

Dijana Damljanović,
dipl. inž.
Aleksandar Vitić,
dipl. inž.
Vojnotehnički institut,
Beograd

EKSPERIMENTALNO ISPITIVANJE ROLERONA U AEROTUNELU T-38

UDC: 629.7.018 : [681.586.2 : 533.694.51

Rezime:

U radu su prikazani rezultati eksperimentalnih ispitivanja rolerona postojećeg projektila u aerotunelu T-38 Vojnotehničkog instituta. Za smanjenje ugaone brzine valjanja koriste se roleroni kao najjednostavniji uređaji. Oni predstavljaju žiroskop sa dva stepena slobode. Postavljaju se na krajeve krila i sastoje se od elerona koji je istovremeno i nosač ozubljenog rotora velike mase. Za rotaciju rotor koristi energiju vazduha. U radu je prikazan jedan roleron definisane geometrije sa odgovarajućim rotorom. Cilj ispitivanja bio je da se izmeri broj obrtaja rotora i šarnirni moment u funkciji ugla otklona rolerona i Mahovog broja.

Ključne reči: aerotunel, roleron, žiroskop sa dva stepena slobode, smanjenje ugaone brzine valjanja, broj obrtaja rotora, koeficijent šarnirnog momenta.

EXPERIMENTAL TESTING OF THE ROLL AILERON IN THE T-38 WIND TUNNEL

Summary:

The results of an experimental testing of the roll aileron of an existing projectile, carried out in the T-38 wind tunnel of the Military Technical Institute, are given in the paper. Representing a 2 dof gyroscope, roll ailerons are used as the simplest devices for decreasing angular velocity. Fixed on wing tips, they consist of ailerons which support massive cogged rotors. Air energy is used for rotor rotation. A roll aileron of a defined geometry, with an appropriate rotor, is described in the paper. The testing objective was to measure the rotor rotation rate and hinge moment as a function of the roll aileron deflection angle and the Mach number.

Key words: wind tunnel, roll aileron, gyroscope with two degrees of freedom, decreasing angular velocity, rotation rate of the rotor, hinge moment coefficient.

Uvod

U okviru istraživačkih zadataka izvršena su merenja na roleronu postojeće rakete u aerotunelu T-38. Ispitivanje je obuhvatalo merenje broja obrtaja rotora rolerona optičkim davačem i merenje šarnirnog momenta rolerona trokomponentnom aerovagom. Varirani su ugaon otklon rolerona i Mahov broj. Roleron se nalazio na kraju krila ispitivanog mo-

dela. Model projektila imao je jedno krilo sa roleronom.

Uloga rolerona kod samonavedenih raketa jeste da smanji ugaonu brzinu valjanja rakete. Jednačine koje opisuju kretanje rakete sa ugrađenim roleronima vrlo su složene. Uprošćavanjem jednačina dobijen je izraz koji uspostavlja vezu između ugaone brzine rakete, broja obrtaja rotora i statičkog derivativa šarnirnog momenta rolerona po otklonu. Proračun broja obrtaja rotora, kao i

proračun šarnirnog momenta, teško je izvodljiv, pa se pristupilo eksperimentalnom istraživanju. U ovom testu izabrana je geometrijska konfiguracija modela koja je već postojala. Cilj je bio da se odrede ova dva važna parametra. Eksperimentalno testiranje izvedeno je u trisoničnom aerotunelu T-38 Vojnotehničkog instituta. U radu je opisan test koji je izveden, kao i rezultati merenja.

Stabilizacija ugaone brzine valjanja projektila primenom rolerona – osnovni princip rada

Roleroni predstavljaju pomerljive aerodinamičke površine slične eleronima, na kojima je ugrađen prilično masivan ozubljen rotor (sa momentom inercije I_r), koji se obrće pod dejstvom vazdušne struje ugaonom brzinom Ω . Zahvaljujući činjenici da se rotor, zajedno sa aerodinamičkim površinama (eleronima), može otklanjati oko ose obrtanja elerona, on poseduje osobine diferencirajućeg žiroskopa, čija je funkcija smanjenje ugaone brzine valjanja. Obrtanje projektila oko uzdužne ose ugaonom brzinom $\dot{\gamma}$ izaziva otklanjanje rolerona za ugao δ_e . Pri datom otklonu javlja se momenat $M_h^{\delta_e} \delta_e$ i odgovarajuće ugaono ubrzanje $\ddot{\gamma}$, koje je u suprotnom smeru od $\dot{\gamma}$. Na taj način se smanjuje ugaona brzina projektila [1]. Osnovni princip rada rolerona prikazan je na sl. 1.

Jednačina kretanja rolerona može se izraziti u obliku:

$$I_e \frac{d^2 \delta_e}{dt^2} - M_h^{\delta_e} \frac{d\delta_e}{dt} - M_h^{\delta_e} \delta_e = -I_r \cdot \Omega \cdot \dot{\gamma} + M_h^\alpha \alpha \quad (1)$$

Ukoliko se pretpostavi da se otklanjanje rolerona može smatrati bezinercionim procesom, dobija se da za jedan roleron važi izraz:

$$I_r \cdot \Omega \cdot \dot{\gamma} = M_h^{\delta_e} \delta_e + M_h^\alpha \alpha \quad (2)$$

a za drugi:

$$-I_r \cdot \Omega \cdot \dot{\gamma} = -M_h^{\delta_e} \delta_e + M_h^\alpha \alpha \quad (3)$$

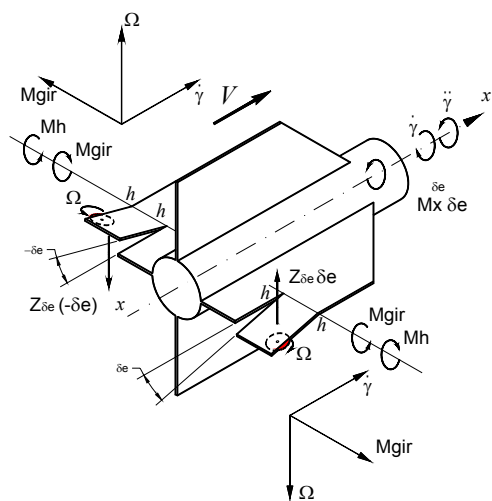
Odavde dobijamo:

$$K_a = \left(\frac{\delta_e}{\dot{\gamma}} \right)_{st} = \frac{I_r \cdot \Omega}{M_h^{\delta_e}} \quad (4)$$

Koeficijent K_a predstavlja faktor pojačanja automata stabilizacije – rolerona. Pošto Ω i $M_h^{\delta_e}$ zavise od dinamičkog pritiska, to koeficijent K_a skoro ne zavisi od visine i brzine leta. Faktor pojačanja rolerona zavisi od njegove konstrukcije, te je mogući dijapazon promena ograničen. Zadatak projektovanja sistema stabilizacije valjanja svodi se na racionalni izbor konstrukcije rolerona i aerodinamičkih karakteristika projektila. Zadovoljavajući rezultati mogu se dobiti primenom rolerona na srazmerno malim projektilima, koji lete u gušćim atmosferskim slojevima. Sam projektil ne sme posedovati velike poremećajne momente valjanja.

Iz jednačine (4) se može naći stvarni ugao otklona rolerona δ_e kao funkcija zadate ugaone brzine valjanja rakete $\dot{\gamma}$:

$$\delta_e = \frac{I_r \cdot \Omega \cdot \dot{\gamma}}{M_h^{\delta_e}} = \frac{I_r \cdot \Omega \cdot \dot{\gamma}}{q_\infty \cdot S_r \cdot C_{ar} \cdot C_{h\delta}} \quad (5)$$



Sl. 1 – Osnovni princip rada rolerona

Da bi se izračunao ugao otklona rolerona δ_e prema jednačini (5) potrebno je utvrditi ugaonu brzinu rotora rolerona Ω i koeficijent šarnirnog momenta $C_{h\delta}$ za razne vrednosti dinamičkog pritiska.

