

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: 309/2016

Никола М. Радовановић
Оптерећење горњег лафета хаубице
калибра 152 mm
мастер рад

Комисија за преглед и одбрану:

1. Доц. др Александар Кари дипл. инж. - ментор
2. Проф. др Богдан Недић - председник
3. Проф. др Бранко Тадић – члан комисије

Датум
одбране: _____

Оцена: _____

У оквиру овог мастер рада кандидат треба да

1. Опише место и улогу горњег лафета у конструкцији артиљеријског оруђа.
2. Опише горњи лафет и силе које делују на лафет код избраног оруђа.
3. Изврши аналитички прорачун напрезања горњег лафета код топ-хаубице 152 mm НОРА-А.
4. Прикаже 3D модел тела горњег лафета топ-хаубице 152 mm НОРА-А.
5. Прикаже резултате симулације напрезања горњег лафета код наведеног оруђа.

Препоручена литература:

З. Ристић, М. Јаковљевић: Основи наоружања (артиљеријска оруђа), ВИЗ – секција за штампање и умножавање, Београд, 2003.

З. Ристић: Збирка задатака из механике наоружања са изводима из теорије, ВИЗ – секција за штампање и умножавање, Београд, 2004.

М. Милић: Правило хаубица-топ 152 mm М-84, Новинско-издавачка установа "Војска", Београд, 1997.

Крагујевац, новембар 2017.

Ментор:
Доц. др Александар Кари дипл. инж.

Садржај

РЕЗИМЕ	4
1. УВОД.....	5
2. УОПШТЕ О АРТИЉЕРИЈСКОМ НАОРУЖАЊУ	6
2.1. Класификација артиљеријских оруђа.....	6
2.2. Главни делови артиљеријског оруђа.....	7
3. МЕСТО И УЛОГА ГОРЊЕГ ЛАФЕТА У КОНСТРУКЦИЈИ АРТИЉЕРИЈСКОГ ОРУЂА.....	8
3.1. Колевка	9
3.1.1. Облици колевке.....	9
3.2. Горњи лафет	13
4. ОПТЕРЕЋЕЊЕ ТЕЛА ГОРЊЕГ ЛАФЕТА ТОП-ХАУБИЦЕ 152 mm НОРА-А.....	17
4.1. Топ-хаубица 152 mm НОРА-А	17
4.2. Горњи лафет топ-хаубице 152 mm НОРА-А	20
4.3. Силе које делују на горњи лафет.....	22
4.4. Инверзни поступак прорачуна кретања трзајуће масе оруђа топ-хаубица 152 mm НОРА-А.....	24
4.4.1. Инверзни поступак прорачуна кретања при трзању	25
4.4.2. Први период трзања	25
4.4.3. Други период трзања	30
4.4.4. Полазни подаци за прорачун	32
4.4.5. Резултати прорачуна	34
4.5. Аналитички прорачун оптерећења горњег лафета	46
5. СИМУЛАЦИЈА ОПТЕРЕЋЕЊА ГОРЊЕГ ЛАФЕТА	52
5.1. 3D модел тела горњег лафета.....	52
5.2. Мерење деформација горњег лафета.....	55
5.3. Анализа методом коначних елемената	56
6. ЗАКЉУЧАК.....	59
ЛИТЕРАТУРА.....	62
ПРИЛОЗИ.....	63

Summary

Masters thesis contains load calculation of upper mount of the artillery gun-howitzer 152 mm NORA-A. A short description of artillery weapons is given, and it is explained the place and role of the upper mount in the construction artillery weapon. An inverted procedure of calculating the movement of the recoil mass of the gun-howitzer 152 mm was done, and the analytical calculation of the upper mount. The 3D model of the upper mount was made in the CATIA program, which was used to simulate the finite element load in the FEMAP software package.

Key words: artillery gun, gun-howitzer, recoil, mount, load, stress, simulation, finite element

Резиме

Мастер рад садржи прорачун оптерећења горњег лафета артиљеријског оруђа топ-хаубица 152 mm НОРА-А. Дат је кратак опис артиљеријског оруђа, и објашњено је место и улога горњег лафета у конструкцији артиљеријског оруђа. Урађен је инверзни поступак прорачуна кретања трзајуће масе оруђа топ-хаубица 152 mm, а затим и аналитички прорачун оптерећења горњег лафета. 3D модел самог тела горњег лафета је измоделиран у програму CATIA, који је употребљен за симулацију оптерећења методом коначних елемената у програмском пакету FEMAP.

Кључне речи: артиљеријско оруђе, топ-хаубица, трзање, лафет, оптерећење, напрезање, симулација, коначни елемент

1. УВОД

У овом мастер раду биће размотрени намена горњег лафета, конструкцијска решења везе горњег и доњег лафета, инверзни поступак прорачуна трзајуће масе и понашање тела горњег лафета у току опаљења артиљеријског оруђа, у конкретном случају топ-хаунице 152 mm НОРА-А.

У почетном делу даће се уопштене констатације о артиљеријском оруђу, укључујући његову класификацију и главне делове. Затим ће бити описано место и улога горњег лафета, склоп горњег лафета и начин остваривања везе између горњег и доњег лафета. Даље, даће се опис топ-хаунице НОРА-А заједно са тактичко-техничким и балистичким подацима, као и опис њеног горњег лафета. Следи анализа сила које делују на тело горњег лафета. Да би било могуће извршити прорачун свих сила које оптерећују горњи лафет потребно је имати дефинисану вредност силе отпора трзању. Ова сила ће бити одређена инверзним поступком прорачуна трзајуће масе. Инверзним поступком трзања врши се идентификација понашања противтрзајућег уређаја при опаљењу метка. Противтрзајући уређај обезбеђује еластичну везу између цеви и лафета артиљеријског лафета. Пројектовањем противтрзајућег уређаја дефинисани су бројни параметри и карактеристике, пре свега, хидрауличне кочнице и повратника. На основу математичког модела формираће се програмски модел на рачунару. Уз помоћ овог програма написаног у Матлабу, помоћу дијаграма и табела биће представљен закон промене силе укупног отпора трзању, заједно са карактеристикама хидрауличне кочнице и повратника на одабраном примеру оруђа. Да би било могуће даље вршити симулацију оптерећења, претходно ће бити формиран 3D модел тела горњег лафета топ-хаунице 152 mm НОРА-А помоћу инжењерског програма за моделирање CATIA. Моделирање ће бити извршено на основу техничког цртежа тела горњег лафета. За анализу напрезања тела горњег лафета методом коначних елемената биће искоришћен програм FEMAP. Претходно креиран CAD модел ће се увести у програм FEMAP, затим ће се аутоматски генерисати мрежа, и као коначни елемент биће изабран тетраедар. Доња кружна плоча ће бити фиксирана, и ту неће долазити до померања. Сила отпора трзању ће заједно са тежинама појединих склопова (усвојених на основу постојећих података о масама појединих склопова хаунице) представљати оптерећење тела горњег лафета приликом симулације. Овако конципирана симулација оптерећења ће дати резултате напрезања тела горњег лафета топ-хаунице 152 mm НОРА-А.

2. УОПШТЕ О АРТИЉЕРИЈСКОМ НАОРУЖАЊУ

Артиљеријско оруђе спада у такозвану групу класичног наоружања. Појам „класично наоружање“ је настао у време појаве и брзог развоја бројних средстава масовног уништења, тј. нуклеарних, хемијских и биолошких борбених средстава. Како се готово паралелно са развојем средстава масовног уништења развијала и ракетна техника, посебно техника електронских вођених пројектила, то је све оно што је раније постојало у наоружању, па и артиљеријско оруђе постало на извештан начин „класично“.

Савремено артиљеријско оруђе представља сложено борбено средство способно да испали пројектил на велику удаљеност и изненадно уништи циљ. Циљеви које артиљерија уништава могу бити: покретни и непокретни, заклоњени и незаклоњени, тачкасти и површински, вертикални или хоризонтални, на земљи, у ваздуху или на води итд. У зависности од врсте циља примењују се оруђа различитих калибара и типова, која имају различите пројектиле и путање пројектила.

Принцип рада готово свих артиљеријских оруђа је исти. Он је заснован на коришћењу енергије сагоревања барутног пуњења у цеви оруђа за време процеса опаљења.

На изабрани циљ што пре и што прецизније упутити што је могуће већи број што ефикаснијих пројектила – одувек је била основна улога артиљерије. Та се улога није мењала, мењали су се само циљеви на које је требало дејствовати: постојали су све покретљивији, масовнији и боље заштићени. Захтеви за ефикасно дејство против циљева таквих карактеристика значајно су утицали на развој артиљеријских оруђа. Тако су савремена артиљеријска оруђа постала део моћног система високих перформанси, способност за извршење широког распона борбених задатака у различитим условима употреба [1] [2].

2.1 Класификација артиљеријских оруђа

Разноврсни борбени задаци које решава артиљерија захтевали су развој више врста оруђа која су различита по калибру, начину лафетације и кретања, типу и борбеној намени. У вези са тим, класификација оруђа се може извршити на основу више критеријума и то:

- По начину опаљења и лансирања пројектила из цеви:
 - класична (конвенционална),
 - бестрзајна и
 - ракетна (реактивна).

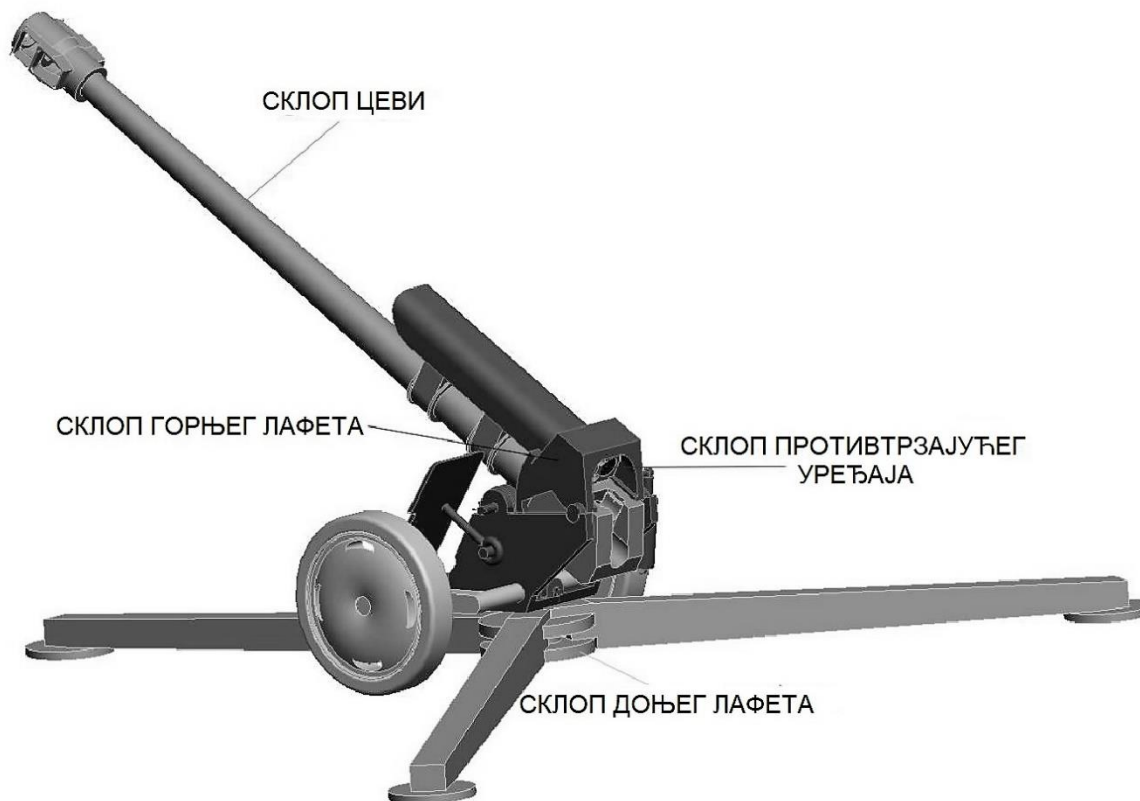
- Према калибру
-оруђа малог калибра (од 30 *mm* до 100 *mm*),
-оруђа средњег калибра (од 105 *mm* до 155 *mm*) и
-оруђа великог калибра (преко 155 *mm*).
- Према начину лафетације:
-стационарна
-преносна(лака),
-вучна и
-самопокретна и самоходна.
- Према месту дејства и врсти циља:
-земаљска (противоклопна и противавионска у KoB),
-тенковска (куполне уградње),
-ваздухопловна,
-бродска и
-обалска.
- Према конструктивно-балистичким особинама:
-топови,
-хаубице,
-топ-хаубице,
-минобацачи и
-ракетни лансери (вишецевни лансери ракета) [1]

2.2 Главни делови артиљеријског оруђа

Без обзира на велику разноврсност облика и типова артиљеријских оруђа, његову конструкцију карактеришу неколико главних делова који су типични и заједнички за већину тих оруђа. Ти делови су:

- склоп цеви са задњаком, затварачем и гасним уређајима,
- противтрзајући уређаји (ПТУ),
- склоп горњег лафета са деловима и механизмима,
- склоп доњег лафета са деловима и
- нишанске справе и уређаји.

На слици 2.2.1. су приказани основни склопови код једног савременог вучног артиљеријског оруђа.



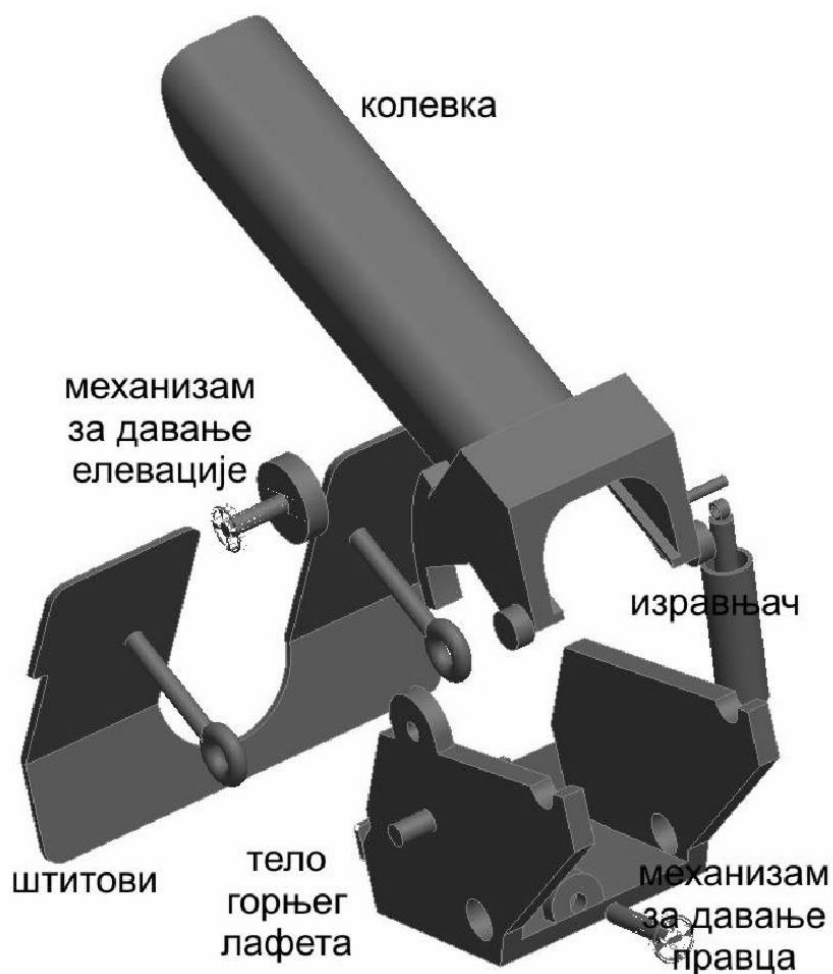
Слика 2.2.1. Основни склопови вучног артиљеријског оруђа [3]

Конструктивна решења других типова оруђа имају сличну структуру као у случају вучних оруђа, али су ипак специфична и нешто другачија с обзиром на начин лафетације и елементе везе делова лафета [1].

3. МЕСТО И УЛОГА ГОРЊЕГ ЛАФЕТА У КОНСТРУКЦИЈИ АРТИЉЕРИЈСКОГ ОРУЂА

Склоп горњег лафета представља носач или постоље склопа цеви којим се обезбеђује вођење цеви и усмерено кретање при опаљењу, као и усмеравање цеви по правцу и висини ради извршења гађања. Овај склоп чине: колевка, тело горњег лафета, механизми (справе) за навођење цеви у простору и механизми за уравнотежавање нагибног склопа (изравњачи), (слика 3.1.).

Нагибни или осцилујући склоп оруђа је комплетан склоп цеви са колевком који ротацијом у односу на тело горњег лафета омогућује закретање цеви у читавом дијапазону елевационих углова. Веза склопа горњег лафета са телом доњег лафета остварена је окретним ослонцем помоћу лежајева. Због тога се горњи лафет често назива окретним или вртљивим склопом оруђа [1].



Слика 3.1. Делови склопа горњег лафета [3]

3.1 Колевка

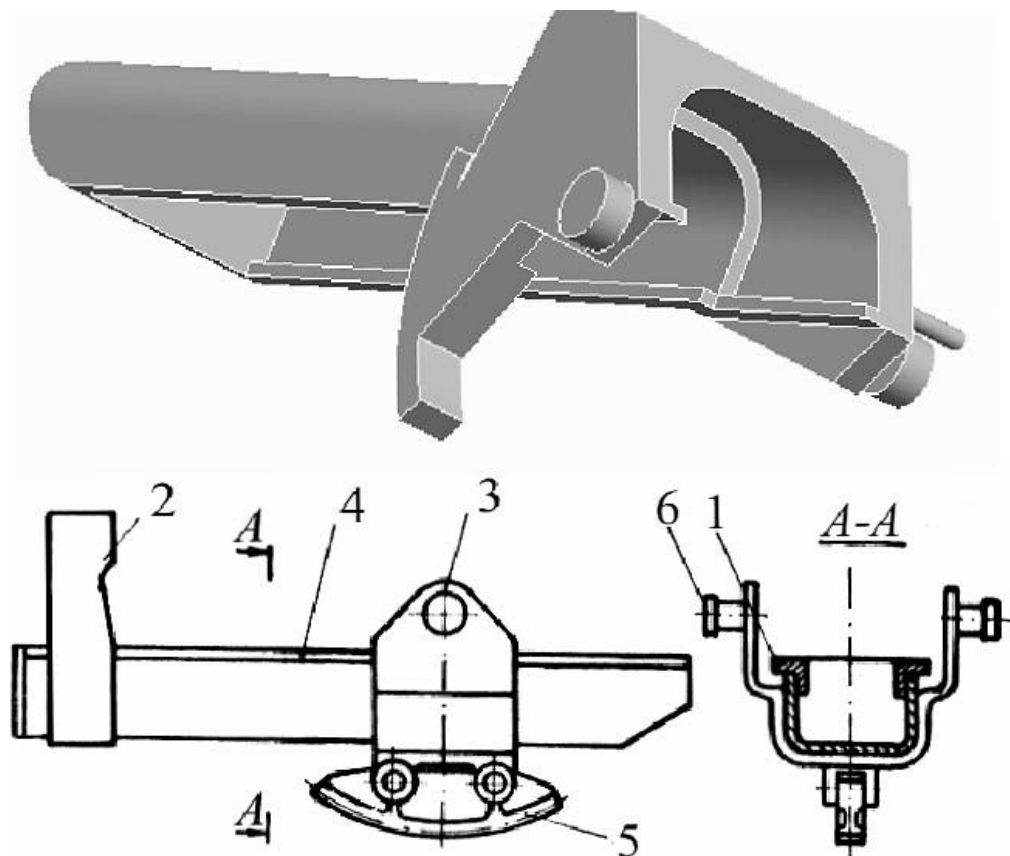
Цев оруђа треба у поступку навођења да се окреће око хоризонталне осе у вертикалној равни, а при опаљењу да се "трза" дуж своје уздужне осе. Ова кретања цеви обезбеђује својом конструкцијом колевка, која има рамена за везу са лежиштима на горњем лафету, око чије осе се окреће цев при трзању и враћању. Колевка, заједно са трзајућим деловима и противтрзајућим уређајем, чини осцилујући (нагибни) склоп.

За колевку су везани: клипњаче (или цилиндри) противтрзајућег уређаја, сектор механизма за покретање по висини, носач нишанских справа, покретни ослонац изравњача и елементи за аутоматско отварање затварача, регулатор дужине трзања и пуњач (уколико оруђе има ове уређаје) [1].

3.1.1 Облици колевке

По својој конфигурацији и начину вођења цеви, колевка може бити: коритастог, цилиндричног и комбинованог типа.

Колевка коритастог типа (слика 3.1.1.1.) има на себи изливене или заковане вођице по којима клизе клизачи трзајућег склопа. Противтрзајући уређај је најчешће смештен у колевци. За предњу огрлицу може да се веже повратник, а кочница трзања је, обично, смештена у корито колевке. На задњој огрлици су рамена колевке и назубљени сектор механизма за покретање по висини.



Слика 3.1.1.1. Колевка коритастог типа [3]

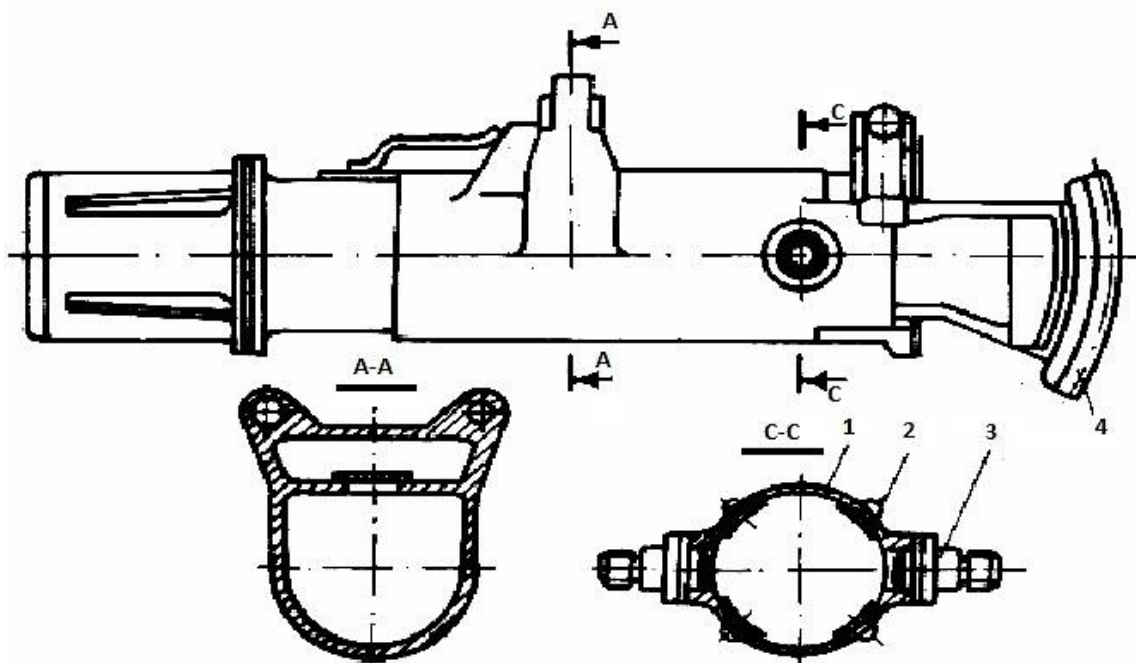
1 – клизачи колевке; 2 – веза за противтрзајући уређај; 3,6 – раме колевке; 4 – тело колевке; 5 – назубљени сектор

Колевка коритастог типа обезбеђује добре услове за кретање трзајућих делова оруђа. Овај тип колевке не захтева обраду великих површина на цеви и колевци; фино су обрађени само вођице колевке и клизачи цеви. Колевка овог типа се углавном примењује код вучних артиљеријских оруђа. Код оруђа са коритастом колевком је повећана висина ватрене линије, што је основни недостатак овог типа колевке, због смањене стабилности оруђа.

Колевка цилиндричног типа (слика 3.1.1.2.) обично је цилиндар у коме се креће цев. Да би се смањили хабање и трење, на унутрашњу површину цилиндра се уграђују бронзане вођице са каналима за подмазивање.

Противтрзајући уређај се везује за спољне површине колевке, а често су и кочница и повратник уграђени изнад колевке. На колевку су, такође, уграђени рамена колевке и сектор механизма за покретање по висини.

У поређењу са коритастом, колевка цилиндричног типа је компактнија, има већу крутост и у технолошком погледу лакша је за израду. Стога се она данас широко примењује и поред тога што има битне недостатке (погоршани су услови хлађења цеви, потребни су квалитетнија обрада спољне површине цеви и њено веће подмазивање) [1].

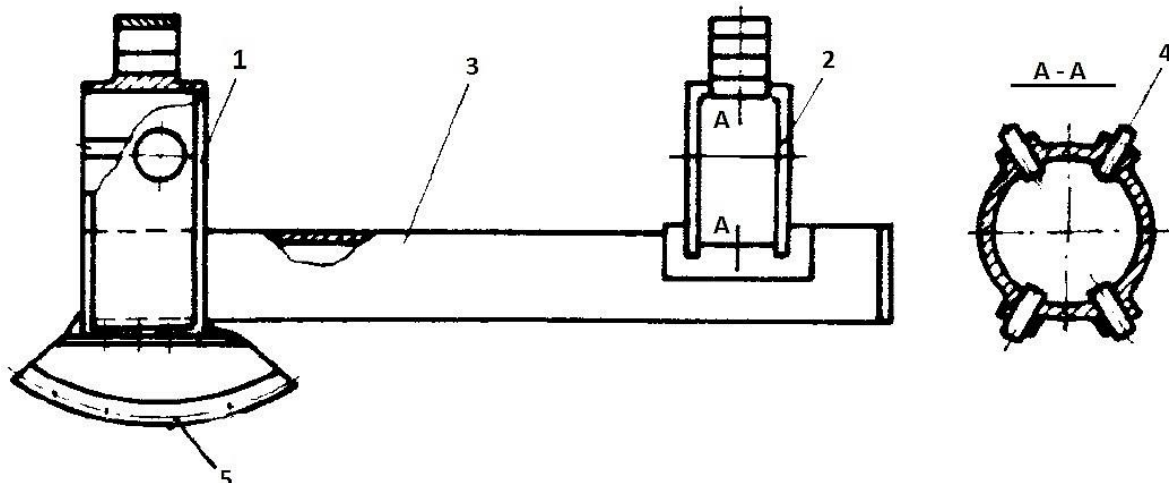


Слика 3.1.1.2. Колевка цилиндричног типа
1 – тело колевке; 2 – вођица; 3 – раме колевке; 4 – назубљени сектор

Један од значајних недостатака колевке цилиндричног типа је променљивост зазора између цеви и вођица, који зависи од температуре цеви и еластичне деформације зидова цеви под дејством притиска барутних гасова (одређивање потребног зазора између цеви и вођица колевке је значајно за правилну функцију цеви при трзању и клаћење цеви после опаљења, које при великом зазору може да ограничи практичну брзину гађања).

Колевке цилиндричног типа се примењују, пре свега, код тенковских топова и самоходних оруђа, а имају примену и код вучних оруђа.

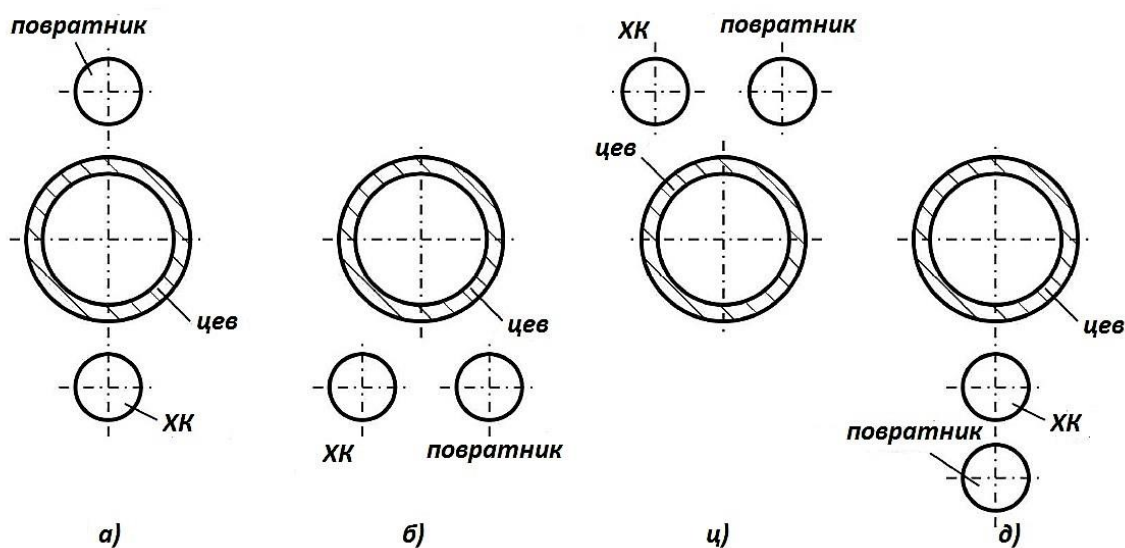
Колевке комбинованог типа имају елементе колевке оба разматрана типа. Једно од могућих решења је приказано на слици 3.1.1.3. Основу колевке чини корито за које су везане две огрлице. У задњој огрлици цев се води помоћу вођица, а у предњој огрлици се котрља по котрљачама са кугличним лежајима које имају могућност радијалног подешавања [1].



