

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: 306/2014

Душан Р. Јовановић

**Интеграција митраљеза 12,7 mm M87 на
мобилну платформу**
мастер рад

Комисија за преглед и одбрану:

- 1. проф. др Богдан Недић – председник комисије**
- 2. проф. др Љубиша Танчић – члан**
- 3. проф. др Александар Кари – ментор**

Датум одбране: _____

Оцена: _____

Крагујевац, октобар, 2015.

У оквиру мастер рада извршити анализу могућности интеграције митраљеза 12,7 mm M87 на мобилну платформу. На основу познатих и измерених конструктивних параметара израчунати силе и оптерећења која делују на цео склоп митраљеза, колевке и горњег лафета. Потребно је размотрити утицај унутрашње балистичких параметара на силу трзања.

Решавањем постављених диференцијалних једначина кретања, одредити максималну вредност силе трзања, и извршити прорачун сила и напрезања која делују на обртни лежај. Прорачун извршити на два начина (методом коначних елемената и методом базираном на израчунавању компонената отпора лежаја из услова равнотеже). Упоредити добијени резултате.

Препоручена литература:

1. Др Зоран Ристић: *Конструкција артиљеријског наоружања*, књига у рукопису.
2. Др Љубиша Танчић: *Унутрашње балистичко пројектовање*, Београд 2014. год.
3. Ф. К. Бабак: *Пулеметы*, Санкт-Петербург, 2005. год.
4. Др Александар Кари: *Проблеми куполне уградње оруђа*, презентација Бг. – Кг. 2015. год.

У Крагујевцу,
30.09.2015.

Предметни наставник

Доцент др Александар Кари

РЕЗИМЕ РАДА

Овај рад се бави лафетирањем тј. уградњом митраљеза 12,7 mm M87 на мобилну платформу. На основу познатих и измерених конструктивних параметара, циљ је израчунати силе и оптерећења која делују на цео склоп митраљеза, колевке и горњег лафета. Најважнија сила која изазива напрезање поменутог склопа је сила трзања. У првом делу рада разматра се утицај унутрашње балистичких параметара на силу трзања. Са одређеним оптималним вредностима УБ параметара, усваја се вредност силе притиска барутних гасова која је главна активна сила која изазива трзање. Уз додавање осталих сила које делују за време опаљења, и решавањем диференцијалних једначина кретања, може се одредити максимална вредност силе трзања. Након тога, са овим податком улази се у прорачун сила и напрезања која делују на обртни лежај. Овај прорачун је извршен на два начина. Добијени резултати су упоређени у закључку.

Кључне речи: **митраљез, трзање, сила, напрезање, лежај**

ABSTRACT

Installation of 12,7 mm M87 machine gun on mobile platform is presented in this work. The goal is to calculate all forces and stresses affecting machine gun, it's cradle and mount assembly, based on known and measured constructional parameters. A recoil force is the most important force causing this stresses. In the first part of work, influence of internal ballistic parameters is scrutinized. With defined optimal values of internal ballistic parameters, gunpowder gases pressure force is adopted, which is the main force that causes recoil. When other forces, acting during machine gun's firing, are added, differential equations can be solved and with it, maximum value of recoil force is calculated. Afterwards, with this information, calculation of forces and stresses on swivel bearing is done by two different methods. Gained results are compared in conclusion chapter.

Key words: **machine gun, recoil, force, stress, bearing**

Садржај

1. УВОДНА РАЗМАТРАЊА	5
1.1 Сила трзања	5
2.2 Митраљез 12,7 mm M87.....	6
2. УТИЦАЈ УБ ПАРАМЕТАРА НА СИЛУ ТРЗАЊА МИТРАЉЕЗА 12,7 ММ M87	8
2.1 Притисак барутних гасова у цеви	9
2.2 Анализа утицајних параметара на притисак барутних гасова у цеви и брзину пројектила	15
2.2.1 Варирање коволумена барутних гасова α	15
2.2.2 Варирање специфичног рада барутних гасова f_b	16
2.2.3 Варирање јединичне брзине сагоревања барута u_{z0}	17
2.2.4 Варирање укупног пута пројектила у цеви x_u	18
2.3 Налажење оптималног решења	19
2.4 Сила притиска барутних гасова на чело клипа у цилиндру за позајмицу	21
2.4.1 Притисак барутних гасова у цилиндру за позајмицу	22
3. ОДРЕЂИВАЊЕ СИЛЕ ТРЗАЊА	26
3.1 Сила притиска барутних гасова F_{bg}	26
3.2 Сила притиска барутних гасова F_{bg}'	27
3.3 Сила повратне опруге затварача	30
3.4 Сила опруге амортизера (buffer-a)	32
3.5 Сила трења на вођицама	34
3.6 Решавање диференцијалних једначина	34
4. ПРОРАЧУН ОПТЕРЕЋЕЊА И СИЛА КОЈЕ ДЕЛУЈУ НА ЛАФЕТ И ОБРТНИ ЛЕЖАЈ	38
ЗАКЉУЧАК	49
Литература	51
Прилози	52

1. УВОДНА РАЗМАТРАЊА

Циљ рада је уградња митраљеза 12,7 mm M87 на мобилну платформу. То подразумева конструкцију горњег лафета који ће издржати оптерећења настала дејством силе трзања. Да би се дошло до оптималног решења, потребно је да сила трзања буде што мања, и да маса лафета такође буде што мања (да се избегне предимензионисање), али не мања од дозвољене.

Према томе, рад има четири основна задатка:

- 1) Испитивање утицаја унутрашње балистичких параметара на силу трзања митраљеза 12,7 mm M87;
- 2) Одређивање силе трзања;
- 3) Пројектовање одговарајућег горњег лафета на основу конструкције митраљеза;
- 4) Одређивање оптерећења лафета и обртног лежаја.

У овом поглављу је описана сила трзања, као главна улазна величина за прорачун и дат је кратак опис митраљеза 12,7 mm M87.

1.1. Сила трзања

У току процеса опаљења на оружје/оружје делује реактивна сила притиска барутних гасова тј. сила трзања. Ова сила настаје као последица убрзаног кретања пројектила у каналу цеви и барутних гасова у смеру према задњем пресеку цеви. Сагласно закону о количини кретања, величина ове силе расте са порастом масе пројектила и брзине његовог кретања. Од величине силе трзања зависе отпорност оружја/оружја и његова стабилност при опаљењу [1].

У случају интеграције оружја (лафетирања), сила трзања се у целости преноси на лафет уколико је цев круто везана са лафетом. Да би се избегле непогодности овакве везе, односно продужило време дејства оптерећења лафета и смањио његов интензитет, цев се еластично повезује са лафетом чиме се омогућава кретање цеви оруђа или целог оружја за време опаљења у правцу осе цеви. Овакво померање назива се трзање, а сви делови који се крећу са склопом цеви чине трзајуће делове. Укупан ход трзајућих делова представља дужину трзања.

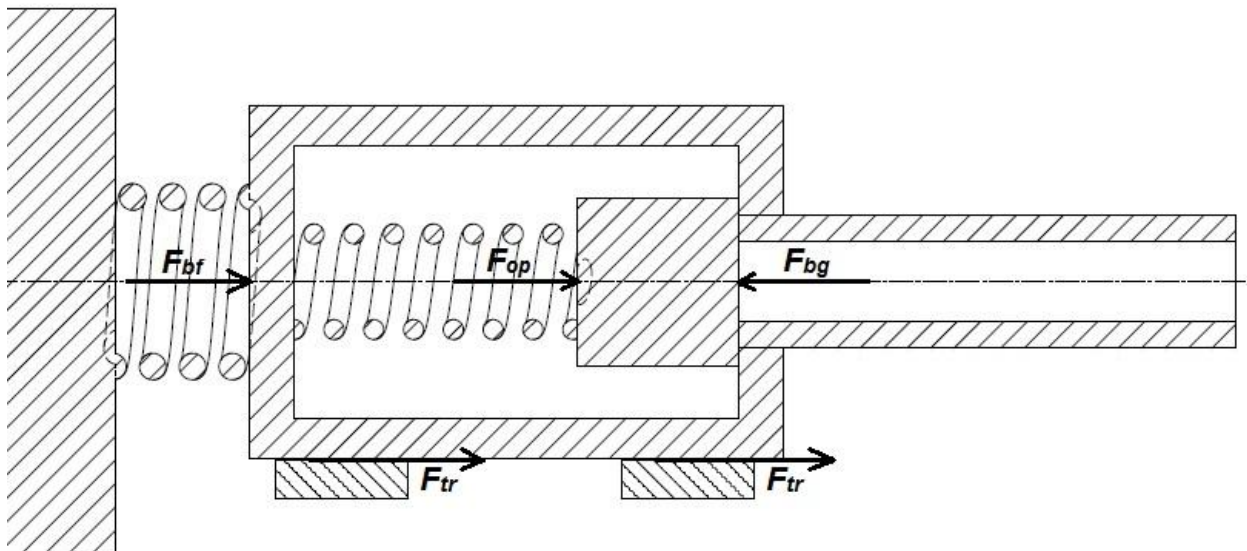
Да би се на најрационалнији начин реализовала конструкција лафета, неопходно је да се дефинише деловање сила на лафет као целину, а такође, и на поједине његове делове. У процесу опаљења митраљеза 12,7 mm M87, делује сила барутних гасова на чело затварача и сила повратне опруге затварача која делује након одбрављивања затварача и супроставља се сили барутних гасова. Векторски збир ове две силе, уз занемаривање силе трења, даје силу трзања:

$$\overrightarrow{P_{kn}} = \overrightarrow{F_{bg}} + \overrightarrow{F_{op}} \quad (1)$$

Ако се митраљез налази на лафету и постоји еластична веза између оружја и лафета, јавља се и сила противтрзајућег елемента (амортизера, хидрауличне кочнице итд.). Такође постоји и сила трења на вођицама која се супроставља кретању митраљеза током трзања. Дејство ових сила приказано је на слици 1.

$$\overrightarrow{P_{kn}} = \overrightarrow{F_{bg}} + \overrightarrow{F_{op}} + \overrightarrow{F_{bf}} + \overrightarrow{F_{tr}} \quad (2)$$

$\overrightarrow{P_{kn}}$ – сила трзања,
 $\overrightarrow{F_{bg}}$ – сила притиска барутних гасова на чело затварача,
 $\overrightarrow{F_{op}}$ – сила повратне опруге затварача,
 $\overrightarrow{F_{bf}}$ – сила противтрзајућег елемента (buffer-a),
 $\overrightarrow{F_{tr}}$ – сила трења на вођицама.



Слика 1. Силе које делују на оружје

Наведене силе су паралелне са осом цеви тако да се интензитет силе трзања може изразити као:

$$P_{kn}(x_1, x_2, t) = F_{bg}(t) - F_{op}(x_1) - F_{bf}(x_2) - F_{tr}(x_2) \quad (3)$$

t – време од тренутка опаљења,
 x_1 – пређени пут затварача,
 x_2 – пређени пут митраљеза у току трзања.

1.2. Митраљез 12,7 mm M87

Митраљез 12,7 mm M87 је базиран на совјетском НСВ-у (рус. Никитина-Соколова-Волкова). У Русији је прихваћен као замена за ДШК (рус. Дегтярёва-Шпагина Крупнокалиберный) 1969. године.



Слика 2. Митраљез 12,7 mm M87 [2]

Функционише на принципу позајмице барутних гасова, са попречно клинастим затварачем као системом брављења. Конструкција митраљеза обезбеђује поуздано функционисање, без застоја, у свим климатским и теренским условима. Цев је израђена методом хладног ковања, а унутрашњост цеви је хромирана, што обезбеђује дуготрајност са непромењеним балистичким карактеристикама.

Сев се брзо и лако демонтира са митраљеза, тако да је у екстремном режиму коришћења могуће њено брзо хлађење или замена резервном. Храњење митраљеза врши се из реденика, смештеног у муницијску кутију, капацитета 60 метака. Чауре се након опаљења избацују напред, чиме је повећана безбедност стрелца и људства у његовом окружењу. Скривач пламена на устима цеви распршује барутне гасове и смањује блесак пламена, чиме се маскира положај оружја. Зависно од намене, митраљез се, са одговарајућом колевком, може уградити на различите типове борбених средстава [2].



Слика 3. Митраљез 12,7 mm M02 Којот [2]

Користи се за дејство против живе силе, неоклопљених и лако оклопљених возила, и нисколетећих циљева у ваздушном простору. Карактеришу га поузданост и једноставност употребе и одржавања. Конструисан је за метак 12,7x108 mm, међутим постоји и верзија митраљеза прилагођена метку .50 Browning (намењен западном тржишту). Пешадијска варијанта митраљеза на треношцу зове се Којот, представљена на слици 3.

Састав комплета:

- Митраљез 12,7 mm M87,
- Резервна цев,
- 36 кратких реденика за 10 метака,
- 3 муницијске кутије,
- Резервни делови,
- Алат,
- Прибор,
- Упутство за руковање и одржавање,
- Сандук за паковање.

Табела 1. Тактичко-техничке карактеристике митраљеза 12,7 mm M87 [2]

Назив	Вредност	Јединица
Калибар	12,7 x 108	mm
	.50 Browning	inch
Корак увијања	381	mm
Број жљебова	8	/
Капацитет реденика	60	метака
Дужина цеви	1100	mm
Дужина, укупна	1560	mm
Маса митраљеза	24,8	kg
Маса резервне цеви	9,3	kg
Брзина паљбе	700	метака/минути
Максимални ефективни домет	1500	m

2. УТИЦАЈ УБ ПАРАМЕТАРА НА СИЛУ ТРЗАЊА МИТРАЉЕЗА 12,7 MM M87

Као што се може видети из једначине (3), сила притиска барутних гасова на чело затварача је сила која изазива трзање митраљеза. Митраљез функционише на принципу позајмице барутних гасова, па се мора узети у обзир и сила притиска барутних гасова на чело клипа у цилиндру за позајмицу, али она је знатно мањег интензитета. Све остале силе које се јављају, су силе које спречавају трзање и имају супротан смер. Интензитет силе притиска барутних гасова на чело затварача је:

$$F_{bg} = p \cdot S_c \quad (4)$$

где су

p – притисак барутних гасова у цеви,

S_c – попречни пресек цеви.

$$S_c = \frac{d^2 \pi}{4} \quad (5)$$

d – калибар оружја.

Калибар је одређен конструкцијом митраљеза, тако да се на промену силе трзања може утицати само променом притиска барутних гасова у цеви. Према једначини (4), сила притиска барутних гасова је директно сразмерна притиску барутних гасова у цеви, па се на основу једначина (3) и (4) може закључити да се са смањењем притиска барутних гасова у цеви, смањује и укупна сила трзања митраљеза за време опаљења.

Дакле, циљ је што више смањити притисак барутних гасова у цеви, али уз што мање смањење карактеристика које утичу на ефикасност оружја, пре свега брзине пројектила на устима цеви, и тактичко-техничких карактеристика представљених у табели 1. Ова два захтева су контрадикторна, зато што се смањивањем притиска барутних гасова у цеви смањује и брзина пројектила на устима цеви, тако да се тражи одређени компромис тј. оптимално решење које ће имати што мању силу трзања, уз најмање могуће нарушавање излазних величина као што је почетна брзина пројектила.

2.1. Притисак барутних гасова у цеви

Промена притиска барутних гасова у цеви у односу на време и пут пројектила у цеви се добија унутрашње балистичким (УБ) прорачуном. Митраљез 12,7 mm M87 користи барут NC-26, код кога је барутно зрно облика седмоканалне цевчице (слика 4) са димензијама:

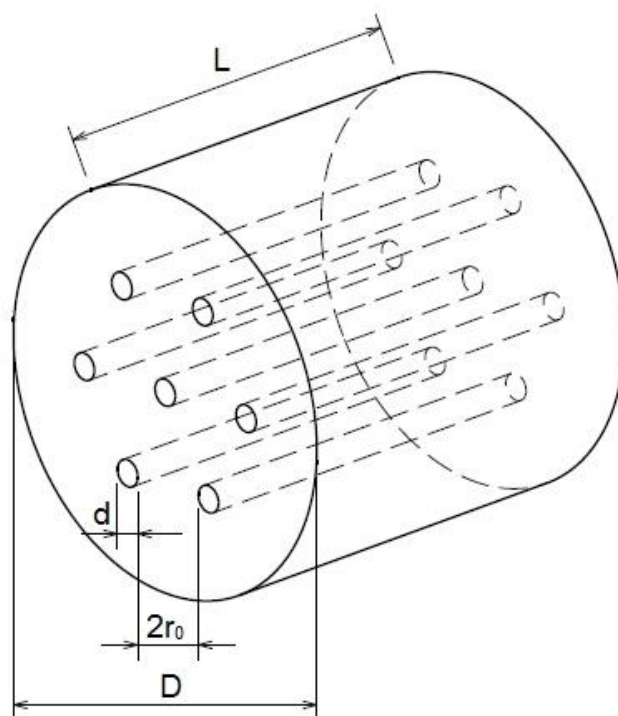
Спољни пречник: $D = 3 \text{ mm}$,

Унутрашњи пречник: $d = 0,2 \text{ mm}$,

Дужина зрна: $L = 3 \text{ mm}$.

Додатни подаци на основу којих се израчунавају остале вредности потребне за формирање улазне датотеке у програму за израчунавање притиска барутних гасова у цеви:

- Количина топлоте при константној запремини: $Q_w = 4019 \text{ J/g}$,
- Маса пројектила: $m = 0,0482 \text{ kg}$;
- Маса барутног пуњења: $m_b = 0,016 \text{ kg}$;
- Почетна запремина барутне коморе: $W_0 = 0,0000204 \text{ m}^3$;
- Укупан пут пројектила у цеви: $x_u = 0,99 \text{ m}$;
- Однос специфичних топлота умањен за 1: $\theta = 0,26928$;
- Притисак форсирања: $p_0 = 45000000 \text{ Pa}$;
- Запреминска маса барута: $\rho_b = 1600 \text{ kg/m}^3$.



Слика 4. Основне димензије барутног зрна (седмоканалне цевчице)

На основу датих података се рачуна:

- Попречни пресек цеви S_c ,
- Коефицијент фиктивности φ ,
- Густина барутног пуњења ρ ,
- Специфичан рад барутних гасова f_b ,
- Коволумен барутних гасова α ,
- Половина дебљине барутног зрна r_0 ,
- Коефицијенти облика κ_1 , λ_1 ,
- Јединична брзина сагоревања барута u_{z0} .

