



**NOVÉ TECHNOLOGIE  
VÝZKUMNÉ CENTRUM  
ZÁPADOČESKÉ  
UNIVERZITY  
V PLZNI**

*ODBOR MODELOVÁNÍ DEFORMAČNÍCH A DYNAMICKÝCH PROCESŮ*

---

*AUTORIZOVANÝ SOFTWARE*

*NOMUVIBLAD\_ETW1*

***SOFTWARE PRO ANALÝZU NELINEÁRNÍCH  
MULTIHARMONICKÝCH VIBRACÍ OLOPATKOVANÝCH  
DISKŮ S BUZENÍM TYPU BĚŽÍCÍ VLNY***

---

Autor: *RNDr. Josef Voldřich, CSc.*

Číslo projektu: *MŠMT 1M06059*

Číslo výsledku: *NTC-SW-15-10*

Odpovědný pracovník: *RNDr. Josef Voldřich, CSc.*

Vedoucí odboru: *RNDr. Josef Voldřich, CSc.*

Ředitel centra: *doc. Dr. RNDr. Miroslav Holeček*

---

*PLZEŇ, PROSINEC 2010*

**Jazyk výsledku:** CZE

**Hlavní obor:** JR

**Uplatněn:** ANO

**Název výsledku česky:**

*NOMUVIBLAD\_ETW1 - Software pro analýzu nelineárních multiharmonických vibrací olopatkovaných disků s buzením typu běžící vlny*

**Název výsledku anglicky:**

*NOMUVIBLAD\_ETW1 - Software for the analysis of nonlinear multiharmonic vibrations of bladed disks with the excitation of traveling wave type.*

**Abstrakt k výsledku česky:**

*NOMUVIBLAD\_ETW1 umožňuje provádět analýzu nelineárních multiharmonických vibrací olopatkovaných disků s třecími kontakty s využitím jejich cyklické symetrie. Buzení je typu běžící vlny, a proto matematický model vyžaduje při své softwarové implementaci zcela odlišné kódování neznámých, než je u programu NOMUVIBLAD\_ESS1. Metodika analýzy je založená na teoretických pracích Petrova a Ewinse z Imperial College London.*

**Abstrakt k výsledku anglicky:**

*NOMUVIBLAD\_ETW1 enables to perform the analysis of nonlinear multiharmonic vibrations of bladed disks with friction contacts using their cyclic symmetry properties. The excitation of bladed disk is of traveling wave type, that is the mathematical model requires completely different coding of degrees of freedom in its software implementation than it is accomplished inside the software NOMUVIBLAD\_ESS1. The method of analysis is based on theoretical studies of Petrov and Ewins of Imperial College London.*

**Klíčová slova česky:**

*nelineární vibrace; olopatkovaný disk; kontakt se třením; cyklická symetrie; běžící vlna*

**Klíčová slova anglicky:**

*nonlinear vibrations; bladed disk; friction contact; cyclic symmetry; traveling wave*

**Vlastník výsledku:** *Západočeská univerzita v Plzni*

**IČ vlastníka výsledku:** *49777513*

**Stát:** *Česká republika*

**Lokalizace:** <http://www.zcu.cz/ntc/vysledky/sw/NTC-SW-15-10.html>

**Licence:** *ANO*

**Licenční poplatek:** *ANO*

**Ekonomické parametry:** *Software přispívá k návrhu olopatkovaných disků se zvýšeným útlumem jejich vibrací. Ekonomický dopad plynoucí z následného zvýšení spolehlivosti a životnosti těchto zařízení, které jsou jedny z nejdůležitějších technologických zařízení konvenčních i jaderných elektráren, je značný.*

**Technické parametry:** *Luděk Hynčík, Západočeská univerzita v Plzni, Nové technologie - Výzkumné centrum v západočeském regionu, Univerzitní 8, 306 14 Plzeň, 377634709, [hyncik@ntc.zcu.cz](mailto:hyncik@ntc.zcu.cz)*

# Obsah

<b>1. Úvod a použité metody</b>	<b>5</b>
<b>2. Výpočetní postup</b>	<b>6</b>
<b>3. Modelované buzení</b>	<b>7</b>
<b>4. „Matematické jádro“ cyklické symetrie</b>	<b>8</b>
<b>5. Příklad geometrie sektoru</b>	<b>14</b>
<b>6. Odlišnost od programu NOMUVIBLAD_ESS1</b>	<b>15</b>
<b>7. Popis formátů vstupních a výstupních souborů</b>	<b>16</b>

# 1. Úvod a použité metody

-Příklad reálného olopatkovaného disku s 62 sektory



## A) Modální analýza rotačních periodických struktur bez nelineárních vazeb řešena pomocí komerčního programu ANSYS

(Thomas, D.L.: Dynamics of rotationally periodic structures, Int. J.Numer. Meth. Eng. 14(1979) 81-102)

