

## Poređenje proračunatih i eksperimentalnih karakteristika rakete upravljane elevonima

Mr Slobodan Mandić, dipl.inž. <sup>1)</sup>  
 Mr Dragoslav Nikolić, dipl.inž. <sup>1)</sup>  
 Mr Milan Milošević, dipl.inž. <sup>1)</sup>  
 Mr Zoran Gajić, dipl.inž. <sup>1)</sup>  
 Mr Ivan Šoštarić, dipl.inž. <sup>1)</sup>  
 Srđan Stojković, dipl.inž. <sup>1)</sup>

Poređeni su derivativi aerodinamičkih koeficijenata dobijenih programom DMAC (poluempirijske metode) i derivativi dobijeni na osnovu merenja aerodinamičkih koeficijenata u aerotunelu T-38 rakete upravljane elevonima. Krive derivativa aerodinamičkih koeficijenata date su u funkciji Mahovog broja. Poklapanje izračunatih derivativa dobijenih na osnovu eksperimenta pokazuje da se program DMAC može koristiti za izračunavanje derivativa aerodinamičkih koeficijenata projektila koji se upravljaju elevonima. Dato je poređenje aerodinamičkih koeficijenata dobijenih programom MAC (metoda ekvivalentnog napadnog ugla) i izmerenih aerodinamičkih koeficijenata u funkciji napadnog ugla za određeni Mahov broj. Poklapanje aerodinamičkih koeficijenata proračunatih pomoću MAC i izmerenih aerodinamičkih koeficijenata i u oblasti izražene nelinearnosti pokazuju mogućnosti ovog programa, koji se može koristiti samo u slučaju kada elevoni nisu otklonjeni.

*Ključne reči:* aerodinamika, poluempirijska aerodinamička metoda, metoda ekvivalentnog napadnog ugla, gradijenti aerodinamičkih koeficijenata, nelinearni aerodinamički koeficijenti.

### Korišćene oznake i simboli

$C_A$	– koeficijent aksijalne sile;
$C_N$	– koeficijent normalne sile;
$C_m$	– koeficijent momenta propinjanja;
$C_l$	– koeficijent momenta valjanja;
$C_h$	– koeficijent šarnirnog momenta;
$C_{N_\alpha}$	– derivativ koeficijenta normalne sile po uglu $\alpha$ ;
$C_{N_\delta}$	– derivativ koeficijenta normalne sile po uglu $\delta$ ;
$C_{m_\alpha}$	– derivativ koeficijenta momenta propinjanja po uglu $\alpha$ ;
$C_{m_\delta}$	– derivativ koeficijenta momenta propinjanja po uglu $\delta$ ;
$C_{l_\delta}$	– derivativ koeficijenta momenta valjanja po diferencijalnom otklonu krila;
$C_{h_\alpha}$	– derivativ šarnirnog momenta po uglu $\alpha$ ;
$C_{h_\delta}$	– derivativ šarnirnog momenta po uglu $\delta$ ;
$Ma$	– Mahov broj;
$x_{CR}$	– centar redukcije momenata;
$a$	– brzina zvuka, m/s ;
$b$	– koeficijent.

### Uvod

PRELIMINARNO projektovanje raketa zahteva brze inženjerske metode za proračun aerodinamičkih

karakteristika i izbor optimalne aerodinamičke konfiguracije rakete. Proračun aerodinamičkih koeficijenata neophodan je i u izboru vage za merenje opterećenja modela rakete pri ispitivanjima u aerotunelu.

Program za proračun derivativa aerodinamičkih koeficijenata (DMAC) [1] i program za proračun aerodinamičkih koeficijenata primenom metode ekvivalentnog napadnog ugla MAC [2] dobra su osnova za ispunjenje zahteva proračuna aerodinamičkih koeficijenata neophodnih za projektovanje raketa.