Попречни пресек цеви је:

$$S_c = n_s \cdot d^2 \quad (6)$$

$$n_s = 0,82$$

$$S_c = 0,000132 \text{ m}^2$$

Коефицијент фиктивности је, према литератури [3]:

$$\varphi = K + \frac{1}{3} \cdot \frac{m_b}{m} \quad (7)$$

За вредност параметра $K = 1,1$ коефицијент фиктивности износи:

$$\varphi = 1,21065$$

Специфичан рад барутних гасова је:

$$\begin{aligned} f_b &= (6546 + 0,91Q_w) \cdot 98,1 \\ f_b &= 1000943 \text{ J/kg} \end{aligned} \quad (8)$$

Коволумен барутних гасова је:

$$\begin{aligned} \alpha &= (1456 - 0,14 Q_w) \cdot 10^{-6} \\ \alpha &= 0,00089334 \text{ m}^3/\text{kg} \end{aligned} \quad (9)$$

Јединична брзина сагоревања барута је:

$$\begin{aligned} u_{z0} &= (-76,6 + 0,0478Q_w) \cdot 10^{-11} \\ u_{z0} &= 11,5508 \cdot 10^{-10} \text{ m/(s}\cdot\text{Pa)} \end{aligned} \quad (10)$$

Половина дебљине барутног зрна на основу геометрије барутног зрна (слика 4) је:

$$r_0 = 0,00044 \text{ m}$$

Сагоревање барутног зрна представљено је на слици 5. Коефицијенти облика одређују се на основу облика и димензија барутног зрна [3]. Односи димензија барутног зрна су:

$$\beta = \frac{2r_0}{2c} \quad (11)$$

$$\gamma = \frac{2r_0}{2b} \quad (12)$$

$$2c = L = 0,003 \text{ m}$$

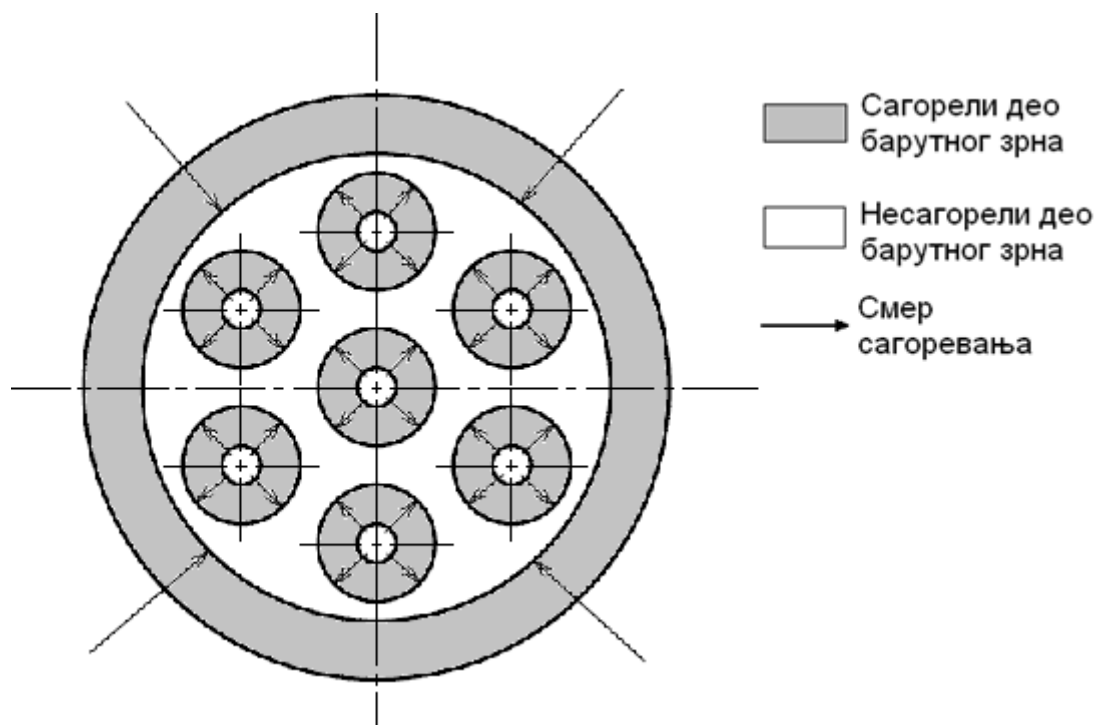
$$2b = D = 0,003 \text{ m}$$

Да би се седмоканално барутно зрно посматрало као једноканално, ради упрошћивања прорачуна, користи се апроксимација:

$$(2c)_1 = (2c)_7 / 0,7 \quad (13)$$

$$\beta = 0,08166667$$

$$\gamma = 0,11666667$$



Слика 5. Сагоревање барутног зрна (седмоканалне цевчице)

Коефицијенти облика за трочлану формулу за израчунавање релативне сагореле масе и релативне сагоревајуће површине су:

$$\kappa = 1 + \gamma + \beta \quad (14)$$

$$\kappa = 1,19833333$$

$$\lambda = - \frac{\beta + \gamma + \gamma\beta}{\kappa} \quad (15)$$

$$\lambda = - \frac{0,466667}{1,466667}$$

$$\lambda = - 0,1735$$

$$\mu = \frac{\gamma\beta}{\kappa} \quad (16)$$

$$\mu = 0,007951$$

Коначно, коефицијенти облика κ_1 и λ_1 за двочлану формулу су:

$$\kappa_1 = \kappa \left(1 - \frac{\mu}{2}\right) \quad (17)$$

$$\kappa_1 = 1,193569$$

$$\lambda_1 = \frac{1}{\kappa_1} - 1 \quad (18)$$

$$\lambda_1 = - 0,16218$$

Сада се може формирати датотека са улазним подацима за унутрашње балистички прорачун. Подаци који се уносе су дати у табели 2 по редоследу којим се уносе у улазну датотеку и у основним јединицама.

Табела 2. Улазни подаци за унутрашње балистички прорачун

Назив	Ознака	Вредност	Јединица
Почетна запремина барутне коморе	W_0	0,0000204	m^3
Површина попречног пресека цеви	S_c	0,000132	m^2
Укупни пут пројектила у цеви	x_u	0,99	m
Коефицијент фиктивности	φ	1,21065	/
Маса пројектила	m	0,0482	kg
Маса барута	m_b	0,016	kg
Запреминска маса	ρ_b	1600	kg/m^3
Коволумен барутних гасова	α	0,00089334	m^3/kg
Однос специфичних топлота умањен за 1	Θ	0,26928	/
Половина дебљине барутног зрна	r_0	0,00044	m
Коефицијент облика	κ_1	1,193569	/
Коефицијент облика	λ_1	- 0,16218	/
Специфичан рад барутних гасова	f_b	1000943	J/kg
Притисак форсирања	p_0	$4,5 \cdot 10^6$	Pa
Јединична брзина сагоревања барута	u_{z0}	$11,5508 \cdot 10^{-10}$	m/sPa

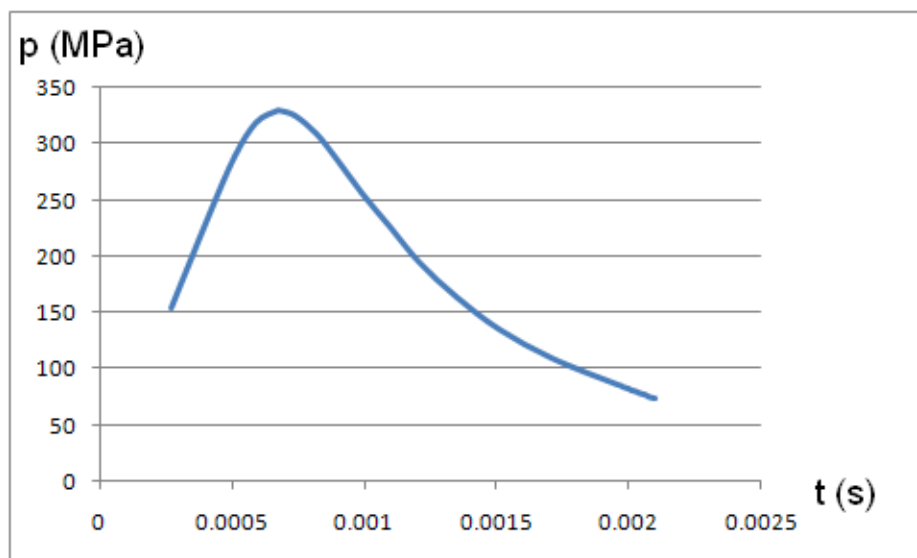
Прорачун се ради методом Дроздова, према литератури [3]. Добијени резултати дати су у табели 3 и приказани су графички на сликама 6 и 7.

Табела 3. Резултати УБ прорачуна за митраљез 12,7 mm М87

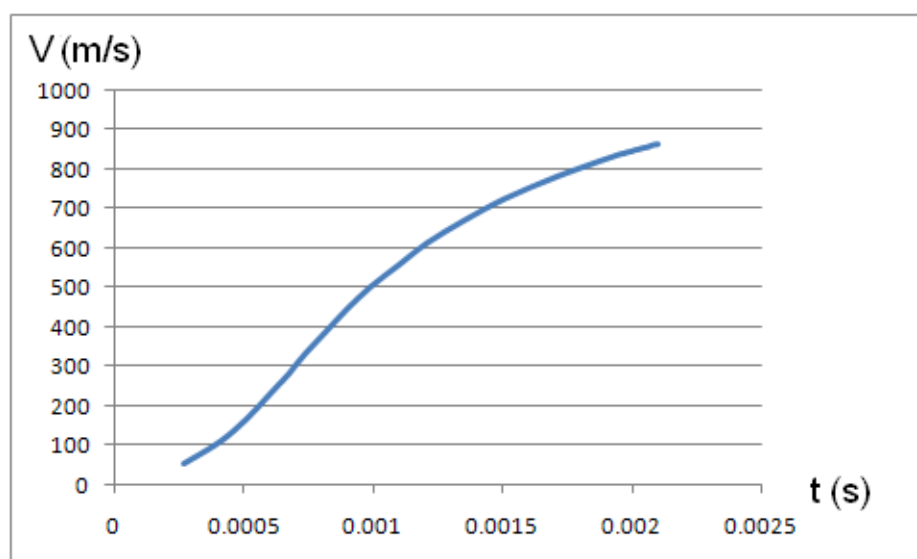
ПРВИ ПЕРИОД						
l	y	ψ	V (m/s)	x (m)	p (Pa)	t (s)
1	0,089335	0,105082	56,05	0,006	154115408	0,00027
2	0,154382	0,179652	112,1	0,017	234853776	0,00041
3	0,21943	0,252584	168,15	0,03	288383936	0,00051
4	0,284477	0,323878	224,2	0,046	318301408	0,00059
5	0,349525	0,393533	280,25	0,065	328811328	0,00067
PM	0,358536	0,403054	288,02	0,068	328976704	0,00068
6	0,414572	0,461551	336,3	0,088	324136224	0,00074
7	0,47962	0,527931	392,35	0,116	308213728	0,00082
8	0,544667	0,592672	448,4	0,151	284532672	0,0009
9	0,609715	0,655775	504,45	0,194	256057072	0,00099
10	0,674762	0,717241	560,51	0,248	225210480	0,0011
11	0,73981	0,777068	616,56	0,316	193897680	0,00121
12	0,804857	0,835257	672,61	0,403	163551744	0,00135
13	0,869905	0,891808	728,66	0,517	135192016	0,00151

14	0,934952	0,946721	784,71	0,666	109486048	0,00171
15	1	0,999996	840,76	0,867	86811968	0,00195

ДРУГИ ПЕРИОД					
l	x (m)	V (m/s)	p (Pa)	t (s)	
16	0,879	843,61	85345752	0,00197	
17	0,891	846,4	83923224	0,00198	
18	0,904	849,14	82542544	0,002	
19	0,916	851,83	81201952	0,00201	
20	0,928	854,46	79899800	0,00203	
21	0,941	857,05	78634504	0,00204	
22	0,953	859,58	77404592	0,00206	
23	0,965	862,07	76208664	0,00207	
24	0,978	864,52	75045368	0,00208	
25	0,99	866,92	73913440	0,0021	



Слика 6. Промена притиска барутних гасова у току времена



Слика 7. Промена брзине пројектила у току времена

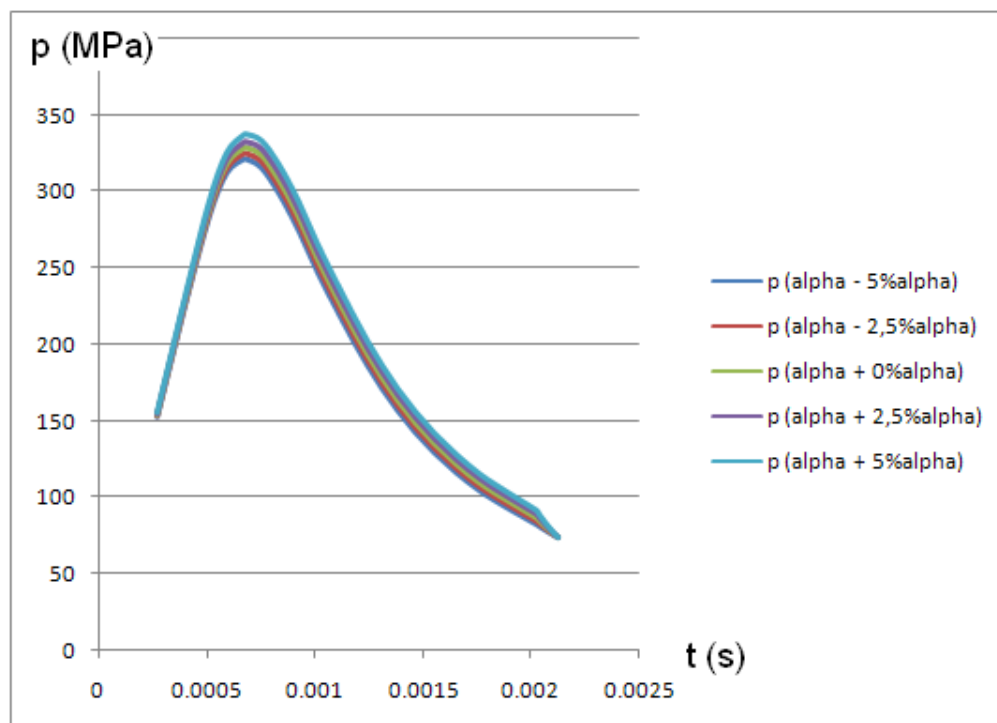
2.2. Анализа утицајних параметара на притисак барутних гасова у цеви и брзину пројектила

Да би се утврдио утицај појединих параметара на величину притиска барутних гасова у цеви и брзину пројектила, биће извршено њихово варирање у дијапазону од $\pm 5\%$. Варираће се један по један параметар док ће остали параметри задржавати основну вредност. На тај начин може се доћи до оптималног решења. Као што је претходно поменуто, циљ је пронаћи такве вредности параметара, да укупан импулс силе барутних гасова буде што мањи тј. што мање вредности притиска барутних гасова у цеви, а да почетна брзина пројектила буде што већа. Такође је потребно избећи случај непотпуног сагоревања барута. Параметри који се варирају су:

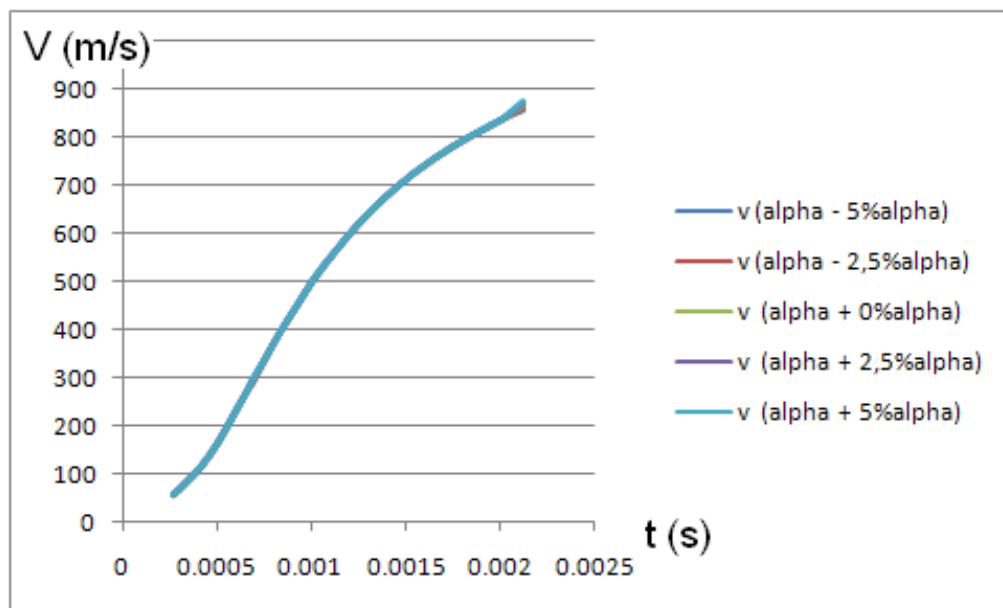
- коволумен барутних гасова α ,
- специфичан рад барутних гасова f_b ,
- јединична брзина сагоревања барута u_{z0} и
- укупни пут пројектила у цеви x_u .

2.2.1. Варирање коволумена барутних гасова α

На основу дијаграма са слика 8 и 9 може се закључити да се са смањењем коволумена барутних гасова α , импулс силе притиска барутних гасова смањује а самим тим смањује се и сила трзања митраљеца 12,7 mm M87 док се брзина пројектила на устима цеви незнатно смањује. Дакле, најповољнији резултат у овој варијацији постигнут је за $\alpha_v = \alpha - 5\% \alpha$.



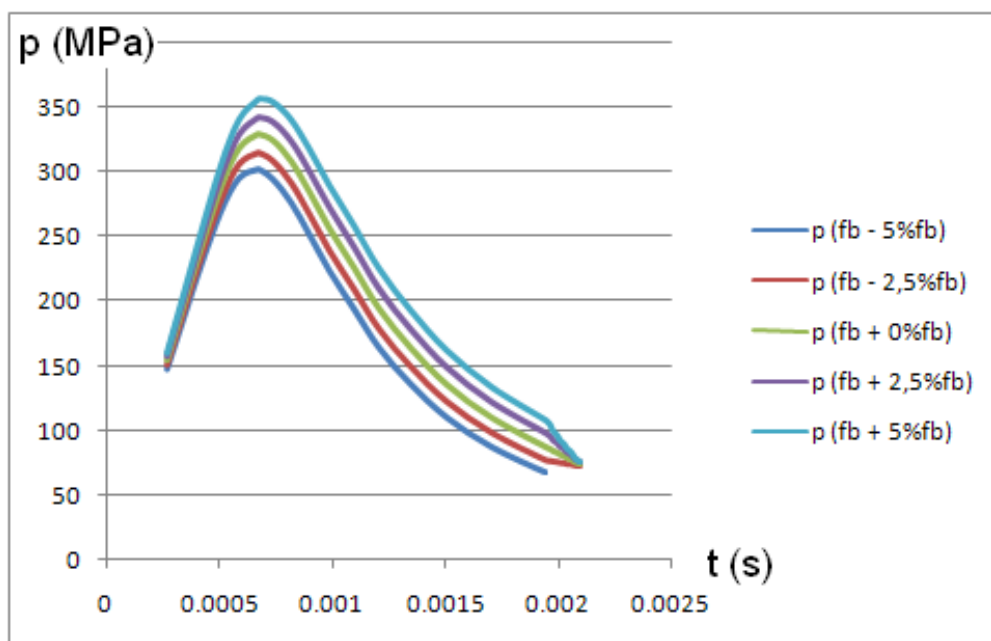
Слика 8. Утицај промене коволумена барутних гасова на притисак барутних гасова у цеви



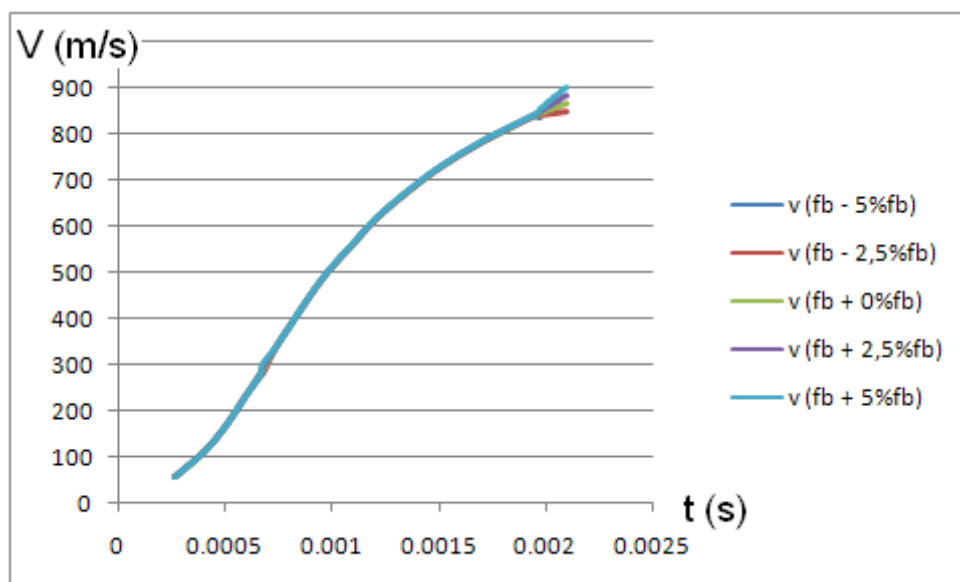
Слика 9. Утицај промене коволумена барутних гасова на брзину пројектила

2.2.2. Варирање специфичног рада барутних гасова f_b

У случају варирања специфичног рада барутних гасова f_b најмањи притисак барутних гасова у цеви постигнут је за $f_{bv} = f_b - 5\% f_b$. Међутим, тада долази до непотпуног сагоревања што је неповољан случај. Зато се као најповољнија варијанта усваја вредност специфичног рада барутних гасова од $f_{bv} = f_b - 2,5\% f_b$ где долази до потпуног сагоревања и значајнијег смањења притиска барутних гасова у цеви (слика 10). Такође, битно је напоменути да смањењем специфичног рада барутних гасова долази и до смањења брзине пројектила на устима цеви али да то смањење није превелико, према слици 11.



