

ESF II projekt Západočeské univerzity v Plzni

reg. č. CZ.02.2.69/0.0/0.0/18_056/0013239



EVROPSKÁ UNIE
Evropské strukturální a investiční fondy
Operační program Výzkum, vývoj a vzdělávání



MINISTERSTVO ŠKOLSTVÍ
MLÁDEŽE A TĚLOVÝCHOVY

Vybrané partie z elektrických strojů
(KEV/VPS)

Vibrace a hluk
v elektrických strojích

Jan Šobra

2021/2022

Hluk a vibrace v elektrických strojích

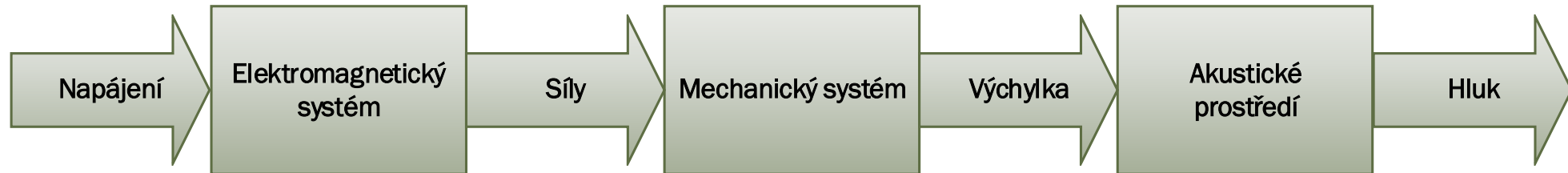
- Běžný, ale zpravidla nechtěný jev při činnosti strojů
- Příčiny vzniku
 - Princip činnosti => vedlejší efekt probíhajících fyzikálních dějů
 - Vliv výroby – konstrukce, technologie, tolerance, nedokonalosti, montáž
 - Ustavení stroje a další části soustrojí
 - Závady

Hluk a vibrace v elektrických strojích

- **e-NVH** = elektromagneticky buzený hluk, vibrace a drsnost
(*electromagnetically-excited Noise, Vibration and Harshness*)
- Proč hluk a vibrace?
 - Vysoká výkonová / momentová hustota (EV/HEV) ==> zvýšené buzení
 - Úspory materiálu (méně robustní konstrukce) ==> nižší tuhost konstrukcí
 - Robustní návrh ==> dlouhodobý provoz (energetika, průmysl)
 - Zdraví a životní prostředí ==> Hygienické normy pro hluk a vibrace
 - Komfort ==> Psychoakustika

Hluk a vibrace v elektrických strojích

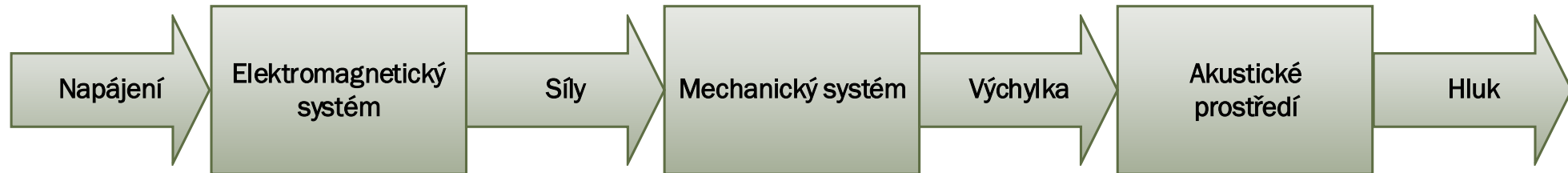
- Vznik elektromagneticky buzeného hluku a vibrací
 - Časově proměnné magnetické síly
 - Řada přeměn energie od elektrické po akustickou



Hluk a vibrace v elektrických strojích

➤ Elektromagnetický systém

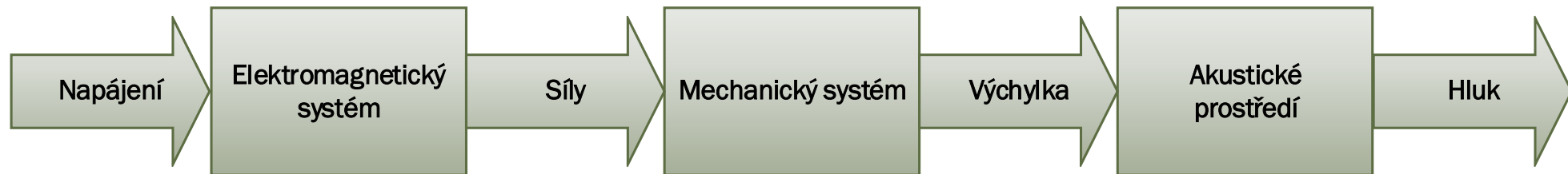
- Vinutí a magnetický obvod
- AC proud nebo otáčející se DC pole /PM => časově proměnné magnetické síly



