

SIMULATION OF AN ELASTIC STRUCTURES VIBRATING IN FLUID

L. Pohanka ¹

Summary: This contribution is focused on vibration of an elastic structure in incompressible fluid. Computer simulation of this problem in time domain is performed. Strong coupled partitioned approach for fluid-structure interaction, ANSYS software and non-stationary harmonic excitation are used. Response in time domain and lowest resonant frequency of the structure are obtained as results of the simulation. This method respects viscosity of fluid and large structural displacement.

1. Úvod

Výpočet dynamických vlastností těles interagujících s tekutinami je důležité pro efektivní navrhování hydraulických strojů. Znalost frekvencí při kterých dochází k rezonančnímu kmitání umožňuje zvolit provozní otáčky stroje dostatečně daleko od takovýchto potenciálně nebezpečných stavů.

Problém interakce těles a nestlačitelných tekutin je obecně nelineární. Při řešení těchto problémů se běžně postupuje tak, že se problém linearizuje. Obvykle se to provádí linearizací rovnic popisujících tekutinu, zanedbáním konvektivních členů, viskozity a zavedením předpokladu malých výchylek nebo nevřívého proudění. Takto upravený model dává po řešení dobré výsledky pro širokou škálu inženýrských problémů interakce těles a tekutin a to z důvodu, že viskozita tekutiny bývá v praxi obvykle malá, konvektivní členy Navier-Stokesových (N-S) rovnic zanedbatelné a výchylky skutečně malé.

Poté je možné popsat tekutinu zjednodušeným systémem lineárních rovnic založeným například na vlnové rovnici (Schroeder & Marcus (1975)) nebo potenciálním proudění (Nikitabooon & Bathe (1993)). Pro popis tekutiny a diskretizaci tělesa a tekutiny, při numerickém řešení, existuje celá řada postupů. Většina z nich končí řešením problému vlastních hodnot jedné soustavy rovnic popisujících jak deformace tělesa tak proudění tekutiny. Celá řada komerčních programů nabízí možnost takového řešení. V programu ANSYS je to například modul LINFLOW.

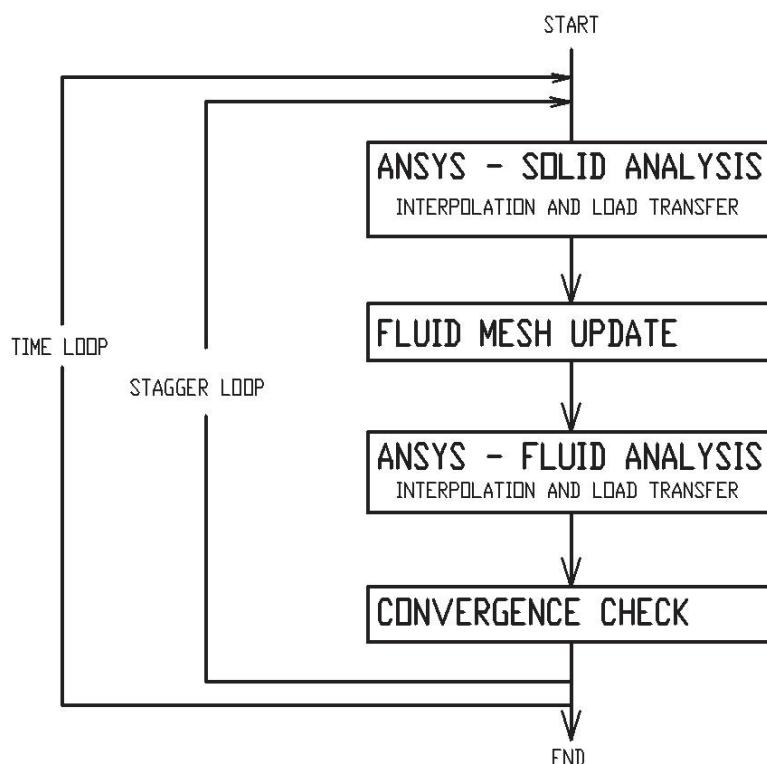
V praxi může ovšem nastat situace, kdy bude viskozita tekutiny velká, což bude méně častý případ, a nebo deformace tělesa velké, což by mohl být případ častější. Při velkých deformacích se projevuje nelinearita řešení deformací tělesa a zároveň narůstá význam viskozity tekutiny a konvektivních členů. Stejně tak nemusí být splněna podmínka nevřivosti.