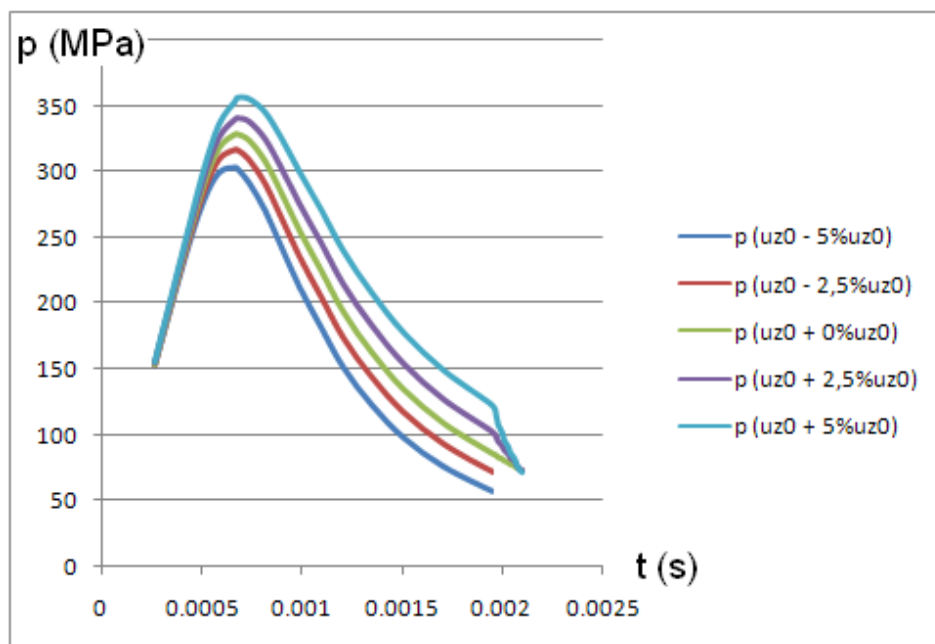
Слика 10. Утицај промене специфичног рада барутних гасова на притисак барутних гасова у цеви



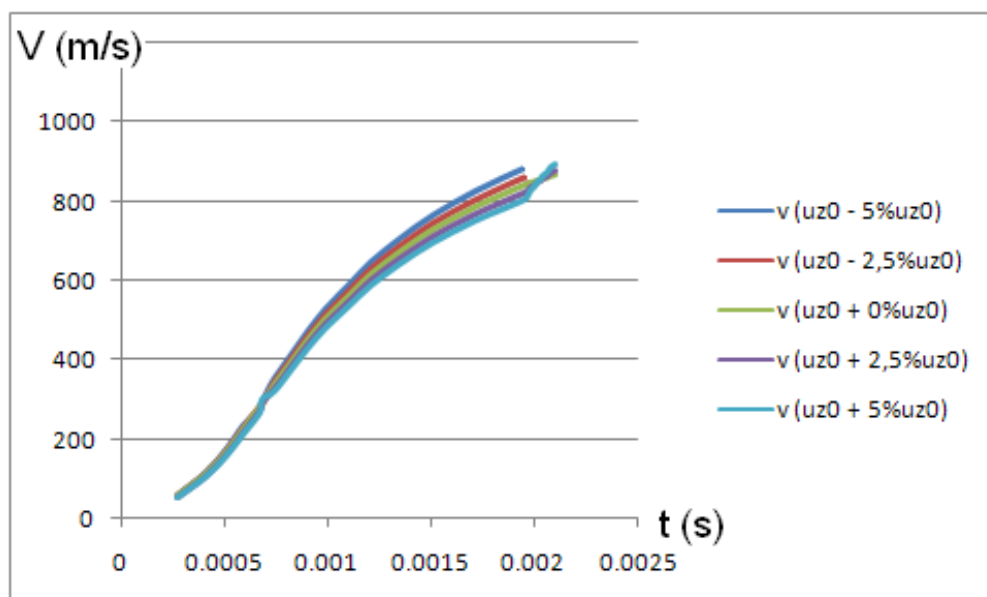
Слика 11. Утицај промене специфичног рада барутних гасова на брзину пројектила

2.2.3. Варирање јединичне брзине сагоревања барута u_{z0}

На дијаграмима са слике 12 види се да се смањењем јединичне брзине сагоревања барута u_{z0} може знатно смањити импулс притиска барутних гасова у цеви. Аналогно смањењу специфичног рада барутних гасова, и у овом случају може доћи до непотпуног сагоревања. За варијације јединичне брзине сагоревања барута од -2,5% и -5% јавља се непотпуно сагоревање тако да је најповољнија варијанта при варирању јединичне брзине сагоревања барута за случај митраљеза 12,7 mm M87, варијанта када нема промене јединичне брзине сагоревања барута ($u_{z0v} = u_{z0} + 0\% u_{z0}$).



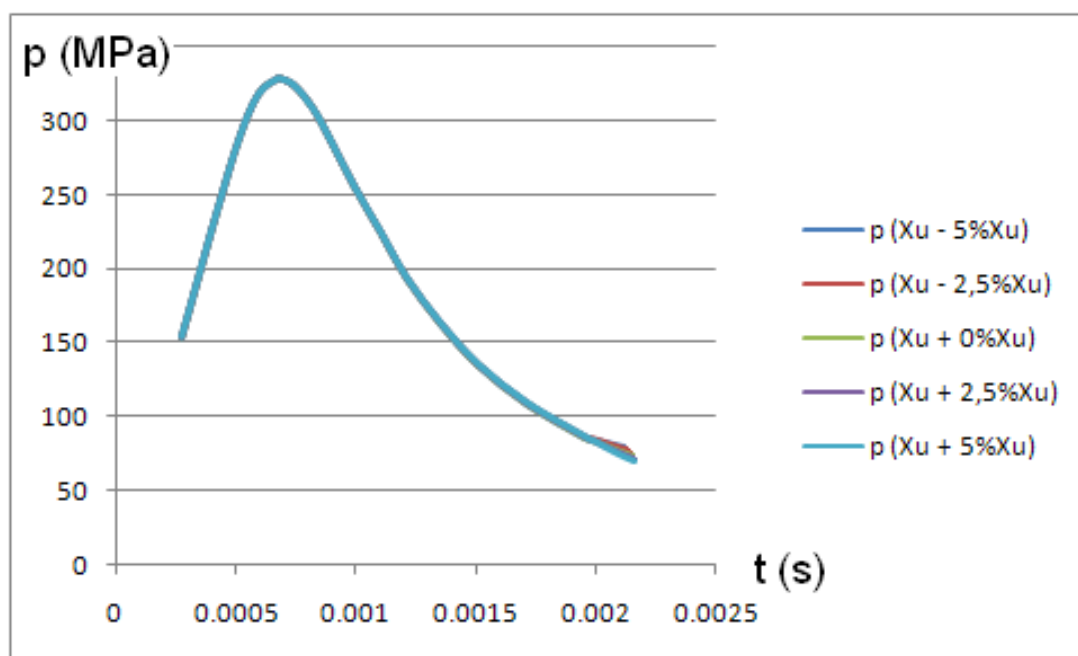
Слика 12. Утицај промене јединичне брзине сагоревања барута на притисак барутних гасова у цеви



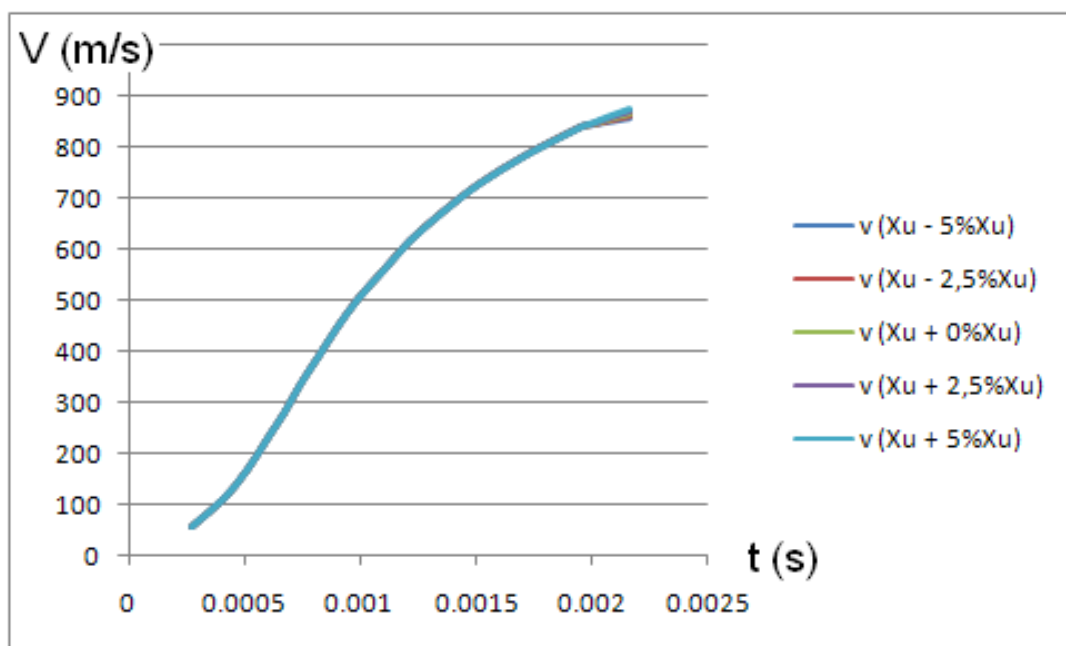
Слика 13. Утицај промене јединичне брзине сагоревања барута на брзину пројектила

2.2.4. Варирање укупног пута пројектила у цеви x_u

На основу дијаграма са слика 14 и 15 може се закључити да промена укупног пута пројектила у цеви x_u веома мало утиче на промену укупног импулса притиска барутних гасова у цеви. Усваја се вредност укупног пута пројектила у цеви без варијација ($x_{uv} = x_u + 0\% x_u$).



Слика 14. Утицај промене укупног пута пројектила у цеви на притисак барутних гасова у цеви



Слика 15. Утицај промене укупног пута пројектила у цеви на брзину пројектила

2.3. Налажење оптималног решења

На основу поглавља 2.2 у улазну датотеку програма за унутрашње балистички прорачун уносе се вредности варираних параметара за које је утврђено да дају оптималне вредности притиска барутних гасова у цеви са што мањим опадањем почетне брзине пројектила и уз испуњен услов да је остварено потпуно сагоревање. Вредности варираних параметара који се уносе у улазну датотеку дати су у табели 4 (*bold font style*). Добијени резултати дати су у табели 5 и приказани су графички на сликама 16 и 17.

Табела 4. Варирање утицајних параметара у дијапазону од $\pm 5\%$

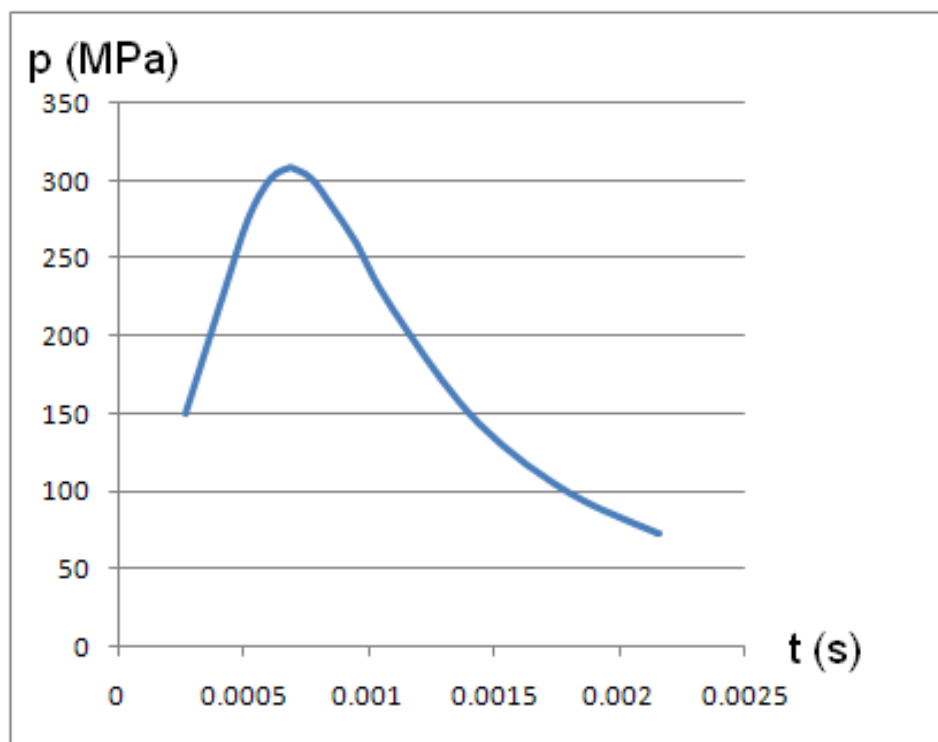
	- 5%	- 2,5%	+ 0%	+ 2,5%	+ 5%
α (m ³ /kg)	0,000849	0,000871	0,000893	0,000916	0,000938
f_b (J/kg)	950895,9	975919,4	1000943	1025967	1050990
u_{z0} (m/sPa)	$1,10 \cdot 10^{-9}$	$1,13 \cdot 10^{-9}$	$1,16 \cdot 10^{-9}$	$1,18 \cdot 10^{-9}$	$1,21 \cdot 10^{-9}$
x_u (m)	0,9405	0,96525	0,99	1,01475	1,0395

Табела 5. Резултати УБ прорачуна за митраљез 12,7 mm М87 након оптимизације улазних параметара

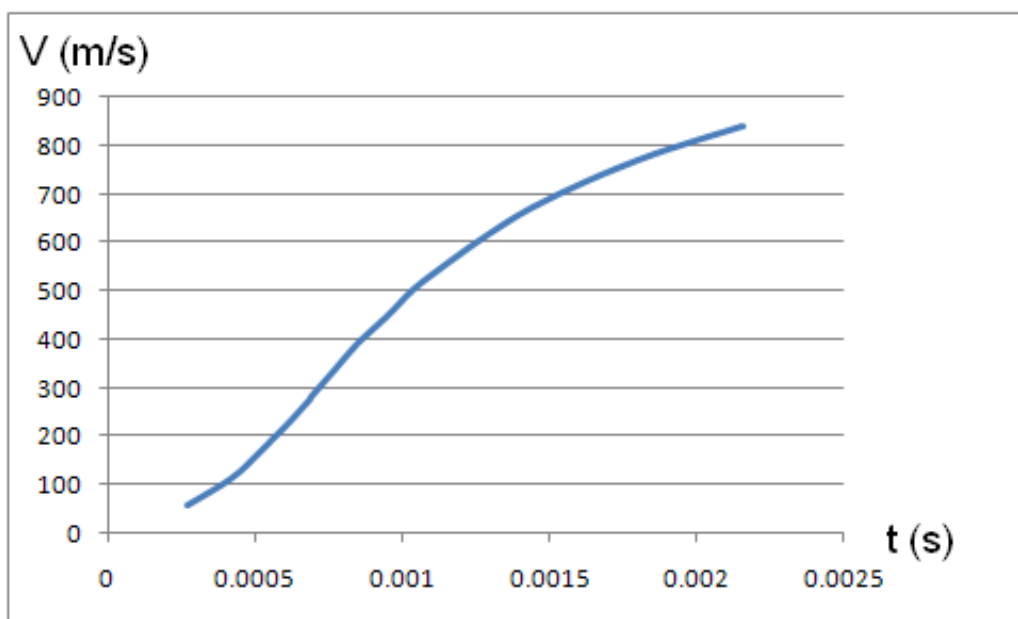
ПРВИ ПЕРИОД						
l	y	ψ	V (m/s)	x (m)	p (Pa)	t (s)
1	0,089958	0,105805	56,01	0,006	150046912	0,00027
2	0,154961	0,180309	112,02	0,017	226151440	0,00042
3	0,219964	0,253177	168,04	0,031	275104480	0,00052
4	0,284967	0,324409	224,05	0,048	300967648	0,00061
PM	0,346984	0,390843	277,49	0,067	308245952	0,00069

5	0,34997	0,394005	280,06	0,068	308235776	0,00069
6	0,414973	0,461965	336,07	0,093	301268416	0,00077
7	0,479976	0,52829	392,09	0,123	284021600	0,00085
8	0,544979	0,592979	448,1	0,161	259921616	0,00095
9	0,609982	0,656031	504,11	0,209	231818784	0,00104
10	0,674985	0,717449	560,12	0,268	201997664	0,00116
11	0,739988	0,77723	616,13	0,345	172215232	0,00129
12	0,804991	0,835375	672,15	0,444	143760368	0,00144
13	0,869994	0,891885	728,16	0,575	117518688	0,00163
14	0,934997	0,946758	784,17	0,749	94039696	0,00186
15	1	0,999996	840,18	0,985	73600976	0,00215

ДРУГИ ПЕРИОД				
l	x (m)	V (m/s)	p (Pa)	t (s)
16	0,985	840,29	73553424	0,00215
17	0,986	840,39	73505936	0,00215
18	0,986	840,5	73458488	0,00215
19	0,987	840,6	73411096	0,00215
20	0,987	840,7	73363768	0,00215
21	0,988	840,81	73316496	0,00215
22	0,988	840,91	73269272	0,00215
23	0,989	841,02	73222104	0,00216
24	0,989	841,12	73174984	0,00216
25	0,99	841,22	73127928	0,00216



Слика 16. Промена притиска барутних гасова у току времена након оптимизације улазних параметара

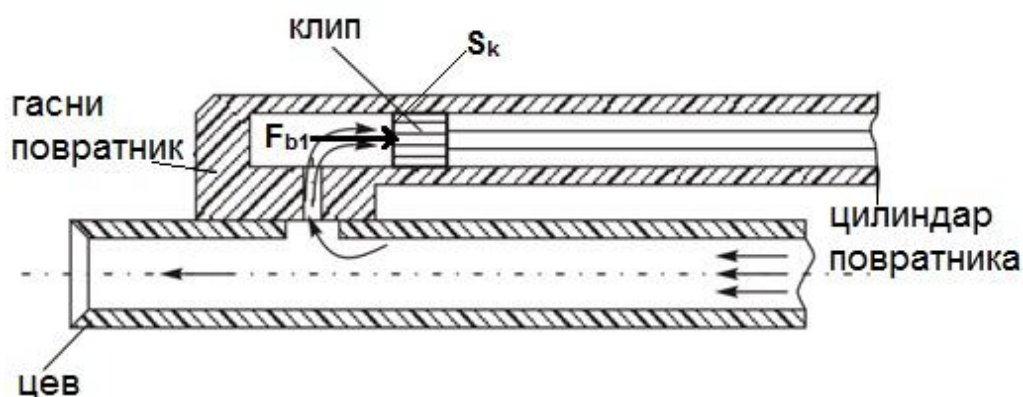


Слика 17. Промена брзине пројектила у току времена након оптимизације улазних параметара

Као што се може видети из табеле 5, максимални притисак у цеви митраљеза 12,7 mm M87 је $p_m = 308 \text{ MPa}$ док је брзина пројектила на устима цеви $V_0 = 841 \text{ m/s}$. Варирањем утицајних УБ параметара у дијапазону од $\pm 5\%$ и одабиром оптималних вредности истих параметара смањен је максимални притисак у цеви за **6,3 %**. Ово смањење притиска ће узроковати смањење силе притиска барутних гасова на чело заварача а самим тим и смањење силе трзања оружја.

2.4. Сила притиска барутних гасова на чело клипа у цилиндру за позајмицу

Сила притиска барутних гасова у цеви делује од тренутка опађења. Када дно пројектила пређе преко отвора за позајмицу, барутни гасови улазе у комору повратника и делују на клип стварајући нову силу. Ова сила, по интензитету, је далеко мања од силе притиска барутних гасова која делује на чело затварача али је не треба занемарити. Дејство силе притиска барутних гасова на чело клипа у цилиндру за позајмицу представљено је на слици 18.