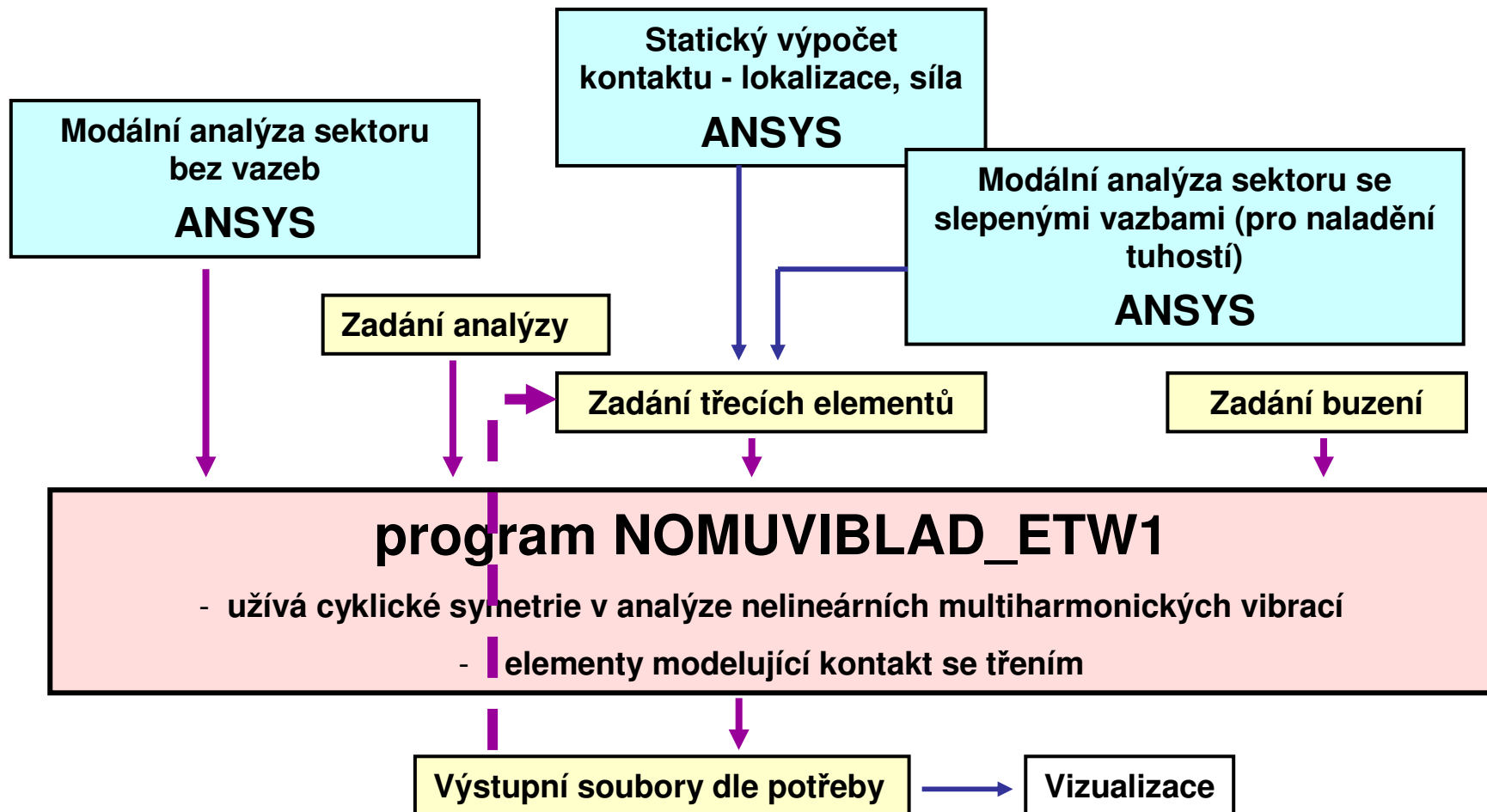
## B) Cyklická symetrie pro systém s nelineárními vazbami implementována dle

Petrov, E.P.: A method for use of cyclic symmetry properties in analysis of nonlinear multiharmonic vibrations of bladed disk, ASME Journal of Turbomachinery 126(2004) 175-183.

## C) Kontaktní třecí prvek implementován dle

Petrov, E.P., Ewins, D.: Analytical formulation of friction interface elements for analysis of nonlinear multiharmonic vibrations of bladed disks, ASME Journal of Turbomachinery 125(2003) 364-371.

## 2. Výpočetní postup



### 3. Modelované buzení

Souřadný systém  $(r, z, \varphi)$  pevně spojen s rotorem – „prostor se otáčí“ s rotorem

$$M \ddot{\mathbf{q}}_j(t) + C \dot{\mathbf{q}}_j(t) + K \mathbf{q}_j(t) + \mathbf{f}_I(\mathbf{q}_j(t)) + \mathbf{f}_L(\mathbf{q}_{j-1}(t), \mathbf{q}_j(t)) + \mathbf{f}_R(\mathbf{q}_j(t), \mathbf{q}_{j+1}(t)) = \mathbf{p}_j(t)$$

$\mathbf{q}_j(t)$  vektor posuvů  $j$ -tého sektoru v čase  $t$

$\mathbf{p}_j(t)$  vektor budících sil  $j$ -tého sektoru v čase  $t$

#### Buzení typu cestující vlny (travelling wave type)

$p_j(t) = p(t+(j-1) \cdot \Delta t)$  ,  $\Delta t = \pm T/N$  ,  $T$  je perioda,  $N$  počet sektorů

$$p(t) = \sum_{k=1}^n \left( p_k^c(r, z, \varphi) \cos(k\omega t) + p_k^s(r, z, \varphi) \sin(k\omega t) \right) \quad , \quad 0 \leq \varphi \leq 2\pi/N$$

$$\text{tj. } \mathbf{q}_j(t) = \mathbf{q}(t+(j-1) \cdot \Delta t), \quad \mathbf{q}(t) = \mathbf{Q}_0 + \sum_{k=1}^n \left( Q_k^c(r, z, \varphi) \cos(k\omega t) + Q_k^s(r, z, \varphi) \sin(k\omega t) \right)$$

## 4. „Matematické jádro“ cyklické symetrie

$$\mathbf{Q} = \begin{pmatrix} Q_0 \\ Q_1^c \\ Q_1^s \\ \vdots \\ Q_n^c \\ Q_n^s \end{pmatrix} \quad \begin{array}{l} \swarrow \\ \text{Vektor všech} \\ \text{harmonických} \\ \text{koeficientů} \end{array} \quad \mathbf{F}(\mathbf{Q}) = \begin{pmatrix} \mathbf{F}_0(\mathbf{Q}) \\ \mathbf{F}_1^c(\mathbf{Q}) \\ \mathbf{F}_1^s(\mathbf{Q}) \\ \vdots \\ \mathbf{F}_n^c(\mathbf{Q}) \\ \mathbf{F}_n^s(\mathbf{Q}) \end{pmatrix} \quad \mathbf{P} = \begin{pmatrix} \mathbf{P}_0 \\ \mathbf{P}_1^c \\ \mathbf{P}_1^s \\ \vdots \\ \mathbf{P}_n^c \\ \mathbf{P}_n^s \end{pmatrix}$$

