

ANALIZA TAČNOSTI MERENJA BITNIH PARAMETARA U FAZI PROJEKTOVANJA SLOŽENIH SISTEMA

Ljubiša Tančić

Vojna akademija

Pavla Jurišića Šturma 33, Beograd

ljubisa.tancic@va.mod.gov.rs

Dušan Regodić

Univerzitet Singidunum

Danijelova 29, Beograd

dregodic@singidunum.ac.rs

Sažetak: Razmatra se problem procesa opaljenja u cevi oružja. Daje se metoda eksperimentalnog određivanja pritiska barutnih gasova i brzine projektila. Analizira se i diskutuje tačnost rezultata merenja, daju se korisni zaključci i smernice za dalji rad na problemu.

Ključne reči: analiza tačnosti merenja, parametri unutrašnje balistike, pritisak barutnih gasova, brzina projektila, streljačko oružje

Abstract: The firing process problem in the small arms barrel is considered. In this research experimental method for propellant gas pressure and velocity projectile measurement is given. The measuring results are analyzed and useful conclusions and directions for future work on this problem are given.

Key words: Analysis of precision measuring, interior ballistic parameters, propellant gas pressure, projectile velocity, small arms

1. UVOD

U cevi oružja odvija se proces opaljenja koji počinje udarom udarne igle u inicijalnu kapslu a završava kada projektil napusti “usta” cevi. Proces se može uslovno podeliti na dve faze i to:

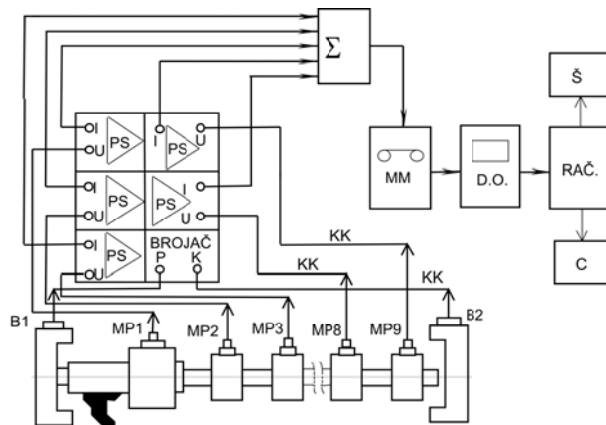
- **faza mirovanja projektila** ili faza sagorevanja barutnog punjenja u konstantnoj zapremini i
- **faza kretanja projektila** ili faza sagorevanja barutnog punjenja u promenljivoj zapremini.

Postoje eksperimentalni uređaji za analizu pojedinih faza, mada se faze odvijaju istovremeno i strogo razmatranje između njih nije moguće.

Veličine koje se najčešće mere, kako na oružju tako i na projektilu, prilikom provere ispravnosti, prijema istih od proizvođača i ispitivanja protutipova, su: pritisak barutnih gasova u cevi i barutnoj komori, brzina kretanja projektila u cevi, početna brzina projektila, vreme procesa opaljenja, naprezanja u zidovima cevi, raspored temperature u zidovima cevi, naprezanje u elementima konstrukcije, vibraciona ispitivanja, brzina trzanja i vraćanja cevi, dužina trzanja cevi, brzina gađanja, promena temperature cevi u toku rada i druga merenja.

2. MERNAPARATURA I IZVOĐENJE EKSPERIMENTA

Za realizaciju eksperimenata na konkretnom kalibru izvršeno je kompletiranje sanduka, cevi, omotača i nosača mernih pretvarača pritiska. Na cevi konkretnog kalibra postavlja se merni lanac za registrovanje pritiska barutnih gasova prema blok šemi slika 1. Za konkretni kalibar korišćeno je devet mernih pretvarača pritiska (MP) švajcarske firme KISTLER, koji su stavljeni u određeni nosač.