Слика 18. Деловање силе притиска барутних гасова на клип у цилиндру [5]

Сила притиска барутних гасова на чело клипа у цилиндру за позајмицу рачуна се према следећој једначини:

$$F_{b1} = S_k \cdot p_k \quad (19)$$

где су

S_k – површина клипа у цилиндру за позајмицу,

p_k – притисак барутних гасова у цилиндру за позајмицу.

Аналогно сили притиска барутних гасова на чело затварача, сила F_{b1} је директно сразмерна притиску барутних гасова у цилиндру за позајмицу, тако да се смањивањем овог притиска може смањити и сила притиска барутних гасова на чело клипа у цилиндру за позајмицу.

2.4.1. Притисак барутних гасова у цилиндру за позајмицу

Притисак у цилиндру за позајмицу се, на основу литературе [6], рачуна по моделу Е. Л. Бравина:

$$p_k = p_\phi \cdot e^{-\frac{t}{b}} \cdot (1 - e^{-\alpha \frac{t}{b}}) \quad (20)$$

где су

p_ϕ – притисак барутних гасова у каналу цеви испод отвора за одвођење барутних гасова у тренутку кад пројектил прође отвор,

t – време деловања гаса на клип у комори гасова,

α – коефицијент позајмице барутних гасова,

b – однос јединичног импулса и притиска.

Коефицијент позајмице барутних гасова рачуна се као:

$$\alpha = n_1 \frac{S_\phi \cdot M_0}{S_k^2} \quad (21)$$

где су

n_1 – опитни коефицијент,

S_ϕ – површина отвора за позајмицу,

S_k – површина клипа коморе за позајмицу,

M_0 – трзајућа маса.

На основу техничке документације фабрике *Застава Оружје*, издвојени су конструкциони подаци потребни за израчунавање притиска барутних гасова у цилиндру за позајмицу:

- Пречник отвора за позајмицу: $d_\phi = 0,0044$ m;
- Место позајмице (мерено од дна цеви): $L_\phi = 0,527$ m;
- Пречник клипа: $d_k = 0,02$ m;
- Трзајућа маса (укључује масу тела затварача, носача затварача и повратне опруге затварача): $M_0 = 2,725$ kg.

Површина отвора за позајмицу износи:

$$S_{\phi} = \frac{d_{\phi}^2 \pi}{4} \quad (22)$$

$$S_{\phi} = 0,0000452 \text{ m}^2$$

Ефективна површина клипа у цилиндру за позајмицу је:

$$S_k = \frac{d_k^2 \pi}{4} \quad (23)$$

$$S_k = 0,0003142 \text{ m}^2$$

За вредност опитног коефицијента $n_1 = 1$, коефицијент позајмице барутних гасова износи:

$$\alpha = 419,8193 \frac{\text{kg}}{\text{m}^2}$$

Подаци који се усвајају на основу УБ прорачуна за затворену цев (из табеле 5):

- Притисак барутних гасова у каналу цеви у тренутку када се пројектил налази на устима цеви: $p_u = 73,1 \text{ МПа}$;
 - Притисак барутних гасова у каналу цеви у тренутку када дно пројектила пређе преко отвора за позајмицу (за пут пројектила од $L_{\phi} = 0,527 \text{ m}$): $p_{\phi} = 120 \text{ МПа}$;
 - Време када се пројектил налази на устима цеви мерено од тренутка када пројектил пређе место за позајмицу: $t_{ku} = 0,00059 \text{ s}$
 - Брзина пројектила на устима цеви: $V_0 = 841,22 \text{ m/s}$
- Коефицијент β одређује се помоћу емпиријског обрасца:

$$\beta = \frac{v_g}{V_0} \quad (24)$$

$$\beta = 1,515656$$

где је v_g средња брзина истицања барутних гасова и износи $v_g = 1275 \frac{\text{m}}{\text{s}}$, према литератури [5].

Коефицијент A дат је изразом:

$$A = 0,365 \frac{\beta^2}{\beta - 0,5} \frac{V_0}{X_u} \quad (25)$$

$$A = 701,4906$$

Јединични импулс у каналу цеви је:

$$i_0 = \frac{p_{\phi} + p_u}{2} \cdot t_{ku} + \frac{p_u}{A} \quad (26)$$

$$i_0 = 161219,22 \text{ Pa}\cdot\text{s}$$

Однос јединичног импулса и притиска у цеви у тренутку када се пројектила нађе на месту позајмице се рачуна по следећој формули:

$$b = \frac{i_0}{p_\Phi} \quad (27)$$

$$b = 0,001343 \frac{1}{s}$$

Са израчунатим свим вредностима које фигуришу у једначини (20), може се представити функција промене притиска у цилиндру за позајмицу:

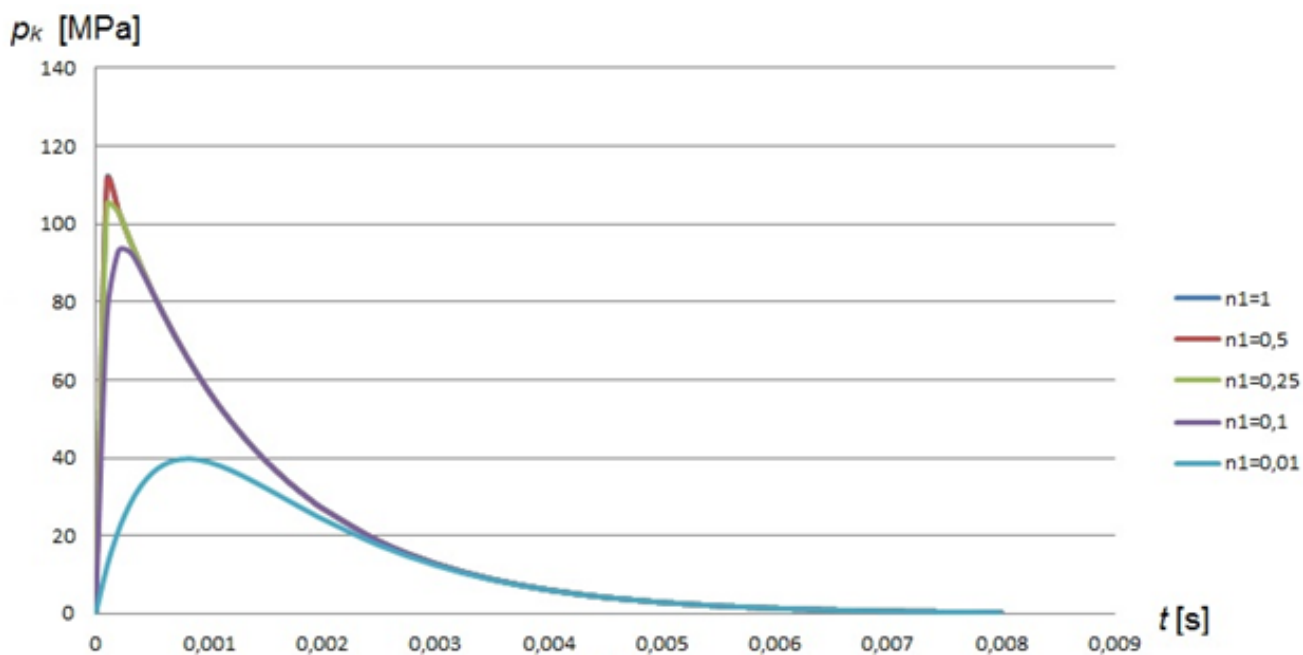
$$p_k = 120 \cdot 10^6 \cdot e^{-\frac{t}{0,001343}} \cdot \left(1 - e^{-31,25725114 \frac{t}{0,001343}}\right)$$

Једини параметар који се у овом случају може варирати је опитни коефицијент n_1 . Варирањем овог коефицијента у оквиру једначине (21) добијене су разлите промене притиска барутних гасова у току времена представљене у табели 6 и графички на слици 19. На основу ових података може се закључити да се смањењем опитног коефицијента може и до неколико пута смањити укупан импулс силе притиска барутних гасова на чело клипа у цилиндру за позајмицу, чиме се утиче и на смањење силе трзања.

Табела 6. Промена силе притиска барутних гасова на чело клипа у цилиндру за позајмицу у току времена за различите вредности опитног коефицијента

t (s)	p_k (Pa)				
	$n_1 = 1$	$n_1 = 0,5$	$n_1 = 0,25$	$n_1 = 0,1$	$n_1 = 0,01$
0	0	0	0	0	0
0,0001	111391215	111031995	105056431	76005851	12068487
0,0002	103402187	103401105	103067652	92967133	21191889
0,0003	95985131	95985128	95967468	92907962	27939741
0,0004	89100102	89100102	89099170	88192683	32778993
0,0005	82708938	82708938	82708888	82441351	36092005
0,0006	76776212	76776212	76776210	76697304	38191419
0,0007	71269042	71269042	71269042	71245773	39332443
0,0008	66156902	66156902	66156902	66150040	39723007
0,0009	61411457	61411457	61411457	61409433	39532146
0,001	57006403	57006403	57006403	57005806	38896917
0,0011	52917324	52917324	52917324	52917149	37928119
0,0012	49121556	49121556	49121556	49121504	36715004
0,0013	45598059	45598059	45598059	45598044	35329167
0,0014	42327303	42327303	42327303	42327298	33827750
0,0015	39291159	39291159	39291159	39291157	32256086
0,0016	36472797	36472797	36472797	36472797	30649874
0,0017	33856598	33856598	33856598	33856598	29036969
0,0018	31428059	31428059	31428059	31428058	27438856
0,0019	29173719	29173719	29173719	29173719	25871860
0,002	27081083	27081083	27081083	27081083	24348137

0,0025	18665397	18665397	18665397	18665397	17603717
0,003	12864960	12864960	12864960	12864960	12452524
0,0035	8867059,5	8867059,5	8867059,5	8867059	8706839
0,004	6111542,2	6111542,2	6111542,2	6111542	6049301
0,0045	4212326,4	4212326,4	4212326,4	4212326	4188147
0,005	2903308,7	2903308,7	2903308,7	2903309	2893916
0,0055	2001079,8	2001079,8	2001079,8	2001080	1997431
0,006	1379226,5	1379226,5	1379226,5	1379227	1377809
0,0065	950619,68	950619,68	950619,68	950619,7	950069
0,007	655206,2	655206,2	655206,2	655206,2	654992,3
0,0075	451595,07	451595,07	451595,07	451595,1	451512
0,008	311257,9	311257,9	311257,9	311257,9	311225,6



Слика 19. Графички приказ промене силе притиска барутних гасова на чело клипа у цилиндру за позајмицу у току времена за различите вредности опитног коефицијента

3. ОДРЕЂИВАЊЕ СИЛЕ ТРЗАЊА

Сила трзања митраљеза 12,7 mm M87 добија се решавањем диференцијалне једначине:

$$P_{kn} = m_m \cdot \ddot{x} = \sum_{i=1}^n F_i \quad (28)$$

где су

m_m – маса митраљеза,

$\ddot{x}$ – убрзање митраљеза,

$\sum_{i=1}^n F_i$ – сума свих сила које делују на митраљез,

n – број сила које делују на митраљез.

Аутоматика митраљеза функционише на принципу позајмице барутних гасова, па је потребно цео процес трзања раздвојити на три фазе, како би се решила једначина (28).

- Прва фаза (од тренутка опаљења до тренутка када дно пројектила пређе преко места за позајмицу):

$$m_m \cdot \ddot{x} = F_{bg} - F_{bf} - F_{tr} \quad (29)$$

где је

F_{bg} – сила притиска барутних гасова на чело затварача до тренутка када дно пројектила пређе преко места за позајмицу.

- Друга фаза (од тренутка када дно пројектила пређе преко места за позајмицу до тренутка када се притисак барутних гасова изједначи са атмосферским притиском тј. када на митраљез не делује ни једна активна сила):

$$m_m' \cdot \ddot{x} = F_{bg}' - F_{op} - F_{bf} - F_{tr} \quad (30)$$

где су

m_m' – маса митраљеза умањена за масу затварача,

F_{bg}' – сила притиска барутних гасова на чело затварача и чело клипа у цилиндру за позајмицу након што дно пројектила пређе преко места за позајмицу.

- Трећа фаза (представља кретање митраљеза по инерцији, а траје од краја друге фазе до заустављања митраљеза, $V_{митраљеза} = 0$ m/s).

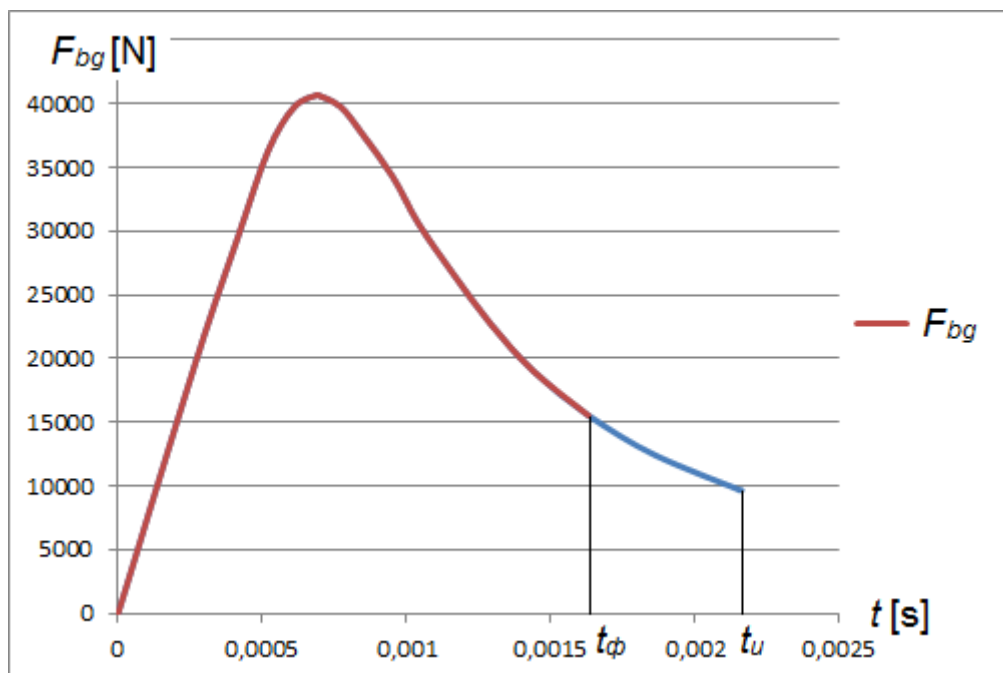
$$m_m \cdot \ddot{x} = -F_{bf} - F_{tr} \quad (31)$$

3.1. Сила притиска барутних гасова F_{bg}

Ова сила добија се на основу унутрашње балистичког прорачуна (слика 16) и једначине (4). Битно је напоменути да, због раздвајања процеса трзања на три фазе, ова сила делује до тренутка када дно пројектила пређе преко места за позајмицу ($t_\phi = 0,0016$ s).

$$F_{bg} = p \cdot S_c$$

На слици 20 црвеном бојом је представљена сила притиска барутних гасова која делује на чело затварача у првој фази. Табеларни приказ дат је у прилогу 1.



Слика 20. Промена силе притиска барутних гасова у току времена

3.2. Сила притиска барутних гасова F_{bg}'

Ова сила може се представити као сума две силе:

$$F_{bg}' = F_{bg}'' + F_k \quad (32)$$

где су

F_{bg}'' – сила притиска барутних гасова на чело затварача смањена услед проширења запремине,

F_k – сила притиска барутних гасова на чело клипа у цилиндру за позајмицу.

Сила F_{bg}'' добија се на основу силе F_{bg} која делује након што дно пројектила пређе преко места за позајмицу (представљено плавом бојом на слици 20) и једначине стања идеалног гаса:

$$pV = nRT \quad (33)$$

где су

p – притисак,

V – запремина,

n – број молова идеалног гаса,

R – универзална гасна константа,

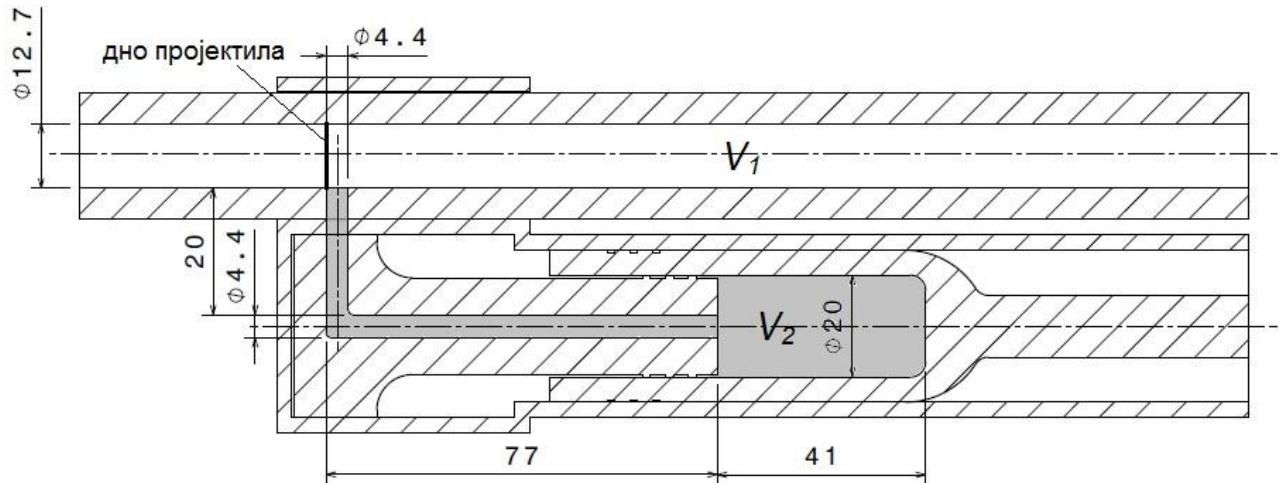
T – температура.

Ако се усвоји да нема промене масе и температуре, може се рећи да:

$$nRT = c = \text{const.} \quad (34)$$

тако да су притисак и запремина директно обрнуто сразмерни.

Када пројектил пређе преко места за позајмицу долази до наглог ширења запремине, што доводи до пада притиска у цеви. Да би израчунали силу F_{bg}'' потребно је одредити нови притисак у цеви p' , који је смањен повећањем запремине.



Слика 21. Ширење запремине након преласка пројектила преко места за позајмицу

На основу слике 21 могу се израчунати запремине V_1 и V_2 :

$$V_1 = S_c \cdot L_\phi \quad (35)$$

$$V_1 = 0,000069564 \text{ m}^3$$

$$V_2 = 0,0044^2 \pi / 4 \cdot 0,02 + 0,0044^2 \pi / 4 \cdot 0,077 + 0,02^2 \pi / 4 \cdot 0,041$$

$$V_2 = 0,0000144 \text{ m}^3$$

Дакле, укупна запремина коју испуњавају барутни гасови непосредно пре него што пројектил пређе преко места позајмице је $V = V_1$. Када пројектил пређе преко места позајмице нова запремина је $V' = V_1 + V_2$. Из једначина (33) и (34) следи релација:

$$pV = p'V' \quad (36)$$

где је p – притисак барутних гасова након што пројектил пређе преко места за позајмицу добијен УБ прорачуном за затворену цев.

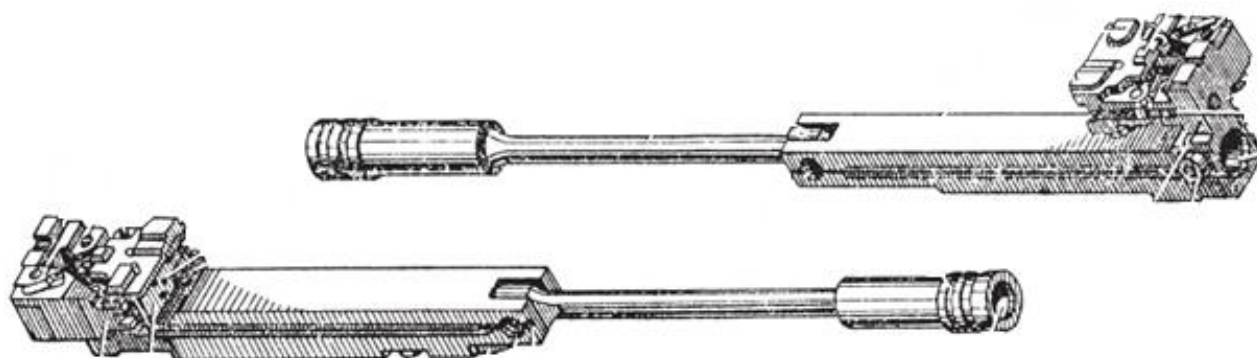
$$p' = p \cdot \frac{V}{V'}$$

$$p' = 0,828938 p$$

Последњи израз показује да је настао пад притиска барутних гасова у цеви од 17,1% услед ширења запремине.