Слика 3.1.1.3. Колевка комбинованог типа

1 – задња огрлица; 2 – предња огрлица; 3 – корито; 4 – котрљача; 5 – сектор

У поступку компоновања осцилирајућих делова важно је да се правилно угради противтрзајући уређај у односу на колевку. Елементи противтрзајућег уређаја треба да буду тако уграђени да силе, које делују за време трзања и враћања, буду симетрично распоређене у односу на вертикалну раван која пролази кроз осу цеви. У том случају цев задржава исти положај при опаљењу метка, па се не ремети тачност гађања, а смањују се силе реакције колевке на трзајуће делове у равни нормалној на раван гађања. Код неких оруђа противтрзајући уређај се уграђује испод колевке. Такав положај смањује висину ватрене линије и повећава стабилност оруђа у периоду трзања (слика 3.1.1.4) [1].



Слика 3.1.1.4. Могући распореди уградње противтрзајућег система
а) повратник изнад цеви, а кочница испод; б) повратник и кочница испод цеви; в) повратник и кочница изнад цеви; д) кочница испод цеви, а повратника испод кочнице;

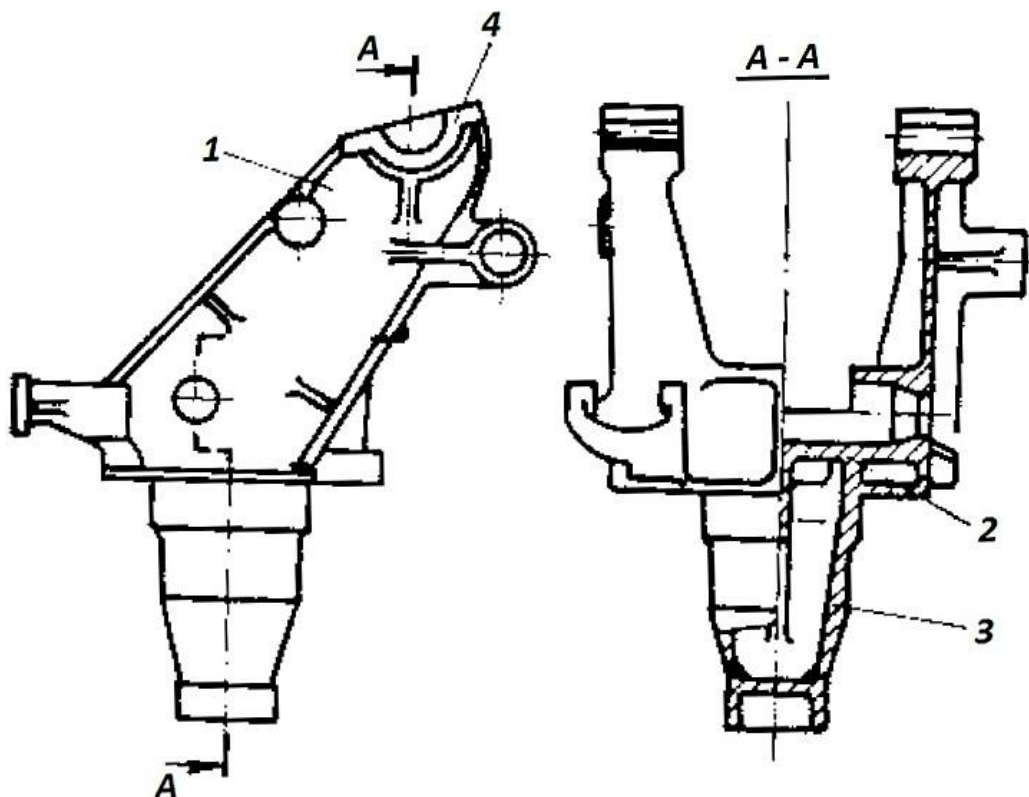
3.2 Горњи лафет

Нагибни склоп оруђа се помоћу рамена колевке повезује са горњим лафетом чија је основна намена да обезбеди навођење цеви оруђа у хоризонталној равни. Зато се осцилујући делови оруђа уграђују на горњи лафет као специјално покретно постоље које се повезује са доњим лафетом помоћу стожера. Код тенкова, неких самоходних оруђа и бродских оруђа функцију носача осцилујућих делова, за разлику од вучних оруђа, има обртна купола [1].

За горњи лафет се причвршћују механизми справа за давање правца и елевације цеви, елементи изравњача, носачи нишанских справа и други помоћни елементи и уређаји (нпр. пуњач оруђа).

Горњи лафети, по свом спољном изгледу, начину везе са доњим лафетом, размештају механизма и облику лежишта за рамена колевке, могу међусобно значајно да се разликују. На горњи лафет се са колевке преносе велике силе и моменти, као и тежина осцилујуће масе. Лафет треба да издржи сва ова оптерећења у статичком и динамичком смислу при опаљењу, уз стални захтев да његова укупна маса буде што мања.

Ово се постиже тако што се најоптерећенији део лафета ојачава ребрима или извођењем у облику кутијастих и рамовних структура са великом отпорношћу.

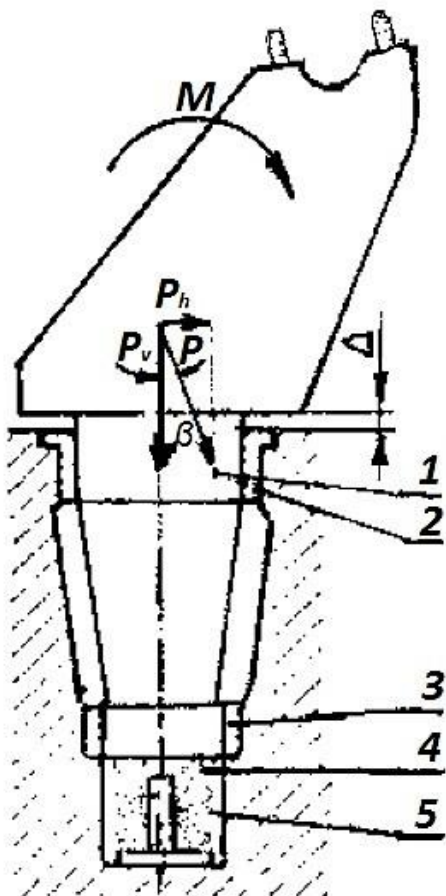


Слика 3.2.1. Шема горњег лафета

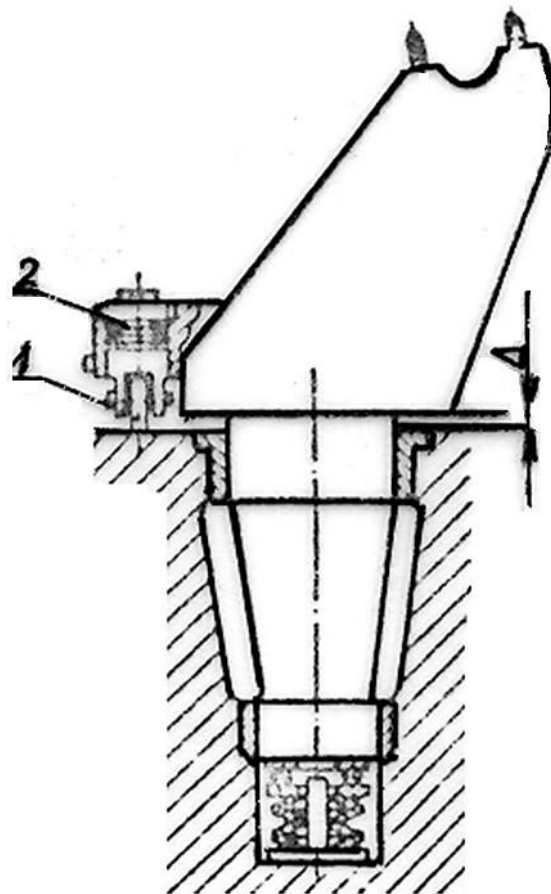
Веза осцилујуће масе и горњег лафета мора да буде поуздана и да се омогући њено закретање око рамена колевке у вертикалној равни за одговарајуће елевационе углове. При томе, у лежиштим рамена колевке треба да буду што мањи momenti силе трења. У конструктивном смислу, горњи лафет је ливена или заварена конструкција сложеног облика, слика 3.2.1. [1].

Састоји се од бочних страница 1 које су међусобно спојене основом 2 на којој је са доње стране причвршћен стожер (пивот) 2 за везу са доњим лафетом. Димензије горњег лафета тзв. габаритне мере, одређују се на основу димензија колевке и захтева за усмеравање цеви у простору према дефинисаном дијапазону угловних заокрета.

Према конструктивном решењу везе са доњим лафетом (слика 3.2.2.) постоји неколико шема типичних решења са стожером који се центрира у клизним лежајевима 2 и 3 на доњем лафету и ослања на тањирасте опруге 5 ради обезбеђења зазора $\Delta=(0.1\div 0.4)\text{mm}$ између ослоних површина горњег и доњег лафета.



Слика 3.2.2. Веза горњег и доњег лафета



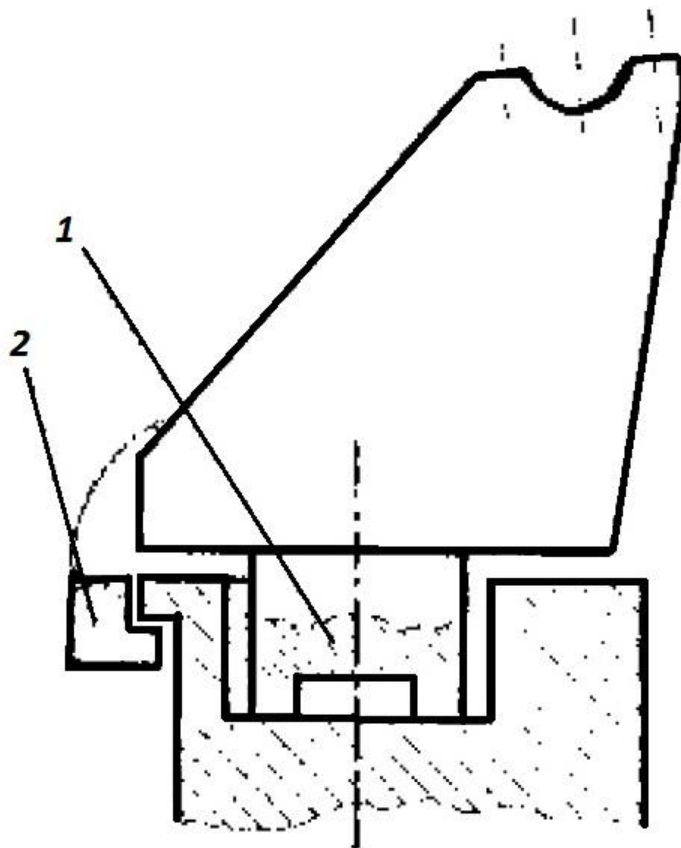
Слика 3.2.3. Веза горњег и доњег лафета помоћу котрљача

При опаљењу овај зазор се потпуно или делимично поништава што зависи од елевације цеви при опаљењу. На овај начин се смањује сила специфичног притиска на доњи лафет и његово укупно оптерећење. Конструкцијом мора да се обезбеди могућност регулисања овог зазора.

На слици 3.2.3 приказано је слично решење претходном, с тим што се уместо зазора горњи лафет ослања на клизну површину доњег лафета преко неколико котрљача 1 еластично улежиштених помоћу тањирастих опруга.

Оваквим ослањањем лафета при опаљењу због равномернијег оптерећења стварају се услови за добру прецизност гађања.

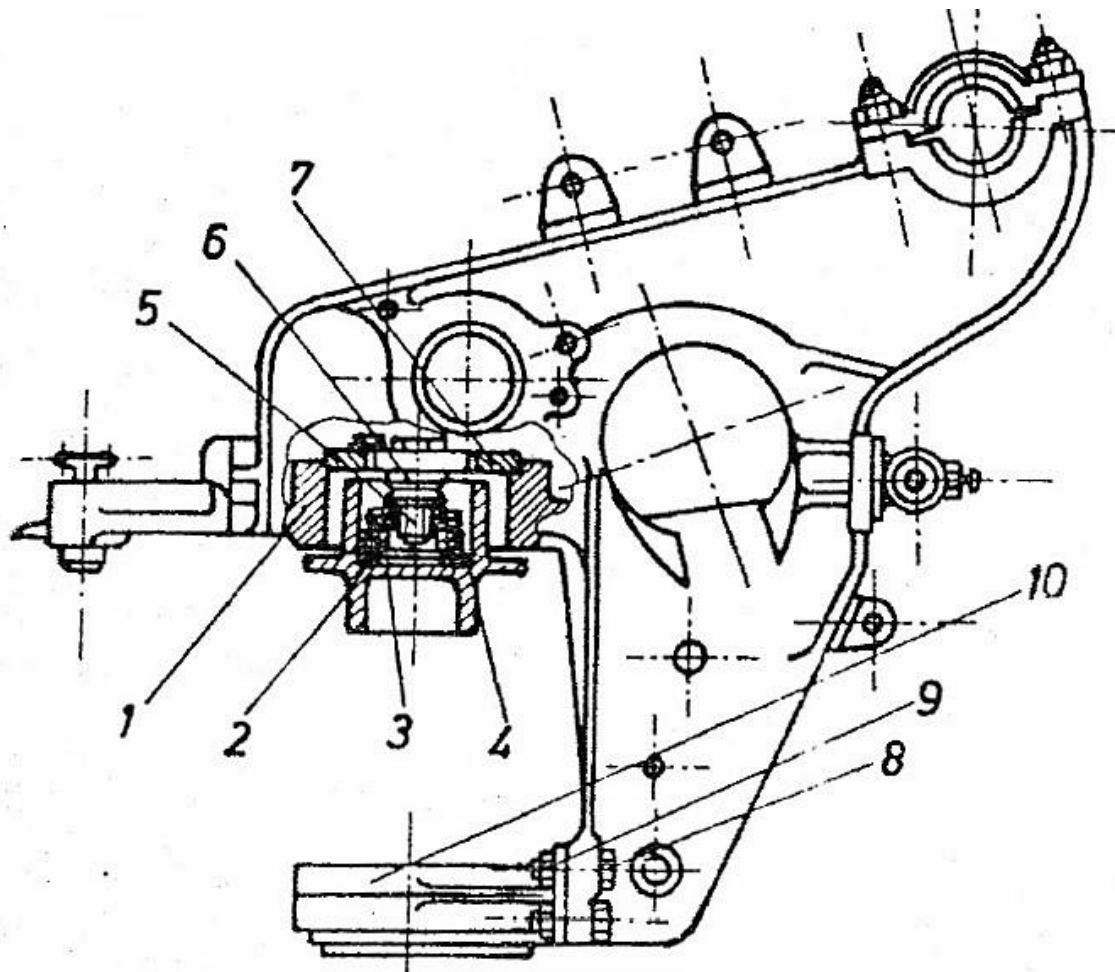
Ако је конструкцијом условљено решење са кратким стожером 1, да би се климање горњег лафета очувало у границама дозвољеног зазора, неопходна је уградња канце 2, слика 3.2.4



Слика 3.2.4. Веза горњег и доњег лафета помоћу кратког стожера

Веза горњег и доњег лафета помоћу кратког стожера повећава момент силе трења између горњег и доњег лафета и отежава усмеравање цеви.

Ређе се примењује решење везе горњег са доњим лафетом када доњи лафет има на себи горњи и доњи стожер. Такво решење горњег лафета дато је на слици 3.2.5.



Слика 3.2.5. Веза горњег и доњег лафета са стожером на доњем лафету

У основи тела горњег лафета је прстенаста прирубница 1 у чији отвор улази горњи стожер доњег лафета. На горњем стожеру су аксијални куглични лежај 2, чаура 3, тањирасте опруге 4, потисни вијак 5 и ослонац 6 наврнут на поклопац 7. На доњи крај тела лафета, са чеоне стране, је помоћу вијка 8 са наврткама 9 уграђено тело лежаја 10 за везу горњег лафета са доњим стожером доњег лафета. Преко тањирастих опруга и других елемената везе се подешава зазор између горњег и доњег лафета тако да буде у границама (0,1 до 0,3) mm. Овакво решење омогућава искључиво секторско поље дејства по правцу, као нпр. код хаубице 122 mm [1].

4. ОПТЕРЕЋЕЊЕ ТЕЛА ГОРЊЕГ ЛАФЕТА ТОП-ХАУБИЦЕ 152 mm НОРА-А

4.1 Топ-хаубица 152 mm НОРА-А

Фамилију оруђа НОРА чине: вучена топ-хаубица 152 mm НОРА-А (М84); вучени конвертовани топови 155 mm М46/84 и 152 mm М46/86; самопокретна топ-хаубица 152 mm НОРА-Ц; и самоходне топ-хаубице 152 mm НОРА-Б и 155 mm НОРА-Б52 (М03). Заједничко за сва наведена оруђа је да припадају основном калибру ватрене подршке копнене војске, а могу да се реализују у калибрима 152 mm односно 155 mm (заменом само цеви), зависно од војно-политичког избора корисника. Разлика је само у филозофији употребе типичној за вучена односно самоходна оруђа. Два од наведених оруђа уведена су у оперативну употребу (НОРА-А и НОРА-Б52), иако је највећу шансу за оперативну употребу имао конвертовани топ 155 mm, јер је руски топ 130 mm М46 био (и још увек јесте) у наоружању више од 55 земаља света. Нажалост, иако је наша земља прва понудила конверзију топа 130 mm М46, због догађаја који су настали почетком 90-тих година и увођења ембарга на промет НВО била је онемогућена његова продаја многим заинтересованим земљама.

Вучена оруђа фамилије НОРА пројектована су тако да се у што већој мери испуне основни захтеви филозофије употребе артиљерије: што већи домет уз очување или повећање разорног дејства пројектила на циљу и што мања маса оруђа, без смањивања енергије пројектила на устима цеви [4].

Вучено оруђе 152 mm НОРА-А (слика 4.1.1.) настало је модернизацијом топа 152 mm Д-20.

Артиљеријско оруђе хаубица-топ 152 mm М-84 је вучно оруђе, чија је основна намена општа ватрена подршка сопствених јединица [5].

Хаубица-топ 152 mm М-84, са припадајућим борбеним комплетом муниције, намењена је за извршавање следећих задатака:

- уништавање или неутралисање артиљеријских оруђа, тенкова, оклопних транспортера и осталих борбених возила;
- наношење губитака, неутралисање или уништење непријатељске незаклоњене или заклоњене живе силе;
- разарање привредних објеката посебног тактичког или стратегијског значаја.



Слика 4.1.1. Топ-хаубица 152 mm НОРА-А (М-84)

ТАКТИЧКО-ТЕХНИЧКЕ КАРАКТЕРИСТИКЕ ОРУЂА

За гађање из хаубице-топа 152 mm М-84 користе се дводелни меци са пуним или смањеним променљивим барутним пуњењем. Оруђе и муниција могу се транспортовати, складиштити и остварити дејство у температурном интервалу од -30°C до $+50^{\circ}\text{C}$.

За гађање из хаубице-топа 152 mm користи се следећа муниција:

- метак 152 mm са тренутно-фугасним пројектилом М-84,
- метак 152 mm са тренутно-фугасним пројектилом ОФ-540
- метак 152 mm са кумулативним пројектилом БП-540

Оруђе је способно за ефикасну противоклопну борбу на даљинама до 1200 метара. Конструкционо решење оруђа обезбеђује поље дејства:

- по висини од -5° до $+63^{\circ}$ степени
- по правцу 50° степени.

Брзина гађања из хаубице-топа 152 mm је 4-6 метака у минути. Време преласка из маршевског у борбени положај и обрнуто је 3-5 минута, у зависности

од степена обучености послуге. Оруђе послужује осам послужиоца са командиром одељења. Основни начин транспорта оруђа је вуча моторним возилом ФАП 2026 БС(АВ) 6х6. Послужиоци се превозе на вучном возилу а муниција у посебном возилу у миру, а у рату на вучном возилу заједно са услугом превози се 1 б/к муниције за оруђе [5].

ТЕХНИЧКИ ПОДАЦИ О ОРУЂУ

• калибар оруђа	152,4 mm
• дужина оруђа на маршу	11.210 mm
• ширина оруђа на маршу	2.415 mm
• висина оруђа на маршу	2.160 mm
• дужина склопа цеви	7.010 mm
• дужина жљебеног дела цеви оруђа	5.059 mm
• дужина барутне коморе	997 mm
• дужина оруђа у борбеном положају	9.670 mm
• ширина оруђа у борбеном положају	5.730 mm
• клиренс	370 mm
• број жљебова	48 ком
• смер увијања жљебова	десни
• ширина жљеба	7 mm
• ширина поља	3 mm
• дубина жљеба	1.5 mm
• највећа дозвољена дужина трзања склопа цеви	950 mm
• маса оруђа у маршевском положају износи	7.130 kg
• маса оруђа у борбеном положају износи	7.080 kg
• маса склопа цеви	2.950 kg
• маса хидрауличне кочнице	101.6 kg
• маса хидропнеуматског повратника	102 kg
• маса изравњача	42 kg
• маса точкова	116 kg
• режим ватре за 5 минута	15 m
• за 20 минута	40 m
• за 60 минута	до 90 m
• притисак у пнеуматцима	7.5±0.2 бара
• притисак азота у повратнику	70±2 бара
• притисак у цилиндру изравњача при највећој елевацији	55±3 бара

КОЛИЧИНА ТЕЧНОСТИ

- у хидрауличној кочници 14.7 l
- у хидропнеуматском повратнику 13.4 l
- у цилиндру изравњача 0.5 l
- у резервоару дизалице 1.9 l
- у резервоару цилиндра за ослобађање точкова 4.0 l

БАЛИСТИЧКИ ПОДАЦИ О ОРУЂУ

- ТФ пројектил М-84 (пуно променљиво барутно пуњење) 810 m/s
- ТФ пројектил М-84 (смањено променљиво барутно пуњење) 320-590 m/s
- ТФ пројектил ОФ-540 (пуно променљиво барутно пуњење) 647 m/s
- ТФ пројектил ОФ-540 (смањено променљиво барутно пуњење) ... 274-510 m/s
- Највећи средњи радни прит. барутних гасова за пројектил М-84 3000 бара
- Највећи дomet оруђа (са ТФ пројектилом М-84) 24150 m
- Маса ТФ пројектила (М84 са упаљачем) 43,56 kg
- Маса барутног пуњења за (ТФ М-84) пуно пуњење 11,6 kg
- Маса барутног пуњења за (ТФ ОФ-540) пуно пуњење 8,015 kg

4.2 Горњи лафет топ-хаубице 152 mm НОРА-А

Горњи лафет је основа делова оруђа покретних по висини. На горњи лафет уграђени су следећи делови оруђа: колевка, механизам за давање правца и нагиба цеви, штитови и носач изравњача. На слици 4.2.1 је приказан горњи лафет топ-хаубице 152 mm НОРА-А. Горњи лафет је сложене заварене или ливене конструкције, изграђен од квалитетног челика. Састоји се из следећих делова: - тела горњег лафета, - лежишта за лежаје рамена колевке.

Лежишта рамена колевке се затварају поклопцима, а са стране су уграђене мазалице преко којих се врши подмазивање лежишта рамена.

Са леве стране горњег лафета заварен је носач механизма за давање правца цеви. У носачу су упресоване бронзане чауре, филцни заптивач и мазалица за подмазивање.

На бочним странама тела горњег лафета израђена су два хоризонтална отвора у којима се ослања вратило са зупчаником механизма за давање нагиба цеви.

На задњем зиду тела горњег лафета, испод носача механизма за давање правца цеви, постављена је ушица са отвором у који се учвршћује сворњак механизма за подешавање изравњача.

Тело лафета има при дну отвор за постављање осовине носача изравњача.

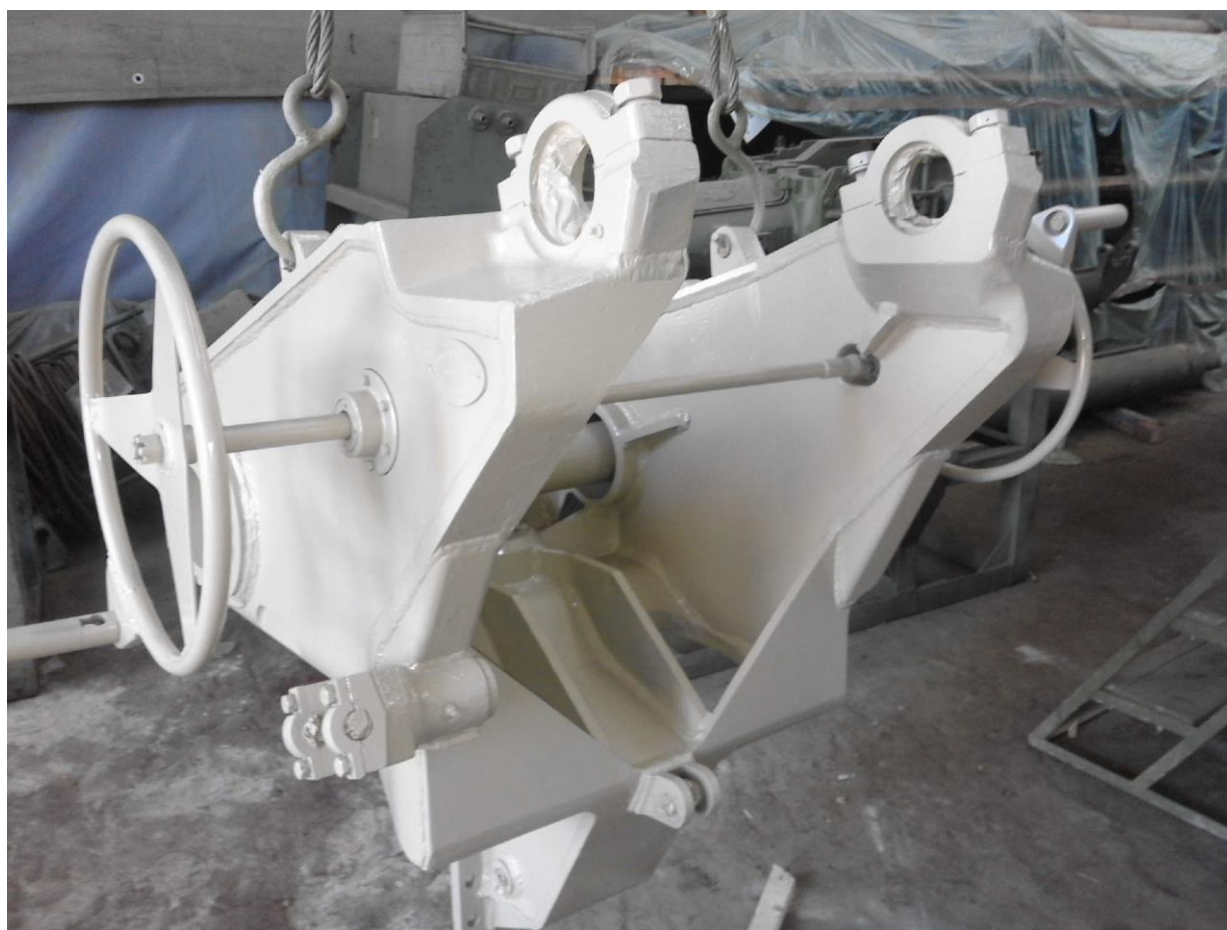
На десну бочну страну тела лафета заварен је помоћни држач механизма за давање нагиба цеви.