¹ Ing. Lukáš Pohanka, Ústav mechaniky těles, mechatroniky a biomechaniky, FSI, VUT v Brně, Technická 2896/2, 616 69 Brno, e-mail ypohan00@stud.fme.vutbr.cz

2. Algoritmus FSI

Při výpočtu je využito možností programu ANSYS pro řešení úloh interakce těles a tekutin. Pro výpočet deformací tělesa je použit řešič ANSYS založený na metodě konečných prvků a pro řešení proudění tekutiny FLOTTRAN založený na metodě konečných objemů. Oba řešiče jsou navzájem propojeny pomocí okrajových podmínek a v jednotlivých iteracích algoritmu FSI (fluid-structure interaction) se mezi nimi přenáší zatížení. Rozlišují se dva základní typy algoritmů tzv. "weak coupled" a "strong coupled" (Hübner & Seidel (2007)). Liší se navzájem počtem iterací mezi řešiči během časového kroku.

Program ANSYS dokáže řešit deformace tělesa včetně možnosti výpočtu nelineárních úloh těles s velkými deformacemi. Pro řešení dynamických úloh používá implicitní časovou integraci. Řešič FLOTTRAN využívá k výpočtu N-S rovnic modifikovaný SIMPLE algoritmus a je schopen při výpočtu zohlednit širokou škálu jevů, např. pohyb hranice tekutiny a turbulentní proudění. Rovnice tekutiny jsou v ALE (Arbitrary Lagrangian-Eulerian) formě, která umožňuje do výpočtu proudění tekutiny zahrnout pohyb hranice. Přenos zatížení z tělesa do tekutiny je realizován posuvem hranice tekutiny korespondujícím s deformací tělesa zmenšenou relaxačním koeficientem. Přenos zatížení z tekutiny na těleso se realizuje zatížením tělesa tlakem, který odpovídá tlaku v tekutině, ten je opět relaxován. Relaxační koeficient zajišťuje numerickou stabilitu úlohy, na kterou má také významný vliv počet vnitřních iterací. Sítě tělesa a tekutiny nemusí být v místě kontaktu totožné a program zatížení při přenosu interpoluje mezi sítěmi.

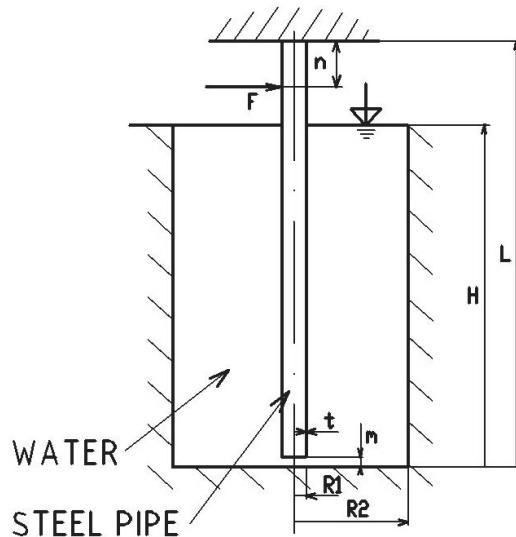


Obr. 1: Schema algoritmu FSI

3. Model

Jako modelová úloha byl zvolen jednostranně vetknutý prut ponořený ve válcové nádobě s tekutinou. Prut je ocelová trubka délky 1200mm a o tloušťce stěny 2mm. Tekutinou je voda. Úloha byla řešena pro několik různých výšek tekutiny a průměrů nádoby. Schéma modelové úlohy je na obrázku 2.

