



## **SIMULATION OF FLUTTER USING CFD-FEM COUPLED MODEL**

**V. Losík\***

**Summary:** *So far the static as well as dynamic aeroelastic tasks have been commonly solved by using linear models of fluid flow (p-k method, DLM) implemented e.g. in system MSC.Nastran. These are reliable methods that allow fast solution of aeroelastic response of aircraft structural parts of classical conception. Together with development of the field of aeroelasticity and increasing performance of the computational hardware there is coming possibility to solve aeroelastic phenomena also by CFD-FEM coupling. With this method it is possible to predict real interaction of flow and mechanical response of the structure also in such cases when the current methods fail: aeroelastic research, solution of wings with adaptive control, flow around the thick profiles, dynamic response of the structure to the periodic eddy detaching.*

### **1. Úvod**

V rámci prací na výzkumném záměru MŠMT – Výzkum pevnosti hmotnostně úsporných konstrukcí, zejména letadlových jsou ve VZLÚ prováděny výpočtové simulace aeroelastických jevů za využití modelu proudění CFD propojeného s MKP modelem obtékané konstrukce.

Za účelem určení možností a limitů řešení aeroelasticity formou párování řešičů CFD a MKP byly prováděny výpočtové studie 2D flatru profilu křídla o dvou stupních volnosti a následně porovnávány s výpočty flatru provedenými za využití lineárních modelů proudění v systému MSC.Nastran. Dále budou prováděny výpočty couplingu 2D úlohy o 3DOF při simulaci křídélkového flatru a odezva kruhového profilu na odtrhávání vírů.

### **2. Propojení řešičů**

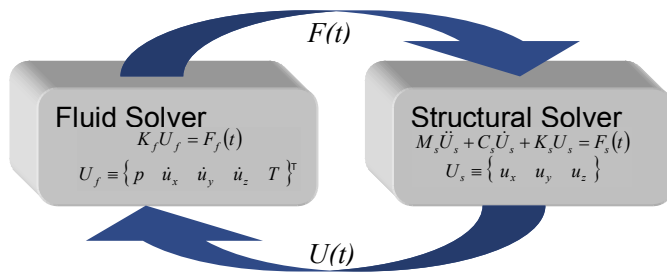
Řešení statické i dynamické aeroelastické odezvy jsou prováděna z hlediska aerodynamiky jako nestacionární. Při řešení 2D 2DOF úlohy jsou v každém časovém kroku výpočtu proudění vypočteny aerodynamické síly (vztlak, moment) a přeneseny do statického resp. dynamického výpočtového modelu jako zatížení, na jehož základě je vypočtena poloha překážky v následujícím časovém kroku výpočtu proudění.

Při řešení aeroelastické úlohy s vysokým počtem stupňů volnosti je princip výpočtu obdobný, s tím rozdílem, že do výpočtu odezvy strukturální části je převáděno přímo pole aerodynamického tlaku, vypočtené na stěnách překážky aerodynamického modelu, zintegrované do uzlů konečně-prvkového modelu konstrukce překážky dle diskretizace a tvořící tak zatěžovací vektor. Následně vypočtený vektor posunutí konstrukce překážky je převeden do uzlů konečně-objemového výpočtového modelu proudění pro řešení dalšího

---

\* Ing. Václav Losík: Výzkumný a zkušební letecký ústav, a.s., Beranových 130, 199 05 Praha 9 - Letňany;  
tel.: +420.225 115 123, fax: +420.283 920 018, e-mail: [losik@vzlu.cz](mailto:losik@vzlu.cz)

časového kroku řešení aerodynamických tlaků aeroelastické simulace, viz schéma Obr. 1.