Hluk a vibrace v elektrických strojích

➤ Mechanický systém

- Statorový paket, vinutí vč. izolačního systému, kostra stroje (+ příp. trámce, pravítka apod.)
- Časově proměnné magnetické síly => vibrace (pružná deformace) zubů statoru a dalších konstrukčních částí



Hluk a vibrace v elektrických strojích

- Časově proměnné magnetické síly => vibrace (pružná deformace) zubů statoru a dalších konstrukčních částí

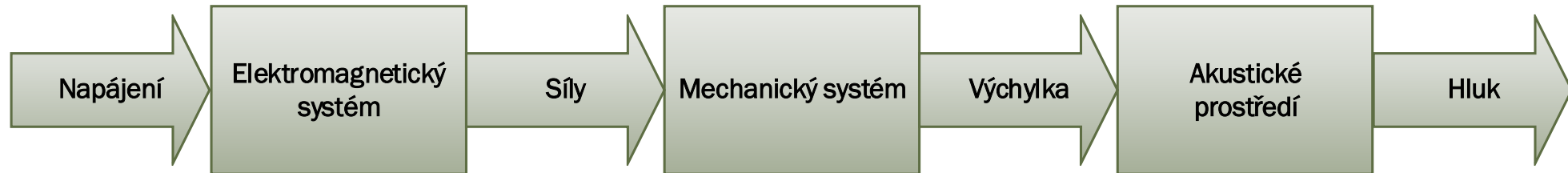


- [Odkaz na video](#)

Hluk a vibrace v elektrických strojích

➤ Akustické prostředí

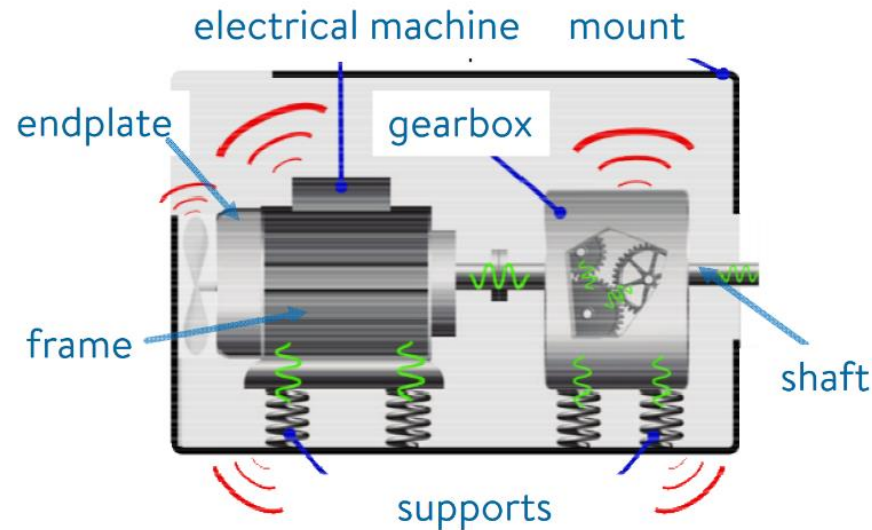
- Tekutina obklopující stroj – zpravidla vzduch
- Vibrace konstrukčních částí obklopených vzduchem => vyzařování akustické energie (hluku)



Hluk a vibrace v elektrických strojích

➤ Cesty šíření hluku

- **Hluk přenášený vzduchem** (*airborne noise*) = pohyb velkého množství vzduchu s využitím značného tlaku
- **Hluk přenášený konstrukcemi** (*structure-borne noise*) = šíření pevnými tělesy formou vibrací



