израчунавају координате тежишта приступа у свим фазама његовог века употребе.

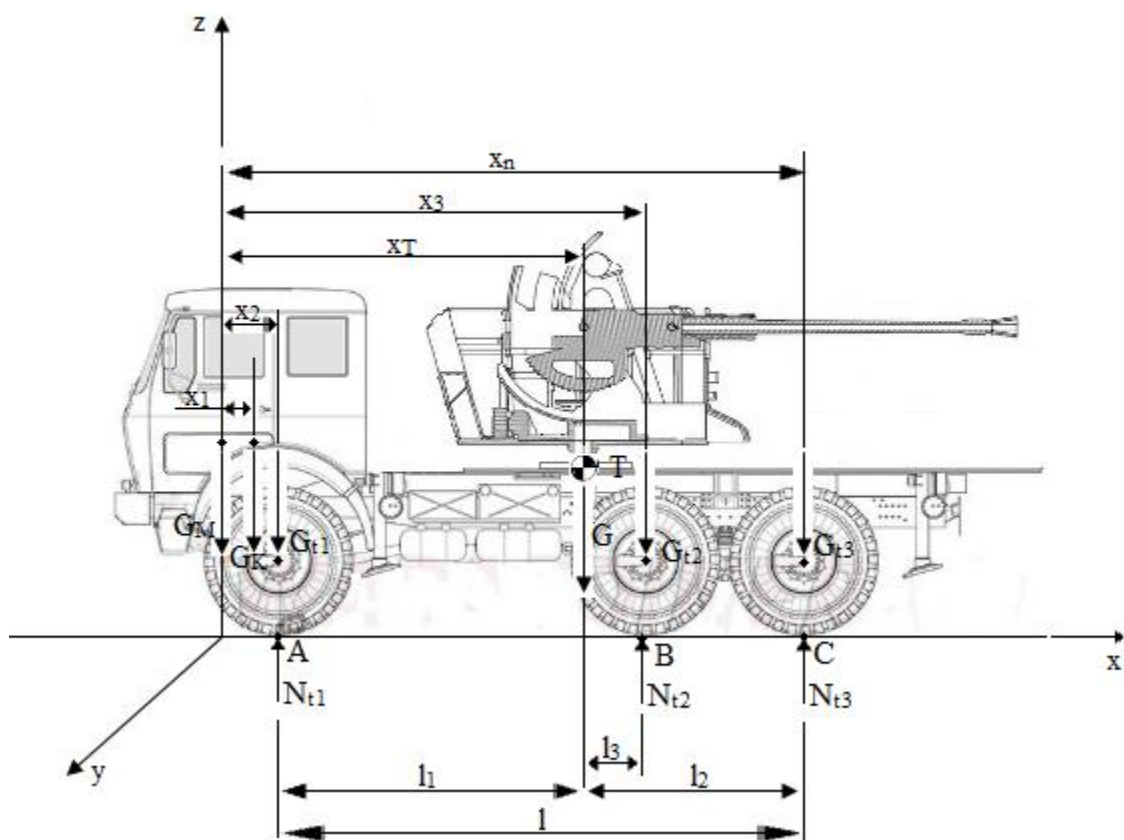
У фази пројектовања полази се од врсте, намене и категорије моторног возила и дефинише полазно системско решење конструкције. Том приликом бирају се врста и величина појединих склопова и агрегата (габарити и масе). Уколико се ради о примени унифицираних агрегата (мотор, мењач, осовине,...) овај део задатка се може решити доста прецизно. Уколико се, међутим, ради о конструкцији која захтева новоконструисане агрегате, онда се користе искуствени подаци о димензијама и маси појединих склопова. Користећи ове податке формира се прелиминарно диспозиционо решење које дефинише међусобни распоред агрегата. Уколико се ради о контролном или модификационом прорачуну већ пројектованог возила, овај део задатка је решен сам по себи. На бази диспозиционог решења одређује се положај тежишта возила. [11]

2.3.3. Аналитички поступак одређивања тежишта моторног возила

Познајући тежинске и диспозиционе параметре појединих склопова, применом аналитичких поставки теоријске механике, може се одредити положај тежишта у простору и нормалне реакције подлоге на тачкове моторног возила. Аналитички поступак одређивања тежишта моторног возила приказан је на слици 15.

Ознаке на слици су:

- G – укупна тежина система возило – наоружање,
- G_M – тежина мотора,
- G_K – тежина кабине,
- T – тежиште и
- N_{t1} , N_{t2} , N_{t3} – реакције ослонаца.



Слика 15 – Аналитички поступак одређивања тежишта камиона ФАП 2026

$$G * x_T = G_K * x_1 + G_{t1} * x_2 + G_{t2} * x_3 + G_n * x_n = \sum_{i=1}^n G_i * x_i \quad (2.9)$$

$$l_1 = x_T = \frac{\sum_{i=1}^n G_i * x_i}{G} = \frac{\sum_{i=1}^n G_i * x_i}{\sum_{i=1}^n G_i} \quad (2.10)$$

Уколико се посматрају исте силе G_i усмерене паралелно X – оси и примени аналогни поступак, добијају се координате тежишта по Z – оси:

$$h_T = z_T = \frac{\sum_{i=1}^n G_i * z_i}{G} = \frac{\sum_{i=1}^n G_i * z_i}{\sum_{i=1}^n G_i} \quad (2.11)$$

где је: h_T – висина тежишта.

Одступање тежишта од уздужне осе возила добија се на исти начин:

$$e_y = y_T = \frac{\sum_{i=1}^n G_i * y_i}{G} = \frac{\sum_{i=1}^n G_i * y_i}{\sum_{i=1}^n G_i} \quad (2.12)$$

Правилним распоредом агрегата тежи се смањењу одступања тежишта од уздужне осе возила. [11]

2.4. Прорачун сила које делују на камион ФАП 2026 приликом дејства из аутоматског топа 40 mm Bofors L/70

2.4.1. Унутрашње балистички прорачун

Процес опаљења започиње ударом ударне игле механизма за опаљење у иницијалну капислу. Тиме се пали иницијална смеша у каписли. Створени пламен пали директно барутно пуњење, ако је у питању метак стрељачког оружја, или припалу када се користи артиљеријски метак. Сматра се да припала тренутно сагори стварајући притисак $p_0 = (2 - 5)$ МПа. Сагоревањем припале интензивира се пламен који пали барутно пуњење. Након паљења, барут почиње да сагорева прелазећи у барутне гасове, чиме почиње да расте притисак иза пројектила. Пројектил ће да мирује све док се не оствари такав притисак, који је довољан да почне урезивање водећег прстена (кошуљице зрна код стрељачког оружја) у жлебове цеви.

Сматра се да је урезивање водећег прстена (кошуљице) тренутно и да се остварује при притиску форсирања, који износи: $p_0 = (10 - 50)$ МПа. Део процеса опаљења од момента опаљења метка до стварања притиска форсирања назива се претходни период. У њему се врши сагоревање барута у константној запремини, а сагори 2 – 5% укупне барутне масе. Покретањем пројектила дуж цеви почиње да расте запремина иза пројектила у којој сагорева барут. У почетку, због мале брзине пројектила, прираштај запремине створен кретањем пројектила биће мањи од новостворених барутних гасова, па ће притисак барутних гасова да расте. Повећањем брзине пројектила, мења се интензитет пораста притиска и облик криве.

У моменту када се изједначе прираштај запремине у јединици времена створен кретањем пројектила и запремина потребна за смештај новостворених барутних гасова, долази до максималног притиска барутних гасова, који износи: $p_m = (250 - 350)$ МПа, а код савремених тенковских топова може да буде и већи. Након постизања максималног притиска, он почиње да опада. Тај процес траје до завршетка сагоревања барута.

Део процеса опаљења од завршетка претходног периода до краја сагоревања барута назива се први период. На крају првог периода брзина пројектила је око 80% од максималне, а пројектил је прешао око 2/3 пута у цеви. Екстремни случај у првом периоду је да се максималан притисак постигне на крају првог периода ($p_m = p_k$). То може да се деси код хаубица када се гађа са првим, а ређе са другим пуњењем, тј. када у релативно великој запремини има мало барута, па је пораст притиска барутних гасова спор.

Након завршетка сагоревања барута, пројектил под дејством притиска барутних гасова наставља кретање дуж цеви. Запремина иза пројектила расте, притисак барутних гасова опада, а брзина пројектила расте, али са све мањим прираштајем. Оваква ситуација траје све док пројектил не напусти цев. Брзина пројектила на устима цеви назива се почетна брзина пројектила (v_0). Савремени пројектили за артиљеријска оруђа имају почетне брзине до 1800 m/s (поткалибарни пројектили имају код топа 105 mm брзину од 1470 m/s, код топа 120 mm 1720 m/s, а код топа 125 mm 1800 m/s). Процес опаљења од краја сагоревања барута па до излетања пројектила из цеви назива се други период. Након овога наступа трећи период или период накнадног дејства барутних гасова.

Пројектил почиње кретање кроз ваздух, а барутни гасови почињу да истичу из цеви. Један део барутних гасова пролази поред пројектила, док други део делује и даље на дно пројектила повећавајући му брзину. [12]

Максимална брзина се остварује када се изједначе сила притиска на дно пројектила и сила отпора ваздуха на врх пројектила. Сматра се да у том моменту престаје деловање барутних гасова на дно пројектила и то је крај трећег периода. Разлика између максималне брзине пројектила и почетне брзине пројектила је врло мала (до 2%), па се обично сматра да је почетна брзина пројектила уједно и максимална.

Може се десити да нема другог периода, тј. да пројектил излети из цеви, а да сав барут није сагорео. Тада се каже да се јавља непотпуно сагоревање барута. Овакво решење је лоше, јер је слабо искоришћење расположиве енергије барута.

Унутрашње балистички прорачун је урађен по методи Рунге – Кута. Ова метода спада у тзв. нумеричке методе. Суштина је у томе да се систем диференцијалних једначина трансформише у облик погодан за нумеричку интеграцију. [12]

Постоји више варијаната ове методе:

- за једну диференцијалну једначину са константним кораком,
- за систем диференцијалних једначина са константним кораком,
- за једну диференцијалну једначину са променљивим кораком и
- за систем диференцијалних једначина са променљивим кораком.

У систем једначина које ће се решавати методом Рунге – Кута улазе следеће једначине:

- једначина биланса енергије:

$$pS_c(X_\psi + X) = f_b m_b \psi - \frac{\kappa-1}{2} \varphi m v^2 \quad (2.13)$$

- једначина кретања пројектила:

$$\varphi m \frac{dv}{dt} = pS_c \quad (2.14)$$

- дефиниција брзине пројектила:

$$v = \frac{dX}{dt} \quad (2.15)$$

- брзина сагоревања барута:

$$u_z = u_{z0} p \quad (2.16)$$

- релативна сагорела маса барута:

$$\psi = \kappa y (1 + \lambda y + \mu y^2) \quad (2.17)$$

$$\psi = \kappa_1 (1 + \lambda_1 y) \quad (2.18)$$

- релативна сагоревајућа површина барутног зрна:

$$\sigma = 1 + 2\lambda y + \mu y^2 \quad (2.19)$$

$$\sigma = 1 + 2\lambda_1 y \quad (2.20)$$

- сведена дужина слободне запремине:

$$X_\psi = \frac{W_\psi}{S_c} = \frac{1}{S_c} \left[W_0 - \frac{m_b}{\rho_b} (1 - \psi) - \alpha m_b \psi \right] \quad (2.21)$$

где су:

- p [Pa] – притисак барутних гасова,
- W_0 [m³] – запремина барутне коморе,
- S_c [m²] – површина попречног пресека цеви,
- X [m] – пут пројектила у цеви,
- f_b [J/kg] – специфичан рад, тј. сила барута,
- m_b, m [kg] – маса барутног пуњења, маса пројектила, респективно,
- r_0 [m] – половина дебљине барутног зрна,
- u_z [m/s] – брзина сагоревања барута,
- u_{z0} [m/s·Pa] – јединична брзина сагоревања или константа у закону сагоревања,
- v [m/s] – брзина пројектила,
- y – релативна сагорела дебљина барутног зрна,
- k – однос специфичних топлота,
- φ – коефицијент фиктивности и
- κ, λ, μ – коефицијенти облика барутног зрна.

Код ове методе постоје три периода: претходни, први и други период. У претходном периоду нема кретања пројектила, већ само сагоревање барута у простору сталне запремине. Због тога није у интересу прорачун тока претходног периода, већ само прорачун вредности одговарајућих карактеристика на крају претходног периода, јер су то полазни подаци за први период. Променљиве су: ψ , σ и y . Њихове вредности на крају претходног периода означавају се са индексом нула.

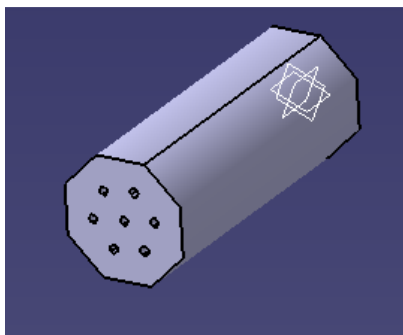
У првом периоду се за независну променљиву узима брзина пројектила v , а у другом периоду, као независна променљива је пут пројектила, јер се зна крај интеграције X_u .

За потребе прорачуна процеса сагоревања цилиндричног седмоканалног барутног зрна коришћено је програмско решење ЖКМКУТ које диференцијалне једначине решава методом Рунге – Кута. Најпре се одређују коефицијенти облика у одређеним фазама сагоревања, након чега се приступа извршењу програма. Овако реализовано програмско решење је универзално и може да се употреби за различита оружја/оруђа. За прорачун одређеног оружја/оруђа треба само датотеку улазних података модификовати или креирати нову која ће садржати конкретне податке везане за дато оружје/оруђе. [12]

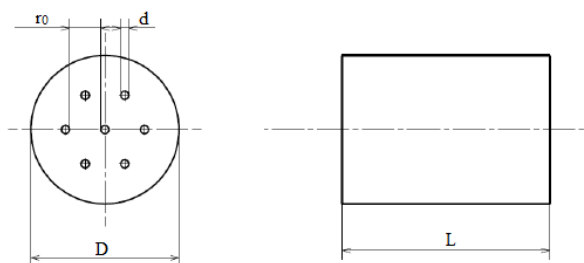
УБ прорачун је урађен за противавионски топ 40 mm Bofors L/70 из методе Серебрјакова. Ово оруђе користи тип барута NCD – 22 код кога је барутно зрно облика седмоканалне цевчице (слике 16 и 17). [13]

Димензије барутног зрна су:

- спољни пречник – $D = 2.8 \text{ mm}$,
- унутрашњи пречник – $d = 0.19 \text{ mm}$,
- дужина зрна – $L = 6.5 \text{ mm}$ и
- половина дебљине барутног зрна – $r_0 = 0.278 \text{ mm}$.



Слика 16 – Изометријски поглед



Слика 17 – Основне димензије барутног зрна

Полазни подаци потребни за креирање улазне датотеке UJK40 узимају се из оптималне варијанте добијене методом Серебрјакова. Полазни подаци су следећи: [13]

- почетна запремина барутне коморе: $W_0 = 0.00057 \text{ m}^3$,
- површина попречног пресека цеви: $S_c = 0.00134 \text{ m}^2$,
- укупни пут пројектила у цеви: $X_u = 2.195 \text{ m}$,
- коефицијент фиктивности: $\phi = 1.192$,
- маса пројектила: $m = 0.88 \text{ kg}$,
- маса барута: $m_b = 0.421 \text{ kg}$,
- запреминска маса: $\rho_b = 1600 \text{ kg/m}^3$,
- однос специфичних топлота умањен за 1: $\Theta = 0.31$ и
- притисак форсирања: $p_0 = 37000000 \text{ Pa}$.

На основу полазних података рачунају се следеће вредности:

- специфичан рад барутних гасова:

$$f_b = \left(6546 + \frac{3.401}{4.187} * Q_w \right) 10^2 \quad (2.22)$$

$$f_b = 915008.4 \frac{J}{kg}$$

- коволумен барутних гасова:

$$\alpha = \left(1456 - \frac{0.524}{4.187} Q_w\right) 10^{-6} \quad (2.23)$$

$$\alpha = 0.0011 \frac{m^3}{kg}$$

- јединична брзина сагоревања барута

$$u_{z0} = \left(-76.6 + \frac{0.179}{4.187} Q_w\right) 10^{-11} \quad (2.24)$$

$$u_{z0} = 6.05 * 10^{-10} \frac{m}{sPa}$$

2.4.1.1. Одређивање коефицијената облика

- Прогресивна фаза:

Релативну сагорелу масу барутног зрна рачуна се по трочланој формули помоћу коефицијената облика κ , λ и μ , у функцији релативне сагореле дебљине барутног зрна u . Пре почетка прорачуна, неопходно је извршити параметаризацију димензија барутног зрна у функцији r_0 , па следи:

- $D = 10.072r_0$,
- $d = 0.683r_0$ и
- $L = 23.381r_0$.

