

## Zařízení pro diagnostiku asynchronních motorů

Device for diagnostics of induction machine

*Tomáš Bulín, Čestmír Ondrůšek, Rostislav Huzlík*

*xbulin01@stud.feec.vutbr.cz, ondrusek@feec.vutbr.cz, huzlik@feec.vutbr.cz*

Faculty of Electrical Engineering and Communications, Brno University of Technology

DOI: -

**Abstract:** The aim of this article is to introduce the faults of induction machines and design of a device for their detection. It is appropriate to detect occurring fault to prevent greater damage in industrial production. Monitoring can be performed by various types of methods, but the stator currents are going to be measured preferentially in this article. Test measuring device, which was created, consists of a current sensors and hardware from National Instruments. Control is realized using LabVIEW, which performs data collection, processing, and evaluation.

# Zařízení pro diagnostiku asynchronních motorů

Tomáš Bulín, Čestmír Ondrůšek, Rostislav Huzlík

Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií VUT v Brně  
Email: xbulin01@stud.feec.vutbr.cz, ondrusek@feec.vutbr.cz, huzlik@feec.vutbr.cz

**Abstrakt** – Cílem tohoto článku je seznámit se s poruchami asynchronních motorů a navržením zařízení pro jejich detekování. V průmyslové výrobě je vhodné včas odhalit vznikající poruchu, aby nedošlo k větším škodám. Provádět monitorování lze různými typy metod, ale podrobněji se budeme zabývat pouze měřením statorových proudů. Vytvořené testovací měřicí zařízení se skládá z proudových čidel a hardwaru od National Instruments. Ovládání zařízení je realizováno za pomoci programu LabVIEW, kde se provádí sběr dat, jejich zpracování a vyhodnocení.

## 1 Úvod

Tento článek se zabývá tvorbou zařízení pro diagnostiku poruch asynchronních motorů. Jedná se o vytvoření nových programů v kombinaci s vhodnými měřicími přístroji. Poruchy v asynchronních motorech lze rozdělit dle jejich původu na elektromagnetické a mechanické. Jejich projevy velmi často splývají do sebe navzájem. Je možné říci, že mezi změnami elektromagnetického pole ve vzduchové mezeře, mechanické zátěže a vibracemi je vzájemná obousměrná vazba, takže jakákoliv událost v jedné oblasti ovlivní i oblasti další [1]. K monitorování nastupující poruchy slouží měření indukovaného napětí z vyhledávacích cívek, axiálního toku procházejícího hřídelí nebo také měření statorových proudů [2]. Mezi nejrozšířenější způsoby detekování poruch elektrických strojů patří vibrodiagnostika, která zvládne odhalit i počátek vznikající mechanické poruchy např. poškozená ložiska. Nevýhodou je nutnost vlastnit speciální měřicí přístroj se snímači vibrací a omezení v podobě výrobcem předdefinovaných způsobů zpracování dat [3,4]. Mezi výhody patří možnost umístění čidel přímo na problematické části motoru a provedení přesnější diagnostiky. Detekování poruch ze statorových proudů sice neodhalí tak velkou škálu poruch, ale proudová čidla bývají u většiny strojů vyššího výkonu již nainstalována. Není nutné tedy pořizovat další čidla, ale stačí již měřené proudy zaznamenat a zpracovat např. rychlou Fourierovou transformací (Fast Fourier Transform – dále jen FFT), kde z výsledného frekvenčního spektra je možné zjistit výskyt poruchy. K záznamu a zpracování dat je v článku použit hardware a software od firmy National Instruments, který má výhodu v tom, že vyhodnocování poruch si může uživatel nastavit přímo podle svých požadavků a použít jim preferované metody zpracování. V článku je popsána problematika poruch viditelných ve spektrech proudů včetně způsobů jejich detekování. Následně jsou vytvořeny tři varianty programů k detekování poruch v programu LabVIEW, popsána jejich přesnost a je vysvětleno i úskalí jejich použití, aby nedocházelo k chybné interpretaci výsledků. Vlastní vyhodnocení je poté

provedeno podle uživatelem předem nastavených parametrů. Detekování poruch v přímo uživatelem vytvořených programech je výhodné z pohledu modifikace vlastního programu a možnosti vytvoření vlastního programu tzv. „na míru“.

## 2 Poruchy v asynchronních strojích

Výroba asynchronních strojů je levná a motory s klecí nakrátko jsou velmi robustní a spolehlivé. Mohlo by se tedy zdát, že je zbytečné zabývat se detekcí poruch u těchto strojů, ale opak je pravdou. Díky jejich velkému rozšíření a tlaku výrobců na co nejvyšší efektivitu výroby se i nízké procento poruchovosti stává velmi významným. Správnou detekcí vznikající poruchy je možné ji předvídat ještě dříve, než dojde k významnému omezení chodu stroje a provést tím pádem jeho včasnou údržbu.

### 2.1 Typické příčiny a druhy poruch

Při návrhu monitorovacího systému se vychází z informací zjištěných u již proběhlých poruch. Každá porucha se totiž rozvíjí postupně a při použití správného vyhodnocovacího algoritmu je možné danou poruchu včas odhalit. Pro návrh vyhodnocovacího mechanismu samozřejmě je nutné znát chování stroje před rozvinutím poruchy, a jaké jsou její pravděpodobné příčiny [5].

#### 2.1.1 Příčiny poruch

Závady v elektrických strojích vznikají z různých důvodů, buď problém vznikne již během výroby, nebo při jeho nevhodném používání, anebo při zanedbání jeho údržby. Mezi nejčastější příčiny poruch patří:

- vadná konstrukce a výroba,
- vadný materiál nebo součást,
- přetížení,
- nadměrné vibrace,
- nadměrná teplota,
- nečistoty.

Z dalších možných příčin můžeme vybrat elektrické, kde figuruje většinou selhání izolace v různých místech stroje a z mechanických selhání ložisek [5].

Poruchy můžeme dále rozdělit na různé druhy, které jsou řešené v normě ČSN CLC/TS 60034-24:

- mezizávitové poruchy,
- poruchy mezi fázemi,
- dvojité zemní spojení,
- excentricita,
- nesymetrie rotoru.

Jak lze vidět je spousta způsobů, kterými se může narušit správný chod motoru, více viz [6].

## 2.2 Vliv vyšších harmonických na činnost asynchronního motoru

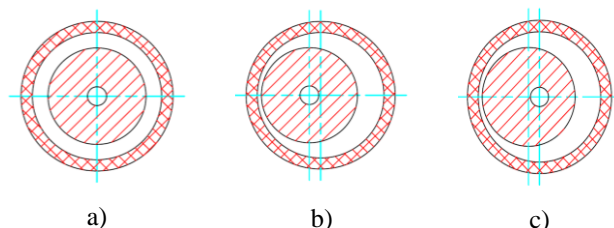
Vyšší harmonické se během provozu projevují zvýšením ztrát, vznikem parazitních momentů, vibracemi a hlukem. Vyhledáváním havarijních frekvencí a vyšších frekvencí ve frekvenčním spektru lze odhalit začínající poruchu a také nepravidelnosti magnetického a elektrického obvodu stroje. Velikost, složení a změny frekvencí vyskytujících se ve stroji mohou být využity k jeho diagnostice (jedná se o vyšší i nižší frekvence než základní harmonická). Aby byl daný problém diagnostikován, není nutné generovat do obvodu žádný testovací signál, ale stačí využít měření např. statorového proudu. Jeho podrobná analýza a sledování změn v čase během provozu stroje slouží ke zjištění vznikající poruchy. Pokud by i přesto došlo k náhlé rychlé poruše, tak naměřená data poslouží pro zpětné vyhodnocení jejich příčin. Získávaný signál lze snadno počítačově zpracovat a dá se použít pro kontinuální monitorování [7].

## 2.3 Excentricita

K častému selhání asynchronního stroje dochází díky excentricitě vzduchové mezery, která vzniká díky výchylce hřídele, nepřesnému umístění rotoru vzhledem ke statoru, opotřebením ložisek apod. Pokud je excentricita velká, pak výsledné radiální síly (nevyváženého magnetického tahu) mohou způsobit tření rotoru o stator, což může způsobit jejich poškození [8].

