

Merenje aerodinamičkih derivativa stabilnosti sila u trisoničnom aerotunelu

Mr Zoran Anastasijević, dipl.inž.¹⁾
Dragan Marinkovski, dipl.inž.¹⁾

U okviru aerodinamičkih istraživanja u VTI VJ, mereni su derivativi stabilnosti duže od dvadeset godina. Istraživanja su pokazala da je neophodno obezbediti mogućnost prevođenja aerodinamičkih derivativa stabilnosti momenata iz tačke u kojoj je izvršeno merenje u novu, izabranu tačku, kao i da je potrebno meriti aerodinamičke derivativne sila. Opisana je procedura koja omogućava da se postojeći uređaji za merenje aerodinamičkih derivativa stabilnosti momenata koriste i za određivanje aerodinamičkih derivativa sila Y i Z .

Ključne reči: Eksperimentalna aerodinamika, aerotunelska ispitivanja, dinamički derivativi stabilnosti, metoda merenja.

Korišćene oznake i simboli

X, Y, Z	- sile duž $x, y, i z$ ose,
L, M, N	- momenti oko $x, y i z$ ose,
p, q, r	- ugaone brzine oko $x, y i z$ ose,
ϕ, θ, ψ	- ugaona pomeranja oko $x, y i z$ ose,
u, v, w	- linearne brzine duž $x, y i z$ ose,
α	- napadni ugao,
β	- ugao klizanja,
η	- fazni stav,
V	- brzina neporemećene struje,
ω	- kružna učestanost,
Z_α	- statički derivativ sile Z usled promena α ,
$Z_q + Z_{\dot{\alpha}}$	- derivativ sile Z usled promene ugaone brzine u propinjanju q ,
$-Z_\beta \cdot \cos \alpha$	- statički derivativ sile Z usled promene β ,
$Z_r - Z_\beta \cdot \cos \alpha$	- derivativ sile Z usled promene ugaone brzine u skretanju r ,
$Z_\beta \cdot \sin \alpha$	- statički derivativ sile Z usled promene ugaone brzine u valjanju p
$Z_p + Z_\beta \cdot \sin \alpha$	- derivativ sile Z usled promene ugaone brzine u valjanju p ,
Y_α	- statički derivativ sile Y usled promene α ,
$Y_q + Y_{\dot{\alpha}}$	- derivativ sile Y usled promene ugaone brzine u propinjanju q ,
$-Y_\beta \cdot \cos \alpha$	- statički derivativ sile Y usled promene β ,
$Y_r - Y_\beta \cdot \cos \alpha$	- derivativ sile Y usled promene ugaone brzine u skretanju r ,
$Y_\beta \cdot \sin \alpha$	- statički derivativ sile Y usled promene β i
$Y_p + Y_\beta \cdot \sin \alpha$	- derivativ sile Y usled promene ugaone brzine u valjanju p .

Uvod

VOJNOTEHNIČKI institut VJ je tokom osamdesetih godina, za potrebe razvoja nadzvučnog aviona, projektovao, izradio i pustio u rad uređaje za merenje dinamičkih derivativa stabilnosti. Izrađeni su uređaji za merenje dinamičkih derivativa stabilnosti sila i momenata za aerotunele T-35 i T-38. Za svaki aerotunel su urađena po dva kompleta uređaja. Jedan komplet obuhvata uređaje koji mere dinamičke derivativne stabilnosti u propinjanju/skretanju i uređaj koji meri dinamičke derivativne stabilnosti u valjanju.

Prethodno je razvijena metoda merenja, koja je bila osnov za projekat uređaja i izradu softvera, obradu rezultata merenja sa uređaja i izračunavanje dinamičkih derivativa stabilnosti momenata.

Tokom korišćenja uređaja za merenje dinamičkih derivativa stabilnosti momenata u aerotunelu T-38, pokazala se potreba za poznavanjem dinamičkih derivativa stabilnosti sila.