За ове вредности одређује се: почетна површина основе барутног зрна, почетна запремина барутног зрна, површина основе барутног зрна на крају прве фазе, запремина барутног зрна на крају прве фазе и релативна сагорела маса барута. [12]

- почетна површина основе барутног зрна:

$$B_0 = \frac{D^2\pi}{4} - 7 * \frac{d^2\pi}{4} = \frac{(10.072r_0)^2\pi}{4} - 7 * \frac{(0.683r_0)^2\pi}{4} = 77.07r_0^2 \quad (2.25)$$

- почетна запремина барутног зрна:

$$W_{z0} = B_0 * L = 1801.97r_0^3 \quad (2.26)$$

- површина основе барутног зрна на крају прве фазе:

$$B = \frac{(D-2r)^2\pi}{4} - 7 * \frac{(d+2r)^2\pi}{4} = \frac{(10.072r_0-2r)^2\pi}{4} - 7 * \frac{(0.683r_0+2r)^2\pi}{4} \quad (2.27)$$

$$B_0 = 77.07r_0^2 - 46.63r_0r - 18.84r^2$$

- запремина барутног зрна на крају прве фазе:

$$W_z = B * (L - 2r) = (77.07r_0^2 - 46.64r_0r - 18.84r^2) * (23.381r_0 - 2r) \quad (2.28)$$

$$W_z = 1801.97r_0^3 - 1244.4r_0^2r - 347.24r_0r^2 + 37.68r^3$$

- релативна сагорела маса барута:

$$\psi = 1 - \frac{W_z}{W_{z0}} = 1 - \frac{1801.97r_0^3 - 1244.4r_0^2r - 347.24r_0r^2 + 37.68r^3}{1801.97r_0^3} \quad (2.29)$$

$$\psi = 1 - \left(1 - 0.691 \frac{r}{r_0} - 0.193 \frac{r^2}{r_0^2} + 0.021 \frac{r^3}{r_0^3} \right)$$

$$y = \frac{r}{r_0} \Rightarrow \psi = 0.691y + 0.193y^2 - 0.021y^3$$

$$\psi = 0.691y * (1 + 0.279y - 0.03y^2)$$

$$\psi = \kappa * y + (1 + \lambda y + \mu y^2)$$

Из ове једнакости могу се изразити коефицијенти облика:

$$\kappa = 0.691 \quad \lambda = 0.279 \quad \mu = -0.03$$

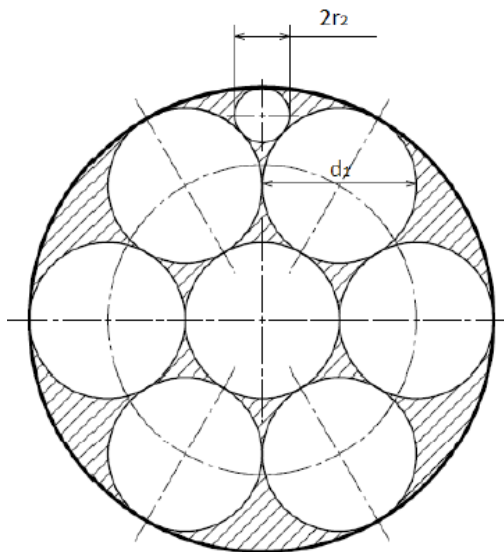
Коефицијенти облика κ_1 и λ_1 рачунају се на следећи начин:

$$\kappa_1 = \kappa * \left(1 - \frac{\mu}{2} \right) = 0.701 \quad (2.30)$$

$$\lambda_1 = \frac{1}{\kappa_1} - 1 = 0.426 \quad (2.31)$$

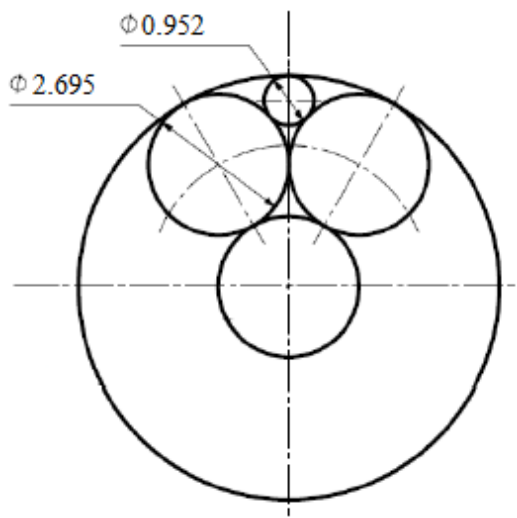
- Дегресивна фаза

После распада остаје 12 штапића који даље сагоревају дегресивно. Због њихове сложене геометрије, ради лакшег рачуна њихове базе (розете) апроксимирају се круговима који су уписани у дате розете (слика 18). Полупречници уписаних кругова су r_2 . Они су потребни за добијање вредности y_k за крај сагоревања. [12]



Слика 18 – Крај прогресивне фазе сагоревања

Коришћењем софтвера CATIA V5R16 добија се пречник круга $2r_2$ и вредност y_k за крај сагоревања, што се може видети на слици 19.



Слика 19 – Прорачун вредности y_k на крају сагоревања

$$2r_2 = 0.952 * r_0 = 0.476r_0 \quad (2.32)$$

$$y_k = \frac{r_0 + r_2}{r_0} = 1.476 \quad (2.33)$$

За сагоревање остатака користе се двочлане формуле за ψ и σ :

$$\psi = \psi_1 + \kappa_2 * (y - 1) * [1 + \lambda_2 * (y - 1)] \quad (2.34)$$

$$\sigma = \sigma_1 + 2 * \lambda_2 * (y - 1) \quad (2.35)$$

Коефицијенти облика κ_2 и λ_2 уз услов за крај сагоревања ($y = y_k$, $\psi = 1$, $\sigma = 1$) се рачунају на следећи начин:

$$\lambda_2 = -\frac{1}{2*(y_k-1)} = -1.05 \quad (2.36)$$

$$\kappa_2 = \frac{2*(1-\psi_1)}{y_k-1} \quad (2.37)$$

$$\psi_1 = 1 - \frac{W_{z1}}{W_{z0}} \quad (2.38)$$

Вредност W_{z1} се добија када се у израз за W_z унесе следећа релација: $r = r_0$.

$$W_{z1} = 1801.97r_0^3 - 1244.4r_0^3 - 347.24r_0^3 + 37.68r_0^3 \quad (2.39)$$

$$W_{z1} = 248.01r_0^3$$

$$\psi_1 = 0.862$$

$$\kappa_2 = 0.58$$

На основу треће претпоставке геометријског закона сагоревања барута, према којој се сагоревање барутног зрна одвија по паралелним слојевима, односно да након истека времена t фронт пламена пређе пут r_0 , барутно зрно ће имати следеће димензије на крају прве, прогресивне, фазе сагоревања:

$$D_1 = D - 2r_0 = 8.072r_0 \Rightarrow D_1 = 2.24$$

$$d_1 = d + 2r_0 = 2.683r_0 \Rightarrow d_1 = 0.75$$

$$L = L - 2r_0 = 21.381r_0 \Rightarrow L_1 = 5.94$$

Када се вредности D_1 , d_1 , и L_1 помноже са $10/7$, добијају се следеће вредности, које ће се користити у улазној датотеци методе Рунге – Кута:

$$D_1 = 3.2,$$

$$d_1 = 1.1,$$

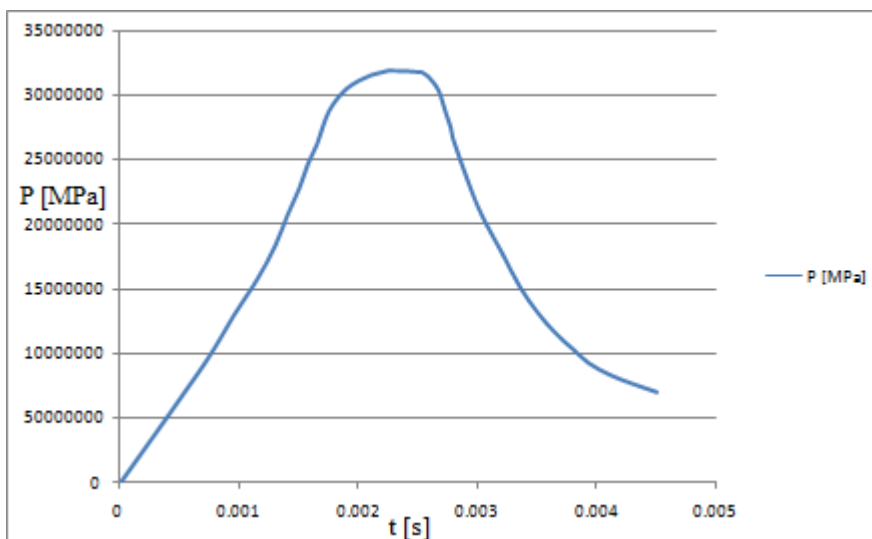
$$L_1 = 8.5.$$

Сада се може формирати датотека са улазним подацима за унутрашње балистички прорачун методом Рунге – Кута. Полазни подаци за УБ прорачун методом Рунге – Кута приказани су у табели 3.

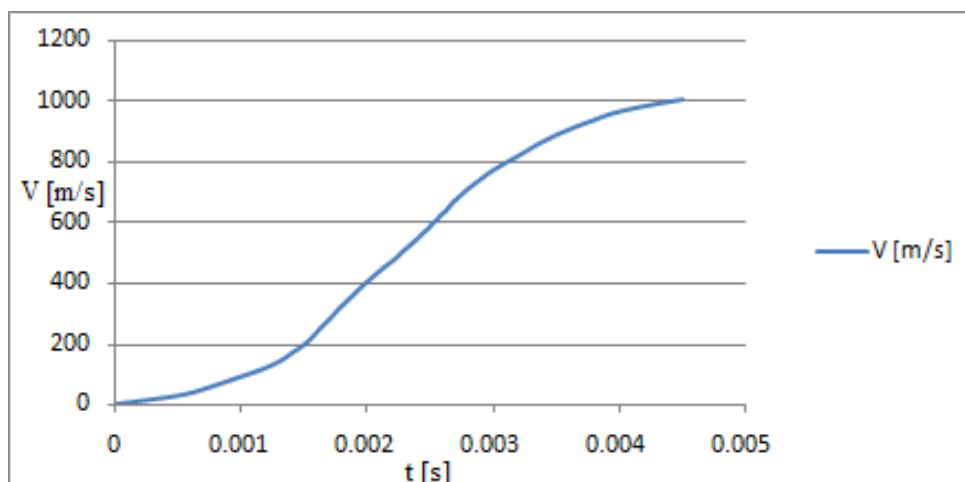
Табела 3 – Полазни подаци за УБ прорачун методом Рунге – Кута

Назив	Ознака	Вредност	Јединица
Почетна запремина барутне коморе	W_0	$5.7 \cdot 10^{-4}$	m^3
Површина попречног пресека цеви	S_c	$1.34 \cdot 10^{-3}$	m^2
Укупни пут пројектила у цеви	x_u	2.195	m
Коефицијент фиктивности	φ	1.192	/
Маса пројектила	m	0.88	kg
Маса барута	m_b	0.421	kg
Запреминска маса барута	ρ_b	1600	kg/m^3
Коволумен барутних гасова	α	0.0011	m^3/kg
Однос специфичних топлота умањен за 1	Θ	0.31	/
Половина дебљине барутног зрна	r_0	0.000278	m
Спољни пречник	D	0.0032	m
Унутрашњи пречник	d	0.0011	m
Дужина зрна	L	0.0085	m
Специфичан рад барутних гасова	f_b	915008.4	J/kg
Притисак форсирања	p_0	$37 \cdot 10^6$	Pa
Јединична брзина сагоревања барута	u_{z0}	$6.05 \cdot 10^{-10}$	m/sPa

На слици 20 приказана је промена максималног притиска барутних гасова у току времена t [s], а на слици 21 приказана је промена почетне брзине такође у току времена.



Слика 20 – Промена максималног притиска барутних гасова у току времена

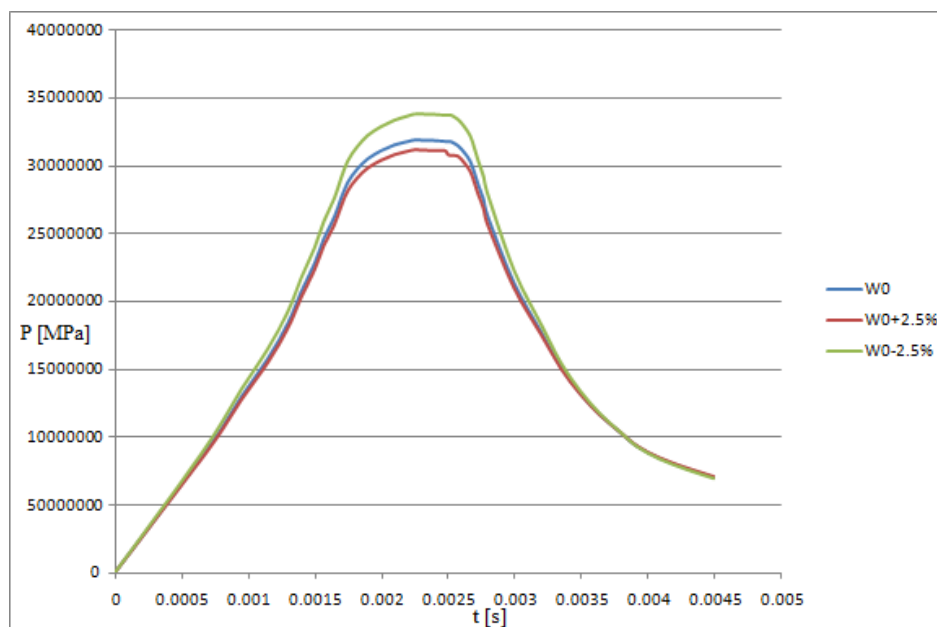


Слика 21 – Промена почетне брзине у току времена

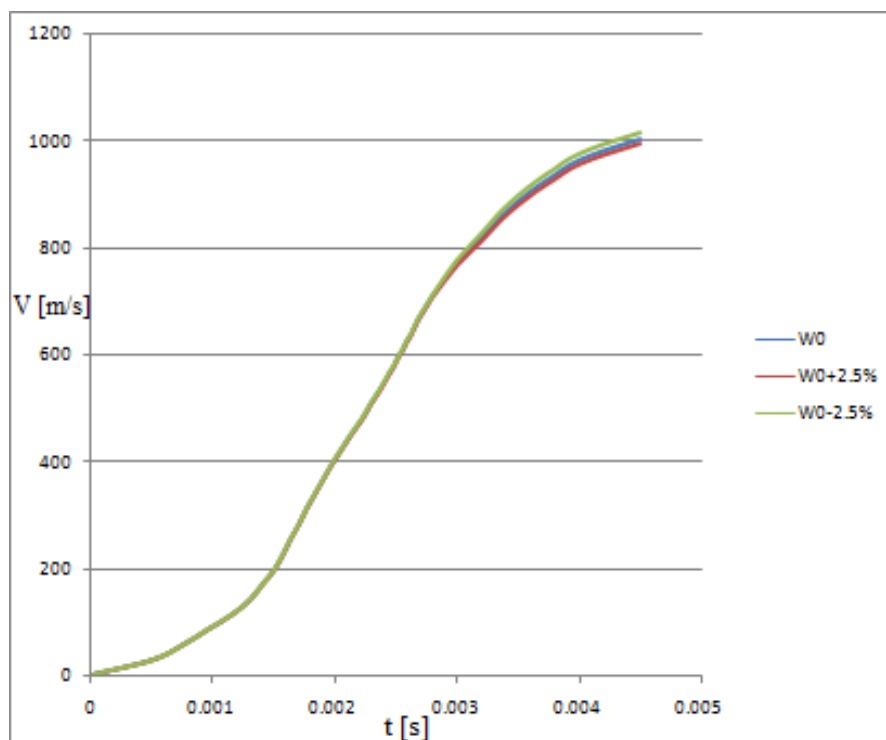
2.4.1.2. Варирање параметара

Да би се утврдио утицај појединих параметара на величину притиска барутних гасова у цеви и брзину пројектила, биће извршено њихово варирање у дијапазону од $\pm 2.5\%$. Варираће се запремина барутне коморе и укупни пут пројектила у цеви. На тај начин може се доћи до оптималног решења. Као што је претходно поменуто, циљ је пронаћи такве вредности параметара, да буде што мања вредност притиска барутних гасова у цеви, а да почетна брзина пројектила буде што већа. Такође је потребно избећи случај непотпуног сагоревања барута.