Vektory s vlnou již neobsahují „pravé“ uzly (geometricky) periodické dvojice

$$\mathbf{F}_k^c(\mathbf{Q}) = \frac{2}{T} \left[ \int_0^T \cos(k\omega t) \mathbf{f}_L(\mathbf{q}(t - T/N), \mathbf{q}(t)) dt + \int_0^T \cos(k\omega t) \mathbf{f}_R(\mathbf{q}(t), \mathbf{q}(t + T/N)) dt \right]$$

$$\mathbf{F}_k^s(\mathbf{Q}) = \frac{2}{T} \left[ \int_0^T \sin(k\omega t) \mathbf{f}_L(\mathbf{q}(t - T/N), \mathbf{q}(t)) dt + \int_0^T \sin(k\omega t) \mathbf{f}_R(\mathbf{q}(t), \mathbf{q}(t + T/N)) dt \right]$$

$$\mathbf{P}_0 = \frac{1}{T} \int_0^T \mathbf{p}(t) dt, \quad \mathbf{P}_k^c = \frac{2}{T} \int_0^T \cos(k\omega t) \mathbf{p}(t) dt, \quad \mathbf{P}_k^s = \frac{2}{T} \int_0^T \sin(k\omega t) \mathbf{p}(t) dt.$$



$$\left\{ \begin{array}{c} Q_{Lk}^c \\ Q_{Ik}^c \\ Q_{Rk}^c \\ Q_{Lk}^s \\ Q_{Ik}^s \\ Q_{Rk}^s \end{array} \right\} = \begin{bmatrix} \mathbf{I} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \mathbf{I} & 0 & 0 \\ \cos(k\alpha) \mathbf{I} & 0 & \sin(k\alpha) \mathbf{I} & 0 \\ 0 & 0 & \mathbf{I} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \mathbf{I} \\ -\sin(k\alpha) \mathbf{I} & 0 & \cos(k\alpha) \mathbf{I} & 0 \end{bmatrix} \left\{ \begin{array}{c} Q_{Lk}^c \\ Q_{Ik}^c \\ Q_{Lk}^s \\ Q_{Ik}^s \end{array} \right\} = \mathbf{G}_k \left\{ \begin{array}{c} Q_{Lk}^c \\ Q_{Ik}^c \\ Q_{Lk}^s \\ Q_{Ik}^s \end{array} \right\} = \mathbf{G}_k \tilde{\mathbf{Q}}_k$$

$$\mathbf{E}^{FE}(\mathbf{Q}) = \tilde{\mathbf{Z}}(\omega) \tilde{\mathbf{Q}} + \tilde{\mathbf{F}}(\tilde{\mathbf{Q}}) - \tilde{\mathbf{P}} = 0$$

## Formulace pomocí aritmetiky komplexních čísel

$$Q_k = Q_k^c + jQ_k^s, \quad P_k = P_k^c + jP_k^s, \quad F_k = F_k^c + jF_k^s,$$

Řešíme soustavy rovnic

$$Z_k Q_k + F_k(Q) = P_k, \quad k = 0, 1, \dots, n$$

kde  $Z_k = [K - (k\omega^2)M] - jk\omega C.$

$$\mathcal{E}_k^{FRF}(\tilde{Q}) = \tilde{Q}_k + \tilde{A}_k(\tilde{F}_k(\tilde{Q}) - \tilde{P}_k) = 0$$

Vektor reziduí

Tedy řešíme soustavy rovnic

$$\tilde{A}_k = \tilde{Z}_k^{-1}(k\omega) \simeq \sum_{r=1}^{N_k} \frac{1}{(1 - j\eta_{r,k})\omega_{r,k}^2 - (k\omega)^2} \phi_{r,k} \phi_{r,k}^* \quad \leftarrow \begin{array}{l} r\text{-té vlastní vektory s } k \text{ uzlovými} \\ \text{průměry} \end{array}$$

je sektorová FRF matice (funkce frekvenční odezvy)

Rozštěpení na lineární a nelineární stupně volnosti

$$\tilde{Q}_k = \begin{Bmatrix} \tilde{Q}_k^{ln} \\ \tilde{Q}_k^{nl} \end{Bmatrix}, \quad \tilde{F}_k(\tilde{Q}) = \begin{Bmatrix} 0 \\ \tilde{F}_k^{nl}(\tilde{Q}^{nl}) \end{Bmatrix}, \quad \tilde{A}_k = \begin{bmatrix} \tilde{A}_k^{ln} & \tilde{B}_k \\ \tilde{B}_k^H & \tilde{A}_k^{nl} \end{bmatrix},$$

$$\begin{Bmatrix} \tilde{Q}_k^{ln} \\ \tilde{Q}_k^{nl n} \end{Bmatrix} + \begin{Bmatrix} \tilde{B}_k \tilde{\mathcal{F}}_k^{nl n}(\tilde{Q}^{nl n}) \\ \tilde{A}_k^{nl n} \tilde{\mathcal{F}}_k^{nl n}(\tilde{Q}^{nl n}) \end{Bmatrix} - \tilde{A}_k \tilde{\mathcal{P}}_k = 0$$

$$\left( \mathcal{E}_k^{FRF}(\tilde{Q}) \right)^{nl n} = \tilde{Q}_k^{nl n} + \tilde{A}_k^{nl n} \tilde{\mathcal{F}}_k^{nl n}(\tilde{Q}^{nl n}) - \left( \tilde{A}_k \tilde{\mathcal{P}}_k \right)^{nl n} = 0$$

Řešení této nelineární rovnice provádíme Newtonovou-Raphsonovou metodou

$$\tilde{Q}^{(m+1)} = \tilde{Q}^{(m)} - \mathbf{R}_m^{-1} \mathbf{E}(\tilde{Q}^{(m)}),$$

kde 
$$\mathbf{R}_m = \frac{\partial \mathbf{E}(\tilde{Q}^{(m)})}{\partial \tilde{Q}}$$

