



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV VÝROBNÍCH STROJŮ, SYSTÉMŮ A ROBOTIKY

INSTITUTE OF PRODUCTION MACHINES, SYSTEMS AND ROBOTICS

DIAGNOSTIKA ZÁTĚŽE ASYNCHRONNÍHO MOTORŮ NA ZÁKLADĚ MĚŘENÍ PROUDŮ

LOAD DIAGNOSIS OF ASYNCHRONOUS MOTORS BASED ON CURRENT MEASUREMENTS

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Adam Vozár

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Rostislav Huzlík, Ph.D.

BRNO 2025

Zadání bakalářské práce

Ústav: Ústav výrobních strojů, systémů a robotiky
Student: **Adam Vozár**
Studijní program: Základy strojního inženýrství
Studijní obor: Základy strojního inženýrství
Vedoucí práce: **Ing. Rostislav Huzlík, Ph.D.**
Akademický rok: 2024/25

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma bakalářské práce:

Diagnostika zátěže asynchronního motorů na základě měření proudů

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Jedním z nástrojů elektrické diagnostiky je vyhodnocení chování motoru pomocí proudů. Pro tuto metodu se často používá zkratka MCSA (motor current signature analysis). Tato metoda umožňuje vyhodnocení poruch motoru a chování zátěže. V rámci práce se student nejprve seznámí s touto metodou. Dále ve vhodném programovacím prostředí (např. LabVIEW, Matlab/Octave, Python apod.) navrhne algoritmus pro vyhodnocení měřených proudů. Tento algoritmus poté student využije pro analýzu předložených signálů. Na závěr práce student vyhodnotí možnosti využití algoritmu a jeho omezení.

Cíle bakalářské práce:

Literární rešerši na téma vyhodnocení chování asynchronního motoru ze snímaných proudů
Návrh algoritmu pro vyhodnocení změn zatěžovacího momentu
Provedení vyhodnocení chování zátěže na základě předložených průběhů proudů
Vyhodnocení možnosti použití algoritmu a omezení použité metody

Seznam doporučené literatury:

TŮMA, Jiří, 1997. Zpracování signálů získaných z mechanických systémů užitím FFT. Praha: Sdělovací technika. ISBN 80-901936-1-7.

KROUPA, M. Analýza změny zátěže asynchronního motoru z měření statorových proudů. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2015. 86s. Vedoucí diplomové práce doc. Ing. Čestmír Ondrůšek, CSc.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2024/25

V Brně, dne

L. S.

doc. Ing. Petr Blecha, Ph.D., FEng.
ředitel ústavu

doc. Ing. Jiří Hlinka, Ph.D.
děkan fakulty

ABSTRAKT

Táto bakalárska práca sa zaoberá diagnostikou záťaže asynchrónneho motora na základe meraných prúdov. Vyhodnocovanie stavu asynchrónneho motora zo snímaného prúdu bolo popísané v literárnej rešerši. Následne bol prevedený návrh algoritmu pre vyhodnotenie zmeny zaťažovacieho momentu na základe metódy MCSA. Algoritmus bol použitý určenie zmeny záťaže predložených priebehov statorových prúdov asynchrónneho motora. Rovnako boli v práci popísané obmedzenia a použitie tohto algoritmu.

ABSTRACT

This bachelor's thesis deals with the load diagnostics of an asynchronous motor based on measured stator currents. The evaluation of the condition of the asynchronous motor from the measured current is described in the literature review. Subsequently, an algorithm for evaluating changes in the load based on the MCSA method was proposed. The algorithm was used to determine the change in load from the presented stator currents measurements of an asynchronous motor. The limitations and applications of this algorithm were described in the thesis.

KLÚČOVÉ SLOVÁ

asynchrónny motor, MCSA, diagnostika záťaže, statorový prúd, Fourierová transformácia

KEYWORDS

asynchronous motor, MCSA, load diagnostics, stator current, Fourier transform

BIBLIOGRAFICKÁ CITÁCIA

VOZÁR, Adam. *Diagnostika zátěže asynchronního motorů na základě měření proudů*. Online, bakalářská práce. Rostislav HUZLÍK (vedoucí práce). Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2025. Dostupné z: <https://www.vut.cz/studenti/zav-prace/detail/162506>.

POĎAKOVANIE:

Rád by som chcel predovšetkým poďakovať vedúcemu bakalárskej práce Ing. Rostislavovi Huzlíkovi, Ph.D. za vedenie práce, za jeho cenné rady a pripomienky. Ďalej by som sa chcel poďakovať mojej rodine a priateľom za podporu počas celého doterajšieho štúdia.