Opis uređaja za merenje derivativa stabilnosti u aerotunelu T-38

Opis uređaja za merenje derivativa stabilnosti u propinjanju/skretanju

Na sl.1 je dat izgled uređaja za merenje derivativa stabilnosti u propinjanju/skretanju. Noseći sistem se sastoji od para unakrsnih elastičnih šarnirnih elemenata (2) koji obezbeđuju oscilatorno kretanje u propinjanju ili skretanju zavisno od položaja modela u odnosu na aerovagu (1). Primarno oscilatorno kretanje se obezbeđuje pomoću

¹⁾ Vojnotehnički institut VJ, 11000 Beograd, Katanićeva 15

hidrauličkog pogonskog mehanizma. Klip (4) se pomera i predaje pogonsku silu pobuđivačkoj poluzi. Prednji deo pobuđivačke poluge je čvrsto vezan za pokretni deo unakrsnog elastičnog šarnira. Unakrsni elastični šarnirni element i cilindar su izrađeni iz jednog dela sa stingom. Pobuđivačka poluga je opremljena mernim trakama i kalibrisana da meri pobuđivački moment, koji deluje na pokretni sistem uređaj-model.

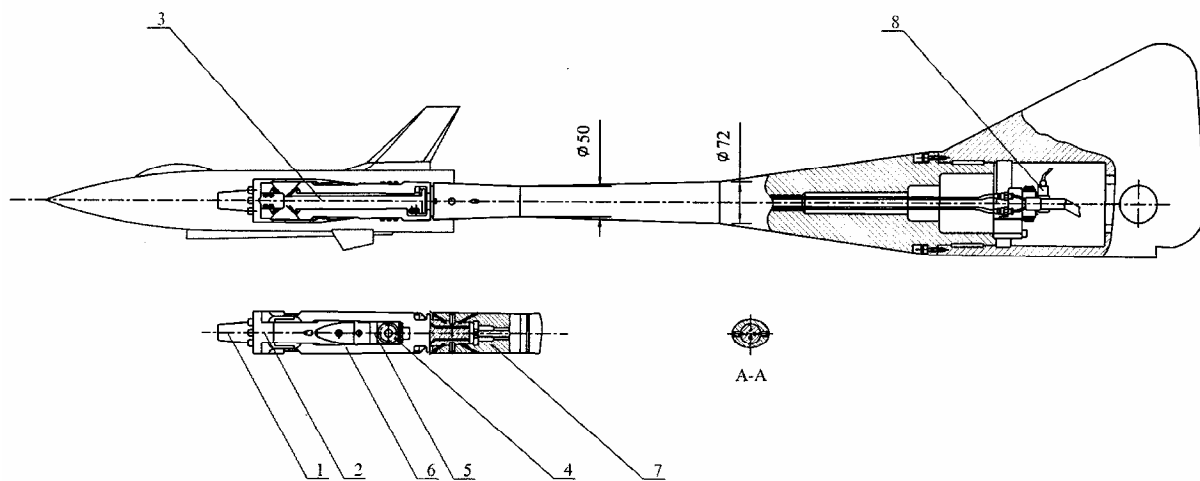
Aerodinamičko opterećenje u sekundarnim ravnima se meri unutrašnjom petokomponentnom aerovagom, koja je vezana za unutrašnjost pobuđivačke poluge.

Karakteristike uređaja za merenje derivativa stabilnosti u propinjanju/skretanju su: amplituda $0.25^{\circ} - 1.5^{\circ}$; frekvencija (1.0 – 15.0)Hz; prečnik stinga: 76 mm; pritisak u hidrauličkoj instalaciji: 140 bara; maksimalna normalna sila: 1000 N; maksimalni napadni ugao: 21° ; Mahov broj 2.0 i pritisak duvanja u aerotunelu T-38 2.3 bara.