- Варирање запремине барутне коморе W_0

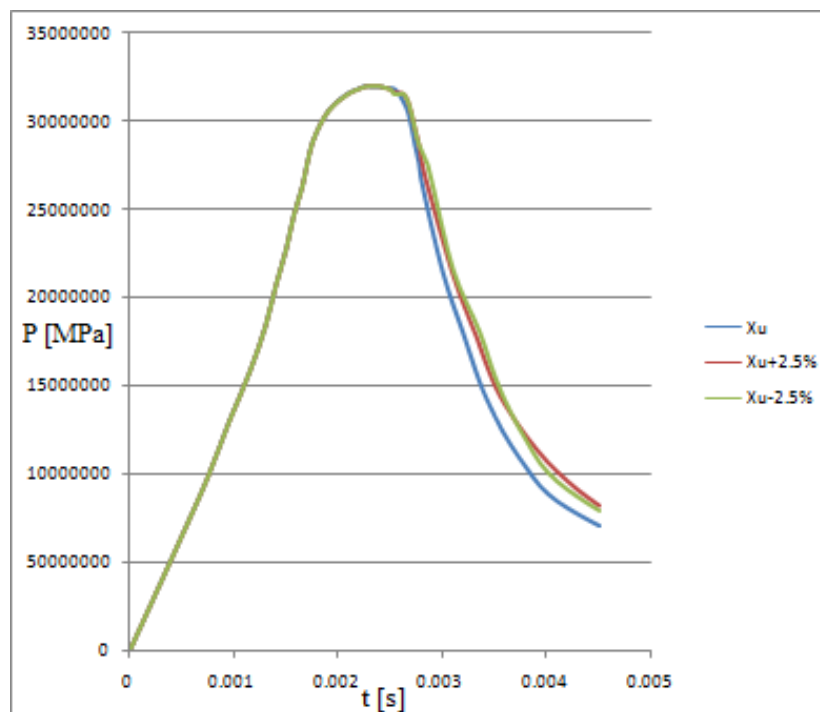


Слика 22 – Утицај промене запремине барутне коморе на притисак барутних гасова у цеви

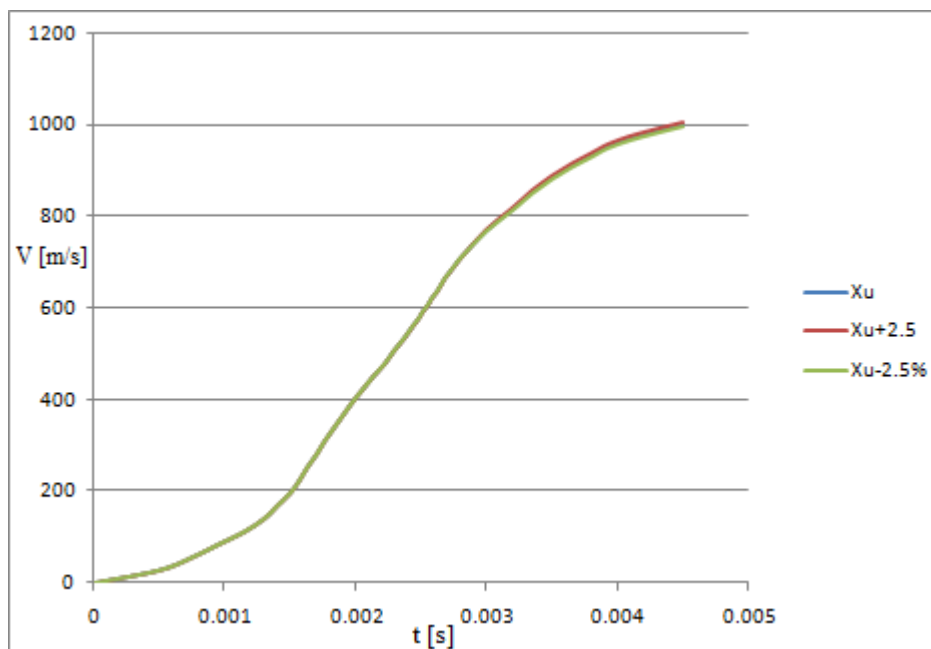


Слика 23 – Утицај промене запремине барутне коморе на брзину пројектила

- Варирање укупног пута пројектила у цеви



Слика 24 – Утицај промене укупног пута пројектила у цеви оруђа на притисак барутних гасова



Слика 25 – Утицај промене укупног пута пројектила у цеви на брзину пројектила

2.4.1.3. Опис добијених резултата

Анализирајући резултате прорачуна види се да оруђе најмање запремине има велику масу барута, велику барутну комору, доста касно сагоревање (λ_k/λ_u) и кратак живот цеви. Упоређујући остале три варијанте види се да варијанта II има најмању барутну комору и масу барута, добар крај сагоревања – најдужи живот цеви. Цев је најдужа, али не битно дужа од остале две варијанте. Према томе, ова варијанта је оптимална. За ову варијанту је извршен прорачун методом Рунге – Кута. Излазна датотека IJK30 приказује добијене податке и могу се видети у прилогу 2. Прорачуном је добијена почетна брзина која износи $v_0 = 1002.61 \text{ m/s}$, а максимални притисак барутних гасова износи $P_m = 319.6 \text{ bar}$ и налази се у дозвољеним границама.

Оптимизацијом је почетна брзина повећана на $v_0 = 1007.46 \text{ m/s}$, што је постигнуто повећањем укупног пута пројектила у цеви за 2.5%, а максимални притисак барутних гасова је за нијансу повећан на вредност $P_m = 319.9 \text{ bar}$ и налази се у дозвољеним границама, што је такође постигнуто повећањем укупног пута пројектила у цеви оруђа за 2.5%.

2.4.2. Прорачун максималне силе трзања

У току процеса опаљења на артиљеријско оруђе делује реактивна сила притиска барутних гасова P_{kp} , тј. сила трзања. Ова сила настаје као последица убрзаног кретања пројектила у каналу цеви и барутних гасова у смеру према задњем пресеку цеви. Сагласно закону о количини кретања, величина ове силе расте са порастом масе пројектила и брзине њеног кретања. Од величине силе трзања зависе отпорност оруђа и његова стабилност при опаљењу.

Максимална сила трзања се рачуна према формули:

$$P_{knmax} = P_{max} * S_c \quad (2.40)$$

где су:

- P_{max} – максимални притисак барутних гасова и
- S_c – површина попречног пресека цеви.

Ове вредности се добијају унутрашње балистичким прорачуном. У овом случају те вредности износе:

$$P_{max} = 3200 \text{ bar} = 320 * 10^6 \frac{N}{m^2}$$

$$S_c = 0.001296 \text{ m}^2$$

па је вредност максималне силе трзања:

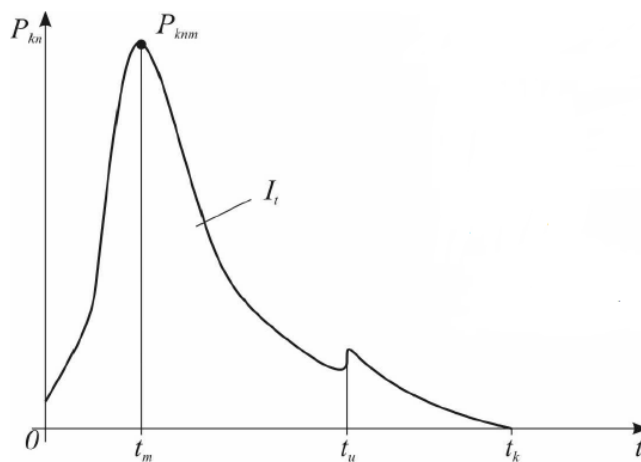
$$P_{knmax} = 414720 \text{ N}$$

2.4.3. Модел прорачуна силе отпора трзању

Услед дејства силе притиска барутних гасова P_{kn} на дно чауре и чело затварача настаје импулс ове силе, који се другим речима зове импулс трзања I_t [Ns]. Овај импулс је главни узрок динамичког понашања делова оруђа. Импулс силе трзања представља површину испод графика (слика 26), односно промену силе трзања по времену:

$$I_t = \int_0^{t_k} P_{kn} dt \quad (2.41)$$

где је: t_k [s] – време завршетка дејства барутних гасова. [10]



Слика 26 – Импулс силе трзања [10]

Импулс силе трзања делује на трзајућу масу, покреће је из стања мировања и убрзава. Скоро цео импулс се предаје трзајућим деловима до тренутка када се пројектил нађе на устима цеви. Јавља се сила инерције, која се дефинише следећом релацијом:

$$R \quad m_t * \ddot{x} = m_t * a = P_{kn} - \sum_{i=1}^n F_i = P_{kn} - \quad (2.42)$$

где су:

- m_t [kg] – маса трзајућих делова,
- $\ddot{x} = a$ [m/s²] – убрзање трзајуће масе,
- n – број сила које делују на оруђе,
- $\sum_{i=1}^n F_i$ – сума свих сила које делују на оруђе и
- R – укупна сила отпора трзању.

Противавионски топ 40 mm Bofors L/70 ради по принципу дугог трзања цеви, те се код њега трзању супротставља сила отпора повратне опруге (око 15%), сила трења на контактним површинама делова који се крећу (око 5%) и сила хидрауличне кочнице (око 80%), који заједно чине силу отпора R :

$$R = F_{tr} + F_{po} + F_{hk} - Q_t \quad (2.43)$$

У овој једначини члан Q_t представља компоненту силе тежине трзајуће масе, која се рачуна према формули:

$$Q_t = m_t * g * \sin \alpha \quad (2.44)$$

Сила трења F_{tr} [N] се супротставља кретању трзајуће масе и смањује брзину трзања. Дејство ове силе је најмање, али је треба узети у обзир и рачунати на следећи начин:

$$F_{tr} = m_t * g * (\mu_{tr} * \cos \alpha + \eta) \quad (2.45)$$

где је:

- $g = 9.81$ m/s² – убрзање Земљине теже,
- $\mu_{tr} = 0.16$ – коефицијент трења за челик,
- $\eta = 0.18$ – коефицијент пропорционалности за силу трења и
- α – угао елевације.

Повратна опруга својим сабијањем при трзању акумулира енергију трзајућих делова. Сила отпора повратне опруге се рачуна помоћу следеће једначине:

$$F_{po} = F_0 + k_{po} * x \quad (2.46)$$

где су: F_{po} [N] – почетна сила повратне опруге, k_{po} [N/m] – крутост опруге, а x [m] – деформација опруге. [10]

Сила хидрауличне кочнице се рачуна помоћу следеће једначине:

$$F_{hk} = \frac{k_k}{2} * \rho * \frac{(S_k + a_x)^2}{a_x^2} * S_k * v^2 \quad (2.47)$$

где су:

- k_k – коефицијент хидрауличног отпора,
- ρ – густина хидрауличне течности,
- v – брзина кретања клипњаче хидрауличне течности,
- S_k – радна површина клипа и
- a_x – укупна површина попречних пресека проточних канала.

2.4.4. Сила хидрауличне кочнице

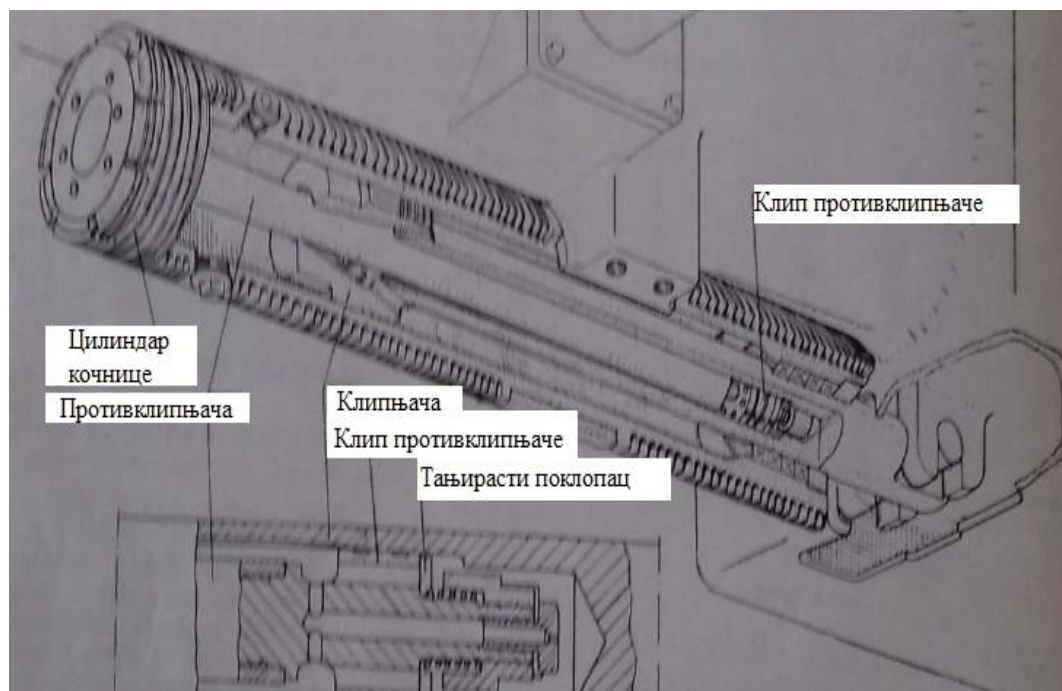
Енергија трзања, која настаје при сваком опаљењу метка делом се корисно искоришћава за сабијање повратне опруге и за рад појединих делова аутоматике и уводника метака, а делом је апсорбује хидраулична кочница. Повратна опруга враћа цев након завршеног трзања у почетни положај. Једна кочница враћања регулише брзину враћања тако да се, при аутоматској палби, цев у моменту опаљења налази поново у почетном положају или бар у његовој близини. Кочница (слика 27) се састоји од једног, за колевку везаног цилиндра кочнице испуњеног хидрауличном течностју.

За предњи поклопац цилиндра причвршћена је противклипњача. Противклипњача на свом задњем крају има клип, који служи као клип кочнице враћања. У цилиндру кочнице смештена је клипњача, која на свом предњем крају има облик клипа. Клипњача је на свом задњем крају везана за ушке на задњаку и према томе учествује у покрету трзања.