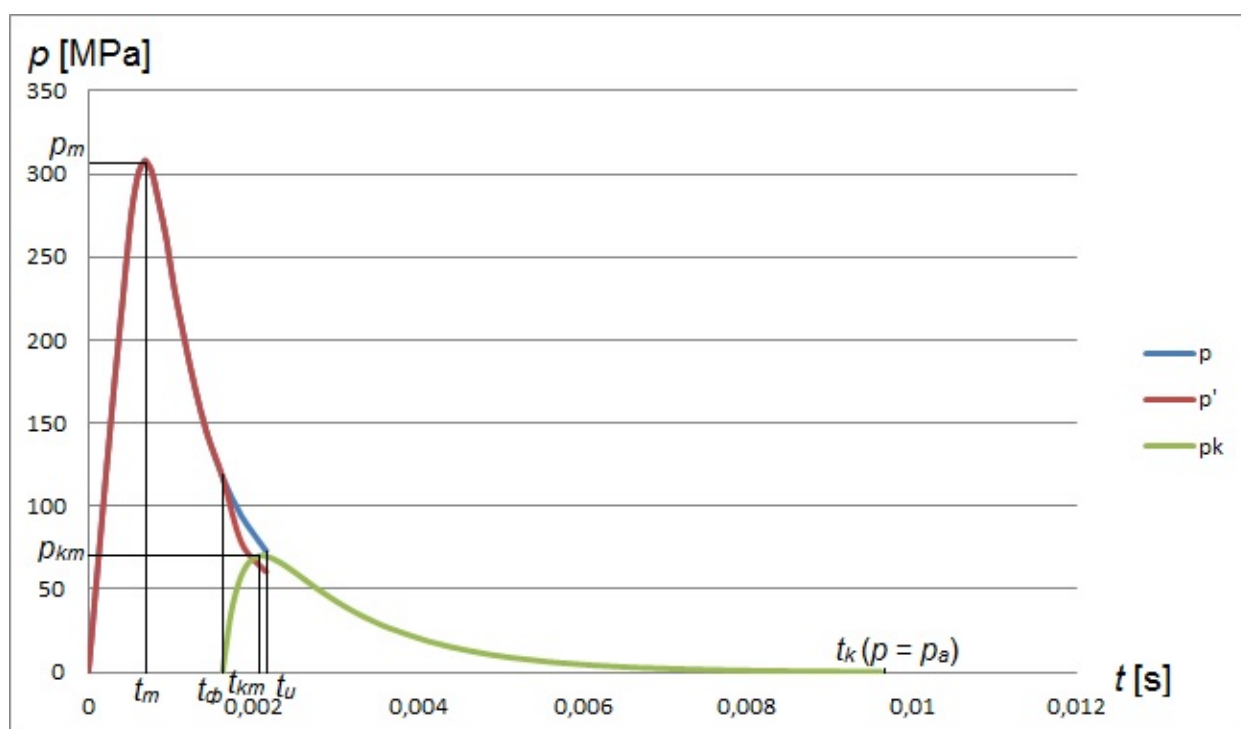
Прорачун притиска барутних гасова у комори гасног повратника дефинисан је у поглављу 2.4.1. Крива промене притиска имаће различите облике у зависности од вредности опитног коефицијента n_1 . Он се усваја на основу експерименталног мерења максималног притиска у комори повратника.

Његова вредност, пре свега, зависи од конструкције клипа у цилиндру за позајмицу, представљеног на слици 22.



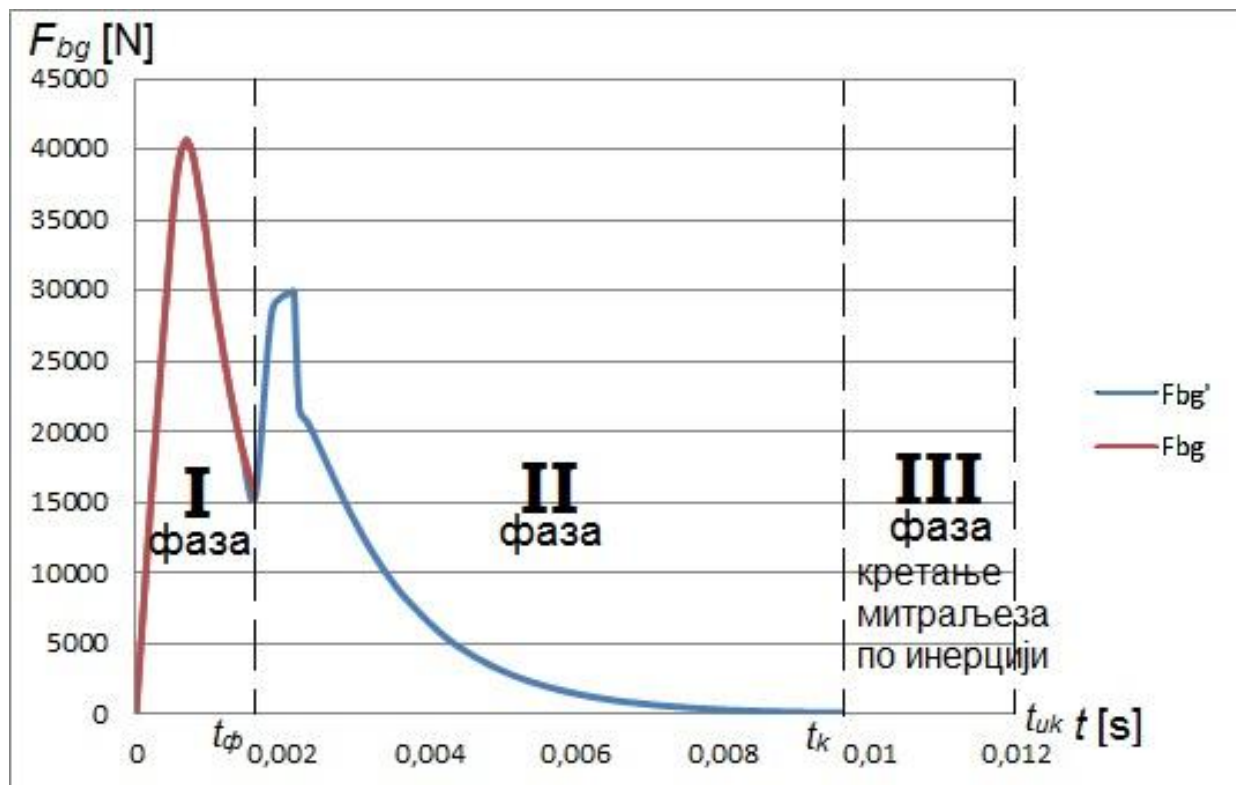
Слика 22. Клип митраљеза 12,7 mm M87 [7]

Усваја се промена притиска у комори гасног повратника за вредност опитног коефицијента $n_1 = 0,012$. На слици 23 је приказана промена притиска барутних гасова који делује на чело клипа у гасном повратнику (зелена боја). На истој слици, ради поређења интензитета, приказана је промена притиска барутних гасова за затворену цев (плава боја) и притисак на чело затварача, уз занемарење притиска у гасном повратнику, за отворену цев (црвена боја).



Слика 23. Промена притиска барутних гасова у току времена за затворену цев (p), отворену цев уз занемарење притиска у гасном повратнику (p'), и притисак у гасном повратнику p_k

На основу дијаграма са слике 23, формира се и дијаграм укупне силе притиска барутних гасова. Ови дијаграми имаће различит облик зато што се за израчунавање силе притисак који делује на чело клипа множи са површином попречног пресека цеви S_c , док се притисак у комори гасног повратника множи са активном површином клипа S_k . Добијени дијаграм представљен је на слици 24 (плавом бојом) и табеларно у прилогу 2 (Сила F_{bg}).



Слика 24. Промена силе притиска барутних гасова по фазама

3.3. Сила повратне опруге затварача

Сила повратне опруге затварача делује на затварач тако што се супроставља његовом кретању уназад. Након његовог заустављања у задњем положају, опруга помоћу акумулиране енергије враћа носач затварача у предњи положај.

Промена ове силе у зависности од пута затварача добија се на основу геометријских величина и интензитета силе у карактеристичним тачкама (слика 25). Вредности ових величина за повратну опругу затварача митраљеа 12,7 mm M87 усвојене су за опругу од жице $\varnothing 1,5$ C DIN2076 ($R_m = 2260 \div 2500 \text{ N/mm}^2$):

$$L_0 = 0,865 \text{ m}$$

$$L_1 = 0,471 \text{ m}$$

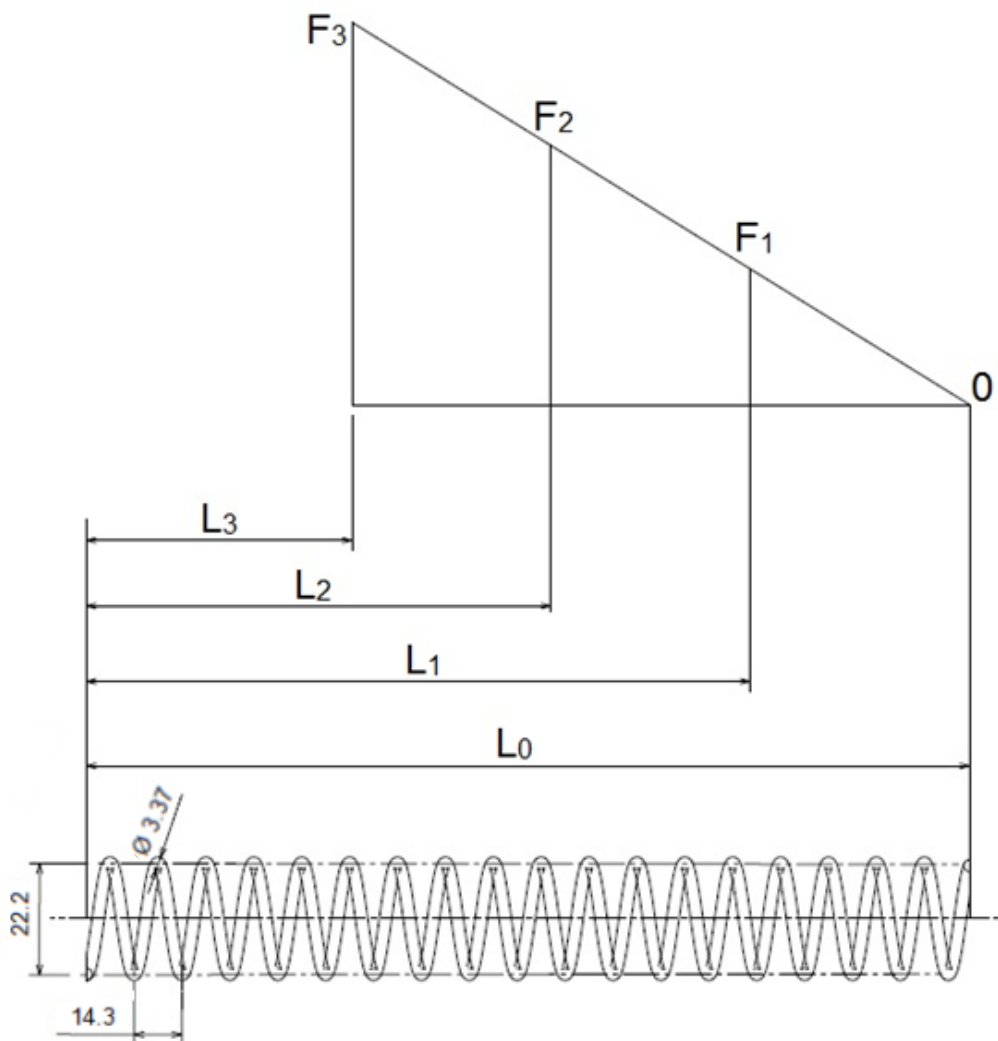
$$L_2 = 0,251 \text{ m}$$

$$L_3 = 0,216 \text{ m}$$

$$F_1 = F_0 = 157 \text{ N}$$

$$F_2 = 245 \text{ N}$$

$$F_3 = F_{max} = 258 \text{ N}$$



Слика 25. Карактеристичне величине повратне опруге митраљеза 12,7 mm M87: L_0 – слободна дужина опруге, L_1 – дужина опруге када делује преднапон F_1 , L_3 – дужина максимално сабијене опруге (када делује максимална сила F_3)

На основу разлика дужине повратне опруге затварача када делује преднапон F_1 и њене дужине када је максимално сабијена

$$x_{max} = L_1 - L_3 \quad (37)$$

$$x_{max} = 0,255 \text{ m}$$

рачуна се крутост опруге:

$$c = \frac{F_{max} - F_0}{x_{max}} \quad (38)$$

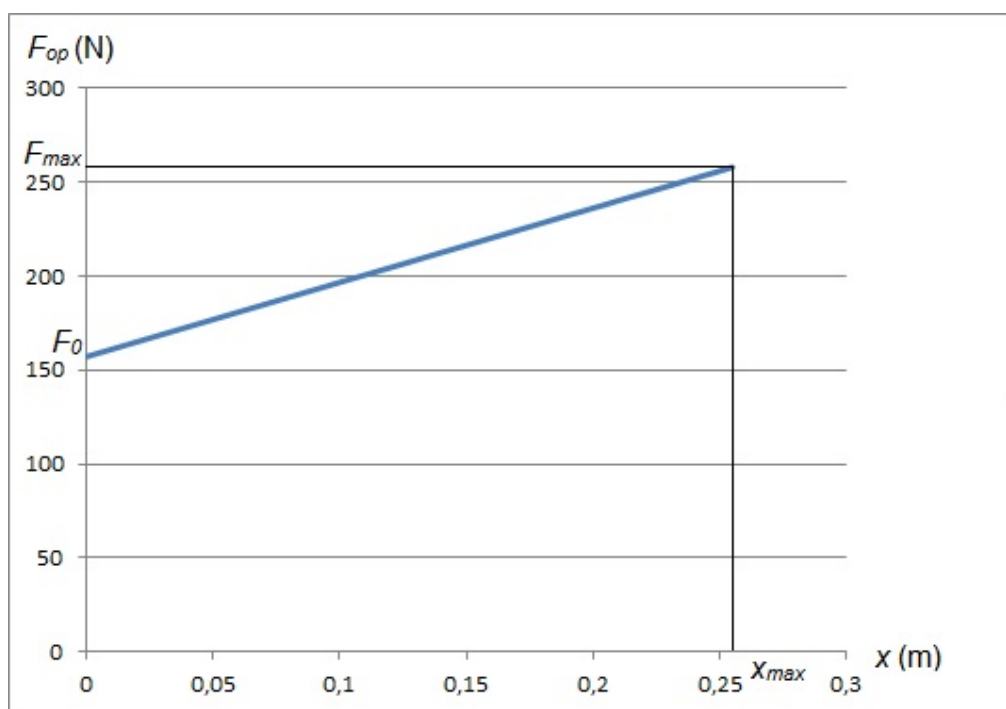
$$c = 396,08 \text{ N/m}$$

Једначина промене силе повратне опруге затварача F_{op} у зависности од пута носача затварача x_1 једнака је:

$$F_{op} = F_0 + cx_1 \quad (39)$$

$$F_{op} = 157 + 396,08 x_1$$

Промена силе повратне опруге затварача у функцији пређеног пута носача затварача дата је на слици 26.



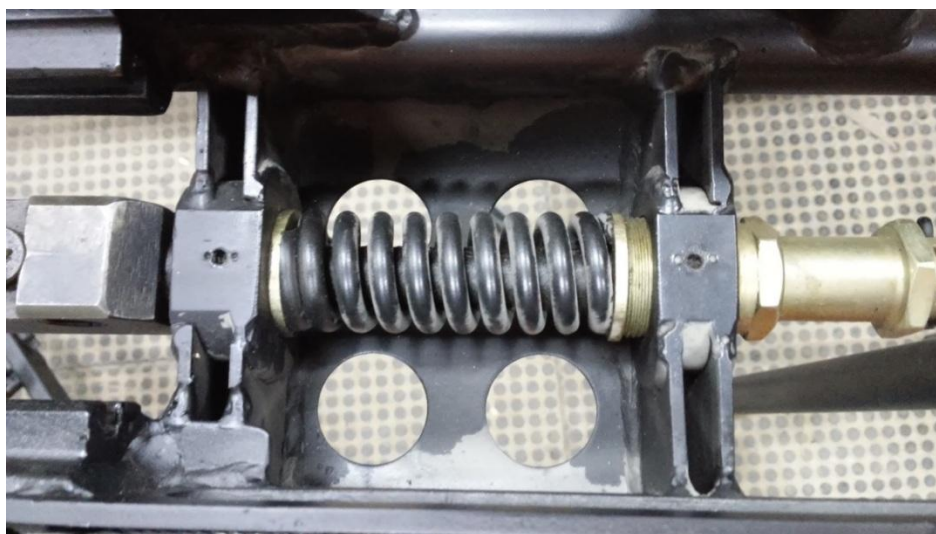
Слика 26. Дијаграм промене силе $F_{op}(x_1) = F_0 + cx_1$

Мерењем је утврђено да је пут затварача од предњег почетног положаја до крајњег задњег положаја једнак

$$x_{1u} = 0,21 \text{ m}$$

3.4. Сила опруге амортизера (buffer-a)

Помоћу амортизера остварује се еластична веза између митраљеза и колевке. Физички изглед ове опруге представљен је на слици 27.



Слика 27. Опруга амортизера митраљеза 12,7 mm M87

У току трзања митраљеза, сабија се опруга амортизера и повећава сила F_{bf} која делује насупрот трзању. Ова сила зависи од пређеног пута митраљеза x_2 и њена промена се добија аналогно сили повратне опруге затварача (према слици 25):

$$L_0 = 0,0855 \text{ m}$$

$$L_1 = 0,078 \text{ m}$$

$$L_2 = 0,064 \text{ m}$$

$$F_1 = F_0 = 760 \text{ N}$$

$$F_2 = F_{max} = 2190 \text{ N}$$

Ако се упореде повратна опруга затварача и опруга амортизера, може се приметити да се опруга амортизера сабија много мање ($x_2 \ll x_1$), али зато има много већу крутост и ствара већу силу ($F_{bf} \gg F_{op}$).

На основу разлика дужине опруге амортизера када делује преднапон F_1 и њене дужине када је максимално сабијена

$$x_{max} = L_1 - L_2$$

$$x_{max} = 0,014 \text{ m}$$

рачуна се крутост опруге:

$$c = \frac{F_{max} - F_0}{x_{max}}$$

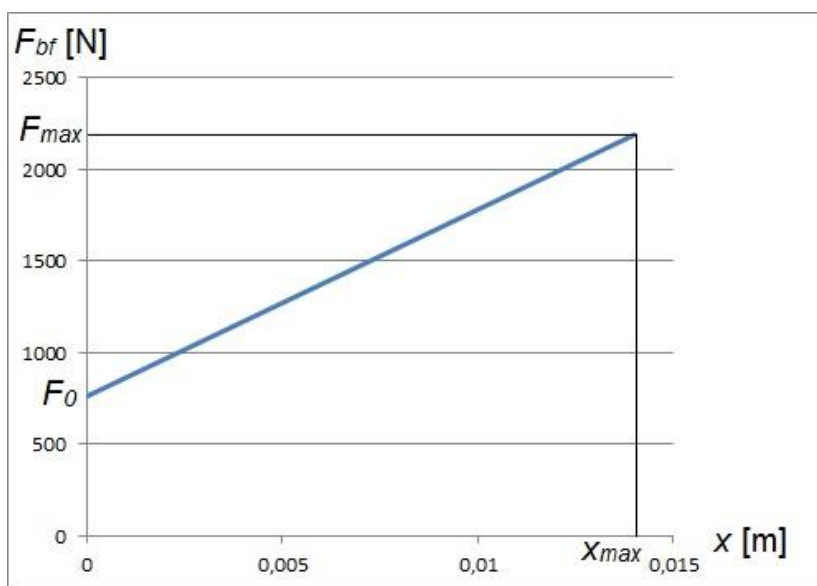
$$c = 102142,9 \text{ N/m}$$

Једначина промене силе опруге амортизера F_{bf} у зависности од пређеног пута митраљеза x_2 једнака је:

$$F_{bf} = F_0 + cx_2$$

$$F_{bf} = 760 + 102142,9 x_2$$

Промена силе опруге амортизера у функцији пређеног пута митраљеза дата је на слици 28.