$L=1100\text{mm}$									
$R_1=16.85\text{mm}$									
$t=2\text{mm}$									
$H=0-1000\text{mm}$									
$m=5\text{mm}$									
$n=100\text{mm}$									
<table border="1"> <thead> <tr> <th></th> <th>$R_2 [\text{mm}]$</th></tr> </thead> <tbody> <tr> <td>vessel 1</td> <td>35</td></tr> <tr> <td>vessel 2</td> <td>50</td></tr> <tr> <td>vessel 3</td> <td>105</td></tr> </tbody> </table>			$R_2 [\text{mm}]$	vessel 1	35	vessel 2	50	vessel 3	105
	$R_2 [\text{mm}]$								
vessel 1	35								
vessel 2	50								
vessel 3	105								



Obr. 2: Schéma modelové úlohy

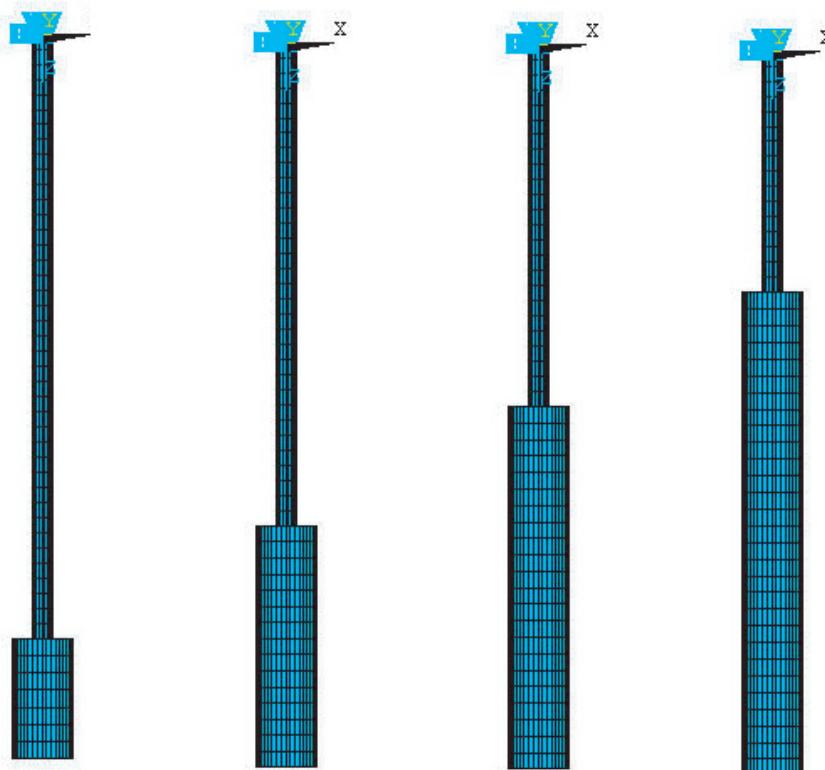
Výpočtová síť pro řešení deformací tělesa je tvořena konečnými prvky SOLID45. Pro modelování tekutiny je použit prvek FLUID142. Z důvodu zjednodušení výpočtové sítě není v modelu vytoveném z konečných prvků zahrnuta oblast mezi koncem prutu a dnem nádoby, přičemž její vliv na výsledky výpočtu se považuje za zanedbatelný. Počty prvků v sítích se liší podle výšky tekutiny a průměru nádoby. Úlohy s výškou vody vyšší než 0.8m nebyly řešeny z důvodu velkého počtu prvků tekutiny a tím významně narůstajících výpočtových nákladů a také zhoršením numerické stability úlohy. Zvyšování výšky vody nad tuto hodnotu však již nemá významný vliv na hodnotu nejnižší rezonanční frekvence.

Na povrch prutu i povrch nádoby je předepsána jako okrajová podmínka nulová rychlosť tekutiny, což odpovídá chování reálné tekutiny. Na povrchu nádoby jsou také předepsány nulové posuvy hranice. Na dně nádoby je zamezen posuv pouze v ose z.

4. Řešení

Prut je nestacionárně harmonicky buzen silou o amplitudě 10N se zrychlením $\alpha = 1.178\text{Hz/s}$. Deformace tělesa jsou v algoritmu řešeny před tlakem v tekutině a probíhá 5 vnitřních (stagger) iterací během jednoho časového kroku. Délka časového kroku 0.002s. Relaxace algoritmu je 0.5. Řešení deformací tělesa bylo provedeno jako lineární (předpoklad malých deformací) a to z důvodů snížení výpočtových nákladů a také proto, že deformace prutu jsou skutečně malé (do 2%). Výsledkem výpočtu je výchylka konce prutu v závislosti na čase.

