

DYNAMICKÉ VÝPOČTY PROGRAMEM ESA PT

Doc. Ing. Daniel Makovička, DrSc. *, Ing. Daniel Makovička**

*ČVUT v Praze, Kloknerův ústav, Praha 6,

**Statika a dynamika konstrukcí, Kutná Hora

1 ÚVOD

Obecně se dynamickým výpočtem rozumí výpočet vlastního kmitání a výpočet vynuceného kmitání analyzované konstrukce. Každá konstrukce je charakterizována svým naladěním. Toto naladění konstrukce lze vyjádřit spektrem vlastních frekvencí a vlastních tvarů kmitání; takže výpočet vlastního kmitání zahrnuje výpočet vlastních frekvencí a vlastních tvarů. Pro tento výpočet existuje řada metodik; program ESA, obdobně jako předchozí verze FEAT vychází z metodiky zpětné iterace podprostoru. Výhodou, případně nevýhodou je, že tato metodika je výhodná pro relativně malý počet zjišťovaných vlastních párů (frekvencí a tvarů) v řádu desítek těchto vlastních párů a vždy počínaje nejnižším vlastním tvarem a jemu odpovídající nejnižší vlastní frekvencí. Pokud nás zajímá větší počet zjišťovaných vlastních párů, výpočtové časy značně narůstají. Některé vlastní tvary a jim odpovídající frekvence odpovídají globálnímu zakmitání konstrukce, jiné jen lokálnímu zakmitání zpravidla malé části konstrukce. Programy ESA i FEAT nemají zabudováno energetické kritérium pro posouzení, zda se jedná o lokální nebo globální tvar a bez vynesení tvaru a jeho vizuálního posouzení nelze o typu tvaru rozhodnout. Problematické zůstává vynášení kroutivých vlastních tvarů kmitání.

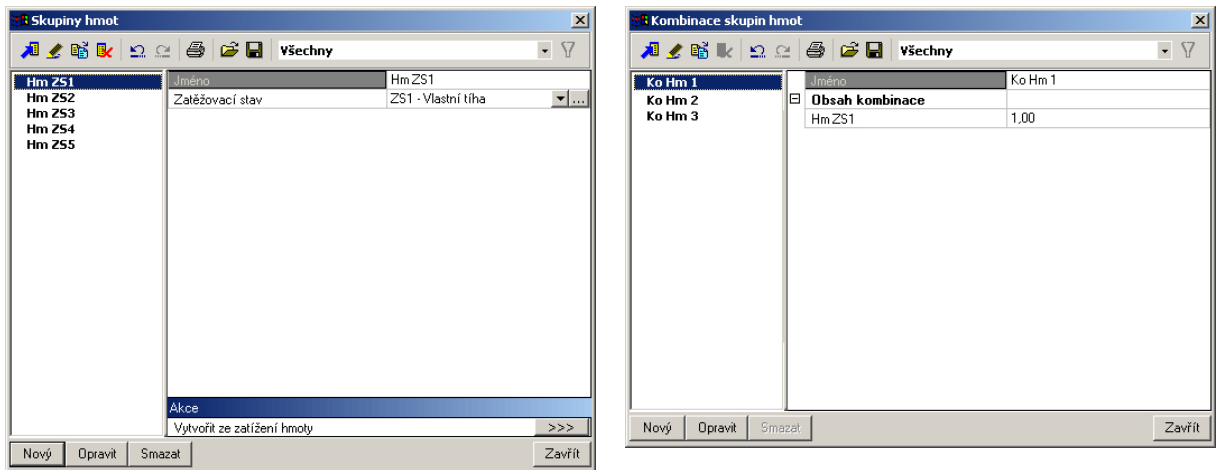
Výpočet vynuceného kmitání se používá v případech, když buzení – pravá strana pohybové rovnice je nenulová. Program ESA využívá pro výpočet vynuceného kmitání rozkladu dynamického zatížení do vypočtených vlastních tvarů. Tato metodika má rovněž svá omezení a sice především je nutné předem spočítat dostatečný počet vlastních tvarů – zpravidla se jedná o globální tvary; míra výstižnosti – přesnosti tohoto výpočtu je právě závislá na počtu těchto tvarů a sice těch, které mají v místě působení zatížení, ať již silového nebo kinematického, dostatečné výchylky (kmitny). ESA zatím dokáže spočítat vynucené kmitání pro harmonické buzení pro dostatečně malý útlum a dále dokáže rozložit do vlastních tvarů dynamické účinky větru a to pouze zatížení větrem ve směru působení větru a na zatížení od vírové rezonance v příčném směru. Obdobně lze do vlastních tvarů rozložit i seismické buzení – a to jak pro obecné účinky, tak pro účinky specifikované podle národních norem zobecněným a zjednodušeným spektrem odezvy.