Označme 
$$\mathbf{S}^{(m)} = \mathbf{R}_m^{-1} \mathbf{E}(\tilde{Q}^{(m)})$$

přičemž tento vektor dostaneme řešením soustavy rovnic

$$\mathbf{R}_m \mathbf{S}^{(m)} = \mathbf{E}(\tilde{Q}^{(m)})$$

Sestavení matice  $\mathbf{R}_m$  derivace vektoru reziduí podle celkového vektoru všech harmonických koeficientů je poměrně pracné

$$\frac{\partial \mathbf{E}^{FRF}}{\partial \tilde{\mathbf{Q}}} = \mathbf{I} + \begin{bmatrix} \mathbf{D}_{00} & Re(\mathbf{D}_{01}) & Im(\mathbf{D}_{02}) & \dots & Im(\mathbf{D}_{0,2m}) \\ Re(\mathbf{D}_{10}) & Re(\mathbf{D}_{11}) & Re(\mathbf{D}_{12}) & \dots & Re(\mathbf{D}_{1,2m}) \\ Im(\mathbf{D}_{10}) & Im(\mathbf{D}_{11}) & Im(\mathbf{D}_{12}) & \dots & Im(\mathbf{D}_{1,2m}) \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ Re(\mathbf{D}_{n0}) & Re(\mathbf{D}_{n1}) & Re(\mathbf{D}_{n2}) & \dots & Re(\mathbf{D}_{n,2m}) \\ Im(\mathbf{D}_{n0}) & Im(\mathbf{D}_{n1}) & Im(\mathbf{D}_{n2}) & \dots & Im(\mathbf{D}_{n,2m}) \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{D}_{k0} = \tilde{\mathcal{A}}_k \frac{\partial \tilde{\mathcal{F}}_k}{\partial \mathbf{Q}_0}, \quad \mathbf{D}_{k,2i-1} = \tilde{\mathcal{A}}_k \frac{\partial \tilde{\mathcal{F}}_k}{\partial \mathbf{Q}_i^c}, \quad \mathbf{D}_{k,2i} = \tilde{\mathcal{A}}_k \frac{\partial \tilde{\mathcal{F}}_k}{\partial \mathbf{Q}_i^s}, \quad k = 0, \dots, n, \quad i = 1, \dots, n$$

(pro skutečné indexování neznámých je to vše náležitě „proházené“)

# Třecí prvek (v lokálním souřadném systému kontaktní plochy)

$\xi = \omega t$     bezrozměrný čas

$x(\xi) = H^T(\xi) X$      $y(\xi) = H^T(\xi) Y$     tangenciální a normálový relativní posuv

$$H^T(\xi) = \{1, \cos(\xi), \sin(\xi), \dots, \cos(n\xi), \sin(n\xi)\}^T$$

$X, Y$  jsou vektory harmonických koeficientů relativních posuvů

## Tangenciální síla

$$\begin{aligned} \mathbf{f}_x &= \mathbf{f}_0 + \mathbf{k}_x (X - X_0) \\ &= \pm \mu \mathbf{f}_y \\ &= 0 \end{aligned}$$

při stavu slepení (stick)

při prokluzu (slip)

při odlehnutí (separation)

## Normálová síla

$$\begin{aligned} \mathbf{f}_y &= \mathbf{N}_0 + \mathbf{k}_y y \\ &= 0 \end{aligned}$$

při kontaktu

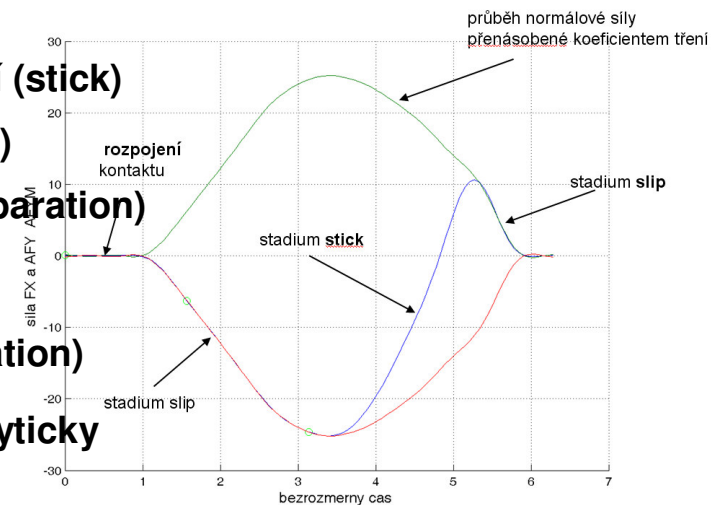
při odlehnutí (separation)

