

# Vibrace vyvolané prouděním tekutiny a jejich hodnocení

K interakci pevné a tekuté fáze dochází v celé škále inženýrských staveb, jako jsou např. chladicí věže, komíny, mosty, ale také zařízení jako jsou trubkové svazky tepelných výměníků a kotlů. Současná úroveň poznání v této oblasti umožňuje predikovat především únosnost v oblasti statického, resp. kvazi-statického zatížení. Tímto způsobem lze rychle a relativně přesně určit výskyt vibračních jevů, není však možné kvantitativně hodnotit vliv těchto vibrací na poškození trubkového svazku a predikovat tak jeho životnost.

## ÚVOD

Správná funkce zařízení na výměnu tepla je dána tepelně-hydraulickým návrhem, bezpečnost pro požadovanou životnost pak zajišťuje pevnostní návrh. Avšak na provedení kontroly trubkového svazku na vibrace vyvolané prouděním tekutiny se často zapomíná. Naopak snaha o lepší výměnu tepla obecně vede k většímu turbulentnímu proudění v mezitrubkovém prostoru. Turbulentní proudění obecně zapříčiňuje rozrušování laminárních podvrstev a také lepší teplotní homogenizaci proudu. Bohužel má i své stinné stránky. Těmi jsou větší a nepravidelnější silové odezvy (příklad silové odezvy v čase po délce trubky je znázorněna na obrázku 1) na stěnách trubkových svazků, které vznikají většinou od vírového buzení v místech úplavu. Díky těmto nepravidelným silovým odezvám dochází k jevu známému jako vibrace způsobené prouděním tekutiny.

Projevy vírového buzení, resp. silových odezev pak mohou být různé. V závislosti na amplitudě výchylky trubky mohou být kategorizovány podle jejich charakteristického projevu. Obecně jsou tyto projevy spojeny s názvy jako turbulentní excitace, vírové excitace (rezonanční oblast), oblast fluidně-elastické nestability a akustická rezonance.

Článek předkládá schéma umožňující vyhodnocení únavy pro jednotlivé vibrační jevy. Vyhodnocení je založeno na obousměrné FSI (interakce mezi tekutinou a strukturou) analýze, která je doplněna o experimentální data, empirické výpočty a databáze, umožňující ze-  
fektivnit výpočtovou náročnost numerických analýz.

## SOUČASNÝ STAV POZNÁNÍ

Popis současného stavu poznání nejlépe zhodnocují tyto úryvky z publikací. „Vibrace vyvolané prouděním se staly jedním z klíčových faktorů, na které se bere ohled při navrhování výměníků tepla spolu s tradičními tepelně-hydraulickými a pevnostními faktory“. [1] „V mnoha tepelných výměnících se objevily vibrační problémy, jak jim zabránit je obecně známo. Co velmi často chybí je schopnost dostatečně popsat vliv skutečné geometrie a podmínek proudění. V důsledku komplexnosti problému je schopnost přesně předpovědět intenzitu vibrací nebo pravděpodobnost poškození menší než jistá“. [2] „Vibrace způsobené prouděním tekutiny jsou velmi komplexním problémem a současný stav poznání neumožňuje přesně definovat řešení tohoto problému. Kvůli komplexnosti problému TEMA negarantuje zamezení výskytu vibračních poškození“. [3]