Slika 1. Blok šema mernog sistema za registrovanje pritiska barutnih gasova i brzine projektila u cevi
MP – merni pretvarač pritiska, KK – koaksijalni kabl, PS – pojačavač naelektrisanja (pojačalo signala), MM – registrator signala (merni magnetofon), DO – digitalni osciloskop, RAČ. – računar, C – crtač (ploter), Š – štampač (printer)

Pri planiranju eksperimenata vodilo se računa i o optimalnoj veličini uzorka kako bi se na osnovu njega mogla donositi procena u odnosu na osnovni skup iz koga je uzet uzorak. Svi uzorci su sa preko 30 jedinica i dosta verno odražavaju karakteristike osnovnog skupa kojeg predstavlja taj uzorak, tj. distribucija frekvencija, aritmetička sredina, standardna devijacija, varijansa itd. nisu opterećene velikom greškom i procene su dosta tačne.

3. OBRADA REZULTATA EKSPERIMENTA

Električni signal zapisan na magnetofonskoj traci registratora, se uvodi u digitalni osciloskop (D.O) firme NICOLET (koji ima ulogu analogno-digitalnog konvertora), a odatle se preuzima putem računara firme HEWLETT PACKARD (RAČ.) u kome se vrši obrada podataka, prema slici 1. Izlazne informacije se pojavljuju na ploteru – crtaču (C) u vidu grafika pritiska u funkciji vremena i na printeru – štampaču (Š) u vidu numeričkih podataka za vreme i pritisak.

Za potrebe ovih istraživanja prikazivani su istovremeno rezultati za 9 mernih mesta za pritisak u funkciji vremena. Eksperimentalna istraživanja su realizovana s ciljem dobijanja stvarnih podataka u cevi za vreme opaljenja i radi upoređenja sa proračunskim podacima. Eksperimentima su registrovane krive razvoja pritiska barutnih gasova na pojedinim mestima duž cevi u funkciji vremena.

Pri svakom opaljenju na odabranom kalibru meren je pritisak na 9 mesta u cevi. Merno mesto 1 registruje pritisak barutnih gasova u čahuri metka a ostala merna mesta su postavljena duž vodišta projektila. Eksperiment je ponavljan najmanje 30 puta. Rezultati su prezentirani u [1 i 2], a ovde se koriste samo srednji eksperimentalni rezultati (slika 2 i 3) za automatsku pušku 7,62 mm.

Na osnovu odstojanja mernih mesta i vremenskog pomaka računa se srednja brzina kretanja projektila u cevi oružja. U tunelu je merena i brzina projektila na 10 m od usta cevi

optičkim barijerama baze 2 m . Na osnovu Standarda Narodne Odbrane (SNO) [3] vrši se svođenje V_{10} na usta cevi.

Pored planiranih eksperimenata za verifikaciju teorijskog i numeričkog modela realizovan je i eksperiment merenja V_{10} iz "bušene" i "nebušene" cevi AP 7,62 mm kojima se raspolagalo.

Tabela 1. Rezultati merenja V_{10} iz „nebušene” cevi

Redni broj opita	$V_{10} ; m / s$	Redni broj opita	$V_{10} ; m / s$	Redni broj opita	$V_{10} ; m / s$
1	715,6	8	720	15	718,9
2	712	9	712,4	16	714,4
3	712,3	10	714,8	17	718,8
4	712,8	11	718,4	18	714,5
5	720,8	12	712,7	19	719,7
6	719,2	13	713	20	719,2
7	711,5	14	709,9	srednja vrednost opita	715,545
				svedena vrednost V_{10} na V_0	725,189

Početna brzina projektila se dobija iz jednačine kretanja projektila na osnovu planimetrisanja ukupne površine ispod krive pritiska u funkciji puta ili vremena:

$$V_0^2 = \frac{2S}{\varphi m} \int_0^x p dx \quad \text{ili} \quad V_0 = \frac{S}{\varphi m} \int_0^t p dt$$

Na osnovu pada brzine projektila V_{10} i povećanja zapremine iza projektila za nosače mernih pretvarača pritiska ($\Delta W = 1,6866\%$), dolazi se do korektivnog koeficijenta od $\Delta V_{10} = 3,574\%$ sa kojim se koriguje srednja izmerena početna brzina projektila svedena na usta cevi (tabela 2).

