MERENJE PRELAZNIH OPTEREĆENJA NA DVA MODELA U AEROTUNELU T-38

Aleksandar Vitić, dipl. inž.
mr Marija Samardžić, dipl. inž.
Vojnotehnički institut

Rezime:

Pri ispitivanju modela u „rafalnom“ aerotunelu sa prekidnim dejstvom T-38, na Mahovim brojevima većim od 2, moraju se uzeti u obzir prelazne pojave koje se javljaju na početku i na kraju rada aerotunela. To su stanja kada su model i aerovaga izloženi velikim aerodinamičkim silama i momentima. Ova kombinovana opterećenja mogu oštetiti modele i aerovage, pa bi bilo potrebno unapred znati kolike se vrednosti očekuju za pojedine konfiguracije modela, kako bi se izvršio pravilan izbor aerovage i odgovarajućih materijala za izradu modela. U tu svrhu postoje dijagrami koji pružaju mogućnost procene ovih opterećenja. Dijagrami su dobijeni na osnovu ispitivanja nekoliko različitih modela na Mahovim brojevima većim od 2.

U radu su prikazana merenja prelaznih opterećenja na još dva modela, a rezultati su upoređeni sa već postojećim dijagramima.

Ključne reči: rafalni aerotunel, prelazna opterećenja, aerotunelski modeli, aerovage, šliren sistem.

MEASUREMENT OF TRANSIENT LOADS ON TWO MODELS

Summary:

The T-38 wind tunnel is a blowdown, intermittent-run type of wind tunnels. During model testing in the this type of wind tunnels, at Mach numbers higher than 2, transient loads which appear during the starting and stopping of the wind tunnel runs must be taken into consideration. These are the conditions when a model and the wind tunnel balance are exposed to large aerodynamic forces and moments. These combined loads can damage models and wind tunnel balances, and, for this reason, it is very important to determine them in advance for any particular model configuration so that an appropriate wind tunnel balance and materials for model manufacturing can be chosen. For that purpose there are graphs which give possibilities to estimate these loads. The graphs are based on experiments with a number of different models at Mach numbers higher than 2.

This paper gives the measurements of transient loads on two more models and the results are compared with the already existing graphs.

Key words: blowdown wind tunnel, transient loads, wind tunnel models, wind tunnel balances, Schlieren system.

Uvod

U toku primopredajnih ispitivanja u aerotunelu T-38 Vojnotehničkog instituta u Beogradu uočene su izvesne pojave koje se javljaju pri startu i zaustavljanju rada aerotunela na Mahovim brojevima većim od $M = 2$. Te pojave nazvane su „prelazna stanja“ u kojima se aerodinamičke sile i momenti znatno povećavaju u odnosu na kasnije vrednosti pri stacionarnim režimima strujanja. Ova stanja izazvana su pojavom normalnog udarnog talasa koji se iz „grla“ mlaznika premešta iza modela i koji, nažalost, nije normalan na osu modela već zaklapa izvestan ugao. To je razlog što dolazi do razlike u pritiscima na gornjaci i donjaci modela koja generiše sile i momente, a oni snažno pomeraju model iz njegove početne pozicije. Ova kombinovana opterećenja javljaju se i u ravni propinjanja i u ravni skretanja i toliko su velika da se moraju ozbiljno uzeti u obzir pri dizajniranju modela i izbora aerovage.

U radu su prikazani rezultati merenja prelaznih opterećenja na dva različita modela u aerotunelu T-38 na brzinama većim od $M = 2$. Dobijeni rezultati upoređeni su sa rezultatima dobijenim u ranijim ispitivanjima prelaznih opterećenja sa drugim modelima [1–4].

Eksperiment

Opis modela i aerovaga

U eksperimentu su korišćena dva modela: Model 1 iz test-programa GE2000 [5] i Model 2 iz test-programa GRAN40 [6].

Model 1 bio je montiran na aerovagu VTI40B i preko stinga prečnika 40 mm vezan za sistem koji služi za promenu napadnog ugla. Na slici 1 prikazana je skica ovog modela, a na slici 2 slika modela u radnom delu aerotunela T-38. Model je cilindričnog oblika sa oživalnim vrhom. Dužina modela je 700 mm, a prečnik 65 mm. Na kraju modela nalaze se pravougaona ili olučasta krila. Ispitivano je nekoliko različitih konfiguracija ovih krila.