Proračun Ω teško je izvodljiv i može se samo eksperimentom utvrditi. Na osnovu eksperimentalnih merenja Ω i $C_{h\delta}$, prema jednačini (5), moguće je uspostaviti korelaciju između ugaone brzine projektila $\dot{\gamma}$ i ugla otklona rolerona δ_e .

Model polukrila sa roleronom

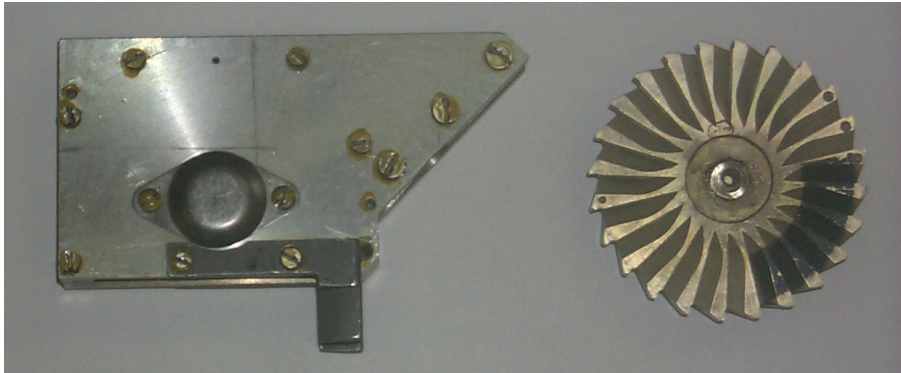
Ispitivani model sastojao se od cilindričnog trupa sa konusnim vrhom i jednog krila sa roleronom. Svi nabrojani delovi modela su originalne komponente rakete. Prečnik modela je 127 mm, a dužina modela 1200 mm. Model polukrila sa roleronom u radnom delu aerotunela T-38 prikazan je na sl. 2.

U strukturi polukrila nalazio se roleron sa ozubljenim rotorom (sl. 3). Konstrukcija rotora rolerona je komplikovana. Rotor se sastoji od kanala po obimu rotora, koji stvaraju rotaciju, i specijalno profilisanih zavojnih kanala ka centru rotacije, koji služe za hlađenje ležaja. Takođe, ispred rotora nalazi se usmerivač vazdušne struje – uvodnik koji je aerodinamički profilisan.

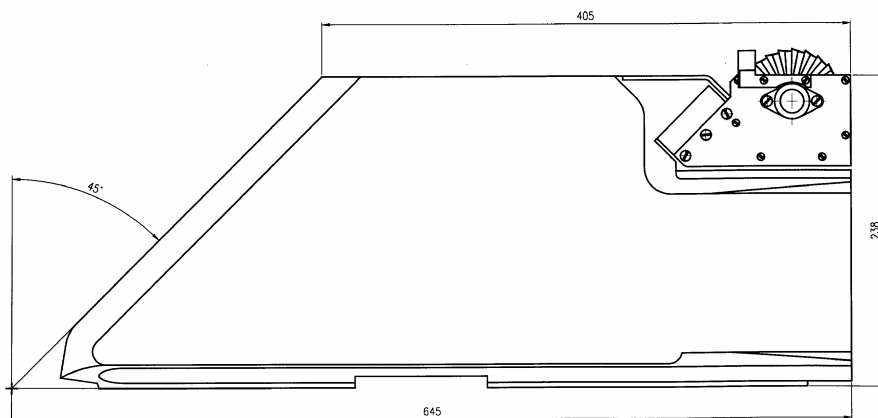
Za potrebe ispitivanja, na mestu gde se merio šarnirni moment, izrađen je nov nosač rolerona u kojem je smeštena trokomponentna aerovaga. Roleron je imao mogućnost diskretnog otklanjanja oko svoje šarnirne ose. Omogućeno je postavljanje rolerona na četiri pozicije definisanih otklona: 0° , 5° , 10° , 15° , koje su



Sl. 2 – Eksperimentalni model sa roleronom u radnom delu aerotunela T-38



Sl. 3 – Roleron sa ozubljenim rotorom



Sl. 4 – Polukrilo sa roleronom

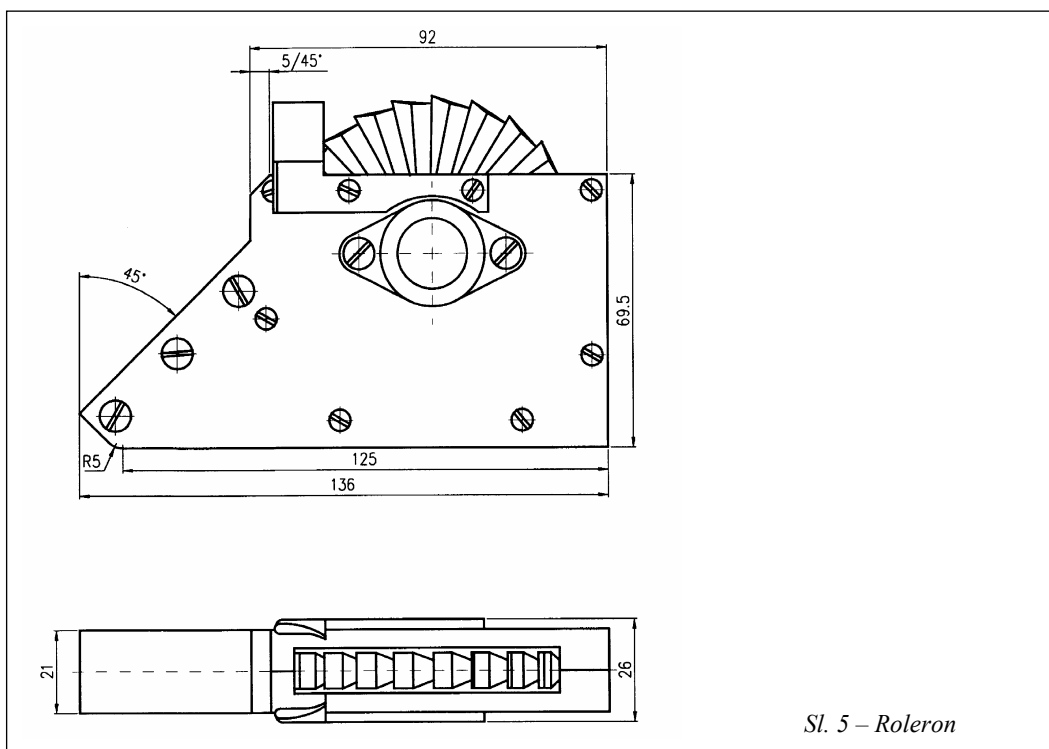
obezbeđene pomoću klinova. Otkloni rolerona definisani su kao pozitivni, ako se, posmatrano duž šarnirne ose, roleron otklanja suprotno od kretanja kazaljke na satu.

Skica polukrila sa roleronom sa osnovnim dimenzijama prikazana je na sl. 4, a skica rolerona sa osnovnim dimenzijama na sl. 5.

U modelu je bila smeštena šestokomponentna aerovaga, proizvođača ABLE, za merenje aerodinamičkih sila i

momenata na modelu. U nosaču rolerona bila je smeštena trokomponentna aerovaga za merenje aerodinamičkih sila i momenata na roleronu. Osa aerovage poklapala se sa šarnirnom osom rolerona. Na roleronu se nalazio optički davač za merenje broja obrtaja rotora.