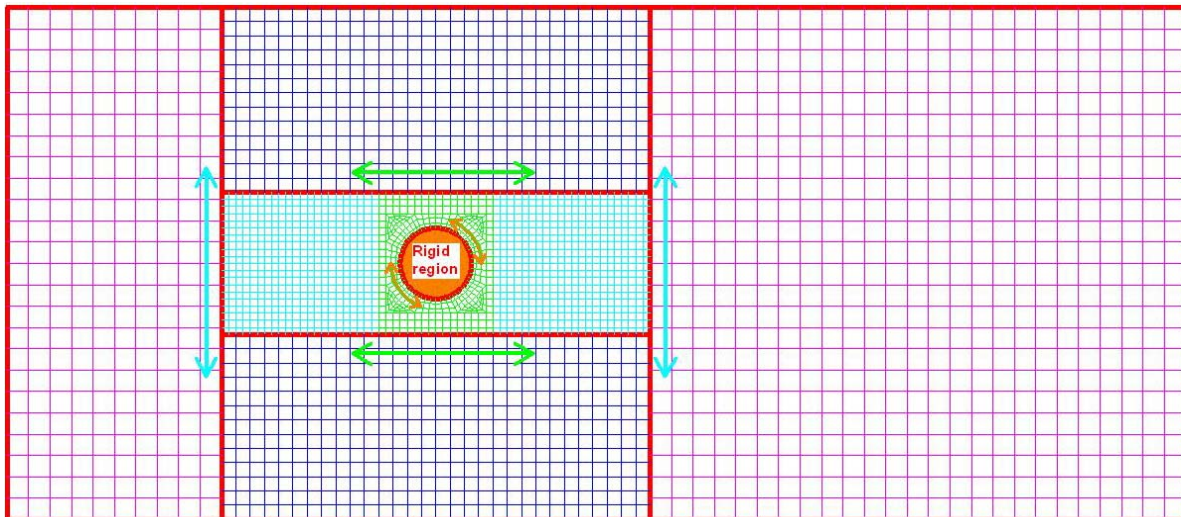
Obr. 1 – Schéma výpočetního procesu couplingu CFD-FEM

### 3. Výpočet

Za využití CFD systému STAR-CD byla provedena sada výpočtu obtékání profilu NACA 0012 se dvěma stupni volnosti (translace a rotace) při různých rychlostech proudění. Pro výpočet byla použita pohyblivá

mřížka se vzájemně klouzajícími rozhraní (*Arbitrary Sliding Interface*) s pohybem řízeným vestavěným řešičem dynamické přechodové odezvy konstrukce dle Newmarkovy metody.

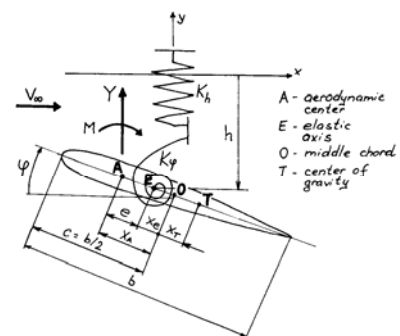
Pro dvojrozměrné úlohy CFD výpočtů s pohyblivou mřížkou byl sestaven model s pěti ASI rozhraními umožňujícími vzájemný pohyb mřížek konečných objemů a tedy pohyb tuhého 2D profilu. Dva ASI zajišťovaly stabilitu výpočtu při vertikální translaci, dva při horizontální translaci a pátý při rotaci profilu. Pohyb mřížky je definován pohybem uzlů buněk konečných objemů.



Obr. 2 – Mřížka konečných objemů výpočetního modelu CFD

### 4. Dvourozměrný případ ohybově-torzního flatru o dvou stupních volnosti

Nejjednodušším modelem pro výpočet flatru je dvourozměrný model se dvěma stupni volnosti, kdy křídlo nahradíme tzv. charakteristickým řezem. Ohybová a torzní tuhost je dána pružinami o tuhostech  $K_h$  a  $K_\varphi$ . Hmotové vlastnosti jsou dány hmotností  $m$ , statickým momentem  $S_\varphi$  a momentem setrvačnosti  $I_\varphi$ . Aerodynamické síly jsou dány dvourozměrným modelem harmonicky kmitajícího profilu v ideální tekutině. Schematicky je charakteristický řez znázorněn na Obr. 3.