Sl. 1 – Skica Modela 1 iz test-programa GE2000

Sl. 2 – Model 1 sa olučastim krilima u radnom delu aerotunela T-38

Model 2 bio je montiran na aerovagu *ABLE 1" MK XXIIIA* i preko stinga prečnika 32 mm vezan za sistem koji služi za promenu napadnog ugla. Skica modela sa osnovnim dimenzijama prikazana je na slici 3. Model je cilindričnog oblika sa oživalnim vrhom. Dužina modela je 206,8 mm, a prečnik 39,8 mm. Položaj centra aerovage smešten je na 134,91 mm od vrha modela.

Sl. 3 – Skica Modela 2 iz test-programa GRAN40

Sl. 4 – Model 2 u radnom delu aerotunela T-38

Opis aerotunela T-38

Aerotunel T-38 u VTI-u je prekidnog dejstva sa natpritiskom i radnim delom kvadratnog poprečnog preseka dimenzija 1,5 m x 1,5 m [7]. Opseg Mahovih brojeva koji se može postići u radnom delu je od 0,2 do 4,0 sa maksimalnim Reynoldsovim brojem do 115 miliona po metru. Regulacija i održavanje Mahovog broja je $\pm 0,3\%$ od zadate nominalne vrednosti. Zaustavni pritisak u radnom delu može biti održavan između 1,1 bar i 15 bara, što zavisi od Mahovog broja, dok je tačnost regulacije $\pm 0,3\%$ nominalne vrednosti. Dužina trajanja jednog ispitivanja (jednog "rafala") iznosi od 6 s do 60 s i zavisi od Mahovog broja i pritiska duvanja.

Instrumentacija i prikupljanje podataka

Potrebni pritisci mere se apsolutnim i diferencijalnim davačima tipa *Mensor* i *Druck* različitog opsega. Nelinearnost i histerezis ovih davača je oko 0,02% punog opsega.

Precizni davači pozicije, tzv. rizolveri, montirani su u mehanizam za promenu napadnog ugla i ugla valjanja. Tačnost sistema za očitavanje napadnog ugla je $\pm 0,05^\circ$, a za ugao valjanja $\pm 0,25^\circ$. Za merenje aerodinamičkih sila i momenata na Modelu 1 korišćena je šestokomponentna aerovaga *VTI40B*, koja je montirana na sting prečnika 40 mm. Njena tačnost je 0,25% punog opsega. Aerovaga je baždarena pre ovog ispitivanja. Za merenje aerodinamičkih sila i momenata na Modelu 2 korišćena je šestokomponentna aerovaga *ABLE 1" MK XXIIIA*, montirana na sting prečnika 32 mm, čija tačnost iznosi 0,3% punog opsega. Aerovaga je, takođe, baždarena pre testa. Sistem za prikupljanje podataka sastoji se od 64-kanalnog sistema tipa *Teledyne* pod kontrolom računara *PC Compaq*. Na svim analognim kanalima izabrano je odgovarajuće pojačanje i postavljeni su filteri odgovarajuće granične učestanosti. Podaci sa svih analognih kanala se digitalizuju *A/D* konvertorom rezolucije 16 bita. Svi kanali su očitavani istom brzinom od 400 podataka u sekundi.

Digitalizovani podaci primaju se na računar *Compaq Alpha Server DS20E* i zapisuju na disk za kasniju obradu.

Vizualizacija strujanja

Vizualizacija strujanja obavljena je sistemom Šliren, a slike su prikupljene na PC računaru koji se nalazi u kontrolnom centru aerotunela [8]. Sistem je takozvanog tipa Z sa paralelnim snopom svetlosti prečnika 900 mm. U svetlosnom kabinetu nalazi se ksenon lampa sa procepom i dva ravna ogledala, koji služe da usmere snop svetlosti na prvo kolimatorsko ogledalo žižne

Sl. 5 – Minijaturna Web kamera u prijemnom kabinetu sistema Šliren

daljine 7200 mm. Na drugoj strani aerotunela nalazi se veliko ravno skretno ogledalo prečnika 1300 mm i drugo kolimatorsko ogledalo iste žižne daljine kao i prvo. U prijemnom delu sistema nalaze se malo ravno ogledalo, filter u boji, mali teleskop za suženje snopa svetlosti i minijaturna Web kamera. Na slici 5 prikazana je Web kamera u prijemnom kabinetu sistema Šliren koji je instaliran u hali aerotunela T-38.