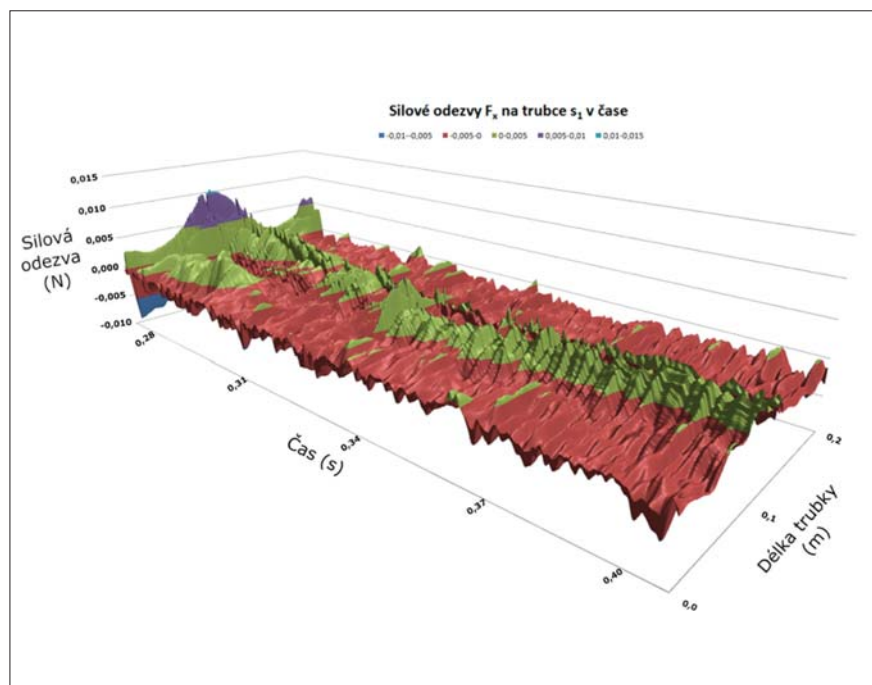
## Hodnocení vibrací způsobených prouděním

Současný stav poznání obsahuje bezpočet empirických nebo polo-empirických vztahů a metod pro stanovení např. výkonové spektrální hustoty silové odezvy, normalizované amplitudy, modální analýzy, tlumících koeficientů nebo frekvencí. Ačkoliv jsou tyto vztahy velmi efektivní a relativně přesné, mají určité podstatné nevýhody. Formulace těchto vztahů je založena na faktorech, které jsou konstantní, jako je například redukovaná rychlost, hydrodynamické součinitele apod.

Tabulka 1 poskytuje přehled kombinací všech možných mechanismů výskytu vibrací způsobených prouděním jak pro osamocenou trubku, tak pro trubkový svazek. Pro všechny tyto vibrační režimy existuje vyhodnocující

schéma. Toto schéma je založeno na postupném definování a vyhodnocování informací jako jsou například hustota tekutiny, redukovaná rychlost proudění, redukované tlumení, dále pak místa a způsob podepření trubek (počtu stupňů volnosti), typu geometrie atd. Z těchto informací se určí frekvence vírů a vlastní frekvence části kontrolované na vibrace. Dalším krokem je srovnání frekvencí a určení amplitud těchto frekvencí. Z amplitud se následně stanoví maximální posuvy trubek, které se následně zanáší do únavových křivek. [1], [2], [3]

Takto stanovený postup je výhodný pro rychlou kontrolu geometrie na vibrace vyvolané prouděním. Bohužel neposkytuje detailnější informace o rozložení napětí na geometrii



Obr. 1 – Silová odezva v čase po délce trubky

| Konfigurace toku     | Fluidně-elastická nestabilita | Vírové excitace | Turbulentní excitace | Akustická rezonance |
|----------------------|-------------------------------|-----------------|----------------------|---------------------|
| <b>Jedna trubka</b>  |                               |                 |                      |                     |
| Kapalina             | o                             | *               | *                    | o                   |
| Plyn                 | o                             | Δ               | Δ                    | o                   |
| <b>Svazek trubek</b> |                               |                 |                      |                     |
| Kapalina             | *                             | Δ               | Δ                    | o                   |
| Plyn                 | *                             | o               | Δ                    | *                   |
| <b>Legenda:</b>      |                               |                 |                      |                     |
| o                    | nepravděpodobný výskyt        |                 |                      |                     |
| Δ                    | možný výskyt                  |                 |                      |                     |
| *                    | nebezpečný výskyt             |                 |                      |                     |