Zdroj: EOMYS Engineering

Hluk a vibrace v elektrických strojích

➤ **Zdroje hluku a vibrací**

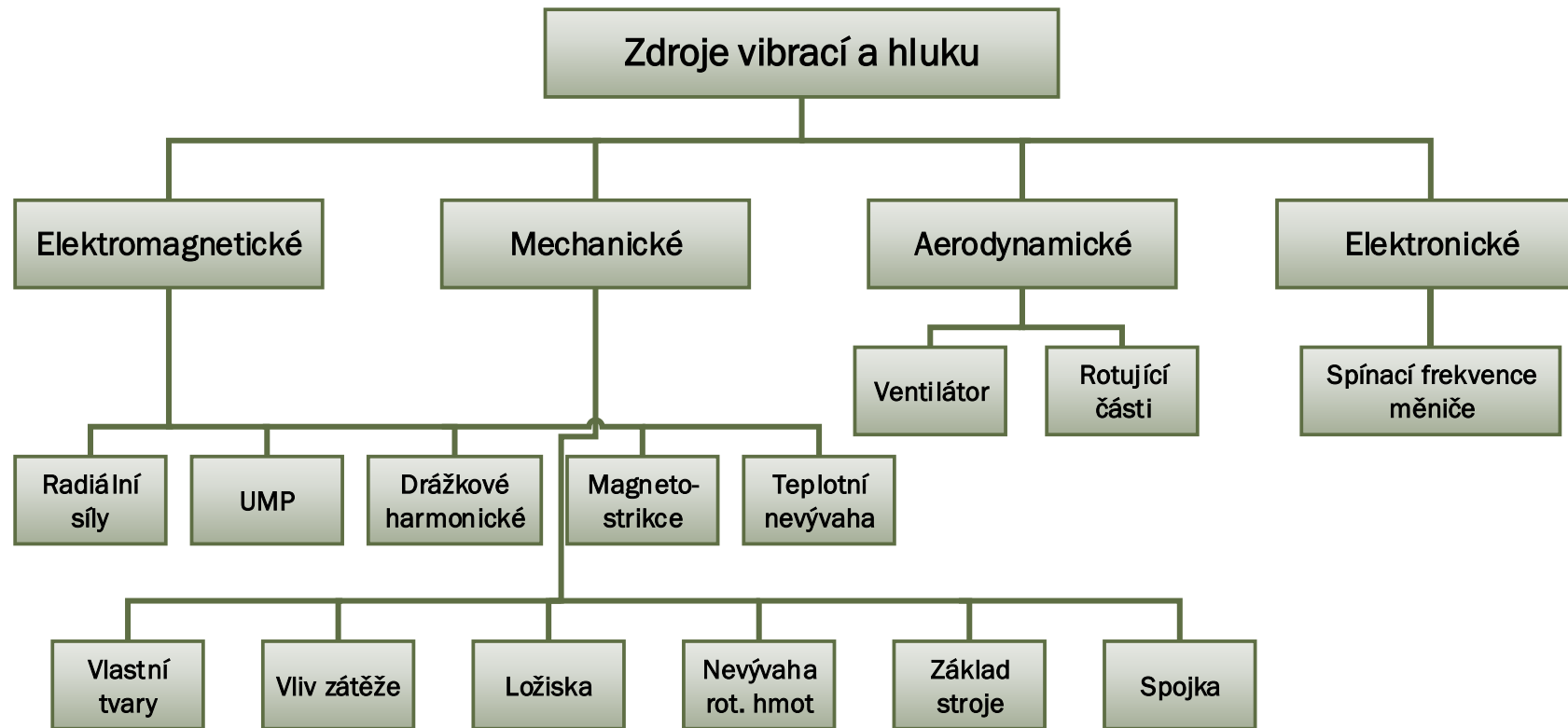
➤ Dle umístění

- Vnitřní
- Vnější

➤ Dle příčiny vzniku

- Elektromagnetické
- Mechanické
- Aerodynamické
- Elektronické

Hluk a vibrace v elektrických strojích



Hluk a vibrace v elektrických strojích

- **Elektromagnetické zdroje hluku a vibrací**
- **Radiální magnetické síly**
- Velikost magnetických sil úměrná kvadrátu indukce ve vzduchové mezeře

$$\Delta p(\xi, t) = \frac{B^2(\xi, t)}{2\mu_0}$$

- Změna velikosti sil v čase i prostoru

Hluk a vibrace v elektrických strojích

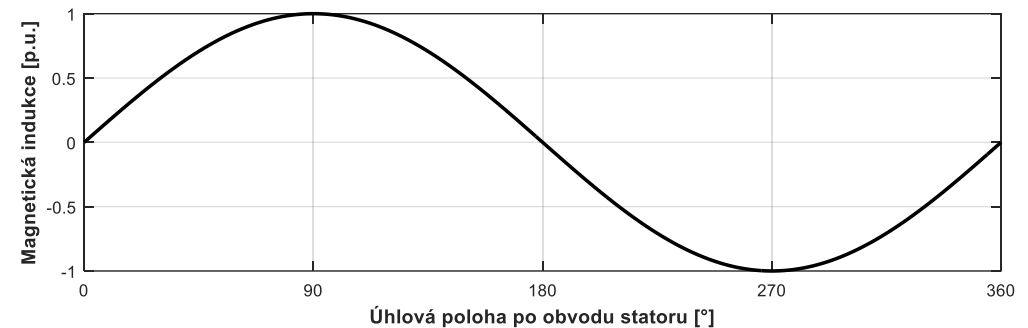
- **Elektromagnetické zdroje hluku a vibrací**