### 2.3.1 Detekování statické a dynamické vzduchové excentricity mezery v asynchronních strojích

Existují dva typy excentricity vzduchové mezery – statická a dynamická viz Obrázek 1. V případě výskytu statické excentricity je její pozice fixní v místě, kde je minimální radiální délka vzduchové mezery. Což může být například způsobeno nesprávným umístěním statoru nebo rotoru při instalaci nebo jejich deformací. Předpokládejme, že spojení rotoru s hřídelí je dostatečně tuhé a úroveň statické excentricity se nemění. Díky asymetrii vzduchové mezery statorové proudy budou obsahovat přesně definované složky, které mohou být detekovány. V případě dynamické excentricity vzduchové mezery, není osa rotoru v ose rotace a minimální vzduchová mezera rotuje spolu s rotorem. Z toho vyplývá, že vzduchová mezera je časově a polohově závislá (statická excentricita je jenom polohově závislá).



Obrázek 1: Příklad pozice statoru a rotoru pro a) normální stav, b) statická excentricita, c) dynamická excentricita

Například dynamická excentricita může být způsobena ohnutou rotorovou hřídelí, opotřebením ložisek, nesouosostí ložisek, mechanickou rezonancí při kritických otáčkách atd. [8].

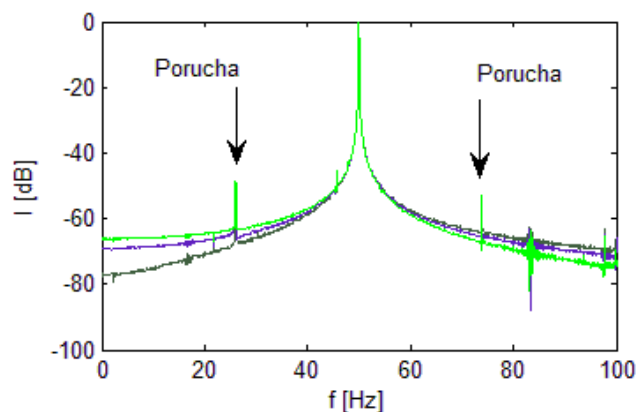
Pro výpočty poruchové frekvence značících excentricitu rotoru na frekvenci  $f_e$  byl použit vzorec z normy ČSN CLC/TS 60034-24 [6]:

$$f_e = f_1 \left[ 1 \pm \frac{K}{p} (1-s) \right], \quad (1)$$

$f_1$  = napájecí frekvence;  $s$  = skluz;  $K = 0$ : statická excentricita;  $K = 1$ : dynamická excentricita;  $p$  = počet pólových dvojic.

Z něj plyne, že počítáme pouze frekvence pro dynamickou excentricitu, protože statická excentricita má stejnou frekvenci, jako je nosná napájecí frekvence a není ve frekvenčním spektru tedy viditelná. Každý motor má nějakou odchylku z výroby, takže je v něm obsažena i dynamická excentricita. Díky kombinaci excentricit a vlivem statické excentricity dojde k vyniknutí původně mnohem menších poruchových frekvencí pro dynamickou excentricitu a je možné detekovat poruchový stav.

V následujícím grafu (Obrázek 2) jsou vyznačeny poruchy excentricity z měření 4 pólového motoru. Měření proudu bylo provedeno pomocí čidel od firmy LEM, která jsou založena na principu měření Hallova napětí.



Obrázek 2: Frekvenční charakteristika proudů pro měřicí čidla LEM (dynamická excentricita)

## 2.4 Detekce asymetrie rotorové klece v asynchronních strojích

Další poruchou asynchronního motoru s klecí nakrátko jsou přerušené rotorové tyče. Pokud dojde k přerušení tyče, proud se začne uzavírat okolními tyčemi, které jsou následně přetěžované větším proudem a tím pádem náchylné k další poruše. Rotor s přerušenými tyčemi má tak následně asymetrický tok v magnetickém obvodu.

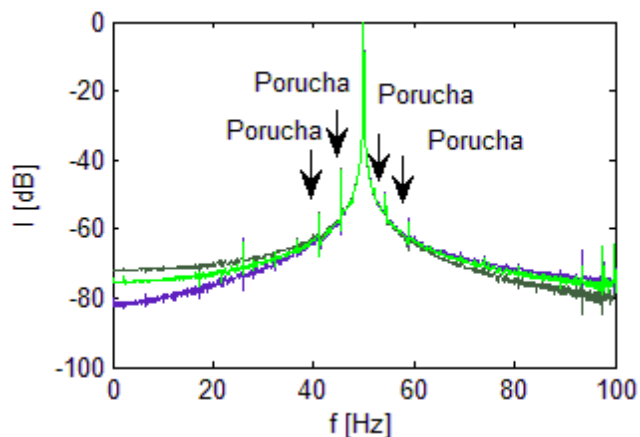
V případě prasknutí tyče (ve svaru mezi kroužkem a tyčí) dochází k přehřívání prasklé tyče, které může způsobit úplné přerušování tyče. Okolní tyče poté musí vést vyšší proud a vydržet mnohem větší tepelné a mechanické namáhání, což vede k poškození (prasknutí) dalších tyčí. Většina proudu, který měl vtékat do přerušené tyče, vtéká do dvou přilehlých tyčí, což způsobí větší tepelné namáhání, které může poškodit

rotorové plechy vlivem změny distribuce tepla a rotorové asymetrie. Pravděpodobnost poruchy je vyšší při častějších těžších startech, které sice nezvyšují záběrný proud, ale prodlužují délku jeho trvání a tím i zvyšují tepelné namáhání [8].

Mezi příčiny asymetrie magnetického obvodu rotoru v podobě přerušení tyčí u motorů s klecí nakrátko patří nedostatečná kvalita materiálu, teplotní a mechanické namáhání během startu motoru. V dnešní době motorů s vysokou účinností a kvalitou se to již nestává v takové míře, ale k přerušení tyče může také dojít vlivem použití špatné kvality materiálu. Klec se vyrábí tlakovým litím hliníku, a pokud se v materiálu objeví vzduchové bublinky, tak dojde k vytvoření slabého místa, které je náchylnější na zlomení. Dalším kritickým místem je připevnění tyčí ke zkratovacím kroužkům. Lze samozřejmě použít i jiné materiály jako měď a mosaz, ale ty nejsou tak cenově výhodné, a proto se používají spíše na stroje s vysokou účinností. Další možností, jak může dojít k poškození klece, je již zmíněné tepelné a mechanické namáhání. Během startu dochází ke zvýšenému tepelnému namáhání a tyče se vlivem roztažnosti způsobené vyšší teplotou a působením radiálních sil mohou posouvat a ohýbat, což po určité době vede k únavě materiálu a prasknutí tyče nebo upevnění tyče ke zkratovacímu kroužku [8]. Poruchovou frekvenci signalizující přerušené rotorové tyče  $f_{sp}$  lze vypočíst dle vztahu:

$$f_{sp} = f_1(1 \pm 2n \cdot s), \quad (2)$$

kde  $f_1$  je napájecí frekvence,  $n$  je pořadí harmonické,  $s$  je skluz. Vypočtené poruchové frekvence jsou viditelné ve spektru statorových proudů, viz Obrázek 3.



Obrázek 3: Frekvenční charakteristika proudů pro měřicí čidla LEM (přerušené tyče)

Díky rotorové asymetrii jsou produkovány pulzující momenty, které vytváří elektromagnetický moment. V ustáleném stavu je frekvence pulsací momentu  $2s\omega_1$ , díky faktu že je rozdíl mezi úhlovými frekvencemi kladných a negativních složek statorových proudů  $\omega_1 - (1 - 2s)\omega_1 = 2s\omega_1$ . Pulzující momenty jsou nasuperponované na střední hodnotu hlavního momentu. Střední hodnota pulzující momentové složky je nulová, takže se neprojeví na výstupu z motoru, ale způsobuje nežádoucí hluk a vibrace. Tyto pulzující momenty jsou nežádoucí, i když jsou jejich amplitudy malé. Díky nim dochází k rezonanci, pokud se frekvence pulsací rovná jmenovité vlastní frekvenci asynchronního motoru. Tento stav nastává

za předpokladu, že je asynchronní motor řízen v širším rozsahu otáček nebo během startu motoru, kdy se vyskytují větší pulzující momenty. Tyto momenty kopírují rozběhovou momentovou křivku asynchronního motoru, a proto jsou největší pulzující momenty během startu, ale po rozběhnutí motoru jsou již amplitudy těchto momentů malé. [8].

