

# **Diagnostika vybraných poruch asynchronních motorů pomocí proudových spekter**

Prof. Ing. Karel Sokanský, CSc.  
VŠB – TU Ostrava, FEI

## **1. Teoretický úvod**

Z rozboru frekvenčních spekter různých veličin generovaných motory za jejich normálního provozu můžeme usoudit na poruchy i nepravidelnosti magnetického a elektrického obvodu stroje nebo také jeho mechanických částí. Jedná se o funkční diagnostiku, poněvadž diagnostický systém nemusí generovat testovací signál, ale využívá statorový proud při zachování provozu motoru. V této metodě provádíme frekvenční analýzu napájecího harmonického proudu elektrického stroje. Protože mechanické vibrace stroje mohou být způsobené elektrickou závadou, je dobré použít jako doplňkovou diagnostickou metodu, měření vibrací stroje.

V proudových spektrech je dominantní první harmonická síťové frekvence 50 Hz a její násobky. Výraznější jsou liché harmonické, které souvisí s diskrétním rozložením vinutí do drážek a změnou vodivosti vzduchové mezery vlivem drážkování, ale mohou se také vyskytnout působením nesinusového napájecího napětí. Je-li třífázové vinutí symetrické, neměla by se ve spektru objevit 3. harmonická a její násobky (9, 15 atd.). Vyšší harmonické, které se ve spektru objevují, mohou být způsobené drážkováním statoru a rotoru. Obvykle nás zajímají vyšší harmonické jen do určitého řádu, neboť amplituda harmonických klesá s jejich řádem a pak se stávají neměřitelnými.

Měření proudových spekter se provádí pomocí analyzátorů. Na jeho vstup přivádíme obvykle napětí snímané z odporu, kterým prochází proud přivedený z proudových kleští. Kleště jsou připojeny na vstupní napájecí kabely stroje. U motorů na velmi vysoké napětí (6kV) se klešťový ampérmetr připojí do sekundárního vinutí proudového transformátoru, umístěného v blokové rozvodně.

Pro hodnocení stavu měřeného objektu se porovnávají v proudovém spektru amplitudy (měřené v dB – decibelech) první harmonické s amplitudami ostatních frekvencí. Jestliže amplitudový rozdíl mezi první harmonickou a některou jinou frekvencí (na postraních pásmech) je menší než 40 dB, mohlo by to předznamenat zhoršení technického stavu měřeného zařízení, a to by se mělo podrobit další kontrole technického stavu.

## **2. Vybrané poruchy asynchronních motorů a jejich projevy v proudovém spektru**

### **2.1 Statická excentricita**

Při statické excentricitě je šířka vzduchové mezery závislá pouze na poloze, nikoliv na čase. Na tomto základě vyvozujeme, že magnetické pole ve vzduchové mezeře se otáčí synchronní rychlostí, jež je dána frekvencí sítě a počtem pólových dvojic asynchronního motoru. Na  $p$  period magnetického pole připadá 1 perioda modulační funkce, která je představována proměnlivou vzduchovou mezerou, tj. funkcí její vodivosti.

Statická excentricita je definována jako vyosení osy rotoru proti ose statoru. Různá velikost vzduchové mezery má za následek, že v místě, kde je mezera menší, dochází k silnější interakci statorového a rotorového magnetického pole. Vliv statické excentricity se projeví jako vznik postraních pásem, které jsou posunuty od síťové frekvence  $f_1$  o synchronní otáčkovou frekvenci  $f$ .

$$\text{Statická excentricita} \quad f_{STAT} = f_1 \pm f_{so} \quad , \quad [\text{Hz}] \quad (1)$$

$$\text{kde} \quad f_{so} = \pm \frac{50}{p} = \pm \frac{f_1}{p} \quad [\text{Hz}] \quad (2)$$

Statická excentricita se rovněž projevuje na dvojnásobku síťové frekvence dle vztahu

$$f_{STAT} = 2 \cdot f_1 \quad (3)$$

Vzhledem k tomu, že se jedná o 2. harmonickou síťové frekvence, je diagnostika statické excentricity na této frekvenci problematická.