Z této odezvy je následně vyhodnocena frekvence při které dojde k rezonančnímu kmitání. Byly zkoušeny rověž jiné způsoby buzení, jako buzení rázem, nebo počáteční výchylkou, ale s



Obr. 3: MKP modely úlohy pro různé výšky tekutiny

ohledem ke stabilitě řešení bylo zvoleno právě nestacionární harmonické buzení.

Výchylka konce prutu v závislosti na budící frekvenci ve směru buzení (UX) a ve směru kolmém na buzení (UY) pro nádobu 2 (vessel 2) a výšku vody 0,6m je na obr 6.

Na obr. 7 je pro ilustraci tlakové a rychlostní pole vzniklé při pohybu prutu tekutinou pro jeden náhodně vybraný časový krok.

5. Zhodnocení

Při stanovování závislostí na jednotlivých parametrech bylo řešení provedeno jen pro několik izolovaných bodů a to z důvodů značných výpočtových nákladů. Numerická stabilita algoritmu je závislá na jeho relaxaci a délce časového kroku. Výsledky jsou závislé na hustotě sítě, zrychlení buzení, velikosti výchylky, délce časového kroku a celé řadě dalších faktorů. Závislost nejnižší rezonanční frekvence na výšce vody pro daný průměr nádoby je na obr.4.

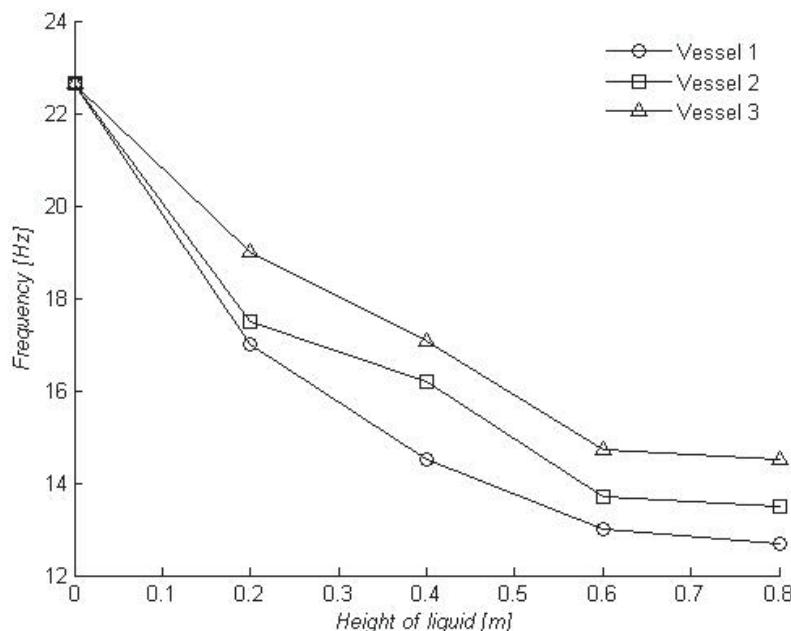
Na obr.6 je znázorněna závislost rezonanční frekvence, pro největší nádobu a výšku vody 0,1m, na viskozitě tekutiny. Je z ní patrné, že při těchto malých výchylkách (řádově 10^{-4} m) a malé výšce tekutiny rezonanční frekvence klesá, ale nikterak významně.

Na obr.5 je porovnána odezva prutu v největší z nádob a výšku vody 0,1m při amplitudě budící síly 10N a 1000N. Úloha se při větším buzení stává méně numericky stabilní a během iterací dochází k situacím, kdy je výchylka konce prutu taková, že prochází stěnou nádoby a tím dojde ke zhroucení celého výpočtu.

Ze stejného důvodu je obtížné tento postup použít v případě že je mezera mezi tělesem

a stěnou nádoby malá.

Z provedených výpočtů je patrné, že při zvýšení amplitudy zhruba na 10e-2m se rezonanční frekvence mění jen nevýznamně.