Opis uređaja za merenje derivativa stabilnosti u valjanju

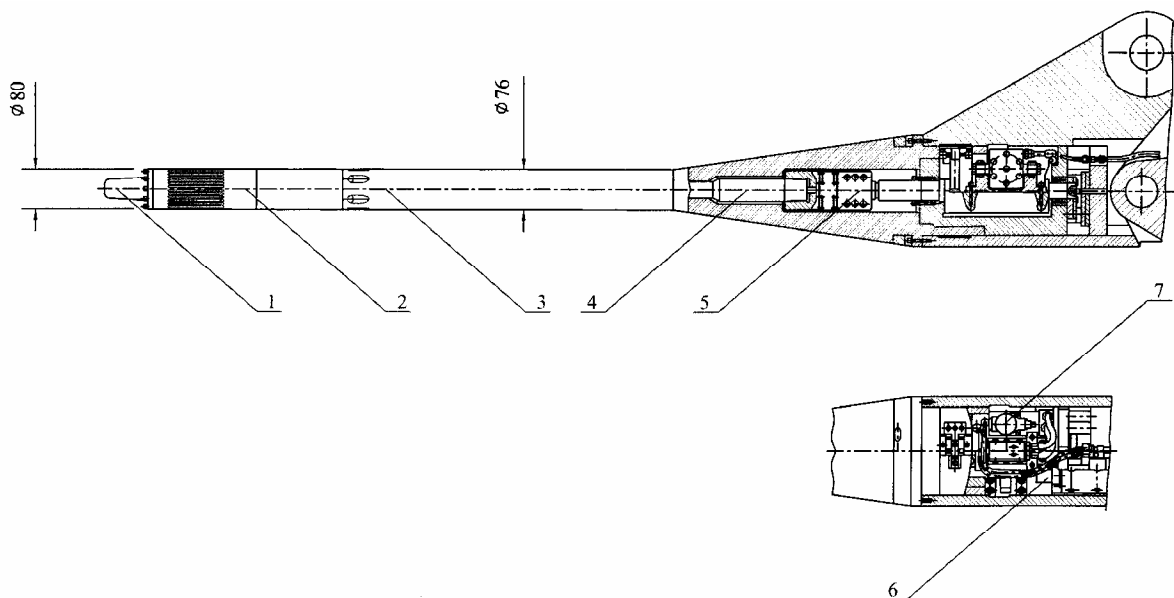
Na sl.2 je dat izgled uređaja za merenje derivativa stabilnosti u valjanju. Noseći sistem, elastični torzioni šarnir (2), sastoji se od dva prstena koji su spojeni sa aksijalno usmerenim lamelama rapoređenim po obodu prstenova. Data su dva noseća sistema: za niska i visoka opterećenja. Ovakva konfiguracija obezbeđuje oscilatorno kretanje u valjanju dok se u ostalim ravnima obezbeđuje visoka krutost. Prednji kraj pogonskog vratila (4) je čvrsto vezan za prednji kraj elastičnog torzionog šarnira. Zadnji kraj pogonskog vratila preko elastične spojnice (5) je vezan za hidraulički pogonski mehanizam. Petokomponentna aerovaga (1) je postavljena unutar prednjeg kraja pogonskog vratila.

Primarno oscilatorno kretanje se ostvaruje pomoću hidrauličkog pogonskog mehanizma. Konzola sa mernim trakama je postavljena između zadnjeg kraja pogonskog



Slika 1. Uređaj za merenje derivativa stabilnosti u propinjanju-skretanju

1- aerovaga, 2- pobuđivačka poluga, 3- lamela za promenu krutosti, 4- klip, 5- davač položaja, 6- telo uređaja sa šarnirnim elementom, 7- nosač, 8- servorazvodnik



Slika 2. Uređaj za merenje derivativa stabilnosti u valjanju

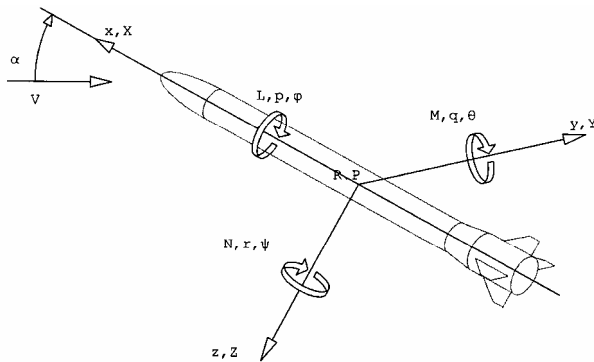
1- aerovaga, 2- torzioni šarnir, 3- nosač uređaja, 4- pobuđivačko vratilo, 5- elastična spojnica, 6- davač položaja, 7- servorazvodnik

vratila i hidrauličkog pogonskog mehanizma i meri oscilatorno kretanje u valjanju. Pobudni moment u valjanju se meri mernim trakama koje su postavljene na pogonskom vratilu.