Dynamická excentricita vzniká při poruše rotoru nebo jeho částí. Poměry jsou složitější o to, že šířka vzduchové mezery není jen funkcí polohy, ale je zároveň funkcí času, protože proměnná vzduchová mezera se otáčí rychlostí danou otáčkami rotoru. Projevuje se vznikem postraních pásem, které jsou posunuty od síťové frekvence  $f_1$  o otáčkovou frekvenci (frekvenci rotoru).

Dynamická excentricita je dána vztahem

$$f_{DYN} = f_1 \pm (1 - s) \cdot f_{so} \quad (4)$$

Pro frekvence vyvolané excentricitou platí také vztah:

$$f_{exc} = \left[ (n_{rt} \cdot R \pm n_d) \frac{1 - s}{p} n_{os} \right] \cdot f \quad , \quad [\text{Hz}] \quad (5)$$

kde    pro     $n_d = 0$             se jedná o statickou excentricitu  
           pro     $n_d = 1, 2, 3$         se jedná o dynamickou excentricitu  
                    $n_{rt} = 1, 2, 3, 4 \dots$   
                    $n_{os} = 0, 1, 3, 5, 7 \dots$   
                    $R \dots$  počet drážek motoru  
                    $s \dots$  skluz  
                    $p \dots$  počet pólových dvojic

## 2.2 Rotorové tyče

Rotorové vinutí asynchronního motoru může být buď vinuto a připojeno na kroužky, nebo trvale spojeno nakrátko, tj. vinutí se skládá z tyčí uložených v drážkách a spojeno na

stranách čelními kruhy. Vinutá nakrátko (klecové) asynchronního stroje tvoří mnohofázovou soustavu zapojenou do hvězdy bez vyvedení nulového vodiče, kde každá tyč tvoří jednu fázi. Napětí jednotlivých tyčí tvoří symetrickou fázorovou hvězdici, která vyvolává v kleci proudy, jež tvoří symetrický vícefázový systém proudů. Při zvýšení odporu některé tyče nebo při přerušení tyče se poruší symetrie magnetického pole. To vyvolá deformaci magnetického pole ve vzduchové mezeře, a tím změny elektrických, elektromechanických, akustických a tepelných veličin. Vzniklý nesymetrický systém můžeme rozdělit na symetrický systém sousledný (přímý), zpětný a nulový.

Poruchy rotorových tyčí mají za následek zhoršení provozních vlastností:

- zvýšení oteplení nepoškozené části vinutí
- vznik parazitních momentů
- zhoršení rozběhových podmínek

Magnetické pole otáčející se ve vzduchové mezeře synchronními otáčkami  $n_{so}$  vybudí ve statorovém vinutí proud  $I_1$  a uzavírá se přes napájecí síť. Ve frekvenčním proudovém spektru se tato porucha projeví jako postranní pásmo posunuté od základní harmonické  $f_1$  (nebo jejích harmonických) dle vztahu

$$f_v = \nu \cdot f_1 \pm 2 \cdot s \cdot f_1 \quad [\text{Hz}] \quad (6)$$

### 3. Vliv poháněného zařízení na vlastnosti proudových spekter

Snahou je nalezení projevů mechanických závad v proudových spektrech. Tyto poruchy nemusí mít původ v monitorovaném motoru. Motor zde může působit jako převodník změn zatížení, které se mohou vyskytovat v poháněném zařízení. Jedná se tedy o další rozšíření využití diagnostiky pomocí proudových spekter.

#### 3.1 Vadné ustavení motoru

Dosti častou závadou je nesprávné ustavení motoru vzhledem k poháněnému zařízení. Špatné ustavení zpravidla způsobuje nesouosost. Nesouosost vyvolává při spojení motoru s poháněným zařízením deformační a třecí síly, které mohou deformovat jak ložiskový uzel, tak samotný motor. V tomto případě bývají při analýze statorového proudu zřetelně vyjádřena postranní pásma posunutá o  $f_i$  od nosné frekvence  $f_1$ .