U tabeli 2 dati su rezultati merenja pritiska, brzina i vremena konkretnog kalibra dobijenih sa osciloskopa. Rezultati su dati prema redosledu opaljenja a merna mesta su označena rastućim brojevima od dna cevi ka ustima cevi kao i kanali na mernom magnetofonu. U prvoj polovini cevi korišćeni su merni pretvarači sa mernim područjem do 500 MPa a u drugoj polovini merni pretvarači sa mernim područjem do 250 MPa obzirom da se i očekuju takve vrednosti pritiska u cevi. Tabela na kraju sadrži i prosečne srednje vrednosti, prosečno srednje odstupanje i mernu nesigurnost za verovatnoću od 95%.

4. DISKUSIJA REZULTATA EKSPERIMENTA

Rezultati u tabeli 2 daju maksimalne vrednosti pritiska na svakom mernom pretvaraču, srednju brzinu između dva pretvarača i vreme ostvarivanja tih veličina. Iz tabele se mogu videti: prosečne srednje vrednosti, maksimalne i minimalne vrednosti izmerenih veličina, raspon između maksimalnih i minimalnih vrednosti kao i prosečno srednje odstupanje i merna nesigurnost za svako merno mesto. Analizom sveukupnosti rezultata uočava se da je merna nesigurnost za brzinu $V_{10} = 0,962 m/s$ i to za 30 opaljenja. **Ovde se nameće logični zaključak, da se sa povećanjem broja merenja smanjuje merna nesigurnost.** Maksimalna merna nesigurnost za brzine projektila u cevi oružja je $V_{10} = 3,34 m/s$ i to na mernom mestu 3. Maksimalna merna nesigurnost kod merenja pritiska iznosi 2,17MPa što se smatra veoma prihvatljivim obzirom da se pojavljuje u području ostvarivanja maksimalnog pritiska barutnih gasova. Proizvođač mernih pretvarača pritiska za takve situacije daje mogućnost pojave "over shoot" premašenja – nadvišenja stvarne vrednosti obzirom da je vreme porasta pritiska

barutnih gasova na mernom mestu 2 vrlo malo, i za vernu reprodukciju, zahteva merni pretvarač veoma velike gornje granične učestalosti. Korišćeni merni pretvarači nemaju dovoljno visoku graničnu učestalost (imaju 140 kHz [4,5]), pa dolazi do oscilovanja samog pretvarača koji se ponaša kao sistem drugog reda sa malim faktorom prigušenja.

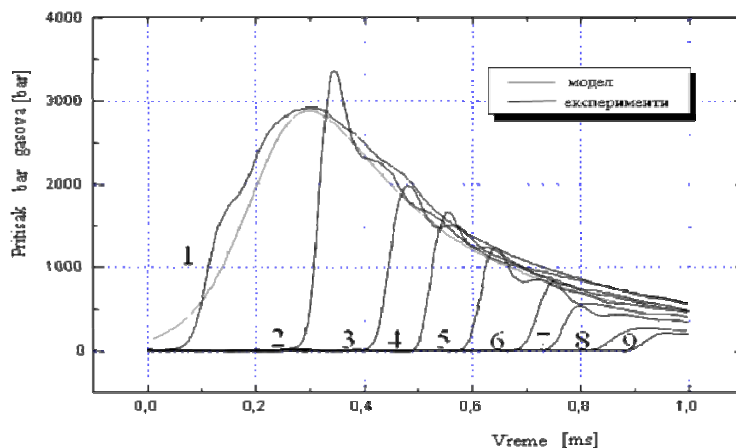
Inače prosečne srednje vrednosti svih opaljenja i svih mernih mesta za odabrano oružje su obrađene na računaru Hewlett Packard i daju se dijagramski na slici 2., a koriste se za uporednu analizu eksperimentalnih rezultata sa proračunskim [1,2] i [6].

Redni brojevi mernih mesta označeni su na dijagramu slika 2. Analiza srednjih vrednosti, pokazuje da se merni pretvarači pritiska jedan za drugim uključuju u registrovanje pritisaka upravo kako su duž cevi i postavljeni. Bitno je uočiti, da za isti vremenski trenutak kada registruje pritisak 9 mernih pretvarača u komori iza projektila, svaki od mernih pretvarača daje svoj lokalni pritisak koji se međusobno razlikuju. Ovo ukazuje da je pritisak barutnih gasova u komori funkcija vremena i puta projektila.