Model je preko stinga bio postavljen na mehanizam za promenu napadnog ugla. Površina u planu modela bila je u skladu sa preporučenim odnosima s obzirom na površinu radnog dela aerotunela.



Sl. 5 – Roleron

Aerotunel T-38

Aerotunelsko postrojenje T-38 u Vojnotehničkom institutu je rafalnog tipa sa natpritiskom i radnim delom kvadratnog poprečnog preseka dimenzija $1,5 \text{ m} \times 1,5 \text{ m}$. Za podzvučna i nadzvučna ispitivanja koristi se radni deo sa glatkim zidovima, dok se za transonična ispitivanja u konfiguraciju ubacuje radni deo sa poroznim zidovima. Poroznost zidova se može menjati između 1,5% i 4%, zavisno od Mahovog broja, da bi se postigao najbolji kvalitet strujanja.

U radnom delu može se postići Mahov broj u intervalu 0,2 do 4,0, dok Reynoldsov broj može dostići 110 miliona/metru. U podzvučnoj konfiguraciji Mahov broj se podešava bočnim kopcima u difuzoru, a u nadzvučnoj konfiguraciji

postavljanjem odgovarajuće konture fleksibilnog mlaznika. U transoničnoj konfiguraciji Mahov broj se reguliše bočnim kopcima, konturom mlaznika i aktivno kontrolisanim sistemom odsisavanja kroz porozne zidove, a može se postaviti i regulisati u okviru 0,3% nominalne vrednosti.

Zaustavni pritisak u radnom delu može da se održava u intervalu 1,1 bar do 15 bara, u zavisnosti od Mahovog broja i regulisati u okviru 0,5% nominalne vrednosti.

Trajanje duvanja može biti od 6 s do 60 s, u zavisnosti od Mahovog broja i zaustavnog pritiska.

U radnom delu aerotunela model se preko repnog držača postavlja na mehanizam koji obezbeđuje kretanje po propinjanju i valjanju, tako da se mogu postići

željeni aerodinamički uglovi. Postrojenje omogućava kretanje modela u diskretnom i kontinualnom modu tokom merenja. Tačnost postavljanja modela na traženi položaj je $0,05^\circ$ po uglu propinjanja i $0,25^\circ$ po uglu valjanja.

Opis merenja i instrumentacije

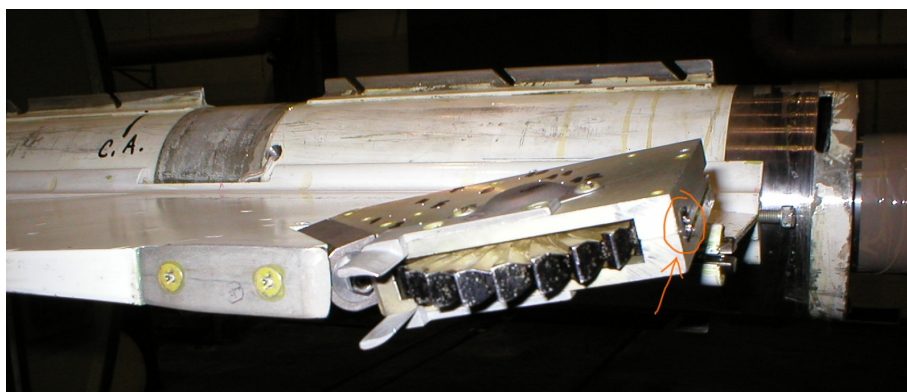
Merenje u aerotunelu izvedeno je u dve faze: merenje broja obrtaja rotora rolerona i merenje šarnirnog momenta, pomoću specijalno konstruisane aerovage koja je postavljena na mesto osovine koja nosi roleron.

Broj obrtaja ozubljenog rotora rolerona meri se optičkim davačem, postavljenim u blizini rotora rolerona (sl. 6). Optički davač davao je naizmenični signal čija je učestanost proporcionalna broju obrtaja rotora. Rotor rolerona ima 24 zupca, od kojih je 12 bilo obojeno u crno, a 12 je ostalo belo. Pri prolasku dela rotora sa crno obojenim zupcima pored optičkog davača on je davao signal, a pri prolasku dela sa belim zupcima signal sa davača bio je nulti. Jedna električna peri-

oda davača odgovarala je jednom obrtu rolerona. Da bi se odredila osetljivost davača i proverilo ispravno funkcionisanje izvedeno je preliminarno baždarenje.

Iza optičkog davača postavljen je frekventno-naponski pretvarač koji je dobijeni signal pretvarao u napon koji se merio. Usrednjavanjem naponskog signala u željenom segmentu uzimanja podataka i množenjem sa baždarnim koeficijentom dobijao se broj obrtaja rotora rolerona. Opseg davača je 1100 Hz, a tačnost frekventno-naponskog pretvarača je 0,3% punog opsega.

Izabrana je optimalna brzina uzimanja podataka. Ispitivanje je izvršeno bez promene napadnog ugla modela (model je bio na nultom napadnom uglu). Formiran je mod rada, koji je omogućio dvadesetak segmenata uzimanja podataka, pri čemu je dobijena vrednost broja obrtaja rolerona za svaki segment. Ukupno vreme trajanja rafala iznosilo je oko 16 s. Na taj način bilo je moguće pratiti ubrzavanje rotora rolerona, odnosno broj obrtaja u svakom segmentu tokom vremena duvanja.



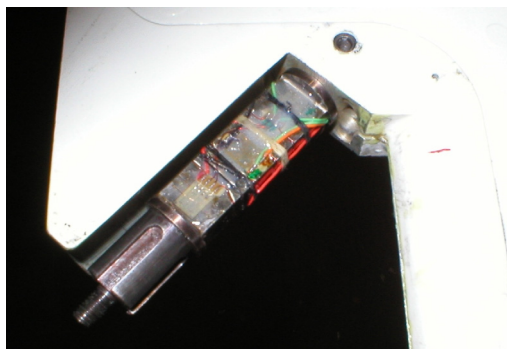
Sl. 6 – Optički davač u blizini rotora rolerona

Zbog velike površine polukrila i nepouzdanih veza na originalnim komponentama rakete i deo ispitivanja sa trokomponentnom aerovagom izvršen je bez promene napadnog ugla modela.

Aerodinamičke sile i momenti na roleronu mereni su specijalno konstruisanom unutrašnjom trokomponentnom aerovagom sa mernim trakama, sl. 7. Aerovaga je projektovana, proizvedena i izbaždarena u sektoru eksperimentalne aerodinamike [3]. Njen nominalni opseg za merenje normalne sile je 470 N, momenta valjanja (šarnirni moment rolerona) 20 Nm, a momenta propinjanja 20 Nm. Tačnost aerovage je približno 0,2% punog opsega.

Za potrebe ovog dela ispitivanja, prema originalnom nosaču rolerona napravljen je novi koji je omogućio prihvat trokomponentne aerovage i obezbeđivao postavljanje rolerona na željeni ugao otklona. Aerovaga je postavljena u novi nosač rolerona, tako da se osa aerovage poklapala sa šarnirnom osom rolerona. Veza aerovage sa krilom predviđena je i izvedena kao veza originalnog nosača rolerona i polukrila. Uparivanjem odgovarajućih žlebova na nosaču i aerovagi obezbeđena su četiri međusobna položaja, u skladu sa definisanim otklonima rolerona. Veza na tim mestima za svaki otklon rolerona ostvarena je pomoću klina, a pritezanje pomoću kontrnavrtke. Ispitivanje je izvršeno u istom modu rada kao i ispitivanje sa optičkim davačem.