Tab. 1 – Mechanismy vibrací způsobené prouděním [4]

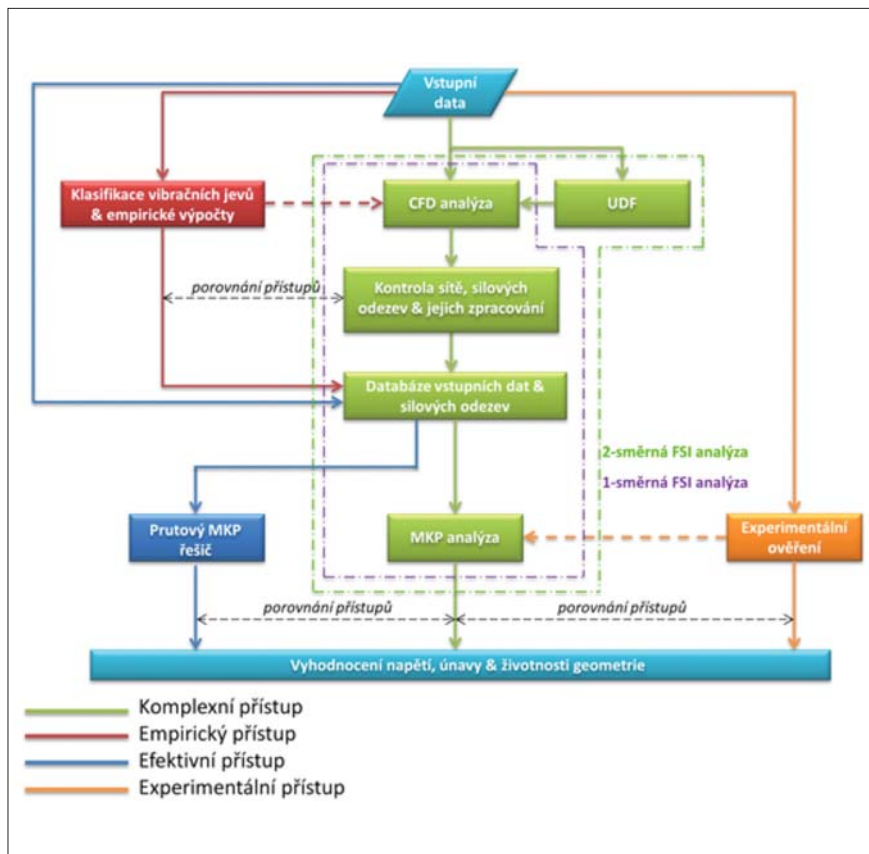
a místech, kde by mohlo docházet ke koncentraci napětí a potenciálnímu poškození trubky.

## METODA PRO KOMPLEXNÍ VYHODNOCENÍ TRUBKOVÉHO SVAZKU ZATÍŽENÉHO PROUDÍCÍ TEKUTINOU

Vibrace způsobené prouděním tekutiny představují značně komplexní jev, jehož predikce přímo vyžaduje popis interakce pevné struktury s tekutinou. Teprve z této interakce je možno zjistit pole napětí na interagující struktuře a následně určit možnou životnost trubkových svazků. Tohoto současné metody nejsou schopny. Způsobem znázorněným na obrázku 2 je možno predikovat místa poškození, vyhodnocovat únavu a životnost geometrie trubkového svazku. Schéma je rozděleno do čtyř přístupů;

- Empirický přístup
- Komplexní přístup
- Experimentální přístup
- Efektivní přístup