У основи тела горњег лафета налази се кућиште за везу са стожером доњег лафета, за смештај лежајева и пакета тањирастих опруга.

На доњи крај тела горњег лафета са чеоне стране причвршћује се лежиште доњег стожера, намењеног за другу везу са доњим лафетом.

На предњи део тела горњег лафета, са његове чеоне стране, заварен је троугласти носач који у средини има вертикални навојни отвор за смештај склопа утврђивача горњег лафета.

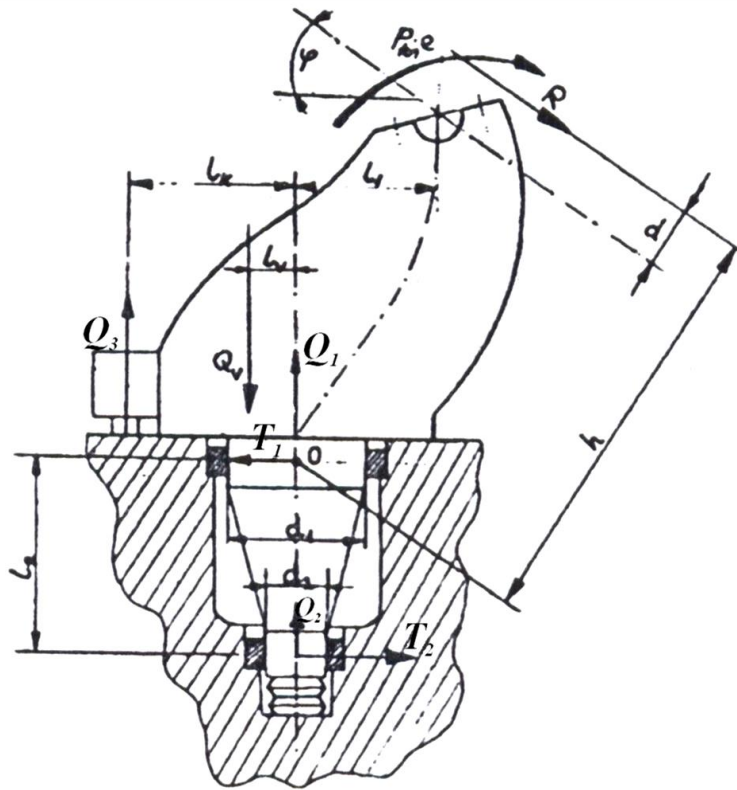
Када је оруђе на маршу, закретањем ручице утврђивача утврђивач се потискује у отвор на доњем лафету и фиксира горњи лафет [5].



Слика 4.2.1. Горњи лафет топ-хаубица НОРА-А 152 mm

4.3 Силе које делују на горњи лафет

Силе које делују на горњи лафет су силе које се преко рамена колевке и назубљеног сектора преносе на лафет услед оптерећења и сила које се јављају као реакције везе са доњим лафетом. Сама структура горњег лафета треба да омогући довољну отпорност на статичка и динамичка оптерећења при опаљењу. Разматра се типична шема и у пракси најчешће примењено решење горњег лафета са стожером. На слици 4.3.1. је приказана шема сила који делују на горњи лафет при опаљењу [6].



Слика 4.3.1. Силе које делују на лафет

Приказане силе које делују на горњи лафет су:

- R - укупна сила отпора трзању,
- T_1, T_2 - силе реакције горњег лежаја,
- Q_1 - сила реакције доњег лафета,
- Q_2 - сила реакције тањирастих опруга амортизера
- Q_3 - сила реакције доњег лафета на котрљаче, ако постоје,
- Q_v - тежина делова оруђа покретних по правцу,
- Q_t - тежина трзајућих делова.

Где су:

- l_3 и l_5 - растојања оса котрљача 3 и 5 од осе стожера,
- l_v - растојање правца дејства силе тежине делова оруђа покретних по правцу од осе стожера,
- l_2 - растојање правца дејства силе реакције тањирастих опруга амортизера од лежача горњег лафета,
- h - висина горњег лафета,
- e - ексцентар центра масе у односу на осу цеви

Прорачун на гњечење горњег и доњег лафета врши се према највећој сили Q_{1max} при највећој елевацији $\varphi = \varphi_{max}$.

Прорачун стожера и лежача горњег лафета врши се према највећој вредности сила $(T_1$ и $T_2)_{max}$ при елевацији $\varphi = 0$.

Прорачун отпорности бочних страница лафета врши се са највећом силом реакције S_{max} (S_{1L} , S_{1d}) у више пресека нормално на неутралну осу.

Провера стабилности горњег лафета (клаћење лафета) врши се према релацији:

$$T_2 = \frac{Q_3 l_3 - Q_v l_v}{l_2} > 0 \text{ тј. } Q_3 > Q_v \frac{l_v}{l_3}. \quad (1)$$

Величина l_v је променљива; у периоду трзања смањује се зависно од померања средишта масе у смеру трзања, а смањује се и са повећањем угла елевације φ . Ако је наведени услов испуњен при $\varphi = 0^\circ$, он ће бити задовољен при $\varphi \neq 0^\circ$ и при опалењу метка.

Зидове тела лафета могуће је прорачунати као рамовну конструкцију, док се конзолни подупирач изравњача на телу горњег лафета проверава на савијање и смицање услед силе изравњача. Стожер горњег лафета се такође испитује на савијање смицање и површински притисак, при чему се стожер може сматрати конзолом променљивог попречног пресека укљештеном за основу горњег лафета [6].

Како би било могуће извршити анализу стања напрезања горњег лафета артиљеријског оруђа, неопходно је дефинисати силу отпора трзања R топ-хаубице 152 mm НОРА-А. За одређивање закона промене силе укупног отпора трзању R користи се такозвани инверзни поступак прорачуна даље објашњен у поглављу 4.4.

4.4 Инверзни поступак прорачуна кретања трзајуће масе оруђа топ-хаубица 152 mm НОРА-А

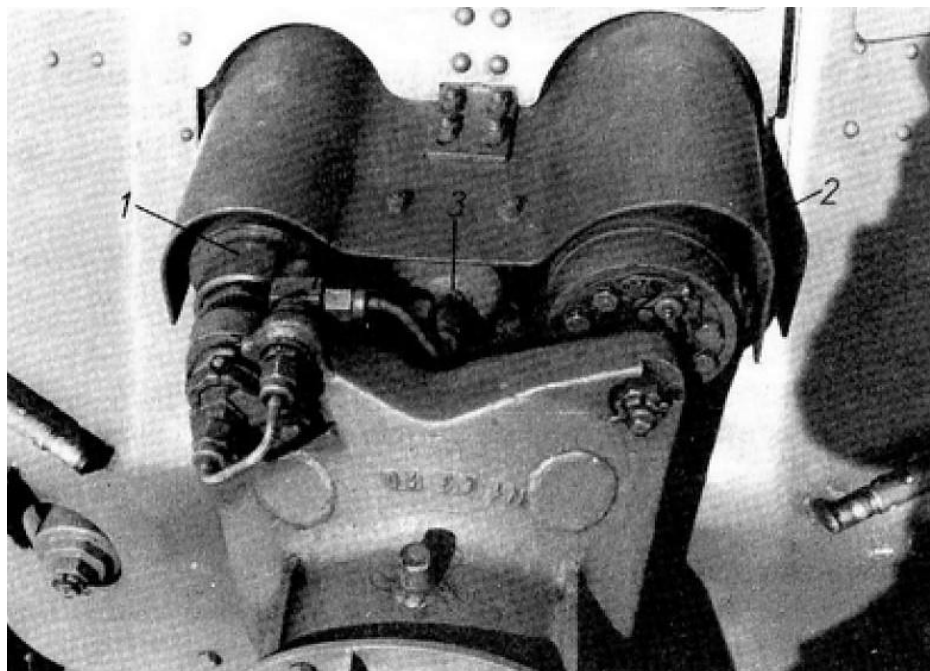
Противтрзајући уређај обезбеђује еластичну везу између цеви и лафета артиљеријског оруђа.

Пројектовањем противтрзајућег уређаја (ПТУ) дефинисани су бројни параметри и карактеристике, пре свега, хидрауличне кочнице и повратника.

Међутим, иако је конструкционо решење главних делова противтрзајућег уређаја познато, један од важних проблема у пракси је како извршити идентификацију његовог понашања при опаљењу метка. У ту сврху се примењује такозвани инверзни поступак прорачуна трзања и враћања, који је посебно важан када се мењају услови гађања или проверавају конструктивни облици отвора који регулишу протицање течности и други елементи хидрауличне кочнице.

Приликом разматрања проблема одређивања елемената кретања трзајуће масе (пут, брзина, време) инверзним поступком при трзању и враћању, за закон промене регулисаних отвора хидрауличне кочнице трзања и враћања одређен је закон промене силе укупног отпора трзању $R(x)$ и враћања $r(y)$ [7].

На основу математичког модела формиран је програмски модел на рачунару у програмском пакету матлаб, чији је код приказан у прилогу 1. Симулација модела и добијени резултати прорачуна приказани су на примеру оруђа топ-хаубица 152 mm НОРА-А.



Слика 4.4.1. Противтрзајући уређај
1-Хидраулична кочница, 2-Хидропнеуматски повратник, 3-Компензатор, 4-Вентил компензатора

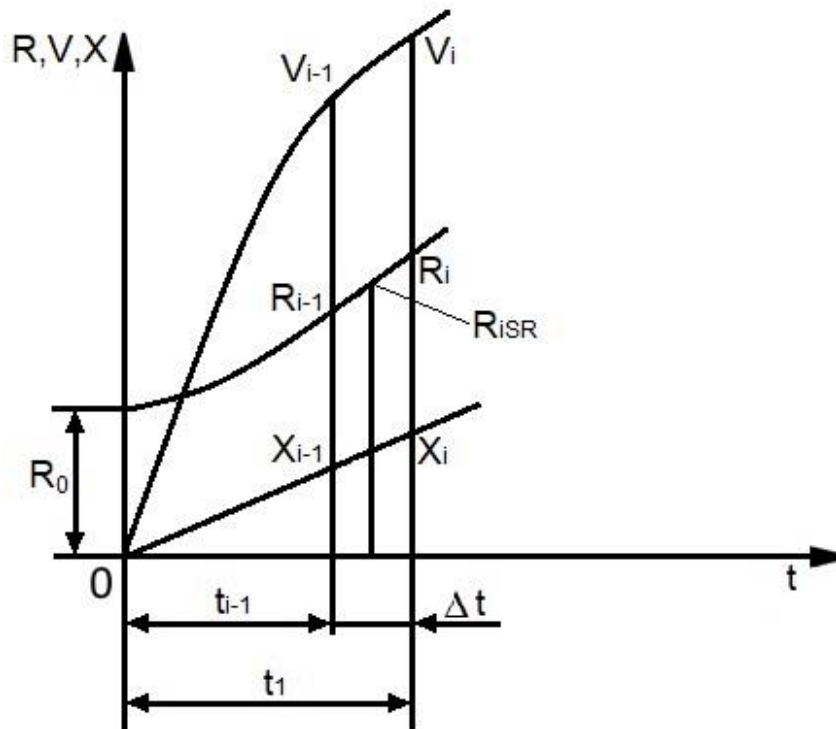
4.4.1 Инверзни поступак прорачуна кретања при трзању

Прорачун кретања трзајуће масе инверзним поступком трзања обухвата два периода:

1. период од почетка трзања до краја периода накнадног дејства барутних гасова на трзајућу масу,
2. период од краја првог периода до заустављања трзајуће масе.

4.4.2 Први период трзања

Цео период од почетка трзања до краја накнадног дејства барутних гасова на трзајућу масу дели се на временске интервале Δt . Пошто је време интервала (Δt) мало, усваја се да је сила укупног отпора трзању (R) у оквиру интервала константна и једнака њеној средњој вредности (слика 4.4.2.1.).



Слика 4.4.2.1. Зависност силе, пута и брзине коченог трзања

Нека су у неком тренутку времена t_{i-1} познате величине пута трзања X_{i-1} , брзине трзања V_{i-1} и силе отпора трзању R_{i-1} . Да би се одредиле њихове вредности у тренутку полази се од једначине кретања трзајуће масе:

$$M_t \frac{dV}{dX} = P_c - R_{isr} \quad (2)$$

односно у интегралном облику:

$$\int_{V_{i-1}}^V dV = \frac{1}{M_t} \left[\int_0^t P_c dt - R_{istr} \int_0^t dt \right] \quad (3)$$

где су:

M_t - маса трзајућих делова,

P_c - сила притиска барутних гасова на дно цеви,

R_{istr} - средња вредност силе отпора трзању у току интервала.

Како је први интегрални члан на десној страни релације:

$$\frac{1}{M_t} \int_0^t P_c dt = W - W_{i-1}$$

где су:

W - брзина слободног трзања у току интервала Δt ,

W_{i-1} - брзина слободног трзања на почетку интервала,

Добија се текућа вредност брзине коченог трзања у интервалу:

$$V = W - (W_{i-1} - V_{i-1}) - \frac{R_{istr}}{M_t} t \quad (4)$$

На крају интервала је:

$$V_i = W_i - (W_{i-1} - V_{i-1}) - \frac{R_{istr}}{M_t} \Delta t \quad (5)$$

Интегрисањем (4) добија се израз за пут коченог трзања на крају интервала:

$$X_i = X_{i-1} + (L_{i-1} - X_{i-1}) - (W_{i-1} - V_{i-1}) \Delta t - \frac{R_{istr}}{2M_t} (\Delta t)^2$$

$$\text{При томе је: } \int_0^t W dt = L - L_{i-1} \quad (6)$$

Брзина и пут слободног трзања трзајуће масе (W, L) за време док се пројектил налази у цеви одређују се према изразима:

$$W = \frac{m + 0,5\mu}{M_t + m + \mu} v \quad (7)$$

$$L = \frac{m + 0,5\mu}{M_t + m + \mu} l \quad (8)$$

где су:

v и l -релативна брзина и пут пројектила који се добијају унутрашње балистичким прорачуном (УБП).

У периоду накнадног дејства барутних гасова брзина и пут слободног трзања добијају се на основу релације (за закон истицања по Бравину) ако је оруђе без гасне кочнице:

$$W = W_u + \frac{b \cdot P_{cu}}{Mt} (1 - e^{-\frac{t}{b}}) \quad \text{и} \quad (9)$$

$$L = L_u + W_u \cdot t + \frac{b \cdot P_{cu}}{M_t} \left[t - b \left(1 - e^{-\frac{t}{b}} \right) \right], \text{ где је:} \quad (10)$$

$$b = \frac{(\beta - 0,5) \cdot \mu}{P_{cu}} V_0 \quad \text{- параметар експоненцијалне функције,}$$

t - време у току периода истицања барутних гасова,

$\tau = b \cdot \ln(0,5 \cdot p_u)$ - трајање периода накнадног дејства (истикања) барутних гасова:

β - коефицијент накнадног дејства барутних гасова.

Како једначине (5 и 6) садрже три променљиве; X_i , V_i и R_{isr} , решавају се поступком интеграције (узастопним приближавањем).

За прву интеграцију узима се да је: $R_{isr}^{(1)} = R_{i-1}$. За први интервал важи да је $R_{isr}^{(1)} = R_0$, а почетна вредност силе се одређује по изразу:

$$R_0 = F_{p0} + F_{tr} - Q_t \sin \varphi, \quad (11)$$

$F_{p0} = p_0 \cdot A_p$ - почетна сила повратника,

$F_{tr} = Q_t (\mu \cos \varphi_{gr} + \nu)$ - сила трења на клизачима колевке и у заптивачима ПТУ,

Q_t - сила тежине трзајуће масе.

На основу једначина (5 и 6), преко $R_{isr}^{(1)}$, одреде се затим величине V_i и X_i и са тим вредностима рачунају се силе хидрауличне кочнице трзања и повратника.

За кочницу трзања вретенастог типа (са контраклипњачом променљивог попречног пресека) сила кочнице је дефинисана изразом:

$$F_k = \frac{k_1 \cdot \rho}{2} \left[\left(\frac{A}{a_i} + 1 \right)^2 \cdot A + \frac{k_3}{k_1} \cdot \frac{A_M^3}{\Omega^2} \right] \cdot V_i^2 \quad (12)$$

$$F_k = f(a_i) \cdot V_i^2 \quad (13)$$

Ознаке за константне површине елемената кочнице у датом изразу (8) јесу:

$$A = A_k - A_{rp}$$

$$A_k = (D^2 - d^2) \cdot \frac{\pi}{4} \text{ - радна површина клипа,}$$

$$A_p = d_p^2 \cdot \frac{\pi}{4} \text{ - површина регулишућег прстена,}$$

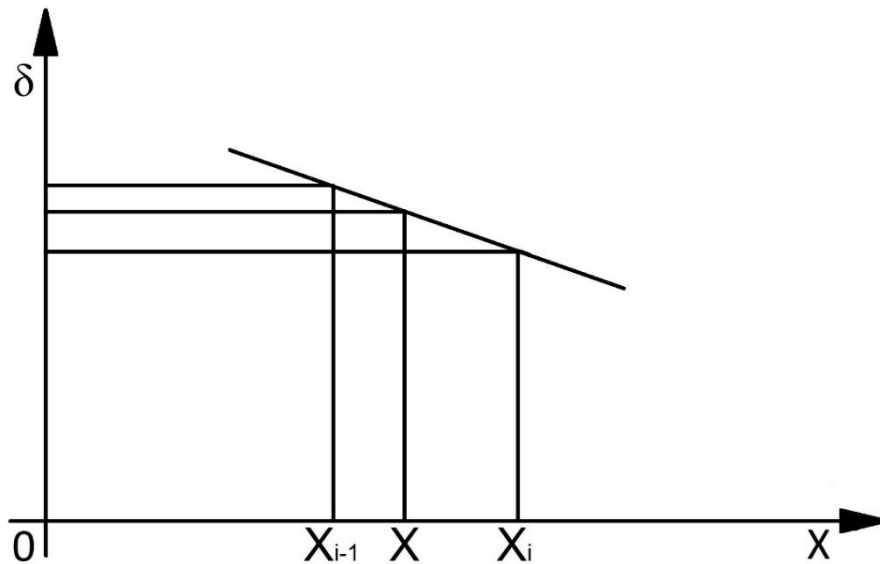
$$A_M = d_1^2 \cdot \frac{\pi}{4} \text{ - површина клипа кочнице враћања,}$$

$$\Omega = n \cdot d_M^2 \cdot \frac{\pi}{4} \text{ - површина прстенастог зазора између зидова клипњаче и пречника контраклипњаче на месту везе са клипом кочнице враћања,}$$

$$a_i = (d_p^2 - \delta_i^2) \cdot \frac{\pi}{4} \text{ - променљива површина прстенастог зазора између регулишућег прстена и контраклипњаче.}$$

Тренутна вредност пречника контраклипњаче (δ) мора се одредити за сваки положај клипа на путу трзања X за довољно мале помаке клипа према слици 4.4.2.2., може се поставити релација која важи у случају да се пречник δ мења линеарно између пресека X_{i-1} и X_i .

$$\Delta t \frac{X_i - X}{X - X_{i-1}} = \frac{\delta_i - \delta}{\delta - \delta_{i-1}} = \gamma, \text{ одакле је: } \delta = \frac{\delta_i + \gamma \cdot \delta_{i-1}}{1 + \gamma} \quad (14)$$



Слика 4.4.2.2. Зависност пречника и пута трзања

Сила хидропнеуматског повратника се одређује једначином која вреди за било коју тачку трзања:

$$F_{pi}^{(1)} = P_0 \cdot A \cdot \left[\frac{H_0}{(H_0 - X_i^{(1)})} \right]^n \quad \text{где је:} \quad (15)$$

$H_0 = \frac{W_0}{A}$ - сведена почетна висина гасног стуба у повратнику,

W_0 - почетна запремина гаса (азота) у повратнику,

n - коефицијент политропе гаса (усваја се $n = 1, 3$).

Укупна сила трења за време трзања може се усвојити константом и одређена је изразом:

$$F_{tr} = Q_t \cdot (\mu \cdot \cos \varphi + \nu) \quad (16)$$

За другу интеграцију узима се да је (2,1 –ознаке интеграције):

$$R_{isr}^{(2)} = F_{ki}^{(1)} + F_{pi}^{(1)} + F_{tr} - Q_t \cdot \sin \varphi \quad (17)$$

На основу $R_{isr}^{(2)}$ поново се одређују параметри кретања $V_i^{(2)}$ и $X_i^{(2)}$, а затим на сличан начин као код прве интеграције величине: $F_{ki}^{(2)}$, $F_{pi}^{(2)}$ и $R_{isr}^{(3)}$.

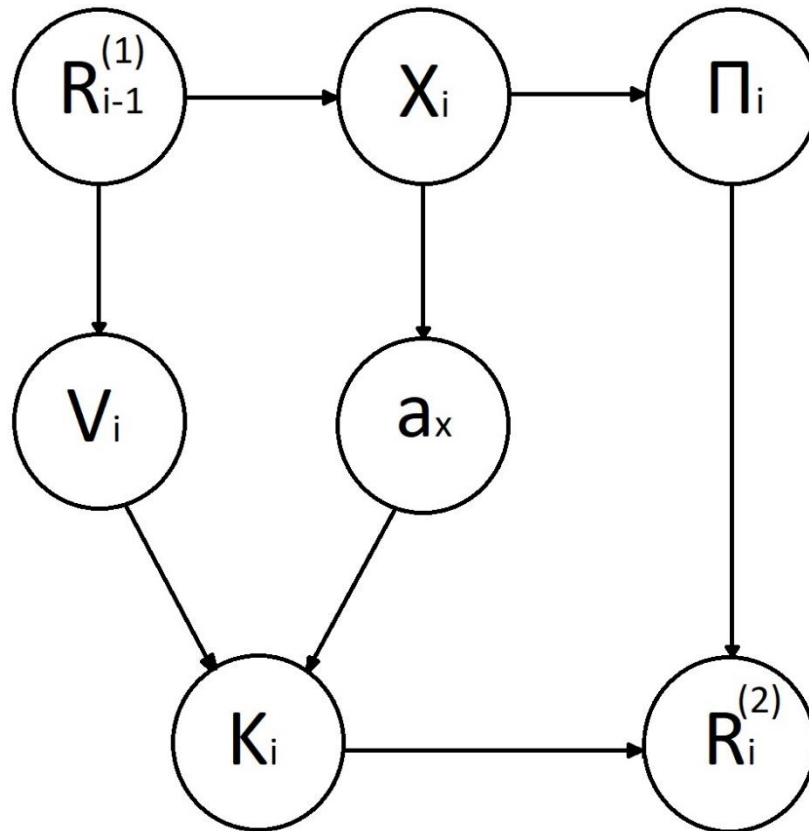
Прорачун се изводи све док се вредности силе $R_{isr}^{(n)}$ не покlope, у оквиру задате тачности израчунавања, са њеним вредностима у претходном приближењу $R_{isr}^{(n)}$.

Сила отпора на крају интервала добија се из израза:

$$R_{isr} = \frac{R_{i-1} + R_i}{2}, \quad \text{одакле је:} \quad (18)$$

$$R_i = 2R_{isr} - R_{i-1}$$

Величина R_i представља полазни податак за прву интеграцију на следећем интервалу Δt . Поступак прорачуна може се једноставно приказати схемом према слици 4.4.2.3. [7].



Слика 4.4.2.3. Схема прорачуна периода трзања

4.4.3 Други период трзања

У другом периоду трзања за променљиву се узима преостали пут трзања који се дели на (i) интервала величине $\Delta X = (5-10) mm$. Полазни услови за овај период су прорачунате величине добијене на крају првог периода трзања. За сваки интервал пута трзања важи енергетска релација:

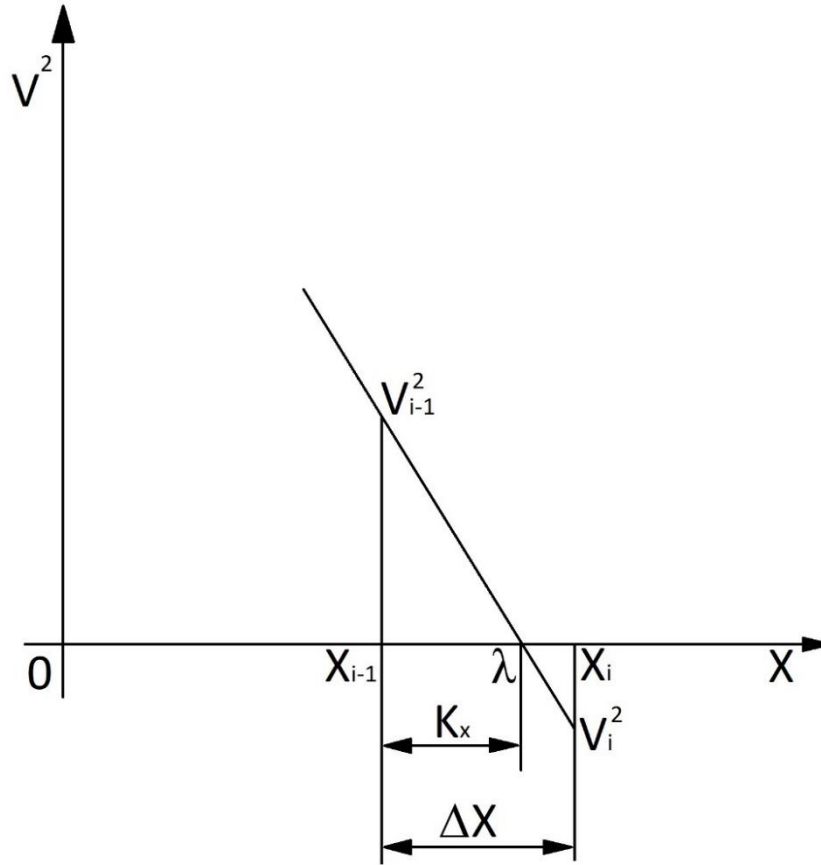
$$\frac{M_t \cdot V_i^2}{2} - \frac{M_t \cdot V_{i-1}^2}{2} = R_{isr} \cdot \Delta X \quad (19)$$

Како је: $R_{isr} = \frac{R_{i-1} + R_i}{2}$, онда ће с обзиром на енергетску релацију (19) бити:

$$V_i^2 = V_{i-1}^2 - \frac{R_{i-1} + R_i}{M_t} \cdot \Delta X \quad (20)$$

На крају интервала пут трзања је:

$$X_i = X_{i-1} + \Delta X$$



Слика 4.4.3.1. Одређивање величине K_x за услов $V_i=0$

Сила укупног отпора трзању на крају интервала износи:

$$R_i = F_{ki} + F_{pi} + F_{tr} - Q_t \sin \varphi, \quad (21)$$

Где се компоненте сила одређују према једначинама F_k према (13), F_{pi} према (15) и F_{tr} према (16). Након увођења релације за R_i у наведеном изразу (18) и сређивања израза, добија се коначан израз за брзину трзања у другом периоду:

$$V_i^2 = V_{i-1}^2 - \frac{R_{i-1} + F_{pi} + F_{tr} - Q_t \sin \varphi + f(a_i) \cdot V_{i-1}^2}{\frac{M_t}{\Delta X} + f(a_i)} \quad (22)$$

Прорачун се изводи док не буде задовољен услов да је: $V_i = 0$. У случају да је $V_i^2 < 0$, приступа се израчунавању дужине пута трзања за који је $V_i^2 = 0$.