Tabela 2. Rezultati merenja pritiska, brzina i vremena za kalibar 7,62 mm

Kanal magnetomna	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Pojacanje pojacala, MPa/V	500	500	500	500	500	200	100	50	20	Brzina na 10 m od usta cevi $V_{10}, m/s$	Napomena
Merno Mesto	1	2	3	4	5	6	7	8	9		
Odstojanje NDK, m	0,0265	0,0375	0,0925	0,1375	0,1825	0,2375	0,2785	0,3295	0,377		
Red. broj opaljenja	t, ms $V, m/s$ P_{max}, MPa										
Merane veličine	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
0,200	0,496	0,526	0,648	0,740	0,826	0,928	0,990	1,065	1,134	682,2	Municija PPU iz 1985. god.
1	0,0	98,3	286,9	489,1	523,2	539,2	661,3	675,4	693,4		
	285,5	312,4	190,0	165,2	121,7	76,6	53,5	24,7	14,3		

0,196	0,560	0,590	0,698	0,788	0,868	0,9615	1,0236	1,0976	1,1647	698,4	- !! -
30	0,0	105,4	324,0	500,0	562,5	588,2	660,2	689,2	707,8		
	300,3	357,0	206,4	165,8	126,5	90,0	58,4	27,4	25,1		
Prosečna 0,208 srednja vrednost	0,532	0,5751	0,6877	0,7806	0,8632	0,9591	1,0199	1,0922	1,1627	689,97	$V_0=699,5 \times 1,03574=724,5$
	0,0	100,8	312,0	484,8	544,4	573,6	652,1	680,5	700,3		
	294,77	342,3	198,0	177,0	124,7	82,12	53,27	26,91	20,73		
Prosečno srednje odstupanje	0,0593	0,0328	0,0367	0,0356	0,0350	0,0345	0,0365	0,0365	0,0377	5,27	:
	0,0	11,446	18,289	13,015	15,625	11,505	9,063	6,098	5,827		
	10,631	11,917	11,828	12,03	9,9369	5,361	3,253	1,0078	2,758		
Merna nesigurnost za P=95%	0,0108	0,0060	0,0067	0,0065	0,0064	0,0063	0,0067	0,0067	0,0068	0,962	:
	0,0	2,09	3,3392	2,376	2,853	2,100	1,654	1,113	1,064		
	1,94	2,1738	2,1596	2,197	0,7188	1,0154	0,0104	0,184	0,5036		



Slika 2. Dijagram $p(t)$ modela i srednjih vrednosti eksperimenta za sva merna mesta na AP 7,62 mm

Pošto su merna mesta relativno blizu jedno od drugog može se na osnovu eksperimentalnih rezultata doneti siguran sud o promeni pritiska i brzine projektila duž cevi za neko fiksno vreme. Očigledno je, da je pritisak od dna cevi ka ustima cevi jedna rastuća pa opadajuća funkcija. Brzina projektila u cevi je rastuća funkcija s tim što je u prvoj polovini cevi mnogo veći gradijent priraštaja brzine u odnosu na drugu polovinu cevi. Karakter promene brzine projektila u cevi logično prati priliv barutnih gasova tj. zakon razvoja pritiska barutnih gasova.

Na slici 2 prikazane su krive pritisa svih mernih mesta i kriva modela na mernom mestu 1. Merno mesto 1 registruje pritisak u čahuri metka tj. počinje da registruje pritisak odmah od opaljenja kapsle. S obzirom da u eksperimentalnoj cevi vladaju drugačiji uslovi opaljenja od bojeve cevi, izvršena je korekcija matematičkog modela i programa prema uslovima za eksperimentalnu cev i sa takvim programom su izvršeni proračuni [1,2] i [6].