Tokom ispitivanja korišćena je standardna merna oprema aerotunela T-38 za merenje parametara strujanja i položaja modela. Aerodinamičke sile i momenti na modelu mereni su unutrašnjom šestokomponentnom aerovagom ABLE 2,5 Mk XXV C sa mernim trakama. Nominalni



Sl. 7 – Trokomponentna aerovaga

opseg aerovage za merenje momenta valjanja je 565 Nm. Sistem za prikupljanje podataka sastojao se od 64-kanalnog sistema tipa TELEDYNE pod kontrolom PC računara. Podaci sa svih analognih kanala digitalizovani su AD konvertorom, zatim primani na računar ALPHA SERVER DS20E preko brzog prijemnika i zapisivani na disk za kasniju obradu.

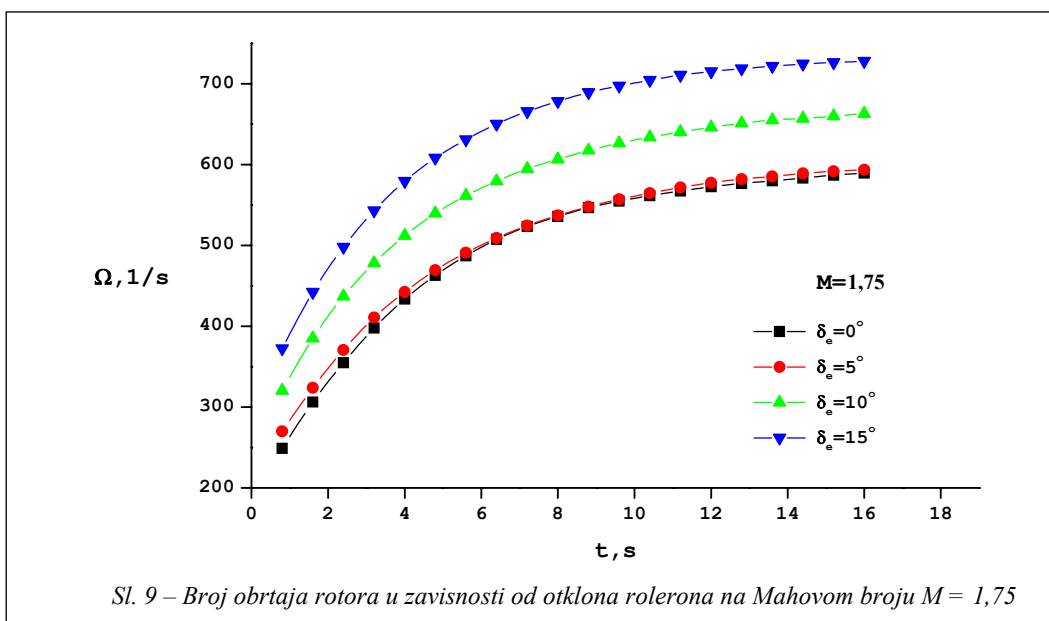
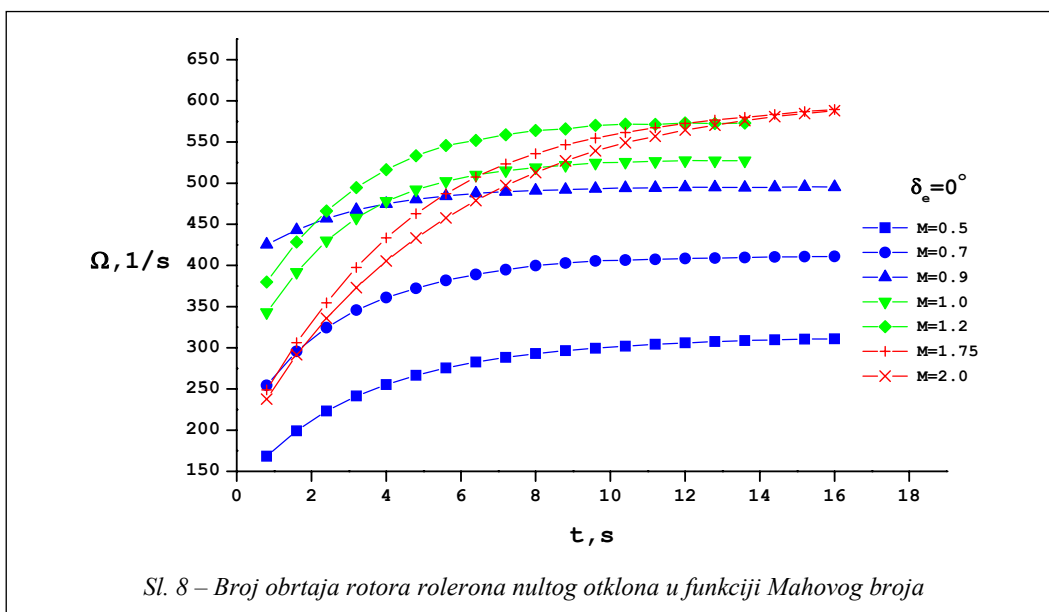
Rezultati merenja

Rezultati merenja prikazani su u tabelama i na dijagramima.

U prvom delu ispitivanja određen je broj obrtaja rotora rolerona na Mahovim brojevima od 0,5 do 2,0, pri ukupnom napadnom uglu modela 0° , uglu valjanja 0° i otklonima rolerona 0° , 5° , 10° i 15° . Određene su i aerodinamičke karakteristike modela polukrila sa roleronom [2].

U drugom delu ispitivanja određene su aerodinamičke karakteristike rolerona, prvenstveno koeficijent šarnirnog momenta, na Mahovim brojevima 0,5, 1,0 i 1,75 pri otklonima rolerona 0° , 5° , 10° i 15° [4].

Promena broja obrtaja rotora rolerona nultog otklona tokom vremena u funkciji Mahovog broja prikazana je na dijagramu na sl. 8.