## 2.5 Modulace signálu

Teorie o analýze rotorových poruch pochází ze všeobecných modulačních principů, když periodické změny v rotorovém magnetomotorickém napětí způsobí periodické změny amplitudy statorového proudu a fáze => amplitudová a fázová modulace.

Změny v rotorovém magnetomotorickém napětí modulují statorový proud. Tuto modulaci lze interpretovat jako primární modulaci. Následně se změní celková síla působící na rotorové cívký, které se pohybují v magnetickém poli, a díky tomu se objeví oscilace elektromagnetického momentu. Oscilující moment způsobí periodické změny v úhlu rotující fáze, a díky tomu je statorový proud fázově modulovaný. Tato modulace může být interpretována jako následná nebo druhořadá modulace. Fázová modulace se většinou vyskytuje společně s amplitudovou modulací, takže existuje i kombinovaná modulace. Rychlost úhlového kmitání se dá také odvodit od fázového kmitání.

Během malého zatížení a normálních pracovních podmínkách jsou amplitudová a fázová modulace v protifázi. Úhlové zrychlení je úměrné magnetomotorickému napětí a úhel je druhou integrací úhlového zrychlení, a proto má časový úsek fázové modulace přesně opačnou fázi amplitudové modulace [9].

Statická excentricita se projevuje zvýšením složky spektra drážkové frekvence. V případě dynamické nebo kombinované excentricity se projevují střídavé změny vzduchové mezery, které způsobují změny v elektromagnetickém poli rotoru během jedné otáčky, takže napájecí proud motoru s frekvencí  $f_1$  je modulovaný frekvencí  $f_r$ . Přerušené tyče způsobují rotorovou asymetrii, zkreslení rozložení proudu v rotoru a díky tomu se mění i magnetomotorické napětí. Rotorovou asymetrii způsobují pulzace rotorového proudu a jsou modulované skluzovou frekvencí  $f_{slip}$ . Proudovou rotorovou modulaci lze transformovat do statorových proudů podle skluzové pólové frekvence  $f_{sp}$ . Toto je ukázáno ve vztahu (3), který je rozepsán

$$\begin{aligned} f_{sp} &= p_p \cdot f_{slip} = p_p \cdot s \cdot f_{sync} = \\ &= p_p \cdot s \cdot 2 \frac{f_1}{p_p} = 2s \cdot f_1, \end{aligned} \quad (3)$$

kde  $p_p$  je počet pólů,  $f_{slip}$  je skluzová frekvence,  $f_{sync}$  je synchronní frekvence a  $s$  je skluz. Skluzová pólová frekvence je nezávislá na počtu pólů motoru [9].

Měřením statorových proudů se získá napájecí frekvence  $f_1$ , která je podle typu poruchy modulovaná v případě excentricity otáčením hřídele nebo v případě přerušených rotorových tyčí skluzovou pólovou frekvencí  $f_{sp} = 2sf_1$  [10].

Vyhodnocování spekter je velmi obtížné, protože je zde velká nosná frekvence, ve které se mohou skrýt zkoumané poruchy. Proto je vhodné použít během zpracování signálu okénkovací metodu např. Hanningovu [1].

## 2.6 Zpracování signálu

Dosavadní shrnuté poznatky vycházely z ideálního stavu. Během reálného měření avšak dochází k odchýlkám. Modulační frekvence má místo čistého harmonického průběhu své vlastní spektrum, které se podílí na modulaci. Točivý moment není vždy úplně konstantní a s jeho změnou dochází i ke změně frekvence otáčení motoru. Objevuje se amplitudová i fázová modulace [11].

Obecně lze využít k odhalení poruchy demodulační metody, které extrahují původní amplitudu a fázi modulující signál za použití speciálních přepočítávacích metod. Výsledné signály pak vykazují vyšší hodnoty u rotorových poruch.

Rotorové poruchy asynchronních motorů jsou modulované okolo nosné frekvence, která je  $f_l$  a maximální modulační frekvence, jenž je rotační frekvence  $f_r$ , takže šířka zkoumaného pásma je vhodná v rozmezí  $0 - 2f_l$ . Maximální šířka pásma musí být menší než  $3f_l$ . Ve spektru analytického signálu dochází k fázovému posuvu nosné frekvence směrem k nižším frekvencím, takže např. třetí harmonická se posune na hodnotu 100 Hz [9].

### 2.6.1 Aplikace Parkovy transformace na diagnostiku statorových statických poruch

Parkova transformace převádí statorový třífázový proud  $i_A(t)$ ,  $i_B(t)$ ,  $i_C(t)$ , na Parkovy vektorové složky  $i_D(t)$ ,  $i_Q(t)$ , za použití  $k_d = k_q = 1$ . Podmínkou ovšem je, aby amplitudy transformovaných proudů  $i_D$ ,  $i_Q$  byly pokud možno stejné viz vztahy (4) a (5):

$$i_D(t) = i_A(t) - \left(\frac{1}{2}\right)i_B(t) - \left(\frac{1}{2}\right)i_C(t), \quad (4)$$

$$i_Q(t) = \left(\frac{\sqrt{3}}{2}\right)i_B(t) - \left(\frac{\sqrt{3}}{2}\right)i_C(t). \quad (5)$$

Velikost Parkova vektoru  $absP$  se rovná odmocnině ze součtu druhých mocnin jeho složek:

$$absP = \sqrt{i_D^2 + i_Q^2}. \quad (6)$$

Za ideálních podmínek (bez statických a dynamických poruch) by se tato velikost rovnala:

$$absP = 1,5I_m. \quad (7)$$

Velikost vektoru je tedy konstantní ( $\sin^2(x) + \cos^2(x) = 1$ ) a neobsahuje žádnou časovou harmonickou složku. Zavedeme předpoklad, že fázový proud  $i_A$  vzroste během poruchy o proud  $i_p$  viz následující vztahy (8) a (9):

$$i_p = I_{pm} \sin(\omega_1 t), \quad (8)$$

$$i_A = (I_m + I_{pm}) \sin(\omega_1 t). \quad (9)$$

Pak s použitím vztahu (10), který je rozepsán:

$$\sin^2(\omega_1 t) = \frac{1}{2}(1 - \cos(2(\omega_1 t))), \quad (10)$$

dostáváme vztah (11) složený z velikosti proudu, kde se nevyskytuje porucha a vlastní poruchy  $I_p$  [1].

$$MagP(t) = 1,5I_m + \frac{1}{2}I_{pm} - \frac{1}{2}I_{pm} \cos(2\omega_1 t). \quad (11)$$

Jakákoli změna vlivem poruchy v amplitudové nesymetrii třífázových proudů se projeví ve spektru změnou velikosti Parkova vektoru  $absP$  na dvojnásobné síťové frekvenci  $2f_l = 100$  Hz. Autospektrum obsahuje ovšem poloviční velikost složky na frekvenci  $2f_l$  oproti příslušné složce autospektra rušivého proudu  $i_p$ . Z tohoto důvodu se posune na nulovou frekvenci i polovina výkonu rušivé přídavné složky. Stejnou hodnotu lze získat ve spektru na dvojnásobku nosné frekvence (v našem případě 100 Hz) i při snížení  $i_A$  o  $i_p$ , avšak stejnosměrná složka  $I_{ss}$  se sníží na hodnotu danou dle vztahu:

$$I_{ss} = 1,5I_m - \frac{1}{2}I_{pm}. \quad (12)$$

Analogicky stejná změna nastane i u změn proudů  $i_B$  a  $i_C$  o proud  $i_p$ , když se změní střídavá složka vektoru  $absP$  a spektrální složka na frekvenci  $2f_l$  [12].