Prvním z nich je tzv. empirický přístup. Tento přístup využívá současného stavu poznání pro klasifikaci vibračních jevů. Taktéž využívá empirických výpočtů pro odhad časového výskytu víru v úplavu pro jejich popsání za pomoci komplexního přístupu. Empirický přístup je zároveň porovnáván (validován) s komplexním přístupem a zároveň jsou jeho relevantní výsledky ukládány do databáze. Druhý z přístupů má název komplexní přístup. Ze vstupních informací je definována doména s okrajovými podmínkami pro provedení CFD (výpočtová dynamika tekutin) analýzy. Z této analýzy jsou exportovány silové odezvy a rozmístění uzlů sítě z plochy trubky. Výstupy z CFD jsou kontrolovány a upravovány pro uložení do databáze. Posledním krokem je vytvoření modelu pro MKP (metoda konečných prvků) analýzu, s okrajovými podmínkami definovanými z CFD a následné vyhodnocení napětí, únavy a životnosti geometrie. Komplexní přístup bez UDF (uživatelé definované funkce) je označen jako jednosměrná analýza jelikož zahrnuje pouze interakce tekutiny na trubkový svazek. Tímto způsobem lze popsat pouze jevy s malými amplitudami výchylky trubky (např. u turbulentních excitací), kde lze zpětnou interakci trubkového svazku na tekutinu zanedbat. Pro vytvoření obousměrné analýzy se zavádí UDF, které umožní nasimulovat zpětnou interakci trubkového svazku na tekutinu a tedy analyzovat



Obr. 2 – Schéma vyhodnocování poškození na geometrii zatíženou proudící tekutinou

i jevy s velkými amplitudami kmitu (např. vírové excitace). Jelikož komplexní přístup obsahuje numerické analýzy, je důležité důkladně validovat tyto analýzy za pomoci experimentu. K tomu slouží experimentální přístup. Posledním přístupem je tzv. efektivní přístup. Tento přístup je zaveden za účelem časově nenáročného, ale podrobného hodnocení životnosti trubkových svazků, což jej předurčuje pro široké uplatnění v praxi. Klíčovými komponenty tohoto přístupu jsou databáze výsledků experimentů a CFD analýz a vlastní MKP prutový řešič. Jednou z významných výhod je pak nezávislost na drahých profesionálních softwarech.

## ZÁVĚR

Článek se zabýval problematikou hodnocení vibrací vyvolaných prouděním tekutiny. Snaží se v kostce zhodnotit současný stav poznání a ukázat možný směr, kudy by se mohl výzkum v této oblasti dále ubírat.

## Poděkování

Tento článek vznikl v rámci projektu NETME CENTRE PLUS (LO1202) za finanční podpory

Ministerstva školství, mládeže a tělovýchovy v rámci Národního programu udržitelnosti I.

## LITERATURA

- [1] HALLE H., CHENOWETH J.M., WAMBSGANSS M.W., DOE/ANL/HTRI Heat Exchanger Tube Vibration Data Bank, Agronne Natl. Lab. Tech. Memo. ANL-CT-80-3, Feb. 1980
- [2] HEWITT G., Heat exchanger design handbook, USA, New York: Begell House, 1998
- [3] Tubular Exchanger Manufacturers Association (TEMA), Standards of the tubular exchanger manufacturers association, 9th ed., USA, New York, 2007
- [4] PETTIGREW M. J., Vibration Analysis of Shell-And-Tube Heat Exchangers, Journal of Fluid and Structures, 18, ISSN 0889-9746

Ing. Jiří Buzík, Ing. Tomáš Léta, Ph.D.,  
doc. Ing. Zdeněk Jegla, Ph.D.,  
Ústav procesního inženýrství,  
Fakulta strojního inženýrství,  
Vysoké učení technické v Brně

## Vibrations caused by fluid flow and evaluating them

The interaction of solid and liquid phases occurs in a wide range of engineering structures, such as cooling towers, smokestacks, bridges, but also in equipment such as the tube bundles of heat exchangers and boilers. The current level of knowledge in this area makes it possible to especially predict loadbearing capacities in static, or quasi-static, loads. In this way, the occurrence of vibrating phenomena can be quickly and accurately determined, but it is not possible to quantitatively evaluate the effect of these vibrations on damages to a tube bundle or to predict its lifetime.