

FAKTORSKA ANALIZA POLAZNIH PARAMETARA KOJI NAJVIŠE UTIČU NA MODEL DVOFAZNOG STRUJANJA U CEVI AUTOMATSKE PUŠKE

- nastavak iz broja 3/2000 -

UDC: 623.522:623.442.45]:519.237.7

Regresivna analiza

Nakon prikupljanja rezultata eksperimenta neophodno je pronaći koji od faktora, variranih u eksperimentu, utiču na izlazne karakteristike. Pored opisane disperzivne analize često se koristi i regresivna analiza rezultata eksperimenta, koja mora dati odgovore na sledeća pitanja:

- koliki je uticaj posmatranog faktora na izlazne karakteristike?
- kolike su srednje vrednosti izlaznih karakteristika?
- kolika su rasipanja oko srednjih vrednosti izlaznih karakteristika?
- kako izgleda matematički model posmatranog procesa koji sa zadatim nivoom poverenja aproksimira stvarni proces?

Odgovor na ta pitanja daje funkcija reagovanja (*prenosna funkcija*) datog procesa.

Rezultati dobijeni eksperimentom predstavljaju funkciju koja zavisi od mnogobrojnih, poznatih i nepoznatih faktora. Ukoliko se postavi linearna regresija (mada je moguća i regresija višeg reda) rezultata eksperimenta, dobiće se određeni matematički model eksperimenta koji je predstavljen jednačinom linearne regresije, koja predstavlja traženu funkciju reagovanja. Funkcija reagovanja za-

visi samo od posmatranih faktora (tj. od vrednosti izvora promena).

U slučaju kada se izvodi eksperiment sa četiri faktora, jednačina linearne regresije (regresivni polinom) ima oblik:

$$\hat{y} = b_0x_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + b_{12}x_{12} + b_3x_3 + b_{13}x_{13} + b_{23}x_{23} + b_{123}x_{123} + b_4x_4 + b_{14}x_{14} + b_{24}x_{24} + b_{34}x_{34} + b_{124}x_{124} + b_{134}x_{134} + b_{234}x_{234} + b_{1234}x_{1234}. \quad (18)$$

gde je:

\hat{y} - vrednost linearne regresije (regresivnog polinoma),

b_j - vrednost j-tog regresivnog koeficijenta,

x_i - vrednost i-tog izvora promene.

Ovako odabran model stvarnog procesa nosi u sebi grešku koja iznosi:

$$\varepsilon = y - \hat{y}, \quad (19)$$

gde je sa y označena vrednost posmatrane veličine koja je dobijena proračunom u eksperimentu, za određenu kombinaciju nivoa faktora. Pomoću regresivne analize moguće je naći takvu jednačinu linearne regresije (regresivni polinom) \hat{y} koja će, sa zadatim nivoom poverenja V , aproksimirati stvarnu funkciju rezultata eksperimenta y . Pri tom se razlikuju slučajevi sa i bez ponavljanja, na jednom nivou fak-

torskog plana (kombinaciji nivoa faktora). U ovom radu, s obzirom na to da se analizira slučaj kada nema ponavljanja (radi se o rezultatima proračuna), objašnjen je postupak regresivne analize za slučaj bez ponavljanja.

Prvi korak je da se nađe srednja vrednost rezultata eksperimenta:

$$\bar{y} = \frac{\sum_{i=1}^{2^n} y_i}{2^n} \quad (20)$$

gde je y_i vrednost rezultata na i -tom nivou faktorskog eksperimenta (ukupno ima 2^n nivoa).

Nakon što je izračunata srednja vrednost svih rezultata u jednom faktorskom eksperimentu, računa se vrednost disperzije, takođe pomoću rezultata eksperimenta. Njena vrednost se određuje prema formuli:

$$\bar{S}_y^2 = \frac{\sum_{i=1}^{2^n} (y_i - \bar{y})^2}{2^n - 1} \quad (21)$$

gde je 2^n ukupan broj rezultata, a \bar{y} njihova srednja vrednost.

Zatim se izračunavaju vrednosti regresivnog polinoma za svaku kombinaciju nivoa faktora. Pri tome se onaj izvor promena za koji je, na osnovu disperzivne analize ili prema odabranom planu eksperimenta, zaključeno da nema uticaja na rezultate eksperimenta, ne nalazi u regresivnom polinomu, tj. vrednost regresivnog koeficijenta je 0.