Obr. 3 – Schema 2-DOF úlohy

Pohybová rovnice deformačních kmitů vyplyne z Lagrangeovy rovnice:

$$\frac{d}{dt} \left( \frac{\partial E}{\partial \dot{q}_s} \right) - \frac{\partial E}{\partial q_s} + \frac{\partial U}{\partial q_s} = Q_s \quad (1)$$

kde:  $s = 1; 2$ . Nezávislé souřadnice určující pohyb budou:  $q_1 = h$ ;  $q_2 = \varphi$ . Zobecněné aerodynamické síly, určené z virtuální práce vnějších sil budou:  $Q_1 = -Y$  (vztlak);  $Q_2 = M_{EO}$  (moment).

Kinetická energie bude:

$$E = \frac{1}{2} \int_0^b V^2 dm = \frac{1}{2} \int_0^b (\dot{h} + r\dot{\varphi})^2 dm = \frac{1}{2} \dot{h}^2 \int_0^b dm + \dot{h}\dot{\varphi} \int_0^b r dm + \frac{1}{2} \dot{\varphi}^2 \int_0^b r^2 dm = \frac{1}{2} \dot{h}^2 m + \dot{h}\dot{\varphi} S_\varphi + \frac{1}{2} \dot{\varphi}^2 I_\varphi \quad (2)$$

Potenciální energie bude:

$$U = \frac{1}{2} K_\varphi \varphi^2 + \frac{1}{2} K_h h^2 \quad (3)$$

Provedeme naznačené derivace kinetické a potenciální energie v Lagrangeově rovnici a dostaneme soustavu diferenciálních rovnic:

$$\begin{aligned} m\ddot{h} + S_\varphi \ddot{\varphi} + K_h h &= -Y \\ S_\varphi \ddot{h} + I_\varphi \ddot{\varphi} + K_\varphi \varphi &= M \end{aligned} \quad (4)$$

Parametry obtékané konstrukce profilu dle Obr. 3 byly následující:

- Hmotnost nosné plochy  $m = 0,086\ 622$  [kg]
- Statický moment kolem EO  $S_\varphi = 0,000\ 779\ 673$  [kg.m] (těžiště v 37 % tětivy)
- Moment setrvačnosti kolem EO  $I_\varphi = 0,000\ 487\ 291$  [kg.m<sup>2</sup>]
- Translační (ohybová) tuhost  $K_h = 105,109$  [N.m<sup>-1</sup>]
- Torzní tuhost  $K_\varphi = 3,695\ 582$  [N.m.rad<sup>-1</sup>]
- Rozpětí aerodynamického modelu  $l = 0,079$  [m]
- Tětiva aerodynamického modelu  $b = 0,30$  [m]
- Poloha elastické osy – 40% tětivy (měřeno od náběžné hrany)

Tab. 1 – Frekvence vlastních tvarů kmitu 2 DOF modelu

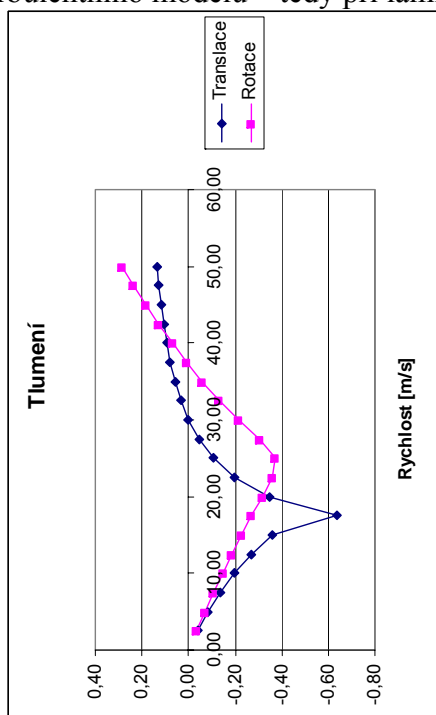
Vl. tvar	Typ vl. tvaru	f [Hz]
1.	Translace (ohyb)	5,537
2.	Rotace (torze)	13,980

Za účelem porovnání výsledků byl pro tento případ byl řešen výpočet flatru dle lineárních teorií v MSC.Nastran. Byla určena první kritická rychlost flatru  $v_{KR} = 30,0$  m/s při kontinuální jednostranné divergenci. Tyto charakteristiky lze odečíst z diagramů Obr. 4a-4b, jež znázorňují průběh frekvence odezvy a tlumení 2DOF konstrukce v závislosti na rychlosti dle jednotlivých tvarů kmitu v dané kombinaci obou tvarů kmitu.