Vektory Fourierových koeficientů pro tyto síly se napočtou analyticky

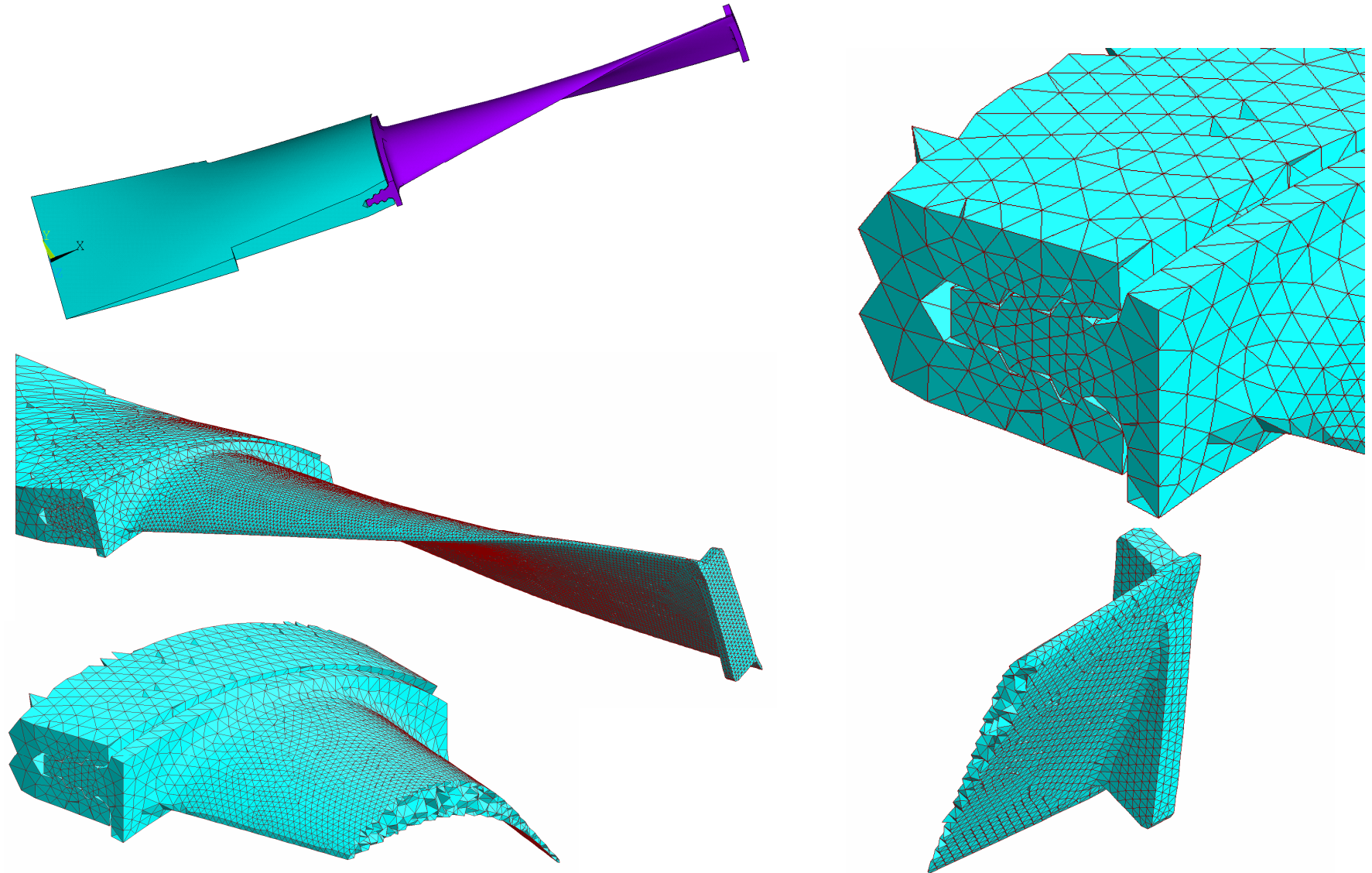
$$\begin{Bmatrix} F_x \\ F_y \end{Bmatrix} = \frac{1}{\pi} \sum_{j=1}^{n\xi} \int_{\xi_j}^{\xi_{j+1}} \begin{Bmatrix} G(\xi) f_x \\ G(\xi) f_y \end{Bmatrix} d\xi$$

$$G^T(\xi) = \{1/2, \cos(\xi), \sin(\xi), \dots, \cos(n\xi), \sin(n\xi)\}^T$$

známe  $X, Y \rightarrow$  počítáme  $F_x, F_y$



## 5. Příklad geometrie sektoru (lopatky s částí disku)



## 6. Odlišnost od programu NOMUVIBLAD\_ESS1

Program NOMUVIBLAD\_ESS1 neumožňuje buzení typu tzv. „běžící vlny“, ale pouze následující prostorově stacionární buzení:

$$p(t) = p_j(t) = \sum_{k=1}^n \left( p_k^c(r, z, \varphi) \cos(k\omega t) + p_k^s(r, z, \varphi) \sin(k\omega t) \right) \quad , \quad 0 \leq \varphi \leq 2\pi/N$$

$$\text{tj.} \quad q_1(t) = q_N(t) = Q_0 + \sum_{k=1}^n \left( Q_k^c(r, z, \varphi) \cos(k\omega t) + Q_k^s(r, z, \varphi) \sin(k\omega t) \right)$$

**a tedy do hry vstupují pouze vlastní tvary s 0 harmonickými průměry**

Tato „drobná“ odlišnost však vyžaduje podstatně odlišné „vnitřní kódování“ nejdůležitějších datových polí a vyžádala si rozsáhlé programátorské práce. Odlišný je i výpočet FRF matic  $A_k$ , všechna násobení touto maticí a tedy i matice  $R_m$  derivace vektoru reziduí.

## 7. Popis formátů vstupních a výstupních souborů

Až na KMENOVÝ SOUBOR a soubor zadávající buzení jsou formáty vstupních i výstupních souborů totožné s formáty souborů programu NOMUVIBLAD\_ESS1. Pro úplnost je i zde všechny vypisujeme.



## Popis formátu vstupních souborů

Po spuštění programu je potřeba z klávesnice zadat jméno KMENOVÉHO SOUBORU, ve kterém jsou uvedena jména dalších potřebných vstupních souborů.

### Formát KMENOVÉHO SOUBORU:

lopotka1020 ! na první řádek se zadává jméno úlohy  
C\* vibrace olopatkovaneho disku ! řádky 2 až 4 obsahují komentář  
C\*31.12.2010  
C\*  
62 ! počet sektorů cyklické symetrie  
20 ! hodnota KK  
1.e-3 1.E-4 1. 1. ! ERREPS EPS GAMA Dc  
5 86. 89.75 0.25 ! NHS O\_MIN O\_MAX O\_KROK  
1 0 2 0.03 ! poradi - harmonicky index - pocet vl tvaru - tlumeni  
2 1 3 0.03 ! opakuje se NHS krat  
3 2 2 0.03  
4 3 2 0.03  
5 4 2 0.03  
lopotka.cdb ! řádky 10 až 15 obsahují jména dalších  
vazba.dat ! vstupních souborů; je nezbytné  
Frekvence.dat ! zachovat jejich pořadí  
Mode.dat  
buzeni.dat  
C\* vystup  
3 ! pocet uzlu pro vystup  
10181 10142 24600 ! uzly, v nemz se pozaduje vystup  
2 ! pocet pripadu pro vystup nelinearni vazby  
1 87. ! cislo vazby, frekvence buzeni v Hz  
1 89. ! cislo vazby, frekvence buzeni v Hz

KK – parametr pro dělení periody  $2\pi$  (hodnota 20 je postačující)

ERREPS – hodnota chyby ukončující konvergenci při řešení nelineární soustavy

EPS – hodnota parametru ukončující konvergenci při výpočtu sil nelineární vazby

GAMA - parametr (doporučuje se 1.)

Dc – parametr (doporučuje se 1., v případě divergence pomáhá jeho snížení)

NHS – počet členů  $n$  multiharmonického rozvoje (vztah 4.1)

Postupně se počítají vibrace od budící frekvence  $\omega=O\_MIN$  po  $O\_MAX$  s krokem  $O\_KROK$ .

