



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



# **Vybrané partie z elektrických strojů**

## **(KEV/VPS)**

**Elektromagneticky buzený hluk a vibrace  
v elektrických strojích**

**(Studijní text)**

**ESF II projekt Západočeské univerzity v Plzni**

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

Jan Šobra

2021



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



# Obsah

## Obsah

|                                                                |    |
|----------------------------------------------------------------|----|
| Obsah.....                                                     | 2  |
| Seznam symbolů a zkratk .....                                  | 3  |
| Úvod .....                                                     | 5  |
| 1 Přehled zdrojů hluku a vibrací v elektrických strojích ..... | 7  |
| 2 Elektromagnetické zdroje hluku a vibrací .....               | 9  |
| 2.1 Radiální magnetické síly .....                             | 9  |
| 2.2 Jednostranný magnetický tah (UMP) .....                    | 12 |
| 2.3 Drážkové harmonické.....                                   | 14 |
| 2.4 Magnetostrikce.....                                        | 14 |
| 2.5 Teplotní nevývaha .....                                    | 15 |
| Závěr .....                                                    | 16 |
| Seznam literatury a informačních zdrojů .....                  | 17 |



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



## Seznam symbolů a zkratek

| Symbol     | Jednotka          | Význam                                 |
|------------|-------------------|----------------------------------------|
| $B$        | T                 | Magnetická indukce                     |
| $c$        | -                 | Libovolné celé číslo                   |
| $e$        | -                 | Nula nebo celé sudé číslo              |
| $f_{1X}$   | Hz                | otáčková frekvence rotoru (mechanická) |
| $f_{ecc}$  | Hz                | frekvence vibrací buzené excentricitou |
| $f_L$      | Hz                | napájecí frekvence stroje              |
| $f_p$      | Hz                | frekvence průchodu pólů                |
| $f_{Qr}$   | Hz                | frekvence průchodu tyčí rotoru         |
| $f_s$      | Hz                | skluzová frekvence                     |
| $k_e$      | -                 | Koeficient typu a míry excentricity    |
| $n$        | $\text{min}^{-1}$ | Počet otáček za minutu                 |
| $p$        | -                 | Počet pólových dvojic stroje           |
| $Q_r$      | -                 | Počet tyčí rotoru asynchronního stroje |
| $s$        | -                 | Skluz asynchronního stroje             |
| $t$        | s                 | Čas                                    |
| $\Delta p$ | $\text{N/m}^2$    | Plošná hustota síly                    |
| $\mu$      | H/m               | Permeabilita                           |
| $\zeta$    | rad               | Úhlová poloha po obvodu statoru        |



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



## Zkratky

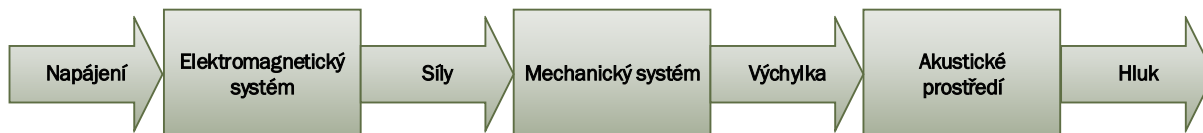
|       |                                                                                                                  |
|-------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 1X    | otáčková frekvence stroje (mechanická)                                                                           |
| 2L    | dvojnásobek napájecí frekvence (twice line frequency)                                                            |
| 2X    | dvojnásobek otáčkové frekvence stroje                                                                            |
| e-NVH | elektromagneticky buzený hluk, vibrace a drsnost<br>(electromagnetically-excited Noise, Vibration and Harshness) |
| UMP   | jednostranný magnetický tah (Unbalanced Magnetic Pull)                                                           |



## Úvod

Hluk a vibrace jsou běžným, i když zpravidla nechtěným, projevem při činnosti strojních zařízení nebo celků. Vznikají v důsledku výrobních tolerancí a nedokonalostí, případně vad, špatnou montáží nebo ustavením strojů na nosném základu. Zvýšené vibrace a hluk jsou také projevem různých závad zařízení. Jejich sledování a následnou analýzu lze tím pádem využít v technické diagnostice. Velmi často vznikají hluk a vibrace z podstaty samotného principu činnosti strojů, doprovodných fyzikálních dějů nebo jako přímý důsledek jejich primární funkce, případně zvolené technologie výroby.