Program ESA dosud neumí spočítat vynucené kmitání pro obecné neharmonické zatížení; pro tento výpočet lze použít verze FEAT 2000 nebo předchozí dosovskou verzi.

2 VLASTNÍ KMITÁNÍ

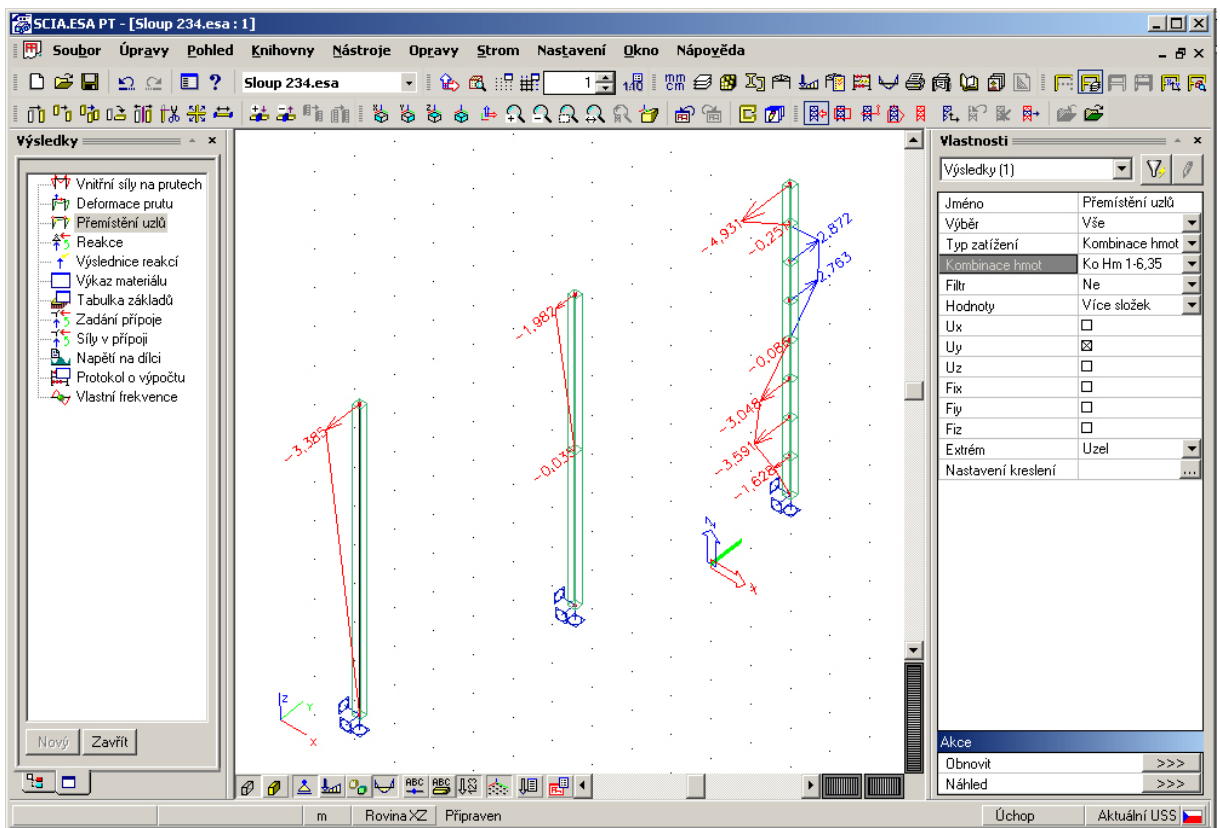
Při analýze dynamicky zatížené konstrukce je nutné vždy začít výpočtovou analýzu výpočtem vlastního kmitání. Vlastní frekvence jsou obecně funkcí hmotnosti a tuhosti konstrukce a tak před zahájením výpočtu je nutné stanovit zejména vliv rozdělení hmotnosti po konstrukci na vypočtené vlastní páry. Do hmotnosti konstrukce se započítává minimálně vlastní hmotnost konstrukce a osamělé hmotnosti v místě soustředěných břemen. Správné však je do hmotnosti konstrukce započítat i hmoty odpovídající ostatním stálým složkám zatížení, případně stálým složkám užitných zatížení (ČSN 73 0032 stanoví zásady pro započtení jednotlivých zatížení). Program ESA i starší FEAT umožňují započítat do hmoty konstrukce hmoty, odpovídající jednotlivým zatížením. V programu ESA je nutné provést