Pro otáčkové frekvence vyskytující se v měřeném spektru statorového proudu platí následující vztahy:

$$f_i = \frac{n}{60} + s \cdot f_1 + i \cdot \frac{n}{60} \quad [\text{Hz}] \quad (7)$$

$n$	jmenovité otáčky motoru	$[\text{min}^{-1}]$
$f_1$	frekvence sítě	$[\text{Hz}]$
$n_s$	synchronní rychlost	$[\text{min}^{-1}]$

$$i = 0, 1, 2, \dots, \frac{f_1 - \frac{n_s}{60}}{\frac{n_s}{60}} \quad (8)$$

Při malých zatíženích můžeme toto postranní pásmo snadno zaměnit za frekvenční pásmo dané synchronními otáčkami točivého magnetického pole statoru tzn.

$$f_s = \frac{n_s \cdot p}{60} = \frac{60 \cdot f_1}{60 \cdot p} = \frac{f_1}{p} \quad [\text{Hz}] \quad (9)$$

### 3.2 Vady převodovek

U asynchronních elektromotorů s převodovkami se ve spektru mohou vyskytovat frekvence odpovídající výstupním otáčkám převodových stupňů. U vícestupňových převodů se mohou vyskytovat ve spektrech frekvence odpovídající otáčkovým frekvencím jednotlivých převodových stupňů. Dalšími mechanickými závadami mohou být nevyváženost rotoru a uvolnění rotorového svazku na hřídeli nebo na rotorové hvězdici. Tyto závady mohou mít projevy v proudových spektrech a jsou vyvolány změnami vzduchové mezery.

### 3.3 Analýza torzních kmitů

Krouticí moment mezi poháněcím motorem a poháněným strojem by se měl uskutečňovat bez jakéhokoliv kmitání či pulzací v čase nebo lépe v průběhu otáčky. V praxi však musíme počítat s tím, že ke konstantnímu točivému momentu se přičítají pulzační momenty. Pulzační momenty mohou být velmi nepatrné. Jedním ze zdrojů těchto momentů může být nesprávné ustavení motoru vůči poháněnému zařízení, což má za následek vznik tzv. torzních kmitů.

Jestliže u soustavy motor – poháněné zařízení vznikají torzní kmity měla by se tato porucha projevit ve vzniku postranních pásmech posunutých od frekvence sítě o dvojnásobek otáčkové frekvence motoru.

Torzní kmity rostou v těchto případech.

- a) se zvětšujícím se úhlem různoběžnosti hřídelů
- b) se zvětšujícím se momentem setrvačnosti hnaného zařízení
- c) v podkritické oblasti  $\varpi < \sqrt{\frac{k_1 \cdot k_2}{k_1 + k_2} \cdot \frac{J_1 + J_2}{J_1 \cdot J_2}}$  s rostoucími otáčkami (10)

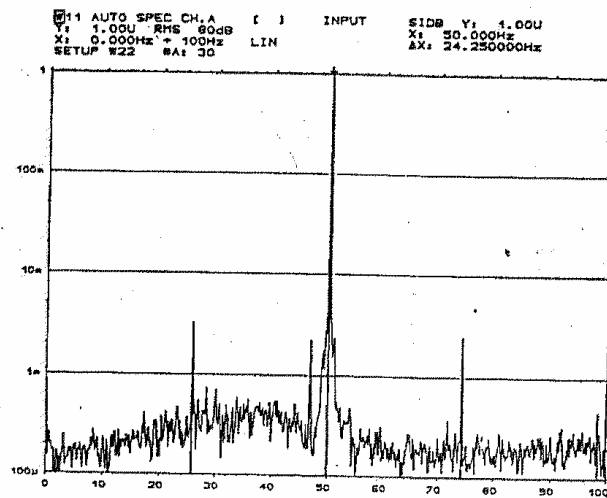
kde	$k_1$ [N.m.rad]	torzní tuhost hřídele motoru
	$k_2$ [N.m.rad]	torzní tuhost poháněného zařízení
	$J_1$ [kg.m <sup>2</sup> ]	setrvačný moment rotoru motoru
	$J_2$ [kg.m <sup>2</sup> ]	setrvačný moment rotoru poháněného zařízení