### 2.6.2 Demodulace za použití Parkovy transformace

Parkova transformace vytváří komplexní signál z třífázových proudů:

$$P(t) = i_D(t) + j \cdot i_Q(t). \quad (13)$$

Ve spektru  $absP$  poté dochází k potlačení složky spektra na frekvenci  $f_l$ . Všechny frekvence menší než nosná frekvence  $f_l$  se ve spektru  $absP$  objeví jako modulační signál, zatímco ve spektru získaném z reálných proudů se objevuje modulovaný signál s postranními složkami kolem nosné frekvence, který je méně přehledný. Lépe se následně provádí analýza spektra  $absP$ . Skluzová pólová frekvence je snáze identifikovatelná, protože není tolik ovlivněna nosnou frekvencí [13].

Parkova transformace provádí analýzu obálky s nosnou frekvencí, která je síťovou frekvencí s šířkou pásma  $0 - 2f_l$ . Výsledkem je průměr obálkové analýzy z třífázových proudů.

$$MagP(t) = 1,5I_m (1 + i(t)), \quad (14)$$

$$MagP(t) = 1,5(I_m + I_{rm} \sin(2\pi f_r t) + I_{spm} \sin(2\pi f_{sp} t)). \quad (15)$$

Ze vztahu (15) plyne, že pokud je Parkova transformace použita pro demodulaci, tak jsou všechny amplitudy modulovaného signálu zesíleny 1,5 krát, takže je nutné k získání reálných hodnot podělit je číslem 1,5 nebo odečíst 3,5 dB v případě decibelového měřítka. Modulační indexy, které znázorňují závažnost poruchy, jsou (pro poruchu excentricity –  $m_r$  a pro přerušené tyče  $m_{sp}$ ) dány vztahy:

$$m_r = \frac{I_{rp}}{1,5I}, \quad (16)$$

$$m_{sp} = \frac{I_{spP}}{1,5I}, \quad (17)$$

kde  $I_{rp}$  je velikost frekvenční složky proudu během excentricity rotoru,  $I_{spP}$  je velikost frekvenční složky proudu při přerušených tyčích v rotoru. Velikost modulačních indexů dle literatury je pro dobrý stav motoru obvykle menší než 1 % [11].

## 2.7 Experimentální část

### 2.7.1 Typ asynchronního motoru použitého k měření

K testování detekčních metod pro zvolené poruchy byl vybrán čtyřpólový asynchronní motor s kotvou nakrátko, viz Tabulka 1. Při měření přerušovaných tyčí byl používán stejný stator a různě rozsáhlé poruchy bylo docíleno výměnou rotoru. U druhého typu měření nebylo z důvodu co nejdelšího zachování funkčnosti daného motoru s definovanou excentricitou, možné tento motor rozdělat a měnily se celé motory ovšem vždy za stejný typ.

Tabulka 1: Jmenovité hodnoty použitého motoru

Typ: TM90-4S B3	
No: 00524902 2011	
U	400/230 V
$n_n$	1400 min <sup>-1</sup>
cos $\varphi$	0,78
f	3~50 Hz
$I_n$	2,7/4,68 A
P	1100 W
2p	4
Y/D	IP 54

### 2.7.2 Měřicí metody

Ideální metodou k odhalování poruchy v asynchronním motoru je online monitoring, pro který se hodí měření statorových proudů. Monitorování proudu má výhodu v tom, že je to neinvazivní metoda a čidla proudu jsou často již u motoru nainstalovaná kvůli destruktivním nadproudům a zemním spojením. Díky tomu je tento monitoring levnější. Nevýhodou je pouze potřeba komplexního vyhodnocovacího algoritmu, který je potřeba spouštět na zařízení o dostatečném výpočetním výkonu [4]. Mezi další nevýhody měření statorových proudů patří:

- Statorové proudové frekvenční spektrum často obsahuje kromě nosné i jiné frekvence než zmíněné poruchové. Tyto frekvence mohou zahrnovat zkreslení od napájecího napětí, nevyváženost zátěže, excentricitu vlivem výroby nebo šum z měřeného pozadí. Pokud se zmíněný šum a další frekvence objeví v místech, kde očekáváme poruchovou frekvenci, tak může dojít i k chybné detekci poruchy [14].

- Většina diagnostických technik vyžaduje, aby byl motor plně zatížen, protože vyniknou ve frekvenčních spektrech poruchové frekvence, avšak diagnostika by měla být spolehlivá a nezávislá na velikosti zatížení [14].

- Vlastní měření je nutné provádět za ustáleného stavu, aby nedocházelo ke změně zátěže během záznamu dat (konstantní rychlost vzorkování), protože může dojít k rozmazání spektra. Dosáhnout takového žádaného stavu je ovšem velmi obtížné, protože soustava je nestacionární a pro získání rozumného rozlišení spektra je nutné zaznamenat dostatek periody z ustáleného stavu [14].

### 2.7.3 Fourierova transformace vzorkovaného signálu

Z důvodu posouzení výskytu poruchových frekvencí v měřeném časovém signálu statorových proudů je potřeba převést časově závislý signál do frekvenční oblasti a k tomuto účelu se nejlépe hodí Fourierova transformace.

Aby nedošlo ke zkreslení Fourierovy transformace, je nutné znát mezní frekvenci  $\omega_m$  nevzorkovaného signálu a mezní frekvence musí být menší nebo maximálně stejná jako polovina úhlové frekvence vzorkování. Úhlová frekvence  $\omega_s/2$  je totiž Nyquistovou frekvencí [15] a vzorkováním nižší frekvencí právě způsobuje zkreslení neboli aliasing výsledných spekter. V reálném měření většinou volíme vzorkovací frekvenci 5 – 10× vyšší než je nejvyšší frekvence, kterou chceme v daném spektru spolehlivě rozlišit.

Základem správné analýzy je tedy provedení měření v dostatečném rozlišení. Čím delší záznam a tím pádem větší počet vzorků tím se hodnota rozlišení zvyšuje, ale zase roste množství ukládaných dat a v některých případech narůstá problém s volnou pamětí pro uložení. Poté je nutné zvolit kompromis v měření kratšího záznamu. Buď se spokojit s horším frekvenčním rozlišením, nebo vzorkovat na nižší frekvenci, což omezí množství identifikovatelných frekvencí.

### 2.7.4 Vybraná měřicí zařízení

Základem správného a přesného měření je dobré použití i vhodné měřicí zařízení, jejichž soupis lze nalézt v Tabulka 2. Napětí je měřeno přístrojem DEWE-30-8, který umožňuje provádět měření na vstupu, až do 1400 V. Výstupní napětí je vždy v rozsahu  $\pm 5$  V. Měření proudu zajišťují velmi přesná čidla od firmy LEM s názvem LAH 25-NP, která využívají Hallův jev s převodním poměrem 8A/0,024 A.

Tabulka 2: Použitá zařízení

Zařízení	DEWE-30-8	LAH 25 – NP
Max. vst. hodnota	1400 V	$I_{sp} = 18$ A
Převodní poměr	800/5	8A/0,024 A
Výstup	$\pm 5$ V	$\pm 0,024$ A
Přesnost	DC přesnost 100V – 1400V $\Rightarrow \pm 0,05$ % ze čtení a $\pm 0,05$ % z rozsahu	$\pm 0,3$ %

Obě měřené snížené veličiny jsou dále zpracovávány měřicími kartami od National Instruments (Tabulka 3), které nelze použít k přímému zapojení do měřeného obvodu. Karty jsou umístěné v šasi NI cDAQ-9188. Pro měření napětí je použita karta NI 9239 s BNC konektory. Čidla LEM jsou připojena k NI 9239 šroubovacími svorkami. Protože daná měřicí karta měří napětí, byl ke svorkám připevněn bočníkový odpor o hodnotě 220  $\Omega$ . V případě proudového výstupu měřicího zařízení je možné použít i přímo proudovou měřicí kartu např. NI 9227. Tuto kartu lze připojit k proudovému měřicímu

transformátoru bez nutnosti úpravy měřeného proudu za předpokladu, že je velikost proudu v mezích měřicí karty.