Srednja eksperimentalna vrednost maksimalnog pritiska barutnih gasova (294,77 MPa) praktično je poklopljena sa modelom (295,1 MPa) za 20 elemenata po promenljivoj s , a i ceo tok eksperimentalne i proračunske krive se dosta dobro poklapaju čime se potvrđuje ispravnost postavljene teorije. Rezultati eksperimenta potvrđuju karakter razvoja pritiska u cevi oružja kao funkcije vremena i položaja u cevi. Izuzetak su krive na mernom mestu 2, 8 i 9 koje su posledica reagovanja mernog lanca i ne mogu se uzeti u obzir kao tačno izmereni podatak. Najverovatnije je, da su razlike posledica vrlo kratkog vremena i inercije samog mernog pretvarača pritiska, koji je mehanički element. Sam proizvođač piezo električnih mernih pretvarača pritisa daje mogućnost kako pozitivnog nadvišenja tj. "overshoot" tako i negativnog nadvišenja signala tj. "undershoot".

Inače, merenje pritiska barutnih gasova u unutrašnjoj balistici najčešće se vrši metodom trajnih deformacija metala ili *piezoelektričnom metodom*.

Krešer i piezoelektrična metoda merenja pritiska ne daju jednake pritiske za isto opaljenje. U francuskoj su ispitana razna oruđa, na raznim nivoima pritiska, kako bi se dobio odnos krešera i piezouređaja. Pri tim opitima je ustanovljeno da je teško odrediti zavisnost pri pritisku za $p_m(\text{krešera}) < 1000$ bara i za $p_m(\text{krešera}) > 4000$ bara. Za dijapazon 1000 do 4000 bara, na osnovu opitnih rezultata, određeni su koeficijenti za polinom drugog stepena, i sračunate vrednosti prema formuli:

$$p_p = 0,9676 p_k + 0,5280 \cdot 10^{-4} p_k^2$$

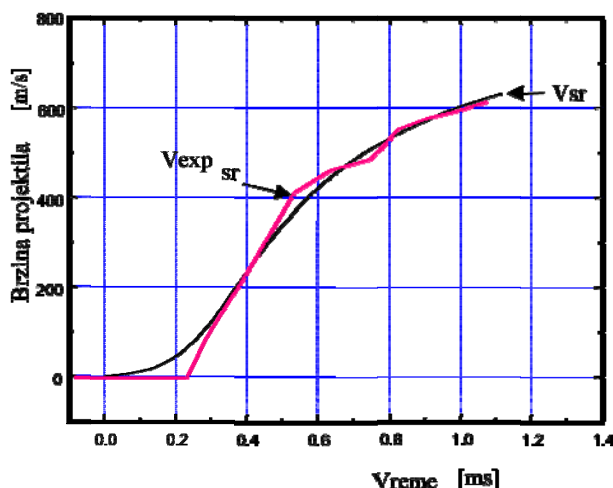
gde je : $p_p = p_m$ piezo; $p_k = p_m$ krešera.

Radi provere polinoma drugog stepena realizovano je merenje maksimalnog pritiska barutnih gasova u cevi oružja krešerom i piezosondama. Dobijeni su sledeći rezultati dati u tabeli 3.

Tabela 3. Rezultati izmerenih pritisaka

$p_k=1520$	$p_k=1960$	$p_k=2600$	$p_k=3800$
$p_p=1593$	$p_p=2099$	$p_p=2873$	$p_p=4439$

Analizom izmerenih pritisaka krešerom i piezosondama da se zaključiti da sa povećanjem maksimalnog pritiska barutnih gasova raste i razlika između pritisaka izmerenih krešerom i piezosondom.



Slika 3. Dijagrami $V(t)$ modela srednjih polaznih podataka i srednjih vrednosti eksperimenata za sva merna mesta na AP 7,62 mm

Srednja eksperimentalna brzina projektila u cevi određuje se na osnovu udaljenosti mernih mesta i vremena dolaska talasa pritiska na merno mesto. Pošto su merna mesta relativno blizu jedno od drugog može se na osnovu eksperimentalnih rezultata doneti zaključak o promeni brzine projektila duž cevi. Brzina projektila u cevi kod svih oružja je rastuća funkcija tokom celog procesa, s tim što je u prvoj polovini cevi znatno veći intenzitet priraštaja brzine. Karakter promene brzine projektila u cevi logično prati priliv barutnih gasova tj. zakon razvoja pritiska barutnih gasova u cevi. Pošto merna mesta predstavljaju diskretne tačke u procesu, da bi se bolje uočile tačke eksperimentalnih rezultata nije vršena interpolacija niti polaganje polinoma kroz tačke.