- **Radiální magnetické síly**

- Vliv kvadrátu indukce => dvě maxima síly v každé periodě (kladná a záporná půlperioda mag. proudu / indukce)

- Základní harmonická vibrací => dvojnásobek napájecí frekvence $2L$ (*twice line frequency*)

- Shoda / blízkost $2L$ a $2X$ pro $2p = 2$



Hluk a vibrace v elektrických strojích

- **Elektromagnetické zdroje hluku a vibrací**
- **Radiální magnetické síly**
- Rozhraní materiálů s různou permeabilitou (feromagnetikum – vzduch)
- Působení sil ve směru materiálu s nižší permeabilitou
- Přitažlivá síla mezi statorem a rotorem
- Možnost vybuzení vlastních tvarů statoru

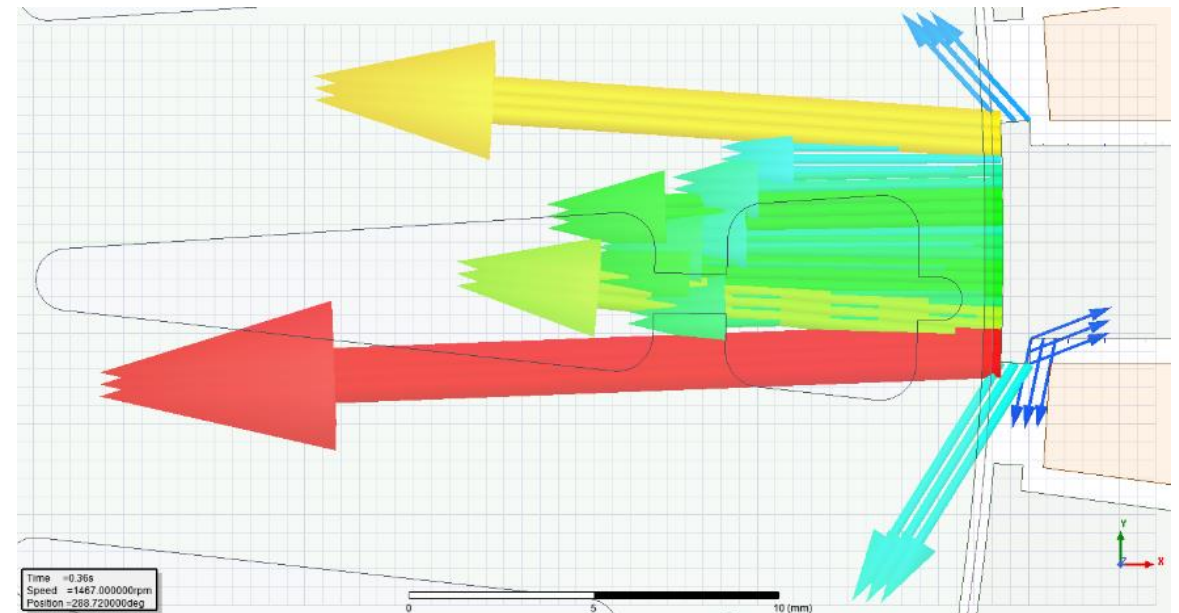
Hluk a vibrace v elektrických strojích

- **Elektromagnetické zdroje hluku a vibrací**

- **Radiální magnetické síly**

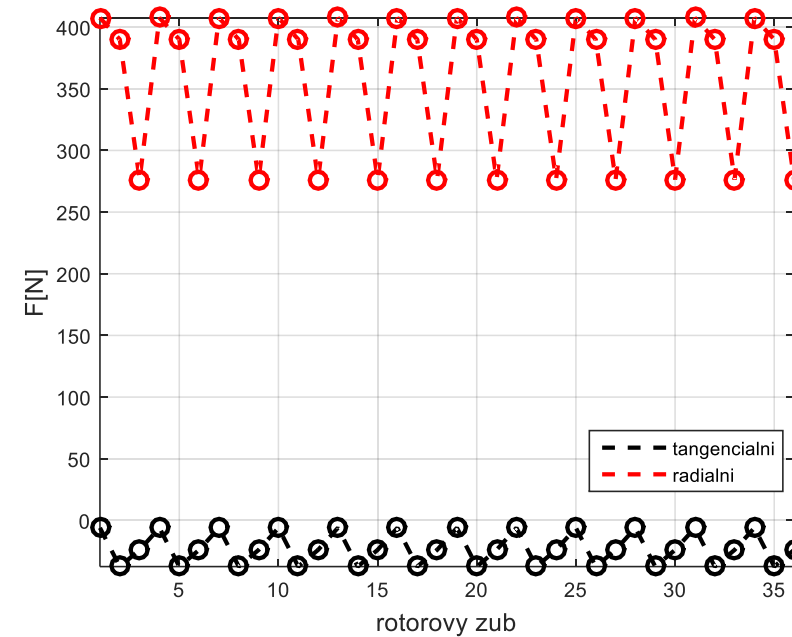
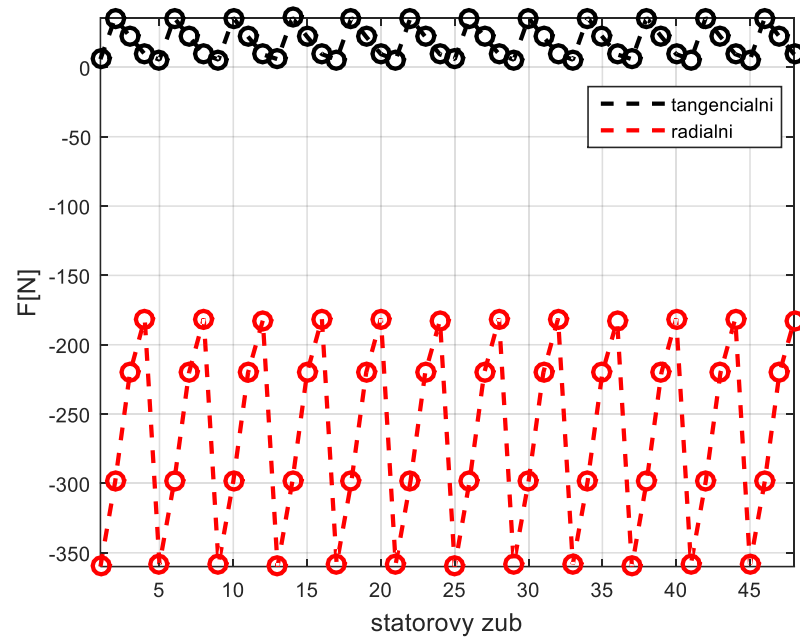
- Vektory plošné hustoty síly soustředěny na hlavu zubu směrem do vzduchové mezery

- Silové působení dovnitř drážky zanedbatelné