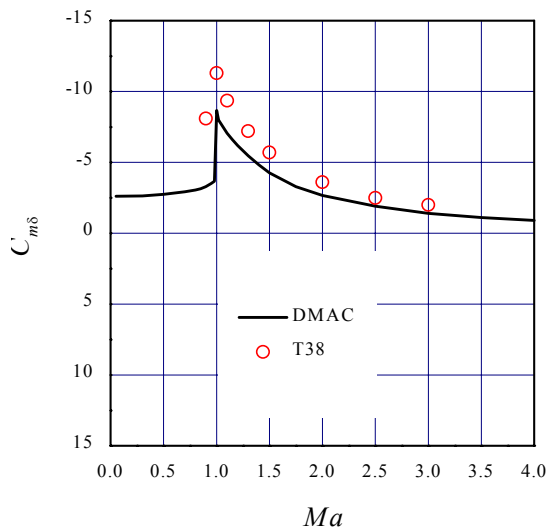
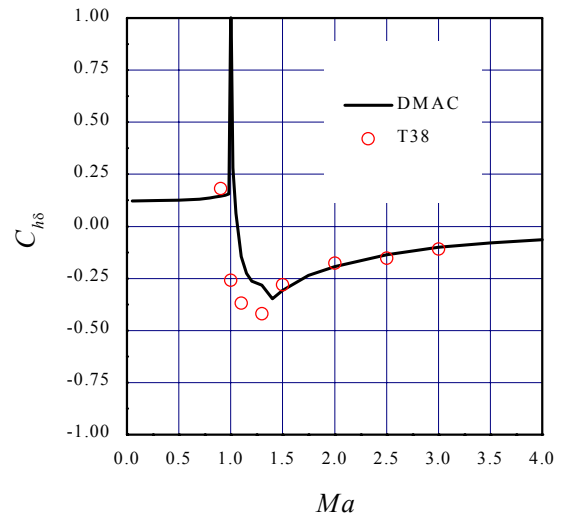
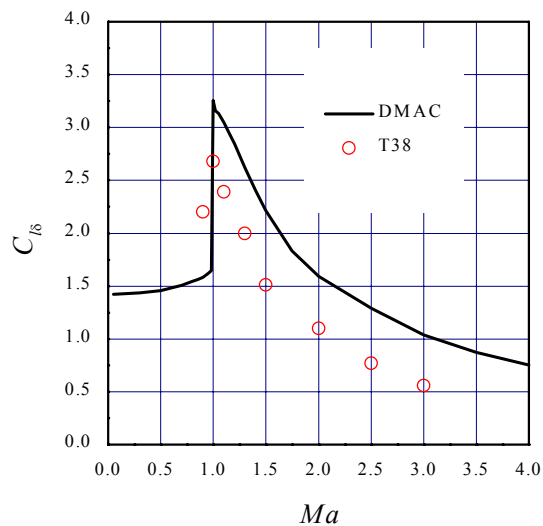
Program za proračun derivativa aerodinamičkih koeficijenata DMAC zasnovan je na empirijskim podacima derivativa izolovanih komponenti raketa, koeficijenata interferencije i uticaja vrtloga na povijanje struje [3,4].

Rakete velike manevarske sposobnosti zahtevaju tačno određivanje aerodinamičkih karakteristika pri velikim napadnim uglovima. Koncept ekvivalentnog napadnog ugla pokazao se kao odlično proširenje poluempirijskih metoda [2,5-7]. Do sada se pokazalo da se MAC [8] dobro poklapa s eksperimentalnim podacima dobijenim u aerotunelu. Iz ovog programa ne može da se dobije koeficijent aksijalne sile, osim dela aksijalne sile koji se dobija kao projekcija normalne sile krila na uzdužnu osu rakete. Tačnost proračuna programa zavisi od tačnosti aerodinamičkih karakteristika izolovanih krila koji se koriste kao ulaz za ovaj program.

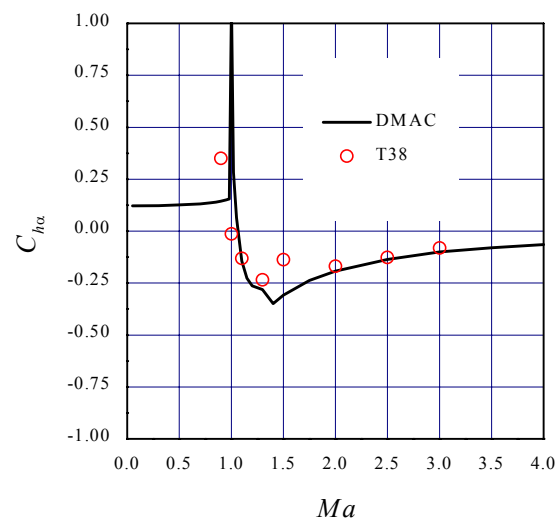
Aerodinamičke karakteristike izolovanih krila određuju se pomoću programa WAC [8].