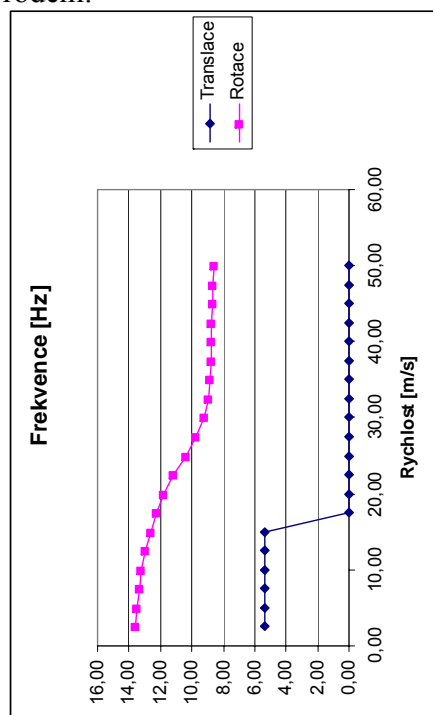
V CFD systému STAR-CD byly dále provedeny výpočty simulací dynamické odezvy konstrukce definované výše metodou konečných objemů s pohyblivou mřížkou při obtékání leteckého profilu křídla NACA 0012. Výpočet byl proveden pro dva stupně volnosti, z modelu (viz Obr. 2) tedy odpadáva horizontální translace a zůstává rotační a vertikálně-translační pohyb.

Byly vypočteny simulace při různých rychlostech proudění od 25 do 45 m/s. Počáteční podmínka dynamického buzení byla pootočení profilu  $\varphi = 1,5^\circ$ . Charakteristiky fluidního

pole jsou parametry vzduchu dle Standardní atmosféry pro výšku 200 m n. m., bez použití turbulentního modelu – tedy při laminárním prodění.



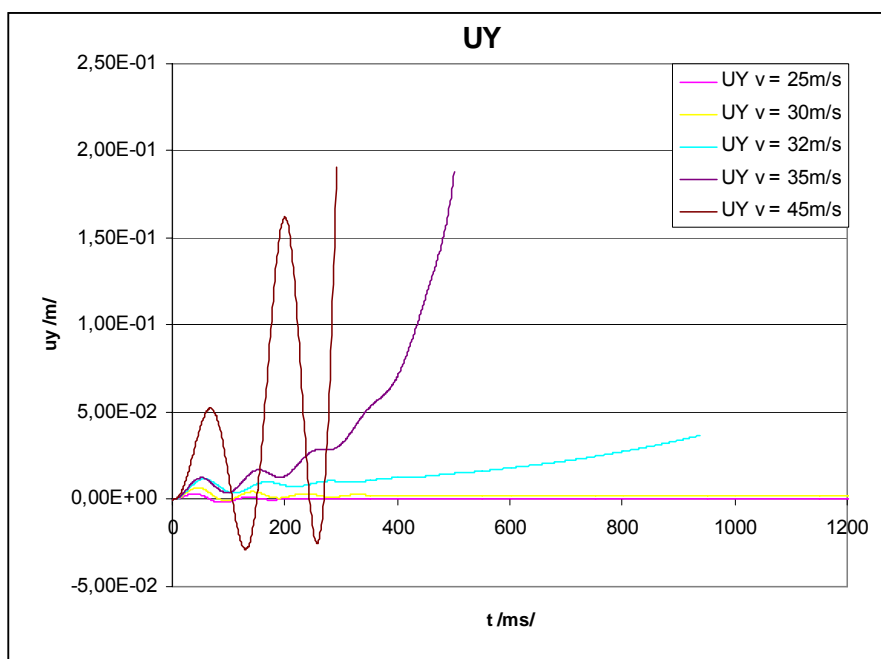
Obr. 4a – Diagram tlumení 2-DOF úlohy v závislosti na rychlosti



Obr. 4b – Diagram frekvence odezvy 2-DOF úlohy v závislosti na rychlosti

Obr. 4 – Výsledný diagram f-g-v flatrového výpočtu 2-DOF úlohy

Dle grafického znázornění posunutí profilu v závislosti na čase z výpočtu CFD (Obr. 2) je zřejmé, že divergence nastává rovněž po dosažení rychlosti 30,0 m/s. Z počátku dojde k zakmitnutí a následně pokračuje jednostranná divergence. Při postupném zvyšování rychlosti proudu za reálných podmínek by však divergence byla plynulá v průběhu celého sledovaného časového úseku.