Слика 28. Дијаграм промене силе $F_{bf}(x_2) = F_0 + cx_2$

3.5. Сила трења на вођицама

Митраљез 12,7 mm M87 је својим вођицама (по две са обе стране сандука митраљеза, слика 29) ослоњен на жлебове колевке и током трзања, јавља се сила трења која се супроставља овом кретању.



Слика 29. Једна од четири вођица преко којих се остварује контакт митраљеза и колевке

Сила трења узрокована је нормалном силом тј. тежином самог митраљеза:

$$Q = m \cdot g \quad (40)$$

$$Q = 243,288 \text{ N}$$

где је g убрзање земљине теже.

Сила трења, уз усвајање коефицијента трења за челик по челику са подмазивањем ($\mu = 0,1$) износи:

$$F_{tr} = \mu \cdot Q \quad (41)$$

$$F_{tr} = 24,3288 \text{ N}$$

3.6. Решавање диференцијалних једначина

Да би се решиле диференцијалне једначине (29), (30) и (31) потребно је дефинисати промене свих сила, масе m и m' , и граничне услове за интеграцију. Поменуте масе су:

$$m = 24,8 \text{ kg}$$

$$m' = 22,075 \text{ kg}$$

Гранични услови за прву фазу су:

а) Почетни услови

$$t = t_0 = 0 \text{ s}$$

$$V = V_0 = 0 \text{ m/s}$$

$$x_1 = 0 \text{ m}$$

$$x_2 = 0 \text{ m}$$

б) Крајњи услови

$$t = t_\phi = 0,00163 \text{ s}$$

$$V = V_\phi$$

$$x_1 = 0 \text{ m}$$

$$x_2 = x_{2\phi}$$

где је V_ϕ брзина а $x_{2\phi}$ пређени пут митраљеза 12,7 mm M87 у тренутку $t = t_\phi$, тј. на крају прве фазе.

Гранични услови за другу фазу су:

а) Почетни услови

$$t = t_\phi = 0,00163 \text{ s}$$

$$V = V_\phi$$

$$x_1 = 0 \text{ m}$$

$$x_2 = x_{2\phi}$$

Почетни услови за другу фазу одговарају крајњим условима прве фазе, тако да су брзина и пређени пут митраљеза на крају прве фазе, истовремено и полазни подаци за другу фазу. Исто важи и за однос друге и треће фазе.

б) Крајњи услови

$$t = t_k = 0,00963 \text{ s}$$

$$V = V_{2k}$$

$$x_1 = x_{1k} = 0,21 \text{ m}$$

$$x_2 = x_{2k}$$

Гранични услови за трећу фазу су:

а) Почетни услови

$$t = t_k = 0,00963 \text{ s}$$

$$V = V_{2k}$$

$$x_1 = x_{1k} = 0,21 \text{ m}$$

$$x_2 = x_{2k}$$

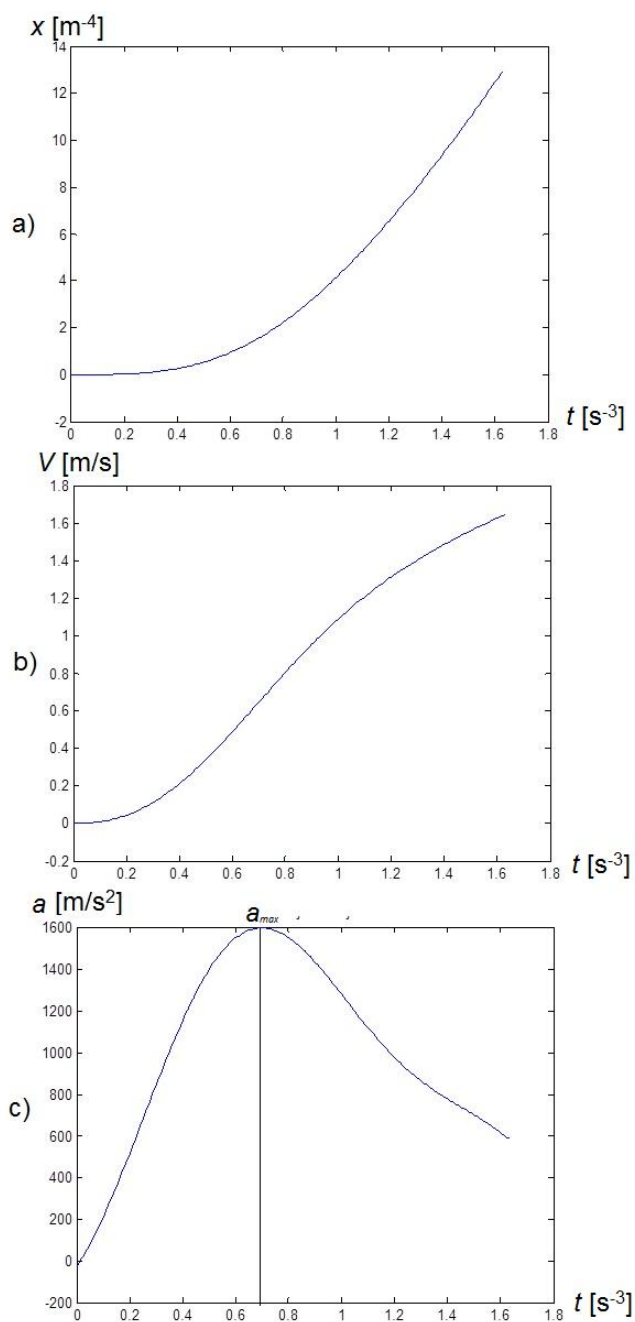
b) Крајњи услови

$$t = t_{uk}$$

$$V = 0 \text{ m/s}$$

$$X_2 = X_{2uk}$$

Прорачун је извршен у програму MATLAB. Решавањем диференцијалних једначина добијена је промена пута, брзине и убрзања митраљеза у времену. На основу максималног убрзања, који се дешава у првој фази, слика 30 с), израчунава се максимална вредност силе трзања. Битно је напоменути да се митраљез зауставља у другој фази што значи да трећа фаза у овом случају не постоји.



Слика 30. Пређени пут, брзина и убрзање митраљеза 12,7 mm M87 у току времена

$$\begin{aligned}
 a_{max} &= 1595,483 \text{ m/s}^2 \\
 (P_{kn})_{max} &= a_{max} \cdot m \\
 \mathbf{(P_{kn})_{max} = 39567,98 \text{ N}}
 \end{aligned}
 \tag{42}$$

Програмско решење у MATLAB-у дато је у прилогу 3.

4. ПРОРАЧУН ОПТЕРЕЋЕЊА И СИЛА КОЈЕ ДЕЛУЈУ НА ЛАФЕТ И ОБРТНИ ЛЕЖАЈ

Да би се израчунале силе које делују на лежај, потребно је направити модел склопа митраљеза са колевком и горњем лафетом и задати претходно израчунату силу трзања заједно са силом земљине теже.

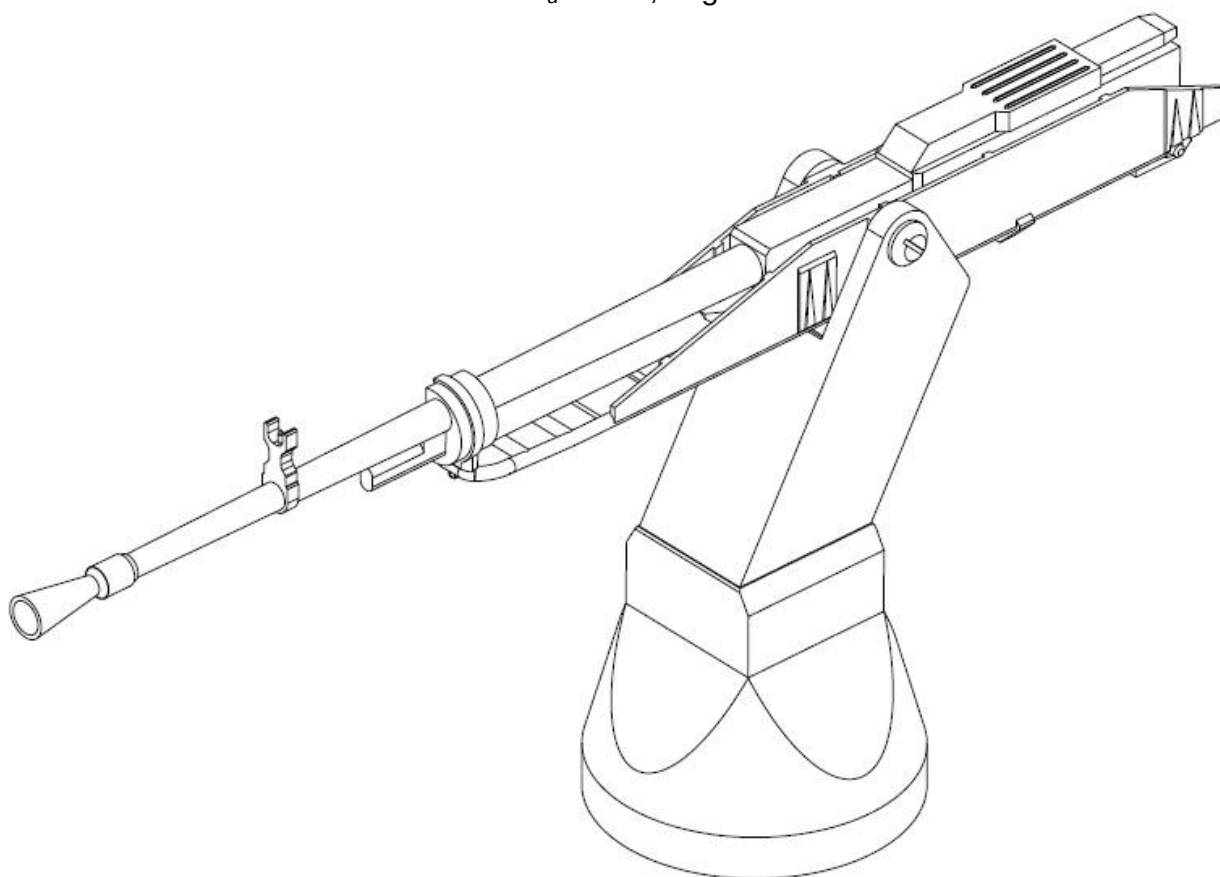
У програмском пакету CATIA V5 R21 урађен је поменути склоп на основу техничке документације из фабрике *Застава Оружје*, слика 31. На основу овог модела добијени су потребни положаји осе цеви, као и масе колевке и горњег лафета.

$$m_{\text{колевке}} = 14,9 \text{ kg}$$

$$m_{\text{г.лафета}} = 98,9 \text{ kg}$$

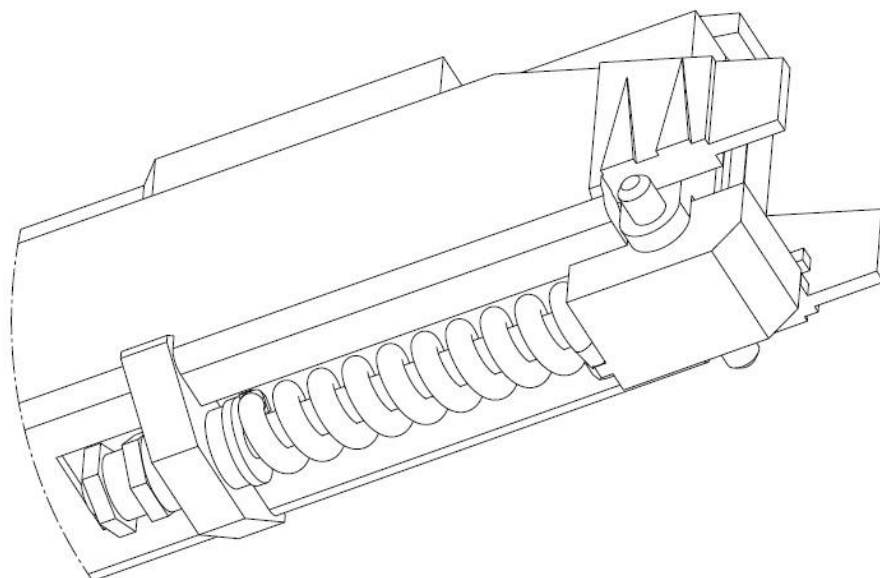
$$m_u = m + m_{\text{колевке}} + m_{\text{г.лафета}} \quad [43]$$

$$m_u = 138,5 \text{ kg}$$



Слика 31. Изометријски поглед на склоп митраљеза 12,7 mm M87 са колевком и горњим лафетом

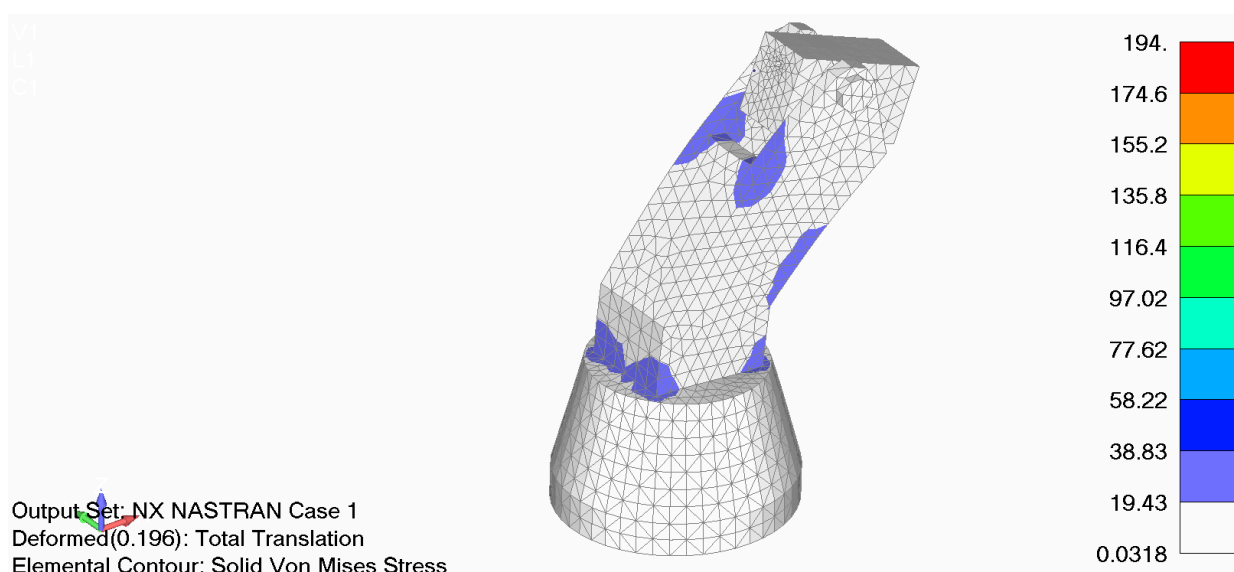
Током трзања, митраљез се креће по вођицама (слика 29), док постоји еластична веза у виду амортизера (слика 32). За симулацију дејства деловања силе трзања, коришћена је метода коначних елемената помоћу програма FEMAP. У програму је употребљен модел упрошћене геометрије (у односу на модел представљен на слици 31), како би анализа била прецизнија.



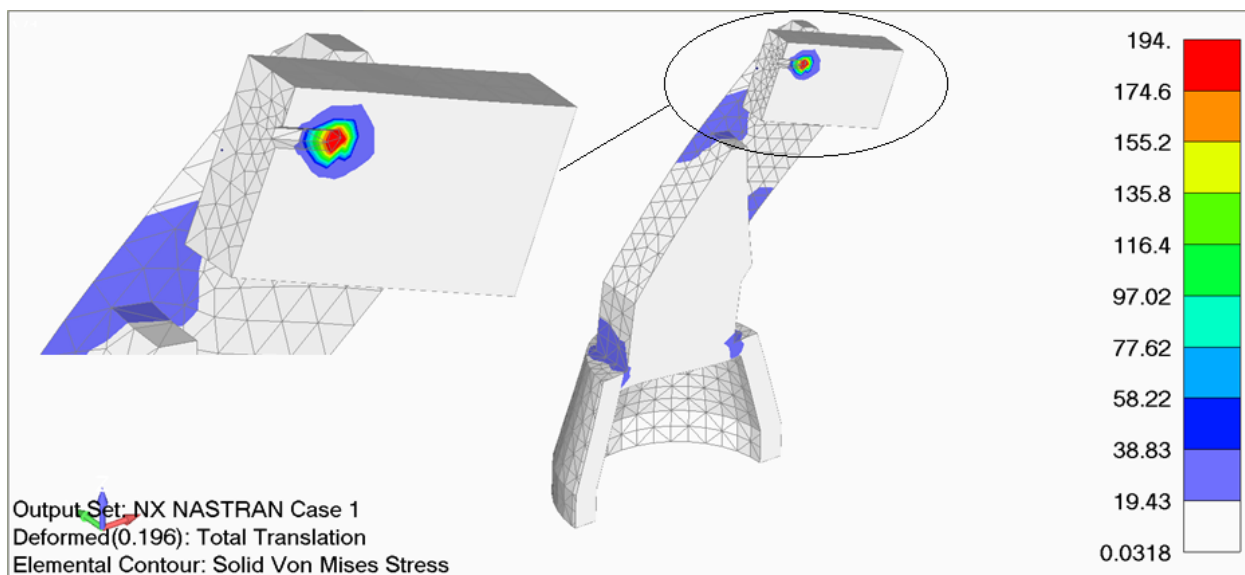
Слика 32. Амортизер који омогућава еластичну везу између митраљеза и колевке

Дејство силе земљине теже се уноси као негативно убрзање које делује на цело тело, док се дејство силе трзања уноси као дејство притиска по површини (дно цеви). Као ограничење (енг. *constraint*) узима се да је доња површина лежаја непокретна (енг. *fixed*). Захваљујући моделу упрошћене геометрије, мрежа коначних елемената се може генерисати аутоматски. Коначни елемент је облика тетраедра. Након обављене анализе, могу се очитати потребна напрезања и силе.

На слици 33 представљено је поље напрезања у МПа у изометријском погледу на склоп. Најоптерећенији делови горњег лафета представљени су светло плавом бојом и они су изложени напону од 19,43 до 38,83 МПа. Што се тиче митраљеза, највећа напрезања су заступљена у зони око дна цеви. Ово се јасно може видети на пресеку (у равни xz), слика 34. Највеће напрезање износи 194 МПа.