<sup>1)</sup> Vojnotehnički institut VJ, 11000 Beograd, Katanićeva 15

Ideja rada je da se izvrši poređenje derivativa aerodinamičkih koeficijenata i

Slika 5. Derivativ koeficijenta momenta propinjanja po  $\delta$ Slika 8. Derivativ šarnirnog momenta po  $\delta$ 

Slika 6. Derivativ koeficijenta momenta valjanja po diferencijalnom otklonu krila

Slika 7. Derivativ šarnirnog momenta po  $\alpha$ 

Odlično poklapanje proračunatih derivativa s derivativima dobijenim na osnovu merenja u aerotunelu postignuto je za  $C_{N_\alpha}$  i  $C_{m_\alpha}$ .

Za koeficijente  $C_{N_\delta}$  (sl.4) i  $C_{m_\delta}$  (sl.5) proračunske vrednosti manje su za  $\approx 10\%$  u odnosu na vrednosti dobijene iz eksperimenta.

Veće nepoklapanje dobijeno je za derivativ aerodinamičkog koeficijenta momenta valjanja (sl.6). Budući da je karakter krive identičan u oba slučaja i pošto su teorijske vrednosti za 30 % veće od izmerenih, može se zaključiti da neki od koeficijenata interferencije nije korektno uzet za datu konfiguraciju rakete. U sledećim ispitivanjima težište treba da bude na određivanju koeficijenata interferencije krila i tela na elevon.

Proračunate vrednosti derivativa šarnirnog momenta daju dobro poklapanje s eksperimentalnim vrednostima (slike 7 i 8).