Hluk a vibrace v elektrických strojích

- Elektromagnetické zdroje hluku a vibrací
- Radiální magnetické síly



Hluk a vibrace v elektrických strojích

- **Elektromagnetické zdroje hluku a vibrací**
- **Radiální magnetické síly**
- Mag. síly o frekvenci $2L$ působí též na čela vinutí
 - Vyvázání, příp. vyložení a upevnění k podpěrnému kruhu
 - Tyčová vinutí => otěr izolace při výstupu z drážky => průraz



Hluk a vibrace v elektrických strojích

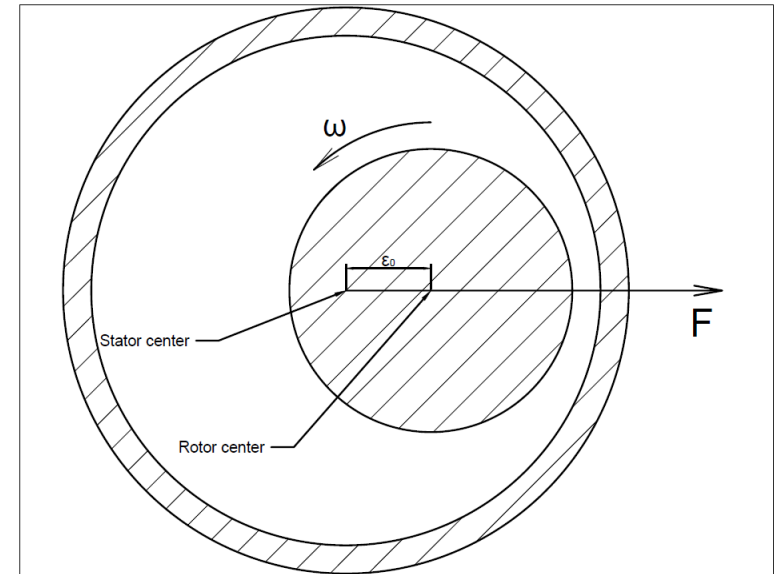
- **Elektromagnetické zdroje hluku a vibrací**
- **Jednostranný magnetický tah (UMP)**
- Nesymetrie magnetického pole
 - **Magnetický obvod** – excentricky uložený rotor, eliptický stator nebo rotor, průhyb hřídele, nerovnoměrné rozložení drážek po obvodu statoru, apod.
 - **Nesymetrie vinutí / napájecího zdroje** - různý počet závitů, mezizávitový zkrat, přerušená tyč rotoru AS apod.
 - => nerovnováha magnetických sil po obvodu stroje => UMP působí ve směru výslednice sil
- Zvýšené vibrace, namáhání ložisek, průhyb hřídele