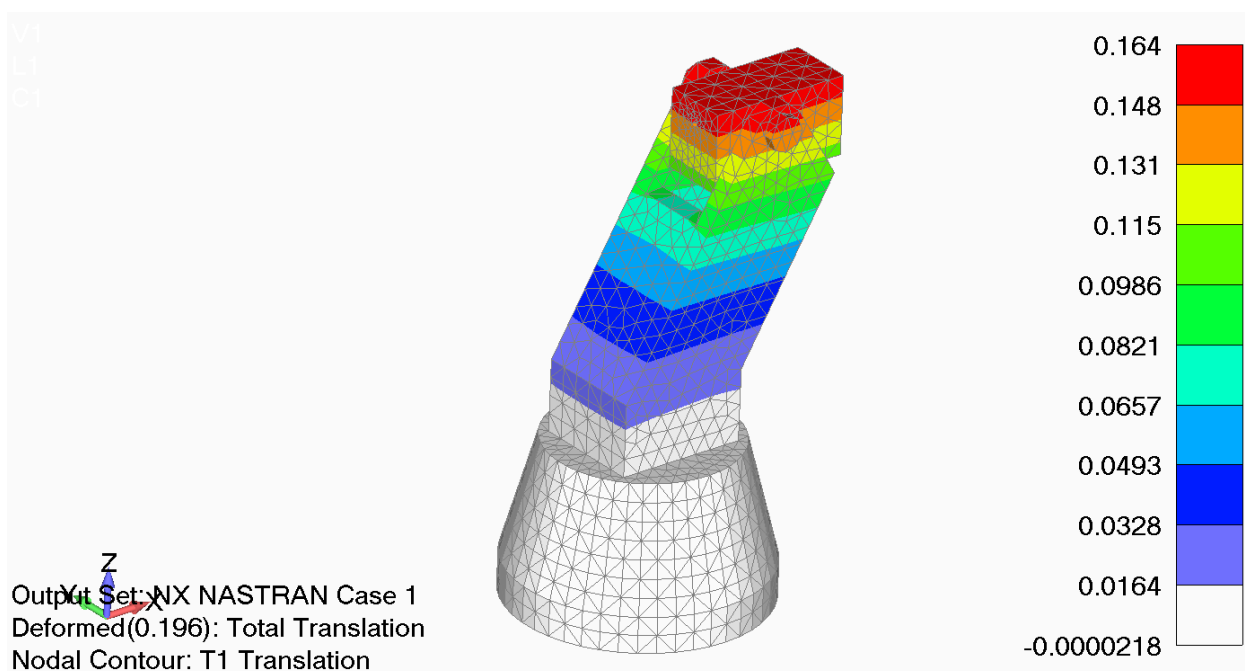


Слика 33. Поље напрезања горњег лафета (МПа)

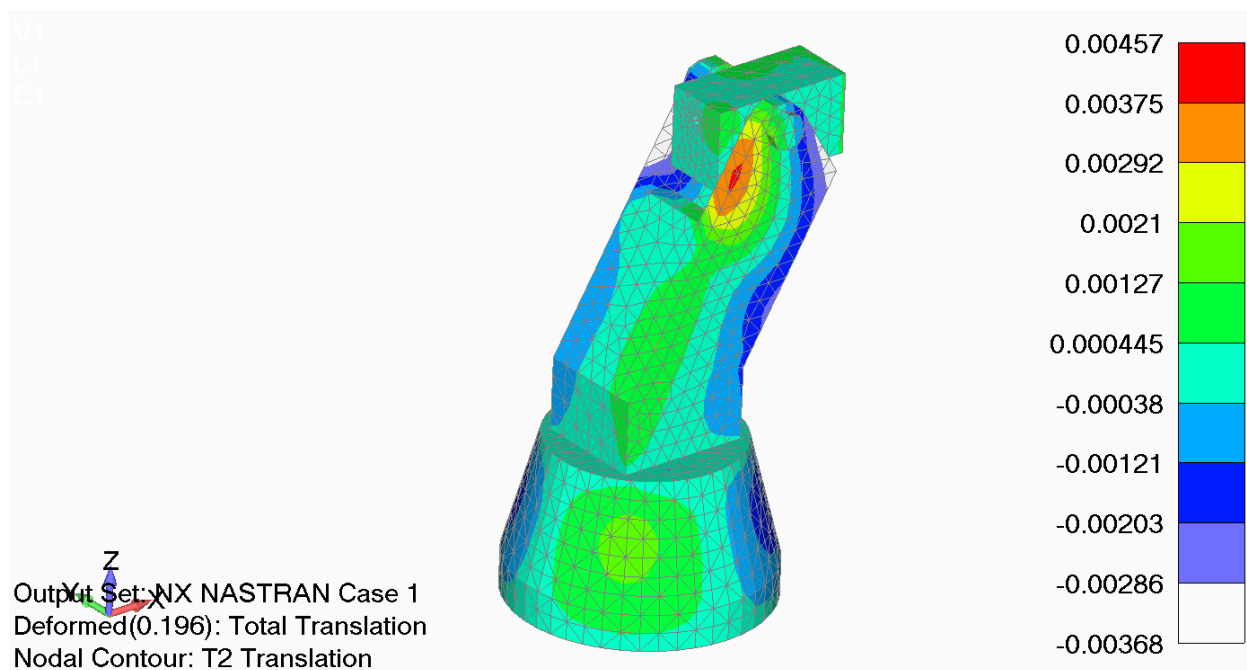


Слика 34. Поље напрезања горњег лафета, пресек у равни xz (MPa)

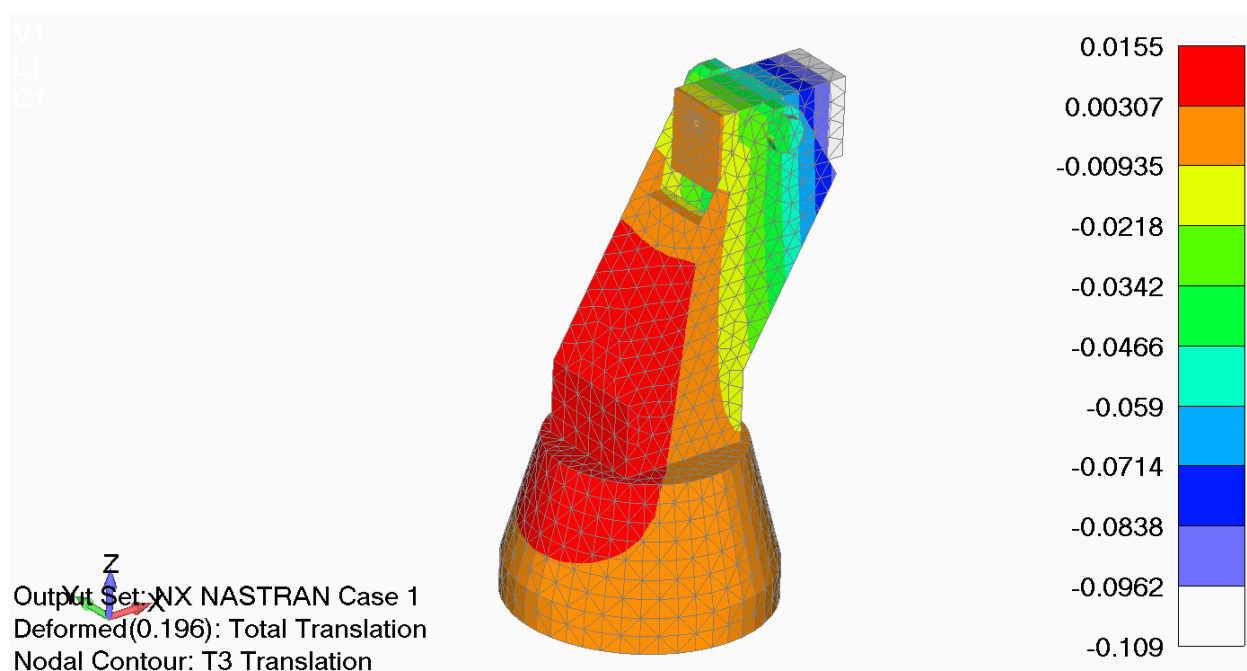
Померања по x , y и z оси представљена су на сликама 35, 36 и 37. На основу ових слика може се закључити да су далеко највећа померања по x оси, што је и логично, зато што сила трзања има исти правац као и x оса. Такође, померања по овој оси су већа у зони дејства силе трзања, а опадају са удаљавњем од ове зоне. Померања у правцу y осе су највећа у елементима рамена колевке док померања по z оси варирају од $-0,109$ mm у задњем до $0,0155$ mm у предњем делу конструкције.



Слика 35. Померања у правцу x осе (mm)



Слика 36. Померања у правцу y осе (mm)



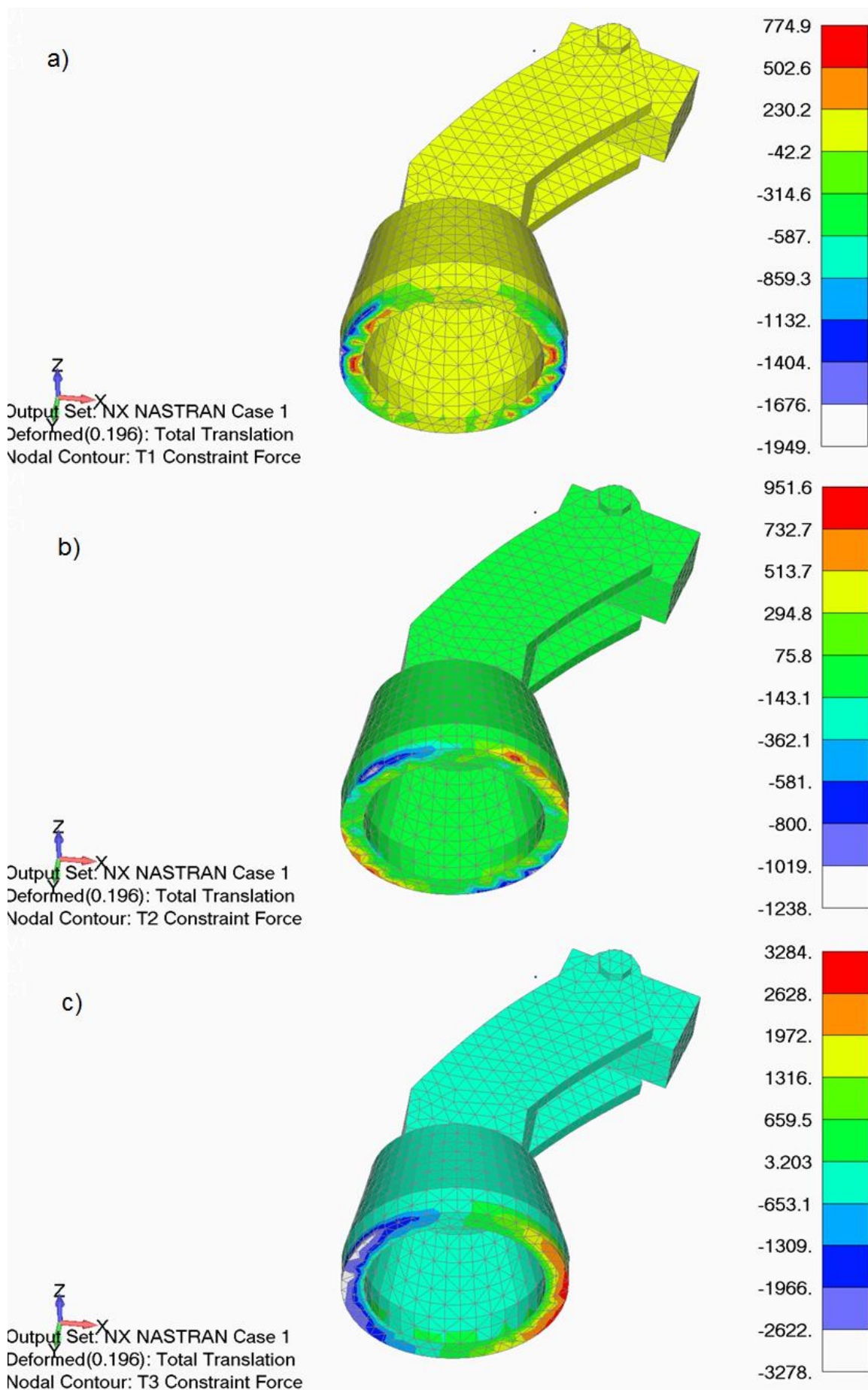
Слика 37. Померања у правцу z осе (mm)

За прорачун лежаја потребно је познавати интензитет сила које делују на лежај. Оне настају услед дејства силе трзања и силе земљине теже. На слици 38 приказана су дејства сила на лежај по x, y и z правцу. Са ових слика могу се очитати максималне вредности сила F_x , F_y , и F_z :

$$F_x = 1949 \text{ N}$$

$$F_y = 1238 \text{ N}$$

$$F_z = 3284 \text{ N}$$



Слика 38. Дејство сила на обртни лежај, а) F_x , б) F_y , в) F_z (N)

- возило се налази на хоризонталној подлози;
- распоред допунског вертикалног оптерећења на куглицу је синусни;
- хоризонталне силе распоређују се по куглицама као и код радијалних кугличних лежаја.

A schematic diagram of a crane mechanism. A coordinate system is shown with the Z -axis vertical and the X -axis horizontal. The crane consists of a base of width D , a vertical column of height h , and a horizontal boom of length b . A weight G is suspended from the column at a horizontal distance $\rho_G \cos \psi_G$ from the Z -axis. A force F_z is applied at the base of the column at a horizontal distance $\rho_z \cos \psi_z$ from the Z -axis. A force P_{kn} is applied at the end of the boom. The diagram illustrates the forces and geometry for the static analysis of the crane.

39: Вертикална реакција лежаја добија се из услова равнотеже, према слици

φ – угао елевације,
 F_R – сила отпора трзању.

[45]

Максимална вредност силе F_z добија са максималним углом елевације ($\varphi = 75^\circ$):

$$F_z = G + F_R \sin 75^\circ$$

$$(F_z)_{\max} = 3572,722 \text{ N}$$

Поларне координате вертикалне реакције одређују се из моментних једначина:

$$\Sigma M_x = 0 \Rightarrow F_z \rho_z \sin \Psi_z + G \rho_G \sin \Psi_G - F_R \cdot a \cdot \sin \varphi \quad [46]$$

$$\Sigma M_y = 0 \Rightarrow F_z \rho_z \cos \Psi_z - G \rho_G \cos \Psi_G - F_R \cdot b \cdot \sin \varphi + F_R \cdot h \cdot \cos \varphi \quad [47]$$

Геометријске величине узимају се из CAD модела:

$$b = 135,7 \text{ mm}$$

$$h = 609,2 \text{ mm}$$

$$\rho_z = 28,747 \text{ mm}$$

Пошто је $a = 0$ (оса митраљеза у равни осе ротације лежаја) и $y = 0$ (тежина у уздужној осној равни куполе) и читав склоп је симетричан у односу на раван xz , па се и тежиште налази у овој равни, угаона координата Ψ_G има вредност 0° , тако да је:

$$\rho_z = \frac{G \rho_G \cos \Psi_G + F_R b \sin \varphi - F_R h \cos \varphi}{G + F_R \sin \varphi} \quad [48]$$

За најнеповољнији случај моментног оптерећења лежаја, када је угао елевације 0° , према слици 39, тада је:

$$\rho_z = -998,99 \text{ mm}$$

Ако је $|\rho_z| > \frac{D}{2}$, то значи да оптерећење настоји да преврне склоп и да мора да делује заштита од превртања. За конкретан случај ($D = 415 \text{ mm}$) је:

$$998,99 \text{ mm} > 207,5 \text{ mm}$$

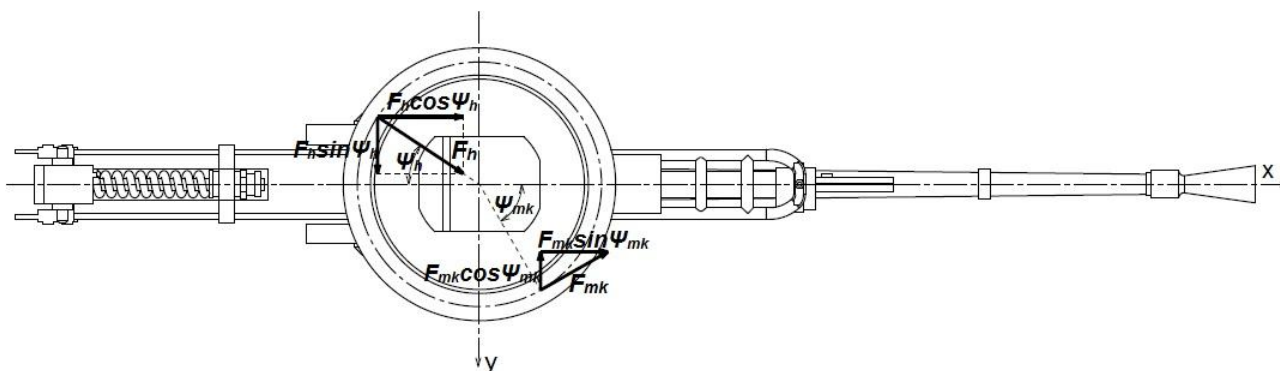
што значи да је ова конструкција није стабилна у смислу превртања, и потребно је користити заштиту од превртања.

Координате резултантне хоризонталне реакције F_h су у општем случају ($D/2$, Ψ_h), а координате реакције механизма за окретање куполе F_{mk} су конструкцијски одређене ($a = D/2$, $\Psi_{mk} = 45^\circ$). Непознате величине (F_h , F_{mk} и Ψ_h) се одређују из услова равнотеже:

$$\Sigma F_x = 0 \Rightarrow F_{mk} \sin \Psi_{mk} + F_h \cos \Psi_h - F_R \cos \varphi = 0 \quad [49]$$

$$\Sigma F_y = 0 \Rightarrow F_h \sin \Psi_h - F_{mk} \cos \Psi_{mk} = 0 \quad [50]$$

$$\Sigma M_z = 0 \Rightarrow F_R \cdot a \cdot \cos \varphi - F_{mk} \frac{D}{2} \quad [51]$$



Слика 40. Дејство сила на склоп у равни ху: F_h – хоризонтална реакција лежаја, F_{mk} – реакција механизма за окретање, Ψ_h - угаона координата хоризонталне реакције, Ψ_{mk} –угаона координата реакције механизма за окретање

$$F_{mk} = \frac{2F_R a \cos\varphi}{D} \quad [52]$$

Величина a представља померање осе митраљеза од геометријског средишта. Како се оса митраљеза налази у хz равни, a има вредност 0 mm, па према једначини 52, не постоји реакција механизма за окретање.

Хоризонтална реакција F_h , као и Ψ_h такође, добијају се из услова равнотеже:

$$F_h = F_R \cos\varphi \sqrt{1 - \frac{4a}{d} \sin\Psi_{mk} + \frac{4a^2}{D^2}} \quad [53]$$

$$F_h = 2292,14 \text{ N}$$

$$\operatorname{tg}\Psi_h = \frac{2a \cos\Psi_{mk}}{D(1 - \frac{2a}{d} \sin\Psi_{mk})} \quad [54]$$

$$\Psi_h = 0^\circ$$

Оптерећење котрљајне стазе једнако је суми оптерећења која су последица вертикалне реакције F_z и момента $M_0 = F_z \rho_z$. Специфично оптерећење на јединицу дужине котрљајне стазе које је резултат деловања силе F_z је:

$$\rho = \frac{F_z}{D\pi} \quad [55]$$

$$\rho = 2740,32 \text{ N/m}$$

Максимално специфично линијско оптерећење котрљајне стазе које је последица деловања резултујућег момента M_0 је:

$$\rho_m = \frac{4F_z \rho_z}{D^2 \pi} \quad [56]$$

$$\rho_m = 26386,08 \text{ N/m}$$

Резултујући момент је:

$$M_0 = \rho_m \frac{D^2 \pi}{4} \quad [57]$$

$$M_0 = 3569,12 \text{ Nm}$$

Да би се одредило максимално вертикално оптерећење куглице неопходно је ово оптерећење поделити на део котрљајне стазе који отпада на једну куглицу ($d\pi/z$), тако да се добија:

$$F_{kzm} = \rho_m \frac{D\pi}{z} = \frac{4F_z \rho_z}{Dz} \quad [58]$$

где је број z куглица лежаја.

$$F_{kzm} = 1146,7 \text{ N}$$

Максимално вертикално оптерећење куглице F_{kzmax} једнако је суми оптерећења које је последица деловања силе F_k , и оптерећења које је последица деловања момента M_0 :

$$F_{kzmax} = \frac{F_z}{z} + \frac{4F_z \rho_z}{Dz} = \frac{F_z}{z} \left(1 + \frac{4\rho_z}{D}\right) \quad [59]$$

$$F_{kzmax} = 1265,79 \text{ N}$$

Насупрот овоме, минимално вертикално оптерећење куглице једнако је разлици ова два оптерећења:

$$F_{kzmin} = \frac{F_z}{z} - \frac{4F_z \rho_z}{Dz} = \frac{F_z}{z} \left(1 - \frac{4\rho_z}{D}\right) \quad [60]$$

$$F_{kzmin} = -1027,61 \text{ N}$$

Максимална хоризонтална сила која делује на куглице котрљајног лежаја ослонца куполе за случај раванског деловања силе тежине куполе и силе трзања оптерећује:

- предњу куглицу за случај покретног обухватног прстена, односно
- задњу куглицу за случај непокретног обухватног прстена.