V elektrických strojích točivých je proměnné elektromagnetické pole zdrojem magnetických sil, které kromě žádoucího točivého momentu budí vibrace statorového paketu, které se následně přenáší na kostru nebo do dalších konstrukčních částí stroje a soustrojí, odkud jsou vyzařovány do okolního prostředí v podobě hluku (vyzařování akustické energie). Tento princip je schematicky zobrazen na Obr. 0.1, kde lze vysledovat celou řadu přeměn energie.



Obr. 0.1: Přeměna elektrické energie na energii akustickou v elektrických strojích. [1]

Stroj je napájen elektrickou energií, která se v elektromagnetickém systému stroje tvořeném vinutím a magnetickým obvodem přemění (mimo jiné) na magnetické síly. Působení těchto sil lze v cylindrickém souřadném systému rozložit do tří směrů – tangenciální (tečné), radiální a axiální. Tangenciální síly tvoří zejména točivý moment, ale způsobují též například ohybové namáhání zubů statoru, které společně s radiálními a axiálními silami budí vibrace statorového (mechanického) systému stroje. Do tohoto systému lze zahrnout především statorový paket, vinutí vč. izolačního systému, kostru stroje a případně též konstrukční části, které slouží k upevnění statorového paketu v kostře (trámce, pravítka atd.). Vibrace způsobují deformaci jednotlivých konstrukčních částí, přičemž konstrukční části obklopené vzduchovým prostředím jsou zdrojem vyzařování akustické energie, tedy hluku.

Vznik a působení magnetických sil, jejich příspěvek ke vzniku hluku a vibrací a také další příčiny a principy vzniku elektromagneticky buzeného hluku a vibrací (e-NVH – *electromagnetically-excited Noise, Vibration and Harshness*) v elektrických strojích jsou detailněji popsány v následujících částech textu.



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



MINISTERSTVO ŠKOLSTVÍ,  
MLÁDEŽE A TĚLOVÝCHOVY

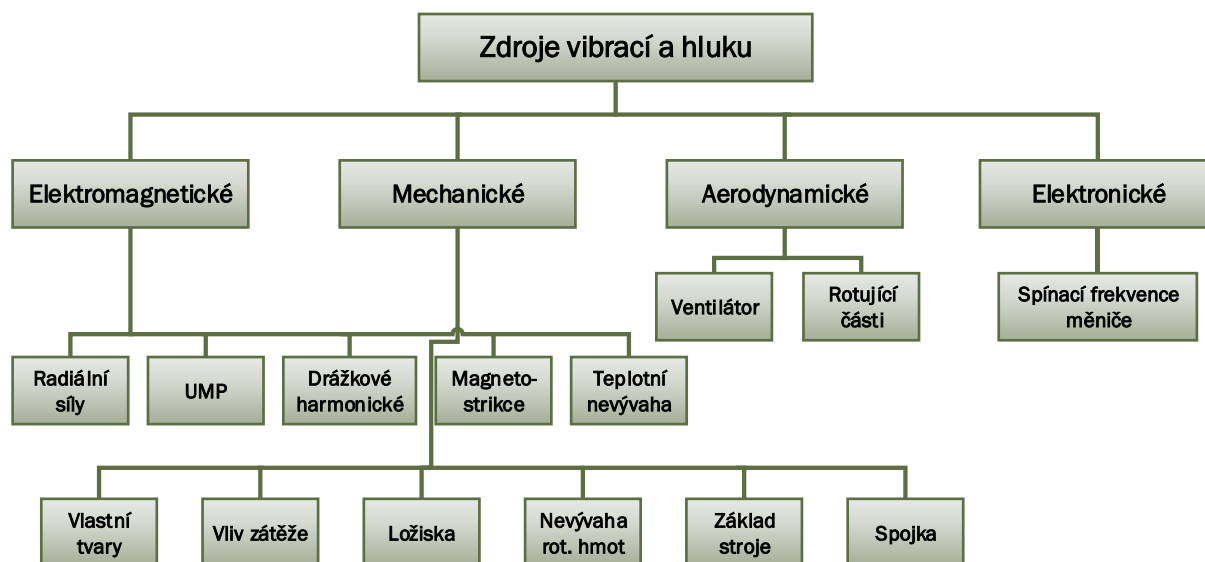
Důvodů, proč se zabývat hlukem a vibracemi již při návrhu elektrických strojů je celá řada. Ty nejdůležitější jsou popsány níže:

- **Vysoká výkonová / momentová hustota** požadovaná v současné době zejména v elektromobilitě je spojena s vyšším sycením magnetického obvodu strojů a tedy vyšším buzením vibrací od magnetických sil ve stroji.
- **Úspory materiálu, resp. méně robustní konstrukce**, mají často za následek nižší tuhost konstrukčních částí a může tedy snáze dojít k vybuzení vibrací.
- **Robustní návrh** pro zajištění dlouhé životnosti a bezporuchového chodu elektrického stroje nesouvisí pouze s dimenzováním z hlediska elektromagnetického využití stroje nebo tepelně-ventilačního výpočtu. Neméně důležité je také dimenzování konstrukčních částí stroje s ohledem na jejich mechanické namáhání, ať už z hlediska momentu přenášeného po hřídeli, únosnosti ložisek nebo právě schopnosti konstrukce odolávat vibracím.
- **Zdravotní hlediska a ohleduplnost k životnímu prostředí** jsou aktuální také v souvislosti s vystavením osob nebo zvířat hluku a vibracím. V této oblasti jsou zavedeny hygienické limity, které stanoví maximální povolené úrovně hluku a vibrací pro různá prostředí a denní nebo noční dobu.
- **Komfort** cestujících v dopravních prostředcích nebo obsluhy zařízení s elektrickým pohonem souvisí jednak s vibracemi, které by se neměly přenášet do vnitřních prostor vozidla a zejména pak s celkovým akustickým projevem pohonu, který by neměl působit rušivě. V tomto případě se jedná spíše o složení (spektrum) hluku než o jeho absolutní úroveň a o jeho vnímání lidským uchem (psychoakustická měřítka).



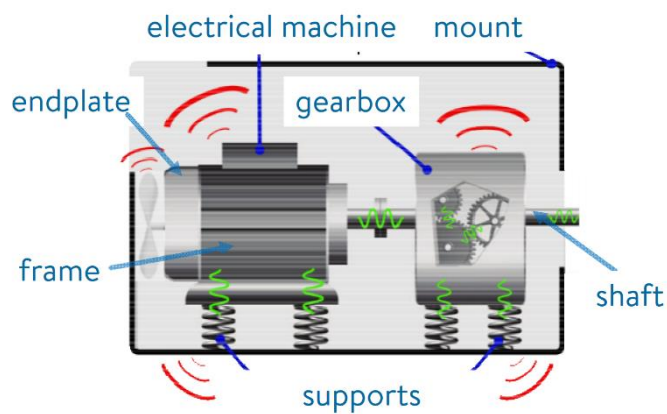
# 1 Přehled zdrojů hluku a vibrací v elektrických strojích

Zdroje hluku a vibrací v točivých elektrických strojích lze rozdělit podle jejich umístění na vnitřní a vnější. Tedy zda jsou vibrace buzeny přímo uvnitř stroje nebo mají původ v jiných částech soustrojí (pohonu), případně v okolním prostředí. Z hlediska příčiny vzniku hluku a vibrací pak lze provést ještě dělení na elektromagnetické, mechanické, aerodynamické a elektronické zdroje (viz Obr. 1.1). Některé z nich se ve stroji vyskytují přirozeně a buď je lze potlačit nebo alespoň zmírnit jejich vliv různými konstrukčními opatřeními (např. zešíkmení drážek) nebo je třeba jejich výskyt akceptovat. Dalšími zdroji chvění a hluku jsou poté závady vznikající během provozu stroje. Některé závady, např. jednostranný magnetický tah (UMP – *unbalanced magnetic pull*), mohou mít elektromagnetickou příčinu, avšak v jejich důsledku mohou vznikat další závady mechanické (např. průhyb hřídele) a naopak. [2]