Према слици 4.4.3.1. се може из односа троуглова поставити релација :

$$K_x = \frac{\Delta X \cdot V_{i-1}^2}{|V_i^2| + V_{i-1}^2}, \quad (23)$$

одакле је укупна дужина трзања: $\lambda = X_{i-1} + K$

Како је време трзања на сваком интервалу:

$$\Delta t_i = \frac{M_t \cdot |V_i - V_{i-1}|}{R_{isr}}, \quad (24)$$

То је укупно време трзања (n је број интервала у оба периода) [7]:

$$T_t = \sum_{i=1}^n \Delta t_i \quad (25)$$

4.4.4 Полазни подаци за прорачун

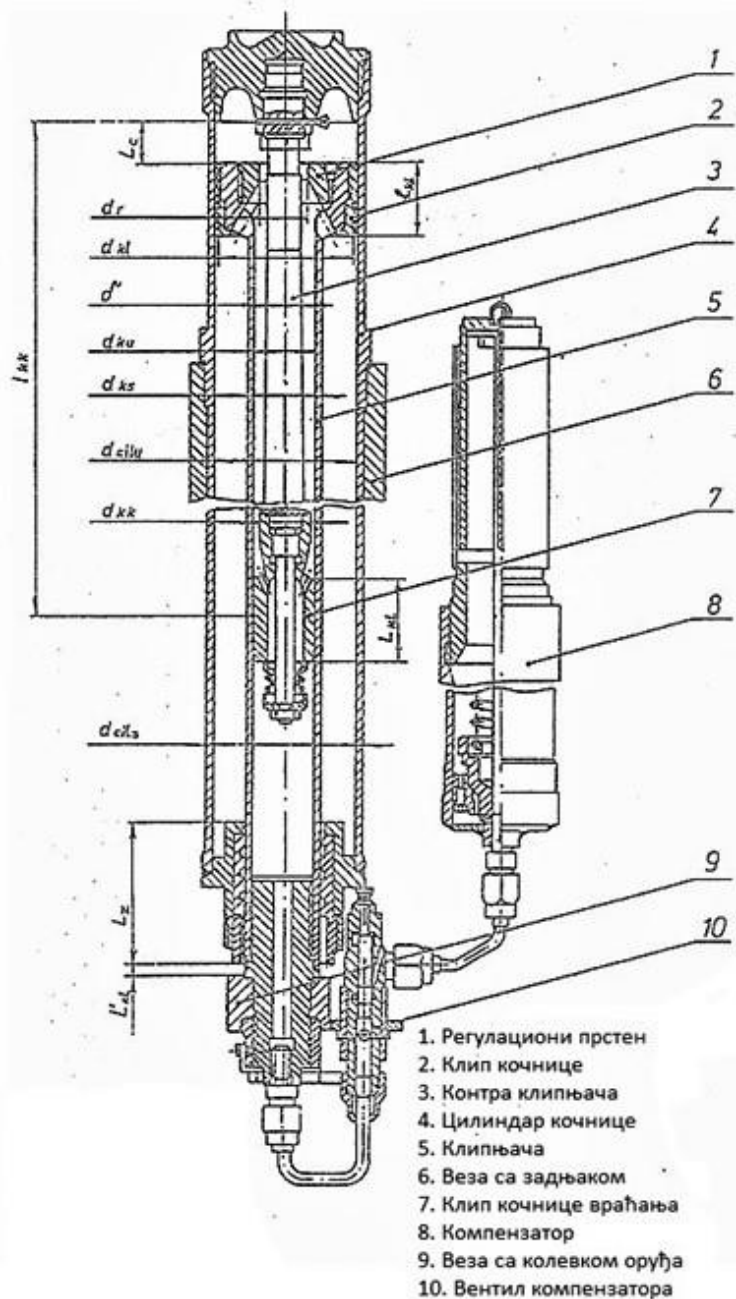
За одређивање величина кретања инверзним поступком помоћу рачунара треба дефинисати три групе почетних података:

1. почетне податке за решавање унутрашње балистичког прорачуна (УБП),
2. почетне податке за прорачун величина трзања и враћања,
3. почетне податке о промени пречника контраклипњаче

Основна објашњења за ове групе података су следећа:

Група података за решавање унутрашње балистичког прорачуна обухвата све податке за пројектил, барутно пуњење и цев неопходне за унутрашње балистички прорачун. У овом раду унутрашње балистички прорачун је урађен по методи Дроздова. У прилогу 2 се налази табеларни приказа резултата прорачуна унутрашње балистике.

Потребни подаци за прорачун величина трзања одређују се на основу расположиве конструктивне документације или мера конструкције. Обухватају тежинске и геометријске параметре елемената противтрзајућег уређаја и карактеристике течности и оруђа. НОРА-А 152 mm користи хидрауличну кочницу вретенастог типа приказану на слици 4.4.4.1



Слика 4.4.4.1. Хидраулична кочница

До групе података којима треба да се одреди каква је промена пречника котраклипњаче и дубине канала кочнице враћања на целој дужини, долази се мерењем на што је могуће мањим интервалима укупне дужине. На разматраном типу хидрауличне кочнице, променљиви пречник контраклипњаче δ са одговарајућом дужином трзања X мења се према Табели 4.4.4.1.

Табела 4.4.4.1. Промена пречника контраклипњаче

$X[mm]$	0	4.45	8.86	11.46	13.24	17.63	26.41	35.15	43.86
$\delta[mm]$	33.49	33.492	33.546	33.737	33.943	33.616	33.551	33.311	33.454

$X[mm]$	52.53	61.15	69.73	78.15	86.62	95.04	103.7	106.62	183.88
$\delta[mm]$	33.621	33.772	34.112	34.041	34.034	33.973	33.823	33.781	34.112

$X[mm]$	256.56	312.31	393.4	457.64	519.22	578.21	634.66	688.59	740.02
$\delta[mm]$	34.616	35.1	35.481	35.868	36.167	36.484	36.79	37.09	37.158

$X[mm]$	788.94	835.38	855.82	900	930	960	990	1020	1050
$\delta[mm]$	37.674	37.962	38.094	38.406	38.614	38.83	39.058	39.298	39.556

$X[mm]$	1080	1100	1140	1170	1200	1230	1245.7	1300
$\delta[mm]$	39.834	40.138	40.478	40.871	41.351	42.041	42.74	42.75

4.4.5 Резултати прорачуна

За решавање разматраног проблема помоћу рачунара изведено је одговарајуће програмско решење у програмском пакету Матлаб. Програм садржи две улазне датотеке, датотеку УБП која садржи резултате прорачуна унутрашње балистике по методи Дроздова, и датотеку ДКК у којој се налазе вредности димензија контраклипњаче. Остале улазне величине се уносе директно у програм то су укупна трзајућа маса, највећа дужина трзања, специфична маса течности у хидрауличној кочници, коефицијент протицања течности у ХК, почетни притисак гаса у повратнику, степен компресије у повратнику, површина попречног пресека цеви, коефицијент политропе повратника, пречник регулационог прстена, пречник клипа ХК, унутрашњи пречник клипњаче, спољашњи пречник клипњаче, унутрашњи пречник цилиндра ХК, спољашњи пречник цилиндра ХК, највећи пречник контраклипњаче, дужина клипа у ХК, дужина КК, почетна запремина гаса у повратнику, радна површина клипа повратника, убрзање Земљине теже, маса барутног пуњења, маса пројектила, дужина водишта пројектила у цеви, коефицијент ефикасности, коефицијент пропорционалности за силу трења, коефицијент трења, коефицијент пропорционалности и угао елевације.

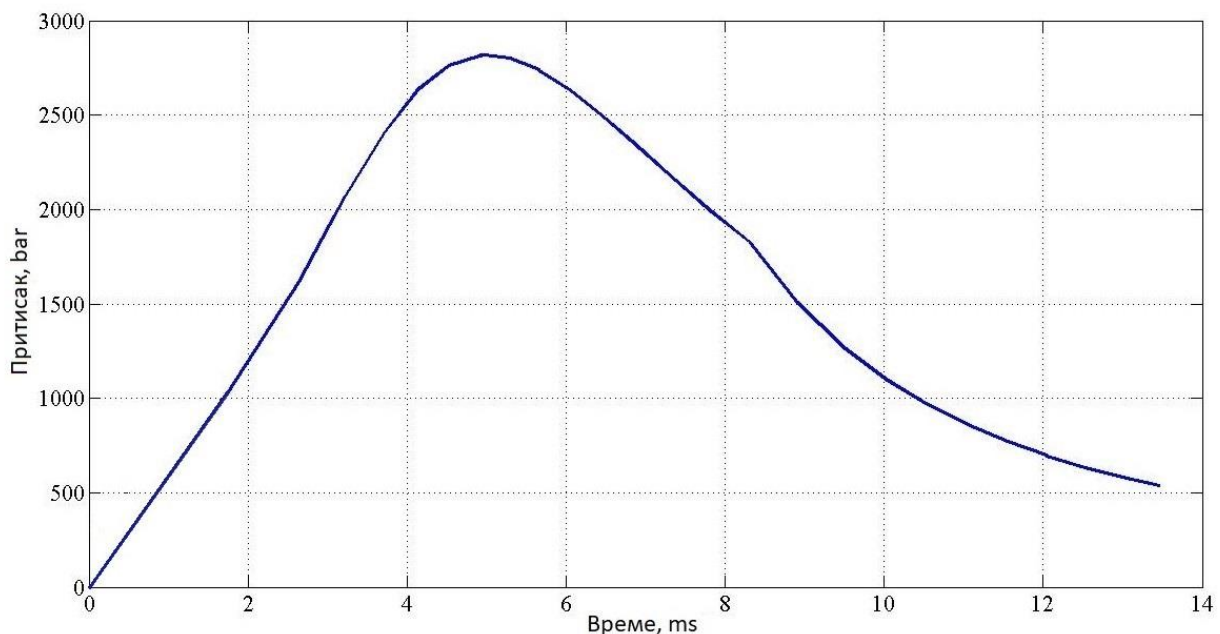
На основу података за одабрани пример оруђа и изведеног решења главних делова ПТУ, помоћу програма ИПТ, добијени су резултати за задат угао елевације $\varphi=0^\circ$ и $\varphi=65^\circ$. Као излаз матлаб формира табелу са резултатима прорачуна. У прилогу 3 је приказан излаз за угао $\varphi=0^\circ$, док се у прилогу 4 налазе резултати за угао елевације $\varphi=65^\circ$.

Додатно, програм ИПТ као излаз даје кључне параметре у виду девет дијаграма. Прва два дијаграма показују параметре унутрашње балистичког прорачуна, у виду промене притиска барутних гасова и брзине пројектила у цеви.

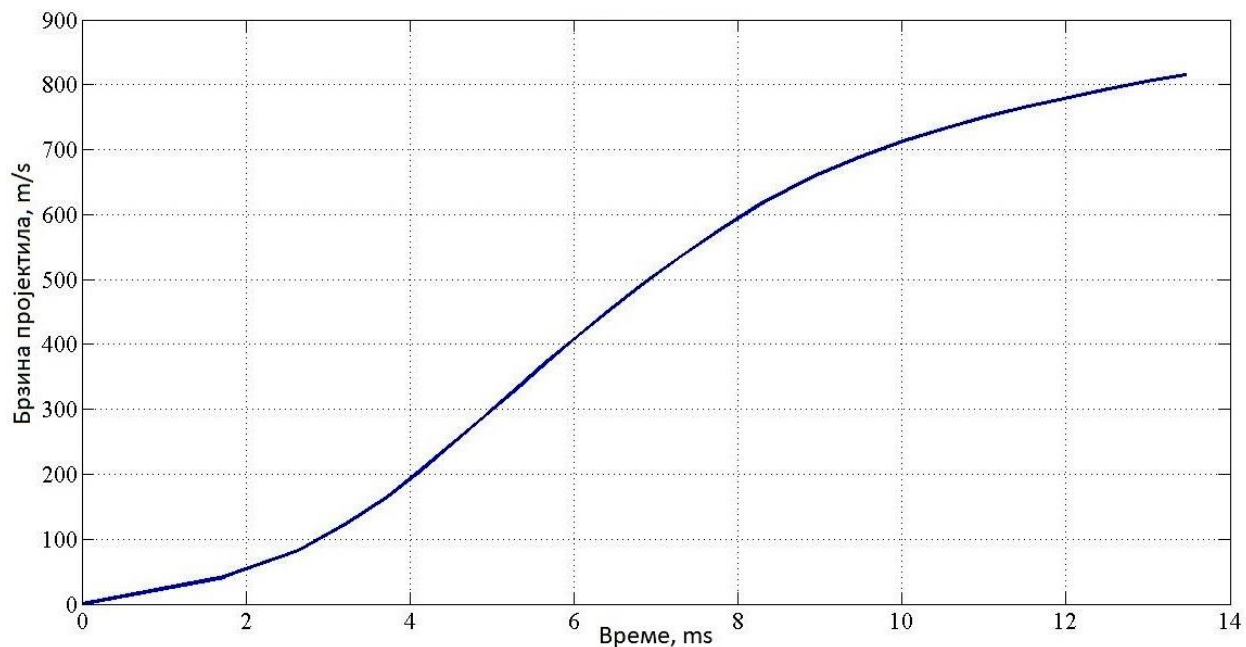
Унутрашње-балистички прорачун је урађен по методи Дроздова. Метода Дроздова се користи код оруђа код којих се употребљава једна врста барута. То су стрељачка оружја, топови и хаубице када гађају са пуњењима од само једне врсте барута. Овај метод се заснива на аналитичком решавању система једначина унутрашње балистике. Решавањем ових једначина добијају се вредности карактеристика опаљења на основу познатих карактеристика цеви, пројектила и карактеристика употребљеног барута [8].

Унутрашње-балистички прорачун је урађен за топ-хаубицу 152 mm НОРА-А. Ово оруђе користи тип барута NGH-275 код кога је барутно зрно облика седмоканалне цевчице. Потребно је дебљину барутог зрна помножити са фактором 10/7 и срачунати коефицијенте облика као за цилиндрично једноканално зрно.

Програмско решење методе Дроздова за унутрашње-балистички прорачун направљен је у програмском језику FORTRAN на персоналном рачунару, и налази се у литератури [9].



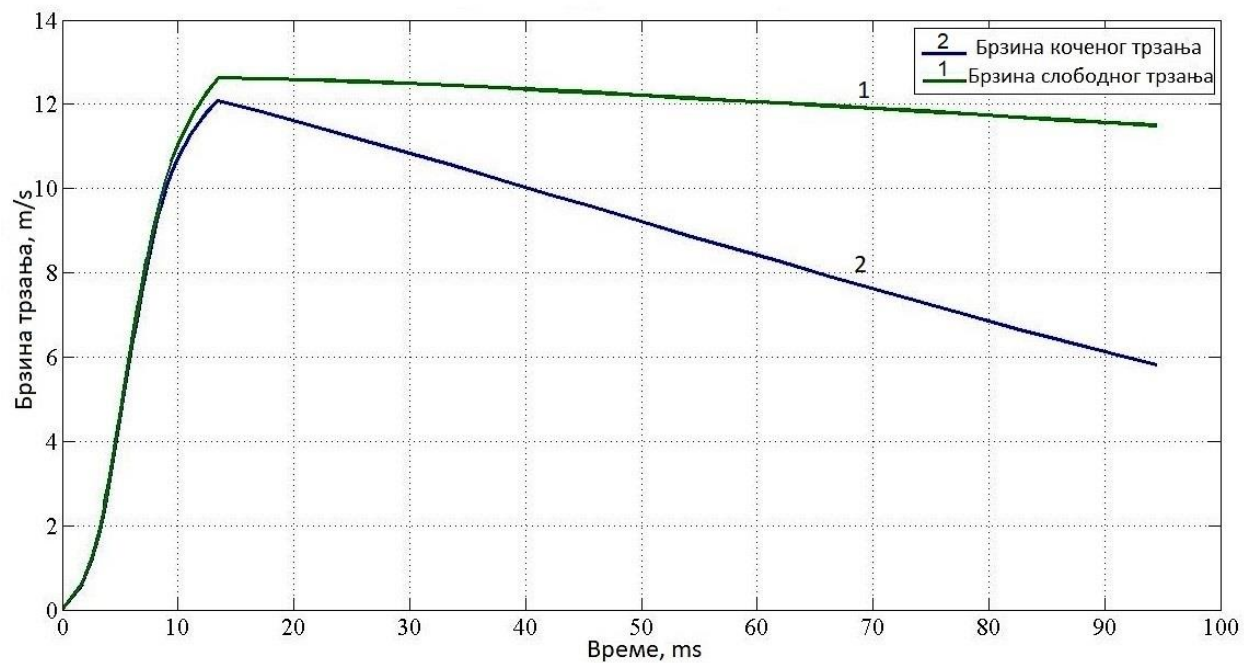
Слика 4.4.5.1. Промена притиска барутних гасова у зависности од времена



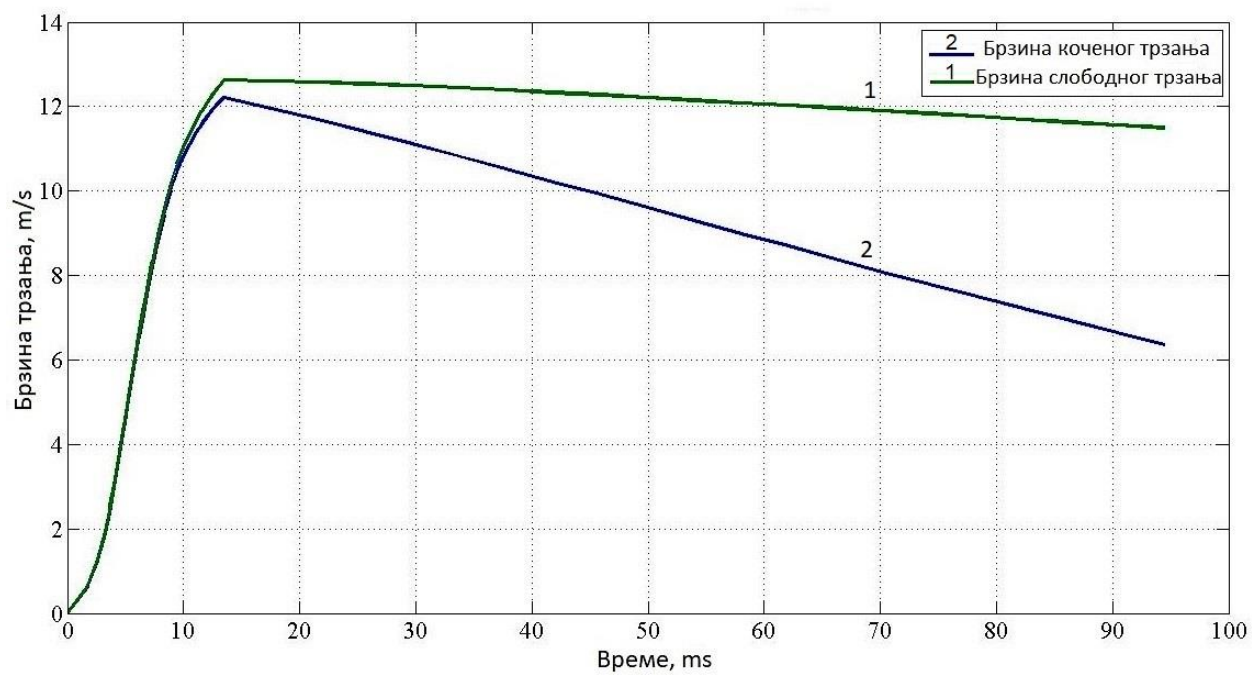
Слика 4.4.5.2. Промена брзине по времену

На слици 4.4.5.1. приказан је дијаграм промене притиска барутних гасова у цеви у зависности од времена, док је на слици 4.4.5.2 приказан дијаграм промене брзине пројектила у цеви у зависности од времена. Из приложеног УБ прорачуна може се видети да је максимални притисак барутних гасова у цеви топ-хаубице 152 mm $P_m=282 \text{ MPa}$, време које је протекло од опаљења до напуштања пројектила уста цеви је $t_u=0,01346 \text{ s}$, пут који је пројектил прешао је $X_u=5,84 \text{ m}$ док је брзина пројектила на устима цеви $V_o=815 \text{ m/s}$. Блага одступања вредности у односу на приказане у техничком упутству, резултат су упрошћавања барутног зрна.

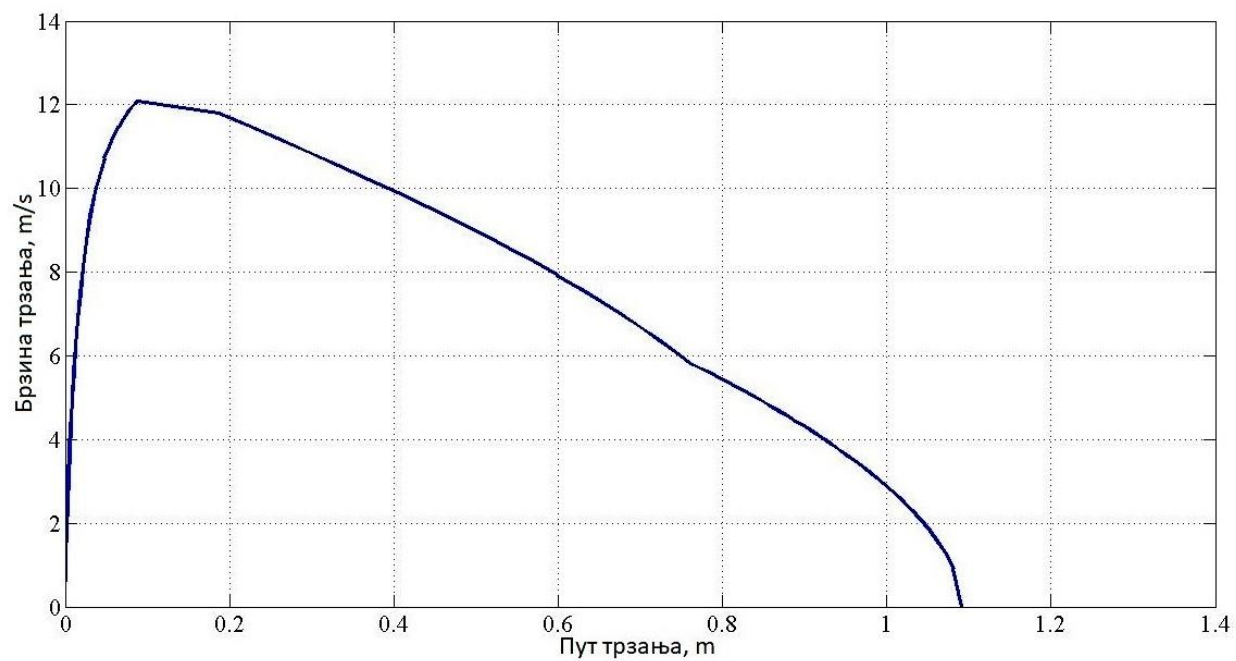
Преосталих седам дијаграма, приказани као резултати програма ИПТ јесу промена брзине слободног и коченог трзања у првом периоду, промена брзине трзања у зависности од пута трзања, промена површине проточних отвора, промена пречника контраклипњаче, промена пута слободног трзања, и промена сила хидрауличне кочнице, повратника, трења и отпора трзању у односу на пут трзања и време трзања.



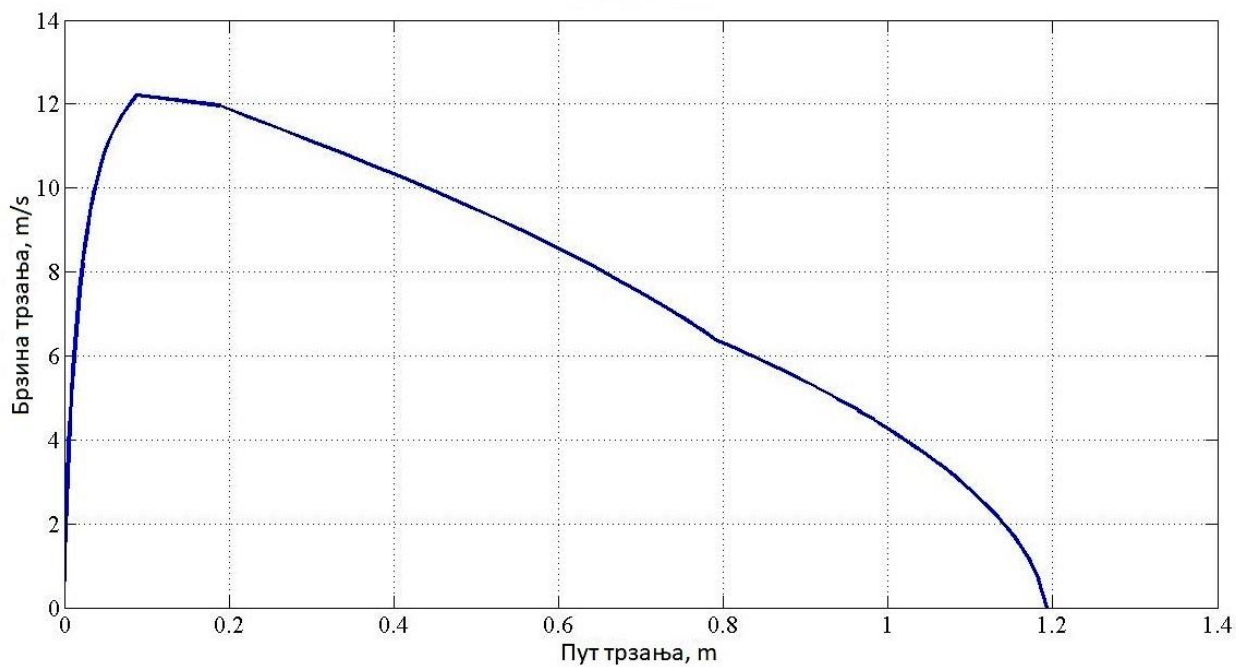
Слика 4.4.5.3. Промена брзина слободног и коченог трзања у првом периоду при елевацији $\varphi=0^\circ$



Слика 4.4.5.4. Промена брзина слободног и коченог трзања у првом периоду при елевацији $\varphi=65^\circ$



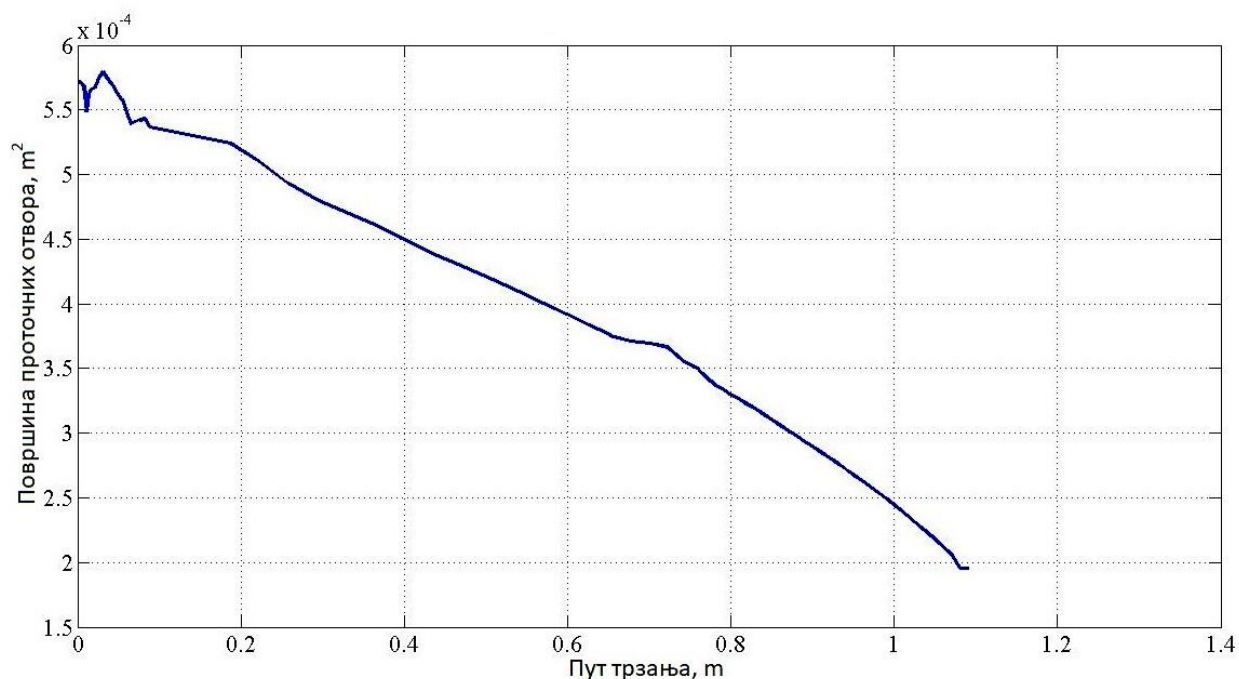
Слика 4.4.5.5. Промена брзине трзања у односу на пут трзања при елевацији $\varphi=0^\circ$



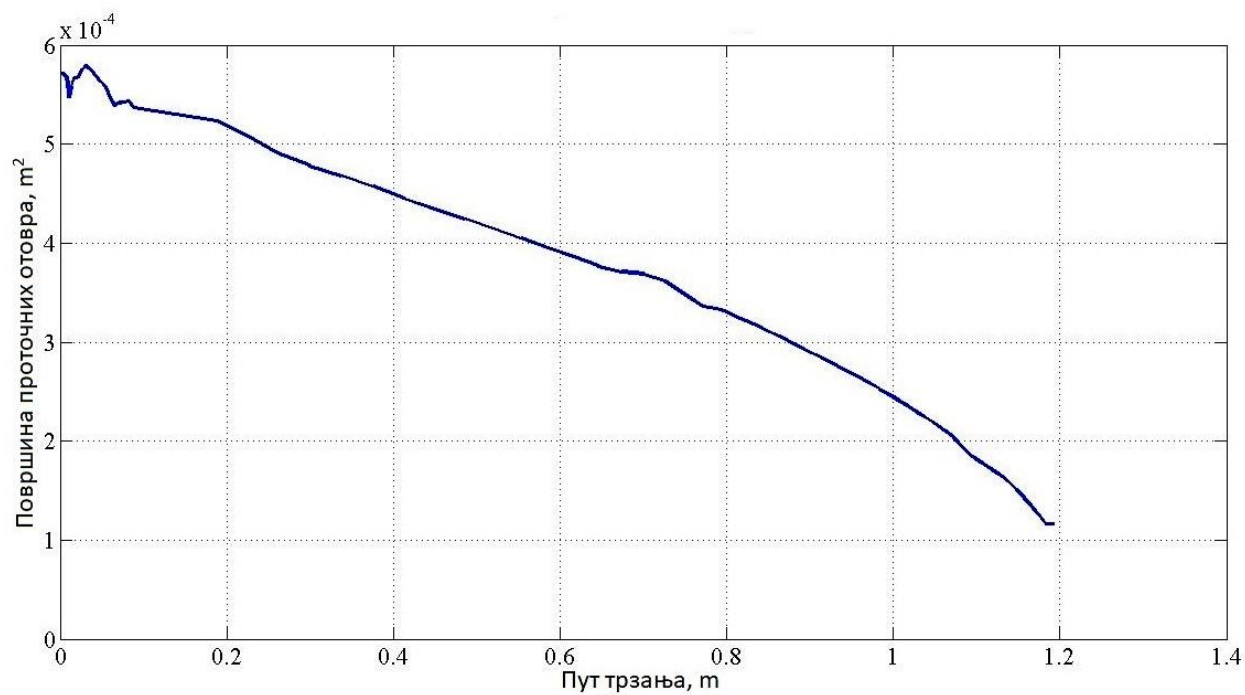
Слика 4.4.5.6. Промена брзине трзања у односу на пут трзања при елевацији $\varphi=65^\circ$

Слободно трзање цеви је кретање цеви уназад за време опаљења тј. лансирање пројектила, услед реактивне силе притиска барутних гасова на дно цеви. На слици 4.4.5.3. и 4.4.5.4. брзина слободног трзања представљена је зеленом бојом (1). Током кретања цев слободно клизи без икаквих сила отпора кретању, а по престанку деловања силе барутних гасова наставља по инерцији. Притисак барутних гасова на дно цеви саопштава цеви брзину кретања која почиње у истом тренутку када и кретање пројектила у цеви. За разлику од слободног трзања, кочено трзање цеви настаје услед деловања сила барутних гасова на дно цеви и силе укупног отпора кретању цеви коју доминатно чине хидраулична кочница трзања, повратник и трење као елементи противтрзајућег уређаја. Брзина коченог трзања на слици 4.4.5.3. и 4.4.5.4. је приказана плавом бојом (2).