výpočet vlastního kmitání pro určenou kombinaci hmot. Tuto kombinaci hmot lze vytvořit automatickou generací z jednotlivých zatěžovacích stavů.



Obr.1 Dialogová okna pro vytváření skupin hmot a jejich kombinace

Při výpočtu vlastního kmitání se automaticky provádí Sturmova kontrola – ověřování, zda při výpočtu nebyla vynechána některá vlastní hodnota (jsou však známy případy, kdy výsledky Sturmovy kontroly nejsou stoprocentně spolehlivé). Tato kontrola byla v programu FEAT volitelná.



Obr.2 Vykreslení stejného vlastního tvaru kmitání na třech stejných sloupech s odlišným počtem uzlů

Výstupem vlastního kmitání u ESA je tabulka vlastních frekvencí. Tato tabulka je pro většinu úloh bez znalosti vlastního tvaru prakticky nepoužitelná. Při vynášení vlastních tvarů ESA umožňuje vynést pořadnice vlastního tvaru pouze v zadaných uzlech jako přemístění uzlů. Je tedy nutné před zahájením výpočtu provést definici těchto uzlů, např. dostatečně

jemným předrozdělením prutů konstrukce na jednotlivé části. V případě plošných konstrukcí technika dělení na uzly není zatím řešitelům známa – tuto verzi programu ESA jsme neměli k dispozici. Kromě výše uvedeného, jak v programu FEAT tak i u ESA zůstává problémem vynést kroutivé tvary – toto vynesení je možné pouze v dosovské verzi FEATu.

3 VYNUCENÉ KMITÁNÍ

Pro výpočet vynuceného kmitání je nutné znát spektrum budících frekvencí. Vzhledem k tomuto spektru buzení stanoví ČSN 73 0032 minimální frekvenční interval, ve kterém je nutné stanovit vlastní tvary – zjednodušeně zpravidla od poloviny budící frekvence do jejího dvojnásobku.

ESA i předchozí FEAT stanovuje vlastní frekvence v rozsahu nejnižších n frekvencí. To znamená, že spodní mez frekvenčního intervalu je automaticky stanovena nejnižší vlastní frekvencí. Dosažení horní meze frekvenčního intervalu je nutné zkusmo ověřit; u rozsáhlých úloh s hustým dělením prvků existuje řada lokálních vlastních frekvencí, které pro řešení úlohy v podstatě nemají význam, ale způsobují neúměrný nárůst času pro řešení. Takže dosáhnout např. hodnoty 100 Hz pro rotační stroje typu turbosoustrojí (na otáčkách 50 Hz) je značně obtížné, případně někdy i nemožné (např. pro plynové turbíny na otáčkách okolo 300 Hz).