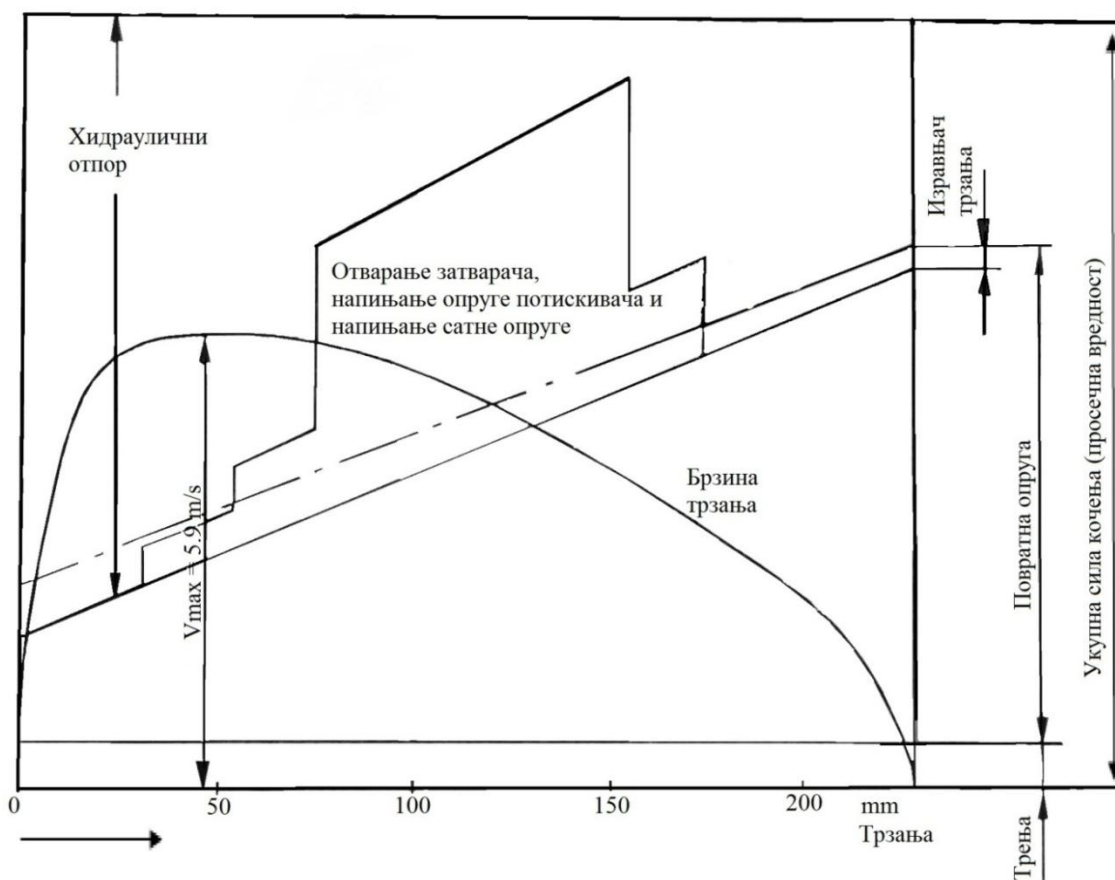
Када цев трза, хидраулична течност је приморана да, пролазећи кроз отворе на задњем крају клипа клипњаче, протиче кроз прстенасти проточни отвор између клипњаче и противклипњаче. Услед тога настаје притисак у хидрауличној течности иза клипа клипњаче. Тај притисак дејствује на прстенасту површину клипа и на тај начин се супротставља трзању. Овај хидраулични отпор зависи од брзине клипњаче (брзина трзања) и величине прстенасто обликованог отвора (површине проточног отвора). Површина проточног отвора је тако изабрана да је укупни отпор трзања сразмерно константан за време целог процеса трзања. Ово је приказано на дијаграму трзања (слика 28).

За време трзања протиче један део течности и уназад између противклипњаче и клипњаче, отвара тањирасти поклопац на клипу противклипњаче, тако да попуњава празан простор у клипњачи.

За време враћања належе тањирасти поклопац на клип противклипњаче (захваљујући дејству опруге вентила и дејству течности) и течност, која се налази у клипњачи, мора делом да протиче кроз жлебове на унутрашњим зидовима клипњаче, а делом кроз рупу на вијку вентила на крају противклипњаче. [8]

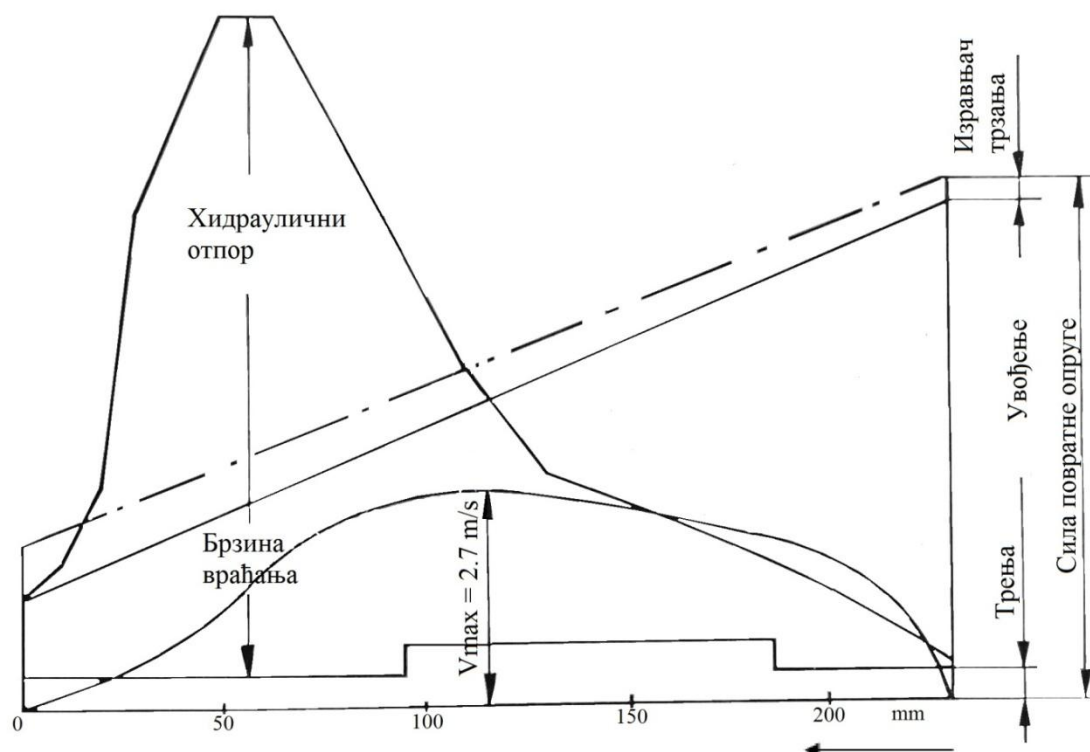


Слика 27 – Хидраулична кочица [8]



Слика 28 – Дијаграм трзања [8]

Ови простори су тако подешени да се, с' обзиром на расположиво време враћања, добије одговарајућа брзина враћања, што се може видети на дијаграму враћања (слика 29). За време враћања, хидраулична течност, која се налази испред клипњаче, протиче натраг иза исте. Ефекат кочења, који се при том појављује на проточном отвору између клипа клипњаче и противклипњаче је сразмерно мали због мале брзине враћања. Део енергије трзања који апсорбује кочница претвара се у топлоту. Да би се олакшало одвођење топлоте и спречило превелико повећање температуре кочнице за време аутоматске палбе, кочница има релативно велики волумен, а цилиндар кочнице поседује ребра за хлађење. [8]

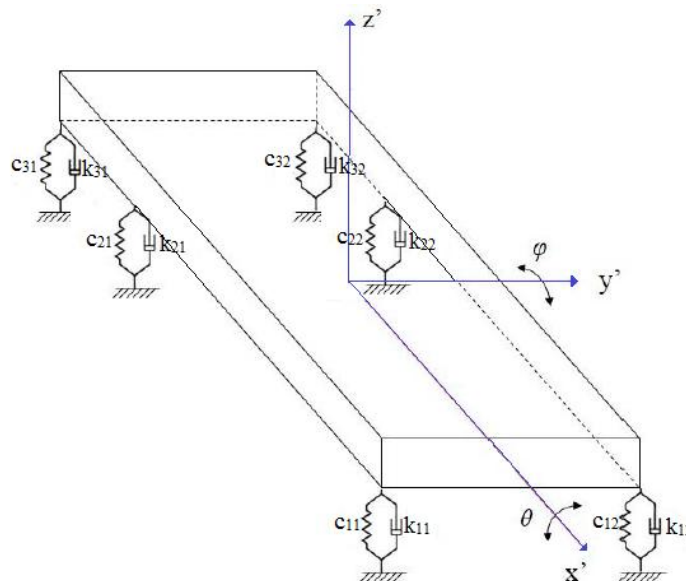


Слика 29 – Дијаграм враћања [8]

3. Математичко – механички модел осциловања мобилне платформе под дејством силе опаљења

Математичко – механички модел служи да математички представи кретање физичког система обухватајући све утицајне параметре, задржавајући једноставност примене упрошћења. Модел је формиран на основу класичних принципа теорије динамике возила. Уз усвојена упрошћења, систем са бесконачно много степени слободе је сведен на систем са три степена слободе, што је приказано на слици 30, а као генералисане координате су изабране следеће величине:

- z_T – вертикални положај тежишта система Т (растојање од подлоге),
- φ – ротација око попречне осе y' (галопирање) и
- θ – ротација око уздужне осе x' (ваљање).



Слика 30 – Тростандардни приказ динамичког модела платформе

- Кретање модела платформе са интегрисаним наоружањем, побуђено силом услед опаљења

Ово кретање се може описати Лагранжевим једначинама друге врсте:

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial E_k}{\partial \dot{q}_i} \right) - \frac{\partial E_k}{\partial q_i} = - \frac{\partial E_p}{\partial q_i} - \frac{\partial \Phi}{\partial \dot{q}_i} + Q'_{q_i} \quad (3.1)$$

Где је:

- $i = 1, n$ а n је број степени слободе кретања система (у овом случају $n = 3$),
- E_k – кинетичка енергија система,
- E_p – потенцијална енергија система,
- Φ – функција дисипације,

- $\left(-\frac{\partial E_p}{\partial q_i}\right)$ – генералисана конзервативна сила,
- $\left(-\frac{\partial \Phi}{\partial \dot{q}_i}\right)$ – генералисана дисипативна сила и
- Q'_{q_i} – произвольна неконзервативна генералисана сила.

Пошто се посматра систем као целина, укупна кинетичка енергија модела се састоји од кинетичких енергија транслације центра масе и ротације око центра масе система:

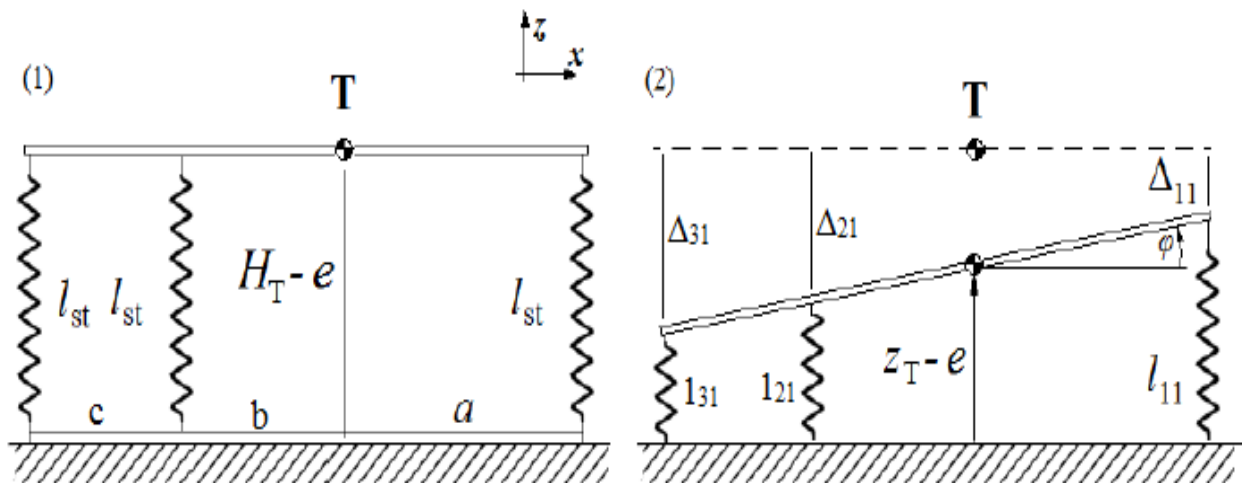
$$E_k = \frac{1}{2} * m * \dot{z}_T^2 + \frac{1}{2} * J_y * \dot{\varphi}^2 + \frac{1}{2} * J_x * \dot{\theta}^2 \quad (3.2)$$

Где су:

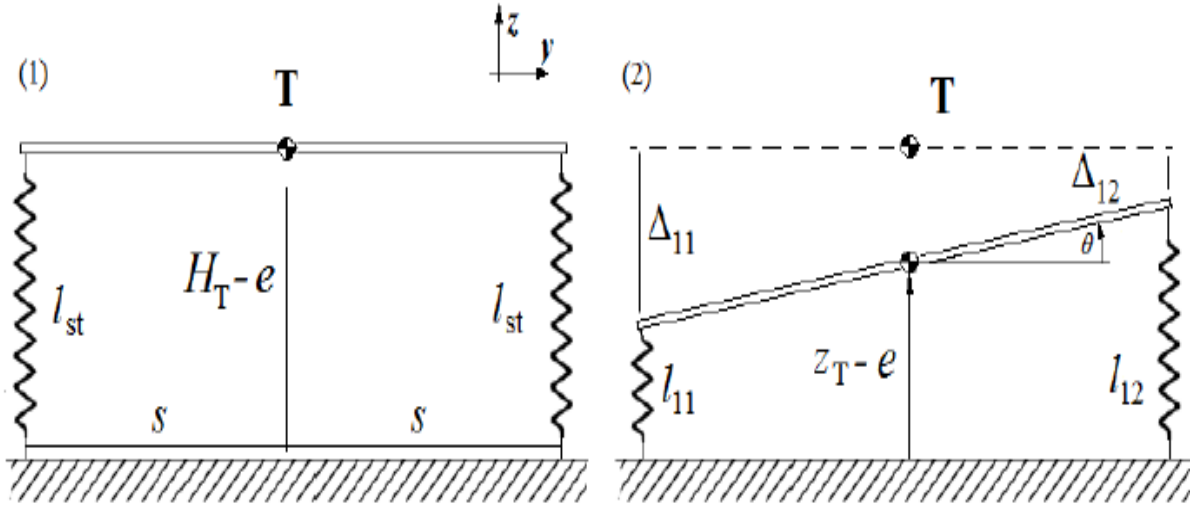
- J_y – момент инерције масе система у односу на уздужну осу y' и
- J_x – момент инерције масе система у односу на попречну осу x' .

За дефинисање потенцијалне енергије потребно је геометријски одредити изразе за релативне деформације опруга пнеуматика и померања клипова амортизера. Једно од упрошћења еластичног система ослањања је коришћење еквивалентне крутости ослањања која урачунава крутост пнеуматика. Сматра се и да су померања опруга и амортизера једнака.

На слици 31 је приказана скица ослањања бочне стране, а на слици 32 ослањање са предње стране. Ознака l_{st} представља дужину ослонца који се деформише у почетном тренутку, а l_{kj} у произвољном тренутку ($k = 1,2,3$).



Слика 31 – Ослањање гледано са бочне стране



Слика 32 – Ослањање гледано са предње стране

На основу ових скица, крајње деформације се могу написати као разлике дужина ослонаца у почетном и крајњем положају, узимајући у обзир померања у обе равни ($H_T = z_{Tst} = \text{const.}$):

$$\begin{aligned}
 \Delta_{11} &= l_{st} - l_{11} = (H_T - e) - (z_T - e + a * \varphi - s * \theta) = H_T - z_T - a * \varphi + s * \theta \\
 \Delta_{12} &= l_{st} - l_{12} = (H_T - e) - (z_T - e + a * \varphi + s * \theta) = H_T - z_T - a * \varphi - s * \theta \\
 \Delta_{21} &= l_{st} - l_{21} = (H_T - e) - (z_T - e - b * \varphi - s * \theta) = H_T - z_T + b * \varphi + s * \theta \quad (3.3) \\
 \Delta_{22} &= l_{st} - l_{22} = (H_T - e) - (z_T - e - b * \varphi - s * \theta) = H_T - z_T + b * \varphi + s * \theta \\
 \Delta_{31} &= l_{st} - l_{31} = (H_T - e) - (z_T - e - (c + b) * \varphi - s * \theta) = H_T - z_T + (c + b) * \varphi + s * \theta \\
 \Delta_{32} &= l_{st} - l_{32} = (H_T - e) - (z_T - e - (c + b) * \varphi - s * \theta) = H_T - z_T + (c + b) * \varphi + s * \theta
 \end{aligned}$$

Израз за потенцијалну енергију система гласи:

$$\begin{aligned}
 E_p &= \frac{1}{2} * c_{11} * \Delta_{11}^2 + \frac{1}{2} * c_{12} * \Delta_{12}^2 + \frac{1}{2} * c_{21} * \Delta_{21}^2 + \frac{1}{2} * c_{22} * \Delta_{22}^2 + \frac{1}{2} * \\
 &\quad c_{31} * \Delta_{31}^2 + \frac{1}{2} * c_{32} * \Delta_{32}^2 \quad (3.4)
 \end{aligned}$$

За исте вредности крутости левих и десних еластичних елемената исте осовине, следи:

$$\begin{aligned}
 c_{11} &= c_{12} = c_1, \quad c_{21} = c_{22} = c_2, \quad c_{31} = c_{32} = c_3 \\
 E_p &= \frac{1}{2} * c_1 * (\Delta_{11}^2 + \Delta_{12}^2) + \frac{1}{2} * c_2 * (\Delta_{21}^2 + \Delta_{22}^2) + \frac{1}{2} * c_3 * (\Delta_{31}^2 + \Delta_{32}^2) \quad (3.5)
 \end{aligned}$$

Изводи релативних померања (релативне брзине клипова у односу на цилиндричне амортизере) и дисипативна функција имају следеће изразе:

$$\begin{aligned}
 \dot{\Delta}_{11} &= -\dot{z}_T - a * \dot{\varphi} + s * \dot{\theta} \\
 \dot{\Delta}_{12} &= -\dot{z}_T - a * \dot{\varphi} - s * \dot{\theta} \\
 \dot{\Delta}_{21} &= -\dot{z}_T + b * \dot{\varphi} + s * \dot{\theta} \\
 \dot{\Delta}_{22} &= -\dot{z}_T + b * \dot{\varphi} + s * \dot{\theta} \\
 \dot{\Delta}_{31} &= -\dot{z}_T + (c + b) * \dot{\varphi} + s * \dot{\theta} \\
 \dot{\Delta}_{32} &= -\dot{z}_T + (c + b) * \dot{\varphi} + s * \dot{\theta}
 \end{aligned} \tag{3.6}$$

$$\begin{aligned}
 \Phi = \frac{1}{2} * k_{11} * \dot{\Delta}_{11}^2 + \frac{1}{2} * k_{12} * \dot{\Delta}_{12}^2 + \frac{1}{2} * k_{21} * \dot{\Delta}_{21}^2 + \frac{1}{2} * k_{22} * \dot{\Delta}_{22}^2 + \frac{1}{2} * k_{31} * \dot{\Delta}_{31}^2 + \\
 \frac{1}{2} * k_{32} * \dot{\Delta}_{32}^2
 \end{aligned} \tag{3.7}$$

За исте вредности пригушења левих и десних амортизера исте осовине, следи:

$$\begin{aligned}
 k_{11} = k_{12} = k_1, \quad k_{21} = k_{22} = k_2, \quad k_{31} = k_{32} = k_3 \\
 \Phi = \frac{1}{2} * k_1 * (\dot{\Delta}_{11}^2 + \dot{\Delta}_{12}^2) + \frac{1}{2} * k_2 * (\dot{\Delta}_{21}^2 + \dot{\Delta}_{22}^2) + \frac{1}{2} * k_3 * (\dot{\Delta}_{31}^2 + \dot{\Delta}_{32}^2)
 \end{aligned} \tag{3.8}$$

За писање Лагранжевих једначина потребно је одредити изводе постављених израза за кинетичку и потенцијалну енергију, а такође и за дисипативну функцију.