Regresivni koeficijenti računaju se prema formuli:

$$b_j = \frac{1}{2^n} \sum_{i=1}^{2^n} x_{ij} \cdot y_i \quad (22)$$

gde je:

b_j – regresivni koeficijent j -tog člana regresivnog polinoma,

x_{ij} – elementi matrice faktorskog plana eksperimenta (nekodirane ili kodirane vrednosti).

Nakon što su određene vrednosti regresivnih polinoma, za svaku kombinaciju nivoa faktora izračunava se disperzija neadekvatnosti, koja predstavlja meru odstupanja regresivnog polinoma od stvarnih vrednosti za svaki nivo faktorskog eksperimenta (kombinaciju nivoa faktora), po formuli:

$$S_{\text{nead}}^2 = \frac{\sum_{i=1}^{2^n} (y_i - \hat{y}_i)^2}{2^n - d} \quad (23)$$

gde je:

y_i – vrednost izmerena u eksperimentu na i -tom nivou faktorskog plana,

\hat{y}_i – vrednost dobijena regresivnim polinomom na i -tom nivou,

d – broj članova regresivnog polinoma.

Neadekvatnost se procenjuje pomoću Fišerovog kriterijuma, slično kao kod disperzivne analize, tako što se izračuna parametar:

$$v_0 = \frac{\bar{S}_y^2}{S_{\text{nead}}^2} \quad (24)$$

koji se upoređuje sa Fišerovim kriterijumom $c = f(V, SS_{\text{im}}, SS_{\text{br}})$,

gde je:

$SS_{\text{im}} = 2^n - 1$ stepen slobode imenioca,

$SS_{\text{br}} = 2^n - d$ stepen slobode brojioca.

Odnos v_0 i c može da bude dvojak:

$v_0 \leq c$ model je adekvatan sa nivoom poverenja V ,

$v_0 > c$ model nije adekvatan (prevelika je S_{nead}^2).

Ukoliko je potvrđeno da je model adekvatan, dobijeni regresivni polinom u potpunosti predstavlja posmatrani proces, tj. može se reći da će se posmatrani proces odvijati prema dobijenom modelu sa verovatnoćom V . Pri izvođenju regresivne analize formira se tabela sa vrednostima koeficijenata kodiranog regresivnog polinoma pomoću koje se utvrđuje uticaj svakog izvora promene, odnosno faktora.

Dobijenim rezultatima, za maksimalni pritisak barutnih gasova i početnu brzinu projektila, analizom adekvatnosti (prema formulama 23 i 24), potvrđena je tvrdnja $v_0 \leq c$, što znači da je model adekvatan, a regresivni polinomi će odsl-

kavati posmatrani proces sa izabranim nivoom poverenja.

Rezultati regresivne analize (vrednosti disperzija i regresivnih koeficijenata) za maksimalni pritisak i početnu brzinu, prikazani su u tabeli 7.

Na osnovu rezultata dobijenih regresivnom analizom (tabela 7), uz korišćenje značaja svakog od izvora promene određenog disperzivnom analizom (na osnovu rezultata iz tabele 7), dolazi se do regresivnih polinoma.

Za veličinu maksimalnog pritiska barutnih gasova kodirani regresivni polinom glasi:

$$p_m = b_0 + b_1X_1 + b_2X_2 + b_3X_3 + b_4X_4 + b_{12}X_1X_2 + b_{13}X_1X_3 + b_{23}X_2X_3 + b_{14}X_1X_4 + b_{24}X_2X_4 + b_{34}X_3X_4 \quad (25)$$

Tabela 7

Disperzija (S_i^2)	Rezultat		Regres. koefic. (b_i)	Rezultat	
	P_{max}	V_0		P_{max}	V_0
S_1^2	71055,57	892,52	b_0	3146,5625	726,875
S_2^2	16272,19	284,77	b_1	73,6875	6,125
S_3^2	15201,57	141,02	b_2	76,5625	8,5
S_4^2	503,44	0,02	b_{12}	1,6875	-0,25
S_5^2	29433,69	165,77	b_3	51,1875	8,375
S_6^2	815,82	0,02	b_{13}	1,3125	-0,125
S_7^2	509,07	26,27	b_{23}	1,4375	0
S_8^2	16240,32	293,27	b_{123}	-0,0625	0
S_9^2	16272,19	284,77	b_4	73,6875	6,125
S_{10}^2	270,19	15,02	b_{14}	1,5625	-0,125
S_{11}^2	503,44	0,02	b_{24}	1,6875	-0,25
S_{12}^2	815,82	0,02	b_{34}	1,3125	-0,125
S_{13}^2	30080,57	147,02	b_{124}	-0,0625	0
S_{14}^2	14747,07	147,02	b_{134}	0,1875	0,125
S_{15}^2	16240,32	293,27	b_{234}	-0,0625	0
S_{16}^2	80904,69	791,02	b_{1234}	-0,0625	0
Srednja vrednost rezultata eksperimenta				3146,5625	726,875
Vrednost disperzije				20645,73	232,12
Suma disperzija				309685,94	3481,75
Maksimalni iznos pojedinačne disperzije				80904,69	892,52
Srednja disperzija				19355,37	217,61