Karakteristike uređaja za merenje derivativa stabilnosti u valjanju su: amplituda 0.25° – 1.5° ; frekvencija (1.0–15.0) Hz; prečnik stinga 50x70 mm, elipsa; pritisak u hidrauličnoj instalaciji 200 bara, maksimalna normalna sila 1000 N; maksimalni napadni ugao 21° ; Mahov broj 2.0 i pritisak duvanja u aerotunelu T-38 2.3 bara.

Aerodinamičke sile nastale pri oscilatornom kretanju modela oko nepokretne ose dinamičkog koordinatnog sistema

Korišćena tehnika merenja nazvana je "Metoda krutih prinudnih oscilacija" [1]. Po ovoj metodi merenja model je prinuđen da vrši ugaono oscilatorno kretanje oko nepokretne ose koordinatnog sistema prikazanog na sl.3. Oscilatorno kretanje se vrši konstantnom amplitudom i umerenom učestanošću. Uređaji za merenje derivativa stabilnosti omogućuju oscilovanje modela u jednom stepenu slobode. Primarno oscilatorno kretanje može biti ili u ravni propinjanja ili u ravni skretanja, ili u ravni valjanja. Tokom eksperimenta meri se položaj modela (θ ili ψ ili ϕ), pobudni moment koji izaziva oscilatorno kretanje sistema uređaj-model (M_T ili N_T ili L_T) i petkomponentni saerovage (Y, Z, L, M, N).



Slika 3. Ugaono oscilatorno kretanje oko nepokretne ose koordinatnog sistema

Aerodinamičke reakcije, koje meri petokomponentna aerovaga, koherentne su sa primarnim oscilatornim kretanjem. To znači, da je učestanost aerodinamičkih reakcija jednaka učestanosti primarnog oscilatornog kretanja, a oscilatorno kretanje u sekundarnim ravnima je fazno pomerenom u odnosu na primarno kretanje. Još jedna važna činjenica, koja je karakteristika procesa nastalog oscilovanjem modela, je da su aerodinamičke reakcije isključivo posledica primarnog oscilatornog kretanja.

Procedura merenja zahteva da se vrše dva merenja: merenje kad aerotunel radi i merenje kad aerotunel ne radi, kada se određuju suvišni uticaji. Aerodinamički deo se dobija kada se od merenja kad aerotunel radi oduzme merenje kad aerotunel ne radi.

Aerodinamičke sile Y i Z se dobijaju kao funkcije zavisnih promenljivih ($R_e, M, \alpha, \beta, u, v, w, p, q, r, \dot{\alpha}, \dot{\beta}$) razvijanjem u Tajlorov red [2]. Članovi višeg reda se zanemaruju u skladu sa pretpostavkom da su poremećaji iz ravnotežnih uslova mali, pa je sinus poremećajnog ugla

jednak samom uglu, a kosinus poremećajnog ugla je jednak jedinici. Proizvodi i kvadrati poremećajnih veličina su zanemarljivi u odnosu na samu poremećajnu veličinu.

Sve navedene pretpostavke ograničavaju primenu ove metode na slučaj malih poremećaja. Po teoriji, linearizacija je primenjiva samo za infinitezimalne poremećaje iz ravnotežnih uslova, ali praktično iskustvo pokazuje da se dovoljno tačni rezultati mogu dobiti i za konačne vrednosti poremećaja.

Pored navedenih pretpostavki, uvedene su i pretpostavke da model ima ravan simetrije i da su upravljачke površine modela nepokretne tokom merenja.

Ravnotežni uslovi modela su definisani napadnim uglom α i uglom klizanja β . Oko navedenih ravnotežnih uslova model se oscilatorno kreće u jednom stepenu slobode. Oscilatorno kretanje modela je sa malim amplitudama i pri niskoj učestanosti. Aerodinamičke sile koje deluju na model izražavaju se kao zbir doprinosa prouzrokovanih preko:

- ugaonih pomeraja α i β ,
- izvoda po vremenu ugaonih pomeraja $\dot{\alpha}$ i $\dot{\beta}$ i
- ugaonih brzina p, q i r .

Nije neophodno da se uključe odvojeni doprinosi prouzrokovani pomeranjem u valjanju. Pri nultom napadnom uglu, aerodinamičke reakcije su nezavisne od ugla valjanja. Pri napadnom uglu različitom od nule i za male vrednosti ugla valjanja, uticaj pomeranja u valjanju se može izraziti kao modifikacija stvarne vrednosti ugla klizanja, dok napadni ugao približno ostaje nepromenjen.