За кинетичку енергију, према једначини (3.2) важи:

$$\begin{aligned}
 \frac{\partial E_k}{\partial \dot{z}_T} &= m * \dot{z}_T \quad \frac{\partial E_k}{\partial \dot{\varphi}} = J_y * \dot{\varphi} \quad \frac{\partial E_k}{\partial \dot{\theta}} = J_x * \dot{\theta} \\
 \frac{\partial E_k}{\partial z_T} &= 0 \quad \frac{\partial E_k}{\partial \varphi} = 0 \quad \frac{\partial E_k}{\partial \theta} = 0 \\
 \frac{d}{dt} \left(\frac{\partial E_k}{\partial \dot{z}_T} \right) - \frac{\partial E_k}{\partial z_T} &= m * \ddot{z}_T \\
 \frac{d}{dt} \left(\frac{\partial E_k}{\partial \dot{\varphi}} \right) - \frac{\partial E_k}{\partial \varphi} &= J_y * \ddot{\varphi} \\
 \frac{d}{dt} \left(\frac{\partial E_k}{\partial \dot{\theta}} \right) - \frac{\partial E_k}{\partial \theta} &= J_x * \ddot{\theta}
 \end{aligned} \tag{3.9}$$

Генералисане конзервативне силе се добијају као парцијални изводи израза за потенцијалну енергију по генералисаним координатама.

$$\begin{aligned}
-\frac{\partial E_p}{\partial z_T} &= -(2 * c_1 + 2 * c_2 + 2 * c_3) * z_T - (2 * c_1 * a - 2 * c_2 * b - 2 * c_3 * (c + b)) * \varphi + \\
&\quad 2 * H_T * (c_1 + c_2 + c_3) \\
-\frac{\partial E_p}{\partial \varphi} &= -(2 * c_1 * a^2 + 2 * c_2 * b^2 + 2 * c_3 * (c + b)^2) * \varphi - (2 * c_1 * a - 2 * c_2 * b - 2 * c_3 * (c + b)) * z_T \\
&\quad - 2 * H_T * (-c_1 * a + c_2 * b + c_3 * (c + b)) \\
-\frac{\partial E_p}{\partial \theta} &= -(2 * c_1 * s^2 + 2 * c_2 * s^2 + 2 * c_3 * s^2) * \theta
\end{aligned} \tag{3.10}$$

Генералисане дисипативне силе се добијају као парцијални изводи функције дисипације по генералисаним координатама:

$$\begin{aligned}
-\frac{\partial \Phi}{\partial \dot{z}_T} &= -(2 * k_1 + 2 * k_2 + 2 * k_3) * \dot{z}_T - (2 * k_1 * a - 2 * k_2 * b - 2 * k_3 * (c + b)) * \dot{\varphi} \\
-\frac{\partial \Phi}{\partial \dot{\varphi}} &= -(2 * k_1 * a^2 + 2 * k_2 * b^2 + 2 * k_3 * (c + d)^2) * \dot{\varphi} - (2 * k_1 * a - 2 * k_2 * b - 2 * k_3 * (c + b)) * \dot{z}_T \\
-\frac{\partial \Phi}{\partial \dot{\theta}} &= -(2 * k_1 * s^2 + 2 * k_2 * s^2 + 2 * k_3 * s^2)
\end{aligned} \tag{3.11}$$

Сили притиска барутних гасова на чело затварача се супротстављају сила отпора повратних опруга и сила трења, које заједно чине силу отпора трзању $R(t)$. Компоненте силе отпора трзању у правцу три осе су:

$$R_x(t) = R * \cos\beta * \cos\alpha \quad R_y(t) = R * \sin\beta * \cos\alpha \quad R_z(t) = R * \cos\beta * \sin\alpha \tag{3.12}$$

Генералисане неконзервативне силе које дејствују на систем се могу добити помоћу принципа виртуалног померања тачке D, у којој делује спољашња побудна сила. Израз за виртуални рад је следећи:

$$\delta A = (R_x(t) * h + R_z(t) * d) * \delta\varphi + (R_y(t) * h) * \delta\theta + (-R_z(t))\delta z_T \tag{3.13}$$

Генералисане неконзервативне силе сада су:

$$Q'_{z_T} = -R_z(t) \quad Q'_\varphi = R_x(t) * h + R_z(t) * d \quad Q'_\theta = R_y(t) * h \tag{3.14}$$

Диференцијалне једначине кретања система се постављају за сваку од генералисаних координата.

- За вертикално померање тежишта система Т, z_T :

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial E_k}{\partial \dot{z}_T} \right) - \frac{\partial E_k}{\partial z_T} = - \frac{\partial E_p}{\partial z_T} - \frac{\partial \Phi}{\partial \dot{z}_T} + Q'_{z_T}$$

$$\begin{aligned} m * \ddot{z}_T + (2 * k_1 + 2 * k_2 + 2 * k_3) * \dot{z}_T + (2 * k_1 * a - 2 * k_2 * b - 2 * k_3 * (c + b)) * \dot{\varphi} + \\ + (2 * c_1 + 2 * c_2 + 2 * c_3) * z_T + (2 * c_1 * a - 2 * c_2 * b - 2 * c_3 * (c + b)) * \varphi - \\ - 2 * H_T * (c_1 + c_2 + c_3) = -R_z(t) \end{aligned} \quad (3.15)$$

- За ротацију око попречне осе у' (галомирање), φ :

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial E_k}{\partial \dot{\varphi}} \right) - \frac{\partial E_k}{\partial \varphi} = - \frac{\partial E_p}{\partial \varphi} - \frac{\partial \Phi}{\partial \dot{\varphi}} + Q'_\varphi$$

$$\begin{aligned} J_y * \ddot{\varphi} + (2 * k_1 * a^2 + 2 * k_2 * b^2 + 2 * k_3 * (c + b)^2) * \dot{\varphi} + \\ + (2 * k_1 * a - 2 * k_2 * b - 2 * k_3 * (c + b)) * \dot{z}_T + (2 * c_1 * a^2 + 2 * c_2 * b^2 + 2 * c_3 * \\ (c + b)^2) * \varphi + (2 * c_1 * a - 2 * c_2 * b - 2 * c_3 * (c + b)) * z_T + 2 * H_T * (-c_1 * a + c_2 * b + \\ c_3 * (c + b)) = R_x(t) * h + R_z(t) * d \end{aligned} \quad (3.16)$$

- За ротацију око уздужне осе х' (ваљање), Θ :

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial E_k}{\partial \dot{\theta}} \right) - \frac{\partial E_k}{\partial \theta} = - \frac{\partial E_p}{\partial \theta} - \frac{\partial \Phi}{\partial \dot{\theta}} + Q'_\theta$$

$$\begin{aligned} J_x * \ddot{\theta} + (2 * k_1 * s^2 + 2 * k_2 * s^2 + 2 * k_3 * s^2) * \dot{\theta} + \\ (2 * c_1 * s^2 + 2 * c_2 * s^2 + 2 * c_3 * s^2) * \theta = R_y(t) * h \end{aligned} \quad (3.17)$$

Систем диференцијалних једначина (3.16), (3.17) и (3.18) се може написати у матричном облику:

$$[A]\{\ddot{q}\} + [B]\{\dot{q}\} + [C]\{q\} = \{Q\}$$

$$\begin{bmatrix} m & 0 & 0 \\ 0 & J_y & 0 \\ 0 & 0 & J_x \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \ddot{z}_T \\ \ddot{\varphi} \\ \ddot{\theta} \end{Bmatrix}$$

$$+ \begin{bmatrix} 2 * k_1 + 2 * k_2 + 2 * k_3 & 2 * k_1 * a - 2 * k_2 * b - 2 * k_3 * (c + b) & 0 \\ 2 * c_1 * a - 2 * c_2 * b - 2 * c_3 * (c + b) & 2 * k_1 * a^2 + 2 * k_2 * b^2 + 2 * k_3 * (c + b)^2 & 0 \\ 0 & 0 & 2 * k_1 * s^2 + 2 * k_2 * s^2 + 2 * k_3 * s^2 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \dot{z}_T \\ \dot{\varphi} \\ \dot{\theta} \end{Bmatrix}$$

$$\begin{aligned}
& + \begin{bmatrix} 2 * c_1 + 2 * c_2 + 2 * c_3 & 2 * c_1 * a - 2 * c_2 * b - 2 * c_3 * (c + b) & 0 \\ 2 * c_1 * a - 2 * c_2 * b - 2 * c_3 * (c + b) & 2 * c_1 * a^2 + 2 * c_2 * b^2 + 2 * c_3 * (c + b)^2 & 0 \\ 0 & 0 & 2 * c_1 * s^2 + 2 * c_2 * s^2 + 2 * c_3 * s^2 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} z_T \\ \varphi \\ \theta \end{Bmatrix} \\
& = \begin{Bmatrix} -R_z(t) + 2 * H_T * (c_1 + c_2 + c_3) \\ R_x(t) * h + R_z(t) * d - 2 * H_T * (-c_1 * a + c_2 * b + c_3 * (c + b)) \\ R_y(t) * h \end{Bmatrix} \quad (3.18)
\end{aligned}$$

[A] – матрица инерције или матрица маса,

[B] – матрица пригушења,

[C] – матрица крутости и

{Q} – вектор сила побуде.

Матрица (3.18) важи за период времена док делује побудна сила отпора трзању R(t) и док је кретање платформе са наоружањем принудно – пригушног карактера.

Матрица пригушног осцилаторног кретања тачкашке платформе са интегрисаним наоружањем, са три степена слободe гласи:

$$\begin{bmatrix} m & 0 & 0 \\ 0 & J_y & 0 \\ 0 & 0 & J_x \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \ddot{z}_T \\ \ddot{\varphi} \\ \ddot{\theta} \end{Bmatrix} \quad (3.19)$$

$$+ \begin{bmatrix} 2 * k_1 + 2 * k_2 + 2 * k_3 & 2 * c_1 * a - 2 * c_2 * b - 2 * c_3 * (c + b) & 0 \\ 2 * k_1 * a - 2 * k_2 * b - 2 * k_3 * (c + b) & 2 * c_1 * a^2 + 2 * c_2 * b^2 + 2 * c_3 * (c + b)^2 & 0 \\ 0 & 0 & 2 * c_1 * s^2 + 2 * c_2 * s^2 + 2 * c_3 * s^2 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \dot{z}_T \\ \dot{\varphi} \\ \dot{\theta} \end{Bmatrix}$$

$$+ \begin{bmatrix} 2 * c_1 + 2 * c_2 + 2 * c_3 & 2 * c_1 * a - 2 * c_2 * b - 2 * c_3 * (c + b) & 0 \\ 2 * c_1 * a - 2 * c_2 * b - 2 * c_3 * (c + b) & 2 * c_1 * a^2 + 2 * c_2 * b^2 + 2 * c_3 * (c + b)^2 & 0 \\ 0 & 0 & 2 * c_1 * s^2 + 2 * c_2 * s^2 + 2 * c_3 * s^2 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} z_T \\ \varphi \\ \theta \end{Bmatrix}$$

$$= \begin{Bmatrix} 2 * H_T * (c_1 + c_2 + c_3) \\ -2 * H_T * (-c_1 * a + c_2 * b + c_3 * (c + b)) \\ 0 \end{Bmatrix}$$

4. Симулациони модел осциловања мобилне платформе

Решавање претходног система диференцијалних једначина врши се нумерички, помоћу програмског пакета MATLAB. Улазни подаци приказани су у табели 4. У њима се налазе: подаци о возилу (технички подаци, положај тежишта возила, карактеристике система еластичног ослањања возила, моменти инерције), подаци о оруђу (маса оруђа, положај интеграције у односу на тежиште система, углови елевације и азимута) и подаци о побудној сили (максимална вредност силе отпора трзању R).