Ovde je b_0 srednja vrednost maksimalnog pritiska dobijena pri izvođenju eksperimenta, po ranije definisanom faktornom planu. To je kodirani regresivni polinom (svaki od faktora koji je njegov član može da ima samo dve vrednosti: +1 kada je na gornjem nivou i -1 kada je na donjem nivou). Najveći uticaj na maksimalni pritisak ima faktor X_2 – jedinična brzina sagorevanja, zatim jednak uticaj imaju faktori X_1 i X_4 (početna masa barutnog zrna i početna površina barutnog zrna), i na kraju faktor X_3 – početna masa baruta, što je već potvrđeno disperzivnom analizom.

Regresivnim polinomom (25), uz primenu vrednosti regresivnih koeficijenata za maksimalni pritisak barutnih gasova (iz tabele 7) dobijaju se dve vrednosti maksimalnog pritiska, odnosno njegoa gornja i donja granica:

$$p_m = 3146,5625 + 73,6875 m_{z0} + 76,5625 u_{z0} + 51,1875 m_{b0} + 73,6875 S_{z0} + 1,6875 m_{z0}u_{z0} + 1,3125 m_{z0}m_{b0} + 1,4375 u_{z0}m_{b0} + 1,5625 m_{z0}S_{z0} + 1,6875 u_{z0}S_{z0} + 1,3125 m_{b0}S_{z0}$$

$p_m = 3430,6875$ – kada su faktori na gornjem nivou,

$p_m = 2862,4375$ – kada su faktori na donjem nivou.

U odnosu na srednju vrednost maksimalnog pritiska dobija se odstupanje od $\pm 284,125$ bara, što ukazuje na to da ovi parametri bitno utiču na maksimalni pritisak barutnih gasova, jer ga menjaju za 9% od svoje srednje vrednosti.

Za veličinu početne brzine zrna kodirani regresivni polinom glasi:

$$V_0 = b_0 + b_1X_1 + b_2X_2 + b_3X_3 + b_4X_4 \quad (26)$$

Analogno objašnjenju za prethodni regresivni polinom b_0 je srednja vrednost početne brzine dobijena pri izvođenju eksperimenta po ranije definisanom faktorskom planu. Očigledno je da najveći uticaj na početnu brzinu zrna ima X_2 – jedinična brzina sagorevanja, na drugom mestu je X_3 – početna masa baruta, dok jednak uticaj imaju faktori X_1 i X_4 (početna masa barutnog zrna i početna površina barutnog zrna), što je već potvrđeno disperzivnom analizom.

Regresivnim polinomom (26), uz primenu vrednosti regresivnih koeficijenata za početnu brzinu projektila (iz tabele 7) dobijaju se dve vrednosti početne brzine, odnosno njena gornja i donja granica:

$$V_0 = 726,875 + 6,125 m_{z0} + 8,5 u_{z0} + 8,375 m_{b0} + 6,125 S_{z0}$$

$V_0 = 756$ m/s – kada su faktori na gornjem nivou,

$V_0 = 697,75$ m/s – kada su faktori na donjem nivou.

U odnosu na srednju vrednost početne brzine zrna dobija se odstupanje od $\pm 29,125$ m/s, što ukazuje na to da ovi parametri bitno utiču na početnu brzinu projektila, jer je menjaju za 4% od svoje srednje vrednosti.

Prikaz rezultata proračuna

Na osnovu programskog rešenja [1 i 2] izvršen je proračun opisanog modela dvofaznog strujanja, sa srednjim vrednostima analiziranih polaznih parametara. Dobijeni rezultati proračuna mogu se prikazati tabelarno i grafički.