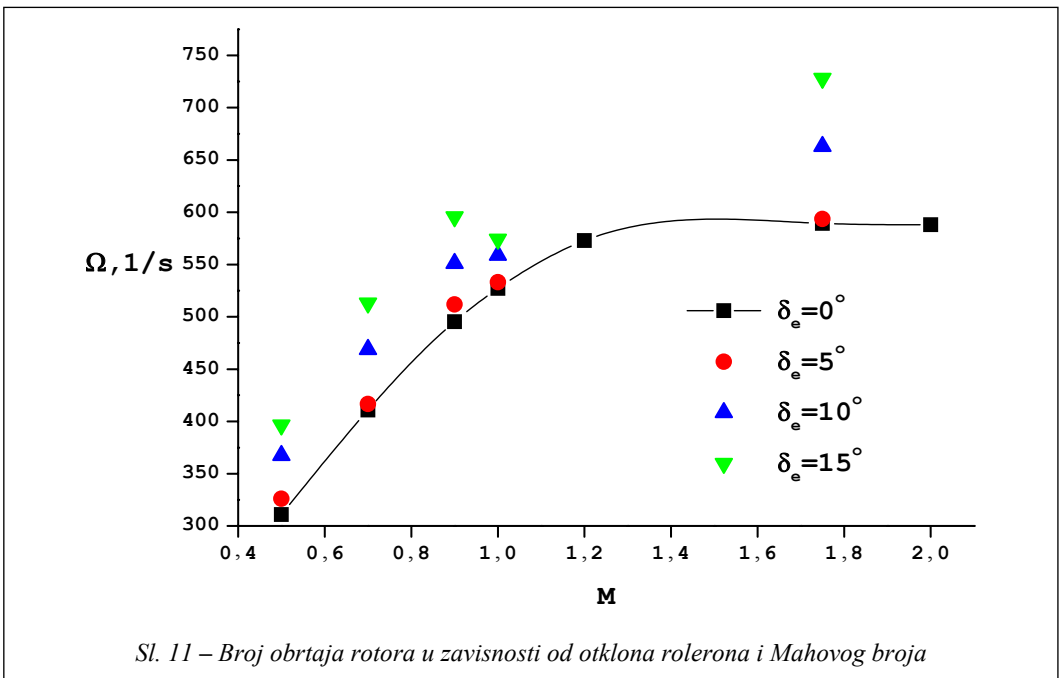
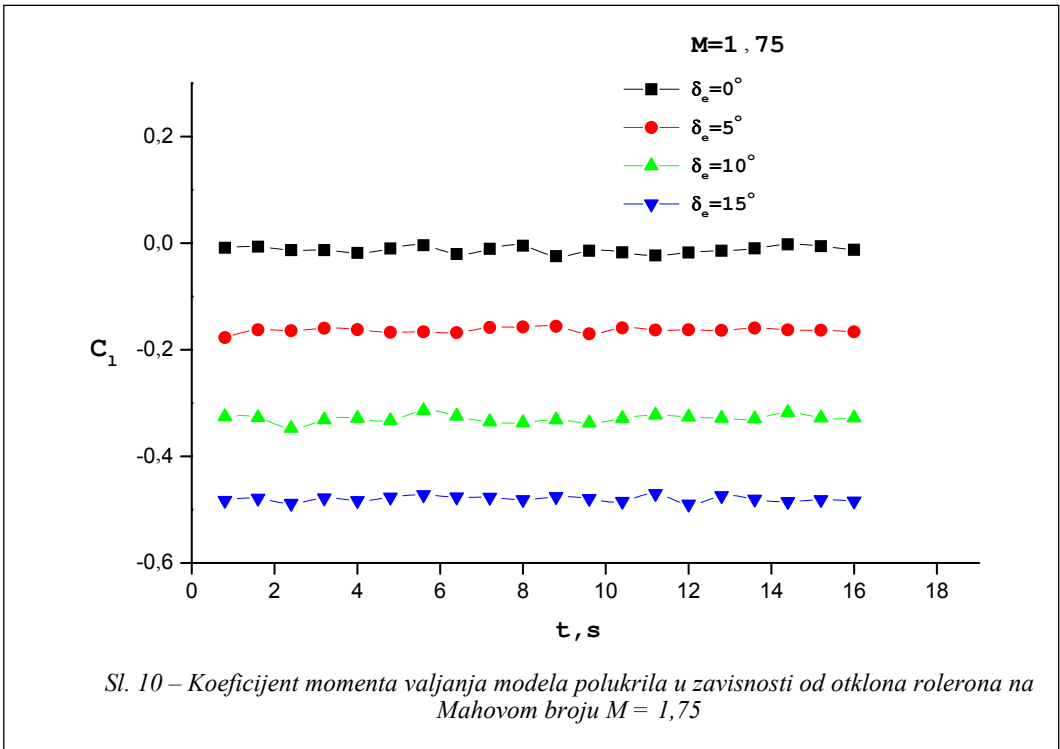


Promena broja obrtaja rotora rolerona tokom vremena u zavisnosti od otklona na izabranom Mahovom broju $M = 1,75$ prikazana je na dijagramu na sl. 9.

Promena koeficijenta momenta valjanja modela polukrila u zavisnosti od otklo-

na rolerona na Mahovom broju $M = 1,75$ prikazana je na dijagramu na sl. 10.

Maksimalno dostignuti broj obrtaja rotora tokom merenja u funkciji Mahovog broja i otklona rolerona prikazani su u tabeli 1 i na dijagramu na sl. 11.



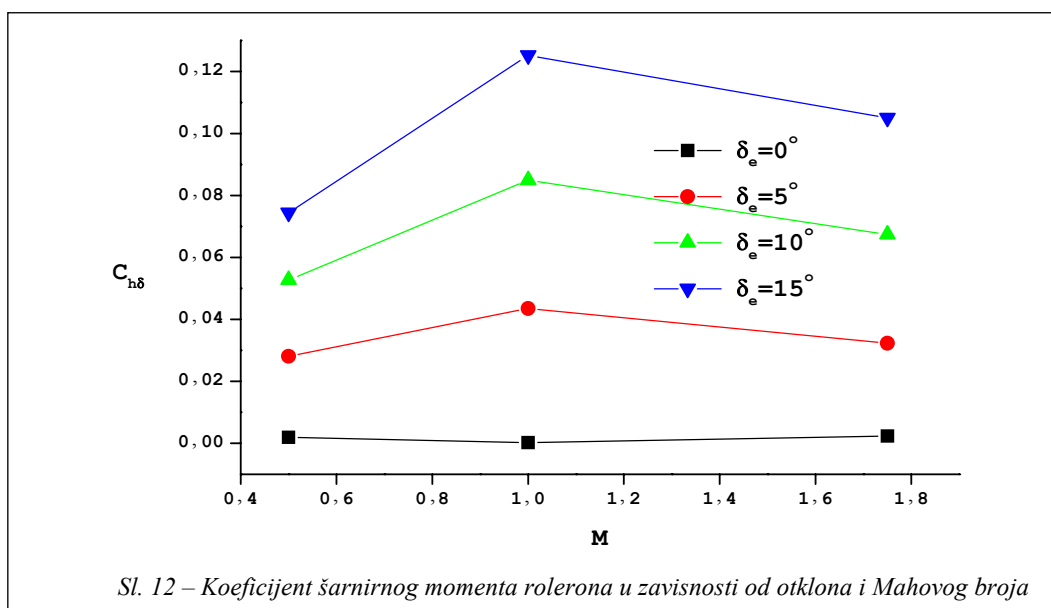


Tabela 1

δ_e	0°	5°	10°	15°
M	Broj obrtaja rotora rolerona $\Omega, 1/s$			
0,5	311	326,1	367,5	396,4
0,7	411	416,6	468,8	513
0,9	495,3	511,9	551,1	595,5
1,0	527,2	533,1	559	574,1
1,2	572,9	–	–	–
1,75	589,4	593,6	663	727,9
2,0	588	–	–	–

Rezultati merenja koeficijenta šarnirnog momenta rolerona u zavisnosti od otklona i Mahovog broja prikazani su u tabeli 2 i na dijagramu na sl. 12.

Tabela 2

δ_e	0°	5°	10°	15°
M	Koeficijent šarnirnog momenta rolerona $C_{h\delta}$			
0,5	0,0019	0,0281	0,0527	0,0744
1,0	0,0002	0,0435	0,0849	0,1252
1,75	0,0023	0,0323	0,0674	0,1050

Rezultati merenja koeficijenta momenta valjanja modela polukrila sa roleronom prikazani su u tabeli 3 i na dijagramu na sl. 13.