Obr. 1.1: Zdroje vibrací a hluku v elektrických točivých strojích. [2]

Z hlediska způsobu šíření hluku se pak rozlišuje hluk přenášený vzduchem a hluk přenášený konstrukcemi (viz Obr. 1.2). Hluk přenášený vzduchem (*airborne noise*) lze charakterizovat jako pohyb velkého množství vzduchu s využitím značného tlaku. Jeho zdrojem může být například vzduch obtékající lopatky ventilátoru na hřídeli stroje nebo velké kmitající plochy (např. kostra stroje). Hluk přenášený konstrukcemi (*structure-borne noise*) se šíří pevnými tělesy formou vibrací a následně může být vyzářen do prostoru jako hluk přenášený vzduchem.



Obr. 1.2: Možné cesty přenosu hluku v elektrických strojích – vzduchem (červeně), konstrukcí (zeleně).  
Zdroj: EOMYS Engineering



## 2 Elektromagnetické zdroje hluku a vibrací

### 2.1 Radiální magnetické síly

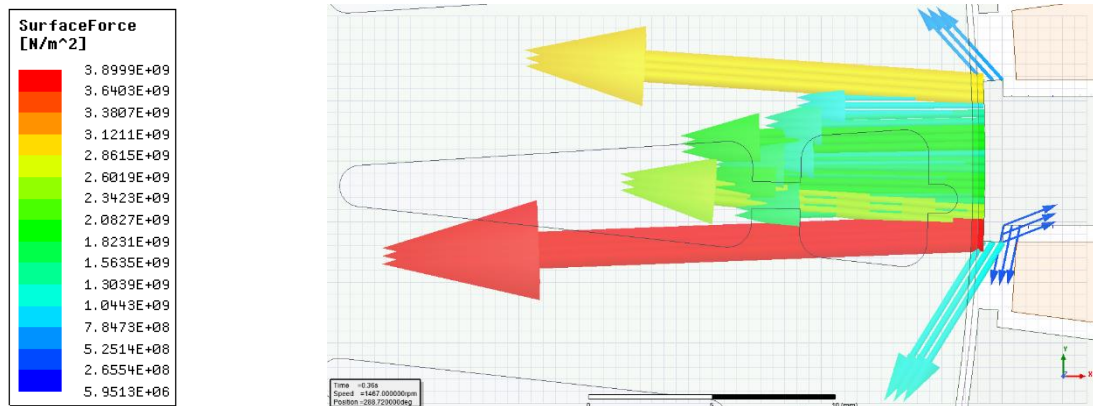
Hluk a vibrace buzené magnetickými silami patří mezi vnitřně buzené. Velikost magnetických sil působících na stator a rotor stroje je odvozena od kvadrátu průběhu magnetické indukce ve vzduchové mezeře stroje. Na velikost vibrací má nejvýznamnější vliv radiální složka indukce, resp. síly. Ovšem určité vibrace jsou buzeny také jejich tečnou složkou, která zároveň způsobuje ohybové namáhání zubů a případně také axiální složkou síly, která vzniká u strojů se zešikmenými drážkami statoru nebo zešikmenými magnety na rotoru. Za předpokladu, že je magnetický obvod stroje tvořen ideálním železem, lze zjednodušeně vypočítat plošnou hustotu síly v radiálním směru jako [3], [4]