Hluk a vibrace v elektrických strojích

- **Elektromagnetické zdroje hluku a vibrací**
- **Jednostranný magnetický tah (UMP)**
- Excentricita statická, dynamická, smíšená
- Proměnná velikost vzduchové mezery po obvodu stroje
- Menší vzduchová mezera => větší sycení => větší magnetická síla v tomto směru
=> jednostranný magnetický tah

Hluk a vibrace v elektrických strojích

- **Elektromagnetické zdroje hluku a vibrací**
- **Jednostranný magnetický tah (UMP)**
- **Excentricita statická**
 - Tuhý hřídel vložený do statoru výchylnou od osy statoru
 - Otáčení rotoru okolo vlastní osy
 - Pozice nejmenší vzduchové mezery stálá v čase =>=> velikost a směr UMP neměnné
 - Může způsobit průhyb hřídele
 - Vibrace na $2L$

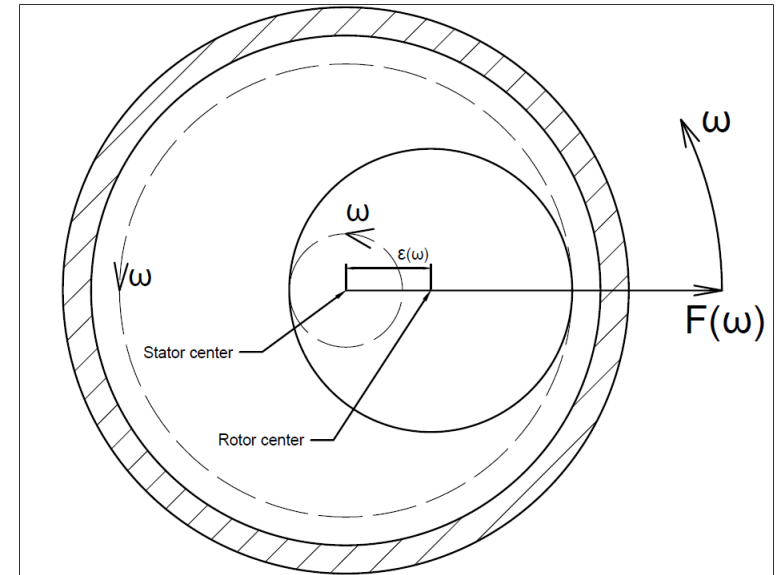


Hluk a vibrace v elektrických strojích

- Elektromagnetické zdroje hluku a vibrací
- Jednostranný magnetický tah (UMP)
- Excentricita dynamická
 - Průhyb rotoru již z výroby nebo teplotní nevyváženost
 - Směr UMP se mění s otáčejícím se rotorem
 - Vibrace hřídele i statoru na otáčkové frekvenci $1X$

$$f_{1X} = \frac{n}{60}$$

- AS postranní pásma vzdálená o $f_p = 2pf_s$



Hluk a vibrace v elektrických strojích

- **Elektromagnetické zdroje hluku a vibrací**
- **Jednostranný magnetický tah (UMP)**
- **Vysokofrekvenční hluk vlivem excentricity**
 - c je libovolné celé číslo, k_e je nula pro SE a nízké celé číslo pro DE, s je poměrná hodnota skluzu a e je nula nebo sudé celé číslo.

$$f_{ecc} = \left[(cQ_r \pm k_e) \frac{1-s}{p} \pm e \right] f_L$$

Hluk a vibrace v elektrických strojích

- **Elektromagnetické zdroje hluku a vibrací**
- **Drážkové harmonické**
- Vysokofrekvenční hluk vlivem drážkování statoru a rotoru
- Vibrace od drážkových harmonických rotoru způsobeny rozptylovým magnetickým polem okolo vodičů (tyčí) rotoru => silové působení na zuby statoru
- Frekvence často nad 1 kHz => mimo běžný rozsah vibrodiagnostických měření

Hluk a vibrace v elektrických strojích

- **Elektromagnetické zdroje hluku a vibrací**
- **Drážkové harmonické**
- Frekvence průchodu tyčí rotoru

$$f_{Qr} = \frac{nQ_r}{60}$$

- Postranní pásma o frekvenci + nebo $- 2L, 4L, 6L, \dots$

Hluk a vibrace v elektrických strojích

- **Elektromagnetické zdroje hluku a vibrací**
- **Magnetostrikce**
- Změna tvaru nebo rozměrů (v řádu μm) při střídavé magnetizaci feromagnetik
 - Natáčení magnetických domén materiálu (a pohyb jejich stěn) ve směru přiloženého magnetického pole
- Vibrace na lichých násobcích $2L$