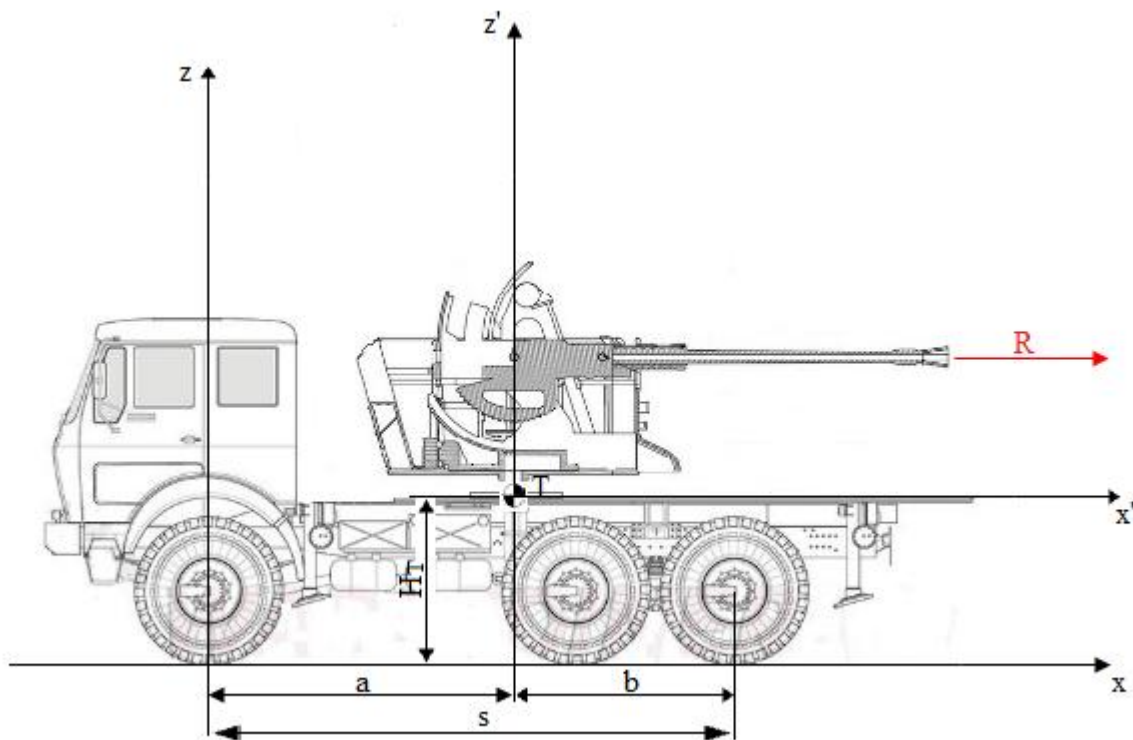
Табела 4 – Полазни подаци за програмско решење

1.	Маса возила – m_v [kg]	9000
2.	Маса оруђа – m_0 [kg]	3500
3.	Маса система – m [kg]	12500
4.	Момент инерције – J_y [kg*m ²]	57950.2
5.	Момент инерције – J_x [kg*m ²]	12048.7
6.	Висина тежишта – H_T [m]	1.2
7.	Растојање од предње осовине – a_v [m]	2.517
8.	Растојање од задње осовине – b_v [m]	1.845
9.	Половина међуосовинског растојања – s [m]	2.39
10.	Коефицијент пригушења – k [Ns/m ²]	16000
11.	Сила повратне опруге – F_p [N]	15435
12.	Угиб – f_1 [m]	0.002
13.	Максимална сила отпора трзању – R [N]	17150
14.	Вертикално растојање до оруђа – h [m]	0.5
15.	Хоризонтално растојање до оруђа – d [m]	0

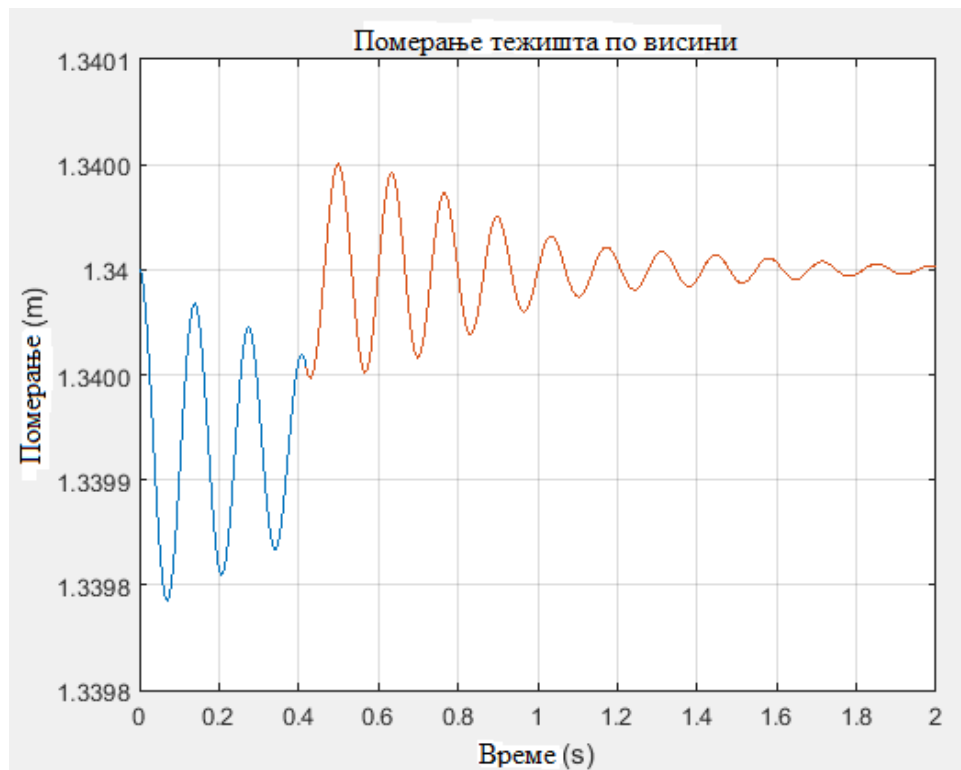
У полазним подацима вредност масе возила је умањена за вредност масе сандука, јер се у овом случају интеграције наоружања сандук мора демонтирати. Маса оруђа је умањена за масу постоља са точковима, које се користи у случају вучне варијанте, али је ради боље заштите додат оклоп тежине нешто мање од 1000 kg. Пошто се средња и задња осовина понашају као да су спрегнуте, имају еквивалентан коефицијент крутости опруга амортизера, па се систем даље разматра као возило са две осовине, односно четири точка. У претходном поглављу приказан је математичко – механички модел осциловања мобилне платформе за случај да ове осовине немају еквивалентне коефицијенте крутости и да се систем понаша као троосовинско возило. За место постављања оруђа изабрана је позиција на којој се налази тежиште возила, тако да је хоризонтално растојање од центра масе камиона до центра масе топа једнако нули, док се за вертикално растојање претпоставља да је на висини од 0.5 m од тежишта возила.

Под дејством тежине оруђа и његове силе отпора трзању јавља се угиб, који у овом случају има малу вредност, јер је маса топа веома мања од масе возила, па кад се сили тежине топа дода и сила отпора трзању, не долази до великог утицаја на шасију возила, што је за цео систем веома значајно.

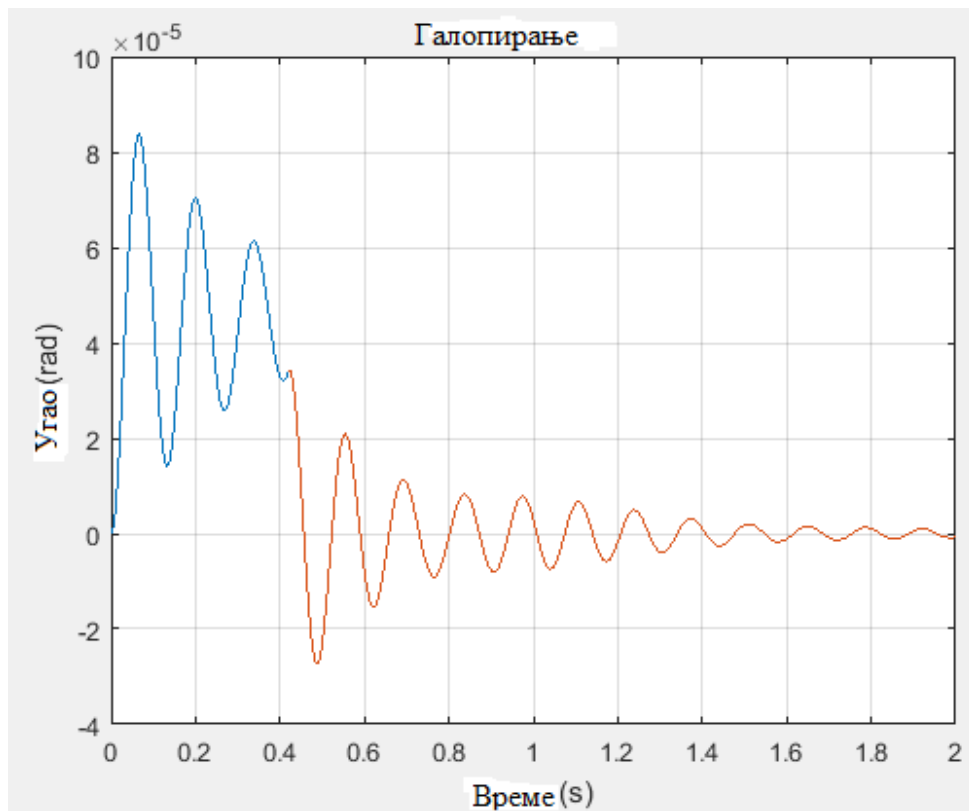
Због недостатка тачних података о возилу, за коефицијент пригушења под претпоставком се користи вредност од 16000 Ns/m^2 . На слици 33 приказано је место интеграције са растојањима од осовина и подлоге. Приказано је и дејство силе отпора трзању R . Излазни подаци добијају се у виду дијаграма, који представљају промене следећих компонената по времену: померање тежишта по висини, галопирање, ваљање, брзина померања тежишта по висини, брзина галопирања и брзина ваљања. Ови дијаграми приказани су на сликама од 34 до 39.



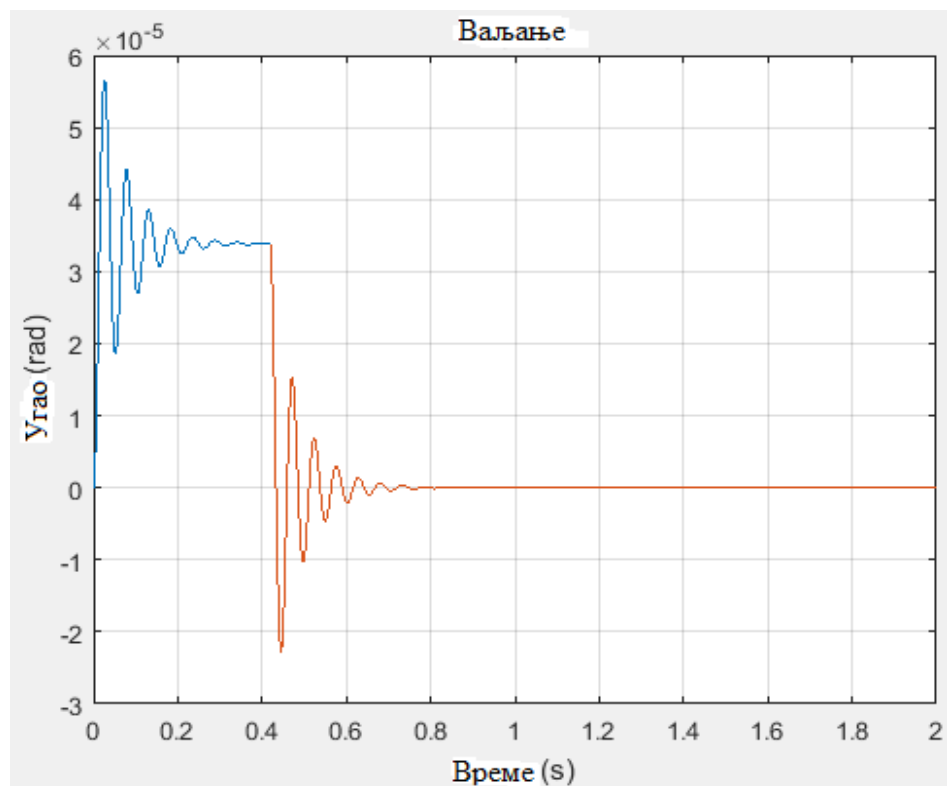
Слика 33 – Место интеграције оруђа



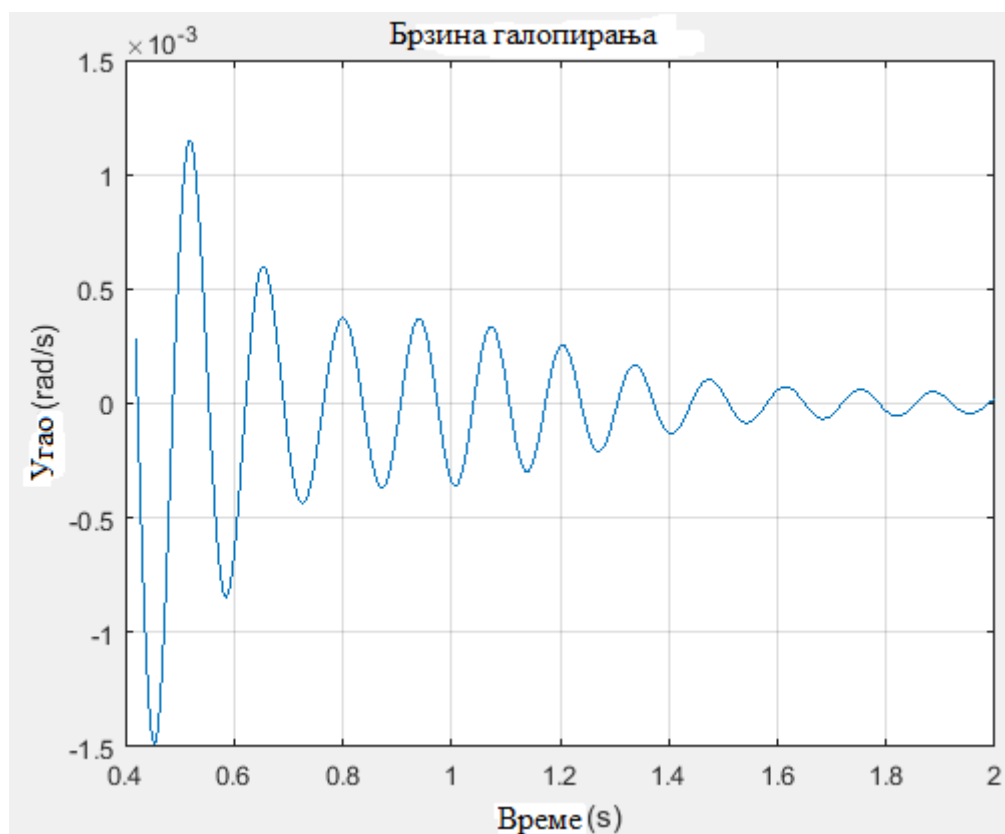
Слика 34 – Померање тежишта по висини



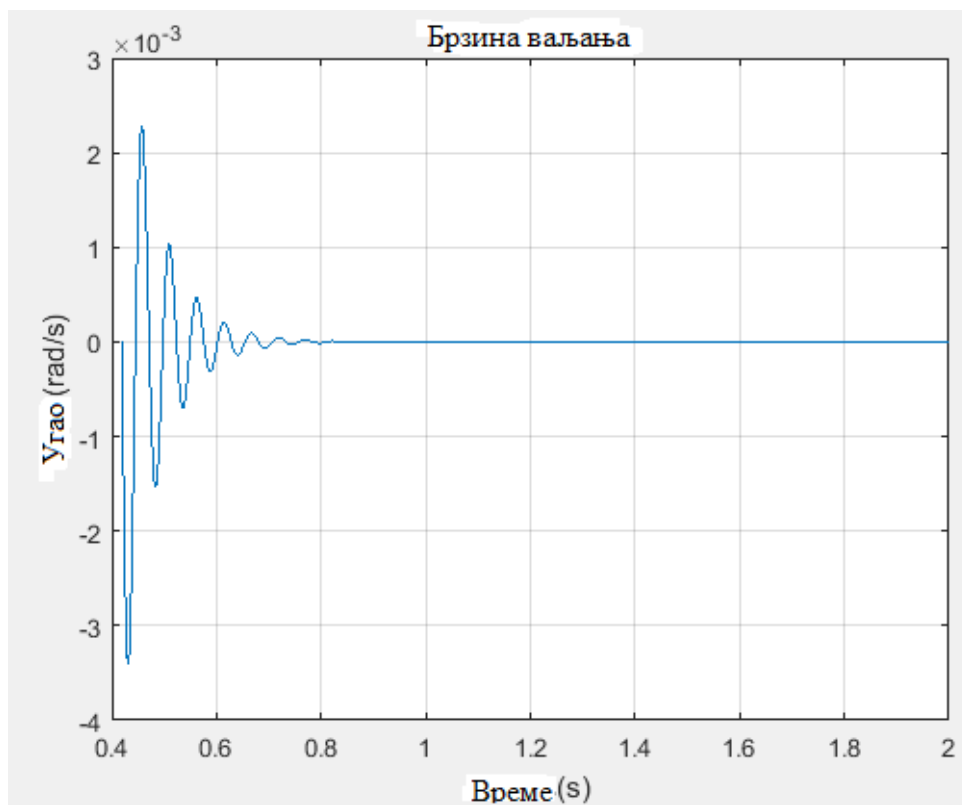
Слика 35 – Галопирање



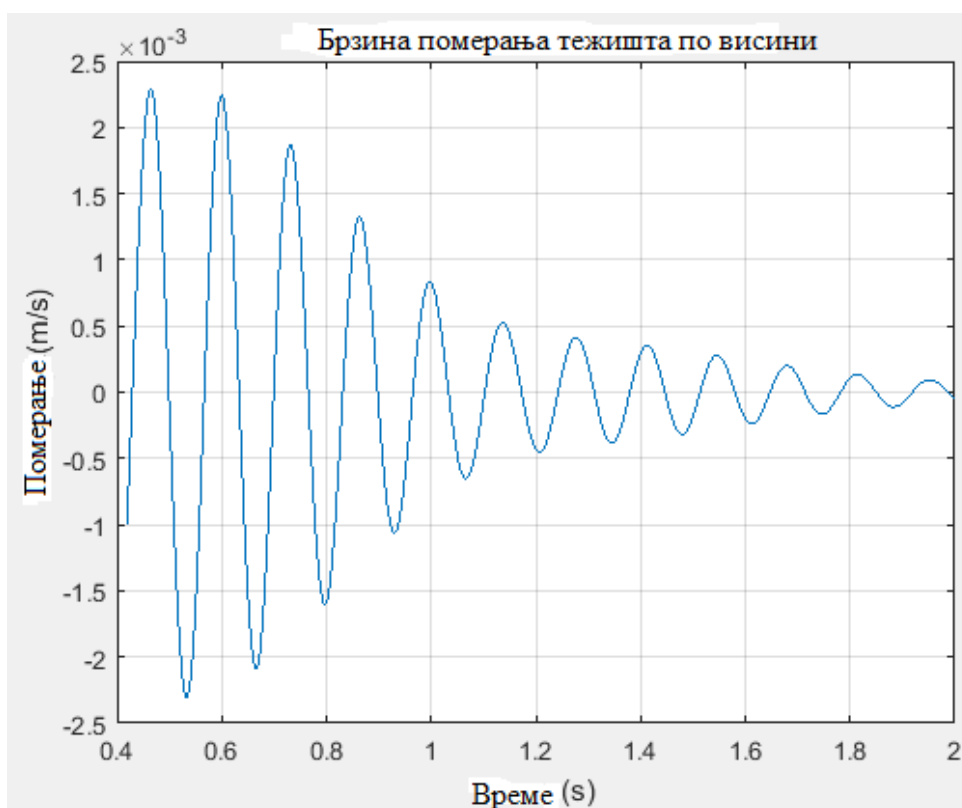
Слика 36 – Ваљање



Слика 37 – Брзина галопирања



Слика 38 – Брзина ваљања



Слика 39 – Брзина померања тежишта по висини

На дијаграму који приказује померање тежишта по висини може се видети да је амплитуда осциловања тежишта веома мала и износи мање од једног милиметра. Крај периода осциловања дешава се након 2 секунде. Ово говори да је систем доста стабилан током опаљења, али је ради прецизности пожељно дејство у кратким рафалима, до 10 метака, када су у питању копнени циљеви, да се не би јавило превелико растурање погодака. Померањем тежишта оруђа у хоризонталном правцу по оси возила, такође се добијају осцилације мале амплитуде, што је последица доста веће масе возила са оклопом у односу на топ, па се интеграција може вршити и на другим местима на шасији.