Tabulka 3: Použitá DAQ zařízení

Zařízení	NI 9239	NI 9227
Vzorkování	Simultánní, 50kS/s/kanál	Simultánní, 50kS/s/kanál
Bitové rozlišení	24 bit	24 bit
Vstupní rozsah	±10 V	$I_{rms}=5$ A; $I_{peak}=14$ A
Antialiasing filtr	Ano	Ano

### 2.7.5 Problematika měření a detekování poruchových frekvencí

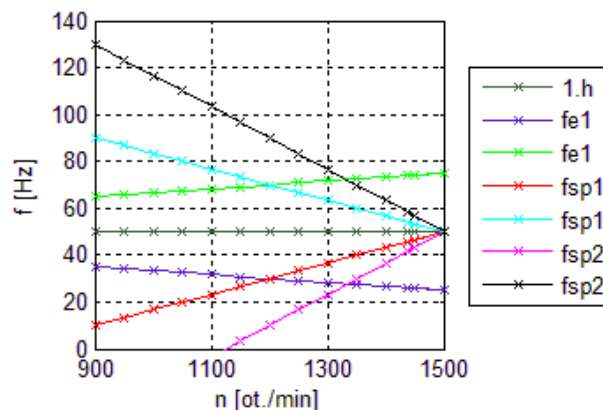
Před vlastním měřením byl v prvním případě proveden teoretický výpočet poruchových frekvencí pro různé velikosti otáček. Do teoretických vztahů (1) a (2) jsou dosazeny hodnoty otáček od synchronních po 900 ot./min. Rozsah otáček byl zvolen empiricky, aby pokryl co největší množství typů vyráběných asynchronních motorů a jejich jmenovitých otáček od firem Siemens a EMP s.r.o. Slavkov u Brna.

Na zobrazených průbězích (Obrázek 4) je patrné, že každý typ poruchy se během zatěžování motoru chová jiným způsobem. Frekvence generované přerušenými tyčemi jsou u nezátěženého motoru téměř identické s první harmonickou a po zatížení se hodnota kladných poruchových frekvencí (frekvence vyšší než 1. harmonická) od tyčí neustále zvětšuje a u záporných (frekvence nižší než 1. harmonická) zase snižuje až na nulovou hodnotu. Poruchové frekvence vytvořené jakoukoliv excentricitou se nachází při synchronních otáčkách na hodnotách 25 Hz a 75 Hz bez ohledu na počet pólů. Čím více poté daný motor zatěžujeme, tak se kladná i záporná složka frekvence přibližuje k první harmonické. Velikost poruchových frekvencí způsobených přerušenými tyčemi a excentricitou rotoru je tedy závislá na skluzové frekvenci.

Teoretický výpočet poruchové frekvence pro dané otáčky je ještě nutné korigovat z důvodu chybovosti použitého dynamometru, kde se během měření vyskytovala odchylka v rámci  $\pm 0,5 \text{ min}^{-1}$  i při ustálené zátěži. Z toho důvodu program provádí výpočet poruchové frekvence i pro velikost otáček  $\pm 0,5 \text{ min}^{-1}$  oproti zadaným otáčkám. Na výsledných vypočtených frekvencích s odchylkou otáček je patrné, že změna otáček motoru v rámci půlotáčky se promítne do velikosti frekvencí jenom minimálně. U přerušených tyčí se mění poruchová frekvence během 0,5 otáčky za minutu pouze o 0,03 Hz a excentricity pouze o 0,01 Hz.

Předpokladem identifikace rozvinutější poruchy je, že čím více je porucha rozvinutá, např. čím více tyčí v rotoru je přerušených a umístěných blízko sebe, tak se amplitudové špičky ve frekvenčním spektru pro poruchovou frekvenci projevují více. Výpočet poruchových frekvencí u poškozených rotorových tyčí se jeví ve srovnání s reálným měřením jako přesný, protože je zde pouze odchylka frekvenčního kroku (během testování 0,05 Hz). Dle předpokladu jsou nejlépe viditelné frekvenční špičky při plném zatížení motoru a s klesajícím

zatížením klesá jejich viditelnost, protože se frekvenční špičky přibližují k nosné frekvenci 50 Hz, kde charakteristika strmě roste v případě dB zesílení.



Obrázek 4: Graf poruchových frekvencí u přerušených tyčí a excentricity rotoru pro 4 pólový motor

Zatímco viditelnost poruchy pro přerušené tyče se ve frekvenčním spektru mění s různým zatížením stroje, tak velikost poruchy pro excentricitu je nezávislá na zatížení stroje a navíc je více viditelná. Vypočtené hodnoty poruchových frekvencí jsou zobrazené v Obrázek 4, kde fe1 jsou poruchové frekvence pro excentricitu (kladná a záporná složka), fsp1 a fsp2 jsou poruchové frekvence pro přerušené rotorové tyče (kladné a záporné složky) a 1.h je velikost první harmonické (napájecí frekvence). Testování bylo prováděno na motoru s kombinací obou typů excentricity (statické a dynamické), protože jejich kombinace se ve spektru projevuje nejvýrazněji. Přesto velikost excentricity mezi motorem bez poruchy a tím, kdy je brán jako porouchaný (Tabulka 4), je pouze přibližně 2,5 násobek odchylky motoru bez poruchy, takže i motor bez definované poruchy bude vykazovat ve frekvenčním spektru menší špičky v oblasti poruchových frekvencí.

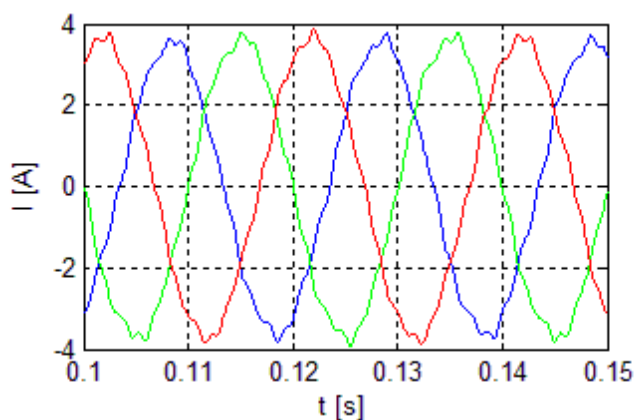
Tabulka 4: Velikost excentricity v měřených čtyřpólových motorech

Motor	statická excentricita	dynamická excentricita
	[mm]	[mm]
Bez poruchy	0 – 0,015	0 – 0,015
S poruchou	0,040 – 0,050	0,040 – 0,050

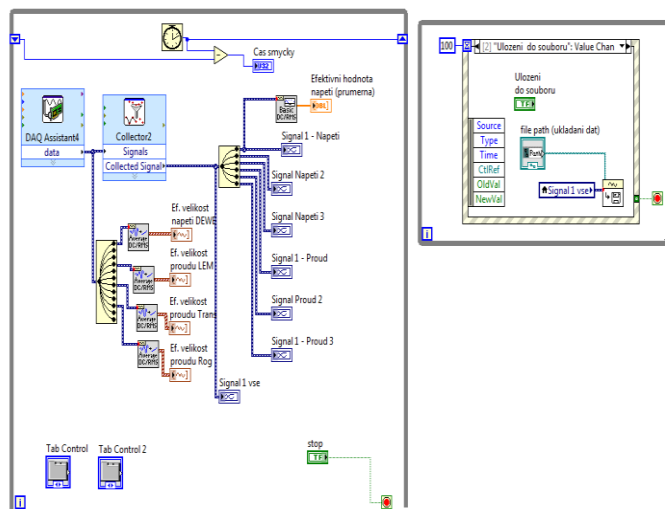
### 2.7.6 Vyhodnocování poruch – varianta 1

K vyhodnocení poruch asynchronních motorů je vhodné mít nejprve naměřená data motorů s poruchou a bez poruchy. Následně je možné relativně rychle vytvořit vyhodnocovací programy v LabVIEW dle změřených dat. Jakmile je ověřena funkčnost programu na prvotním vzorku dat je možné přejít k rozsáhlejšímu testování na dalších motorech s méně výraznou poruchou. Na začátku byly tedy naměřeny časové průběhy proudů z asynchronního motoru bez poruchy, s definovanou statickou a dynamickou excentricitou a s přerušenou rotorovou tyčí Obrázek 5. Vlastní měření a zpracovávání dat, bylo provedeno pomocí programu LabVIEW, který zpracovával namě-

řená data z DAQ karet. Vlastní měřicí program není výrazně komplikovaný a provádí v několika málo blocích načítání dat z měřicích karet a zobrazování průběhů a hodnot měřených veličin (Obrázek 6). Po stisku tlačítka uživatelem se vždy provede uložení 20s záznamu.