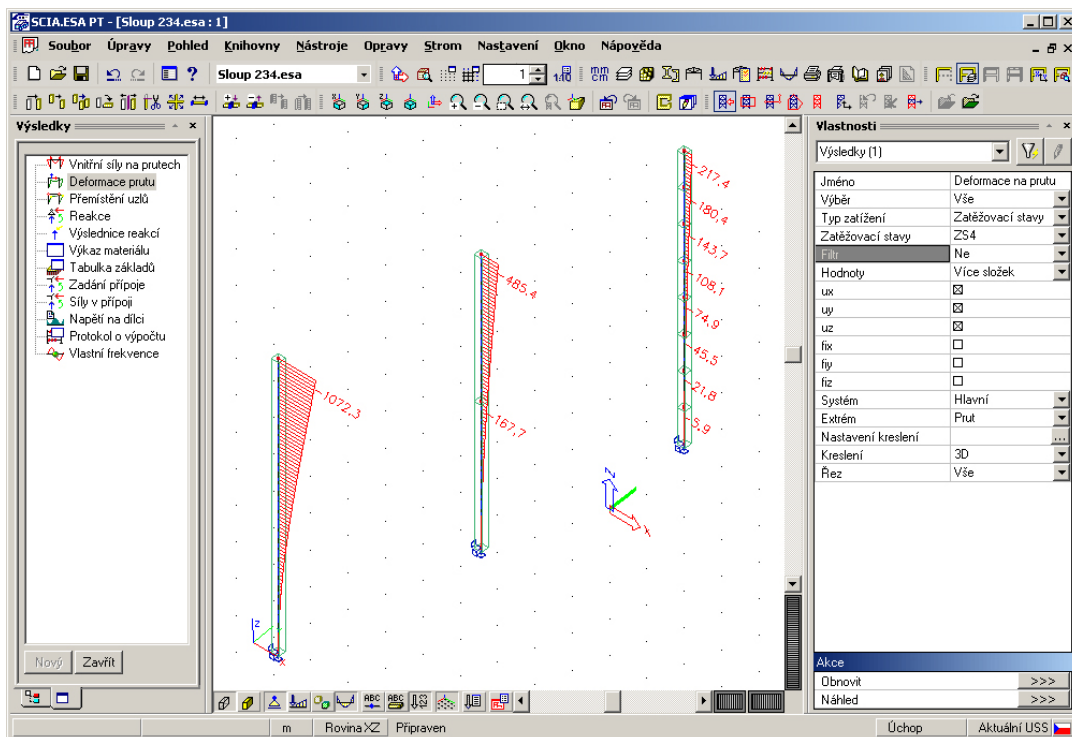
Jestliže tedy připustíme, že např. pro seismické buzení mohou být významné i frekvence okolo 30 Hz, pak výpočet vlastních tvarů a frekvencí by měl být proveden minimálně ve frekvenčním pásmu od 0 do 60 Hz. Pokud sestavíme velmi podrobný výpočtový model (s hustým dělením na konečné prvky) pak jednotlivé lokální vlastní tvary mohou po sobě následovat s frekvenčními rozestupy i 0,1 Hz, případně ještě menšími, takže potřebujeme spočítat pro pásmo 0 až 60 Hz cca 600 vlastních tvarů a frekvencí a pro ně není použitá metodika v programu ESA, ani FEAT výhodná – řešení není numericky stabilní anebo vede na nereálné výpočtové časy. Ani rozklad dynamického zatížení do tak velkého počtu vlastních tvarů není použitelný pro běžné výpočty. Je proto nutné volit vhodný kompromis mezi dělením konstrukce na konečné prvky a požadovanou přesností výpočtu a dobou jeho trvání.

U dynamického větru zpravidla situace bývá jednodušší, neboť zatížení větrem rozkládáme do několika (jednoho nebo několika) nejnižších vlastních frekvencí, zpravidla do cca 4 Hz (ČSN 73 0035, ENP). S problémem se lze setkat u konstrukcí u nichž jsou dvojité (zdvojené) vlastní frekvence – zpravidla 1. a 2. frekvence, dále 3. a 4. frekvence u symetrických konstrukcí. Zdvojená frekvence znamená např., že jeden vlastní tvar kmitání ve směru x odpovídá obdobnému tvaru ve směru y , s tím, že oba tvary mají stejnou velikost (hodnotu) vlastní frekvence. Tomuto zdvojenému tvaru vlastně odpovídá kmitání v diagonálním směru a pro hranaté konstrukce zpravidla stožárů a věží to znamená provést analýzu větru jak ve směru x , tak y , tak také v diagonálním směru. Z hlediska praktického provedení výpočtu znamená výpočet pro jednu frekvenční hodnotu zdvojené frekvence provést pro všechny tři směry (x , y a diagonálu mezi nimi) a výsledky „sečíst jako kvadráty pod odmocninou“.