N – počet nenulových vlastních tvarů systému bez vazeb

$\eta$  - koeficient tlumení

lopotka.cdb – název souboru s geometrií lopatky (ve formátu programu ANSYS)

vazba.dat - zadání nelineárních vazeb

Frekvence.dat - hodnoty nenulových vlastních frekvencí systému bez vazeb

Mode.dat - vlastní tvary (s nenulovými vlastními frekvencemi) systému bez vazeb

prvni\_tvar.dat – případný vlastní tvar s nulovou vlastní frekvencí odpovídající volné rotaci

olopatkovaného disku  
buzeni\_TORZE1.dat – zadání budících sil

---

**Formát souboru typu lopatka.cbd je formátem programu ANSYS. Soubor musí obsahovat následující typy řádků s počty uzlů, prvků a vazeb, se souřadnicemi uzlů, s prvkovými čísly a s čísly uzlů vazeb**

```
NUMOFF,NODE, 25171
NUMOFF,ELEM, 97926
NUMOFF,MAT , 2 ! nemusí
NUMOFF,CEQN, 1572
NUMOFF,TYPE, 12 ! nemusí
```

```
NBLOCK,6,SOLID
(3i8,6e16.9)
```

```
1 0 0 0.449058014 -2.910199930E-02 0.230845001
2 0 0 0.399071991 -2.751700020E-02 0.230845001
3 0 0 0.349101990 -2.549600030E-02 0.230845001
4 0 0 0.299153015 -2.301300050E-02 0.230845001
5 0 0 0.249229004 -2.006900020E-02 0.230845001
6 0 0 0.199332993 -1.668799970E-02 0.230845001
7 0 0 0.149464005 -1.291899970E-02 0.230845001
```

...

```
EBLOCK,19,SOLID, 97926
(19i8)
```

```
1 1 1 1 0 0 0 0 8 0 1 2438 2606 2440 2440 2336 2336 2336 2336
1 1 1 1 0 0 0 0 8 0 2 2258 1018 1011 1011 1024 1024 1024 1024
1 1 1 1 0 0 0 0 8 0 3 2433 2578 2633 2633 2360 2360 2360 2360
```

...

```
CE,R5.0,DEFI, 3, 1, 0.00000000
CE,R5.0,NODE, 1,UX , -1.00000000 , 42,UX , 0.994869351
CE,R5.0,NODE, 42,UY , 0.101168215 ,
CE,R5.0,DEFI, 3, 2, 0.00000000
CE,R5.0,NODE, 1,UY , -1.00000000 , 42,UY , 0.994869351
CE,R5.0,NODE, 42,UX , -0.101168215 ,
CE,R5.0,DEFI, 2, 3, 0.00000000
CE,R5.0,NODE, 1,UZ , -1.00000000 , 42,UZ , 1.00000000
CE,R5.0,DEFI, 3, 4, 0.00000000
CE,R5.0,NODE, 2,UX , -1.00000000 , 41,UX , 0.994869351
CE,R5.0,NODE, 41,UY , 0.101168215 ,
CE,R5.0,DEFI, 3, 5, 0.00000000
CE,R5.0,NODE, 2,UY , -1.00000000 , 41,UY , 0.994869351
CE,R5.0,NODE, 41,UX , -0.101168215 ,
CE,R5.0,DEFI, 2, 6, 0.00000000
CE,R5.0,NODE, 2,UZ , -1.00000000 , 41,UZ , 1.00000000
CE,R5.0,DEFI, 3, 7, 0.00000000
```

...

**Čtení se provádí pomocí následujících procedur (ve FORTRAN 90)**

```
!*****
SUBROUTINE READ_1(NSNOD,NSELM,NCOUP)
!
```

```

IMPLICIT NONE
INTEGER NSNOD,NSELM,NCOUP,KK
CHARACTER*80 AAA
CHARACTER*12 BBB
KK=0
1 CONTINUE
READ(16,80)AAA
IF (AAA(1:12).EQ.'NUMOFF,NODE,')THEN
  WRITE(6,80)AAA
  BACKSPACE(16)
  READ(16,81)BBB,NSNOD
  WRITE(*,*)'pocet uzlu je ',NSNOD
  KK=KK+1
  IF (KK.EQ.3)RETURN
ENDIF
IF (AAA(1:12).EQ.'NUMOFF,ELEM,')THEN
  WRITE(6,80)AAA
  BACKSPACE(16)
  READ(16,81)BBB,NSELM
  WRITE(*,*)'pocet prvku je ',NSELM
  KK=KK+1
  IF (KK.EQ.3)RETURN
ENDIF
IF (AAA(1:12).EQ.'NUMOFF,CEQN,')THEN
  WRITE(6,80)AAA
  BACKSPACE(16)
  READ(16,81)BBB,NCOUP
  NCOUP=NCOUP/3
  WRITE(*,*)'pocet dvojic periodicity je ',NCOUP
  KK=KK+1
  IF (KK.EQ.3)RETURN
ENDIF
GOTO 1
80 FORMAT(A80)
81 FORMAT(A12,I8)
!
END
!
!*****
SUBROUTINE READ_2(NSNOD,NODE)
! cteni souradnic uzlu
IMPLICIT NONE
INTEGER NSNOD,K,I1,I2,I3
REAL NODE(3,NSNOD),X,Y,Z
CHARACTER*80 AAA
!
80 FORMAT(A80)
11 FORMAT(3I8,6E16.9)
REWIND(16)
1 CONTINUE
READ(16,80,END=999)AAA
IF (AAA(1:7).NE.'NBLOCK,')GOTO 1
READ(16,*)
DO 2 K=1,NSNOD
  READ(16,11)I1,I2,I3,X,Y,Z
  IF (I1.NE.K)THEN
    WRITE(*,*)K,I1,' mezery v cislovani uzlu - procedura READ_2'
    PAUSE
  ENDIF
  NODE(1,K)=X
  NODE(2,K)=Y
  NODE(3,K)=Z
2 CONTINUE
  WRITE(6,*) 1 ',NODE(1,1),NODE(2,1),NODE(3,1)
  WRITE(6,*)NSNOD,NODE(1,NSNOD),NODE(2,NSNOD),NODE(3,NSNOD)
  WRITE(6,*)'v procedure READ_2 byly nacteny uzly'
RETURN
999 WRITE(*,*)'v procedure READ_2 nebyly nacteny uzly'
  WRITE(6,*)'v procedure READ_2 nebyly nacteny uzly'
  STOP
END
!*****
SUBROUTINE READ_3(NSELM,ITETRA)
! cteni prvkovych cisel
IMPLICIT NONE
INTEGER NSELM,K,II(19)