Obr. 5 – Průběh horizontální výchylky v čase dle CFD výpočtu

## 5. Dvourozměrný případ odezvy kruhového profilu na odtrhávání vírů

Jedná se model odezvy profilu konstrukce na odtrhávání von Kármánových vírů, které vzniká především v kritické, ale také nadkritické oblasti charakteru turbulentního nestacionárního proudění, jež je definována Reynoldsovým číslem  $Re = (5 \div 350) \cdot 10^3$ .

Tato úloha je řešitelná právě pouze s využitím CFD systému propojeného s dynamickým konstrukčním řešičem.

Parametry úlohy byly následující:

Horizontální

translační tuhost  $k_x = 9869,6 \text{ N/m}$

Vertikální

translační tuhost  $k_y = 9869,6 \text{ N/m}$

Hmotnost  $m = 10 \text{ kg}$

Vlastní frekvence  $f_x = f_y = 5,0 \text{ Hz}$

Výška obtékaného válce  $l = 1,0 \text{ m}$

Průměr obtékaného válce  $b = 0,3 \text{ m}$

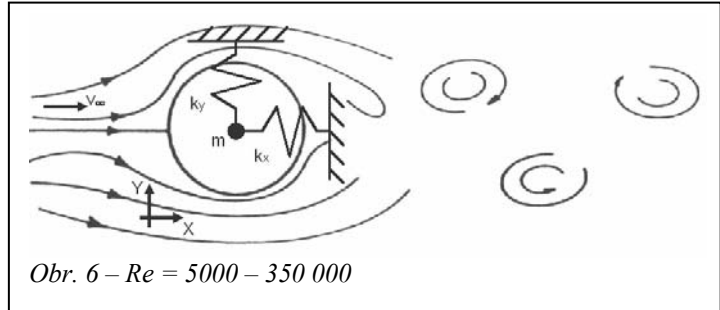
Rychlost proudění  $v_\infty = 8,5 \text{ m/s}$

Strouhalovo číslo  $St \approx 0,18 \div 0,20$

Hustota vzduchu  $\rho = 1,202 \text{ kg/m}^3$

Kinematická viskozita  $\mu = 1,46e-5 \text{ m}^2/\text{s}$

Reynoldsovo číslo  $Re \approx 210\,000$



Parametry proudění byly nastaveny tak, aby frekvence vírové rezonance dle Strouhalova čísla ze vztahu:

$$f_{cr} = \frac{St \cdot v_{cr}}{b} = 5,1 \div 5,6 \text{ Hz} \quad (5)$$

odpovídala vlastní frekvenci konstrukce.

Dynamická odezva byla řešena Newmarkovou metodou dle nezávislých pohybových rovnic:

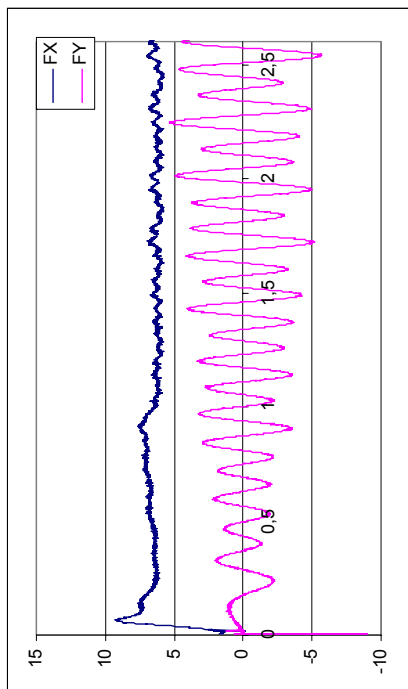
$$\begin{aligned} m\ddot{u} + K_x u &= X \\ m\ddot{v} + K_y v &= Y \end{aligned} \quad (6)$$