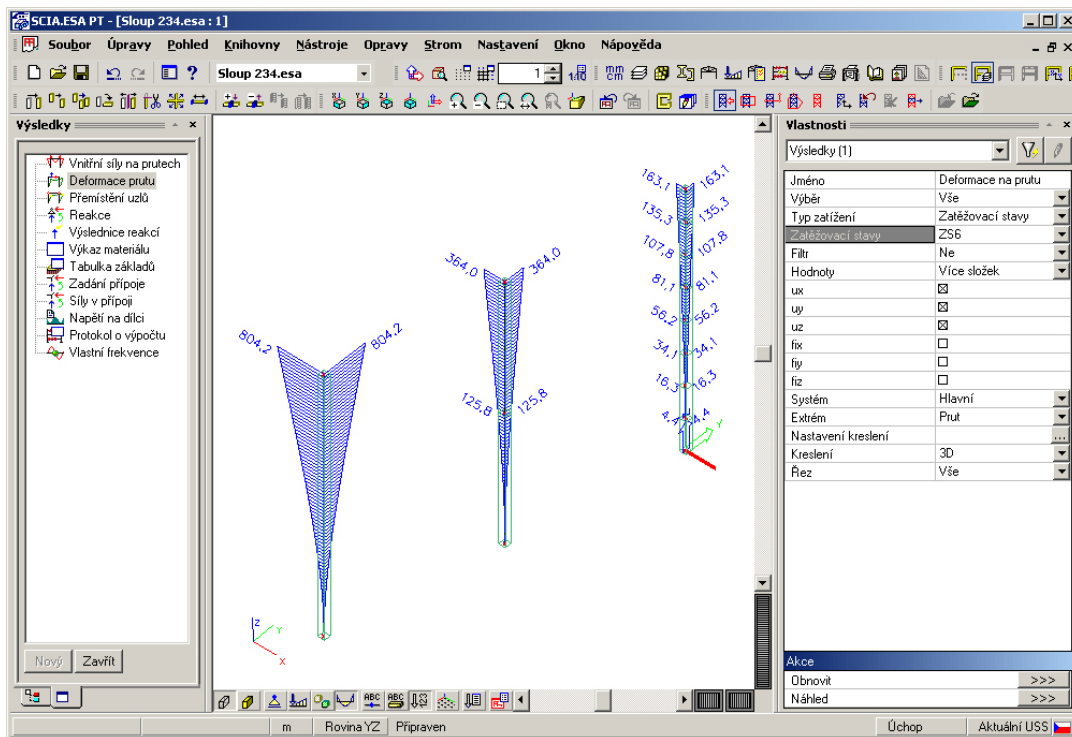
4 DYNAMICKÝ VÍTR

Nutnost provedení výpočtu konstrukce na dynamický vítr je definována v ČSN 73 0035 a v ČSN P ENV 1991-2-4. Oba dva normové podklady se mezi sebou liší jak metodikou, tak velikostí jednotlivých součinitelů. Metodika podle EC je zpravidla komplexnější (zahrnuje více jevů) a jejím zjednodušením lze v některých případech dosáhnout shodu mezi oběma normovými přístupy. Nicméně podle EC můžeme dostat velikost zatížení od dynamického větru a tedy výchylek i namáhání i 2,5-krát větší než podle ČSN 73 0035. V tomto smyslu je nutné konstatovat, že program ESA je proveden podle metodiky ČSN 73 0035.

Tak např. součinitel výšky κ_{wm} pro střední hodinovou rychlost je podle ČSN 73 0035 (P2.5) v rozmezí 0,24 až 1,48; podle ENV 1991-2-4 (čl.8.5) podobný součinitel expozice c_s , avšak stanovený pro nárazy větru (tedy pro okamžité hodnoty), nabývá hodnotu až cca 4,5.



Obr.3a Velikost průhybů od dynamického větru ve směru x na třech stejných sloupech s odlišným počtem uzlů