Tabela 3

δ_e	0°	5°	10°	15°
M	Koeficijent momenta valjanja modela polukrila C_l			
0,5	-0,0505	-0,2786	-0,5411	-0,7224
1,0	-0,0248	-0,2991	-0,5799	-0,8342
1,75	-0,0236	-0,1733	-0,3092	-0,4533

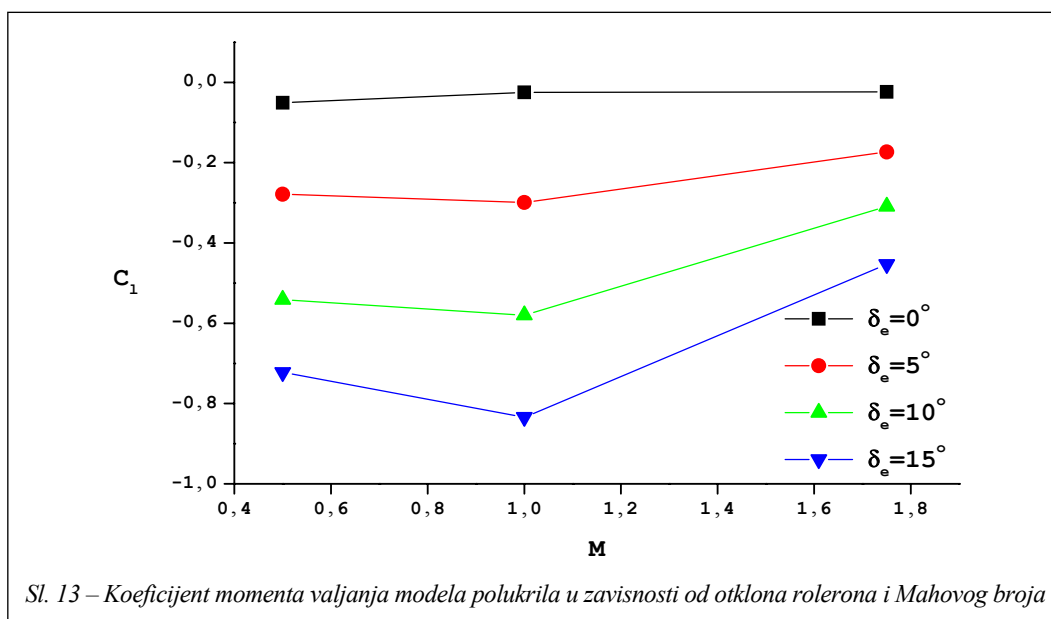
Zaključak

Na osnovu sprovedenih merenja broja obrtaja rolerona i koeficijenta šarnirnog momenta, prema jednačini (5), moguće je uspostaviti korelaciju između ugaone brzine projektila i ugla otklona rolerona.

Dobijeni rezultati merenja pokazuju da je maksimalan broj obrtaja rotora oko 730/s na Mahovom broju 1,75 i pri otklonu rolerona od 15°.

Koeficijent šarnirnog momenta rolerona je maksimalan na Mahovom broju 1,0, pri otklonu rolerona od 15°.

Efekat smanjenja ugaone brzine valjanja modela sa povećanjem ugla otklona rolerona potvrđen je merenjem momenta valjanja.



Sl. 13 – Koeffcijent momenta valjanja modela polukrila u zavisnosti od otklona rolerona i Mahovog broja

Dobijeni rezultati merenja pokazali su dobro slaganje sa podacima dobijenim od naručioca ispitivanja koji su rezultat preliminarnog teorijskog proračuna.

Pri budućem projektovanju sličnih projektila koji koriste rolerone, kao prihvaćena rešenja za stabilizaciju ugaone brzine valjanja, eksperimentalna aerodinamika Vojnotehničkog instituta može da podrži zadatak u pogledu merenja broja obrtaja i aerodinamičkih karakteristika rolerona, kao i projektovanja i izrade neophodne merne opreme.

Korišćene oznake:

M – Mahov broj u radnom delu aerotunela T-38

q – dinamički pritisak u radnom delu

δ_e – ugao otklona rolerona

S_r – površina rolerona

C_{ar} – srednja aerodinamička tetiva rolerona

$C_{h\delta}$ – statički derivativ koeffcijenta šarnirnog momenta po otklonu rolerona

C_1 – koeffcijent momenta valjanja

I_r – moment inercije rotora rolerona

I_e – moment inercije rolerona

Ω – ugaona brzina rolerona

$\dot{\gamma}$ – ugaona brzina rakete oko uzdužne ose

$\ddot{\gamma}$ – ugaono ubrzanje rakete oko uzdužne ose

K_a – faktor pojačanja automata stabilizacije rolerona

M_h – šarnirni moment rolerona

M_{gi} – žiroskopski moment rolerona

M_x – moment valjanja projektila

Z – sila uzgona rolerona

V – brzina

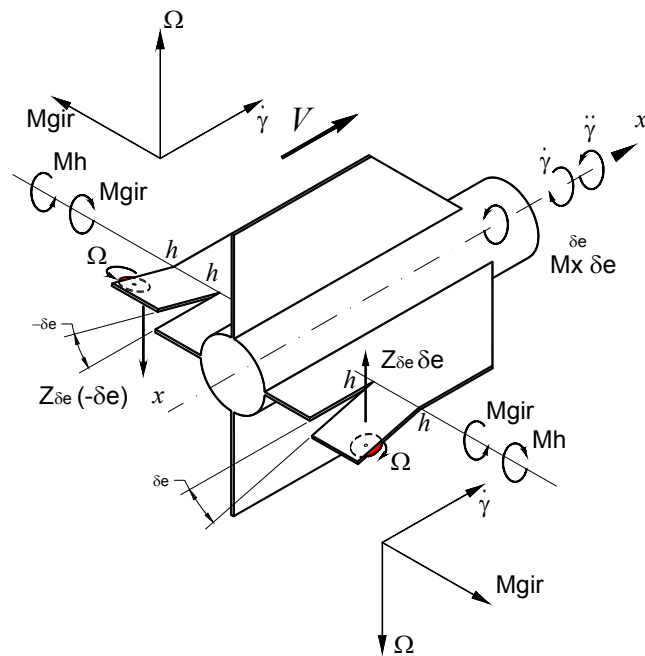
h – šarnirna osa

x – uzdužna osa projektila

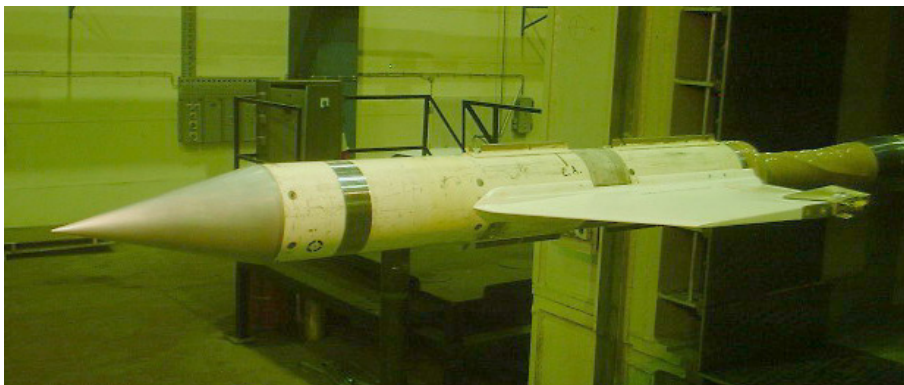
∞ – oznaka za parametre neporemećenog strujanja.

Literatura:

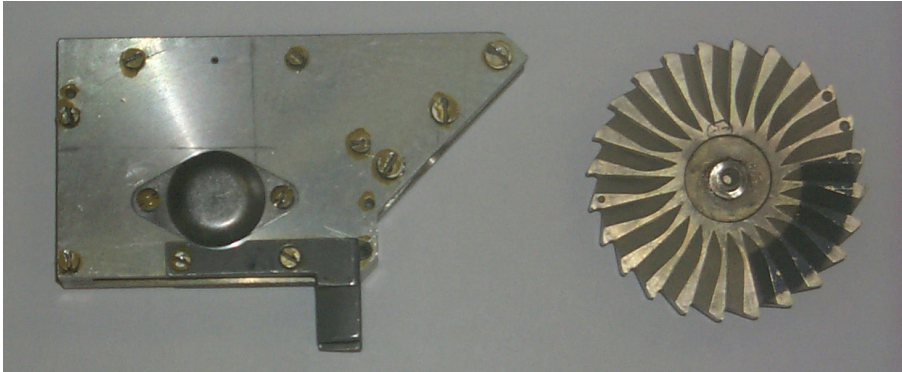
- [1] Minović, S.: Dinamika sistema vođenja i upravljanja projektila.
- [2] Damljanović, D., Vitić, A.: Ispitivanje modela polukrila sa roleronom na Mahovim brojevima 0,5 do 2,0 u aerotunelu T-38, Vojnotehnički institut, interni izveštaj, 2005.
- [3] Marinkovski, D., Damljanović, D.: Proračun i baždarenje trokomponentne aerovage za ispitivanje rolerona, Vojnotehnički institut, interni izveštaj, 2005.
- [4] Damljanović, D.: Ispitivanje rolerona pomoću trokomponentne aerovage na Mahovim brojevima 0,5, 1,0 i 1,75 u aerotunelu T-38, Vojnotehnički institut, interni izveštaj, 2005.