У општем случају просторног деловања сила F_R и G_k максимално је оптерећена куглица која се налази на правцу деловања хорзонталне реакције F_h , у предњем делу куполе за случај покретног обухватног прстена, односно у задњем делу куполе за случај непокретног обухватног прстена. Експериментално је утврђено да је:

$$F_{khmax} = 5 \frac{F_h}{z} \quad [61]$$

$$F_{khmax} = 382,02 \text{ N}$$

Дејство прорачунатих сила и оптерећења приказано је на слици 41. Максимално оптерећење куглице је:

$$F_{kmax} = \sqrt{F_{kzmax}^2 + F_{khmax}^2} \quad [62]$$

$$F_{k \max} = 1322,18 \text{ N}$$

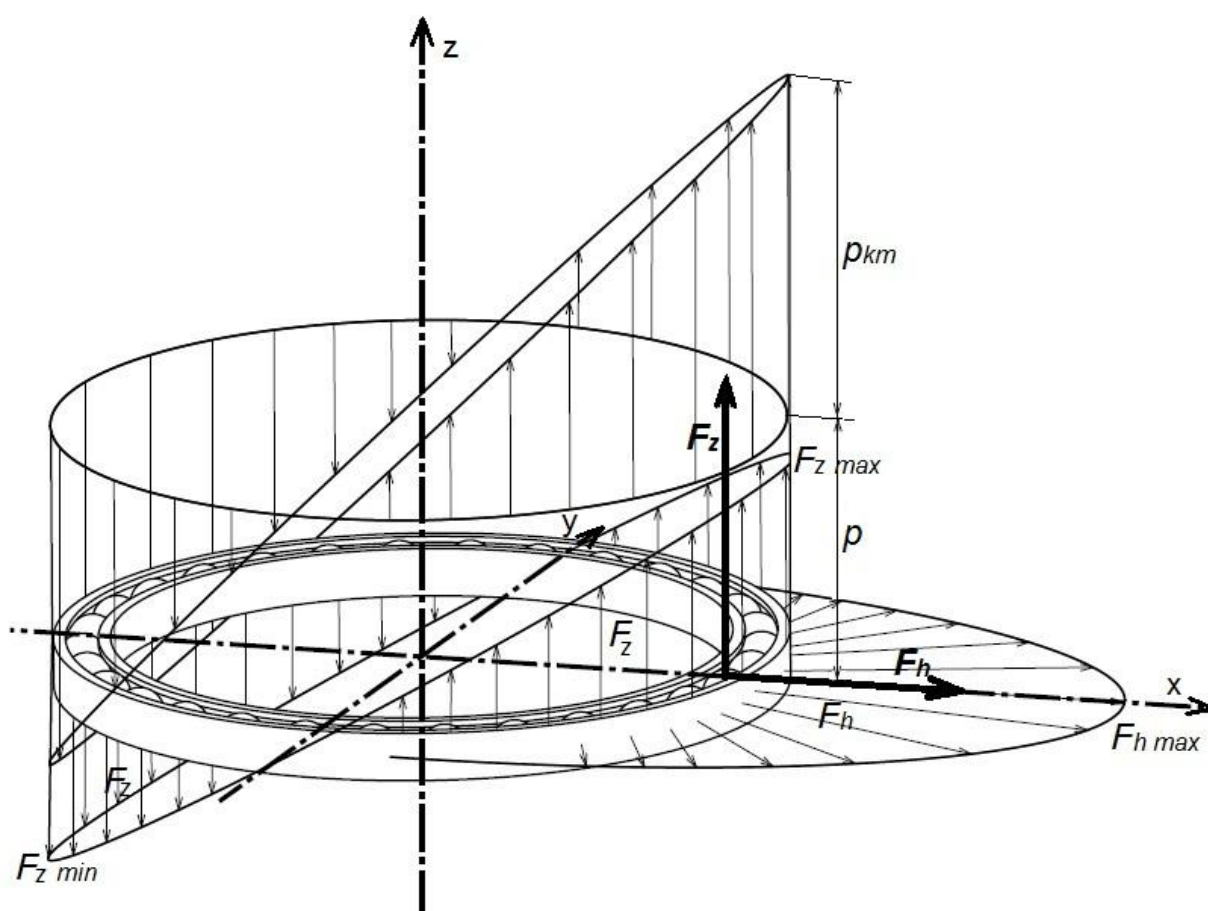
Контактни напон на површински притисак (дробљење) најоптерећеније куглице израчунава се према:

$$\sigma_k = 0,388 \sqrt[3]{\frac{F_{k \max} E_{ekv}^2}{r_{ekv}^2}} \quad [63]$$

где су

$E_{ekv} = \frac{2E_1 E_2}{E_1 + E_2}$ – еквивалентни модул еластичности (E_1 – модул еластичности материјала куглице, E_2 – модул еластичности материјала стазе),

$r_{ekv} = \frac{r_s r_k}{r_s + r_k}$ – еквивалентни полупречник кривине (r_s , r_k – полупречник кривине стазе и куглице)



Слика 41. 3D дијаграм сила и оптерећења који делују на лежај

Ако се усвоји да су куглица и стаза од истог материјала, онда је:

$$E_1 = E_2 = E_{ekv} = 210 \cdot 10^9 \text{ Pa}$$

Код изведених конструкција је $r_s = (1.01 - 1.2)r_k$.

$$r_k = 0,015 \text{ m}$$

$$r_s = 1,105 \cdot r_k$$

$$r_s = 0,016575 \text{ m}$$

$$r_{ekv} = 0,158 \text{ m}$$

Коначно, контактни напон на површински притисак σ_k износи:

$$\sigma_k = 514,8 \text{ MPa}$$

ЗАКЉУЧАК

У раду је извршен прорачун силе трзања митраљеза 12,7 mm M87, разматран утицај унутрашње балистичких параметара на њу, као и њено дејство на склоп митраљеза, колевке и лафета. На основу конструктивних параметара самог митраљеза, пројектован је горњи лафет, заједно са колевком и обртним лежајем, на тај начин, да митраљез може постићи максимални угао елевације од 75° , како би могао гађати циљеве у ваздуху, и максимални угао депресије од -5° . Моделирање је извршено у програмском пакету CATIA V5R21. Да би се дошло до оптималног решења, потребно је да сила трзања буде што мања, и да маса лафета такође буде што мања (да се избегне предимензионисање), али не мања од дозвољене.

Сила притиска барутних гасова на чело затварача је сила која изазива трзање митраљеза. Аутоматика митраљеза функционише на принципу позајмице барутних гасова, па се мора узети у обзир и сила притиска барутних гасова на чело клипа у цилиндру за позајмицу, али она је знатно мањег интензитета. Све остале силе које се јављају, су силе које спречавају трзање и имају супротан смер. Сила притиска барутних гасова је директно сразмерна притиску барутних гасова у цеви, па се са смањењем притиска барутних гасова у цеви, смањује и укупна сила трзања митраљеза за време опаљења.

Унутрашње балистичким прорачуном добијен је максимални притисак у цеви митраљеза 12,7 mm M87 од $p_m = 328,98$ МПа. Након овог прорачуна, испитан је утицај појединих унутрашње балистичких параметара на силу трзања митраљеза. Циљ је што више смањити притисак барутних гасова у цеви, а самим тим и силу трзања, али уз што мање смањење карактеристика које утичу на ефикасност оружја. Ова два захтева су контрадикторна, зато што се смањивањем притиска барутних гасова у цеви, смањује и брзина пројектила на устима цеви, тако да се тражи одређени компромис тј. оптимално решење које ће имати што мању силу трзања, уз најмање могуће нарушавање излазних величина као што је почетна брзина пројектила. Од укупно 15 параметара који се уносе у улазну датотеку за унутрашње балистички прорачун варијани су коволумен барутних гасова α , специфичан рад барутних гасова f_b , јединична брзина сагоревања барута u_{zo} и укупни пут пројектила у цеви x_u . Варијани су један по један параметар док су остали параметри задржавали основну вредност. На тај начин дошло се до оптималног решења. Параметри су варијани тако да је избегнут случај непотпуног сагоревања барута. Варирањем ових параметра у дијапазону од $\pm 5\%$ и одабиром оптималних вредности истих, смањен је максимални притисак у цеви на $p_m = 308,25$ МПа, што представља смањење од 6,3 %. Ово смањење притиска ће узроковати смањење силе притиска барутних гасова на чело затварача а самим тим и смањење силе трзања.

На основу оптималног притиска барутних гасова у цеви и конструктивних параметара саме цеви, прорачуната је сила барутних гасова за затворену цев. Међутим, потребно је размотрити и утицај силе притиска барутних гасова на чело клипа у цилиндру за позајмицу. Доказано је да се смањењем опитног коефицијента може и до неколико пута смањити укупан импулс силе притиска барутних гасова на чело клипа у цилиндру за позајмицу, чиме се утиче и на смањење силе трзања. Израчунато је да након што дно пројектила пређе преко места за позајмицу, услед наглог проширења запремине, долази до пада притиска барутних гасова у цеви од 17,1%.

Цео процес трзања подељен је у три фазе. Уврштавањем сила притиска барутних гасова на чело затварача и клипа у цилиндру за позајмицу, заједно са силом трења, повратне опруге затварача и силом опруге амортизера (buffer-a) у систем диференцијалних једначина, и дефинисањем граничних услова за све три фазе, израчунато је максимално убрзање митраљеза. Множењем ове вредности са масом митраљеза добијена је максимална вредност силе трзања од $(P_{kn})_{max} = 39567,98 \text{ N}$. Прорачун је вршен помоћу програма MATLAB.

Са овом вредности силе трзања, извршен је прорачун оптерећења и сила које делују на обртни лежај. Прорачун је вршен на два начина. Први је методом коначних елемената помоћу програма FEMAP. Коначни елемент је облика тетраедра. Најоптерећенији делови горњег лафета су изложени напону од 19,43 до 38,83 МПа. Највећа померања су у правцу x осе. Такође, померања по овој осе су већа у зони дејства силе трзања, а опадају са удаљавњем од ове зоне. Померања у правцу y осе су највећа у елементима рамена колевке. Максимална вредност вертикалне компоненте силе отпора лежаја добијена овом методом је $F_z = 3284 \text{ N}$, док су вредности сила у правцу x и y осе $F_x = 1949 \text{ N}$ и $F_y = 1238 \text{ N}$. Ове две силе дају хоризонталну компоненту $F_h = \sqrt{F_x^2 + F_y^2} = 2308,95 \text{ N}$.

Друга метода базира се на израчунавању компонената отпора лежаја из услова равнотеже. Максимална вредност вертикалне компоненте силе отпора лежаја добијена другом методом је $F_z = 3572,72 \text{ N}$, док је вредност хоризонталне компоненте $F_h = 2292,14 \text{ N}$. Ако се упореде вредности сила отпора обртног лежаја добијених помоћу ове две методе, може се видети да су оне веома сличне $[(F_z)_1 = 91,92\% (F_z)_2, (F_h)_1 = 100,73\% (F_h)_2]$.

Литература

- [1] Др Зоран Ристић: *Конструкција артиљеријског наоружања*, књига у рукопису.
- [2] <http://www.zastava-arms.rs/sr/militaryproduct/mitraljez-m87-127x108-mm-50-browning>
- [3] Др Милоје Цветковић: *Унутрашња балистика*, Београд, 1998. год.
- [4] Др Љубиша Танчић: *Унутрашње балистичко пројектовање*, Београд 2014. год.
- [5] Др Зоран Ристић: *Конструкција аутоматског наоружања*, скрипта Бг. – Кг. 2014. год.
- [6] Др Маринко Петровић: *Механика аутоматског оружја*, Београд, 2007. год.
- [7] Ф. К. Бабак: *Пулеметы*, Санкт-Петербург, 2005. год.
- [8] Др Александар Кари: *Проблеми куполне уградње оруђа*, презентација Бг. – Кг. 2015. год.

Прилози

Прилог 1 – Сила F_{bg}

t (s)	Fbg (N)
0	0
0,00027	19806,19238
0,00042	29851,99008
0,00052	36313,79136
0,00061	39727,72954
0,00069	40688,46566
0,00069	40687,12243
0,00077	39767,43091
0,00085	37490,8512
0,00095	34309,65331
0,00104	30600,07949
0,00116	26663,69165
0,00129	22732,41062
0,00144	18976,36858
0,00163	15512,46682

Прилог 2 – Сила F_{bg}'

t	Fbg'
0.00163	0
0.00186	28647.44504
0.00215	29974.424
0.00216	29929.19658
0.00223	21577.47815
0.00233	20767.73699
0.00243	19748.91931
0.00253	18632.73319
0.00263	17487.86473
0.00273	16355.73728
0.00283	15260.55252
0.00293	14215.68434
0.00303	13227.74677
0.00313	12299.17862
0.00323	11429.88266
0.00333	10618.26221
0.00343	9861.874081
0.00353	9157.837131
0.00363	8503.085686
0.00413	5863.423457
0.00463	4041.603083
0.00513	2785.669839
0.00563	1920.001519
0.00613	1323.344392
0.00663	912.1034428
0.00713	628.6592267
0.00763	433.2978068
0.00813	298.6466773
0.00863	205.8395784
0.00913	141.8731071
0.00963	97.78478301

Прилог 3 – MATLAB фајлови

За прву фазу:

```
x=load('Fbg.txt');
vreme=x(:,1);
y=x(:,2);

t=0:0.00001:vreme(end);
a0=1.825e4;
a1=-1.224e4;
a2=-5939;
b1=1.516e4;
b2=1700;
w=2587;
c1=760;
c2=102142.9;
c3=24.3288;
c4=a0-c1-c3;
m=24.8;
w1=sqrt(c2/m);
x2=1/m*(c4/(w1^2)*(1-cos(w1*t))+a1/(w^2-w1^2)*(cos(w1*t)-cos(w*t))+b1/(w^2-
w1^2)*(w/w1*sin(w1*t)-sin(w*t))+a2/(4*w^2-w1^2)*(cos(w1*t)-
cos(2*w*t))+b2/(4*w^2-w1^2)*(2*w/w1*sin(w1*t)-sin(2*w*t)));
figure()
plot(t,x2)
title('put mitraljeza');
x2_prim=1/m*(c4/w1*sin(w1*t)+a1/(w^2-w1^2)*(w*sin(w*t)-w1*sin(w1*t))+b1/(w^2-
w1^2)*(w*cos(w1*t)-w*cos(w*t))+a2/(4*w^2-w1^2)*(2*w*sin(2*w*t)-
w1*sin(w1*t))+b2/(4*w^2-w1^2)*(2*w*cos(w1*t)-2*w*cos(2*w*t)));
figure()
plot(t,x2_prim)
title('brzina mitraljeza');
x2_sekundum=1/m*(c4*cos(w1*t)+a1/(w^2-w1^2)*(w^2*cos(w*t)-
w1^2*cos(w1*t))+b1/(w^2-w1^2)*(w^2*sin(w*t)-w*w1*sin(w1*t))+a2/(4*w^2-
w1^2)*(4*w^2*cos(2*w*t)-w1^2*cos(w1*t))+b2/(4*w^2-w1^2)*(4*w^2*sin(2*w*t)-
2*w*w1*sin(w1*t)));
figure()
plot(t,x2_sekundum)
title('ubrzanje mitraljeza');
```

За другу фазу:

```
x=load('Fbg_prim.txt');
vreme=x(:,1);
y=x(:,2);
m=22.075;
c1=760;
c2=102142.9;
c3=24.3288;
c4=157;
c5=396.08;
x1k=0.21;
tk=vreme(end);
tf=vreme(1);
c6=x1k/(tk-tf);
vremel=x(:,1)-vreme(1);
a0=-1.196e11;
a1=1.73e11;
a2=-5.711e10;
a3=-8.663e8;
a4=5.488e9;
a5=-9.824e8;
```

```

b1=1.014e11;
b2=-1.019e11;
b3=4.522e10;
b4=-8.967e9;
b5=5.258e8;
w=127.1;
w1=sqrt(c2/m);
c7=0.001296954;
c8=1.643626713;
c9=a0-c1-c3-c4;
c10=c5*c6;
c11=m*c7;
c12=m*c8;
t=vremel(1):0.00001:vremel(end);
x2=1/m*(c9/(w1^2)*(1-cos(w1*t))+a1/(w^2-w1^2)*(cos(w1*t)-cos(w*t))+b1/(w^2-
w1^2)*(w/w1*sin(w1*t)-sin(w*t))+a2/(4*w^2-w1^2)*(cos(w1*t)-
cos(2*w*t))+b2/(4*w^2-w1^2)*(2*w/w1*sin(w1*t)-sin(2*w*t))+a3/(9*w^2-
w1^2)*(cos(w1*t)-cos(3*w*t))+b3/(9*w^2-w1^2)*(3*w/w1*sin(w1*t)-
sin(3*w*t))+a4/(16*w^2-w1^2)*(cos(w1*t)-cos(4*w*t))+b4/(16*w^2-
w1^2)*(4*w/w1*sin(w1*t)-sin(4*w*t))+a5/(25*w^2-w1^2)*(cos(w1*t)-
cos(5*w*t))+b5/(25*w^2-w1^2)*(5*w/w1*sin(w1*t)-
sin(5*w*t))+c11*cos(w1*t)+c12/w1*sin(w1*t)-
c10*t/(w1^2)+c10*sin(w1*t)/(w1^3));
figure(1)
plot(t+vreme(1),x2,'r')
x2_prim=1/m*(c9/w1*sin(w1*t)+a1/(w^2-w1^2)*(w*sin(w*t)-w1*sin(w1*t))+b1/(w^2-
w1^2)*(w*cos(w1*t)-w*cos(w*t))+a2/(4*w^2-w1^2)*(2*w*sin(2*w*t)-
w1*sin(w1*t))+b2/(4*w^2-w1^2)*(2*w*cos(w1*t)-2*w*cos(2*w*t))+a3/(9*w^2-
w1^2)*(3*w*sin(3*w*t)-w1*sin(w1*t))+b3/(9*w^2-w1^2)*(3*w*cos(w1*t)-
3*w*cos(3*w*t))+a4/(16*w^2-w1^2)*(4*w*sin(4*w*t)-w1*sin(w1*t))+b4/(16*w^2-
w1^2)*(4*w*cos(w1*t)-4*w*cos(4*w*t))+a5/(25*w^2-w1^2)*(5*w*sin(5*w*t)-
w1*sin(w1*t))+b5/(25*w^2-w1^2)*(5*w*cos(w1*t)-5*w*cos(5*w*t))-
c11*w1*sin(w1*t)+c12*cos(w1*t)-c10/(w1^2)+c10/(w1^2)*cos(w1*t));
figure(2)
hold on
plot(t+vreme(1),x2_prim,'r')
title('brzina mitraljeza');
x2_sekundum=1/m*(c9*cos(w1*t)+a1/(w^2-w1^2)*(w^2*cos(w*t)-
w1^2*cos(w1*t))+b1/(w^2-w1^2)*(w^2*sin(w*t)-w*w1*sin(w1*t))+a2/(4*w^2-
w1^2)*(4*w^2*cos(2*w*t)-w1^2*cos(w1*t))+b2/(4*w^2-w1^2)*(4*w^2*sin(2*w*t)-
2*w*w1*sin(w1*t))+a3/(9*w^2-w1^2)*(9*w^2*cos(3*w*t)-
w1^2*cos(w1*t))+b3/(9*w^2-w1^2)*(9*w^2*sin(3*w*t)-
3*w*w1*sin(w1*t))+a4/(16*w^2-w1^2)*(16*w^2*cos(4*w*t)-
w1^2*cos(w1*t))+b4/(16*w^2-w1^2)*(16*w^2*sin(4*w*t)-
4*w*w1*sin(w1*t))+a5/(25*w^2-w1^2)*(25*w^2*cos(5*w*t)-
w1^2*cos(w1*t))+b5/(25*w^2-w1^2)*(25*w^2*sin(5*w*t)-5*w*w1*sin(w1*t))-
c11*w1^2*cos(w1*t)-c12*w1*sin(w1*t)-c10/w1*sin(w1*t));
figure(3)
hold on
plot(t+vreme(1),x2_sekundum,'r')
title('ubrzanje mitraljeza');

```