Na slici 3 prikazane su krive modela dobijene sa srednjim ulaznim podacima i eksperimentalna kriva usrednjenih vrednosti. Karakteri promena srednje brzine u modelu i eksperimentu su slični a red veličina brzina u potpunosti je identičan jedino što postoji vremenski pomak za tzv. vreme predopaljenja. Ovde je izvršen pomak eksperimentalne krive unapred za tzv. vreme predopaljenja i ako se izvrši polaganje polinoma kroz tačke eksperimentalnih brzina dobilo bi se skoro potpuno poklapanje funkcija eksperimenata i modela. Prosečna srednja eksperimentalna vrednost početne brzine projektila iznosi 723,6 m/s a proračunska iznosi 721,7 m/s. Ovo odstupanje je neznatno i ukazuje na vrlo dobru saglasnost srednje eksperimentalne brzine i proračunske brzine projektila u cevi oružja.

5. ZAKLJUČAK

Rad daje analizu i diskusiju tačnosti merenja unutrašnje balističkih parametara za vreme procesa opaljenja u cevi oružja na osnovu eksperimentalnih istraživanja i numeričkog modeliranja na računaru. Rezultati eksperimentalne metode realno oslikavaju fizičku sliku

procesa opaljenja. Analizom se došlo do saznanja da srednji uslovi proračuna daju optimalne ulazno-izlazne parametre i prihvatljive rezultate proračuna za konkretno oružje.

Komparativnom analizom su obuhvaćeni pritisak barutnih gasova i brzina projektila u cevi oružja u funkciji vremena. Rezultati eksperimenata i modela potvrđuju karaktere promena pritiska i brzine i osnovnu pretpostavku matematičkog modela da su pritisak barutnih gasova i brzina projektila funkcije vremena i puta projektila. Upoređenjem eksperimentalnih i proračunskih rezultata pritisaka barutnih gasova i brzina projektila uočava se njihova dobra međusobna usaglašenost što potvrđuje korektnost matematičkog modela. Teorijsko-numerički model može da se koristi kao simulator opaljenja.

Činjenica da ne postoji apsolutno tačno izmereni rezultat ukazuje da i sam postupak merenja nije deterministička već stohastička pojava koja zahteva visoku frekvenciju uzorkovanja i specifičnu laboraciju baruta da se dobije što tačnije izmeren rezultat.

LITERATURA:

- [1] Lj. Tančić: *Eksperimentalno istraživanje parametara dvofaznog strujanja u cevi oružja*, NTP-1, Beograd, 2001.
- [2] Lj. Tančić: *Numeričko rešenje nestacionarnog modela unutrašnje balistike oružja malih kalibara*, doktorska disertacija, VTA VJ, Beograd, 1997.
- [3] *** : Standard Narodne Odbrane (SNO 4294/85), *Merenje brzine projektila na putanji pomoću pretvarača za detekciju prolaska*, Beograd, 1985.
- [4] *** : Piezo-Instrumentation Kistler, *Operating Instructions high-pressure quartz transducers, Type 6201B, 6203, 6211, 6221*, Kistler Instrumente AG, CH-8408 Winterthur, Switzerland, 1983.
- [5] *** : Piezo-Messtechnik Kistler, *Quarzkristall-Hochdruckaufnehmer, Operating-and service-instructions for Type 6201B, 6203, 6211, 6221*, Kistler Instrumente AG, CH-8408 Winterthur, Switzerland, 1978.
- [6] Lj. Tančić: *Diskusija rezultata tačnosti merenja unutrašnje balističkih parametara u cevi oružja*, III Naučno-stručni skup sa međunarodnim učešćem iz oblasti odbrambenih tehnologija OTEH2009, VTI Beograd, 2009.