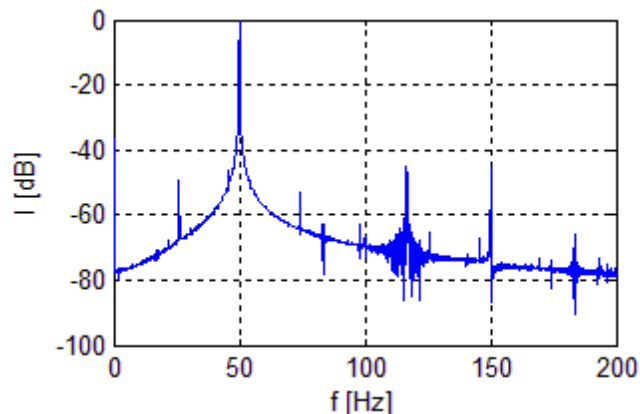


Obrázek 5: Časový signál napájecích proudů



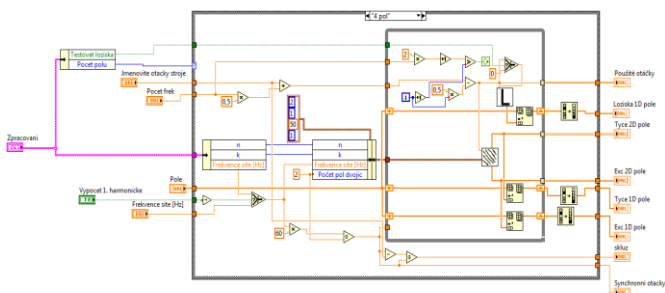
Obrázek 6: Block diagram realizovaný pro měření napětí a proudů

Naměřená data jsou následně zpracována pomocí FFT při ponechání zesílení v decibelech. Jak je možné pozorovat v následujícím spektru proudu (Obrázek 7), tak překmitý v případě excentricity rotoru jsou mnohem větší, než v případě přerušovaných tyčí a tím pádem více viditelné i v množství šumu, díky čemuž je lze snadněji identifikovat. Tato vlastnost má nevýhodu v tom, že poruchové frekvence se ve spektrech objevují za jakéhokoliv stavu zatížení motoru a motor bez poruchy také nějaké vykazuje. Během vyhodnocování je třeba mít toto na paměti a jako poruchu brát až poruchovou frekvenci s větší amplitudou. Ve spektrech jsou dále patrné další špičky způsobené druhou a třetí harmonickou a další náhodně se vyskytující špičky jsou většinou způsobené rušením přeneseným z napájení. Znalost výsledného frekvenčního spektra proudů po zpracování FFT je důležitá z pohledu návrhu vlastního programu pro zpracovávání dat, který je již komplikovanější.



Obrázek 7: Proudové spektrum

Program pro vlastní zpracování pomocí FFT bez okénkovací funkce sestává z několika subsystémů. Ve své podstatě provádí teoretický výpočet poruchových frekvencí, např. viz Obrázek 8 a FFT z předloženého časového signálu. Ke správnému výpočtu těchto frekvencí je ovšem nutné, aby uživatel zadal do programu parametry zkoumaného motoru.



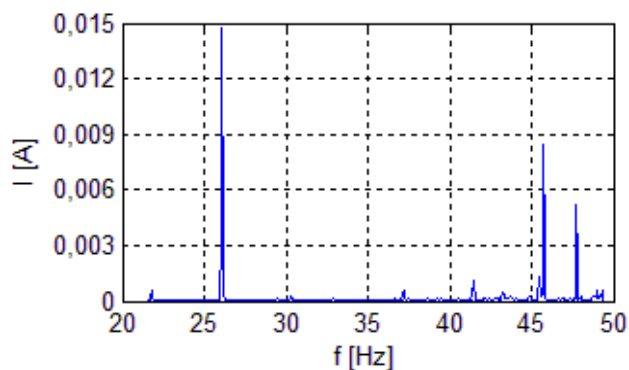
Obrázek 8: SubVI výpočet poruchových frekvencí dle zadaného rozptylu pro zvolené otáčky a pólový motor

Následně program dle nastavené velikosti hranice threshold provádí vyhledávání špiček ve spektru proudu. U nalezených špiček je určena velikost frekvence na základě znalosti vzorkování. Následně dojde k porovnání frekvencí teoreticky vypočtených pro daný typ poruchy s frekvencemi reprezentujícími špičky ve spektru proudu. Během testování byla zjištěna dobrá přesnost mezi vypočítanou poruchovou frekvencí a reálnou změřenou poruchou. Program je založen na identifikování poruchového stavu na základě porovnání vypočtených a identifikovaných poruchových frekvencí, a pokud velikost proudu poruchové frekvence přesáhne uživatelem definovanou úroveň. Jedná se o empirický přístup, kdy je nutné provést více měření jak pro zdravý motor, tak pro již porouchaný a na základě těchto skutečností přizpůsobit citlivost programu. Program kromě upozornění uživatele na riziko poruchy zobrazí proudové frekvenční spektrum a vypíše vypočítanou poruchovou frekvenci, pro kterou byla detekována proudová špička.

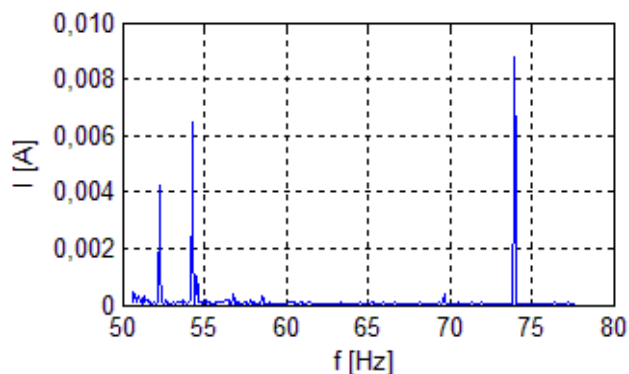
### 2.7.7 Vyhodnocování poruch – varianta 2

V případě, že nastavování citlivosti programu nepřipadá v úvahu, je možné zvolit lehce odlišný způsob zobrazení zkoumaného spektra a tím pádem i vyhodnocování. Pokud je

spektrum proudů zobrazeno bez nelineárního zesílení (tedy bez stupnice v decibelech), tak je možné lépe odečítat velikost amplitud poruchových frekvencí, které jsou tím pádem v ampérech. V tomto případě velikost špiček proudů ve spektru odpovídá i velikosti proudů ve skutečnosti a lze je tedy přepočítat dle úrovně zatížení. Přepočet je prováděn pomocí poměru velikosti poruchového proudu s velikostí proudu první harmonické. Program následně porovnává již jen číselné hodnoty a jakmile dojde k překročení předem nastavené meze, tak signalizuje poruchový stav. V této variantě je při zpracování FFT použita i funkce Hanningovo okno, která se obecně používá při zpracování spojitých signálů. Má všeobecně nejlepší filtrační charakteristiky, a proto se hodí ji používat ve většině případů. Eliminuje nepřesnosti FFT při zpracování signálu s neúplnou periodou a také minimalizuje zvlnění spektra v okolí nosné frekvence (v našem případě 1. harmonické) na rozdíl od předchozího příkladu. Na grafech (Obrázek 9, Obrázek 10) lze jasně vidět proudové špičky v místě poruchových frekvencí z levé i pravé strany první harmonické, která není v grafech zobrazena, protože její velikost je mnohonásobně větší jak velikosti proudových špiček poruch a ty by poté nebyly viditelné.



Obrázek 9: FFT z reálného časového průběhu proudu – výřez levé části spektra



Obrázek 10: FFT z reálného časového průběhu proudu – výřez z pravé části spektra

V tabulkách (Tabulka 5, Tabulka 6) jsou uvedeny souhrnně vypočtené teoretické hodnoty frekvencí a jejich změřené frekvence z proudového spektra. Hodnoty odpovídají motoru s definovanou statickou a dynamickou excentricitou, avšak vyskytují se zde již i poruchové frekvence pro přerušené rotorové tyče, pro které sice motor nemá definovanou

poruchu, ale vzhledem k jeho stáří je možné, že již dochází ke vzniku další poruchy.