ČESTNÉ PREHLÁSENIE

Prehlasujem, že som bakalársku prácu vypracoval samostatne a že všetky použité literárne zdroje som správne a úplne citoval. Bakalárska práca je z hľadiska obsahu majetkom Fakulty strojného inžinýrství VUT v Brne a môže byť použitá ku komerčným účelom iba so súhlasom vedúceho bakalárskej práce a dekana FSI VUT.

V Brne dňa 22.5.2025

.....

Adam Vozár

OBSAH

1	ÚVOD	9
2	TEORETICKÁ ČASŤ	10
2.1	ASYNCHRÓNNY MOTOR	10
2.1.1	Točivé magnetické pole.....	10
2.1.2	Konštrukcia statoru	14
2.1.3	Konštrukcia rotoru	15
2.1.4	Princíp činnosti asynchrónneho motora	16
2.2	SIGNÁL.....	17
3	SÚČASNÝ STAV RIEŠENEJ PROBLEMATIKY.....	19
3.1	ZAPOJENIE MCSA	19
3.2	SPRACOVANIE SIGNÁLU V RÁMCI DIAGNOSTIKY MCSA.....	21
3.2.1	Fouriérová transformácia (Fourier transformation – FT).....	21
3.2.1.1	<i>Diskrétna Fouriérová transformácia.....</i>	<i>21</i>
3.2.1.2	<i>Rýchla Fourierová transformácia</i>	<i>21</i>
3.2.2	Vlnková transformácia (Waveletová transformácia)	21
3.2.3	Porovnanie metód na spracovanie a úpravu signálu	22
3.3	IDENTIFIKOVATELNÉ STAVY MOTORA METÓDOU MCSA.....	23
3.3.1	Nesymetria vzduchovej medzery	23
3.3.2	Porucha kletky rotoru	24
3.3.3	Poškodené ložiská	25
3.3.4	Skrat na vinutí statoru.....	26
3.3.5	Záťaž.....	27
4	NÁVRH ALGORITMU	28
5	VÝSLEDKY A GRAFY	38
6	POUŽITIE A OBMEDZENIA ALGORITMU	44
7	ZÁVER	45
8	ZOZNAM POUŽITEJ LITERATÚRY	47

1 ÚVOD

Prvý, v praxi použiteľný, asynchrónny motor bol zostrojený v 90. rokoch 19. storočia v Nemecku a stal sa základom pre ďalší rozvoj tejto technológie. Rýchlo nabral na popularite a dnes patria asynchrónne stroje k najrozšírenejším elektrickým strojom na svete, používaným v širokom spektre aplikácií. Od priemyselných aplikácií, kde sú používané ako pohony výrobných strojov, dopravníkov alebo čerpadiel, cez domáce spotrebiče ako napríklad práčky a chladničky až po vzdelávanie a výskum, kde sú používané na demonštráciu princípov elektromagnetizmu. Veľkou výhodou je ich jednoduchá konštrukcia, vysoká odolnosť, spoľahlivosť a nízke náklady na ich prevádzku a výrobu. Nízka výrobná cena je spojená s veľkou sériovosťou výroby. Asynchrónne motory sú často napájané bežnou trojfázovou sieťou. Avšak, ako každý mechanický a elektrický stroj, aj tieto motory sú náchylné na rôzne poruchy, ktoré môžu ovplyvniť ich výkon a efektívnosť.

Preto je dôležité sledovanie stavu asynchrónnych motorov. Jednou z najužitočnejších metód sledovania stavu tohto typu motora je frekvenčná analýza statorového prúdu, tiež nazývaná MCSA (Motor Current Signature Analysis). Ide o neinvazívnu metódu, ktorou dokážeme získať informácie o možných poruchách motora a jeho záťaži.

Táto bakalárska práca sa venuje bližšiemu popísaniu MCSA, spôsobmi spracovania signálu a poruchám, ktoré je možné touto metódou odhaliť. V ďalšej časti práce bude navrhnutý a popísaný algoritmus na diagnostiku záťaže asynchrónneho motora využitím tejto metódy. Týmto algoritmom budú vyhodnotené už vopred namerané dáta, čím bude ukázané ako tento algoritmus funguje. Následne budú opísané jeho obmedzenia a možné využitia.