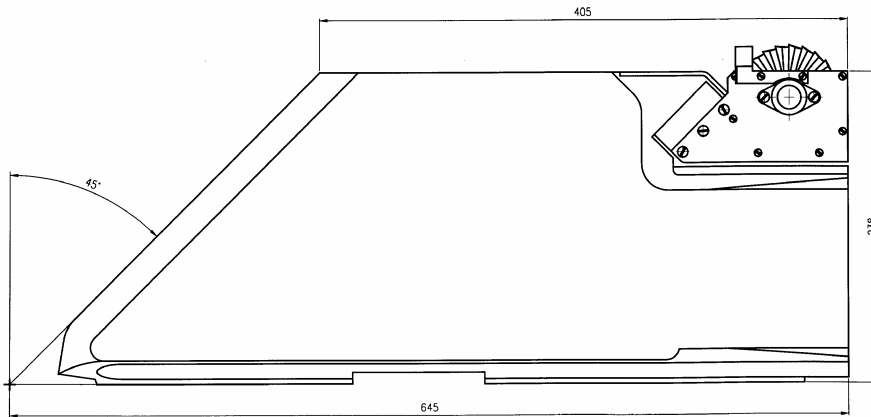
Sl. 1 – Osnovni princip rada rolerona



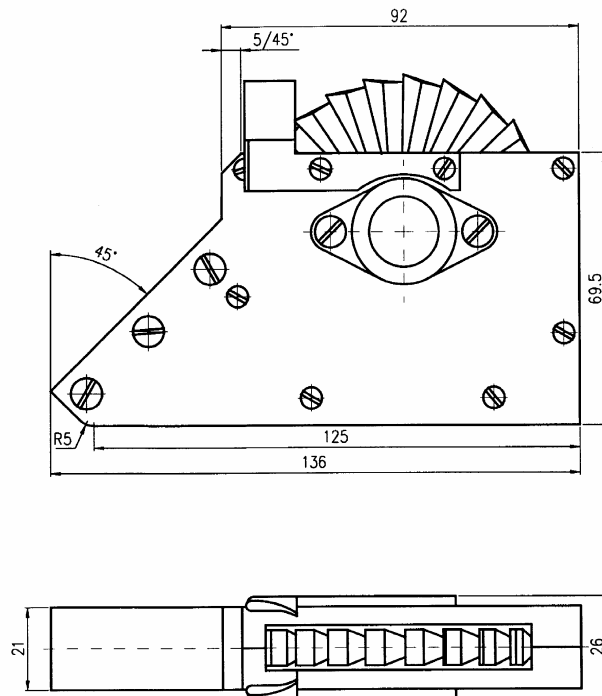
Sl. 2 – Eksperimentalni model sa roleronom u radnom delu aerotunela T-38



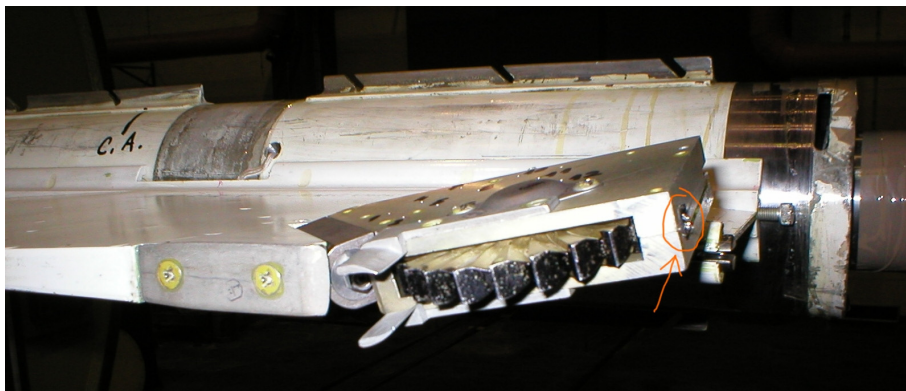
Sl. 3 – Roleron sa ozubljenim rotorom



Sl. 4 – Polukrilo sa roleronom



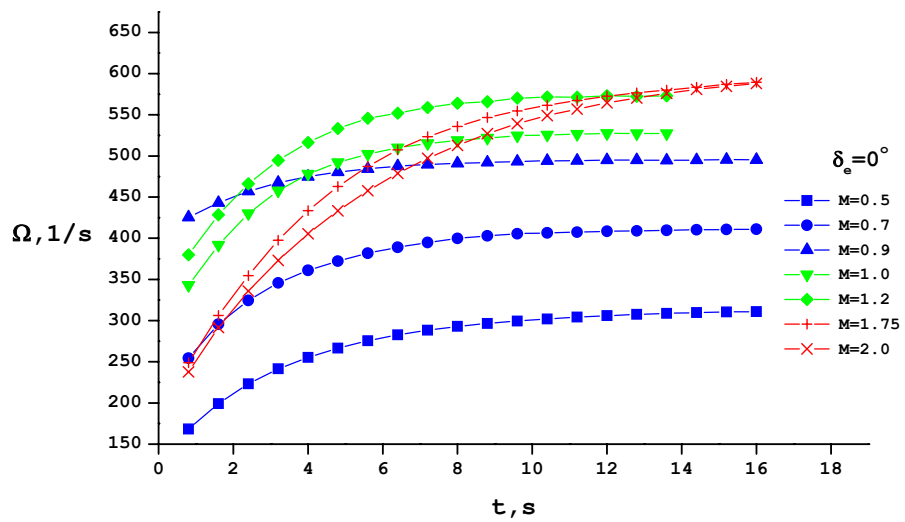
Sl. 5 – Roleron



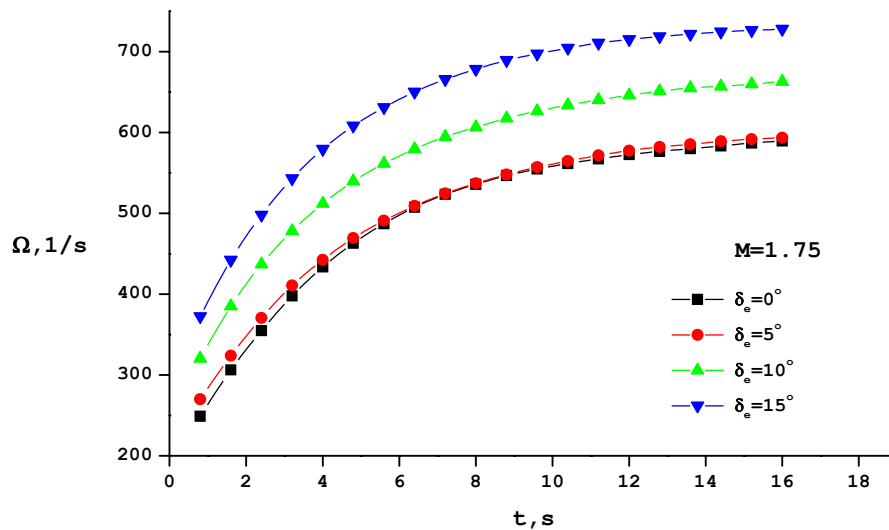
Sl. 6 – Optički davač u blizini rotora rolerona