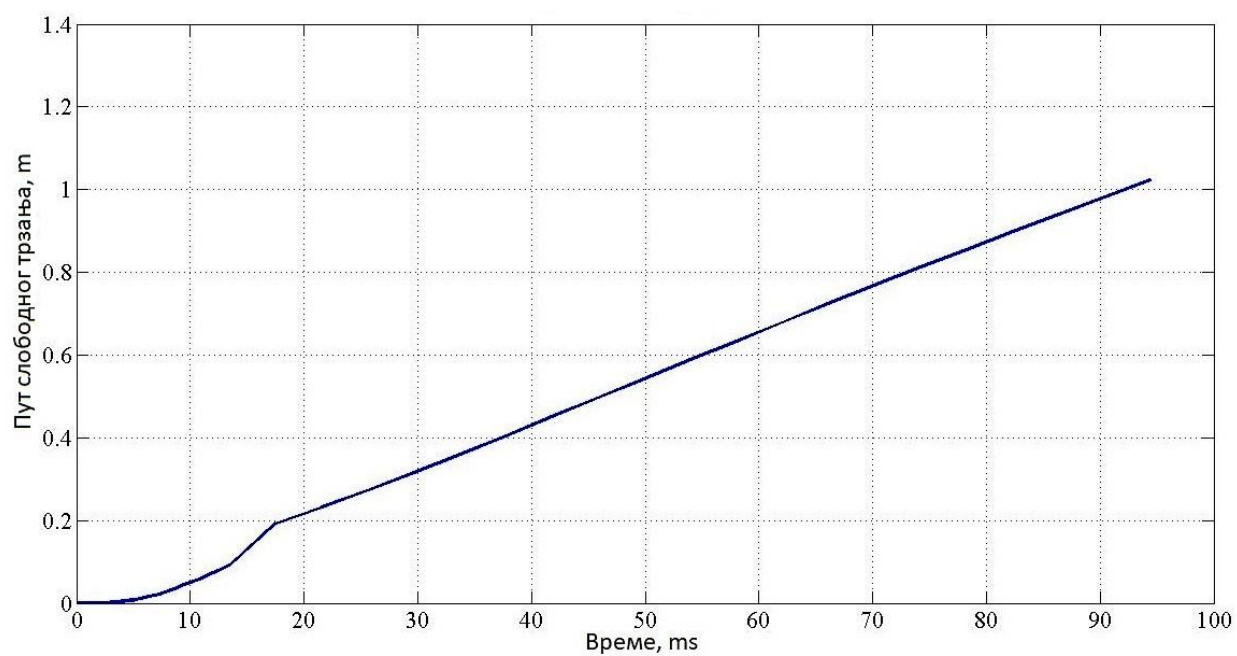
Зависно се од типа и намена оруђа обично се захтевима тражи да се задати пут трзања обезбеди у функцији елевационог угла цеви при различитим барутним пуњењима. Захтевани пут трзања у случају слободног трзања је немогуће остварити, па се енергија трзања апсорбује радом силе отпора трзању. На слици 4.4.5.5. и 4.4.5.6. приказана је промена брзине коченог трзања у односу на пут трзања. У тренутку када су силе једнаке $P_{kn}(t)=R(t)$ трзајући делови имају највећу брзину трзања, од тог момента до краја трзања кретање ће бити успорено. Тако се може видети да при углу елевације $\varphi=0^\circ$ максимална брзина трзања износи $12,08 \text{ m/s}$, док је остварен пут трзања $1,07 \text{ m}$. При углу елевације $\varphi=65^\circ$ максимална брзина трзања је $12,21 \text{ m/s}$ а укупан пут трзања износи $1,19 \text{ m}$.



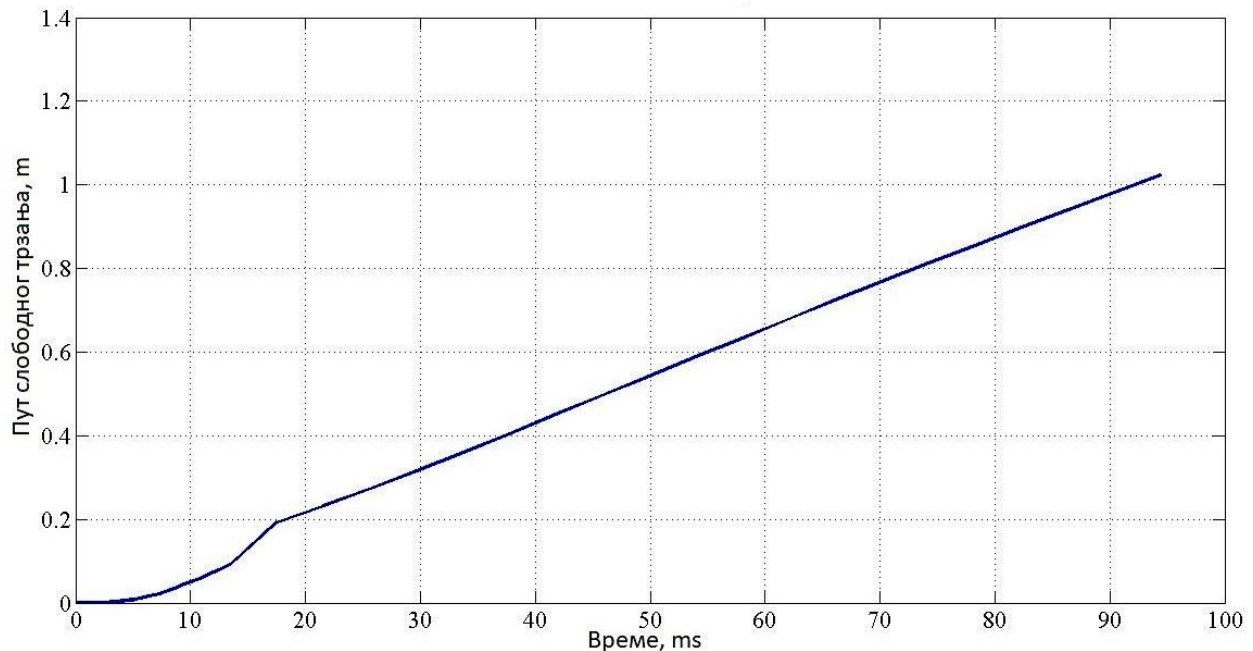
Слика 4.4.5.7. Промена површине проточних отвора при елевацији $\varphi=0^\circ$



Слика 4.4.5.8. Промена површине проточних отвора при елевацији $\varphi=65^\circ$



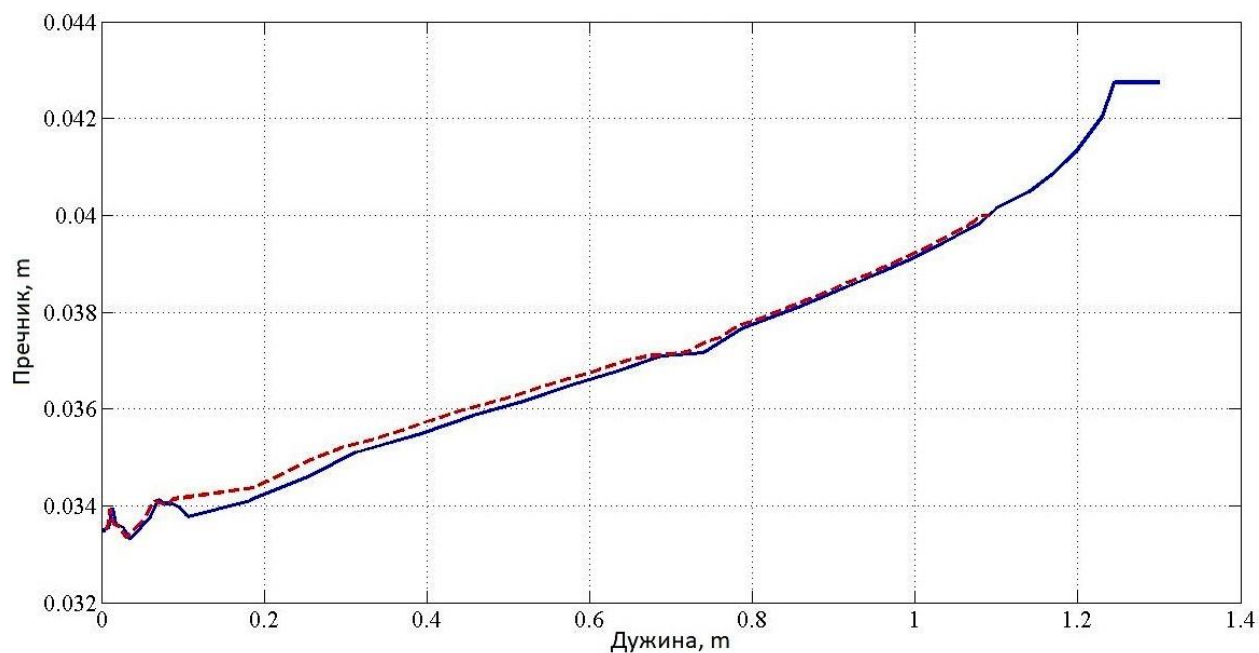
Слика 4.4.5.9. Промена пута слободног трзања при елевацији $\varphi=0^\circ$



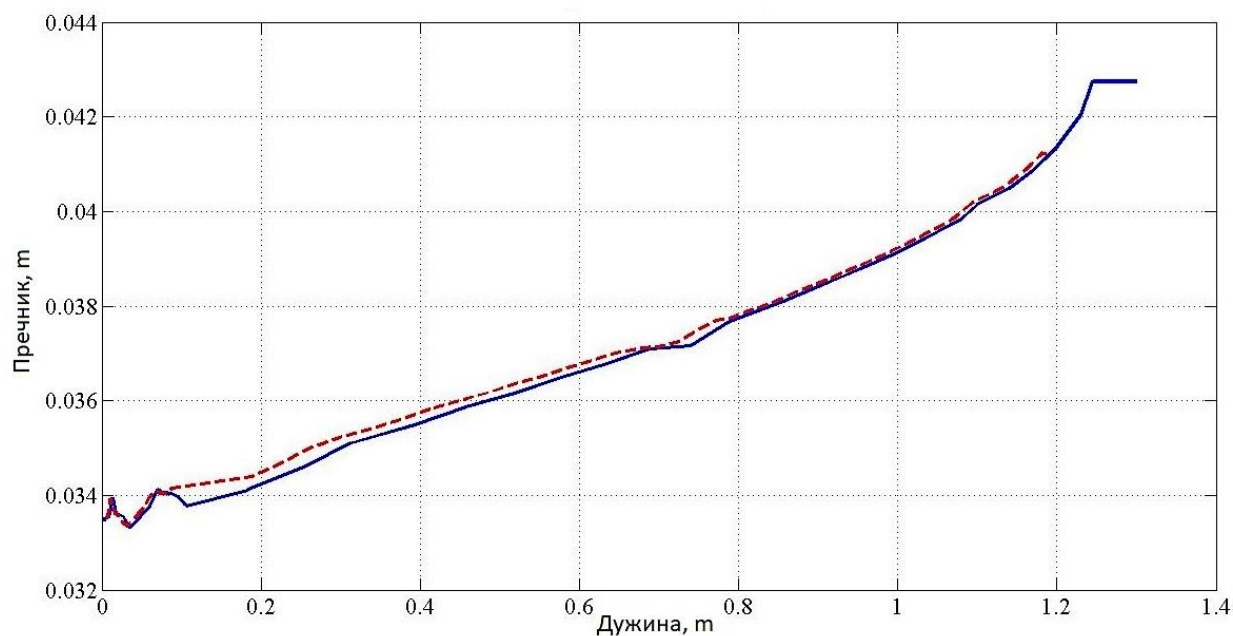
Слика 4.4.5.10. Промена пута слободног трзања при елевацији $\varphi=65^\circ$

На сликама 4.4.5.7. и 4.4.5.8. су приказане промене површине проточних отвора у зависности од пута трзања. Њихов карактер промене је исти, само је остварен на различитим дужинама трзања услед различитих углова елевације. Зависност притиска у цилиндру хидрауличне кочнице и хидрауличног отпора од површине проточних канала, омогућава да се утиче на закон кочења цеви и то мењајући облик проточних канала у зависности од дужине трзања.

Дијаграми са слика 4.4.5.9. и 4.4.5.10. представљају промену пута слободног трзања при углу елевације од 0° и 65° . Почетна неравномерна промена пута до 0,2 m, повезана је са наглим скоком брзине слободног трзања приказана на дијаграму 4.4.8. Са дијаграма се види да пут слободног трзања већ у првом периоду достиже вредност од 1,03 m, док максимална дужина трзања износи 1,2 m. Ово је јасан показатељ неопходности употребе коченог трзања, како би се енергија трзања трзајуће масе потпуно утрошила до краја трзања.

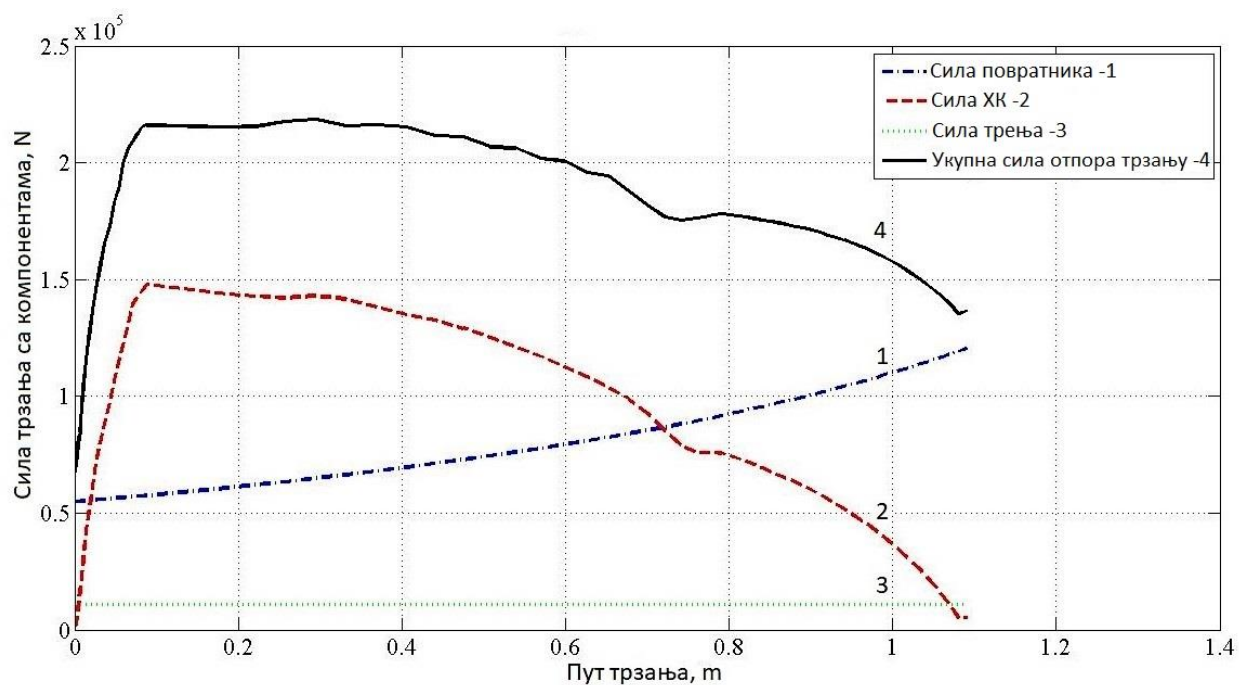


Слика 4.4.5.11. Промена пречника контраклипњаче при елевацији $\varphi=0^\circ$

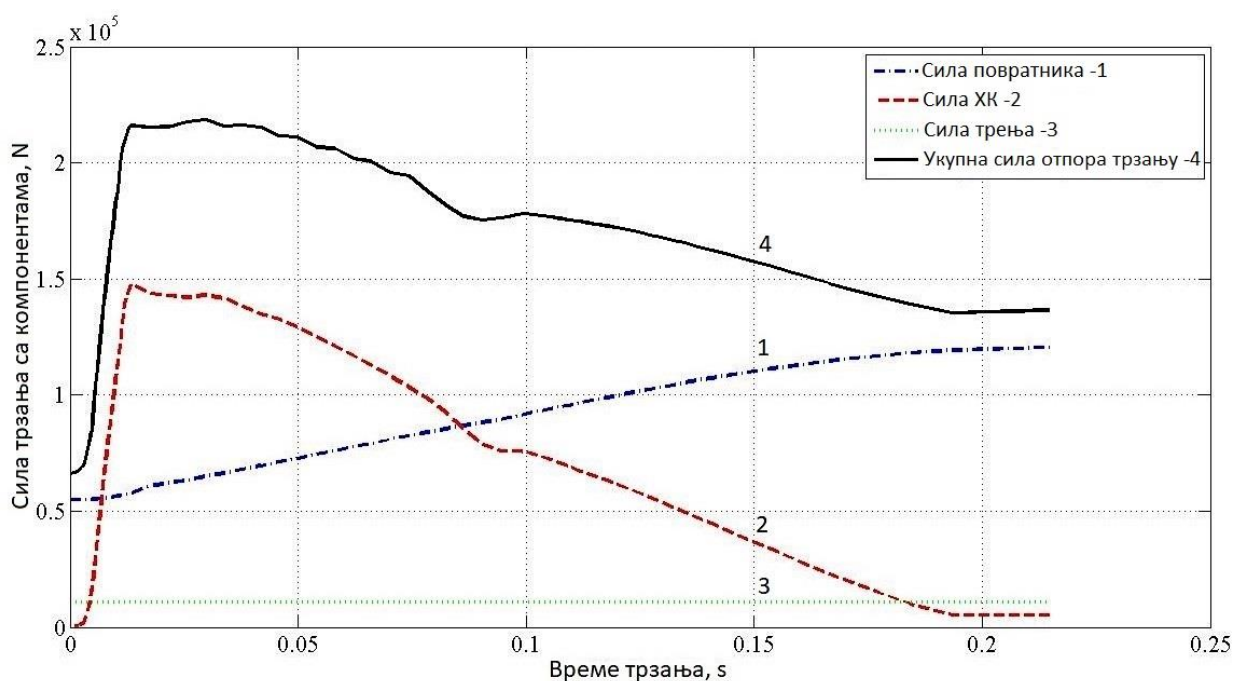


Слика 4.4.5.12. Промена пречника контраклипњаче при елевацији $\varphi=65^\circ$

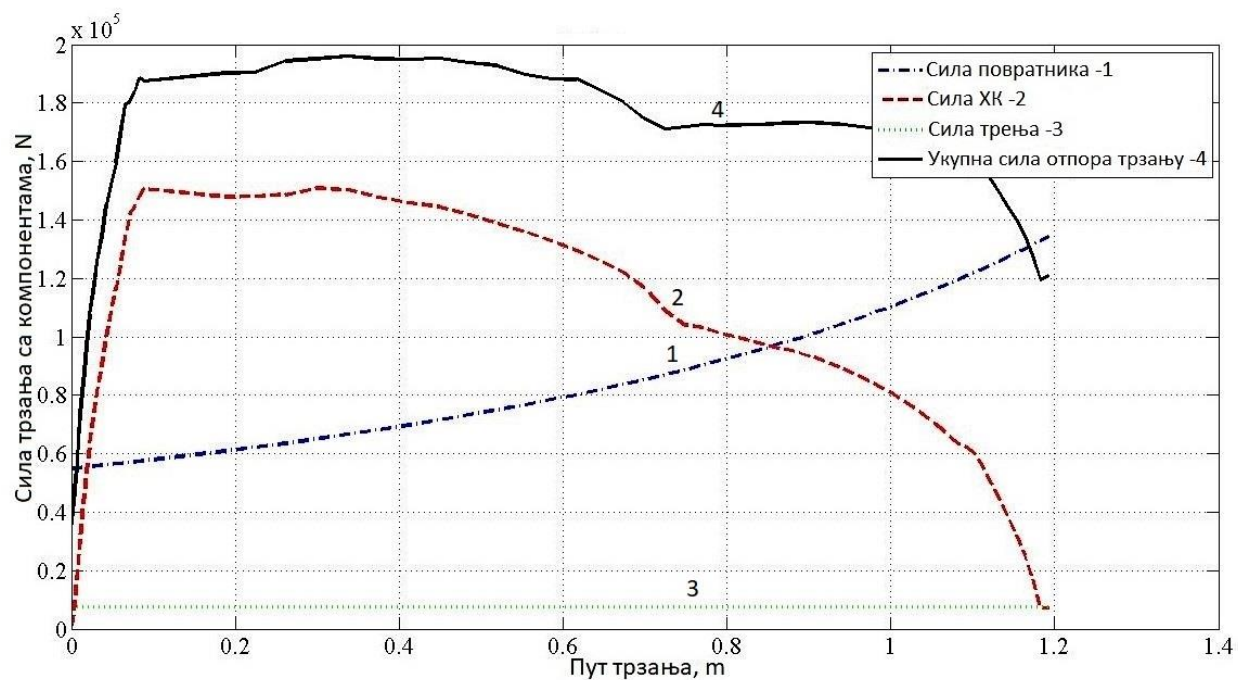
Пуном линијом на сликама 4.4.5.11. и 4.4.5.12. приказана је промена пречника контраклипњаче на целој дужини добијена непосредним мерењем на што мањим интервалима укупне дужине. Испрекиданом линијом је представљена вредност коју израчунава програм ИПТ. Програм одређује тренутну вредност пречника контраклипњаче за сваки положај клипа на путу трзања X . Ова вредност се одређује интерполацијом вредности пута трзања и вредности добијене непосредним мерењем пречника контраклипњаче.



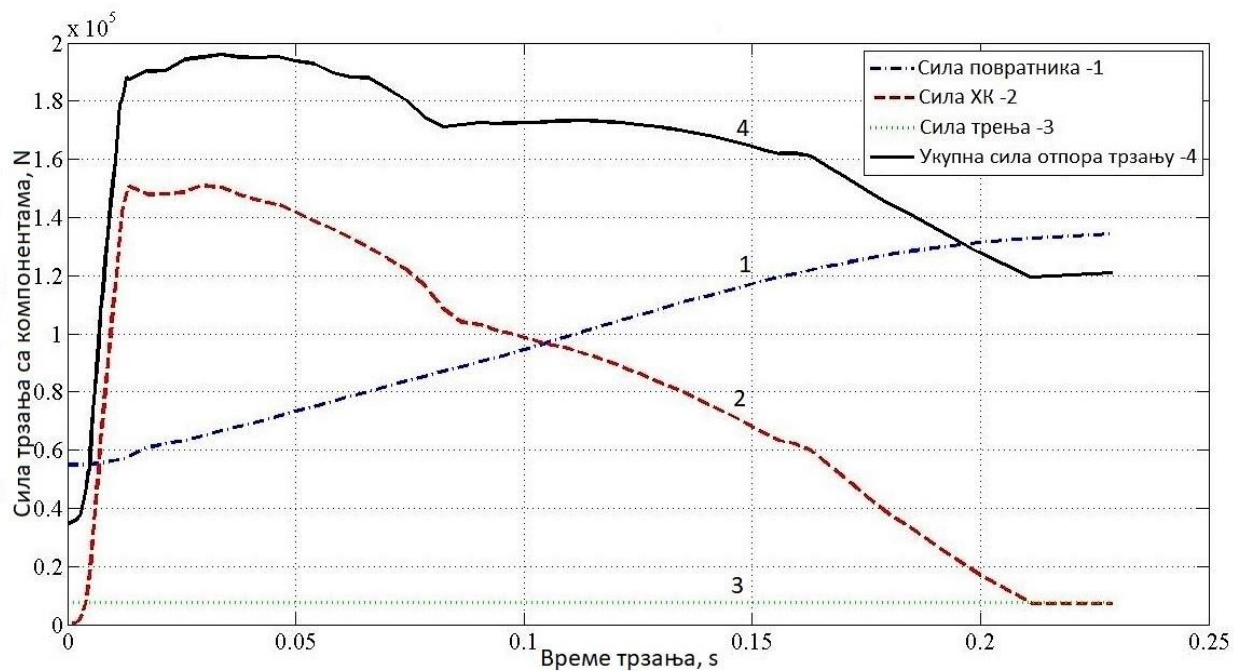
Слика 4.4.5.13. Промена силе отпора трзању са компонентама у зависности од пута трзања при елевацији $\varphi=0^\circ$



Слика 4.4.5.14. Промена силе отпора трзању са компонентама у зависности од времена трзања при елевацији $\varphi=0^\circ$



Слика 4.4.5.15. Промена силе отпора трзању са компонентама у зависности од пута трзања при елевацији $\varphi=65^\circ$



Слика 4.4.5.16. Промена силе отпора трзању са компонентама у зависности од времена трзања при елевацији $\varphi=65^\circ$

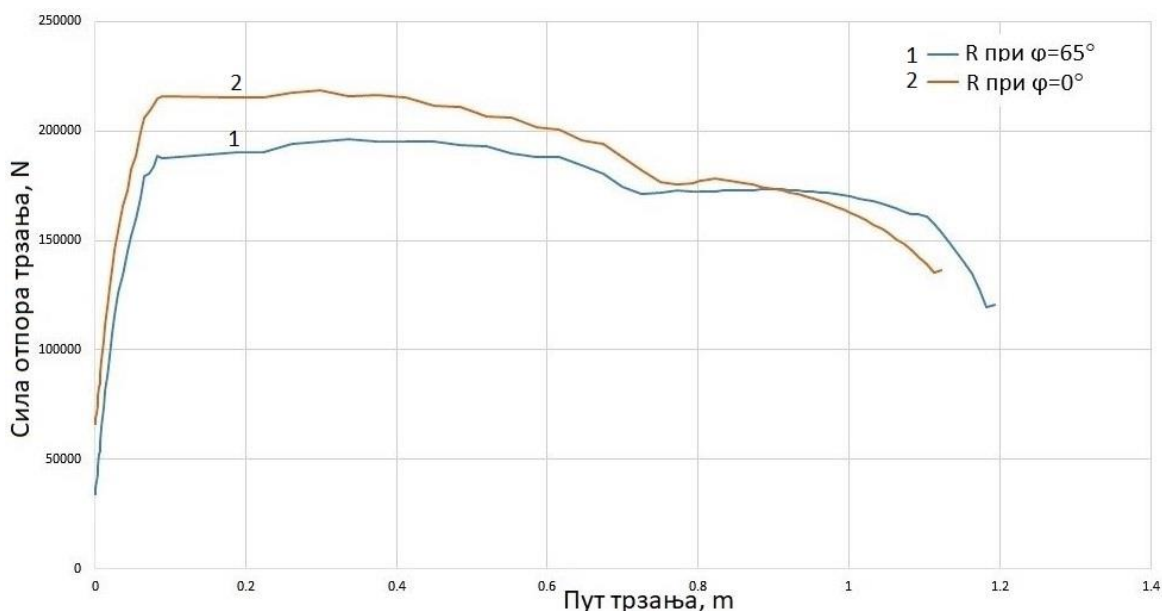
На сликама 4.4.5.13. и 4.4.5.15. је дата промена силе повратника F_p (плава боја-1), силе кочнице F_k (црвена боја-2), силе трења F_{tr} (зелена боја-3) и промена укупне силе отпора трзању R (црна боја-4) на путу трзања X , док је на сликама 4.4.5.14. и 4.4.5.16. дата промена силе повратника F_p (плава боја-1), силе кочнице F_k (црвена боја-2), силе трења F_{tr} (зелена боја-3) и промена укупне силе отпора трзању R (црна боја-4) у зависности од времена трзања t , за два карактеристична елевациона угла $\varphi=0^\circ$ и $\varphi=65^\circ$.