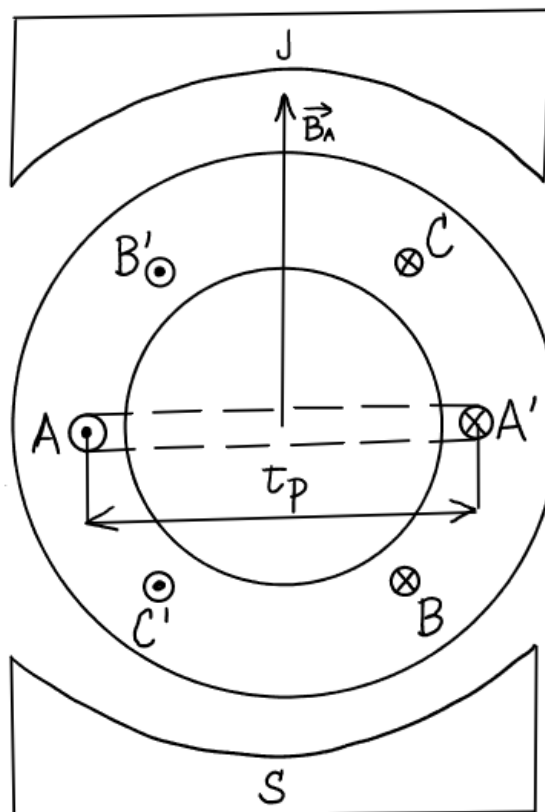
2 TEORETICKÁ ČASŤ

2.1 Asynchrónny motor

Asynchrónny motor je, hlavne v priemyselných aplikáciách, najpoužívanejším elektromotorom. Je to dané hlavne jeho jednoduchou konštrukciou, veľkou pracovnou spoľahlivosťou a dobrými prevádzkovými vlastnosťami. Asynchrónne motory sú väčšinou vyrábané hromadne, čo tiež prispieva k ich priaznivej cene. Vyrábajú sa s výkonmi od 60 W napájané nízkym napätím až do 14 MW napájané vysokým napätím. V minulosti sa asynchrónne motory napájali zo siete, no v súčasnosti sa rýchlo zvyšuje miera nasadenia týchto motorov v regulačných pohonoch v spojení s polovodičovými meničmi. Takéto nasadenie umožňuje efektívne a flexibilné riadenie motorových systémov, čo prispieva k zvýšeniu produktivity, úsporám energie a optimálnemu chodu motorov.

2.1.1 Točivé magnetické pole

Kľúčový význam pre objasnenie princípu funkcie asynchrónneho motora má vznik točivého magnetického poľa v statore [1]. Toto pole si môžeme predstaviť ako magnetické pole permanentného magnetu, ktoré sa v priestore otáča. V asynchrónnych motoroch je jeho vznik založený na princípe elektromagnetickej indukcie. Keď elektrický prúd preteká cez vodič vo forme cievky, vytvára okolo neho magnetické pole. V trojfázovom statorovom vinutí sú jednotlivé vinutia voči sebe priestorovo posunuté o 120° a prúdy sú vzájomne časovo posunuté o 120° . Usporiadanie trojfázového vinutia, ktoré je uložené v statore, je schematicky znázornené na Obr. 1.



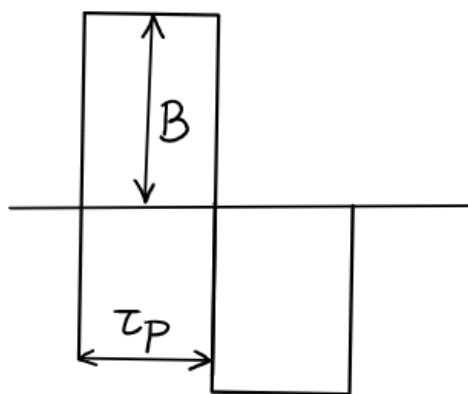
Obr. 1) Schéma trojfázového vinutia, upravené z [1].

Ak predpokladajme, že každé vinutie má jeden závit a že vinutím A preteká jednosmerný prúd. Rozmer τ_p sa nazýva pólová rozteč. Potom magnetomotorickú silu môžeme vypočítať vzťahom (1),

$$F_m = \oint H \cdot dl = H \cdot \delta = \frac{B}{\mu_0} \cdot \delta = \sum_{i=1}^N i_i = N \cdot i \quad (1)$$