Obrada rezultata merenja

Obrada rezultata merenja u stacionarnom režimu strujanja

Obrada podataka u stacionarnom režimu strujanja vrši se posle svakog „rafala“, pri čemu se koristi standardni softverski paket *T38-APS* za obradu merenja u aerotunelima *VTI*. Obrada se izvodi u nekoliko faza:

- čitanje zabeleženih sirovih podataka, normalizacija i prevođenje u standardni format;
- određivanje parametara strujanja, tj. primarni merni sistem;
- određivanje položaja modela;
- određivanje aerodinamičkih koeficijenata u stacionarnom režimu strujanja.

Svaka faza obrade izvodi se posebnim softverskim modulom.

Obrada rezultata merenja aerodinamičkih sila i momenata u prelaznom režimu

Obrada podataka u prelaznom režimu strujanja izvršena je na kraju celokupnog predviđenog test-programa. Na osnovu zabeleženih „sirovih“ podataka izrađeni su dijagrami, prikazani u primerima na slikama 6 i 7, gde se vide vrednosti sila i momenata u prelaznom, kao i u stacionarnom režimu strujanja izmereni aerovagom. Za svaki pojedinačni „rafal“, za oba modela, pročitane su vrednosti sila i momenata, a zatim su, korišćenjem jednačine 1–6, izračunati normalizovani koeficijenti. Svi podaci zapisani su u tabelama 1 i 2.

$$k_x = \frac{F_{XX}}{S_x} \dots\dots 1) \quad k_y = \frac{F_{YY}}{S_y} \dots\dots 2) \quad k_z = \frac{F_{ZZ}}{S_z} \dots\dots 3)$$

$$k_l = \frac{M_{XX}}{BS_z} \dots\dots 4) \quad k_m = \frac{M_{YY}}{LS_y} \dots\dots 5) \quad k_n = \frac{M_{ZZ}}{LS_z} \dots\dots 6)$$

Sl. 6 – Sila otpora (FXX) na Modelu 1 za vreme prelaznih i stacionarnih režima strujanja pri $M = 3,0$

Sl. 7 – Moment skretanja (MZZ) na Modelu 1 za vreme prelaznih i stacionarnih režima strujanja pri $M = 3,0$

Tabela 1

Pregled sakupljenih podataka za merenje prelaznih opterećenja na Modelu 1

Redni broj	M	P ₀ [bar]	FXX [N]	FYY [N]	FZZ [N]	MXX [Nm]	MYX [Nm]	MZZ [Nm]	k _x	k _y	k _z	k _l	k _m	k _n
8	2,5	4,0	320	1000	650	8	120	140	9,65	2,16	1,4	1,2	3,7	4,3
10	3,0	7,0	315	1200	1800	10	200	170	9,57	2,59	3,88	1,6	6,2	5,2
15	2,5	4,0	360	1200	1350	10	150	200	10,9	2,59	2,91	1,6	4,6	6,2
16	3,0	7,0	365	1200	2400	10	200	200	11,0	2,59	5,17	1,6	6,2	6,2
25	2,5	4,0	380	1650	800	18	140	120	11,5	3,56	1,73	2,8	4,3	3,7
26	3,0	7,0	470	1650	1600	16	180	170	14,2	3,56	3,45	2,5	6,2	3,2
28	2,5	4,0	360	1350	1000	12	160	140	10,9	2,90	2,20	1,9	4,9	4,3
27	3,0	7,0	400	1200	1300	10	200	200	12,1	2,59	2,80	1,6	6,2	6,2
40	2,5	4,0	370	1100	1600	16	120	140	11,2	2,37	3,45	2,5	3,7	4,3
41	3,0	7,0	360	1700	1600	12	160	200	10,9	3,66	3,45	1,9	4,9	6,2
48	2,5	4,0	420	1200	1400	10	120	200	12,7	2,59	3,02	1,6	3,7	6,2
47	3,0	7,0	320	1700	2000	12	160	200	9,65	3,66	4,30	1,9	4,9	6,2
56	2,5	4,0	380	1500	1200	12	140	120	11,5	3,23	2,59	1,9	4,3	3,7
57	3,0	7,0	320	1600	2400	12	200	170	9,65	3,45	5,17	1,9	6,2	5,2