$$\Delta p(\xi, t) = \frac{B^2(\xi, t)}{2\mu_0}, \quad (1)$$

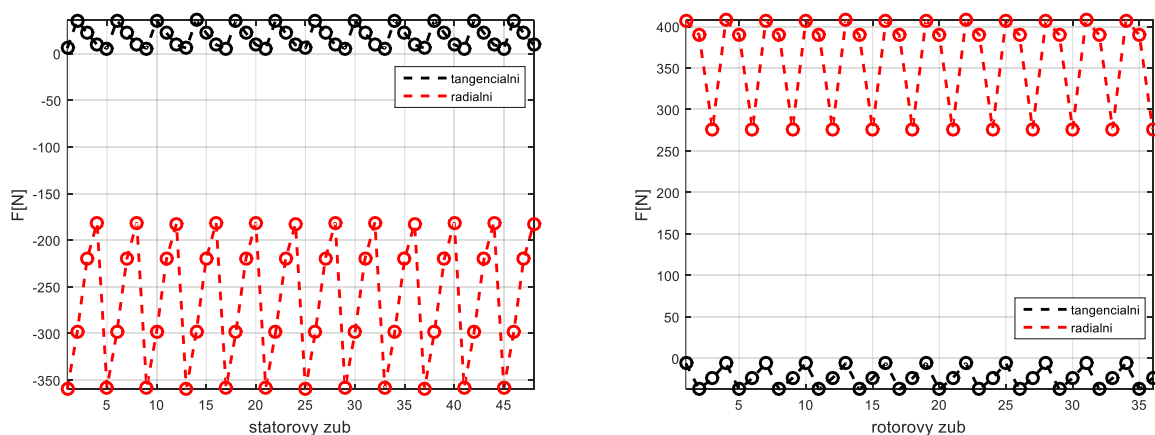
kde  $B(\xi, t)$  je magnetická indukce v daném časovém okamžiku  $t$  a konkrétní úhlové poloze na obvodu statoru  $\xi$  a  $\Delta p(\xi, t)$  je odpovídající plošná hustota síly (někdy též uváděna jako specifický magnetický tlak).

Magnetické síly působí na rozhraní materiálů s různou permeabilitou – v případě elektrických strojů se jedná o rozhraní feromagnetika (elektrotechnické plechy) a vzduchu. Působení sil je ve směru materiálu s nižší permeabilitou, tedy do vzduchu, a výsledkem je přitažlivá síla mezi statorem a rotorem.

Silové působení je soustředěno téměř výhradně na hlavu zubu, směrem do vzduchové mezery – převažuje tedy radiální směr. Silové působení na tělo zubu směrem dovnitř drážky je zanedbatelné. To je dáno výrazně vyšší velikostí magnetické indukce ve vzduchové mezeře oproti indukci uvnitř drážky. Výše uvedené je patrné z Obr. 2.1, kde je zobrazeno rozložení vektorů plošné hustoty síly na zubu statoru asynchronního stroje. Celková síla působící na jednotlivé zuby statoru a rotoru téhož stroje v jednom časovém okamžiku je patrná z Obr. 2.2. Obrázky pochází z konečnoprvkové analýzy asynchronního stroje o výkonu 11 kW.



Obr. 2.1: Vektory plošné hustoty síly působící na jeden zub statoru.



Obr. 2.2: Velikost sil působících na zuby statoru (vlevo) a rotoru (vpravo) v radiálním a tečném směru.

Velikost sil působících na zuby statoru se v čase a prostoru mění společně s indukcí ve vzduchové mezeře dle (1) a právě tyto časově proměnné síly budí vibrace zubů, které se dále přenášejí přes jho do kostry stroje.

Frekvence základní harmonické vibrací od magnetických sil je vlivem kvadrátu indukce v (1) na dvojnásobku frekvence napájecího napětí / proudu (*twice line frequency*) a značí se  $2L$ . V případě sinusového průběhu magnetizačního proudu, a tím pádem i magnetické indukce ve vzduchové mezeře, má totiž výsledná síla v každé periodě magnetické indukce dvě maxima – v kladné a záporné půlvlně. To znamená, že vibrace buzené touto silou kmitají na frekvenci rovné dvojnásobku frekvence napájecího napětí. Tato skutečnost je dobře patrná z Obr. 2.4. Určitá úroveň vibrací na této frekvenci