U dinamičkom koordinatnom sistemu veza između α, β, ψ i ϕ je data u obliku :

$$\sin \beta = \sin \alpha \cdot \sin \phi \cdot \cos \psi - \cos \alpha \cdot \sin \psi \quad (1)$$

Za male vrednosti uglova β, ϕ i ψ sledi da je :

$$\sin \phi \cong \phi, \quad \sin \psi \cong \psi, \quad \cos \psi \cong 1, \quad \sin \beta \cong \beta$$

tako da je:

$$\beta = \phi \cdot \sin \alpha - \psi \cdot \cos \alpha \quad (2)$$

Promene aerodinamičkih reakcija usled oscilatornog kretanja modela oko osa dinamičkog koordinatnog sistema su:

$$Y = \frac{\partial Y}{\partial \alpha} \cdot \alpha + \frac{\partial Y}{\partial \beta} \cdot \beta + \frac{\partial Y}{\partial \dot{\alpha}} \cdot \dot{\alpha} + \frac{\partial Y}{\partial \dot{\beta}} \cdot \dot{\beta} + \frac{\partial Y}{\partial p} \cdot p + \frac{\partial Y}{\partial q} \cdot q + \frac{\partial Y}{\partial r} \cdot r \quad (3)$$

$$Z = \frac{\partial Z}{\partial \alpha} \cdot \alpha + \frac{\partial Z}{\partial \beta} \cdot \beta + \frac{\partial Z}{\partial \dot{\alpha}} \cdot \dot{\alpha} + \frac{\partial Z}{\partial \dot{\beta}} \cdot \dot{\beta} + \frac{\partial Z}{\partial p} \cdot p + \frac{\partial Z}{\partial q} \cdot q + \frac{\partial Z}{\partial r} \cdot r \quad (4)$$

Pošto model u aerotunelu vrši oscilatorno kretanje oko nepokretne ose, važe sledeće relacije:

$$\begin{aligned} \alpha &= \theta \\ \dot{\phi} &= p \\ \dot{\alpha} &= q \\ \dot{\psi} &= r \end{aligned} \quad (5)$$

Prvi izvod po vremenu izraza (2) je:

$$\dot{\beta} = \dot{\phi} \cdot \sin \alpha - \dot{\psi} \cdot \cos \alpha = p \cdot \sin \alpha - r \cdot \cos \alpha \quad (6)$$

Kada se izrazi (2 i 6) i relacije (5) uvrste u jednačine (3 i 4), dobija se:

$$Y = Y_{\alpha} \cdot \theta + (Y_q + Y_{\dot{\alpha}}) \cdot q - Y_{\beta} \cdot \psi \cdot \cos \alpha + (Y_r - Y_{\dot{\beta}} \cdot \cos \alpha) \cdot r + Y_{\beta} \cdot \phi \cdot \sin \alpha + (Y_p + Y_{\dot{\beta}} \cdot \sin \alpha) \cdot p \quad (7)$$

$$Z = Z_{\alpha} \cdot \theta + (Z_q + Z_{\dot{\alpha}}) \cdot q - Z_{\beta} \cdot \psi \cdot \cos \alpha + (Z_r - Z_{\dot{\beta}} \cdot \cos \alpha) \cdot r + Z_{\beta} \cdot \phi \cdot \sin \alpha + (Z_p + Z_{\dot{\beta}} \cdot \sin \alpha) \cdot p \quad (8)$$

Zbog zahteva da uređaj poseduje visoku krutost u sekundarnim ravnima, aerovaga ne sme da ima element za merenje aksijalne sile X . Element za silu X bi mnogo snizio krutost aerovage što bi dovelo do većih deformacija u sekundarnim ravnima, a što je u suprotnosti sa početnim pretpostavkama.

Strogo gledajući, jednačine (7) i (8) važe samo za male vrednosti ugla klizanja i male vrednosti amplitude oscilovanja.

Aerodinamički derivativi stabilnosti sila

Derivativi stabilnosti sile Z usled promene ugaone brzine u propinjanju q

Kako je napisano u prethodnom poglavlju, aerodinamičke reakcije koje se mere u sekundarnim ravnima su koherentne sa primarnim oscilatornim kretanjem i isključivo nastaju usled tog kretanja.