Галопирање такође садржи период осциловања у трајању од две секунде, с' тим што му је амплитуда 0.085 mrad . Галопирање представља ротацију система око попречне осе. Након око 0.6 секунди амплитуда се смањује и систем се враћа у равнотежни положај. Ваљање представља ротацију система око уздужне осе и у овом случају траје пуно краће од галопирања. Период осциловања траје нешто мање од 0.8 s, а оно што је упечатљиво на дијаграму је нагла промена угла ротације. Промена се дешава већ након 0.4 s, а убрзо након тога систем се враћа у равнотежни положај.

Брзина галопирања је изражена променом угла по времену. Највећи пик се достиже при углу од 1.5 mrad после 0.45 s, након чега долази до постепеног смањења угла галопирања све док се систем не врати у стање пре опаљења. Брзина ваљања је такође изражена променом угла по времену, али веома брзо опада до нуле, јер само ваљање траје од галопирања. На овом дијаграму највећи пик се достиже при углу од 3.4 mrad после приближно 0.45 s. Максимална брзина померања тежишта по висини износи 2.3 m/s , након чега постепено опада све док се тежиште не заустави у почетном положају на висини од 1.2 m.

Место интеграције наоружања на мобилну платформу веома утиче на промену генералисаних координата. У овом случају, где је топ интегрисан изнад тежишта камиона, добијају се прихватљиве вредности генералисаних координата. Промена места интеграције сигурно ће довести до повећања једне и смањења друге генералисане координате. На пример, померањем оруђа ка задњем делу возила добиће се већа вредност галопирања него што је она на тренутној позицији. Ако се топ не интегрише лево или десно од осе возила, већ остане на њој самој, неће доћи до велике промене величине ваљања, било да је топ интегрисан одмах иза кабине, изнад тежишта камиона или ближе задњем делу.

5. Закључак

Тема овог рада била је анализа понашања мобилне платформе при опаљењу. На почетку је описано шта све садржи проблем интеграције наоружања и какви се системи могу користити као платформа за њихов смештај. При трансформацији неког комерцијалног возила у борбено мора се водити рачуна о томе да оно мора да издржи сва оптерећења која се јављају услед дејства силе тежине наоружања са борбеним комплетом и оклопом, а првенствено оптерећења проузрокована опаљењем. Како би се све осцилације система возило – наоружање за кратко време пригушиле, мора се пажљиво конструисати систем еластичног ослањања, који има кључну улогу при апсорбовању енергије, створене услед опаљења.

Противавионски топ 40 mm Bofors L/70 ради по принципу дугог трзања цеви и затварача, услед чега се јавља велика инертност трзајућих маса, што негативно утиче на мобилну платформу, зато што је врло лако избацује из равнотежног положаја. При интеграцији овог топа на камион ФАП 2026 мора се пажљиво изабрати место интеграције, које ће омогућити малу промену генералисаних координата по времену. Исто тако, што се брже систем доведе у стање пре опаљења, то ће бити већа брзина гађања са малим растурањем погодака на циљу.

Почетак решавања проблема интеграције представља постављање и анализа теоријског модела, који мора да садржи податке о изабраном возилу и наоружању. Након тога приказан је прорачун оптерећења које мобилна платформа трпи приликом опаљења, а који подразумева следеће: дефинисање свих сила које оптерећују модел изабраног неоклопљеног возила, унутрашње балистички прорачун за изабрано наоружање, прорачун максималне силе трзања, силе отпора трзању и силе хидрауличне кочнице и постављање модела прорачуна отпора трзању. Унутрашње балистичким прорачуном добија се почетна брзина пројектила и расподела притиска у цеви у функцији времена као и његова максимална вредност. Израчунавањем вредности максималног притиска може се одредити сила трзања која има један од највећих утицаја на мобилну платформу. Битан параметар који је потребно одредити је сила отпора трзању и сила хидрауличне кочнице. У току унутрашње балистичког прорачуна варирана су два параметра: запремина барутне коморе и укупни пут пројектила у цеви.

Оптимизацијом је почетна брзина повећана на $v_0 = 1007.46 \text{ m/s}$, што је постигнуто повећањем укупног пута пројектила у цеви за 2.5%, а максимални притисак барутних гасова је за нијансу повећан на вредност $P_m = 319.9 \text{ bar}$ и налази се у дозвољеним границама, што је такође постигнуто повећањем укупног пута пројектила у цеви оруђа за 2.5%.

Како би се динамички представило понашање система возило – наоружање, постављен је математичко – механички модел осциловања мобилне платформе под дејством силе опаљења, који садржи диференцијалне једначине и три генералисане координате: вертикални положај тежишта, ротација око уздужне осе (ваљање) и ротација око попречне осе (галомирање). Овај математичко – механички модел користио се за израду симулационог модела осциловања мобилне платформе. Постављене су две матрице. Прва траје док делује побудна сила отпора трзању, а друга траје док је кретање платформе са наоружањем принудно – пригушног карактера. На основу добијених података и решавањем диференцијалних једначина добијају се конкретне једначине осциловања платформе, односно промена генералисаних координата у току времена.

Овакав систем се углавном не може решити аналитичким путем, те је због тога потребно његово нумеричко решавање коришћењем савремених рачунарских софтвера.

Решавање постављеног система једначина или једном речју симулација се може извршити у програмском пакету MATLAB, који даје и графички приказ добијених резултата. На основу добијених резултата може се кориговати постављени математичко – механички модел, место интеграције, начин везе, карактеристике система еластичног осциловања, одговарајућа брзина паљбе, са циљем да се одреди конфигурација система возило – наоружање, који је у стању да издржи настала оптерећења.

У симулационом моделу приказана је промена генералисаних координата по времену, као и промена њихових брзина по времену. Ове промене су сликовито представљене дијаграмима. У прорачуну нису вариране вредности полазних података, тако да су дијаграми добијени само за један случај. На дијаграмима је уочено кратко трајање периода и мала амплитуда осциловања, што значи да систем не трпи превелике осцилације приликом опаљења.

За место интеграције изабрано је тежиште возила, па су за тај случај прорачунати полазни подаци за програмско решење у коме се рачунају осцилације система возило – наоружање. На основу добијених дијаграма, закључује се да је овај начин интеграције повољан, јер систем лако подноси сва оптерећења проузрокована опаљењем и тежином наоружања. Добијене су мале вредности осцилација, које се лако пригушују системом еластичног ослањања, са коефицијентом пригушења 16000 Ns/m^2 .

Померање места интеграције наоружања ван уздужне осе возила није препоручљиво, јер би се стабилност система доста нарушила. Недостатак прорачуна је тај што се користила само максимална вредност силе која се преноси на платформу, уместо да се користи њена стварна промена. Како би се приказала реалнија слика о утицају интегрисаног наоружања на мобилну платформу, треба се поставити реалнији математички модел, који укључује више степени слободе и кретање већег броја маса. По питању система еластичног ослањања, код њега се могу варирати коефицијенти крутости и пригушења, како би се приказао њихов утицај на осцилације система или се евентуално може користити већ постојећи систем, који је у пракси више пута проверен.

Пошто се у овом раду код математичко – механичког модела користио систем са 3 степена слободе и симулација извршена само за један угао правца и елевације, као и за једну вредност коефицијената крутости и пригушења, даљи рад на овој теми би могао подразумевати симулацију у којој ће се ови параметри више пута варирати, користити систем са више степени слободе кретања, мењати место интеграције и приказати реалнија слика силе која се преноси на платформу, а не само њена максимална вредност, како би се још прецизније одредило најбоље место за интеграцију оруђа. Исто тако, у даљем раду на овој теми, пошто је маса возила пуно већа од масе оруђа, може се конструисати шасија мање масе, што може послужити при испуњењу захтева за конструкцијом лакшег возила, које ће имати бољу покретљивост, а притом и задржати отпорност на оптерећења проузрокована тежином наоружања и процесом опаљења. Пошто је у овом случају симулација извршена за возило код кога друга и трећа осовина имају еквивалентне коефицијенте крутости и пригушења, тј. понашају се као да су спрегнуте, у даљем раду на овој теми би могао да се користи систем код кога сваки точак има своје коефицијенте крутости и пригушења.

6. Литература

- [1] Ристић З. Јаковљевић М. „, Основи наоружања – конструкција артиљеријског оруђа “, Књига, Војна академија, Београд, 2001.
- [2] <https://www.google.com/search?q=samohodna+top+haubica+nora>, 13.05.2018.
- [3] <https://www.google.com/Самоходни+минобацач+240+mm+Тулипан>, 13.05.2018.
- [4] <https://www.google.com/search?q=borbeno+vozilo+lazar>, 13.05.2018.
- [5] <https://www.google.com/url?sa=i&source=images&cd=&cad=rja&uact>, 13.05.2018.
- [6] <http://i.imgur.com/l7dLMod.jpg>, 13.05.2018.
- [7] https://sr.wikipedia.org/sr-el/ФАП_2026_БС/АВ_6_x_6, 10.01.2018.
- [8] Бродски противавионски топ 40 mm D.70 M.55 m и M.70 „ Vofors “, Књига 1, Техничко упутство, 1975.
- [9] <https://www.google.rs/url?sa=i&rct=j&q=&esrc=s&source=images&cd=&cad>, 05.01.2018.
- [10] др Александар Кари, дипл. инж. предавања из предмета „ Интеграција наоружања на мобилне платформе “, Факултет инжењерских наука, Крагујевац, 2017.
- [11] „ Силе које делују на моторно возило “, Скрипта, 25.05.2018.
- [12] Љ. Танчић, Збирка задатака из унутрашње балистике, Сектор за школство, обуку, научну и издавачку делатност, Београд, 1999.
- [13] Љ. Танчић, Унутрашње балистичко пројектовање, Уџбеник, Медија центар „ Одбрана “ Београд, 2014.

Списак слика

Слика 1 – Самоходна топ – хаубица 155 mm Нора Б52	2
Слика 2 – Самоходни минобацач 240 mm Туилпан 2S4	3
Слика 3 – Оклопно возило Лазар 3	4
Слика 4 – <i>Swing mount</i> са интегрисаним митраљезом	4
Слика 5 – Митраљез интегрисан на возило помоћу туреле	5
Слика 6 – ФАП 2026 БС/АВ 6х6	6
Слика 7 – Противавионски топ 40 mm Bofors L/70	9
Слика 8 – Дуго трзање цеви	11
Слика 9 – Топ у тренутку опаљења	11
Слика 10 – Ток трзања	12
Слика 11 – Крај трзања	12
Слика 12 – Почетак враћања	13
Слика 13 – Крај циклуса	13
Слика 14 – Статичка расподела тежине	14
Слика 15 – Аналитички поступак одређивања тежишта камиона ФАП 2026	16
Слика 16 – Изометријски поглед	20
Слика 17 – Основне димензије барутног зрна	20
Слика 18 – Крај прогресивне фазе сагоревања	23
Слика 19 – Прорачун вредности ук на крају сагоревања	23
Слика 20 – Промена максималног притиска барутних гасова у току времена	25
Слика 21 – Промена почетне брзине у току времена	26
Слика 22 – Утицај промене запремине барутне коморе на притисак барутних гасова у цеви	26
Слика 23 – Утицај промене запремине барутне коморе на брзину пројектила	27
Слика 24 – Утицај промене укупног пута пројектила у цеви оруђа на притисак барутних гасова	27
Слика 25 – Утицај промене укупног пута пројектила у цеви на брзину пројектила	28
Слика 26 – Импулс силе трзања	29
Слика 27 – Хидраулична кочница	32
Слика 28 – Дијаграм трзања	32
Слика 29 – Дијаграм враћања	33
Слика 30 – Тродимензионални приказ динамичког модела платформе	34
Слика 31 – Ослањање гледано са бочне стране	35
Слика 32 – Ослањање гледано са предње стране	36
Слика 33 – Место интеграције оруђа	42
Слика 34 – Померање тежишта по висини	43
Слика 35 – Галопирање	43
Слика 36 – Ваљање	44
Слика 37 – Брзина галопирања	44
Слика 38 – Брзина ваљања	45
Слика 39 – Брзина померања тежишта по висини	45

Списак табела

Табела 1 – <i>Технички подаци камиона ФАП 2026 БС/АВ 6х6</i>	7
Табела 2 – <i>Карактеристике противавионског топа 40 mm Bofors L/70</i>	10
Табела 3 – <i>Полазни подаци за УБ прорачун методом Рунге – Кута</i>	25
Табела 4 – <i>Полазни подаци за програмско решење</i>	41

ПРИЛОГ 1

```

C *****
C *
C * UNUTRASNJE BALISTICKI PRORACUN PO METODI RUNGE-KUTA *
C *
C * POLAZNI PODACI *
C *
C * W0 - ZAPREMINA BARUTNE KOMORE *
C * SC - POPRECNI PRESEK CEVI *
C * XU - UKUPNI PUT PROJEKTILA U CEVI *
C * FI - KOEFICIJENT FIKTIVNOSTI *
C * EM - MASA PROJEKTILA *
C * AMB - MASA BARUTA *
C * ROB - ZAPREMINSKA MASA BARUTA *
C * ALFA - KOVOLUMEN BARUTNIH GASOVA *
C * AK - ODNOS SPECIFICNIH TOPLOTA *
C * R0 - POLOVINA DEBLJINE BARUTNOG ZRNA *
C * AKAPA - KOEFICIJENT OBLIKA "KAPA-1" *
C * ALAM - KOEFICIJENT OBLIKA "LAMDA-1" *
C * FB - SPECIFICAN RAD BARUTNIH GASOVA *
C * P0 - PRITISAK FORSIRAWA *
C * UZ0 - JEDINICNA BRZINA SAGOREVANJA BARUTA *
C * GKV - DOZVOLJENA GRESKA RACUNANJA BRZINE *
C * GKX - DOZVOLJENA GRESKA RACUNANJA PUTA *
C * GKT - DOZVOLJENA GRESKA RACUNANJA VREMENA *
C * ORUDJE - NAZIV ORUDJA *
C * BARUT - OZNAKA BARUTA *
C *
C * Program sastavio Tancic dr Ljubisa *
C *****
C *
PROGRAM JKMKUT
CHARACTER OR*16,BARUT*8
DIMENSION AK(5),AKT(5)
COMMON EM,FI,AIK,H,VL,SC,AMB,FB,A,XD,Y0,YK
COMMON AKAP1,ALAM1,AMI1,PSIK,AKAP2,ALAM2
OPEN (60,FILE='UJK152')
OPEN (61,FILE='UJK152')
READ(60,*) W0,SC,XU,EM,AMB,TETA,ROB,ALFA
READ(60,*) R0,DM,DV,C,FI
READ(60,*) FB,P0,UZ0,V0,X0,T0
READ(60,*) OR, BARUT
AM=SQRT(3.)*(4*R0+DM)/3+4*R0+2*DM
HM=SQRT(3.)*AM/2
Q=3*AM*HM-(19*3.14/4)*(DM**2)