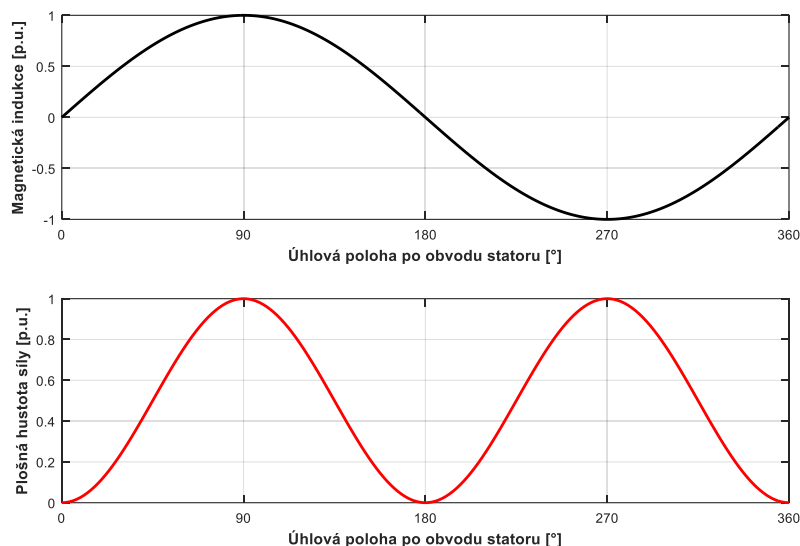
se tedy přirozeně vyskytuje také u strojů v bezvadném technickém stavu a růst vibrací na této frekvenci je typický pro některé poruchy způsobující nesymetrii magnetického obvodu (např. statická excentricita nebo mezizávitový zkrat na vinutí).

Magnetické síly o frekvenci  $2L$  (viz níže) působí také na čela vinutí statoru, z toho důvodu je nutné čela dobře vyvázat, u větších strojů případně vyložit a upevnit k podpěrnému kruhu, aby se v maximální možné míře zabránilo vibracím čel. Vibrace čel totiž zejména u tyčových vinutí způsobují otěr izolace na výstupu tyče z drážky (projevuje se bílým prachem) a v krajním případě může dojít k průrazu izolace (viz Obr. 2.3).

Při technické diagnostice dvoupólových synchronních a asynchronních strojů je třeba dát pozor na shodu, resp. blízkost (v případě AS), ve frekvencích  $2L$  a druhé harmonické od otáčkové frekvence  $2X$ .



*Obr. 2.3: Izolace ve formě bílého prachu, sedřená z čel vinutí třením a vibracemi (vlevo); průraz izolace statorového vinutí vzniklý v důsledku vibrací čel (vpravo) [5]*



*Obr. 2.4: Jedna perioda průběhu magnetické indukce a radiální magnetické síly (dvoupólový stroj, zanedbán vliv drážkování)*

## 2.2 Jednostranný magnetický tah (UMP)

Pokud je stroj z elektromagnetického hlediska symetrický, jsou magnetické síly působící po obvodu stroje v rovnováze a rotor není přidavně namáhán. Ovšem v případě nesymetrie magnetického pole vzniká jednostranný magnetický tah, který působí ve směru výslednice sil a způsobuje přidavné namáhání rotoru a ložisek. To může vést k předčasnému opotřebení ložisek, průhybu hřídele a v krajním případě též ke kolizi rotoru se statorem.

Zmíněná nesymetrie může být způsobena například geometrickou nesouměrností magnetického obvodu (excentricky uložený rotor, eliptický stator nebo rotor, průhyb hřídele, nerovnoměrné rozložení drážek po obvodu statoru, apod.), nesymetrií vinutí (např. různý počet závitů, mezizávitový zkrat nebo přerušená tyč rotoru AS) nebo nesymetrií napájecího zdroje. Jednostranný magnetický tah může být statický nebo dynamický, podle toho, zda působí stále ve stejném směru nebo se jeho směr v čase mění (v závislosti na otáčení hřídele). To je vysvětleno níže na příkladu statické a dynamické excentricity (viz Obr. 2.5).

V případě excentricity není velikost vzduchové mezery stejná po celém obvodu stroje. Vzduchová mezera se v místě, kde je menší, více sytí a tím pádem vzniká v tomto směru také větší magnetická síla, která způsobí jednostranný magnetický tah. Excentricita může být statická (SE), dynamická (DE) nebo smíšená. Zatímco v případě statické excentricity je pozice nejmenší vzduchové



mezery stálá v čase a velikost a směr jednostranného magnetického tahu lze alespoň v prvním přiblížení považovat za neměnné, v případě dynamické excentricity se pozice nejmenší vzduchové mezery a s ní také směr jednostranného magnetického tahu v čase mění.