```

```

INTEGER ITETRA(4,NSELM)
CHARACTER*80 AAA
!
80 FORMAT(A80)
REWIND(16)
1 CONTINUE
READ(16,80,END=999)AAA
  IF (AAA(1:7).NE.'EBLOCK,')GOTO 1
READ(16,*)
DO 2 K=1,NSELM
  READ(16,*)II
  IF (II(11).NE.K)THEN
    WRITE(*,*)K,II(11),' mezery v cislovani prvku - procedura READ_3'
    PAUSE
  ENDIF
  ITETRA(1,K)=II(12)
  ITETRA(2,K)=II(13)
  ITETRA(3,K)=II(14)
  ITETRA(4,K)=II(16)
2 CONTINUE
  K=1
  WRITE(6,*)K,ITETRA(1,K),ITETRA(2,K),ITETRA(3,K),ITETRA(4,K)
  K=NSELM
  WRITE(6,*)K,ITETRA(1,K),ITETRA(2,K),ITETRA(3,K),ITETRA(4,K)
  WRITE(6,*)'v procedure READ_3 byly nacteny prvky'
RETURN
999 WRITE(*,*)'v procedure READ_2 nebyly nacteny uzly'
  WRITE(6,*)'v procedure READ_2 nebyly nacteny uzly'
  STOP
END
!*****
SUBROUTINE READ_4(NCOUP,ICOUP)
! cteni prvkovych cisel
IMPLICIT NONE
INTEGER NCOUP,K,I1,I2
INTEGER ICOUP(2,NCOUP)
CHARACTER*80 AAA
CHARACTER*13 A13
CHARACTER*23 A23
!
80 FORMAT(A80)
11 FORMAT(A13,I8,A23,I8)
REWIND(16)
1 CONTINUE
READ(16,80,END=999)AAA
  IF ((AAA(1:3).NE.'CE,').OR.(AAA(9:13).NE.'DEFI,'))GOTO 1
!
DO 2 K=1,NCOUP
  READ(16,11)A13,I1,A23,I2
  READ(16,*)
  READ(16,*)
  READ(16,*)
  READ(16,*)
  READ(16,*)
  READ(16,*)
  READ(16,*)
  READ(16,*)
  ICOUP(1,K)=I1
  ICOUP(2,K)=I2
2 CONTINUE
  K=1
  WRITE(6,*)K,ICOUP(1,K),ICOUP(2,K)
  K=NCOUP
  WRITE(6,*)K,ICOUP(1,K),ICOUP(2,K)
  WRITE(6,*)'v procedure READ_4 byly nacteny dvojice uzlu periodicity'
RETURN
999 WRITE(*,*)'v procedure READ_4 nebyly nacteny dvojice uzlu periodicity'
  WRITE(6,*)'v procedure READ_4 nebyly nacteny dvojice uzlu periodicity'
  STOP
END)

```

---

## Formát souboru typu vazba.dat

NCOUP

PPP

!první řádek

C\*

N1L N2R Nr No Na Tr To Ta kx ky \mu N0 kz  
opakuje se NCOUP krát

! první řádek znací počet elementu - kontaktních vazeb (dvojice uzlu) NCOUP a způsob zadání třetí roviny

! parametr PPP=0 --> první vektor je vektor normály (v cylindrických souřadnicích), druhý vektor je tečný

! parametr PPP=1 --> oba vektory jsou tečné (v kartézských souřadnicích), první z nich je směrem prokluzu

! druhý řádek má následující strukturu

N1L N2R Nr No Na Tr To Ta kx ky \mu N0 kz

kde

N1L je číslo prvního uzlu vazby

N2R je číslo druhého uzlu vazby

(Nr, No, Na) pro parametr 0 v 1. řádku - je vektor normály kontaktu směřujícího od 1L do 2L, složky jsou vyjádřeny v cylindrických souřadnicích

tj. napr. Nr = skalární součin vektoru normály a radiálního vektoru v uzlu 1L - umělý uzel 2L vznikne otočením uzlu 2R o úhel  $2 \cdot \pi / N$  (N je počet sektorů)

(Tr, To, Ta) pro parametr 0 v 1. řádku - je tečný vektor kontaktu, v jehož směru dochází k prokluzu

kx tečná tuhost kontaktu

ky normálová tuhost kontaktu

\mu koeficient tření

N0 předepínací síla kontaktu

---

### Formát souboru typu Frekvence.dat

NN SET FREQ ! první řádek

1 67.120 1 0

2 160.05 2 0

celkem NN krát

NN značí počet vlastních nenulových frekvencí, musí být  $NN > N$ , kde N je počet vlastních frekvencí z KMENOVÉHO SOUBORU.

Následující řádky pak obsahují pořadové číslo frekvence a samotnou hodnotu vlastní frekvence v Hz. Pro druhý software NOMUVIBLAD-ETW1 značí třetí číslo číslo s počtem nodálních průměrů příslušného tvaru a dále pořadové vlastní číslo vlastní frekvence odpovídající právě uvedenému nodálnímu průměru.

---

### Formát souboru typu Mode.dat

1. ! první řádek

1. 0.10597E-02 0.20554E-01 0.26140E-02

2. 0.98925E-03 0.18272E-01 0.25655E-02

počet opakování odpovídá počtu uzlů modelovaného sektoru

počet opakování takovýchto bloků je NN (je výstupem programu ANSYS)

Začátek každého sektoru obsahuje pořadové číslo vlastního tvaru, další řádky pak číslo uzlu a posuvy ve směru x, y, z .

U software NOMUVIBLAD-ETW1 se vyskytují i vlastní tvary s nenulovým počtem nodálních průměrů. V případě takového vlastního čísla tomuto číslu přísluší dva po sobě zapsané vlastní tvary (jeho reálná a imaginární část dle popsané teorie).