Hluk a vibrace v elektrických strojích

- **Elektromagnetické zdroje hluku a vibrací**
- **Magnetostrikce**
- U točivých strojů není významným zdrojem hluku
- U transformátorů dominantním zdrojem hluku
 - Nízkofrekvenční „hučením“
 - Roste se sycením jádra (B^2)
 - Vliv stažení plechů

Hluk a vibrace v elektrických strojích

- **Elektromagnetické zdroje hluku a vibrací**
- **Teplotní nevývaha**
- Průhyb rotoru v důsledku nerovnoměrného prohřátí (např. zkratované plechy rotoru nebo různá vodivost tyčí klece nakrátko)
- Zvýšené vibrace na otáčkové frekvenci rotoru $1X$
- Neprojevuje se u studeného rotoru => vibrace postupně rostou s teplotou

Hluk a vibrace v elektrických strojích

- **Mechanické zdroje hluku a vibrací**

- **Vlastní tvary**

- Vlastní frekvence = frekvence při které dojde k silnému rozkmitání (rezonanci) systému i při slabém buzení
- Vlastní tvar = tvar kmitání odpovídající vlastní frekvenci

Hluk a vibrace v elektrických strojích

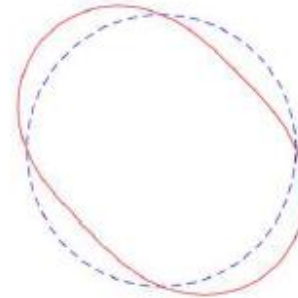
- **Mechanické zdroje hluku a vibrací**
- **Řád elektromagnetické obvodové vlny**



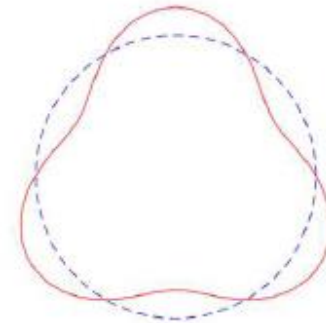
$r=0$



$r=1$



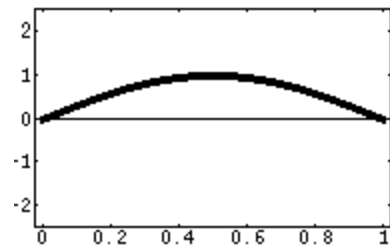
$r=2$



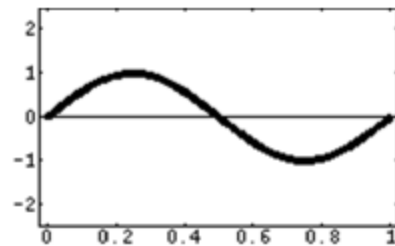
$r=3$

Hluk a vibrace v elektrických strojích

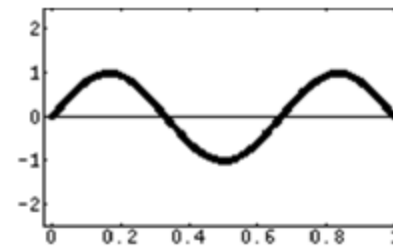
- **Mechanické zdroje hluku a vibrací**
- **Vlastní tvary**



1st mode

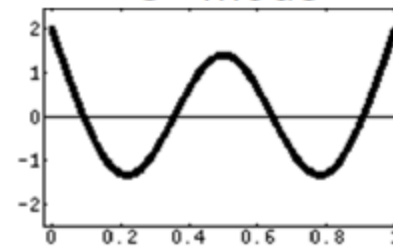
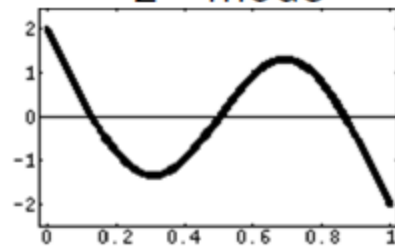
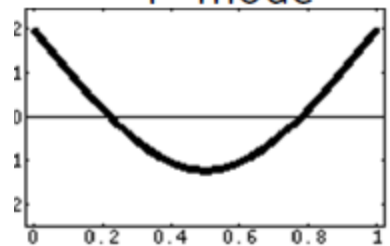