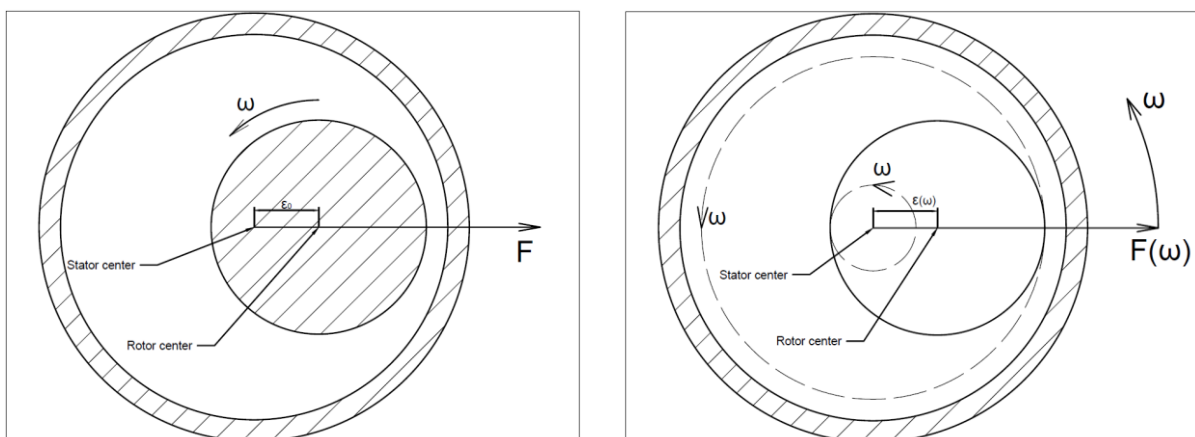
Statickou excentricitu si lze představit jako tuhý hřídel, který je vložen do statoru s jemnou výchylnou od osy statoru. Rotor se tedy otáčí kolem své vlastní osy, která ovšem není totožná s osou statoru. Tento stav může zejména u delších strojů způsobit průhyb hřídele, který by ovšem měl mít stále stejnou pozici.

Oproti tomu dynamická excentricita je většinou způsobena průhybem rotoru již z výroby nebo vzniklém v důsledku teplotní nevyváženosti rotoru. V tom případě se směr jednostranného magnetického tahu mění společně s otáčejícím se rotorem a způsobuje vibrace hřídele a také statoru stroje na násobcích mechanické otáčkové frekvence rotoru  $1X$  dle (2).

U asynchronních strojů se v případě DE dále mohou okolo otáčkové frekvence a dvojnásobku napájecí frekvence vytvořit postranní pásma vzdálená o frekvenci průchodu pólů (3), kde  $f_s$  je skluzová frekvence stroje [6].

$$f_{1X} = \frac{n}{60} \quad (2)$$

$$f_p = 2pf_s \quad (3)$$



Obr. 2.5: Schematické zobrazení statické (vlevo) a dynamické excentricity (vpravo).



Stroje s excentricitou mohou vykazovat také vysokofrekvenční hluk a vibrace, jejichž frekvence jsou dány harmonickými MMF statoru a drážkováním rotoru. Frekvence vibrací buzených excentricitou ( $f_{ecc}$ ) jsou dle [7] dány vztahem

$$f_{ecc} = \left[ (cQ_r \pm k_e) \frac{1-s}{p} \pm e \right] f_L, \quad (4)$$

kde  $c$  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.

## 2.3 Drážkové harmonické

Hluk a vibrace buzené magnetickými silami na vyšších frekvencích jsou dány drážkováním statoru a rotoru, z toho důvodu se nazývají drážkové harmonické nebo také frekvence průchodu tyčí rotoru. Frekvence drážkových harmonických rotoru je dána rovnicí (5), kde  $n$  je počet otáček rotoru za minutu a  $Q_r$  je počet drážek / tyčí rotoru. Vibrace od drážkových harmonických rotoru jsou způsobeny rozptylovým magnetickým polem okolo tyčí samotných. Toto pole je generováno proudem indukovaným v tyčích a jím buzené síly působí na zuby statoru. Z (5) lze odvodit, že frekvence drážkových harmonických jsou často nad 1 kHz a tím pádem se nachází mimo běžný rozsah vibrodiagnostických měření. Jimi buzené vibrace jsou hlavním zdrojem vysokofrekvenčního hluku v asynchronním stroji, ale nezpůsobují strukturální změny [6].

$$f_{Qr} = \frac{nQ_r}{60}, \quad (5)$$

Okolo frekvence průchodu tyčí rotoru se také mohou vyskytovat postranní pásma o frekvenci + nebo -  $f_{2L}, f_{4L}, f_{6L}, \dots$ .