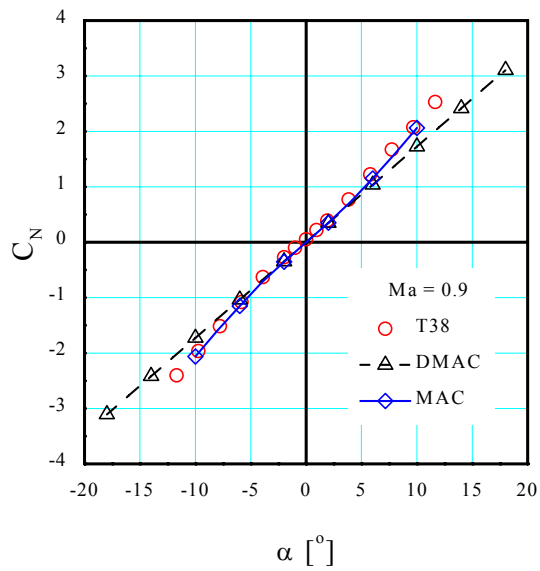
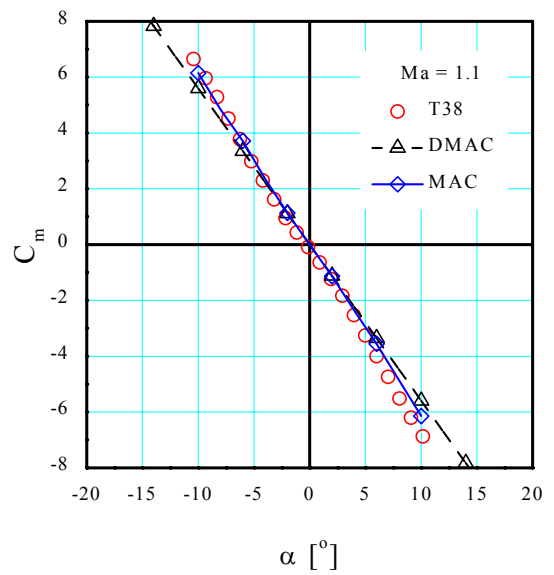
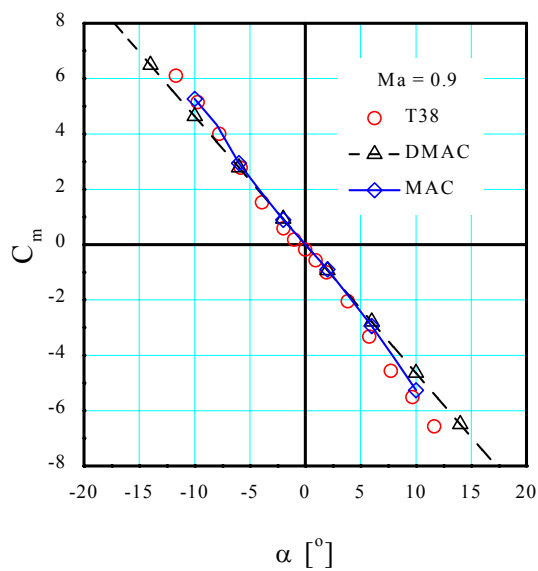
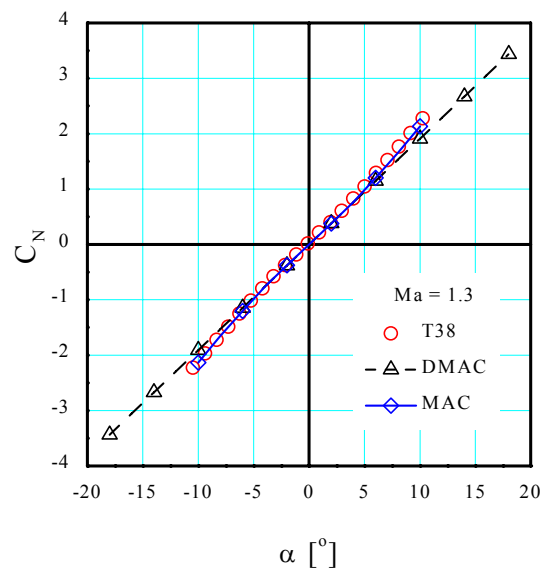
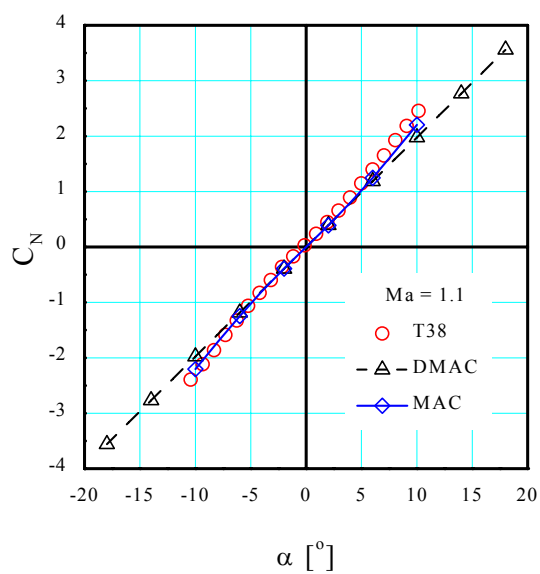
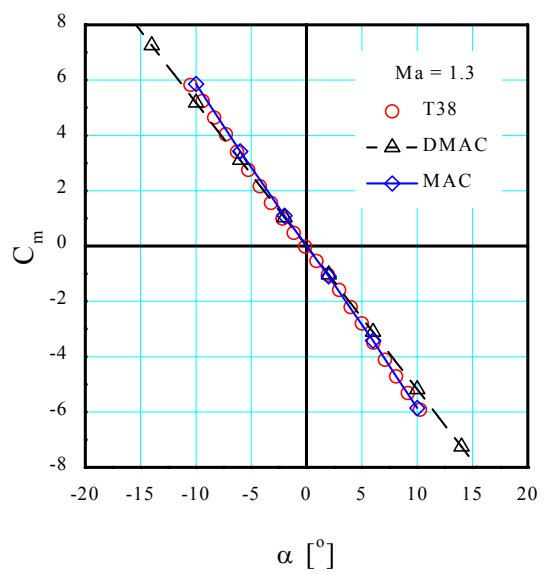
## Aerodinamički koeficijenti