Укупна сила отпора трзања R представља резултанту силу кочења кретања коју чине силе главних делова противтрзајућег уређаја (кочнице F_k и повратника F_p) и компоненте механичког и хидрауличног трења, односно укупна сила трења F_{tr} , као и силе тежине трзајућих делова Q_t . Према томе је:

$$R(t) = F_k + F_p + F_{tr} - Q_t \sin \varphi \quad (20)$$

Као што се види са дијаграма, кочење се врши променљивом силом отпора $R(t) \neq const$. Ово је сасвим рационално јер за обезбеђење услова стабилности, сила отпора трзања се мења са променом линије стабилности оруђа. Хидраулична кочница је главни елемент помоћу којег може да се регулише целокупна висина отпора кочења цеви до њеног заустављања. Отпор ХК трзања се повећава са повећањем брзине трзања и смањивањем проточних површина за протицање течности. Основна намена повратника је враћање трзајућих делова оруђа, после опаљења, у почетни положај и њихово држање у предњи положај при свим угловима елевације цеви. При трзању повратник учествује у кочењу кретања трзајућих делова тако што акумулира део њихове кинетичке енергије у облик потенцијалне енергије. Акумулирана потенцијална енергија повратника омогућује враћање делова у предњи положај. Почетна сила повратника се одређује из услова да се трзајући делови држе у предњем положају при највећем елевационом углу цеви. Са претходна четири дијаграма се може очитати да је почетна сила повратника $F_{p0} = 54883.95 \text{ N}$.

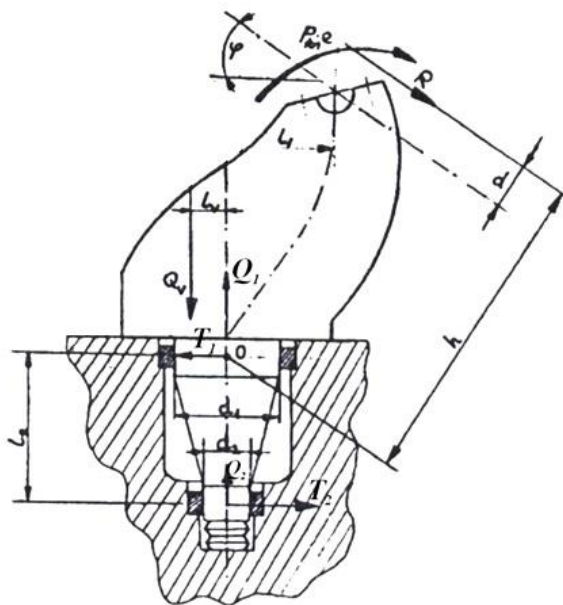
При различитим угловима елевације, добијају се различите вредности сила отпора трзању, са истим карактером промена. Тако при углу елевације $\varphi=0^\circ$, почетна вредност силе отпора трзања $R_0 = 66273 \text{ N}$, максимална вредност износи $R_{max} = 218584 \text{ N}$ која је остварена на путу трзања $X_{Rmax} = 0.294915198 \text{ m}$, а укупни пут трзања $X_\lambda = 1.090730338 \text{ m}$. При елевацији $\varphi=65^\circ$, почетна вредност силе отпора трзања $R_0 = 34326 \text{ N}$, на путу трзања $X_{Rmax} = 0.3371799 \text{ m}$ је остварена максимална вредност силе отпора трзања $R_{max} = 196055 \text{ N}$, док укупни пут трзања износи $X_\lambda = 1.192692156 \text{ m}$. Дакле при већим угловима елевације, остварује се мање вредности силе отпора трзања, док је пут трзања дужи. На овакве вредности знатно утиче сила тежине трзајућих делова, јер повећањем угла, на основу синуса у једначини, расте и сама вредност силе.



Слика 4.4.5.17 Промена силе отпора трзања R на путу трзања X при елевацији $\varphi=0^\circ$ и $\varphi=65^\circ$

4.5 Аналитички прорачун оптерећења горњег лафета

Уз претходну дефинисану промену силе отпора трзања R , и података са техничког цртежа и техничког упутства приступа се анализи стања напрезања горњег лафета топ-хаубице 152 mm НОРА-А. Веза између горњег и доњег лафета је остварена помоћу стожера без котрљача. Прилагођена шема оптерећења тела горњег лафета дата је на слици 4.5.1. за случај топ-хаубице 152 mm НОРА-А.



Слика 4.5.1. Силе које делују на горњи лафет за случај топ-хаубице 152 mm НОРА-А

Величине силе реакција T_1 , T_2 и Q_1 одређују се из услова равнотеже сила и момената;

$$\sum F_x = 0, \sum F_y = 0, \sum M_0 = 0$$

$$T_1 = T_2 + R \cdot \cos \varphi \quad (26)$$

$$T_2 = \frac{P_{kn} \cdot e + R \cdot h - Q_v \cdot l_v}{l_2} \quad (27)$$

за $e = 0 \rightarrow P_{kn} e = 0$, па израз добија облик:

$$T_2 = \frac{R \cdot h - Q_v \cdot l_v}{l_2} \quad (28)$$

$$Q_1 = R \cdot \sin \varphi + Q_v - Q_2 \quad (29)$$

Сила реакције Q_2 се добија из израза

$$Q_2 = C_2 \cdot \Delta_2 \quad (30)$$

Где је C_2 крутост тањирасте опруге а Δ_2 угиб са урачунатим зазором између горњег и доњег лафета.

Крутост тањирасте опруге амортизера C_2 износи:

$$C_2 = 1,5 \cdot 10^7 \frac{N}{m}$$

Величине угиба са зазором између горњег и доњег лафета износи:

$$\Delta_2 = 0.005 m$$

Добија се да је сила реакције тањирастих опруга амортизера:

$$Q_2 = 75000 N$$

Тежина делова покретних по правцу је:

$$Q_v = m_{pp} \cdot g \quad (31)$$

Где је m_{pp} маса делова покретних по правцу и износи:

$$m_{pp} = 4580 \text{ kg}$$

Следи да је тежина делова покретних по правцу:

$$Q_v = 4580 \text{ kg} \cdot 9.81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} = 44930 \text{ N}$$

Величина l_v променљива; у периоду трзања смањује се у зависности од померања средишта масе у смеру трзања, а смањује се и са повећавањем угла елевације φ .

Тежина трзајућих делова хаубице добија се на основу података о масама делова хаубице:

$$m_t = 3213 \text{ kg} \quad \text{Одакле следи}$$

$$Q_t = 3213 \text{ kg} \cdot 9.81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} = 31520 \text{ N}$$

Крак h (висина горњег лафета) на коме делује сила отпора трзању R је:

$$h = 0,75 \text{ m}$$

На основу претходно датих израза (26÷31) добијају се вредности карактеристичних сила која дефинишу напрезање тела горњег лафета на месту везе горњег и доњег лафета. Вредности сила су дате у табели 4.5.1.

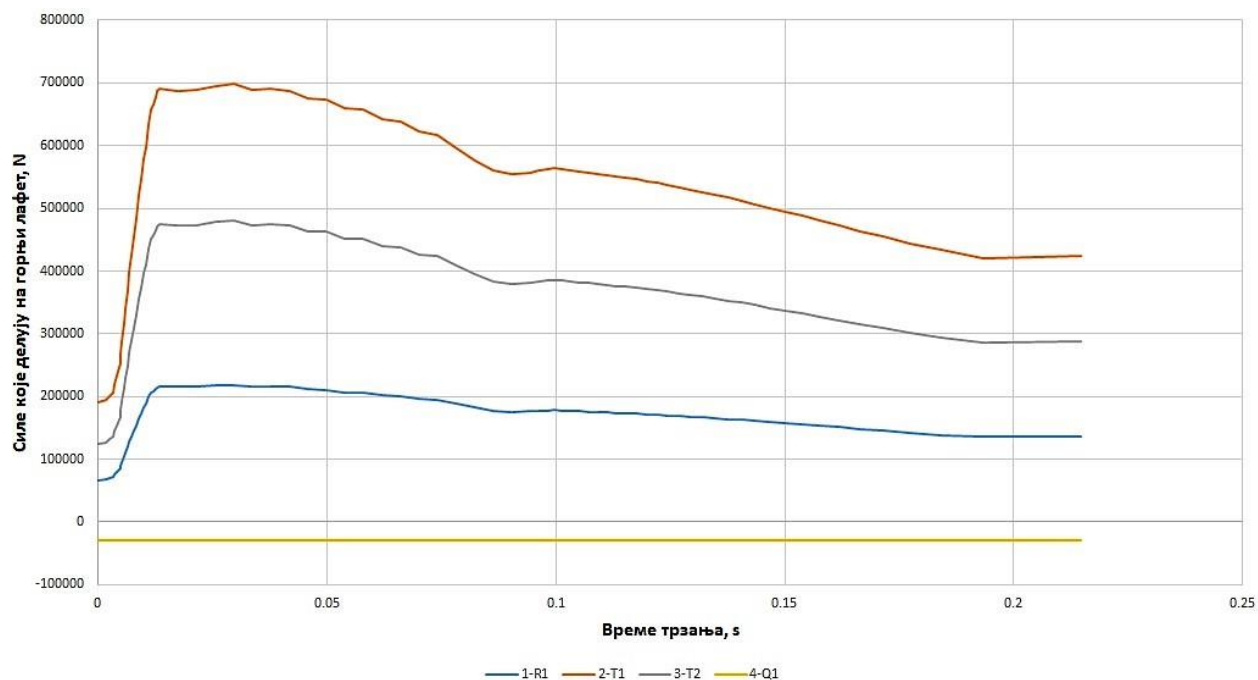
Табела 4.5.1. Вредности сила које делују на горњи лафет при углу $\varphi=0^\circ$ и углу $\varphi=65^\circ$

Оптерећења горњег лафета при елевационом углу $\varphi=0^\circ$				Оптерећења горњег лафета при елевационом углу $\varphi=65^\circ$			
R [N]	T ₁ [N]	T ₂ [N]	Q ₁ [N]	R [N]	T ₁ [N]	T ₂ [N]	Q ₁ [N]
66273.45	190958.2	124684.7	-30070	34326.31	64558.45	50141.39	-1688.02
67346.06	194533.5	127187.5	-30070	35783.21	68569.76	53540.81	-483.419
69158.12	200573.7	131415.6	-30070	37271.11	72666.46	57012.59	746.823
70997.79	206706	135708.2	-30070	40255.92	80884.64	63977.15	3214.75
75005.26	220064.2	145059	-30070	43618.06	90141.73	71822.15	5994.665
79070.98	233616.6	154545.6	-30070	47286.22	100241.4	80381.17	9027.599
83078.88	246976.3	163897.4	-30070	52686.25	115109.5	92981.26	13492.51
84815.61	252765.4	167949.7	-30070	53605.81	117641.3	95126.89	14252.82
89536.86	268502.9	178966	-30070	57851.51	129331.2	105033.5	17763.29
95623.43	288791.4	193168	-30070	64966.83	148922	121635.9	23646.44
104349.6	317878.6	213529	-30070	73869.66	173434.5	142409.2	31007.56
111171.1	340616.9	229445.9	-30070	81381.49	194117	159936.8	37218.55
119662	368920.1	249258.1	-30070	88093.66	212597.9	175598.5	42768.36
128666	398933.3	270267.3	-30070	97140.07	237505.7	196706.8	50248.2
136869.4	426278	289408.6	-30070	107780.5	266802.2	221534.4	59045.98
145593.4	455358.1	309764.6	-30070	115530.7	288141.3	239618.4	65454.12

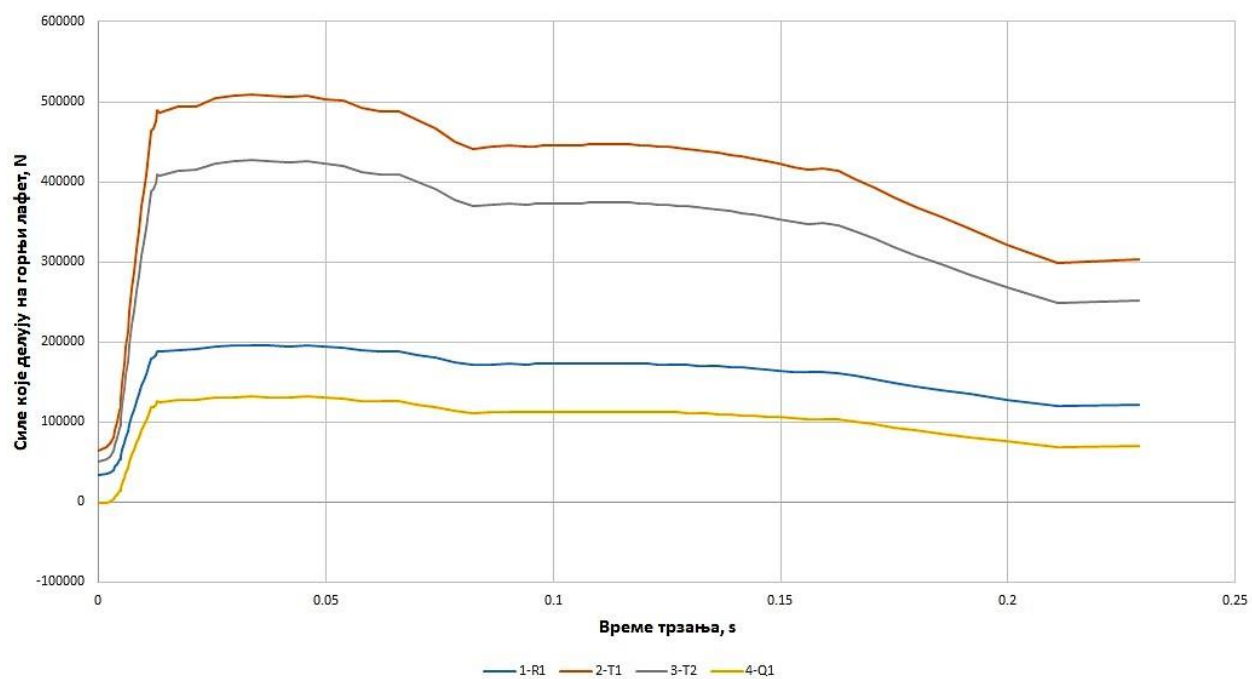
154281.6	484318.6	330037	-30070	125840.7	316528.1	263675	73978.73
165562.7	521922.4	356359.7	-30070	134465.2	340274.2	283798.8	81109.7
172793.6	546025.2	373231.6	-30070	145006.2	369297.1	308394.5	89825.28
182773.5	579291.5	396518.1	-30070	151958.5	388439.2	324616.6	95573.69
188450.9	598216.4	409765.5	-30070	159654.7	409629.3	342574.4	101937.1
199495.7	635032.2	435536.5	-30070	169343.6	436305.9	365181.6	109948.1
206177.5	657305.2	451127.6	-30070	179218.9	463495.9	388224	118113.3
208953	666556.7	457603.7	-30070	180339.5	466581.5	390838.9	119039.9
212076.7	676969	464892.3	-30070	183740.5	475945.5	398774.5	121851.9
214965.7	686599.1	471633.4	-30070	188472.4	488973.9	409815.5	125764.3
216037.1	690170.4	474133.3	-30070	187542.7	486414.3	407646.3	124995.7
215180.3	687314.4	472134.1	-30070	190320.6	494062.7	414128.1	127292.5
215532.3	688487.8	472955.5	-30070	190496.5	494547.1	414538.5	127438
217630.9	695483	477852.1	-30070	194267.3	504929.3	423337.1	130555.8
218584.2	698660.6	480076.4	-30070	195160.8	507389.5	425421.9	131294.6
215811.3	689417.6	473606.3	-30070	196054.9	509851.1	427508.1	132033.8
216145.1	690530.3	474385.2	-30070	195107.6	507243	425297.8	131250.6
215163.5	687258.4	472094.9	-30070	194893.7	506654	424798.6	131073.7
211619.5	675445	463825.5	-30070	195304.9	507786.3	425758.2	131413.7
210985	673329.9	462344.9	-30070	193764.8	503545.8	422164.5	130140.3
206710.3	659081.1	452370.8	-30070	192769.4	500805	419841.8	129317.2
206119.1	657110.5	450991.3	-30070	189701.1	492356.9	412682.5	126780.3
201685.8	642332.5	440646.8	-30070	188104.2	487960.2	408956.4	125459.9
200596.2	638700.7	438104.5	-30070	187968.6	487586.9	408640.1	125347.8
195814.2	622760.8	426946.6	-30070	184238.7	477317.2	399937	122263.8
194313.9	617759.5	423445.7	-30070	180241.6	466311.8	390610.3	118958.9
187841.1	596183.8	408342.7	-30070	174292.6	449932.4	376729.5	114040.2
181968.6	576608.6	394640	-30070	171143.6	441262.1	369381.8	111436.5
176882.6	559655.2	382772.7	-30070	171927.8	443421.2	371211.5	112084.8
175382.1	554653.5	379271.5	-30070	172604.7	445285	372791	112644.5
176192.3	557354.4	381162.1	-30070	172150.9	444035.6	371732.2	112269.3
176944.3	559861	382916.7	-30070	172311.9	444478.7	372107.7	112402.4
177665	562263.5	384598.4	-30070	172439.1	444829.1	372404.7	112507.6
178153.6	563892	385738.4	-30070	172530.7	445081.3	372618.4	112583.4
177692.1	562353.5	384661.5	-30070	172584.5	445229.5	372743.9	112627.9
177184.8	560662.7	383477.9	-30070	172663.7	445447.4	372928.6	112693.3
176629.6	558812.1	382182.4	-30070	172724.3	445614.3	373070.1	112743.4
176024.2	556794.1	380769.9	-30070	172886.2	446060.1	373447.9	112877.3
175400	554713.2	379313.2	-30070	173066.6	446556.6	373868.7	113026.4
174748.5	552541.7	377793.2	-30070	173194.4	446908.5	374166.8	113132.1
174108.9	550409.5	376300.7	-30070	173265.8	447105.1	374333.5	113191.1

173477.4	548304.8	374827.4	-30070	173264.1	447100.5	374329.6	113189.7
172774	545959.9	373185.9	-30070	173163.2	446822.7	374094.2	113106.3
171994.2	543360.6	371366.4	-30070	172993.5	446355.4	373698.1	112966
171131.4	540484.8	369353.4	-30070	172776.8	445758.9	373192.6	112786.8
170155.9	537232.9	367077	-30070	172553.9	445145.1	372672.5	112602.5
169091.5	533685	364593.5	-30070	172245.4	444295.7	371952.6	112347.4
167937.6	529838.7	361901.1	-30070	171885.6	443304.9	371113	112049.9
166737.8	525839.4	359101.6	-30070	171536.7	442344.4	370299	111761.5
165428.9	521476.3	356047.4	-30070	171078.9	441084	369230.9	111383
164010.3	516747.8	352737.5	-30070	170544.6	439612.7	367984	110941.1
162541.9	511852.9	349311	-30070	169993.4	438095.1	366697.9	110485.4
160935.2	506497.4	345562.2	-30070	169301	436188.7	365082.3	109912.9
159186.7	500669.1	341482.4	-30070	168516.7	434029.3	363252.3	109264.4
157344.4	494528	337183.6	-30070	167730.2	431863.8	361417.1	108614.1
155324.5	487795.1	332470.6	-30070	166753.7	429175.1	359138.6	107806.7
153121.3	480451	327329.7	-30070	165636.7	426099.8	356532.3	106883.2
150788.2	472674.1	321885.9	-30070	164470.7	422889.2	353811.6	105919.1
148216.5	464101.6	315885.1	-30070	163039.6	418949	350472.4	104735.8
145392.5	454688.4	309295.9	-30070	161903.4	415820.7	347821.3	103796.4
142339.3	444511.1	302171.7	-30070	162029.6	416168.2	348115.7	103900.7
138954.8	433229.5	294274.6	-30070	160974	413261.7	345652.6	103027.9
135223.9	420792.9	285569	-30070	157494.1	403680.3	337532.8	100150.6
136438.4	424841.2	288402.8	-30070	153569.1	392873.7	328374.7	96905.38
				149161.2	380737.2	318089.5	93260.76
				144577.6	368116.9	307394.3	89470.88
				140137.3	355891.2	297033.6	85799.5
				134562.2	340541.4	284025.2	81189.92
				127757.7	321806.3	268148	75563.75
				119363	298692.9	248560.4	68622.77
				120843.6	302769.4	252015.1	69846.96

На основу добијених вредности сила које оптерећују тело горњег лафета на месту везе горњег и доњег лафета, формиран је дијаграм промене ових сила у односу на време трзања. На слици 4.5.2. се налази дијаграм промене укупне силе отпора трзању, силе реакције горњег лежаја и сила реакције доњег лафета у односу на време трзања при елевационом углу од 0° , док је на слици 4.5.3. приказан исти дијаграм промена сила само при углу елевације од 65° .



Слика 4.5.2. Силе које делују на горњи лафет при углу елевације $\varphi=0^\circ$



Слика 4.5.3. Силе које делују на горњи лафет при углу елевације $\varphi=65^\circ$

5. СИМУЛАЦИЈА ОПТЕРЕЋЕЊА ГОРЊЕГ ЛАФЕТА

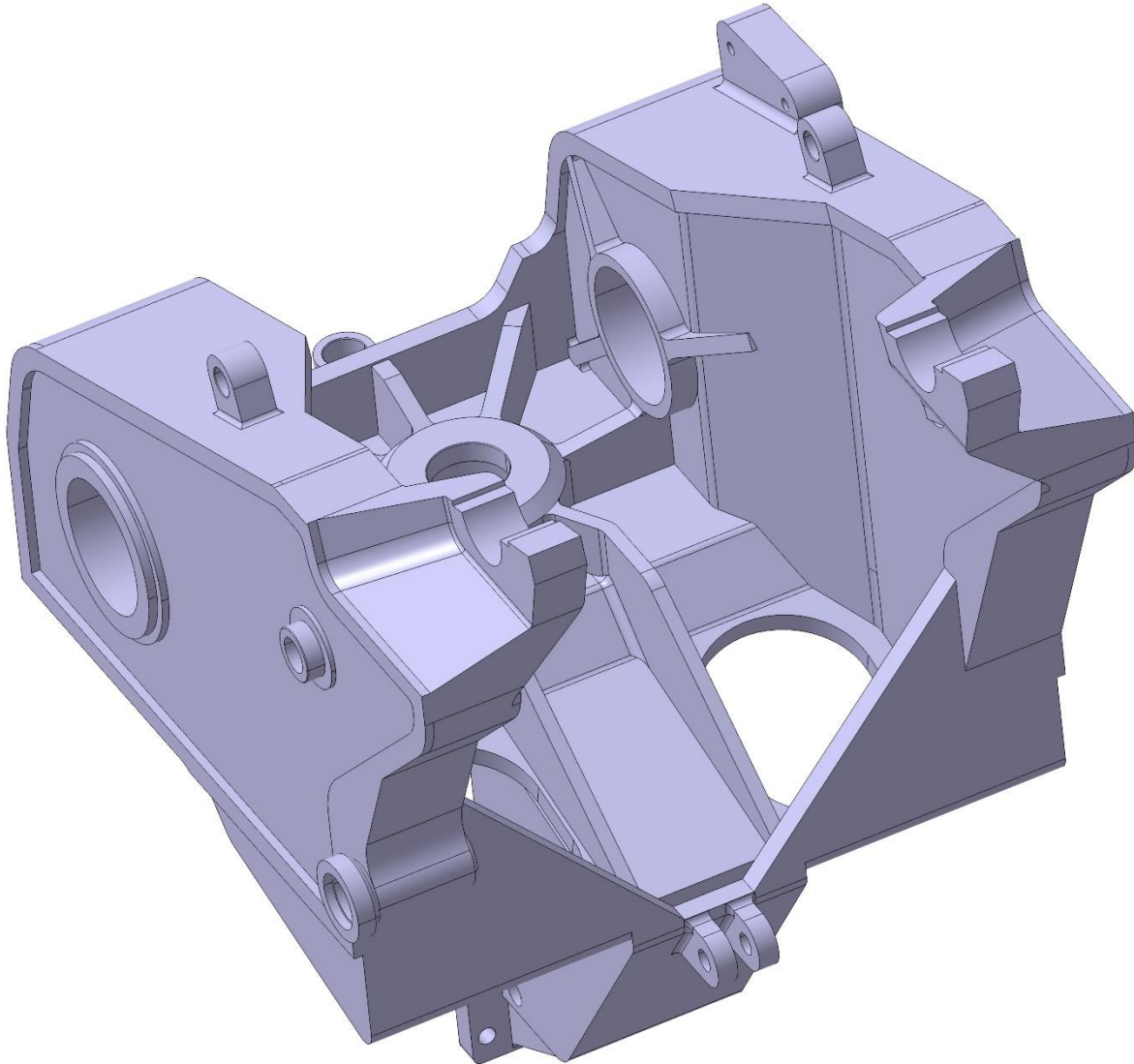
5.1 3D модел тела горњег лафета

Како би било могуће извршити симулацију оптерећења тела горњег лафета, у току опаљења, претходно је било потребно креирати димензијама и обликом што приближнији 3D модел тела горњег лафета топ-хаунице 152 mm M84. За моделирање је коришћен програм CATIA у верзији V5R21. CATIA (*Computer Aided Three-Dimensional Interactive Application*) је тродимензионални рачуарски програм за рачуарско пројектовање и техничко конструисање. Аутор програма је компанија *Dassault Systèmes*.