## 2.4 Magnetostrikce

Magnetostrikce je jev, kdy u feromagnetických materiálů dochází při magnetizaci ke změně jejich tvaru nebo rozměrů. Z mikroskopického hlediska dochází při magnetizaci k natočení, zprvu náhodně orientovaných, magnetických domén materiálu ve směru přiloženého magnetického pole. Při tomto natočení dochází k pohybu stěn mezi magnetickými doménami, což společně se samotným natočením domén způsobuje makroskopickou změnu tvaru a rozměrů materiálu v řádu  $\mu\text{m}$ .



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



Při střídavé magnetizaci dochází k pravidelné změně orientace přiloženého pole a tím pádem také k pravidelným změnám rozměrů magnetického materiálu. Tyto pravidelné změny rozměrů se projevují **vibracemi a hlukem na frekvenci  $2L$**  a jejích lichých harmonických. U točivých strojů magnetostrikce zpravidla nepatří mezi významné zdroje hluku, resp. je maskována jinými zdroji hluku. Na druhou stranu u transformátorů je magnetostrikce dominantním zdrojem hluku – projevuje se charakteristickým nízkofrekvenčním „hučením“, které nabývá na intenzitě se sycením jádra. Velký vliv na hluk transformátoru má kromě sycení také síla stažení plechů.

## ***2.5 Teplotní nevývaha***

Teplotní nevývaha je způsobena nerovnoměrným prohřátím rotoru, resp. průhybem rotoru v důsledku nerovnoměrného prohřátí. Teplotní nevývaha způsobuje, stejně jako jiné druhy nevývahy, zvýšené **vibrace na otáčkové frekvenci rotoru  $1X$** . Na rozdíl od nevývahy rotujících hmot se ovšem teplotní nevývaha neprojevuje u studeného rotoru a vibrace postupně rostou s teplotou rotoru. Příčinou teplotní nevývahy mohou být například zkratované plechy rotoru nebo různá vodivost rotorových tyčí u klece nakrátko (část tyčí je odlita z jiné vsázky).



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



## Závěr

Studijní text uvádí přehled zdrojů hluku a vibrací v elektrických strojích a blíže se zaměřuje na elektromagneticky buzený hluk a vibrace. Ostatní zdroje hluku, tedy mechanické, aerodynamické a elektronické nejsou v textu blíže popisovány a v krátkosti jim bude věnována pozornost během přednášky.

Text není určen jako plnohodnotná náhrada přednášky, je spíše doplňkem a rozšířením k přednáškové prezentaci.



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



MINISTERSTVO ŠKOLSTVÍ,  
MLÁDEŽE A TĚLOVÝCHOVY

## Seznam literatury a informačních zdrojů

- [1] J. F. Gieras, C. Wang, and J. C. Lai, *Noise of Polyphase Electric Motors*. Boca Raton: CRC/Taylor & Francis, 2006.
- [2] J. Šobra, "Dynamické chování konstrukčních částí elektrických strojů," Západočeská univerzita v Plzni, Fakulta elektrotechnická, Plzeň, 2018.
- [3] I. Boldea and S. Nasar, *The Induction Machine Handbook*, vol. 6. CRC Press, 2001.
- [4] D. Mayer, *Aplikovaný elektromagnetismus*. České Budějovice: KOPP, 2012.
- [5] K. Lachman, "Měření chvění čel vinutí velkých generátorů," Západočeská univerzita v Plzni, Plzeň, 2016.
- [6] W. R. Finley, M. M. Hodowanec, and W. G. Holter, "An analytical approach to solving motor vibration problems," *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 36, no. 5, pp. 1467–1480, 2000.
- [7] G. H. Bate, "Application notes: Vibration diagnostics for industrial electric motor drives," Naerum, 1988.