---

### Formát souboru typu buzeni.dat pro parametr KK=2

2                   ! 1.řádek s parametrem KK=2  
                    ! volny radek

K  
HI IVF RE IM  
počet opakování K

K znaci pocet clenu buzeni v multiharmonicem rozvoji

HI nodalni prumer vlastniho tvaru, který je buzen

IVF kolikaty vlastni tvar pro HI nodalni prumer je buzen

RE coefficient, kterou je prenasobena realna slozka buzeneho vlastniho tvaru

IM coefficient, kterou je prenasobena imaginarni slozka buzeneho vlastniho tvaru

ostatni mozne volby parametru KK nejsou beznemu uzivateli doporučeny vyjma KK=1, který ma stejny format jako v pripade programu NOMUVIBLAD\_ESS1

## Popis formátu výstupních souborů

V průběhu výpočtu jsou výstupní informace ukládány do řady souborů, z nichž některé slouží k monitorování výpočtu nebo sloužily k ladění programu. Pro běžné uživatele jsou důležité čtyři z nich, které jsou vytvářeny v ASCII formátu. Jejich další zpracování pro následná grafická vyobrazení nebo tvorbu grafů již musí být provedeno v jiném prostředí nebo jinými programy (např. programem MATLAB). Připravované další verze programu možnosti výstupu ještě vylepší.

Značme dále

n1, n2, ... , nout	čísla uzlů pro výstup, která jsou uvedena ve vstupním KMENOVÉM SOUBORU
name	jméno úlohy (je jménem KMENOVÉHO SOUBORU bez přípony dat)
vazba	číslo zvolené vazby
frek	hodnotu zvolené frekvence

Výstupními soubory jsou

n1\_name.OUT  
n2\_name.OUT  
...  
nout\_name.OUT  
NODE\_name.out  
name\_QAMP.OUT  
GRAFF\_vazba\_frekw  
GRAFX\_vazba\_frekw

### Soubor n\*\_name.OUT

obsahuje čtyři sloupce. První sloupec obsahuje bezrozměrný čas probíhající od 0. do  $2\pi$ , další sloupce pak radiální, obvodový, axiální a celkový (absolutní hodnota vektoru) posuv v příslušném uzlu n\*. Při další budící frekvenci se soubor přepíše.

Příklad:

0.0000	-0.97683E-05	-0.32505E-03	0.21181E-03	0.38809E-03
0.0628	-0.10485E-04	-0.34839E-03	0.22925E-03	0.41718E-03
0.1257	-0.11160E-04	-0.37035E-03	0.24579E-03	0.44463E-03
0.1885	-0.11791E-04	-0.39085E-03	0.26136E-03	0.47033E-03
...				
6.0947	-0.74001E-05	-0.24773E-03	0.15475E-03	0.29218E-03
6.1575	-0.82230E-05	-0.27462E-03	0.17448E-03	0.32546E-03
6.2204	-0.90135E-05	-0.30043E-03	0.19353E-03	0.35748E-03

### Soubor NODE\_name.OUT

První sloupec obsahuje hodnoty budící frekvence, v následujících sloupcích pak hodnoty maximálních amplitud vibrací (posuvů) v příslušných uzlech n1, n2, ..., nout.

Příklad – pro výpočty provedené pro budící frekvence 88Hz a 88.25Hz a s uzly n1, n2, n3 má uvedený soubor tvar:

88.00 0.5783E-03 0.5817E-03 0.5657E-03  
88.25 0.6105E-03 0.6141E-03 0.5972E-03

### **Soubor GRAFF\_vazba\_fre**

obsahuje sedm sloupců, které dávají informaci o silovém působení v nelineární vazbě během jedné periody.

*První sloupec* obsahuje bezrozměrný čas probíhající od 0. do  $2\pi$ .

*Druhý sloupec* udává hodnotu tangenciální síly ve sledovaném směru prokluzu (směr je zadán v jednom ze vstupních souborů).

*Třetí sloupec* udává hodnoty proměnlivé složky normálové síly.

*Čtvrtý sloupec* udává sílu přenášenou kontaktem v tečném směru kolmém na směr pro druhý sloupec (pro správně vypočtený směr prokluzu je nulový; v případě zadání dvou třecích elementů mezi dvěma uzly, pakliže dominantní směr prokluzu neexistuje, se jeho nulovost zajistí volbou nulové tuhosti  $k_z$ ).

*Pátý sloupec* udává absolutní hodnoty druhého sloupce (tj. absolutní hodnotu třecí síly).

*Šestý sloupec* udává celou hodnotu normálové síly  $i$  s velikostí předepnutí  $N_0$ .

*Sedmý sloupec* udává absolutní hodnoty čtvrtého sloupce.

Příklad:

0.000000E+00 0.848249E+03 0.741956E+02 0.878336E+01 0.848249E+03 0.174876E+04 0.878336E+01  
0.628319E-01 0.911983E+03 0.798030E+02 0.926826E+01 0.911983E+03 0.175044E+04 0.926826E+01  
0.125664E+00 0.972118E+03 0.850953E+02 0.971658E+01 0.972118E+03 0.175203E+04 0.971658E+01  
...  
0.622036E+01 0.781170E+03 0.682957E+02 0.826381E+01 0.781170E+03 0.174699E+04 0.826381E+01  
0.628319E+01 0.848251E+03 0.741958E+02 0.878338E+01 0.848251E+03 0.174876E+04 0.878338E+01

### **Soubor GRAFX\_vazba\_fre**

obsahuje čtyři sloupce, které dávají informaci o relativních posuvech v nelineární vazbě během jedné periody.

*První sloupec* obsahuje bezrozměrný čas probíhající od 0. do  $2\pi$ .

*Druhý sloupec* udává hodnoty relativního tangenciálního posuvu mezi uzly vazby (ve směru třecí síly).

*Třetí sloupec* udává hodnoty relativního normálového posuvu mezi uzly vazby.

*Čtvrtý sloupec* udává hodnoty relativního tangenciálního posuvu mezi uzly vazby ve směru kolmém na směr prokluzu (pro správně vypočtený směr prokluzu je tento relativní posuv nulový; v případě zadání dvou třecích elementů mezi dvěma uzly se jeho nulovost zajistí volbou nulové tuhosti  $k_z$ ).