Систем за пројектовање помоћу рачунара или CAD системи представљају скуп софтверских алата и технологија који инжењерима пружа низ погодности током рада на развоју конструкције производа. Те се погодности огледају у аутоматском извођењу конструкторских операција, као што су исцртавање линија, формирање тела, модификације, рад са базама стандардних елемената и сл. Код савремених начина пројектовања помоћу рачунара полази се од раванске пројекције основног тродимензионалног облика производа који се моделира. У даљем поступку стварања модела додају се остали геометријско-технолошки ентитети којим се постиже крајња форма производа. Суштина приступа и поступка развоја производа и процеса помоћу рачунара огледа се у стварању модела. Модел је рачуарска представа реалног производа или процеса. Да би се креирао модел неопходно је испоштовати одговарајуће поступке и процедуре. Читав процес назива се моделирање. Моделирање је процес стварања модела кроз дефинисање његових геометријских, димензионих, тополошких, инжењерских, технолошких и производних карактеристика [10]. Моделирање је вршено у кабинетским условима, приликом чега су димензије тела горњег лафета очитане са достављеног техничког цртежа тела горњег лафета топ-хаунице 152 mm НОРА-А. Приликом формирања 3D модела тела горњег лафета коришћен је модул *Mechanical design-Part design*. У *part design*-у употребљени су основни алати као што су: *Pad, Pocket, Hole, Plane, Chamfer...* Приликом тога је искоришћена и одговарајућа симетрија појединих сегмената склопа. Моделом су обухваћени сви елементи који чине тело горњег лафета, у шта спадају:

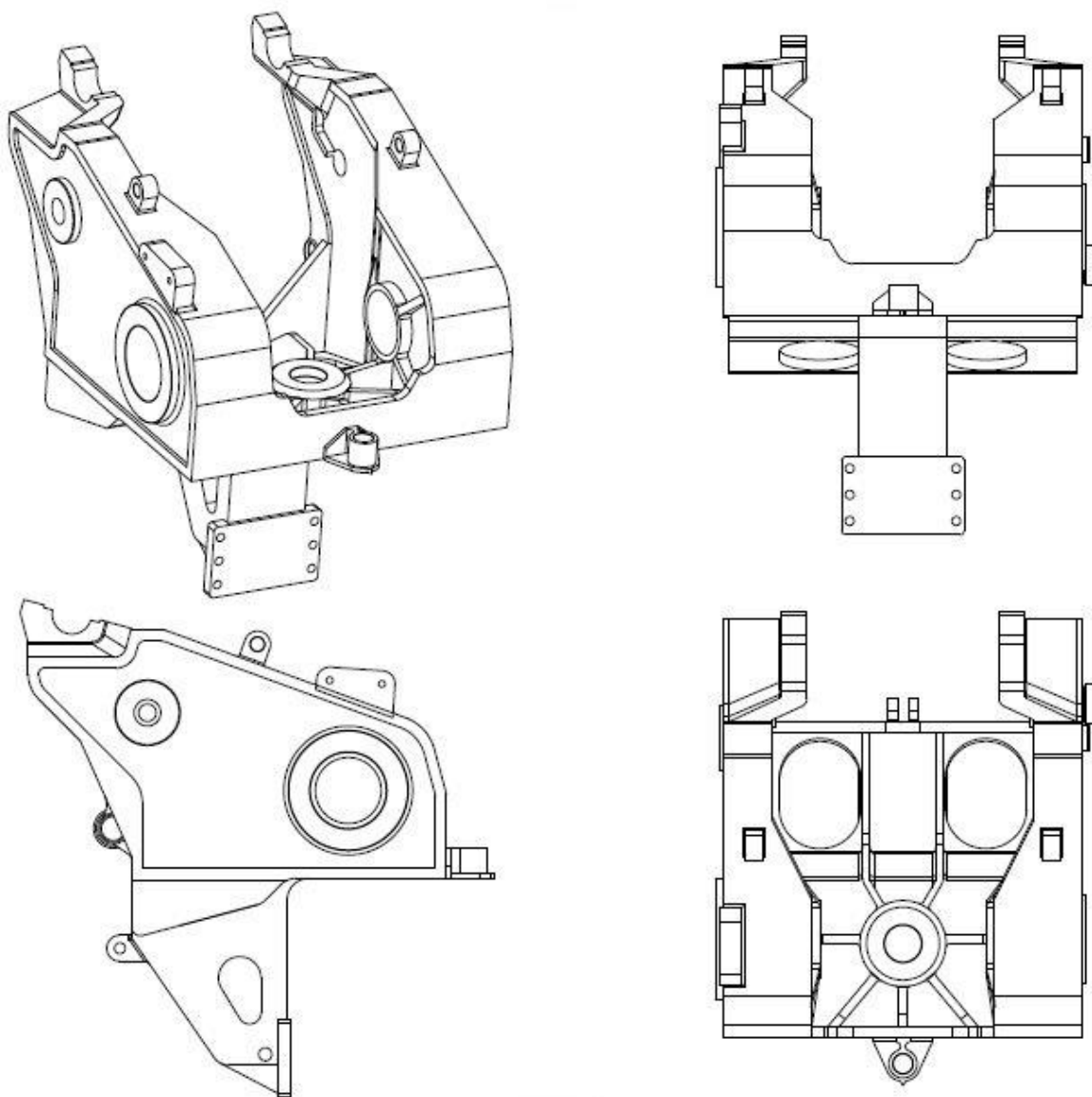
- основа тела горег лафета,
- бочне странице тела горњег лафета,
- рамена колевке,
- ослонци изравњача,
- попречна и уздужна ојачања,
- елементи механизма за давање елевације и правца,
- централни отвор за везу горњег и доњег лафета помоћу стожера,
- попречни отвор за смештај путне осовине

На слици 5.1.1, приказан је изометријски приказ тела горег лафета добијен помоћу опције *Capture* у програму *Catia*.



Слика 5.1.1. 3D модел тела горњег лафета хаубице 152 mm HOPA-A креиран помоћу CATIAV5R21

Такође, рачунарски програм *Catia* поседује модул *Drafting* који омогућава израду техничког цртежа на основу добијеног модела. У овом модулу је добијена слика 5.1.2 која представља поглед тела горњег лафета топ-хаубице 152 mm HOPA-A у три перспективе и то, поглед спреда, поглед одозго и поглед слева.



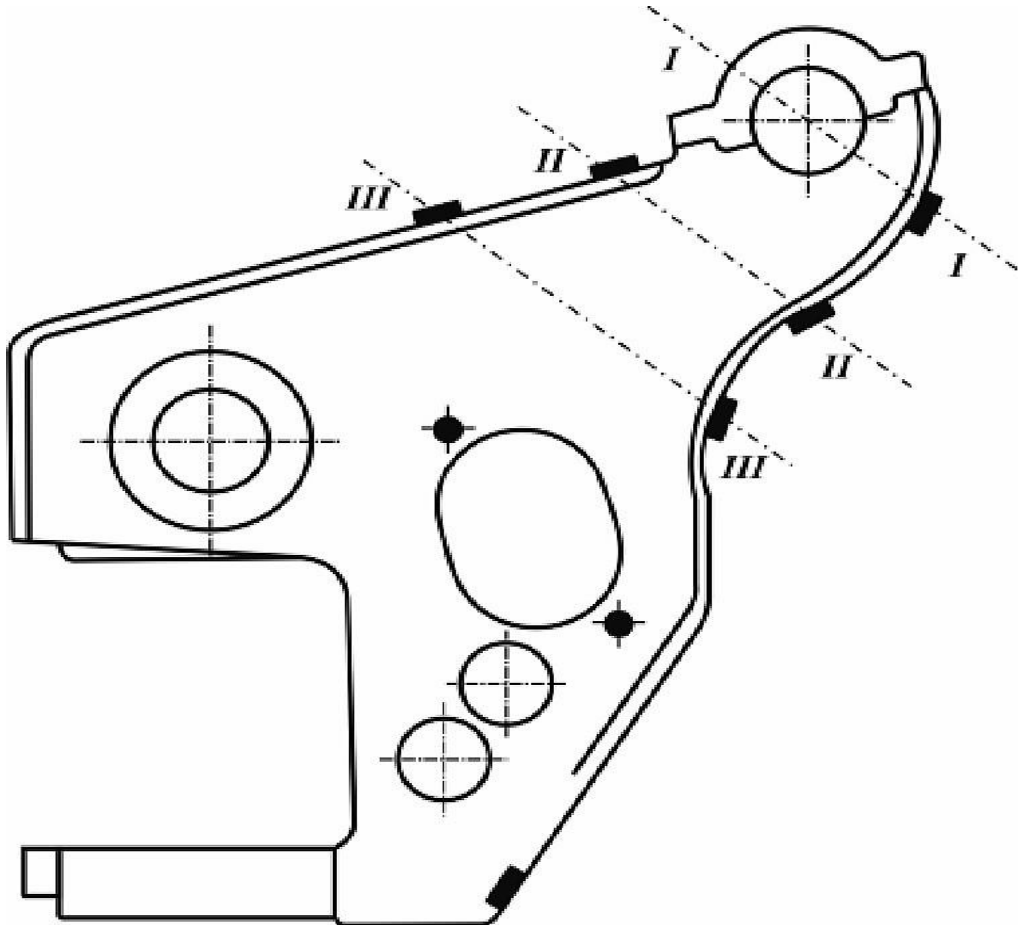
Слика 5.1.2. Ортогонална пројекција тела горег лафета топ-хаубице 152 mm HOP-A
(Амерички распоред погледа)

Формирани модел тела горњег лафета топ-хаубице 152mm HOP-A је у потпуности веродостојан, те сходно томе може бити коришћен за анимацију и симулацију рада целокупног система. За то би било потребно формирати моделе осталих делова и склопова топ-хаубице 152mm HOP-A, узимајући у обзир њихове димензије, облик и материјал од кога су направљени, увести одговарајућа оптерећења којима су изложени, као и силе и моменте којима они делују на друге склопове за време дејства оруђа. Тиме би било могуће добити приближно реалну слику понашања делова, склопова, као и целокупног оруђа у току опаљења.

5.2 Мерење деформација горњег лафета

За време гађања горњи лафет је подвргнут дејству силе реакције у лежишту рамена колевке и силе реакције доњег лафета. Услед дејства тих сила у страницама горњег лафета и његовој основној плочи јављају се притисак, сабијање и смицање [2].

Најоптерећенији део горњег лафета су његове странице, а највећи напони се јављају при савијању у вертикалној равни.



Слика 5.2.1. Мерна места на горњем лафету [3]

Марне траке се постављају на ободу странице, обично оне са које је лакше извршити повезивање трака са мерном опремом, на местима за које је прорачуном показано да су најугроженија са становништва отпорности (слика 5.2.1). Осим тога, мерне траке се постављају и на местима концентрације напона, као што су отвори за пролаз цилиндра изравњача, и улежиштења елевационе осовине и централног пивота (обртне осовине) доњег лафета.

Мерење напона на горњем лафету врши се торментачним гађањем при нултом и највећем елевационом углу [2].

5.3 Анализа методом коначних елемената

Основна идеја анализе методом коначних елемената је моделирање проблема подразумевајући да је просторни домен проблема подељен - дискретизован на поддомене на које се примењују општа знања и искуства из механике континуума и нумеричке математике. Поддомени о којима је реч терминолошки се означавају као коначни елементи. Анализа система спрегнутих коначних елемената, добијених дискретизацијом континуума, омогућава нумеричку симулацију одзива континуума на задате побуде. Физичке величине које су обухваћене моделом добијају се у дискретном облику, тј. у тачкама које произилазе из дискретизације. Ове тачке зову се чворне тачке или једноставно чворови.

На основу дискретизације физичког проблема, интерполирањем и увођењем интерполационих функција уз увођење природног (локалног) координатног система, успостављањем равнотежне једначине за елементе и за целокупну структуру, долази се до матрица елемената и система. Увођењем ограничења и сила које делују на систем у нумерички модел и решавањем се добијају померања тачака која представљају решење проблема. У даљем поступку се добијени резултати користе за анализу напрезања појединих делова (елемената) система [11].

Избор типа коначног елемента је један од најважнијих корака у примени метода коначних елемената. Правилан избор је веома важан за добијање тачних резултата. Основне особине коначних елемената су:

- облик
- број и врста чворова
- број и врста степени слободе у појединим чворовима и
- врста интерполационих функција.

Без било ког од ових параметара, коначни елемент није потпуно дефинисан. С обзиром на њихов облик, елементи могу бити са праволинијским и са криволинијским контурама. Битна је подела на линијске, раванске и просторне коначне елементе

- Линијски коначни елемент је део праве или криве линије. Код овог типа елемента једина димензија која се разматра је дужина. Примери су штапови и греде.
- Равански коначни елементи се користе за анализу проблема који се могу посматрати као дводимензионални (равно стање деформације и напона, осносиметрично стање деформације). Најчешће су четвороугаоног или троугаоног облика.
- Просторни коначни елементи се користе за анализу тродимензионалних проблема и обично су облика тетраедра или призме. Као и равански, могу бити праволинијски и криволинијски.

Функције помоћу којих се представља поље променљивих у елементу, називају се интерполационе функције, функције облика или апроксимативне

функције. Помоћу интерполационих функција се успоставља непосредна веза између вредности функције у било којој тачки елемента и основних непознатих параметара у чворовима. Вредност функције у некој тачки се интерполира између њених вредности у чворовима. Помоћу ових функција одређена је само квалитативно промена функције у елементу, што значи да је дефинисан само њен облик док је интензитет те промене одређен вредностима параметара у чворовима. Од избора интерполационих функција зависи испуњење континуитета између појединих елемената. У методи коначних елемената се углавном користе полиноми као интерполационе функције и то: *Lagrange*-ови полиноми, *Serendipity* функције и *Hermite*-ови полиноми [12].

За анализу напрезања тела горњег лафета методом коначних елемената искоришћен је програм FEMAP у верзији V11.0. *Femap (Finite Element Modeling And Postprocessing)* је програм инжењерске анализе чији је власник *Siemens PLM Software* који се користи за израду модела коначних елемената сложених инжењерских проблема ("пред-процесирање") и приказ резултата решења ("пост-процесирање"). Програм ради на *Windows* систему и обезбеђује увоз CAD модела, моделирање и алате за креирање модела коначних елемената, као и функционалност постпроцесирања која омогућава машинским инжењерима да интерпретирају резултате анализе.

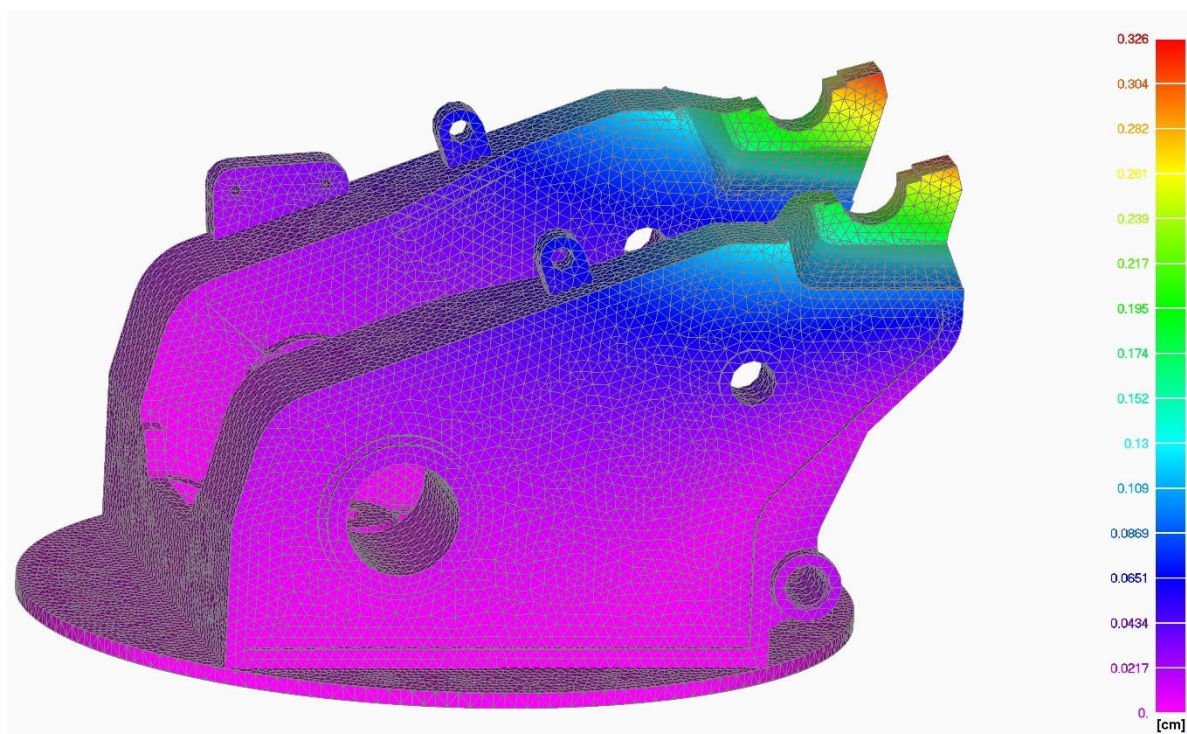
На CAD моделу који је увезен за симулацију напрезања извршено је неколико измена како би се добили предуслови за бољи прорачун. Наиме, уклоњен је сваки *chamfer* и *edge filet*. На тим местима приком аутоматског генерисања мреже програм врши њено уситњавање јер се очекује повећана концентрација напона. Такође, доњи део тела горњег лафета је пресечен и постављен на кружну плочу. Даље се приступа дефинисању симулационих параметара. На основу реалног система и свих реалних особина и појава које га прате у процесу опаљења потребно је дефинисати материјал модела, оптерећења која делују на модел и ослонце модела. На основу података са техничког цртежа, за материјал модела користи се челик Č4731. Његове карактеристике су следеће:

- густина материјала: $\rho=7850 \text{ kg/m}^3$
- Јунгов модул еластичности: $E=2.1 \cdot 10^{11} \text{ N/m}^2$
- Поасонов коефицијент: $\nu=0.3$

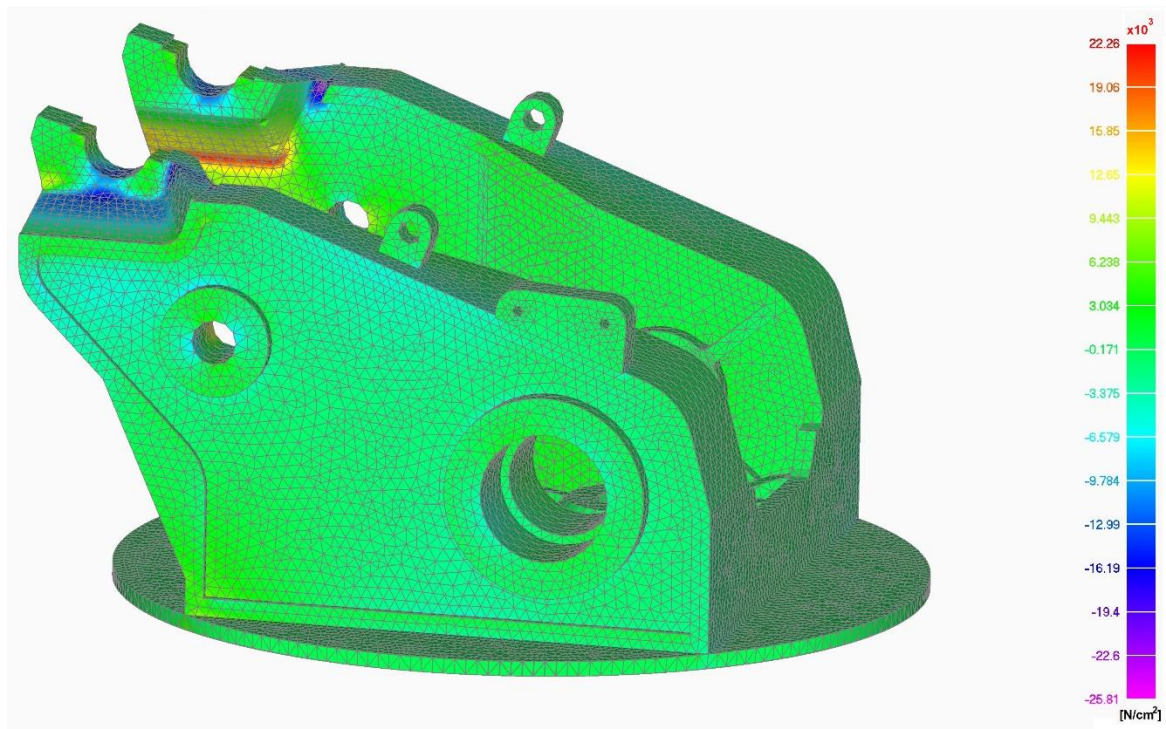
Топлотне карактеристике материјала (проводљивост и специфична топлота) нису узимане у обзир пошто се ради о динамичкој, а не енергетској анализи.

Силе којима је оптерећен модел тела горњег лафета су максимална сила отпора трзању (није узето у обзир кретање трзајуће масе) добијена помоћу програм ИПТ, $R_{max}= 218584 \text{ N}$, тежина нагибног склопа добијена на основу података о масама оруђа и тежина тела горњег лафета дефинисана самим карактеристикама креираног модела. Доња кружна плоча је узета као чврст ослонац, те не долази до померања услед оптерећења модела.

Као просторни коначан елемент изабран је тетраедар. Број чворова износи 391086, док је број тетраедра 257935.



Слика 5.3.1. Померања изазвана оптерећењима тела горњег лафета



Слика 5.3.2. Напрезање тела горњег лафета добијено симулацијом

Закључак

Мастер рад садржи прорачун оптерећења тела горњег лафета, конкретно артиљеријског оруђа топ-хаубица 152 mm НОРА-А (М84), и симулацију оптерећења 3D модела тела горњег лафета поменутог оруђа методом коначних елемената.

У процесу навођења цев треба да има могућност окретања у хоризонталној равни око вертикалне осе. Зато се осцилирајући делови оруђа уграђују на специјалну обртну осовину. Код топ-хаубице 152 mm НОРА-А функцију носача осцилирајућих делова има горњи лафет. Горњи лафет је ливена или заварена конструкција сложене форме. Састоји се од бочних страница међусобно спојених основом на којој је централни стожер за везу са доњим лафетом. У горњем делу бочних страница су лежишта за рамена колевке. Силе које делују на горњи лафет су силе које се преко рамена колевке и назубљеног сектора преносе на лафет услед оптерећења и сила које се јављају као реакције везе са доњим лафетом. Основна сила која оптерећује тело горњег лафета јесте сила отпора трзању R .

Закон промене силе укупног отпора трзању $R(x)$ одређен је поступком инверзног прорачуна трзајуће масе приказан у поглављу 4.4. У првом делу је изложена суштина математичког модела инверзног поступка трзања и враћања и наведени потребни полазни подаци за прорачун. На основу математичког модела написан је програмски код у пакету Матлаб. Инверзи поступак прорачуна трзања је урађен за два карактеристична угла, $\varphi=0^\circ$ и $\varphi=65^\circ$, и на основу њега је извршена идентификација понашања противтрзајућег уређаја. Излаз у виду табеле је приказан у прилогу 3, у ком се налази закон промене сила хидрауличне кочнице F_k , хидропнеуматског повратника F_p и укупног отпора трзању R . Такође програм ИПТ даје дијаграм промене притиска барутних гасова и брзине пројектила у цеви, тако што као улаз користи излазне податке унутрашње балистичког прорачуна који је урађен по методи Дроздова. Добијени је максимални притисак барутних гасова у цеви топ-хаубице 152 mm $P_m=282 \text{ MPa}$, док је брзина пројектила на устима цеви $V_0=815 \text{ m/s}$. Максимална вредност силе отпора трзања се постиже при углу елевације $\varphi=0^\circ$ и износи $R_{max}=218584 \text{ N}$. Ова вредност је постигнута на дужини трзања $X=0.295 \text{ m}$ и времену $t=0.0297 \text{ s}$. Максимална вредност силе отпора трзању R , заједно са тежином нагибног склопа представља оптерећење формираног 3D модела тела горњег лафета топ-хаубице 152 mm НОРА-А. Изложена метода инверзног поступка прорачуна трзајуће масе је једноставна и омогућује брзу идентификацију свих величина при анализи против трзајућег уређаја оруђа, а посебно потребне корекције изменом утицајних параметара (нпр. притиска у повратнику, специфичне масе течности, коефицијената отпора протицању, угла елевације и сл.). У разматраној методи инверзног поступка могу се узети у обзир и утицај стишљивости течности, промена трења на клизачима и заптивачима елемената противтрзајућег уређаја, величине толеранција делова у кочници, повратнику и др. Изложени модел се може користити при анализи конкретних

система, јер је метода довољно тачна и поуздана. Верификована је на већем броју практичних примера у разним условима употребе противтрзајућег уређаја.

Вредности карактеристичних сила које дефинишу напрезање тела горњег лафета на месту везе горњег и доњег лафета су приказане у поглављу 4.5, слика 4.5.2. и 4.5.3. Промена укупне силе отпора трзању, силе реакције горњег лежаја и сила реакције доњег лафета у односу на време трзања је приказана за два карактеристична угла елевације од 0° и 65° . Веће вредности се постижу при углу елевације $\varphi=0^\circ$, јер зависе од силе отпора трзању која је већа при мањим угловима елевације. Доминантне силе јесу силе реакције горњег лежаја. Максимална вредност силе $T_{1max}=698660\text{ N}$, док је $T_{2max}=480076\text{ N}$. Константна вредност силе реакције доњег лафета, $Q_1=-30070\text{ N}$, током процеса трзања се остварује услед синуса у формули одређивања ове силе.

За симулацију напрезања формиран је модел тела горњег лафета топ-хаубице 152 mm НОРА-А у програмском пакету CATIA. 3D модела тела горњег лафета је креиран у модулу *part design*. У овом модулу су употребљени основни алати као што су: *Pad*, *Pocket*, *Hole*, *Plane*, *Chamfer*... Такође је искоришћена и одговарајућа симетрија појединих сегмената склопа. Моделом су обухваћени сви елементи који чине тело горњег лафета приликом чега су димензије тела горњег лафета очитане са техничког цртежа тела горњег лафета топ-хаубице 152 mm НОРА-А. На основу тога је формиран модел у потпуности веродостојан, и даље коришћен за анимацију и симулацију рада целокупног система.

Анализа напрезања тела горњег лафета топ-хаубице 152 mm НОРА-А методом коначних елемената извршена је помоћу рачунарског програма FEMAP. Резултати добијени инверзним поступком прорачуна трзајуће масе дали су релевантну, максималну вредност силе отпора трзању R , која је заједно са тежином нагибног склопа представљала оптерећење формираног 3D модела тела горњег лафета топ-хаубице 152 mm НОРА-А. За материјал модела коришћен је челик Č4731 са карактеристикама $\rho=7850\text{ kg/m}^3$, $E=2.1\cdot 10^{11}\text{ N/m}^2$ и $\nu=0.3$. Као просторни коначан елемент изабран је тетраедар. Број чворова износи 391086, док је број тетраедра 257935. Резултати напрезања и померања добијени симулацијом оптерећења 3D модела тела горњег лафета топ-хаубице 152 mm НОРА-А приказани су на слици 5.3.1. и 5.3.2. Експериментални резултати мерења напона тела горњег лафета показују да најоптерећеније део јесу његове странице, такође, концентрација напона се очекује код отвора за пролаз цилиндра изравњача, и улежиштења елевационе осовине и централног пивота (обртне осовине) доњег лафета, као што је приказано на слици 5.2.1. Приказана напрезања се потпуно подударају са експерименталним резултатима. Такође на основу познатих резултата мерења деформација горњег лафета оруђа калибра 152 mm, очекује се максимална вредност напрезања величина до 10^4 N/cm^2 , што се поклапа са добијеном максималном вредношћу напрезања од $2,2\cdot 10^4\text{ N/cm}^2$. Максимална вредност померања изазвана оптерећењем износи 3,2 mm, док на кружној плочи

нема померања јер је у симулација фиксирана. Резултати за усвојени начин везе горњег и доњег лафета упућују на то да је коришћена методологија за анализу стања напрезања горњег лафета у потпуности веродостојна јер су добијене вредности јако приближне реалним у току опаљења.

За постизање што приближнијих резултата симулације реалним, било би потребно узети у обзир кретање трзајуће масе, тј. да је $R = R(x)$, насупрот тога у обзир је узета само маскимална вредност силе отпора трзању. Коришћење што је могуће мање упрошћења и апроксимација и ручно прецизније генерисање мреже, насупрот аутоматском. Такође је приликом симулације дефинисан крут ослонац тела горњег лафета, што реално није случај, заправо на том месту, месту везе горњег и доњег лафета долази до појаве зазора.