```

PI=R0*(3*AM+SQRT(3.)*2*HM+19*3.14*DM)

R=(R0**2)*(SQRT(3.)*2-19*3.14)

BET=2*R0/C

AKAP1=PI/Q+BET

ALAM1=(-R/Q-PI*BET/Q)/AKAP1

AMI1=(R*BET/Q)/AKAP1

AKAP=AKAP1*(1-AMI1/2)

ALAM=1/AKAP-1

R2=(DM/2+R0)/4

YK=1+R2/(DM/2+R0)

PSIK=AKAP1*(1+ALAM1+AMI1)

AKAP2=2*(1-PSIK)/(YK-1)

ALAM2=-1/(2*(YK-1))

```
C *****
C *
C * PRORACUN KONSTANTI I PRETHODNOG PERIODA *
C *
C *****
```

DEL=AMB/W0

AIK=R0/UZ0

VL=SQRT(2./FI*FB/EM*AMB/TETA)

XD=W0/SC*(1.-DEL/ROB)

A=AMB/SC*(ALFA-1./ROB)

PSI0=(1./DEL-1./ROB)/(FB/P0+ALFA-1./ROB)

SIG0=SQRT(1.+4*ALAM/AKAP*PSI0)

Y0=2.*PSI0/((SIG0+1.)*AKAP)

VK1=SC/FI*AIK/EM*(1.-Y0)

VK=SC/FI*AIK/EM*(YK-Y0)

WRITE(61,4) OR,BARUT

4 FORMAT(' ',16X,'UB-PRORACUN PO METODI RUNGE-KUTA',/

+ ,22X,'S KONSTANTNIM KORAKOM',/

+ ,',22X,'ORUDJE ',A16,/,26X,'BARUT ',A8,///)

WRITE(61,5)W0,SC,XU,FI,EM,AMB,FB,ROB,ALFA,TETA,R0,DM,DV,

+C,AKAP1,ALAM1,AMI1,UZ0,P0

5 FORMAT(' ',19X,'JEDINICE PO SI SISTEMU MERA',///,26X,

+'POLAZNI PODACI',/,2X,'W0=',F7.5,2X,'SC=',F7.5,

+6X,'XU=',F4.2,8X,'FI=',F6.4,5X,'M=',F6.3,/,2X,

+'MB=',F6.3,3X,'FB=',F8.0,5X,'ROB=',F5.0,6X,'ALFA=',

+F7.5,2X,'TETA=',F7.5,/,2X,'R0=',F7.5,2X,'DM=',F7.5,

+6X,'DV=',F7.5,5X,'C=',F7.5,5X,'KAPA=',F7.5,/,2X,

+'LAMDA=',F7.5,15X,'MI=',F7.5,5X,'UZ0=',E8.2,2X,'P0=',

+E8.2,///)

WRITE(61,6) Y0,PSI0,SIG0

6 FORMAT(' ',24X,'PRETHODNI PERIOD',/,11X,'Y0=',F7.5,5X,

+'PSI0=',F7.5,5X,'SIG0=',F7.5,///)

```

WRITE(61,7)
7 FORMAT(' ',27X,'PRVI PERIOD',/, ' ',27X,'*PRVA FAZA*',/,
+4X,'T',8X,'PSI',8X,'V',9X,'X',9X,'P',10X,'T',/)

```

```

C *****
C *
C * PRORACUN OBA PERIODA U 'DO 8 ...' *
C * PN - NEZAVISNA PROMENLJIVA *
C * PZ - ZAVISNA PROMENLJIVA *
C *
C *****

```

```

I=0
RP=0
DO 8 IPER=1,3
IF(IPER-2) 91,92,10
91 H=VK1/20
PN0=V0
PNK=VK1
PZ0=X0
GO TO 11
92 H=(VK-VK1)/10
WRITE(61,88)
88 FORMAT(/,27X,'***DRUGA FAZA***',/)
PN0=VK1
PNK=VK
PZ0=PZ
GO TO 11
10 H=(XU-PZ0)/10
WRITE(61,44)
44 FORMAT(///,27X,'DRUGI PERIOD',/,14X,'T',6X,'X',
+8X,'V',10X,'P',10X,'T',/)
X0=PZ0
PZ0=PN0
PN0=X0
PNK=XU
11 I=I+1

```

```

C *****
C *
C * PRORACUN 5 PRIBLIZENJA ZA ZAVISNU *
C * PROMENLJIVU I VREME *
C *
C *****

```

```

DO 15 J=1,5
  K=J*(5-J)/2-1
  IF(J-1) 16,16,17
16 PN=PN0
  PZ=PZ0
  GO TO 20
17 IF(J-5) 18,19,19
18 PN=PN0+H/K
  PZ=PZ0+AK(J-1)/K
  GO TO 20
19 PZ=PZ0+2*AK(2)-AK(1)
20 IF(IPER-2) 21,21,22
21 CALL KOEF(IPER,PN,PZ,PSI,AK(J),AKT(J),XPSI)
  GO TO 15
22 CALL KOEF(IPER,PZ,PN,PSI,AK(J),AKT(J),XPSI)
15 CONTINUE

```

```

C *****
C *
C * PRORACUN ZAVISNE PROMENLJIVE I VREMENA *
C *****
  PZ=PZ0+(AK(1)+2.*AK(2)+2.*AK(3)+AK(4))/6.
  T=T0+(AKT(1)+2.*AKT(2)+2.*AKT(3)+AKT(4))/6.
C *****
C *
C * PRORACUN PRITISKA *
C *
C *****

```

```

  IF(IPER-2) 23,23,24
23 P=FB*AMB/SC*(PSI-PN**2/VL**2)/(XPSI+PZ)
  GO TO 25
24 P=FB*AMB/SC*(1.-PZ**2/VL**2)/(XPSI+PN)
25 IF(IPER.EQ.3) GO TO 41
  IF(PZ.GT.XU) GO TO 333
  WRITE(61,39) I,PSI,PN,PZ,P,T
39 FORMAT(' ',I4,F13.6,F9.2,F10.3,F13.0,F8.4)
40 PZ0=PZ
  PN0=PN
  T0=T

```

```

      IF(RP.EQ.2) GO TO 11
      IF(ABS(PN-PNK).LE.0.001) GO TO 80
      GO TO 11
80  IF(RP.EQ.1) GO TO 43
      RP=RP+1
      GO TO 8
41  WRITE(61,42) I,PN,PZ,P,T
42  FORMAT(' ',I14,F9.3,F9.2,F13.0,F9.4)
      IF(ABS(PN-PNK).LE.0.001) GO TO 8
      GO TO 40
43  PZ0=PZ
      PN0=PN
      T0=T
      RP=RP+1
      8 CONTINUE
333 CLOSE (60)
      CLOSE (61)
      STOP
      END
C *****
C *
C *   PODPROGRAM ZA PRORACUN JEDNOG PRIBLIZENJA   *
C *
C *****
      SUBROUTINE KOEF(IP,V,X,PSI,BK,BKT,XPSI)
      COMMON EM,FI,AIK,H,VL,SC,AMB,FB,A,XD,Y0,YK
      COMMON AKAP1,ALAM1,AMI1,PSIK,AKAP2,ALAM2
      IF(IP.EQ.3) GO TO 1
      Y=Y0+FI/SC*EM/AIK*V
      IF(Y.GT.1) GO TO 203
      PSI=AKAP1*Y*(1+ALAM1*Y+AMI1*(Y**2))
      GO TO 201
203 IF((Y-1).GT.(YK-1)) Y=YK
      PSI=PSIK+AKAP2*(Y-1)*(1+ALAM2*(Y-1))
201 XPSI=XD-A*PSI
      P=FB*AMB/SC*(PSI-V**2/VL**2)/(XPSI+X)
      BK=H*FI*EM/SC*V/P
      BKT=H*FI/SC*EM/P
      RETURN
1  PSI=1.
      XPSI=XD-A
      P=FB*AMB/SC*(1.-V**2/VL**2)/(XPSI+X)
      BK=H*SC/FI*P/EM/V
      BKT=H/V
      RETURN
      END

```

ПРИЛОГ 2

- Датотека IJK30 са излазним подацима:

Претходни период		
$y_0 = 0.03977$	$\psi_0 = 0.03120$	$\sigma_0 = 1.02301$

Први период					
Прва фаза					
I	ψ	V	X	P	T
1	0.068294	28.18	0.006	65256460	0.0005
2	0.106107	56.37	0.017	98752984	0.0008
3	0.144238	84.55	0.031	129776368	0.0010
4	0.182682	112.73	0.046	158229808	0.0011
5	0.221435	140.91	0.062	184102160	0.0012
6	0.260490	169.10	0.080	207425424	0.0014
7	0.299844	197.28	0.098	228257232	0.0015
8	0.339490	225.46	0.118	246672112	0.0015
9	0.379424	253.64	0.138	262756480	0.0016
10	0.419640	281.83	0.160	276605440	0.0017
11	0.460134	310.01	0.183	288320480	0.0018
12	0.500900	338.19	0.208	298007840	0.0019
13	0.541933	366.37	0.233	305777120	0.0019
14	0.583228	394.56	0.261	311740160	0.0020
15	0.624780	422.74	0.289	316010112	0.0021
16	0.666583	450.92	0.320	318490416	0.0022
17	0.708633	479.10	0.352	319624352	0.0022
18	0.750924	507.29	0.386	319493984	0.0023
19	0.793451	535.47	0.422	319219712	0.0024
20	0.836210	563.65	0.460	318649824	0.0024

Друга фаза					
I	Ψ	V	X	P	T
21	0.867330	578.33	0.481	318400128	0.0025
22	0.895174	593.00	0.502	318325088	0.0025
23	0.919743	607.68	0.523	318251968	0.0025
24	0.941036	622.35	0.546	315314784	0.0026
25	0.959053	637.03	0.569	310514112	0.0026
26	0.973794	651.70	0.593	304056320	0.0026
27	0.985259	666.38	0.618	296053344	0.0027
28	0.993448	681.05	0.645	286621792	0.0027
29	0.998362	695.73	0.673	275882432	0.0028
30	1.000000	710.40	0.703	263959312	0.0028

Други период				
I	X	V	P	T
31	0.852	771.48	213904272	0.0030
32	1.001	818.30	178464688	0.0032
33	1.150	855.82	152213472	0.0034
34	1.300	886.83	132082368	0.0035
35	1.449	913.06	116214680	0.0037
36	1.598	935.66	103425488	0.0039
37	1.747	955.42	92925408	0.0040
38	1.897	972.91	84169640	0.0042
39	2.046	988.53	76770880	0.0043
40	2.195	1002.61	70446728	0.0045

ПРИЛОГ 3

```
% *****
% PRORACUN OSCILACIJA SISTEMA VOZILO-NAORUZANJE
% *****

clc;close all;clear all;
mv=9000; % masa vozila, kg
mo=3500; % masa oruzja, kg
m=mv+mo; % masa sistema, kg
Jy=57950.2; % moment inercije, kg*m2
Jx=12048.7; % moment inercije, kg*m2
Htv=1.2; % visina tezista, m
av=2.517; % rastojanje od prednje osovine, m
bv=1.845; % rastojanje od zadnje osovine, m
s=2.39; % polovina medjuosovinskog rastojanja; m
k=16000; % koeficijent prigusenja, N*s/m2
Fp=15435; %N sila na oprugu
f1=0.002; %m ugib
alfa=10*pi/180; %ugao elevacije, rad
beta=45*pi/180; %azimut, rad
c=Fp/f1; % koeficijent krutosti opruga, N/m
R=17150; % N sila otpora trzanju koja se prenosi
h=0.5; %vertikalno rastojanje do oruzja, m
d=0; %horizontalno rastojanje do oruzja, m
b=(mv*bv+mo*(bv-d))/m;
Ht=(mv*Htv+mo*(Htv+h))/m;
a=4.362-bv;
k11=4*k;
k12=2*k*a-2*k*b;
k21=2*k*a-2*k*b;
k22=2*k*(a^2)+2*k*(b^2);
k33=2*k*(s^2)+2*k*(s^2);
c11=4*c;
c12=2*c*a-2*c*b;
c21=2*c*a-2*c*b;
c22=2*c*(a^2)+2*c*(b^2);
c33=2*c*(s^2)+2*c*(s^2);
Q1=-R*(cos(beta))*(sin(alfa))+4*Ht*c;
Q2=R*(cos(beta))*(cos(alfa))*h+R*(cos(beta))*(sin(alfa))*d-2*Ht*(-c*a+c*b);
Q3=R*(sin(beta))*(cos(alfa))*h;
tspan=0:0.0001:0.419;
F=@(t,y) [y(4);y(5);y(6);-(k11/m)*y(4)-(k12/m)*y(5)-(c11/m)*y(1)-(c12/m)*y(2)+Q1/m;...
-(k21/Jy)*y(4)-(k22/Jy)*y(5)-(c21/Jy)*y(1)-(c22/Jy)*y(2)+Q2/Jy;...
-(k33/Jx)*y(6)-(c33/Jx)*y(3)+Q3/Jx];
y0=[Ht;0;0;0;0;0];
70
```

```

[t,y]=ode45(F,tspan,y0);
y1=y(:,1);
y1k=y1(end)
y2=y(:,2);
y2k=y2(end)
y3=y(:,3);
y3k=y3(end)
y4=y(:,4);
y4k=y4(end)
y5=y(:,5);
y5k=y5(end)
y6=y(:,6);
y6k=y6(end)
figure(1)
plot(t,y(:,1))
title('Pomeranje tezista po visini')
xlabel('Vreme(s)')
ylabel('Pomeranje(m)')
grid on
hold on
figure(2)
plot(t,y(:,2))
title('Galopiranje')
xlabel('Vreme(s)')
ylabel('Ugao(rad)')
grid on
hold on
figure(3)
plot(t,y(:,3))
title('Valjanje')
xlabel('Vreme(s)')
ylabel('Ugao(rad)')
grid on
hold on
R=0;
Q1=-R*(cos(beta))*(sin(alfa))+4*Ht*c;
Q2=R*(cos(beta))*(cos(alfa))*h+R*(cos(beta))*(sin(alfa))*d-2*Ht*(-c*a+c*b);
Q3=R*(sin(beta))*(cos(alfa))*h;
tspan=0.419:0.0001:2;
F=@(t,y) [y(4);y(5);y(6);-(k11/m)*y(4)-(k12/m)*y(5)-(c11/m)*y(1)-(c12/m)*y(2)+Q1/m;...
-(k21/Jy)*y(4)-(k22/Jy)*y(5)-(c21/Jy)*y(1)-(c22/Jy)*y(2)+Q2/Jy;...
-(k33/Jx)*y(6)-(c33/Jx)*y(3)+Q3/Jx];
y0=[y1k;y2k;y3k;y4k;y5k;y6k];
[t,y]=ode45(F,tspan,y0);
71
figure(1)

```

```

plot(t,y(:,1))
title('Pomeranje tezista po visini')
xlabel('Vreme(s)')
ylabel('Pomeranje(m)')
grid on
figure(2)
plot(t,y(:,2))
title('Galopiranje')
xlabel('Vreme(s)')
ylabel('Ugao(rad)')
grid on
figure(3)
plot(t,y(:,3))
title('Valjanje')
xlabel('Vreme(s)')
ylabel('Ugao(rad)')
grid on
figure(4)
plot(t,y(:,4))
title('Brzina pomeranja tezista po visini')
xlabel('Vreme(s)')
ylabel('Pomeranje(m/s)')
grid on
figure(5)
plot(t,y(:,5))
title('Brzina galopiranja')
xlabel('Vreme(s)')
ylabel('Ugao(rad/s)')
grid on
figure(6)
plot(t,y(:,6))
title('Brzina Valjanja')
xlabel('Vreme(s)')
ylabel('Ugao(rad/s)')
grid on

```