Kako se razmatra nestacionarni problem, osnovna veličina je vreme, a zatim s – masa radnog medijuma koja definiše

Vreme	Put	ϵ	ρ	u	u_b	E	p
ms	cm		kg/m ³	m/s	m/s	mJ/kg	bar
0,061	0,00	0,45952	30,67	0,000	0,000	3,952867	307,05
	0,28	0,45964	30,66	0,633	0,435	3,951914	306,83
	0,56	0,45977	30,64	1,229	0,871	3,951034	306,62
	0,84	0,45989	30,63	1,792	1,311	3,950262	306,41
	1,13	0,46002	30,62	2,326	1,756	3,949622	306,21
	1,41	0,46015	30,60	2,835	2,209	3,949128	306,03
	1,69	0,46028	30,59	3,324	2,670	3,948790	305,85
	1,97	0,46041	30,57	3,796	3,144	3,948612	305,68
	2,25	0,46054	30,56	4,256	3,631	3,948593	305,52
	2,53	0,46067	30,54	4,707	4,134	3,948728	305,38
	2,82	0,46081	30,53	5,153	4,654	3,949009	305,24
	3,10	0,46094	30,51	5,598	5,194	3,949424	305,11
	3,38	0,46108	30,49	6,045	5,756	3,949955	304,99
	3,66	0,46122	30,48	6,496	6,342	3,950578	304,88
3,95	0,46135	30,46	6,953	6,953	3,951263	304,77	
0,092	0,00	0,46943	49,90	0,000	0,000	3,941295	507,30
	0,28	0,46963	49,86	1,157	0,954	3,940753	506,79
	0,57	0,46982	49,82	2,280	1,909	3,940251	506,29
	0,85	0,47001	49,78	3,373	2,867	3,939808	505,80
	1,13	0,47021	49,74	4,439	3,831	3,939438	505,32
	1,42	0,47040	49,70	5,480	4,802	3,939149	504,84
	1,70	0,47060	49,66	6,500	5,783	3,938948	504,38
	1,99	0,47080	49,62	7,502	6,775	3,938838	503,92
	2,27	0,47099	49,58	8,489	7,781	3,938819	503,48
	2,56	0,47119	49,53	9,463	8,804	3,938891	503,04
	2,84	0,47139	49,49	10,427	9,844	3,939048	502,62
	3,12	0,47159	49,45	11,383	10,905	3,939284	502,20
	3,41	0,47179	49,41	12,335	11,989	3,939590	501,79
	3,69	0,47199	49,37	13,284	13,097	3,939952	501,39
3,98	0,47219	49,32	14,233	14,233	3,940351	500,99	

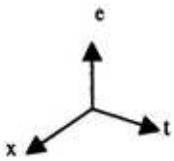
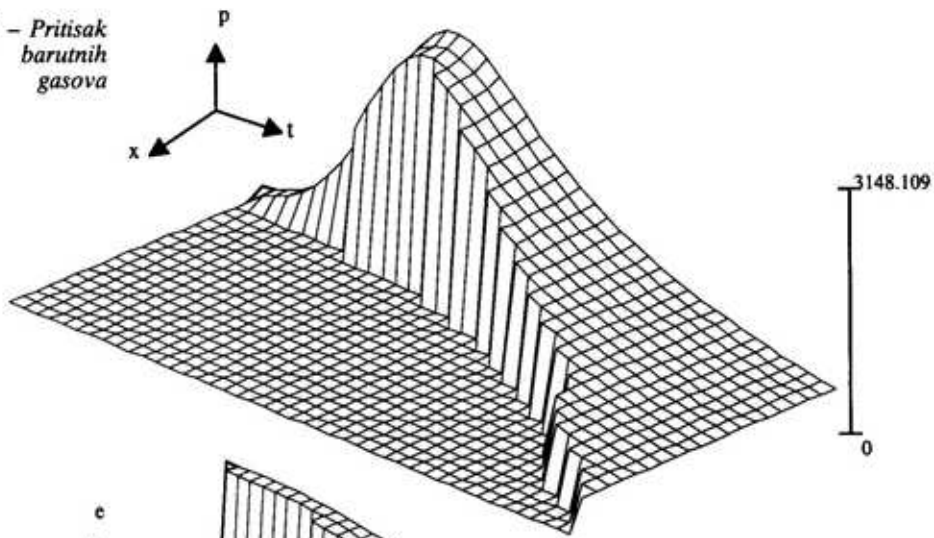
konačnu zapreminu u kojoj se odvija proces, a daje i put projektila u cevi oružja.