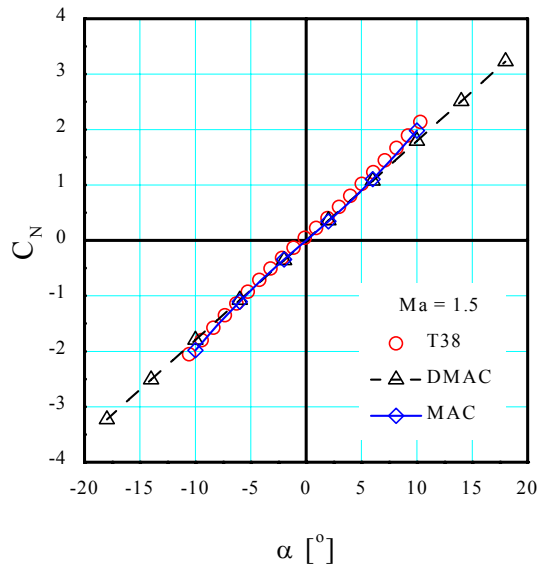
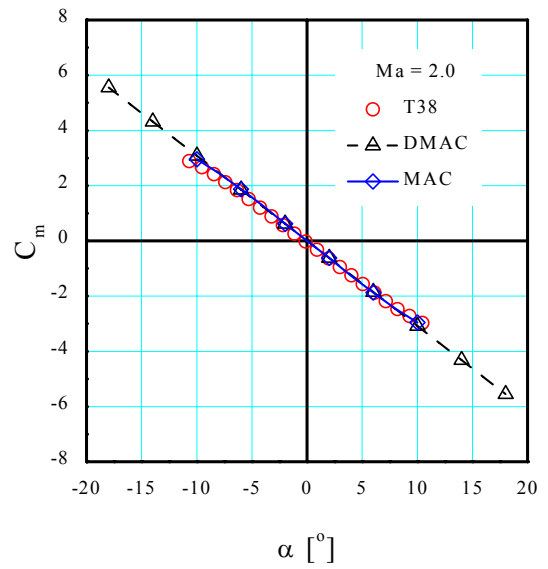
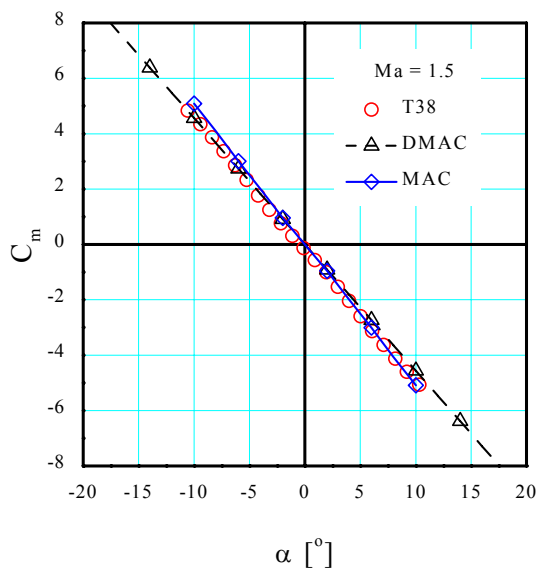
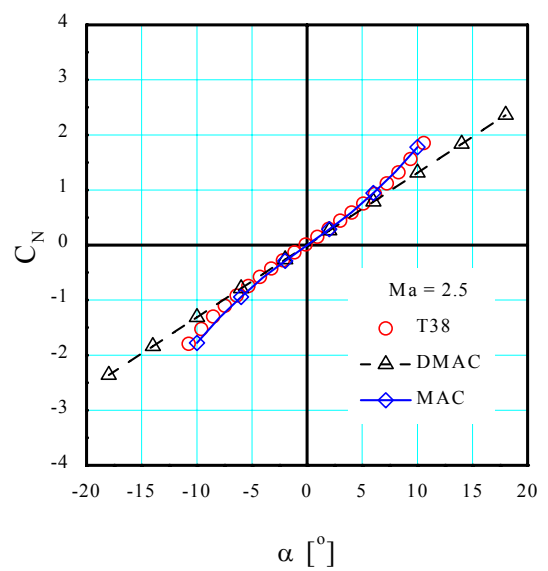
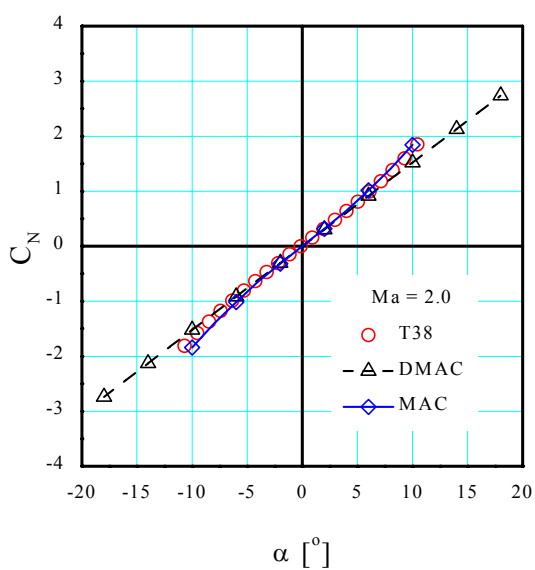
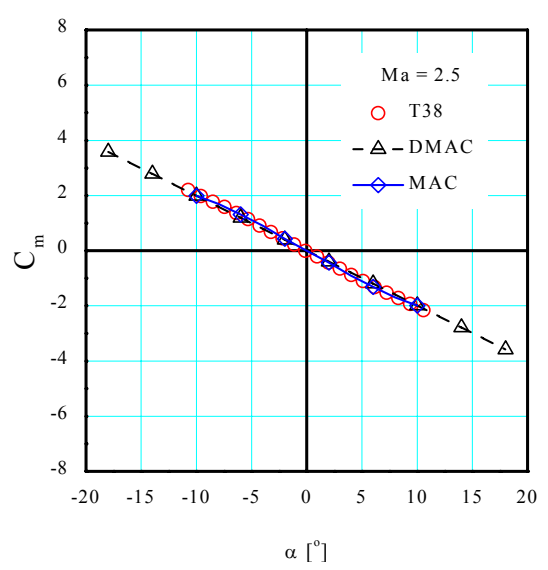
Analizom aerodinamičkih koeficijenata dobijenih merenjem u aerotunelu očigledna je pojava nelinearnosti sa napadnim uglom.