Obr. 4: Závislost rezonanční frekvence na výšce vody a průměru nádoby

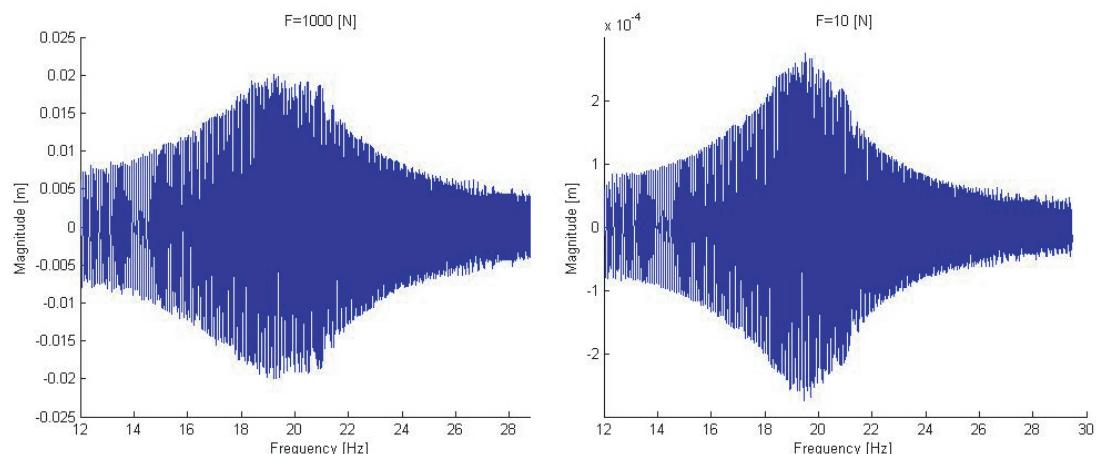
6. Závěr

Výpočtové náklady při použití tohoto postupu jsou extrémně vysoké a pro vyšší frekvence nebo složitější model se stanou téměř neúnosné. Pro některé případy ovšem mohou tyto náklady být opodstatněné. Pokud je nutné ve výpočtu zohlednit velké deformace, významnou viskozitu nebo vřílivé proudění tekutiny.

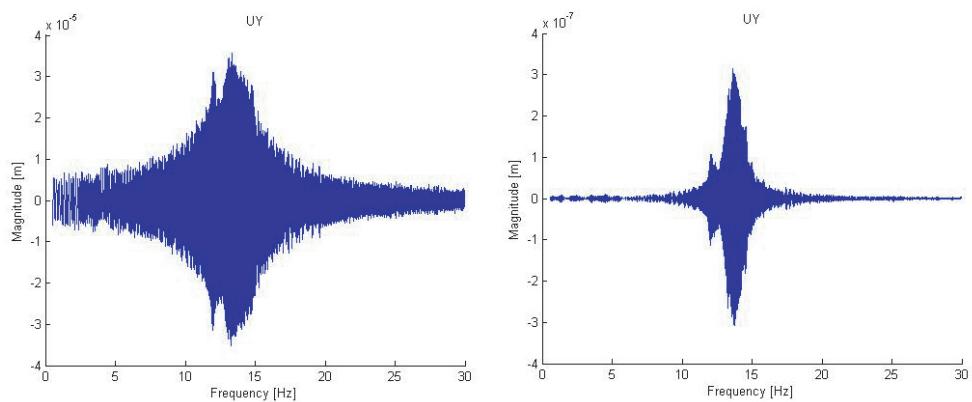
Literatura

- Altinisik D., Karadeniz H. & Severn R.T. (1981) Theoretical and experimental studies on dynamic structure-fluid coupling, *Proc. Instn Civ. Engrs*, Part 2, 1981, 71, Sept., 675-704.
- Amabili M., Pelicano F. & Paidoussis M.P. (2000) Non-Linear dynamics and stability of circular cylindrical shells containing flowing fluid, *Journal of Sound and Vibration*, 237(4), pp. 617-640.
- Broch, J.T. (1984) *Mechanical Vibration and Shock Measurements*, Brüel & Kjær, Glostrup.
- Cho J.-R. & Song J.-M. (2001) Assessment of Classical Numerical Models for the Separate Fluid-Structure Modal Analysis, *Journal of Sound and Vibration* 239(5), 995-1012.
- Everstine G.C. & Gordon C. (2000) Finite Element Solution of Fluid-Structure Interaction Problems, 18 May