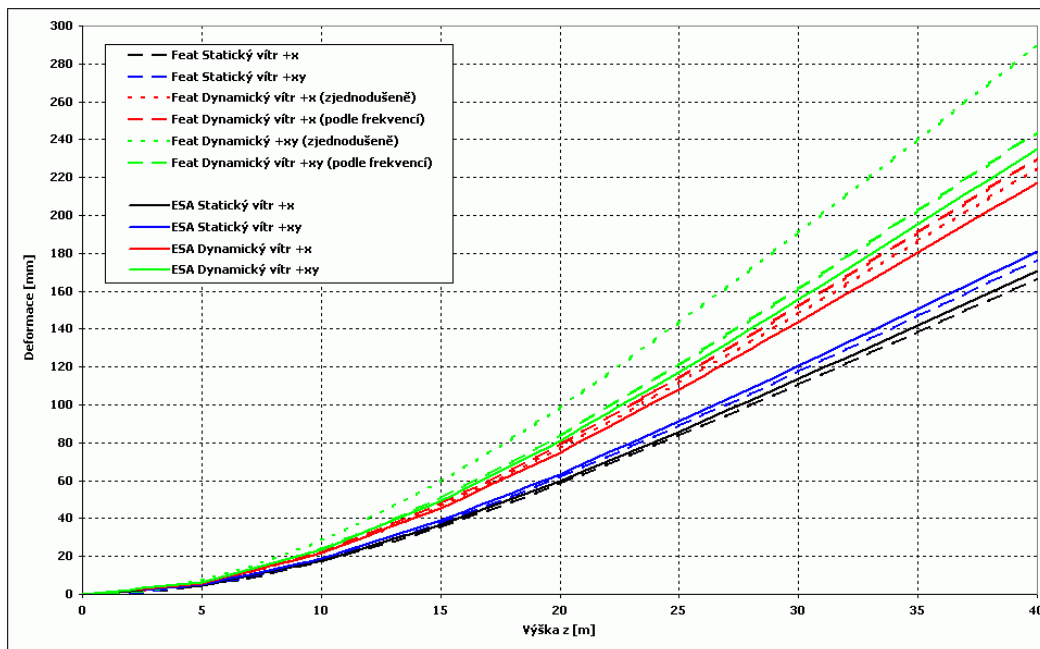
Obr.3b Velikost průhybů od dynamického větru ve směru diagonály xy na třech stejných sloupech s odlišným počtem uzlů

Obdobně u příčného kmitání (kolmo na směr větru) je Strouhalovo číslo pro kruhové průřezy rovno 0,20 (vzorec P24 v [1]), respektive $5 = 1 / St = 1 / 0,20$, obdobně i v [3]; pro

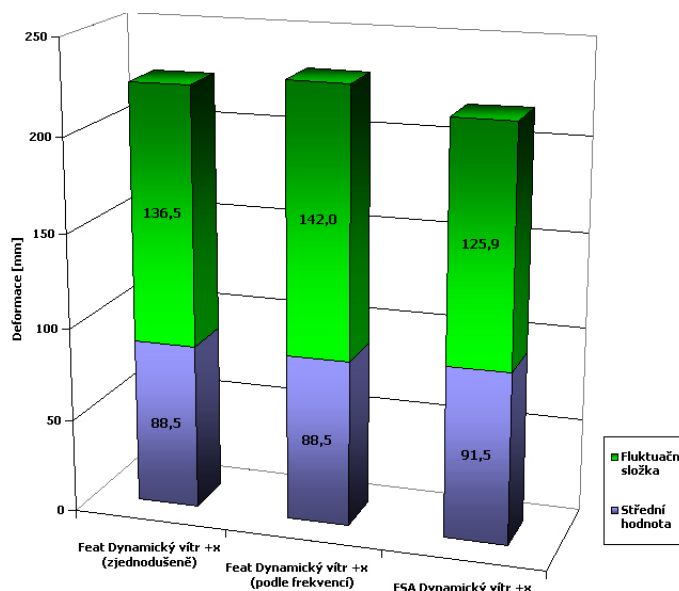
hranaté průřezy je podle ENV 1991-2-4 (čl.C.2.2 v [3]) je Strouhalovo číslo zadáno jako funkce rozměrů průřezu v rozmezí hodnot pouze $St = 0,06$ až $0,15$.

Programem ESA lze tedy spočítat dynamický vítr a to buď součet střední a flukтуаční hodnoty, nebo jen střední hodnotu bez flukтуаční složky; pro válcové konstrukce lze zavést také zatížení od vírové rezonance (označena jako Karmánova).

Pro porovnání programů ESA a FEAT bylo stanoveno zatížení a spočítána odezva na dynamický vítr pro čtvercový železobetonový sloup výšky 40 m a průřezu 1x1 m. Výsledné hodnoty deformace jsou uvedeny na obr.4.



Obr.4a Graf se srovnáním velikosti deformace pro různě stanovené a zavedené zatížení dynamickým větrem – alternativně programem FEAT a ESA



Obr.4b Graf se srovnáním velikosti deformace od střední a flukтуаční části zatížení dynamickým větrem – alternativně programem FEAT a ESA

V programu ESA nejsou zahrnuty výpočty gallopingu, divergence a flutteru a také vzájemné ovlivňování konstrukcí za sebou nebo vedle sebe – pro tyto případy je nutné použít metodiku podle ENV.