Primarno oscilatorno kretanje modela u ravni propinjanja je:

$$\theta = |\theta| \cdot e^{j \cdot \omega \cdot t} \quad (9)$$

gde su:

$|\theta|$ - amplituda oscilatornog kretanja i

ω - kružna učestanost.

Sila Z izazvana primarnim oscilatornim kretanjem je data izrazom:

$$Z = |Z| \cdot e^{j(\omega \cdot t - \eta_{\theta Z})} \quad (10)$$

gde su:

$|Z|$ - amplituda sile Z izazvane primarnim oscilatornim kretanjem u ravni propinjanja,

ω - kružna učestanost i

$\eta_{\theta Z}$ - fazni stav između primarnog oscilatornog kretanja i sile Z

Analizom izraza (8) se vidi, da ako je poremećaj (odnosno primarno kretanje) u ravni propinjanja, izraz za silu Z glasi:

$$Z = Z_{\alpha} \cdot \theta + (Z_q + Z_{\dot{\alpha}}) \cdot q \quad (11)$$

Iz (11) se vidi da se sila Z sastoji od komponente koja potiče od aerodinamičke krutosti, i u fazi je sa kretanjem, i od komponente koja potiče od aerodinamičkog prigušenja, koja je van faze i sledi kretanje za 90° .

Postupak dobijanja konačnih izraza za aerodinamičke

derivativne sile je:

Prvi izvod izraza (9) po vremenu t je:

$$\dot{\theta} = j \cdot \omega \cdot |\theta| \cdot e^{j \cdot \omega \cdot t} \quad (12)$$

Izraz (10) se deli sa θ i sa $\dot{\theta}$:

$$\frac{Z}{\theta} = \frac{|Z| \cdot e^{j(\omega \cdot t - \eta_{\theta Z})}}{|\theta| \cdot e^{j \cdot \omega \cdot t}} = \left| \frac{Z}{\theta} \right| \cdot e^{j \cdot \eta_{\theta Z}} \quad (13)$$

$$\frac{Z}{\dot{\theta}} = \frac{|Z| \cdot e^{j(\omega \cdot t - \eta_{\theta Z})}}{j \cdot \omega \cdot |\theta| \cdot e^{j \cdot \omega \cdot t}} = \left| \frac{Z}{\dot{\theta}} \right| \cdot \frac{e^{j \cdot \eta_{\theta Z}}}{j \cdot \omega} \quad (14)$$

odnosno, ako se prethodni izrazi preurede, dobija se:

$$Z = \theta \cdot \left| \frac{Z}{\theta} \right| \cdot e^{j \cdot \eta_{\theta Z}} \quad (15)$$

$$Z = \dot{\theta} \cdot \left| \frac{Z}{\dot{\theta}} \right| \cdot \frac{e^{j \cdot \eta_{\theta Z}}}{j \cdot \omega} \quad (16)$$

Kada se izraz (15) diferencira po θ , a izraz (16) diferencira po $\dot{\theta}$ i ako se koriste realni delovi rezultujućih izraza, dobija se:

$$\frac{\partial Z}{\partial \theta} = \left| \frac{Z}{\theta} \right| \cdot \cos \eta_{\theta Z} \quad (17)$$

$$\frac{\partial Z}{\partial \dot{\theta}} = \left| \frac{Z}{\dot{\theta}} \right| \cdot \frac{\sin \eta_{\theta Z}}{\omega} \quad (18)$$

Ako se izraz (11) diferencira po θ i $\dot{\theta}$, dobija se:

$$\frac{\partial Z}{\partial \theta} = Z_{\alpha} \quad (19)$$

$$\frac{\partial Z}{\partial \dot{\theta}} = Z_q + Z_{\dot{\alpha}} \quad (20)$$

Konačni izrazi za aerodinamičke derivativne sile Z usled promene ugaone brzine u propinjanju q , se dobijaju kada se uporede izrazi (17 i 19), odnosno izrazi (18 i 20):

$$Z_{\alpha} = \left| \frac{Z}{\theta} \right| \cdot \cos \eta_{\theta Z} \quad (21)$$

$$Z_q + Z_{\dot{\alpha}} = \left| \frac{Z}{\dot{\theta}} \right| \cdot \frac{\sin \eta_{\theta Z}}{\omega} \quad (22)$$

Na potpuno isti način se određuju ostali aerodinamički derivativi sile.