Pored maksimalnog pritiska barutnih gasova i početne brzine projektila, kao važnih UB karakteristika, koje su posebno analizirane u ovom radu, postoji čitav niz drugih veličina za koje se u svakom vremenskom intervalu vrši proračun: brzina barutnih zrnaca, brzina barutnih gasova, poroznost, energija barutnih

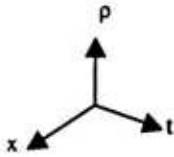
gasova, gustina barutnih gasova, temperatura površine barutnog zrna, brzina sagorevanja barutnog zrna, relativno sagorela masa baruta u zapremini i druge. Ovako veliki broj proračunskih veličina predstavlja problem za tabelarno prikazivanje svih veličina, pa se prikazuju samo odabrani parametri.

Radi ilustracije u tabeli 8 prikazan je način tabelarnog prikazivanja rezultata proračuna.

Sl. 1 – Pritisak
barutnih
gasova

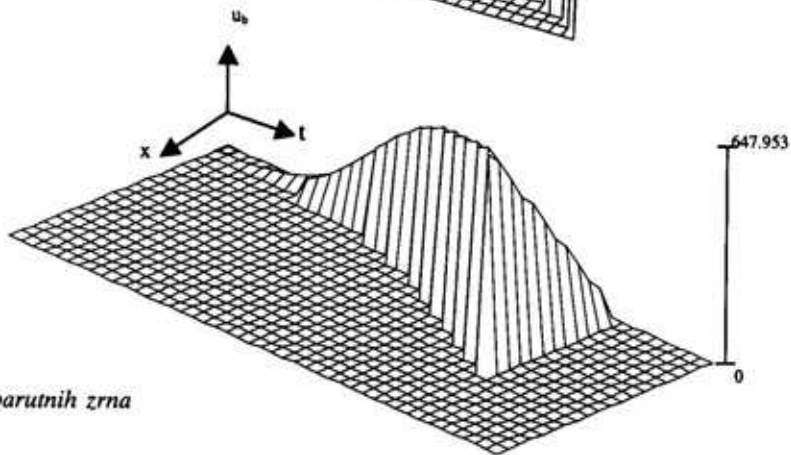
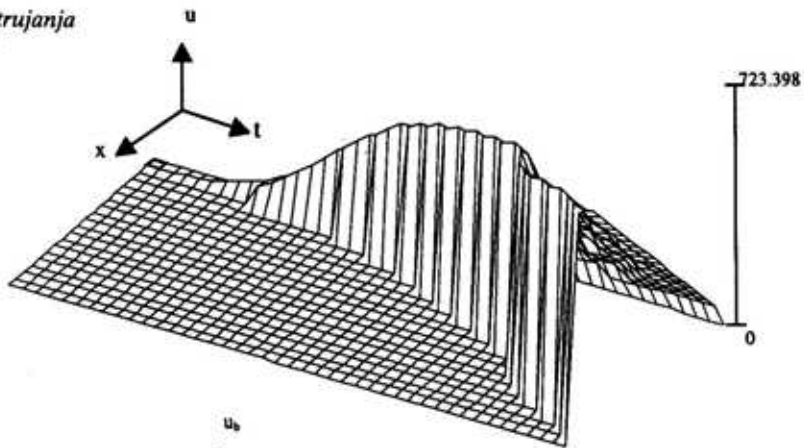


Sl. 2 –
Unutrašnja
energija
barutnih
gasova



Sl. 3 – Gustina
barutnih
gasova

Sl. 4 – Brzina strujanja
barutnih gasova



Sl. 5 – Brzina barutnih zrna

U tabeli 8 date su vrednosti navedenih parametara strujanja u zapremini između dna cevi (čela zatvarača) i dna projektila. Dvofazni UB modeli u zapremini iza projektila daju različite vrednosti parametara za razliku od klasičnih modela koji daju samo srednje vrednosti ovih parametara. U tabeli 8 je za određeni trenutak u zapremini iza projektila prikazan primer za 15 tačaka za koje se daju vrednosti posmatranih parametara strujanja. Dvofazni UB modeli odslikavaju karakter promene posmatranih parametara u zapremini iza projektila.

Karakteristike proračuna: pritisak barutnih gasova – p , unutrašnja energija

barutnih gasova – e , gustina barutnih gasova – ρ , brzina strujanja barutnih gasova – u i brzina barutnih zrna – u_b grafički se prezentiraju u MATCAD-u (slike 1 do 5), kao prostorne funkcije vremena i položaja cevi. Sve karakteristike procesa opaljenja u cevi oružja su funkcije dve nezavisne promenljive (t, x), što znači da zavise i od vremena i od položaja u cevi, te se i opisuju prostornim krivim površinama. U tome je i osnovna razlika između klasične teorije unutrašnje balistike i teorije dvofaznog strujanja.