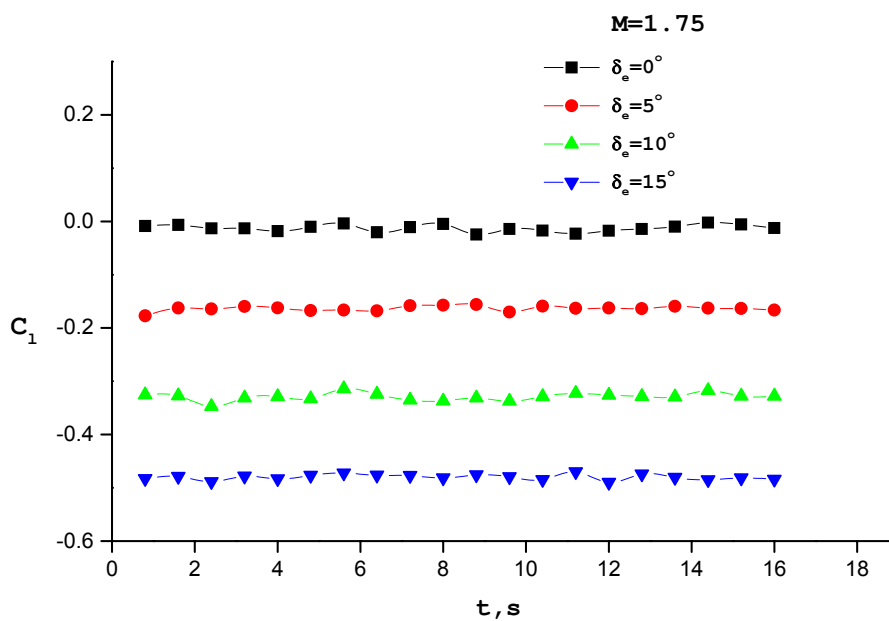
Sl. 7 – Trokomponentna aerovaga



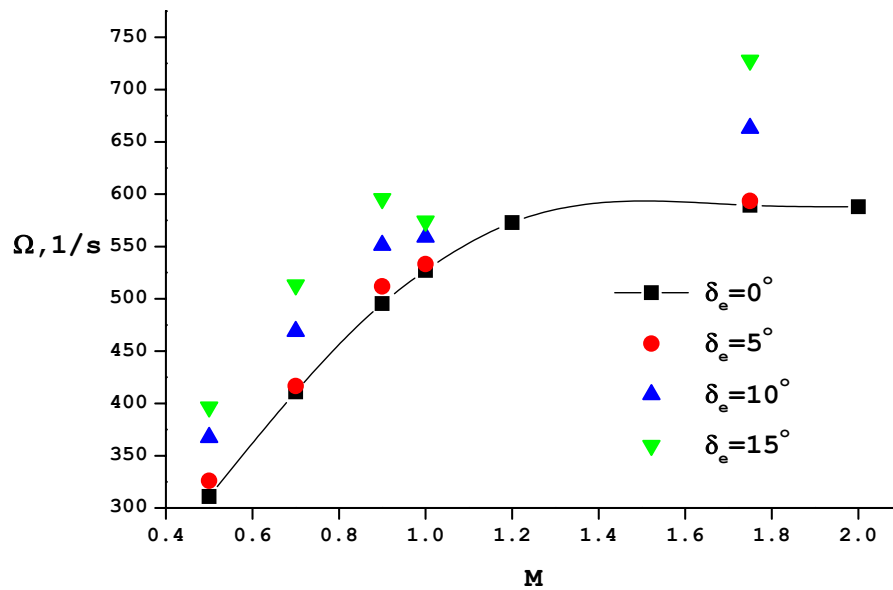
Sl. 8 – Broj obrtaja rotora rolerona nultog otklona u funkciji Mahovog broja



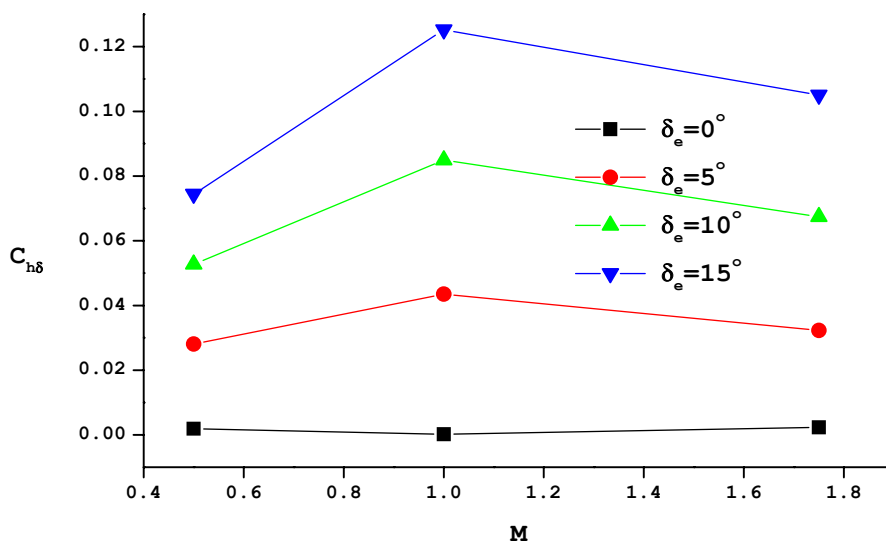
Sl. 9 – Broj obrtaja rotora u zavisnosti od otklona rolerona na Mahovom broju $M = 1,75$



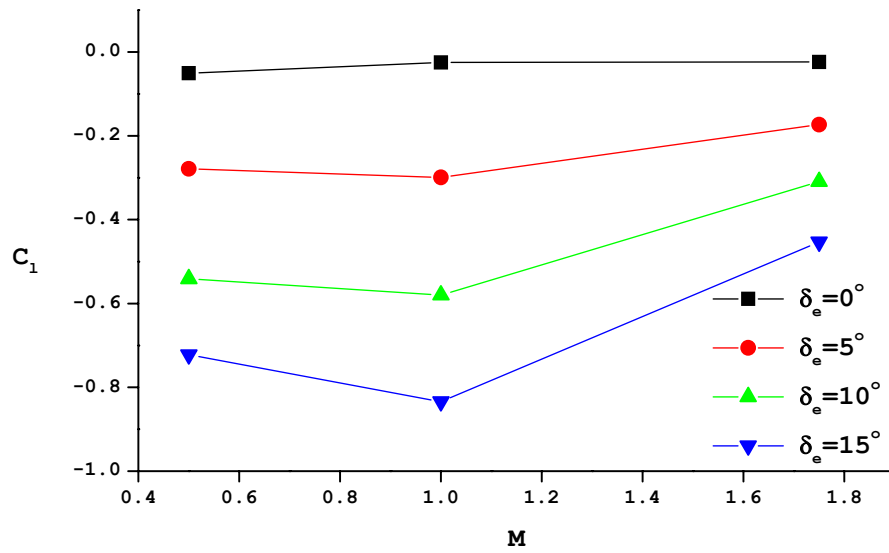
Sl. 10 – Koeffcijent momenta valjanja modela polukrila u zavisnosti od otklona rolerona na Mahovom broju $M = 1,75$



Sl. 11 – Broj obrtaja rotora u zavisnosti od otklona rolerona i Mahovog broja



Sl. 12 – Koficijent šarnirnog momenta rolerona u zavisnosti od otklona i Mahovog broja



Sl. 13 – Koeffcijent momenta valjanja modela polukrila u zavisnosti od otklona rolerona i Mahovog broja