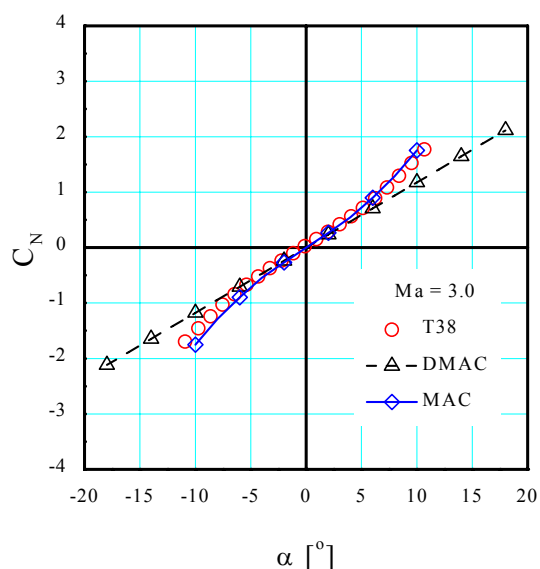
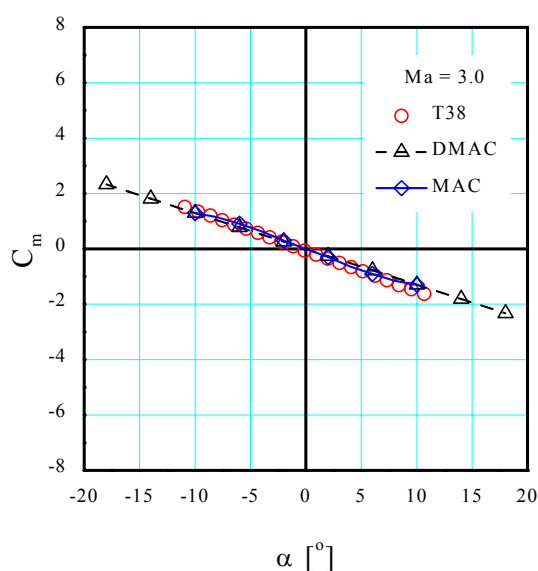
Dosadašnjim analizama nelinearnosti aerodinamičkih koeficijenata raketa koje imaju dve sekcije krila pokazalo se da program MAC daje odlično poklapanje proračunatih aerodinamičkih koeficijenata s izmerenim vrednostima. Ovim programom nije moguće obuhvatiti rakete koje se upravljaju elevonima.