## **4. Příklady naměřených spekter**

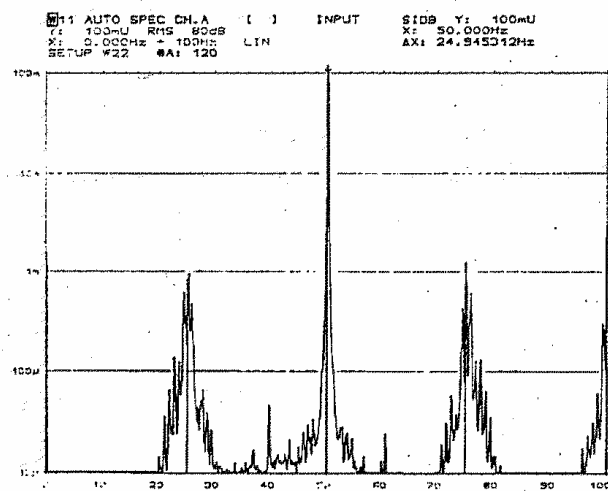
Příklady spekter s vybranými závadami se nacházejí v příloze.

## **5. Závěr**

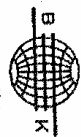
Měření pomocí proudových spekter je jednodušší než měření pomocí vibračních spekter při srovnatelné vypovídací schopnosti. Aby nedošlo k mylné interpretaci závad, je nutno měřit a podrobit spektrálnímu rozboru také napětí, které bezprostředně ovlivňuje proud. Doporučuje se, pokud to lze, ověřit hodnocení pomocí proudových spekter hodnocením vibračních spekter.



Obr. 1 Dobře ustavený motor vykazující malou dynamickou excentricitu



Obr. 2 Špatně ustavený motor



Briel & Kjaer

Type 2034

Sign.:

Mass.  
Object:

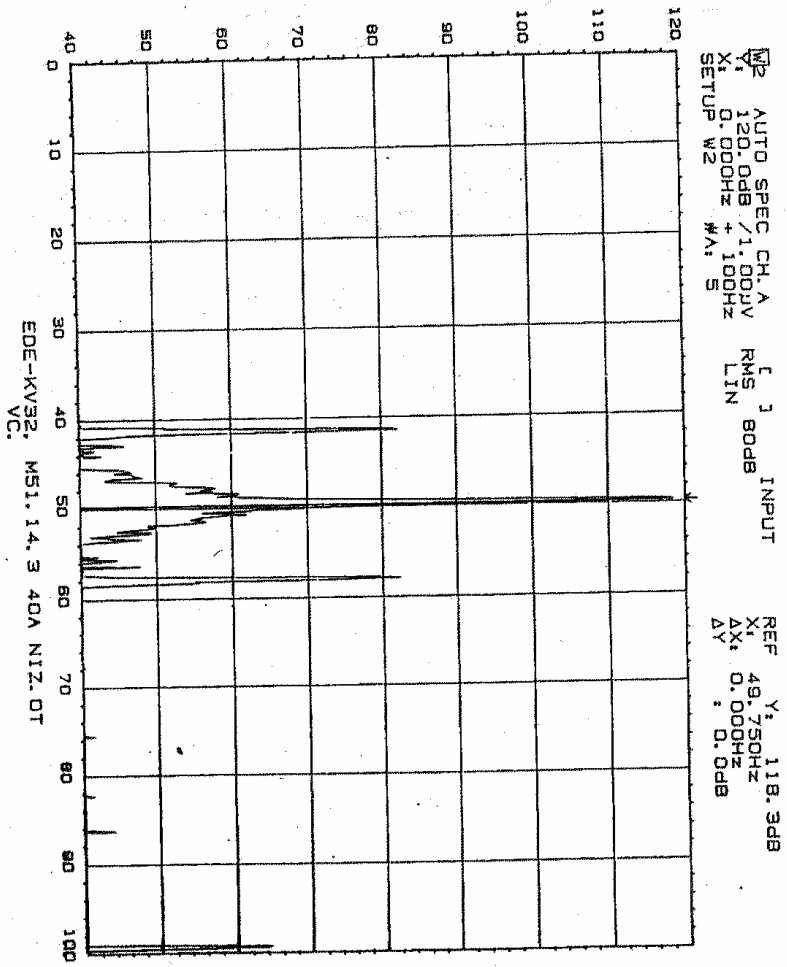
Comments:

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_



Obr. 3 Kouřový ventilátor vykazující značnou dynamickou excentricitu