Funkcije su prikazane u aksonometrijskom položaju tako što je horizontalna ravan nezavisnih promenljivih (baza) za-

rotirana u smeru kazaljke na satu za 45° , a pravac posmatranja u odnosu na bazu je pod uglom od 25° . Podatak za vertikalnu skalu (na crtežu) predstavlja razmeru crtanja u odnosu na podatke proračuna i njime se reguliše visina crteža. Početak koordinatnog sistema je u najvišoj tački horizontalne ravni (baze) na crtežu. Od te tačke sa leve strane se pruža osa koja definiše položaj u cevi, a sa desne strane je vremenska osa. Promenom tri parametra, koja su prikazana na slikama, moguće je dobiti željeni aksonometrijski izgled date funkcije. Na slikama su prikazani samo vidljivi delovi površina, a moguće je prikazati i nevidljivi deo.

Takođe, na slikama se uočava horizontalna ravan i kriva površina u vidu brega – funkcijska površina. Svaka kriva površina ima dve rubne krive linije: desna rubna linija predstavlja krivu promene date funkcije na dnu cevi, a leva definiše krivu promene date funkcije uz dno zrna. Ako se data kriva površina preseče uzastopnim vertikalnim ravnima paralelnim vremenskoj osi, dobija se familija krivih koje definišu vremenske promene funkcije na određenim mestima u cevi. Slično tome, ako se data površina preseče vertikalnim ravnima, paralelnim osi položaja u cevi, dobiće se familija krivih koja definiše promenu funkcije duž cevi u fiksnim momentima.

Zaključak

Primenom faktorske analize na polazne parametre koji najviše utiču na model dvofaznog strujanja u cevi automatske puške 7,62 mm, dolazi se do sledećih zaključaka:

– analizirana su četiri parametra koji najviše utiču na izlazne UB karakteristike, kako samostalno tako i u kombinaciji sa ostalim parametrima. To su: jedinična brzina sagorevanja baruta, početna masa barutnog zrna, početna površina barutnog zrna i početna masa baruta;

– potpunim faktorskim planom eksperimenta obuhvaćeni su maksimalni pritisak barutnih gasova i početna brzina projektila. Analogno ovoj analizi moguće je da se postupak faktorske analize primeni i na ostale karakteristike strujanja (gustina barutnih gasova, poroznost, energija barutnih gasova, temperatura barutnih gasova, itd...);

– postupkom disperzivne i regresivne analize izvršeno je rangiranje odabranih parametara, formirani su regresivni polinomi, dobijene srednje vrednosti za maksimalni pritisak barutnih gasova i početnu brzinu projektila, kao i njihove dozvoljene granice odstupanja. Na osnovu dobijenih regresivnih koeficijentata i formiranih regresivnih polinoma moguća je dalja korekcija odabranih parametara radi usaglašavanja rezultata modela sa rezultatima eksperimenata;

– za pritisak barutnih gasova i brzinu projektila izvršena je faktorska analiza za određeni vremenski trenutak, odnosno trenutak postizanja maksimalnog pritiska i brzine projektila na ustima cevi (početna brzina);

– potpuni faktorski plan eksperimenta 2^4 primenjen je u ovom radu na teorijski model dvofaznog strujanja. Na isti način faktorska analiza se može primeniti i na eksperimenat [6], što iziskuje znatno više vremena i novčanih sredstava. Najbolje je da se realizuje kombinacija teorijskog modela i eksperimentalnih istraživanja.

Literatura:

- [1] Cvetković, M.: Unutrašnja balistika, Vojnoizdavački zavod, Beograd, 1998.
- [2] Tančić, Lj.: Zbirka zadataka iz unutrašnje balistike, Vojnoizdavački zavod, Beograd, 1999.
- [3] ***: Propis o kvalitetu proizvoda (PKP), SOUR „Prvi partizan“ RO Namenska proizvodnja, Užice, 1987.
- [4] ***: Commission Internationale Permanente (CIP), Geneve, 1985.
- [5] Pantelić, I.: Uvod u teoriju inženjerskog eksperimenta, Radnički univerzitet – „Radivoj Čirpanov“, Novi Sad, 1976.
- [6] Petrović, M.: Analiza novog oblika vodišta zrna za cev kal. 5,56 mm, doktorska disertacija, VTA, Beograd, 1999.