Analiza uticaja napadnog ugla na nelinearnost aerodinamičkih koeficijenata rakete (sl.1) može da se obuhvati programom MAC, samo u slučaju kada elevoni nisu otklonjeni. U tom slučaju se pretpostavlja da krilo i elevon predstavljaju jednu celinu.

Na dijagramima se poredi aerodinamički koeficijenti dobijeni proračunom sa eksperimentalnim vrednostima. Date prave predstavljaju aerodinamičke koeficijente dobijene proračunom na osnovu DMAC.

Slika 9a.  $C_N$ ,  $Ma = 0.9$ Slika 10b.  $C_m$ ,  $Ma = 1.1$ Slika 9b.  $C_m$ ,  $Ma = 0.9$ Slika 11a.  $C_N$ ,  $Ma = 1.3$ Slika 10a.  $C_N$ ,  $Ma = 1.1$ Slika 11b.  $C_m$ ,  $Ma = 1.3$

Slika 12a.  $C_N$ ,  $Ma = 1.5$ Slika 13b.  $C_m$ ,  $Ma = 2.0$ Slika 12b.  $C_m$ ,  $Ma = 1.5$ Slika 14a.  $C_N$ ,  $Ma = 2.5$ Slika 13a.  $C_N$ ,  $Ma = 2.0$ Slika 14b.  $C_m$ ,  $Ma = 2.5$

Slika 15a.  $C_N$ ,  $Ma = 3.0$ Slika 15b.  $C_m$ ,  $Ma = 3.0$ 

$$\begin{aligned} C_N &= C_{N_\alpha} \cdot \alpha \\ C_m &= C_{m_\alpha} \cdot \alpha \end{aligned} \quad (1)$$

Na dijagramima aerodinamičkih koeficijenata propinjanja i skretanja može se videti postojanje nelinearnosti. Nelinearnost je posebno izražena u subsonici ( $Ma = 0.9$ ). Nelinearnost aerodinamičkih koeficijenata zanemarljiva je za napadne uglove u oblasti ( $-10^\circ \leq \alpha \leq 10^\circ$ ) za Mahove brojeve između  $Ma \geq 1.1$  i  $Ma \leq 2.0$ . Za Mahove brojeve  $Ma = 2.5$  i  $Ma = 3.0$  izmerene vrednosti aerodinamičkih koeficijenata pokazuju izraženu nelinearnost kod aerodinamičkih koeficijenata normalne sile. Na dijagramima (slike 14a i 15a) se vidi da

se aerodinamički koeficijenti dobijeni pomoću programa MAC odlično poklapaju s izmerenim vrednostima.

Na osnovu datih upoređenja u ovom radu, vidi se da se program MAC dobro poklapa s eksperimentalnim rezultatima i da odlično prati nelinearnost po napadnom uglu za koeficijent normalne sile i koeficijent momenta propinjanja.

## Zaključak

Proračun derivativa aerodinamičkih koeficijenata nezaobilazan je deo postupaka projektovanja raketnih projektila. Za raketu koja se upravlja elevonima pokazano je odlično poklapanje proračunatih vrednosti  $C_{N_\alpha}$ ,  $C_{m_\alpha}$  sa vrednostima dobijenim iz eksperimenta. Proračunati derivativi upravljačke sile i upravljačkog momenta  $C_{N_\delta}$ ,  $C_{m_\delta}$  razlikuju se od eksperimentalnih vrednosti za manje od 10%. Karakter promene proračunatog i eksperimentalnog derivativa  $C_b$  u funkciji Mahovog broja je isti, a teorijske vrednosti su veće za približno 30%.

Nelinearnost aerodinamičkih koeficijenata zbog napadnog ugla raketa koje se upravljaju elevonima može da se proceni pomoću programa MAC (zasnovanog na metodi ekvivalentnog napadnog ugla) samo za slučaj kada elevoni nisu otklonjeni. U radu se krilo i elevon predstavljaju kao celina. Pokazano je odlično poklapanje proračunatih i merenih aerodinamičkih koeficijenata normalne sile i momenta propinjanja, što je vidljivo i u slučaju kada je izražena nelinearnost s povećanjem napadnog ugla kao za Mahove brojeve  $Ma = 0.9$  i  $Ma > 2.0$