Tabulka 5: Vypočtené a změřené poruchové frekvence pro přerušenou rotorovou tyč  $f_{sp}$  a excentricitu  $f_e$

Zátěž	n [min <sup>-1</sup> ]	s [%]	Vypočtené frekvence		Změřené frekvence	
			$f_{sp}$ [Hz]	$f_e$ [Hz]	$f_{sp}$ [Hz]	$f_e$ [Hz]
100 %	1436,0	4,27	54,27	73,93	54,3	74,0
			58,53		–	
			45,73	26,07	45,7	26,1
			41,47		41,4	
50 %	1469,5	2,03	52,03	74,49	52,1	74,5
			54,07		–	
			47,97	25,51	48,0	25,5
			45,93		–	
0 %	1497,5	0,17	50,17	74,96	–	75,0
			50,33		50,3	
			49,83	25,04	49,8	25,1
			49,67		–	

Tabulka 6: Změřené velikosti amplitud poruchových frekvencí pro přerušenou rotorovou tyč  $I_{sp}$  a excentricitu  $I_e$

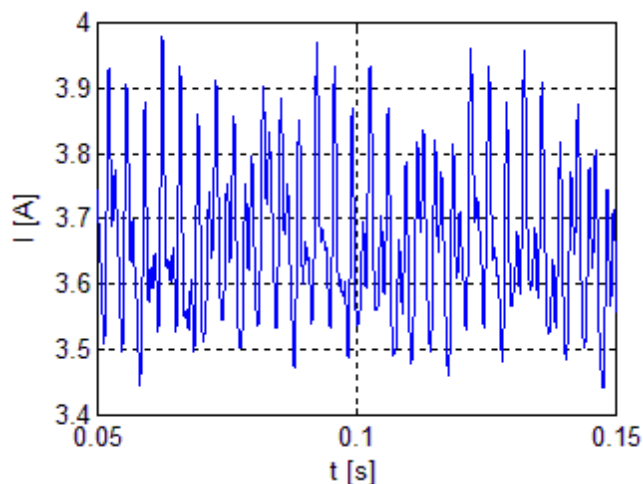
Zátěž	$I_{sp}$	$I_e$	$I_{1.h.}$	$I_{sp}/I_{1.h.}$	$I_e/I_{1.h.}$
	[A]	[A]	[A]	[%]	[%]
100 %	0,0061	0,0084	3,51	0,17	0,24
	–			–	
	0,0088	0,0159		0,25	0,45
	0,0009			0,03	
50 %	0,0053	0,0114	2,5	0,21	0,45
	–			–	
	0,0022	0,0214		0,09	0,84
	–			–	
0 %	–	0,0051	2,2	–	0,23
	0,0035			0,16	
	0,0043	0,0203		0,19	0,92
	–			–	

## 2.7.8 Vyhodnocení poruch – varianta 3

Poslední zkoumanou variantou detekce poruch byla FFT z časového signálu přepočteného pomocí Parkovy transformace. Obrázek 11 zobrazuje časový průběh signálu, který vznikne po přepočtu tří časových průběhů proudů pomocí Parkovy

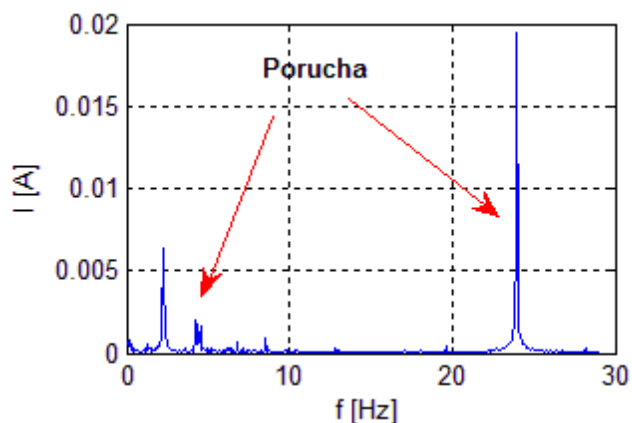
transformace. Oproti reálnému signálu zde nelze vysledovat žádnou výraznější periodicitu průběhu a kmitání probíhá okolo velikosti amplitudy měřených proudů.

Spektrum proudu, které vzniklo po přepočtu Parkovou transformací, je oproti předchozím případům posunuto celé doleva a nejvýznamnější složka se místo na 50 Hz nachází v 0 Hz. Velikost proudové složky na nulové frekvenci je ve srovnání s ostatními složkami mnohonásobně větší, a proto není zobrazena.

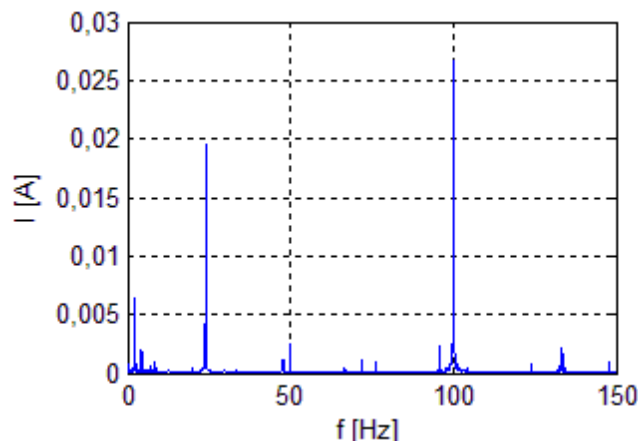


Obrázek 11: Časový signál napájecích proudů po Parkově transformaci

Zkoumaná proudová spektra motoru se statickou a dynamickou excentricitou při plném zatížení jsou zobrazena v grafech (Obrázek 12, Obrázek 13). Vyznačené frekvence jsou jak pro excentricitu motoru (23,95 Hz), tak pro asymetrii rotoru při přerušené rotorové tyči (4,3 Hz), kterou zkoumaný motor neměl deklarovanou, a proto tato frekvence je prakticky zanedbatelná. Spektra nevykazují díky transformaci výskyt většího množství šumu a jsou dobře čitelná i bez použití okénkovacích funkcí v průběhu zpracování FFT. Ze zobrazených grafů je patrné, že velikost složky na frekvenci 100 Hz, tedy dvounásobku nosné frekvence, je sice větší jak poruchové frekvence, ale její velikost je stále pouze v řádech miliampér. Zatímco velikost stejnosměrné frekvenční složky (0 Hz), kde je i nosná frekvence, dosahuje velikosti v řádu ampér.



Obrázek 12: FFT z proudu transformovaného Parkovou transformací – výřez spektra



Obrázek 13: FFT z proudu transformovaného Parkovou transformací – celkové zkoumané spektrum

Přesnější srovnání spolehlivosti této metody bylo provedeno v následujících tabulkách 7 – 10, kde lze najít jak motor se statickou a dynamickou excentricitou, tak motor s přerušenou tyčí. Identifikování frekvencí v této variantě je opět velmi přesné a vypočtené frekvence odpovídají i frekvencím proudových špiček. Riziko poruchy představují poměrové indexy  $m_{rp}$  a  $m_{spP}$ , které se bohužel během našeho měření výrazně i přes definované poruchy motorů nezvýšily nad 1 %. Testované motory tedy neměly nejspíš uměle vytvořenou takovou poruchu jaká je potřeba pro výraznější zvětšení poměru a motory by se tedy ve skutečnosti daly ještě bez problému provozovat dále.