Tabela 2

Pregled sakupljenih podataka za merenje prelaznih opterećenja na Modelu 2

Red. broj	M	P ₀ [bar]	FXX [N]	FYY [N]	FZZ [N]	MYX [Nm]	MZZ [Nm]	k _x	k _y	k _z	k _m	k _n
5	2,0	2,3	54	148	102	2,8	4,6	4,34	2,3	1,63	2,17	3,6
8	2,5	4,0	100	204	290	9,571	6,37	8,04	3,27	4,64	7,41	4,93
9	3,0	6,0	71	184	240	14,13	5,3	5,71	2,9	3,8	10,9	4,01
17	2,0	2,3	56	51	48	1,6	1,63	4,5	0,82	0,77	1,24	1,26
18	2,5	4,0	96	260	200	8,72	7,54	7,72	4,16	3,2	6,75	5,86
19	3,0	6,0	133	185	250	13,4	5,67	10,69	2,96	4,01	10,4	4,39

Analiza snimaka efekata vizualizacije strujanja

Prikazano je nekoliko snimaka Modela 2 snimljenih metodom Šli- ren za vreme ispitivanja u aerotunelu T-38. Na slici 8 prikazan je snimak uzet za vreme strujanja u stacionarnom režimu strujanja kada je već bio uspostavljen Mahov broj $M=3$. U pitanju je Model 2 koji se u tom trenutku nalazio pri napadnom uglu od 0 stepeni. Na snimku se jasno vidi kosi udarni talas formiran i vezan za vrh modela. Izvan polja ovog talasa strujanje je uniformno bez ikakvog poremećaja.

Sl. 8 – Model 2 za vreme stacionarnog režima

Sl. 9 – Model 2 za vreme prelaznog režima strujanja $M = 2$

Na slici 9 prikazan je snimak iz rane faze formiranja strujanja u radnom delu aerotunela T-38 na Mahovom broju $M = 2$. Na snimku se uočava nadolazeći normalni udarni talas pod uglom koji zahvata model i unosi razliku u pritiscima na gornjaci i donjaci modela. Svuda oko modela strujanje je jako turbulentno.

Slika 10 i slika 11 takođe prikazuju Model 2 u ranoj fazi uspostavljanja strujanja, ali ovog puta pri Mahovim brojevima $M = 2,5$ i $M = 3$. Na slikama

se još jasnije uočavaju normalni udarni talasi koji nose diskontinuitet u pritiscima i koji zbog toga pomeraju model na jednu, odnosno drugu stranu.

Sl. 10 – Model 2 za vreme prelaznog režima strujanja pri $M = 2,5$

Sl. 11 – Model 2 za vreme prelaznog režima strujanja pri $M = 3,0$

Rezultati ispitivanja

Rezultati ispitivanja prikazani su na dijagramu na slici 12. Punom linijom su prikazani rezultati iz ranijih ispitivanja prelaznih opterećenja, a kvadratičima i kružićima rezultati dobijeni ispitivanjem Modela 1 i Modela 2.

Za koeficijente normalizovane sile otpora može se reći da su, za oba modela i sve Mahove brojeve, u području očekivanih vrednosti. Isto važi i za normalizovane koeficijente momenta skretanja.

Izmereni normalizovani koeficijenti bočne sile i momenta propinjanja se, sa izuzetkom nekoliko tačaka, nalaze, takođe, u području gde se i očekuju.

Jedna polovina koeficijenata normalne sile nalazi se izvan očekivanog područja, dok je druga polovina unutar njega. Za naredne modele

koji se budu ispitivali pri supersoničnim brzinama izvan 2 Maha ovi dobijeni podaci se moraju ozbiljno uzeti u obzir.

Normalizovan koeficijent momenta valjanja za Model 2 bio je nula, jer taj model nije imao krila. Dobijeni rezultati za Model 1 pokazuju da su veći od očekivanih, što se može objasniti činjenicom da su kod ovog modela krila, olučasta ili pravougaona, bila dosta velika.