Литература

- [1] З. Ристић, М. Јаковљевић: Основи наоружања (артиљеријска оруђа), ВИЗ – секција за штампање и умножавање, Београд, 2003.
- [2] М. Б. Калезић: Пројектовање артиљеријских система, Ваљево принт, Београд, 2010.
- [3] А. Кари: Презентације са наставе Конструкција артиљеријских оруђа, ФИН Крагујевац, 2016.
- [4] А. Л. Палигорић: Анализа концепције решења артиљеријских оруђа фамилије НОРА, Војнотехнички гласник, 2011, Vol. LIX, No. 4
- [5] М. Милић: Правило хаубица-топ 152 mm М-84, Новинско-издавачка установа “Војска”, Београд, 1997.
- [6] З. Ристић: Збирка задатака из механике наоружања, ВИЗ – секција за штампање и умножавање, Београд, 2004.
- [7] З. Ристић: Инверзни поступак прорачуна кретања трзајуће масе оруђа помоћу рачунара, Секција за штампање и умножавање ЦВШ ВЈ, Београд, 1994.
- [8] М. Цветковић: Унутрашња балистика, Сектор за школство, обуку, научну и издавачку делатност, Војнотехничка академија Војске Југославије, Београд, 1998.
- [9] Љ. Танчић: Збирка задатака из унутрашње балистике, Сектор за школство, обуку, научну и издавачку делатност, Војнотехничка академија Војске Југославије, Београд, 1999.
- [10] Г. Девеџић: CAD/CAM технологије, Машински факултет у Крагујевцу, Крагујевац, 2009.
- [11] М. Којић, Р. Славковић, М. Живковић, Н. Грујовић: Метод коначних елемената I, Машински факултет у Крагујевцу, Крагујевац, 2010.
- [12] В. Мандић, Презентације са наставе CAD/CAM/CAE, Крагујевац, 2015

П Р И Л О З И

Прилог 1

Програмско решење „Инверзни прорачун трзања“

```
%INVERZNI PRORACUN TRZANJA
clc;
clear all;
close all;

% *****
% *  DEFINISANJE POCETNIH PODATAKA *
% *****

mt=3213; %ukupna trzajuca masa, kg
xlam=1.2; %najveca duzina trzanja, m
ro=890; %specificka masa tecnosti u HK, kg/m3
k1=1.4; %koeficijent proticanja tecnosti u HK
k3=5.3; %koeficijent proticanja tecnosti u HK
p0=87e05; %pocetni pritisak gasa u povratniku, Pa
m=2.4; %stepen kompresije u povratniku
S=0.01815; %povrsina popreznog preseka cevi, m2
np=1.2; %koeficijent politrope povratnika
drp=0.043; %precnik regulacionog prstena, m
dkl=0.12475; %precnik klipa HK, m
dku=0.052; %unutrasnji precnik klipnjace, m
dks=0.065; %spoljasnji precnik klipnjace, m
dcilu=0.125; %unutrasnji precnik cilindra HK, m
dcils=0.135; %spoljasnji precnik cilindra HK, m
dkkmax=0.04275; %najveci precnik KK, m
lk=0.06; %duzina klipa u HK, m
lkk=1.525; %duzina KK, m
W0=0.014319; %pocetna zapremina gasa u povratniku, m3
Ap=0.0063085; %radna povrsina klipa povratnika, m2
g=9.806; %ubrzanje Zemljine teze, m/s2
mbp=14.2; %masa barutnog punjenja, kg
mp=43.56; %masa projektila, kg
lvp=5.84; %duzina vodista projektila u cevi, m
eta=0.45; %koeficijent efikasnosti GK
```

```

ni=0.18; %koeficijent proporcionalnosti za silu trenja
mi1=0.16; %koeficijent trenja
n2=1; %koeficijent proporcionalnosti RP
fi=65*pi/180; %ugao elevacije, rad

% *****
% * IZRACUNAVANJE R0 *
% *****

Fk0=0; %pocetna sila kocnice trzanja, N
Fp0=p0*Ap; %pocetna sila povratnika, N
Qt=mt*g; %sila tezine trzajuće mase, N
Ftr=Qt*(mi1*cos(fi)+ni); %sila trenja za ugao elevacije fi, N

R0=Fk0+Fp0+Ftr-Qt*sin(fi); %pocetna sila otpora trzanju, N

% *****
% ***** PRVI PERIOD TRZANJA *****
% *****

MUB=dlmread('UBP152.txt');
v=MUB(:,2); %relativna brzina projektila po UB proracunu, m/s
x=MUB(:,3); %relativni put projektila po UB proracunu, m/s
p=MUB(:,4); %pritisk u cevi po UB proracunu, Pa
t=MUB(:,5); %vreme kretanja projektila po UB proracunu, s
n=length(t);
vp0=max(v); %pocetna brzina projektila, m/s
pu=p(n); %pritisk na ustima cevi, Pa
pm=max(p); %maksimalni pritisak u cevi, Pa

figure(1)
plot(t*1000,p/100000,'LineWidth',2.5)
grid on
title('Promena pritiska u cevi')
xlabel('Vreme, ms','FontSize',16)
ylabel('Pritisak, bar','FontSize',16)
set(gca,'FontSize',16,'FontName','Times New Roman')

figure(2)

```

```

plot(t*1000,v,'LineWidth',2.5)
grid on
title('Promena brzine projektila u cevi')
xlabel('Vreme, ms','FontSize',16)
ylabel('Brzina projektila, m/s','FontSize',16)
set(gca,'FontSize',16,'FontName','Times New Roman')

% *****
% * PARAMETRI SLOBODNOG TRZANJA *
% *****

W=((mp+0.5*mbp)/(mt+mp+mbp))*v; %brzina trzanja za vreme dok je projektil u cevi, m/s
L=((mp+0.5*mbp)/(mt+mp+mbp))*x; %put trzanja za vreme dok je projektil u cevi, m
Wu=max(W); %brzina slobodnog trzanja kad je projektil na ustima cevi, m/s
Lu=max(L); %put slobodnog trzanja kad je projektil na ustima cevi, m
tu=max(t); %vreme kad je projektil na ustima cevi, s

beta=(1400/vp0); %koeficijent naknadnog dejstva barutnih gasova bez GK
Pcu=pu*S; %sila pritiska na ustima cevi, N
betagk=((mp+beta*mbp)*sqrt(1-eta)-mp)/mbp; %koeficijent naknadnog dejstva barutnih
gasova sa GK
hi=(betagk-0.5)/(beta-0.5); %impulsna karakteristika GK
b=(beta-0.5)*mbp*vp0/Pcu; %parametar eksponencijalne funkcije
tau=b*log(0.5*pu/100000); %vreme trajanja perioda naknadnog dejstva, s
% tau=5*b %vreme trajanja perioda naknadnog dejstva, s
n1=20; %broj intervala perioda naknadnog dejstva
t1=tau/n1; %vreme trajanja jednog intervala perioda naknadnog dejstva, s
i1=n;
lambdagk=1-sqrt(1-eta);
Fgk=lambdagk*(beta+mp/mbp)*Pcu/(2*(beta-0.5));
for tnd=t1:t1:tau
    i1=i1+1;
    W(i1)=W(i1-1)+(hi*b*Pcu/mt)*(1-exp(-tnd/b));
    L(i1)=Lu+W(i1-1)*tnd+(hi*b*Pcu/mt)*(tnd-b*1-exp(-tnd/b));
    t(i1)=tu+tnd;
end

figure(3)
plot(t*1000,W,'LineWidth',2.5)

```

```

grid on
title('Promena brzine slobodnog trzanja')
xlabel('Vreme, ms','FontSize',16)
ylabel('Brzina slobodnog trzanja, m/s','FontSize',16)
set(gca,'FontSize',16,'FontName','Times New Roman')

figure(4)
plot(t*1000,L,'LineWidth',2.5)
grid on
title('Promena puta slobodnog trzanja')
xlabel('Vreme, ms','FontSize',16)
ylabel('Put slobodnog trzanja, m','FontSize',16)
set(gca,'FontSize',16,'FontName','Times New Roman')

n1=i1;
V(1)=0;
R(1)=R0;
X(1)=0;
% *****
% * PARAMETRI KOCENOG TRZANJA *
% *****
Ak=(dkl*dkl-dks*dks)*pi/4; %radna površina klipa kocnice trzanja, m2
Arp=drp*drp*pi/4; %površina regulacionog prstena, m2
A=Ak-Arp; %površina zazora između klipa KT i RP, m2
Akv=dku*dku*pi/4; %površina klipa kocnice vraćanja, m2
omega=n2*Akv; %površina prstenastog zazora između zidova klipnjace i prečnika KK,
m2
KK=dlmread('DKK.txt');
xkk=KK(:,1)/1000;
dkk=KK(:,2)/1000;
dkkmax=max(dkk); %najveći prečnik KK, m
Ftr(1)=Ftr;
Fk(1)=Fk0;
Fp(1)=Fp0;
H0=W0/AP;

% *****
% ***** PRVI PERIOD TRZANJA *****

```

```
% *****
```

```
for i=1:1:(n1-1)
```

```
    Ftr(i+1)=Qt*(mi1*cos(fi)+ni); %sila trenja za ugao elevacije fi, N
```

```
    deltat(i)=t(i+1)-t(i);
```

```
    V(i+1)=W(i+1)-(W(i)-V(i))-R(i)*deltat(i)/mt;
```

```
    X(i+1)=X(i)+(L(i+1)-L(i))-(W(i)-V(i))*deltat(i)-R(i)*deltat(i)*deltat(i)/(2*mt);
```

```
    delta(i)=interp1(xkk,dkk,X(i+1));
```

```
    a(i)=(drp*drp-delta(i)*delta(i))*pi/4;
```

```
Fk(i+1)=(k1*ro/2)*((A/a(i)+1)*(A/a(i)+1)*A+(k3*Akv*Akv*Akv/(k1*omega*omega)))*V(i+1)  
*V(i+1);
```

```
    Fp(i+1)=Fp0*(H0/(H0-X(i+1)))^np;
```

```
    R(i+1)=Fk(i+1)+Fp(i+1)+Ftr(i+1)-Qt*sin(fi);
```

```
    relR=abs((R(i+1)-R(i))/R(i+1));
```

```
    while relR>0.005
```

```
        V(i+1)=W(i+1)-(W(i)-V(i))-R(i)*deltat(i)/mt;
```

```
        X(i+1)=X(i)+(L(i+1)-L(i))-(W(i)-V(i))*deltat(i)-R(i)*deltat(i)*deltat(i)/(2*mt);
```

```
        delta(i)=interp1(xkk,dkk,X(i+1));
```

```
        R(i)=(2*R(i+1)-R(i));
```

```
        relR=abs((R(i+1)-R(i))/R(i+1));
```

```
        a(i)=(drp*drp-delta(i)*delta(i))*pi/4;
```

```
Fk(i+1)=(k1*ro/2)*((A/a(i)+1)*(A/a(i)+1)*A+(k3*Akv*Akv*Akv/(k1*omega*omega)))*V(i+1)  
*V(i+1);
```

```
    Fp(i+1)=Fp0*(H0/(H0-X(i+1)))^np;
```

```
    R(i+1)=Fk(i+1)+Fp(i+1)+Ftr(i+1)-Qt*sin(fi);
```

```
end
```

```
end
```

```
figure(5)
```

```
plot(t*1000,V,t*1000,W,'LineWidth',2.5)
```

```
grid on
```

```
title('Promena brzine slobodnog i kocenog trzanja u 1. periodu')
```

```
xlabel('Vreme, ms','FontSize',16)
```

```
ylabel('Brzina trzanja, m/s','FontSize',16)
```

```
legend('Brzina kocenog trzanja','Brzina slobodnog trzanja')
```

```
set(gca,'FontSize',16,'FontName','Times New Roman')
```

```

% *****
% ***** DRUGI PERIOD TRZANJA *****
% *****

deltaX=0.01;
VTK(i)=V(i)*V(i);
while VTK(i)>0
    i=i+1;
    X(i+1)=X(i)+deltaX;
    delta(i)=interp1(xkk,dkk,X(i+1));
    delta(i+1)=delta(i);
    a(i)=(drp*drp-delta(i)*delta(i))*pi/4;
    a(i+1)=a(i);
    Ftr(i+1)=Qt*(mi1*cos(fi)+ni); %sila trenja za ugao elevacije fi, N
    Fp(i+1)=Fp0*(H0/(H0-X(i+1)))^np;
    Fkpom=(k1*ro/2)*((A/a(i+1))*(A/a(i)+1)*A+(k3*Akv*Akv*Akv/(k1*omega*omega)));
    VTK(i)=(V(i)*V(i))-(R(i)+Fp(i+1)+Ftr(i+1)-
Qt*sin(fi)+Fkpom*(V(i)*V(i)))/(mt/deltaX+Fkpom);
    if VTK(i)>0
        V(i+1)=sqrt(VTK(i));
        Fk(i+1)=Fkpom*V(i+1)*V(i+1);
    else
        V(i+1)=0;
        Fk(i+1)=Fk(i);
    end
end

R(i+1)=Fk(i+1)+Fp(i+1)+Ftr(i+1)-Qt*sin(fi);
deltat=abs(2*mt*(V(i+1)-V(i))/(R(i+1)+R(i)));
t(i+1)=t(i)+deltat;
end
m=max(Fp)/Fp0

izlaz=[t X' V' Fp' Fk' R'];

dlmwrite('izlaz.txt',izlaz, 'delimiter','\t','precision',6);

figure(6)
plot(X,Fp,'-.b',X,Fk,'--r',X,Ftr,':g',X,R,'-k','LineWidth',2.5)

```

```

title('Promena sile otpora trzanju')
xlabel('Put trzanja, m','FontSize',16)
ylabel('Sila trzanja sa komponentama, N','FontSize',16)
legend('Sila povratnika -1','Sila HK -2','Sila trenja -3','Ukupna sila otpora trzanju -4')
grid on
set(gca,'FontSize',16,'FontName','Times New Roman')

```

```

figure(7)
plot(xkk,dkk,X,delta,'--r','LineWidth',2.5)
title('Promena precnika kontrakljpnjace')
grid on
set(gca,'FontSize',16,'FontName','Times New Roman')

```

```

figure(8)
plot(X,a,'LineWidth',2.5)
title('Promena površine protocnih otvora')
xlabel('Put trzanja, m','FontSize',16)
ylabel('Površina protocnih otvora, m2','FontSize',16)
grid on
set(gca,'FontSize',16,'FontName','Times New Roman')

```

```

figure(9)
plot(X,V,'LineWidth',2.5)
title('Promena brzine trzanja')
xlabel('Put trzanja, m','FontSize',16)
ylabel('Brzina trzanja, m/s','FontSize',16)
grid on
set(gca,'FontSize',16,'FontName','Times New Roman')

```

```

figure(10)
plot(t,Fp,'-.b',t,Fk,'--r',t,Ftr,':g',t,R,'k','LineWidth',2.5)
title('Promena sile otpora trzanju')
xlabel('Vreme trzanja, s','FontSize',16)
ylabel('Sila trzanja sa komponentama, N','FontSize',16)
legend('Sila povratnika -1','Sila HK -2','Sila trenja -3','Ukupna sila otpora trzanju -4')
grid on
set(gca,'FontSize',16,'FontName','Times New Roman')

```

Прилог 2

Унутрашње балистички прорачун методом Дроздова

I	V	X	P	T
1	0	0	30000000	0
2	41.3	0.029	102477280	0.00174
3	82.6	0.079	161659856	0.00264
4	123.9	0.138	207429440	0.00323
5	165.2	0.206	240849504	0.00372
6	206.5	0.284	263327136	0.00414
7	247.79	0.373	276378464	0.00453
8	289.09	0.474	281511744	0.00491
9	296.14	0.492	281702080	0.00498
10	330.39	0.589	280160864	0.00529
11	371.69	0.72	273645952	0.00566
12	412.99	0.871	263150096	0.00605
13	454.29	1.044	249711408	0.00645
14	495.59	1.243	234221472	0.00687
15	536.89	1.475	217433072	0.00732
16	578.19	1.743	199968000	0.0078
17	619.49	2.056	182331536	0.00832
18	657.58	2.434	150560768	0.00891
19	687.83	2.812	127506064	0.00948
20	712.68	3.191	110092880	0.01002
21	733.62	3.569	96525104	0.01054
22	751.61	3.948	85687272	0.01105
23	767.31	4.326	76852048	0.01155
24	781.18	4.705	69526184	0.01204
25	793.57	5.083	63363972	0.01252
26	804.73	5.462	58116388	0.01299
27	814.85	5.84	53599712	0.01346

ПРИЛОГ 3

Инверзни поступак трзања за топ-хаубицу 152 mm при елевацији $\varphi=0^\circ$

t [s]	X [m]	V [m/s]	F _p [N]	F _k [N]	R [N]
0	0	0	54883.95	0	66273.45
0.00174	0.000418	0.604152	54896.09	336.0807	67346.06
0.00264	0.001152	1.225161	54917.4	1382.17	69158.12
0.00323	0.00203	1.852273	54942.92	3159.473	70997.79
0.00372	0.003048	2.481022	54972.53	5668.914	75005.26
0.00414	0.004222	3.111001	55006.7	8914.104	79070.98
0.00453	0.005564	3.741029	55045.84	12920.41	83078.88
0.00491	0.00709	4.37079	55090.38	17692.89	84815.61
0.00498	0.007361	4.478157	55098.31	18583.35	89536.86
0.00529	0.008829	5.000093	55141.22	23238.99	95623.43
0.00566	0.010812	5.628657	55199.33	30190.61	104349.6
0.00605	0.013098	6.255549	55266.44	38892.46	111171.1
0.00645	0.015719	6.881256	55343.55	45672.05	119662
0.00687	0.018733	7.505454	55432.48	52925.38	128666
0.00732	0.022245	8.127298	55536.45	61780.99	136869.4
0.0078	0.026301	8.746332	55656.95	71182.61	145593.4
0.00832	0.031034	9.362218	55798.17	79807.14	154281.6
0.00891	0.036743	9.923571	55969.4	88367.2	165562.7
0.00948	0.04244	10.36303	56141.24	97891.56	172793.6
0.01002	0.048145	10.71859	56314.3	106625.7	182773.5
0.01054	0.053826	11.01364	56487.58	114675	188450.9
0.01105	0.059511	11.26207	56661.95	122010.8	199495.7
0.01155	0.065168	11.4745	56836.48	130967.4	206177.5
0.01204	0.070829	11.65758	57012.12	139475.6	208953
0.01252	0.076465	11.81795	57187.94	142092.2	212076.7
0.01299	0.082105	11.95947	57364.92	145050.7	214965.7
0.01346	0.087715	12.08446	57541.94	147782.9	216037.1
0.01751	0.186973	11.79595	60848.07	143620	215180.3
0.02156	0.221629	11.49629	62085.63	142734.4	215532.3
0.02561	0.257889	11.18693	63430.8	142013.8	217630.9
0.029661	0.294915	10.86533	64860.54	143011.4	218584.2
0.033711	0.332081	10.53984	66356.25	141709.6	215811.3
0.037761	0.368933	10.21126	67902.96	138144.7	216145.1
0.041811	0.40514	9.884497	69488.21	134963	215163.5

0.045861	0.440453	9.554007	71100.98	132468.4	211619.5
0.049911	0.474685	9.223719	72731.1	129103.6	210985
0.053961	0.50771	8.897956	74369.87	124989.9	206710.3
0.058012	0.539434	8.571537	76009.06	120924.5	206119.1
0.062062	0.569793	8.250074	77640.81	116889.6	201685.8
0.066112	0.598741	7.928844	79257.57	112589.4	200596.2
0.070162	0.626249	7.61334	80852.08	108159.5	195814.2
0.074212	0.652301	7.298831	82417.23	103532.8	194313.9
0.078262	0.676887	6.990577	83946.1	98820.05	187841.1
0.082312	0.700011	6.68565	85432.19	92561.52	181968.6
0.086363	0.721682	6.388047	86869.28	85232.73	176882.6
0.090413	0.741919	6.096965	88251.78	78685.91	175382.1
0.094463	0.76073	5.807575	89573.58	75906.47	176192.3
0.096199	0.77073	5.712166	90291.09	75940.94	176944.3
0.097965	0.78073	5.614728	91019.22	75933.55	177665
0.099762	0.79073	5.515228	91758.17	75683.16	178153.6
0.101592	0.80073	5.413891	92508.21	74471.58	177692.1
0.103457	0.81073	5.310906	93269.56	73202.97	177184.8
0.105358	0.82073	5.2062	94042.47	71874.87	176629.6
0.107299	0.83073	5.0997	94827.21	70484.75	176024.2
0.109281	0.84073	4.99131	95624.04	69063.64	175400
0.111307	0.85073	4.880921	96433.24	67603.01	174748.5
0.113379	0.86073	4.768399	97255.07	66141.52	174108.9
0.115502	0.87073	4.653581	98089.84	64675.34	173477.4
0.117678	0.88073	4.536315	98937.84	63123.86	172774
0.119912	0.89073	4.416459	99799.37	61482.54	171994.2
0.122208	0.90073	4.293854	100674.8	59744.41	171131.4
0.124572	0.91073	4.16833	101564.3	57879.27	170155.9
0.127009	0.92073	4.039693	102468.4	55910.8	169091.5
0.129525	0.93073	3.907706	103387.4	53837.98	167937.6
0.132129	0.94073	3.772073	104321.6	51704	166737.8
0.13483	0.95073	3.632453	105271.3	49445.31	165428.9
0.137639	0.96073	3.488464	106237.1	47061.01	164010.3
0.140568	0.97073	3.339616	107219.2	44610.43	162541.9
0.143633	0.98073	3.185319	108218.1	42004.89	160935.2
0.146854	0.99073	3.024884	109234.1	39240.32	159186.7
0.150254	1.00073	2.857406	110267.8	36364.29	157344.4
0.153864	1.01073	2.681721	111319.6	33292.65	155324.5
0.157727	1.02073	2.496325	112389.9	30019.1	153121.3
0.161898	1.03073	2.299079	113479.3	26596.67	150788.2
0.166458	1.04073	2.0869	114588.1	22916.07	148216.5

0.171531	1.05073	1.855084	115717	18963.23	145392.5
0.177327	1.06073	1.59556	116866.5	14760.57	142339.3
0.184252	1.07073	1.292411	118037	10205.54	138954.8
0.193359	1.08073	0.903872	119229.3	5282.346	135223.9
0.214739	1.09073	0	120443.7	5282.346	136438.4

ПРИЛОГ 4

**Инверзни поступак трзања за топ-хаубицу 152 mm при елевацији
 $\varphi=65^\circ$**

t [s]	X [m]	V [m/s]	F _p [N]	F _k [N]	R [N]
0	0	0	54883.95	0	34326.31
0.00174	0.000433	0.62091	54896.51	354.9836	35783.21
0.00264	0.001186	1.250671	54918.38	1440.334	37271.11
0.00323	0.002081	1.883444	54944.39	3266.72	40255.92
0.00372	0.003115	2.517052	54974.47	5834.786	43618.06
0.00414	0.004305	3.151092	55009.11	9145.394	47286.22
0.00453	0.005663	3.784826	55048.73	13227.44	52686.25
0.00491	0.007206	4.418342	55093.79	18084.37	53605.81
0.00498	0.007481	4.526381	55101.81	18990.51	57851.51
0.00529	0.008964	5.051233	55145.18	23749.38	64966.83
0.00566	0.010967	5.683362	55203.87	30841.54	73869.66
0.00605	0.013275	6.313992	55271.64	39721	81381.49
0.00645	0.01592	6.943646	55349.47	46381.58	88093.66
0.00687	0.018961	7.571701	55439.22	53848.08	97140.07
0.00732	0.022504	8.197645	55544.13	62834.39	107780.5
0.0078	0.026594	8.821388	55665.69	72336.7	115530.7
0.00832	0.031368	9.442189	55808.17	81050.95	125840.7
0.00891	0.037126	10.00928	55980.92	89994.51	134465.2
0.00948	0.042873	10.45372	56154.35	99732.15	145006.2
0.01002	0.048629	10.81448	56329.01	108715.3	151958.5
0.01054	0.054361	11.11398	56503.93	116964.1	159654.7
0.01105	0.060098	11.36703	56680.01	124520.7	169343.6

0.01155	0.065808	11.58358	56856.3	134082.4	179218.9
0.01204	0.071524	11.77135	57033.75	142057.7	180339.5
0.01252	0.077215	11.93604	57211.43	144778.1	183740.5
0.01299	0.082912	12.08175	57390.32	148013.9	188472.4
0.01346	0.088581	12.2112	57569.35	150726.5	187542.7
0.01751	0.188425	11.95861	60899	147884.1	190320.6
0.02156	0.223807	11.69254	62164.97	148077.6	190496.5
0.02561	0.260922	11.41238	63545.73	148571.7	194267.3
0.029661	0.298921	11.12039	65018.76	150895.2	195160.8
0.033711	0.33718	10.82443	66566.37	150241.6	196054.9
0.037761	0.37524	10.52334	68174.3	147686.4	195107.6
0.041811	0.412759	10.22041	69830.46	145816.3	194893.7
0.045861	0.449485	9.915474	71524.5	144533.5	195304.9
0.049911	0.485227	9.608287	73246.97	141856.4	193764.8
0.053961	0.519853	9.303993	74989.57	138707.1	192769.4
0.058012	0.553267	9.000106	76744.7	135906.5	189701.1
0.062062	0.585394	8.694677	78504.56	132770.4	188104.2
0.066112	0.616178	8.390743	80261.54	129398.4	187968.6
0.070162	0.645589	8.091074	82008.73	125878.6	184238.7
0.074212	0.673605	7.791152	83739.01	122094	180241.6
0.078262	0.700212	7.496082	85445.31	116371.4	174292.6
0.082312	0.725419	7.208479	87121.55	108693.1	171143.6
0.086363	0.749235	6.92466	88761.59	103919.3	171927.8
0.090413	0.771662	6.641909	90358.46	102999.3	172604.7
0.094463	0.792692	6.358224	91904.44	100999.6	172150.9
0.096046	0.802692	6.27335	92656.67	100408.3	172311.9
0.097651	0.812692	6.187239	93420.27	99771.98	172439.1
0.099279	0.822692	6.099857	94195.48	99088.35	172530.7
0.10093	0.832692	6.011168	94982.58	98355.07	172584.5
0.102607	0.842692	5.921115	95781.81	97634.99	172663.7
0.104309	0.852692	5.829634	96593.46	96883.98	172724.3
0.106038	0.862692	5.736634	97417.81	96221.51	172886.2
0.107795	0.872692	5.642007	98255.15	95564.52	173066.6
0.109583	0.882692	5.545679	99105.78	94841.68	173194.4
0.111402	0.892692	5.447591	99970	94048.87	173265.8
0.113255	0.902692	5.347684	100848.2	93169.06	173264.1
0.115143	0.912692	5.245905	101740.5	92175.76	173163.2
0.117068	0.922692	5.142193	102647.5	91099.05	172993.5
0.119033	0.932692	5.036466	103569.4	89960.51	172776.8
0.12104	0.942692	4.92861	104506.6	88800.38	172553.9
0.123092	0.952692	4.818512	105459.5	87538.98	172245.4

0.125192	0.962692	4.70606	106428.4	86210.22	171885.6
0.127343	0.972692	4.591095	107413.8	84876.01	171536.7
0.129549	0.982692	4.473456	108416	83416.02	171078.9
0.131815	0.992692	4.352994	109435.5	81862.12	170544.6
0.134146	1.002692	4.229501	110472.7	80273.73	169993.4
0.136546	1.012692	4.102764	111528.1	78525.94	169301
0.139023	1.022692	3.972564	112602.1	76667.66	168516.7
0.141583	1.032692	3.838587	113695.3	74788.02	167730.2
0.144236	1.042692	3.700502	114808	72698.76	166753.7
0.146991	1.052692	3.557976	115940.9	70448.92	165636.7
0.149861	1.062692	3.41054	117094.4	68129.33	164470.7
0.152861	1.072692	3.257677	118269.2	65523.5	163039.6
0.156007	1.082692	3.098567	119465.7	63190.78	161903.4
0.159324	1.092692	2.931369	120684.7	62098.04	162029.6
0.162841	1.102692	2.754564	121926.6	59800.49	160974
0.166599	1.112692	2.568353	123192.1	55055.01	157494.1
0.170647	1.122692	2.372403	124482	49840.25	153569.1
0.175055	1.132692	2.164738	125796.8	44117.47	149161.2
0.179925	1.142692	1.942131	127137.3	38193.32	144577.6
0.185418	1.152692	1.698746	128504.3	32386.07	140137.3
0.19182	1.162692	1.425052	129898.4	25416.93	134562.2
0.199735	1.172692	1.101972	131320.5	17190.31	127757.7
0.211039	1.182692	0.667243	132771.4	7344.693	119363
0.228889	1.192692	0	134252	7344.693	120843.6