## Literatura

- [1] ЛЕБЕДЕВ, А.А., ЧЕРНОБРОВКИН, Л.С. *Динамика полета беспилотных летательных аппаратов*. Машиностроение, Москва 1973.
- [2] ЂУК, Д.: *Program MAC – Modifikacija programa MLOADS za proračun aerodinamičkih karakteristika pri proizvoljnom uglu valjanja*. Int. dok. VTI 03-27-B2, Beograd.
- [3] NIELSEN, J.N. *Missile Aerodynamics*. McGraw-Hill, New York, 1960.
- [4] ЂURČIN, M., STOJKOVIĆ, S., MILOŠEVIĆ, M. *Program "DMAC" – Program za proračun aerodinamičkih derivativa projektila*. Int. dok. VTI Beograd, 1990.
- [5] HEMSCH, M.J., SMITH, C.H.A., NIELSEN, J.N., PERKINS, C.N. *Calculation of Component Forces and Moments of Arbitrarily Banked Cruciform Missiles with Control Deflections*. Report ADO34722.
- [6] NIELSEN, J.N., HEMSCH, M.J., SMITH, C.A. *A Preliminary Method for Calculating the Aerodynamic Characteristics of Cruciform Missiles to High Angles of Attack Including Effects of Roll Angle and Control Deflections*. ONR-CR215-226-4F (ADA 054349), Nielsen engineering & research, Inc. Mountain view, California 94043, 1977.
- [7] VENUGOPOL, S., KRISHNAMURTHY, M. *Missile Aerodynamics at High Angles of Attack. A prediction code*. *Journal of Spacecraft and Rockets*, March-April 1995, vol.32, no.2.
- [8] ЂURČIN, M., STOJKOVIĆ, S. *Program "WAC" – Program za proračun aerodinamičkih koeficijenata krila*. Int. dok. VTI Beograd, 1990.

## Comparison of calculated and experimental characteristics of elevon operated missiles

The derivatives of aerodynamic coefficients received through the DMAC programme (semi-empirical methods) and those received on the basis of the aerodynamic coefficients of the aileron operated missiles measured in the T-38 wind tunnel have been compared. Derivative curves of aerodynamic coefficients are given as a function of the Mach number. The matching of the calculated derivatives based on experiments shows that the DMCA programme may be used for calculating derivatives of aerodynamic coefficients of elevon operated missiles. The comparison of aerodynamic coefficients resulting from the MAC programme (method of the equivalent angle of attack) and the measured aerodynamic coefficients in function of the angle of attack for a certain Mach number is given. The matching of the aerodynamic coefficients calculated with the help of the MAC programme and the measured aerodynamic coefficients even in the areas of explicit nonlinearity shows the possibilities of this programme which can be applied exclusively where the elevons have not been removed.

*Key words:* aerodynamics, semi-empiric aerodynamic method, the method of equivalent angle of attack, gradients of aerodynamic coefficients, nonlinear aerodynamic coefficients.

## Comparaison des caractéristiques calculées et expérimentales de la fusée guidée par élévons

Les dérivées des coefficients aérodynamiques obtenus par le programme DMAC (une méthode sémi-empirique) sont comparées aux dérivées obtenues par la mesure des coefficients aérodynamiques d'une fusée guidée par ailerons en soufflerie T-38. Les courbes de dérivées des coefficients aérodynamiques sont données en fonction du nombre de Mach. La concordance des dérivées calculées obtenus en expérience démontre que le programme DMAC peut être utilisé pour calculer les dérivées des coefficients aérodynamiques chez les projectiles guidés par élévons. Les coefficients aérodynamiques obtenus par le programme MAC (une méthode de l'angle d'attaque équivalent) sont comparés aux coefficients aérodynamiques mesurés en fonction d'un angle d'attaque pour un nombre de Mach particulier. La concordance des coefficients aérodynamiques calculés à l'aide du MAC et des coefficients aérodynamiques mesurés même dans le domaine de la non-linéarité considérable démontre la possibilité de ce programme qui ne peut être utilisé que dans le cas où les élévons ne sont pas éliminés.

*Mots-clés:* aérodynamique, méthode aérodynamique sémi-empirique, méthode de l'angle d'attaque équivalent, gradients des coefficients aérodynamiques, coefficients aérodynamiques non-linéaires.