Při CFD výpočtu proudění byl použit trubulentní model k-Epsilon pro nízká Reynoldsova čísla se standardním chováním u stěny. Mezní vrstva při obtékání válce, jež byla určna dle vztahu :

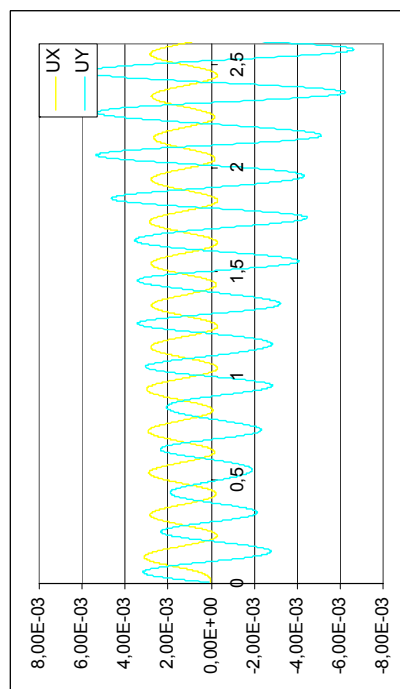
$$= 0,01 \text{ m} \quad (7)$$

Byla rozdělena do 16 vrstev buněk konečných objemů, přičemž tloušťka první vrstvy buněk na stěně odpovídala  $ds = 0,0003 \text{ m}$ .

Z diagramu Obr. 7 je zřejmé, že při simulaci došlo k přimknutí vírové rezonance na odezvu konstrukce a vzájemné interakci, čehož důsledkem byl následný nárůst amplitudy vertikální odezvy v čase. Výpočet však kolaboval z důvodu nastavení parametrů trubulentního modelu a frekvence odtrhávání vírů rovněž neodpovídala výše uvedeným 5,1 Hz, ale 8,5 Hz, jež by vedly na Strouhalovo číslo odpovídající 0,3.



Obr. 7a – Průběh vztlaku a odporu v čase



Obr. 7b – Průběh vertikální a horizontální výchylky v čase

Obr. 7 – Odezva obtékaného kruhového profilu

## 6. Závěr

Z provedených a vyhodnocených výpočtů je zřejmé, že existuje shoda řešení aeroelastických úloh při nestacionárním laminárním režimu proudění za použití CFD metod propojených s řešením konstrukční částí metodou konečných prvků a řešení za použití lineárních aerodynamických teorií.

Při výpočtu aeroelastické odezvy na vírovou rezonanci je třeba klást velký důraz na nastavení parametrů CFD výpočtu, vhodný výběr turbulentního modelu a správnou diskretizaci mřížky domény konečných objemů.

Tato metoda bude dále rozvíjena a testována při aplikaci na úlohy interakce proudění s konstrukcemi o vyšší stupni volnosti při s laminárním prouděním. V řešení odezvy odezvy konstrukce na odtrhávání vírů bude pokračovat testování turbulentních modelů při různých rychlostech proudění, diskretizací mřížek a profilů obtékaných konstrukcí.

## 7. Literatura

- Čečrdle, J. (2004) Aeroelastická analýza ověřovacího modelu letecké konstrukce se dvěma stupni volnosti, výzkumná zpráva VZLÚ, V-1799/3210/04.
- Čečrdle, J. (2005) Výpočet vířivého a křídélkového flatru křídla s motorem aeroelastického modelu letounu L-610, výzkumná zpráva VZLÚ, V-1839/3210/05.
- Losík, V. & Čečrdle, J. (2005) Aeroelastická analýza ověřovacího modelu letecké konstrukce se třemi stupni volnosti, výzkumná zpráva VZLÚ, V-1833/3210/5.
- Hodges, H. D. & Pierce, A. G. (2002) Introduction to Structural Dynamics and Aeroelasticity, ISBN: 0-521-80698-4.