Tabulka 7: Motor se statickou a dynamickou excentricitou – poruchové frekvence

Zátěž	n	s	$f_{mech}$	$f_{mech}$ změřeno	$f_{sp}$	$f_{sp}$ změřeno
	[ $\text{min}^{-1}$ ]	[-]	[Hz]	[Hz]	[Hz]	[Hz]
100 %	1436,0	0,043	23,93	23,95	4,27	4,3
75 %	1453,0	0,031	24,22	24,2	3,13	3,15
50 %	1469,5	0,020	24,49	24,5	2,03	2,05
25 %	1484,6	0,010	24,74	24,75	1,03	1,05
0 %	1497,5	0,002	24,96	24,95	0,17	0,15

Tabulka 8: Motor s přerušenou rotorovou tyčí – poruchové frekvence

Zátěž	n	s	$f_{mech}$	$f_{mech}$ změřeno	$f_{sp}$	$f_{sp}$ změřeno
	[ $\text{min}^{-1}$ ]	[-]	[Hz]	[Hz]	[Hz]	[Hz]
100 %	1434,0	0,044	23,90	23,9	4,40	4,5
75 %	1451,0	0,033	24,18	24,2	3,27	3,3
50 %	1467,0	0,022	24,45	24,45	2,20	2,2
25 %	1483,0	0,011	24,72	24,75	1,13	1,1
0 %	1497,0	0,002	24,95	24,95	0,20	–

Tabulka 9: Motor se statickou a dynamickou excentricitou – velikosti proudů

Zátěž	n	$I_{\text{mech}}$	$I_{\text{sp}}$	$I_{\text{A ef}}$	$m_{\text{rP}}$	$m_{\text{spP}}$
	[ $\text{min}^{-1}$ ]	[A]	[A]	[A]	[%]	[%]
100 %	1436,0	0,0143	0,0030	2,54	0,56	0,12
75 %	1453,0	0,0172	0,0021	2,12	0,81	0,10
50 %	1469,5	0,0155	0,0055	1,81	0,85	0,31
25 %	1484,6	0,0148	0,0047	1,62	0,91	0,29
0 %	1497,5	0,0225	0,0063	1,58	1,43	0,40

Tabulka 10: Motor s přerušenou rotorovou tyčí – velikosti proudů

Zátěž	n	$I_{\text{mech}}$	$I_{\text{sp}}$	$I_{\text{A ef}}$	$m_{\text{rP}}$	$m_{\text{spP}}$
	[ $\text{min}^{-1}$ ]	[A]	[A]	[A]	[%]	[%]
100 %	1434,0	0,0011	0,0129	2,55	0,04	0,50
75 %	1451,0	0,0010	0,0078	2,12	0,05	0,37
50 %	1467,0	0,0012	0,0080	1,79	0,07	0,44
25 %	1483,0	0,0005	0,0054	1,58	0,03	0,34
0 %	1497,0	0,0031	–	1,52	0,21	–

### 3 Závěr

Automatizování měření a jeho vyhodnocování je velmi výhodné, obzvláště pokud je možné program upravit a dle potřeby modifikovat. Zrychluje zpracování celého měření a díky tomu může být poté použito k trvalému monitorování stavu motoru. Výhodou programu je, že vždy může zobrazit detekovanou frekvenci včetně velikosti amplitudy a frekvenčních spekter. Použití primárně dvou typů vyhodnocovacích metod při měření statorových proudů dává možnost porovnávat detekované poruchy navzájem a provést správné vyhodnocení poruchovosti motoru. Testování prokázalo, že zpracovaný signál pomocí FFT odpovídá teoretickým předpokladům a frekvenční špičky pro vypočtené frekvence se v rámci testování shodují. Nevýhodou přímého zpracování signálu pomocí FFT je velká náchylnost zpracovaného signálu na pronikání šumu ze sítě. Nasuperponovaný šum ztěžuje a v některých případech i znemožňuje detekci poruchy stroje. V případě zpracování FFT z absolutní hodnoty z transformovaných průběhů Parkovou transformací takový problém nenastával. V žádané oblasti byla spektra relativně čistá a porucha vždy velmi dobře viditelná. Velikost poruchové frekvence detekované v proudovém spektru po Parkově transformaci lze převést do poměrných veličin. Pokud je jejich hodnota větší než nastavená procentuální velikost poruchy uživatelem, tak program signalizuje poruchu motoru.

### Poděkování

Publikace vznikla v Centru výzkumu a využití obnovitelných zdrojů energie (CVVOZE) za finanční podpory MŠMT v rámci programu NPU I (projekt č. LO1210).

### Literatura

- [1] JAKSCH, Ivan. Measuring and evaluating methods for online induction motor diagnosis. In: *The Fifth International Conference on Power Electronics and Drive Systems, 2003. PEDS 2003*. [online]. Singapore: IEEE, 2003, s. 308–312. ISBN 0-7803-7885-7. Dostupné z: doi:10.1109/PEDS.2003.1282809
- [2] NANDI, Subhasis. *Fault analysis for condition monitoring of induction motors*. Texas (USA), 2000. Dizertační práce. Texas A&M University.
- [3] STACK, Jason R. *Fault signature detection for rolling element bearings in electric machines*. Georgia (USA), 2002. Dizertační práce, Georgia Institute of Technology.
- [4] OBAID, Ramzy R. *Detection of Rotating Mechanical Asymmetries in Small Induction Machines*. Atlanta, 2003. Dizertační práce. Georgia Institute of Technology.
- [5] TAVNER, Peter, Li RAN, Jim PENMAN a Howard SEDDING. *Condition Monitoring of Rotating Electrical Machines* [online]. London: Institution of Engineering and Technology, 2008 [cit. 10. prosinec 2015]. ISBN 978-0-86341-739-9. Dostupné z: [http://app.knovel.com/web/toc.v/cid:kpCMREM001/viewerType:toc/root\\_slug:condition-monitoring](http://app.knovel.com/web/toc.v/cid:kpCMREM001/viewerType:toc/root_slug:condition-monitoring)
- [6] ČSN CLC/TS 60034-24. *Točivé elektrické stroje – Část 24: Online detekce a diagnostika možných poruch aktivních částí točivých elektrických strojů a ložiskových proudů – Návod k použití*. Praha: Český normalizační institut. 2012.
- [7] CHMELÍK, Karel. *Příspěvek k diagnostice střídavých elektrických strojů*. Ostrava, 1993. Příspěvek. Vysoká škola báňská, Fakulta elektrotechniky a informatiky, Katedra elektrických strojů a přístrojů.
- [8] VAS, Peter. *Parameter Estimation, Condition Monitoring, and Diagnosis of Electrical Machines*. Oxford: Oxford University Press, 1993. ISBN 01-985-9375-9.
- [9] JAKSCH, Ivan a Jan ZALUD. Rotor fault detection of induction motors by sensorless irregularity revolution analysis. In: *The XIX International Conference on Electrical Machines - ICEM 2010* [online]. Rome: IEEE, 2010, s. 1–6. ISBN 978-1-4244-4174-7. Dostupné z: doi:10.1109/ICELMACH.2010.5607699
- [10] JAKSCH, Ivan a Petr FUCHS. Rotor cage faults detection in induction motors by Motor Current Demodulation Analysis. In: *2007 IEEE International Symposium on Diagnostics for Electric Machines, Power Electronics and Drives* [online]. Cracow: IEEE, 2007, s. 247–252. ISBN 978-1-4244-1061-3. Dostupné z: doi:10.1109/DEMPED.2007.4393103
- [11] JAKSCH, Ivan a Jiri BAZANT. Demodulation methods for exact induction motor rotor fault diagnostic. In: *2005 5th IEEE International Symposium on Diagnostics for Electric Machines, Power Electronics and Drives* [online]. Vienna: IEEE, 2005, s. 1–5. ISBN 978-0-7803-9124-6. Dostupné z: doi:10.1109/DEMPED.2005.4662494
- [12] JAKSCH, Ivan. Využití Parkovy transformace pro diagnostiku statorových vad asynchronních motorů. In: *XIX. Mezinárodní symposium učitelů elektrických pohonů* [on-

- line]. Liberec: Technická univerzita v Liberci, 2002, s. 231 – 236. ISBN 80-7083-612-1. Dostupné z: <http://www.mechatronika.cz/symep/sbornik>
- [13] JAKSCH, Ivan. Rotorové vady asynchronních motorů a jejich diagnostika. In: *XIX. Mezinárodní symposium učitelů elektrických pohonů* [online]. Liberec: Technická univerzita v Liberci, 2002, s. 225 – 230. ISBN 80-7083-612-1. Dostupné z: <http://www.mechatronika.cz/symep/sbornik>
- [14] KING, Gregory John. *Induction motor fault detection using the fast orthogonal search algorithm*. Ottawa, 2010. Dizertační práce. Royal Military College of Canada.
- [15] TŮMA, Jiří. *Zpracování signálů získaných z mechanických systémů užitím FFT*. Štramberk: Sdělovací technika, 1997, 174 s. ISBN 80-901936-1-7.