5 HARMONICKÉ KMITÁNÍ

Harmonické kmitání je v programu ESA chápáno jako kmitání soustavy s n - stupni volnosti, zatížené jednou nebo více budícími silami s harmonickým časovým průběhem (se sinusovým nebo kosinusovým průběhem), stejným pro všechny zadané síly (síly jsou ve fázi). Typickým příkladem pro toto využití jsou periodické ustálené síly např. rotačních strojů nebo klikových mechanismů (pístů ap.). Pro zadání výpočtu je nutné stanovit velikost amplitudy (amplitud) budících sil a jednu frekvenci buzení. Pokud je třeba provést výpočet pro odlišné frekvence buzení je nutné výpočet opakovat pro jednotlivé frekvence buzení a působivé směry těchto sil na jednotlivých frekvencích buzení. Výsledný stav pak vznikne superpozicí několika zatěžovacích stavů.

Výpočet je proveden rozkladem do vlastních tvarů kmitání a tedy je nutné stanovit tolik vlastních tvarů výpočtem vlastního kmitání, do kterých rozklad provádíme. Nemá smysl rozkládat buzení např. na budicí frekvenci 25 Hz do nejnižších vlastních tvarů na frekvencích do 5 Hz, pak chyba výpočtu může být i řádová. Je tedy nutné respektovat ČSN 73 0032 a rozklad provést pro dané buzení na 25 Hz do všech frekvencí (alespoň globálních) ve frekvenčním intervalu 0 až 50 Hz. Tím ovšem nároky na čas výpočtu narůstají.

V programu ESA je výpočet harmonického kmitání proveden pro globální útlum, charakterizovaný útlumem celé konstrukce. Výsledkem výpočtu je složený tvar kmitání (jediný) odpovídající frekvenci buzení a počítané frekvenci (té, na které chceme znát odezvu). Jestliže je třeba stanovit rezonanční křivku pro vybrané body na konstrukci je potřebí celý výpočet zopakovat několikrát pro všechny po rozumných krocích se měnící frekvence „zájmu“, v nichž potřebujeme odezvu konstrukce znát. Je tedy výpočet rezonanční křivky zdoluhavý, časově velmi náročný výpočet.

6 ZÁVĚR

Cílem tohoto příspěvku byl v podstatě úvod do problematiky dynamických výpočtů pro seminář o použitelnosti programu ESA. Je nutné konstatovat, že ESA má řadu nových modulů, který dynamický výpočet usnadňují, např. dynamický vítr, seismické zatížení, harmonické zatížení, generátory zatížení atd. Nicméně pro jejich správné pochopení je nutné se velmi pečlivě seznámit s metodikou – tak např. dynamický vítr nezahrnuje veškeré možnosti dynamického větru, může být výsledek výpočtu zkreslen v jednotlivých krocích např. rozdělením hmot po konstrukci, počty uvažovaných vlastních frekvencí a tvarů, jemností dělení konstrukčních částí na uzly pro stanovení vlastních tvarů ap. To byl vlastně účel a cíl našeho příspěvku.

Věříme, že tvůrci programu ESA budou jeho možnosti dále zkvalitňovat a rozšiřovat; nicméně z naší zkušenosti je dobré a účelné si výsledky značně zautomatizovaného výpočtu (který mnohdy funguje jako černá skříňka) alespoň na jednoduchém příkladu ověřit, než jsou vydány ve tvaru statického (dynamického) výpočtu v dokumentaci pro výstavbu nebo rekonstrukce - v tomto smyslu nabízí zpracovatelé tohoto příspěvku i ostatním zájemcům své zkušenosti a svou kapacitu.

CITOVANÉ NORMY

- [1] ČSN 73 0035 Zatížení stavebních konstrukcí, 1986
- [2] ČSN 73 0032 Výpočet stavebních konstrukcí zatížených dynamickými účinky strojů, 1978
- [3] ČSN P ENV 1991-2-4, ČSN 73 0035 Předběžná norma, Zásady navrhování a zatížení konstrukcí, Část 2-4 Zatížení konstrukcí – Zatížení větrem, 1996