2nd mode



3rd mode

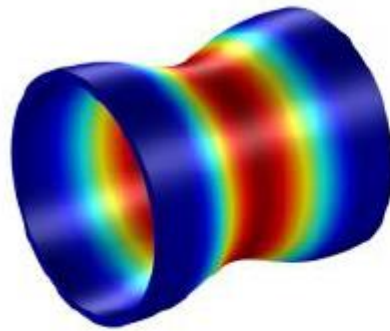
simply supported at both ends



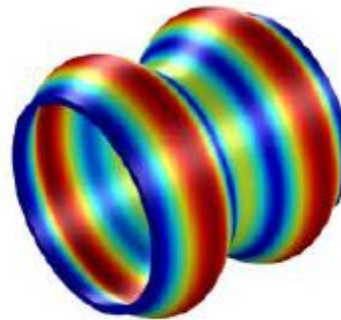
free-free

Hluk a vibrace v elektrických strojích

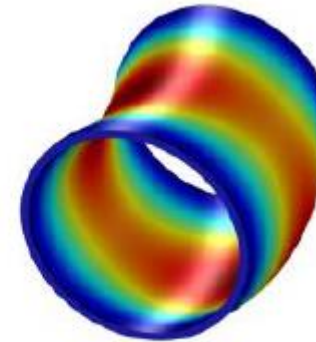
- **Mechanické zdroje hluku a vibrací**
- **Vlastní tvary**



$m = 0, n = 1$



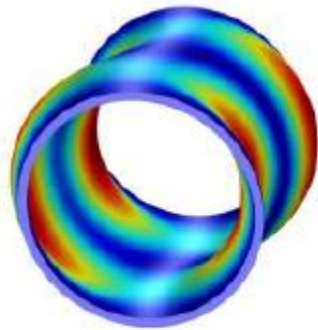
$m = 0, n = 3$



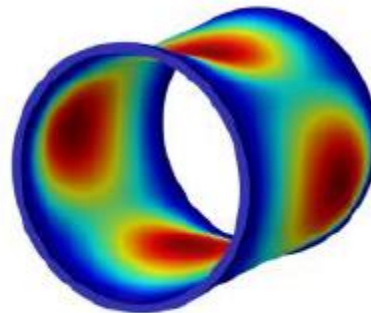
$m = 1, n = 1$

Hluk a vibrace v elektrických strojích

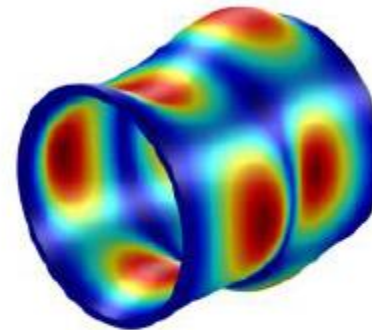
- **Mechanické zdroje hluku a vibrací**
- **Vlastní tvary**



$m = 1, n = 2$



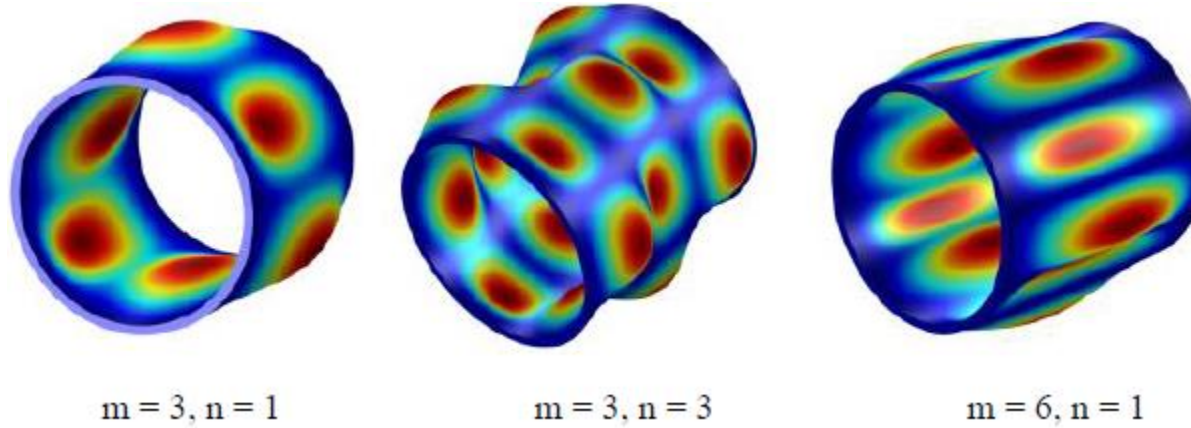
$m = 2, n = 1$



$m = 2, n = 2$

Hluk a vibrace v elektrických strojích

- **Mechanické zdroje hluku a vibrací**
- **Vlastní tvary**



Děkuji za pozornost

Jan Šobra

jsobra@fel.zcu.cz