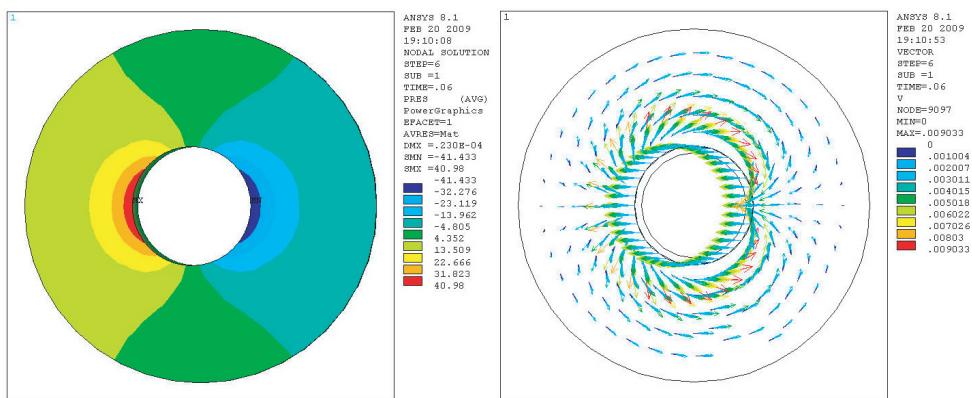
- Haufe A., Wiemar K. & Göhner U. (2004) Advanced Airbagsimulation using Fluid-Structure Interaction and the Eulerian Method in LS-DYNA, *LS-DYNA Anwenderforum*, Bamberg 2004
- Hübner, B. & Seidel, U. (2007) Partitioned solution to strongly coupled hydroelastic systems arising in hydro turbine design *2nd IAHR International Meeting of the Workgroup on Cavitation and Dynamic Problems in Hydraulic Machinery and Systems*, Timisoara Romania, October 24-26, pp.55-64
- Kölke A. & Legay A. (2006) An Enriched Space-Time Finite Element Method for Fluid-Structure Interaction - Part II: Thin Flexible Structures, *III European Conference on Computational Mechanics Solids, Structures and Coupled Problems in Engineering*, C.A.Monta Soares et.al.(eds.), Lisbon, Portugal, 5-8 June
- Nikitpaiboon C. & Bathe K.J. (1993) An Arbitrary Lagrangian-Eulerian Velocity Potential Formulation for Fluid-Structure Interaction, *Computers and Structures*, Vol. 47 , No. 4/5, pp. 871-891
- Novotný J., Horáček J. & Damašek A. (1999) Numerical Solution of Fluid-Structure Interaction using Finite Element Method, *Engineering aero-hydroelasticity*, Prague, August 30-September 3, 1999
- Schroeder E.A. & Marcus M.S. (1975) Finite Element Solution of Fluid-Structure Interaction Problems, *46th. Shock and Vibration Symposium*, San Diego, October 1975.



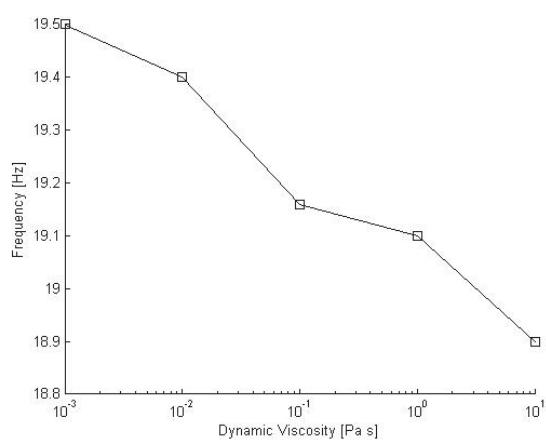
Obr. 5: Výchylka konce prutu pro různé amplitudy buzení



Obr. 6: Výchylka konce prutu ve směru buzení a ve směru kolmém



Obr. 7: Tlakové a rychlostní pole při pohybu prutu tekutinou



Obr. 8: Nejnižší rezonanční frekvence v závislosti na viskozitě tekutiny