Kada se koristi uređaj kod koga se primarno oscilatorno kretanje vrši u ravni propinjanja, dobijaju se:

$$Z_{\alpha} = \left| \frac{Z}{\theta} \right| \cdot \cos \eta_{\theta Z} \quad (23)$$

$$Z_q + Z_{\dot{\alpha}} = \left| \frac{Z}{\dot{\theta}} \right| \cdot \frac{\sin \eta_{\theta Z}}{\omega} \quad (24)$$

$$Y_{\alpha} = \left| \frac{Y}{\theta} \right| \cdot \cos \eta_{\theta Y} \quad (25)$$

$$Y_q + Y_{\dot{\alpha}} = \left| \frac{Y}{\dot{\theta}} \right| \cdot \frac{\sin \eta_{\theta Y}}{\omega} \quad (26)$$

Kada se koristi uređaj kod koga se primarno oscilatorno kretanje vrši u ravni skretanja, dobija se:

$$-Z_{\beta} \cdot \cos \alpha = \left| \frac{Z}{\psi} \right| \cdot \cos \eta_{\psi Z} \quad (27)$$

$$Z_r - Z_{\dot{\beta}} \cdot \cos \alpha = \left| \frac{Z}{\theta} \right| \cdot \frac{\sin \eta_{\psi Z}}{\omega} \quad (28)$$

$$-Y_{\beta} \cdot \cos \alpha = \left| \frac{Y}{\psi} \right| \cdot \cos \eta_{\psi Y} \quad (29)$$

$$Y_r - Y_{\dot{\beta}} \cdot \cos \alpha = \left| \frac{Y}{\theta} \right| \cdot \frac{\sin \eta_{\psi Y}}{\omega} \quad (30)$$

Kada se koristi uređaj kod koga se primarno oscilatorno kretanje vrši u ravni valjanja, dobija se:

$$Z_{\beta} \cdot \sin \alpha = \left| \frac{Z}{\phi} \right| \cdot \cos \eta_{\phi Z} \quad (31)$$

$$Z_p + Z_{\dot{\beta}} \cdot \sin \alpha = \left| \frac{Z}{\phi} \right| \cdot \frac{\sin \eta_{\phi Z}}{\omega} \quad (32)$$

$$Y_{\beta} \cdot \sin \alpha = \left| \frac{Y}{\phi} \right| \cdot \cos \eta_{\phi Y} \quad (33)$$

$$Y_p + Y_{\dot{\beta}} \cdot \sin \alpha = \left| \frac{Y}{\phi} \right| \cdot \frac{\sin \eta_{\phi Y}}{\omega} \quad (34)$$

Zaključak

Izložena procedura merenja omogućava da se postojeći uređaji za merenje aerodinamičkih derivativa stabilnosti u aerotunelu T-38, u toku istog merenja koriste i za određivanje aerodinamičkih derivativa sila Y i Z .

Za uobičajne konfiguracije aviona i raketa interes za merenjem aerodinamičkih derivativa stabilnosti sila je mali.

Poznavanje aerodinamičkih derivativa stabilnosti sila je neophodno kada se vrši preračunavanje derivativa stabilnosti momenata iz tačke u kojoj je izvršeno merenje u novu referentnu tačku.

Literatura

- [1] SCHUELER, C.J., WARD, L.K., HODAP, A.E., Techniques for measurement of dynamic stability derivatives in ground test facilities. *Agardograph*, 1967, vol.121,
- [2] ANASTASIJEVIĆ, Z. *Neki mogući prilazi merenju aerodinamičkih derivativa stabilnosti metodom "krutih prinudnih oscilacija" u podzvučnom aerotunelu*. magistarski rad. Mašinski fakultet, Beograd, 1984.
- [3] ORLIK-RUCKEMANN, K.J., LABERGE, J.G., HANFF, E.S. *Measurement of dynamic cross-derivatives due to pitching and yawing*. AIAA Paper No.74-611, NAE, Canada, 1974.

Rad primljen: 25.10.1999.god.