Sl. 12 – Rezultati ispitivanja Modela 1 i Modela 2 u aerotunelu T-38

Zaključak

Kao i ranija ispitivanja prelaznih opterećenja i ova su dala vrlo korisne kvalitativne i kvantitativne podatke u razjašnjavanju pojava koje se javljaju pri startu i zaustavljanju rada aerotunela na Mahovim brojevima preko 2. U pripremnoj fazi, pri izboru aerovage i veličine modela koji treba da bude ispitan na velikim supersoničnim brzinama, dobijeni podaci se moraju vrlo ozbiljno uzeti u obzir.

Korišćene oznake

M_∞		Mahov broj u radnom delu aerotunela
V	m/s	Brzina neporemećene struje
P_o	bar	Zaustavni pritisak u radnom delu aerotunela
P_{st}	bar	Statički pritisak u radnom delu aerotunela
T_o	K	Zaustavna temperatura u radnom delu aerotunela
k_x	$\frac{N}{cm^2}$	Normalizovana vrednost sile otpora u prelaznom režimu strujanja
k_y	$\frac{N}{cm^2}$	Normalizovana vrednost bočne sile u prelaznom režimu strujanja
k_z	$\frac{N}{cm^2}$	Normalizovana vrednost normalne sile u prelaznom režimu strujanja
k_l	$\frac{Nm}{cm^3} \cdot 10^{-3}$	Normalizovana vrednost momenta valjanja u prelaznom režimu strujanja
k_m	$\frac{Nm}{cm^3} \cdot 10^{-3}$	Normalizovana vrednost momenta propinjanja u prelaznom režimu strujanja
k_n	$\frac{Nm}{cm^3} \cdot 10^{-3}$	Normalizovana vrednost momenta skretanja u prelaznom režimu strujanja
F_{XX}	N	Vrednost aksijalne sile u prelaznom režimu strujanja
F_{YY}	N	Vrednost bočne sile u prelaznom režimu strujanja
F_{ZZ}	N	Vrednost normalne sile u prelaznom režimu strujanja
M_{XX}	Nm	Vrednost momenta valjanja u prelaznom režimu strujanja
M_{YY}	Nm	Vrednost momenta propinjanja u prelaznom režimu strujanja
M_{ZZ}	Nm	Vrednost momenta skretanja u prelaznom režimu strujanja
S_X	cm^2	Frontalna površina modela
S_Y	cm^2	Bočna površina modela
S_Z	cm^2	Površina u planu modela
L	cm	Ukupna dužina modela
B	cm	Razmah modela
RSN		Redni broj duvanja
∞		Oznaka za parametre neporemećenog strujanja

Literatura

- [1] Vuković, Đ.: Definisanje prelaznih opterećenja pri ispitivanju u aerotunelu T-38 VTI, interni izveštaj V3-2264-O, Vojnotehnički institut, Beograd, 1984.
- [2] Vuković, Đ.: Ispitivanje prelaznih opterećenja u aerotunelu T-38 VTI, interni izveštaj V3-2404-I, Vojnotehnički institut, Beograd, 1986.
- [3] Vuković, Đ.: Istraživanje prelaznih opterećenja u aerotunelu T-38 koničnim modelom i aerovagom ABLE MK XXV, VTI interni izveštaj V3-2464-I, Vojnotehnički institut, Beograd, 1986.
- [4] Vuković, Đ.: Analiza rezultata ispitivanja prelaznih opterećenja u aerotunelu T-38 VTI, interni izveštaj V3-2550-O, Vojnotehnički institut, Beograd, 1988.
- [5] Vitić, A.: Ispitivanje olučastih krila na modelu GE2000 pri brzinama od 0,5 do 3,0 Maha u aerotunelu T-38 VTI, interni izveštaj V3-2873-I, Vojnotehnički institut, Beograd.
- [6] Samardžić, M.: Ispitivanje granate prečnika 40 mm u aerotunelu T-38 VTI, interni izveštaj V3-2982-I, Vojnotehnički institut, Beograd.
- [7] Elfstrom, G.M., Medved, B.: The Yugoslav 1,5 m Trisonic Blowdown Wind Tunnel, AIAA Paper 86-0746-CP.
- [8] Vuković, Đ., Vitić A.: Modernizacija Šliren sistema u aerotunelu T-38 VTI, interni izveštaj V3-2981-A, Vojnotehnički institut, Beograd.