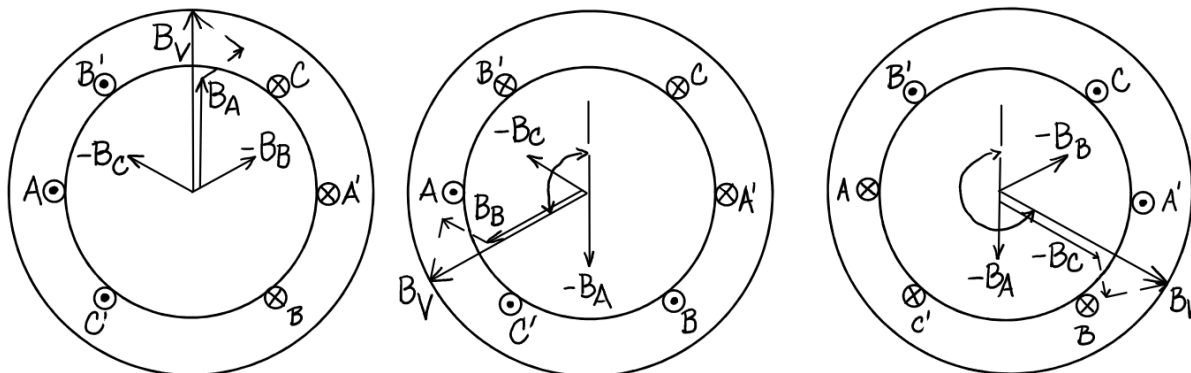
kde H je intenzita magnetického poľa vo vzduchovej medzere, B je magnetická indukcia vo vzduchovej medzere, N je počet sériových vodičov, δ je dĺžka vzduchovej medzery a i je okamžitá hodnota prúdu pretekajúceho vodičom.

Vzhľadom k tomu, že magnetický odpor statoru a rotoru je zanedbateľný, bude mať veľkosť vektoru magnetickej indukcie B vo vzduchovej medzere medzi statorom a rotorom obdĺžnikový priebeh zobrazený na Obr. 2. Toto magnetické pôsobenie je rovnaké ako pri fiktívnom permanentnom magneti, ktorého póly sú na Obr. 1. označené ako J a S .



Obr. 2) Priebeh magnetickej indukcie, upravené z [1].

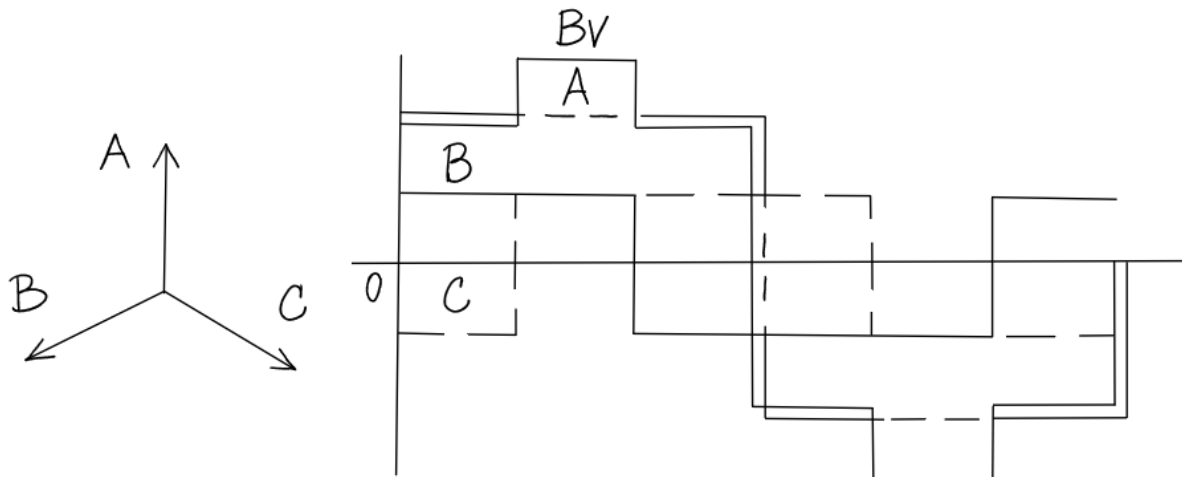
Ak pripojíme na cievku A striedavý prúd, potom sa bude okamžitá hodnota magnetickej indukcie meniť v čase sínusovo, ale priestorový priebeh B bude stále obdĺžnikový. Uvažujme teraz napájanie všetkých troch fáz prúdmi so vzájomným posunom o 120° . Účinky vektorov magnetickej indukcie od jednotlivých fáz sa budú sčítavať. Situácie, ktoré môžu nastať sú zobrazené na Obr. 3.



Obr. 3) Vektory magnetickej indukcie, upravené z [1].

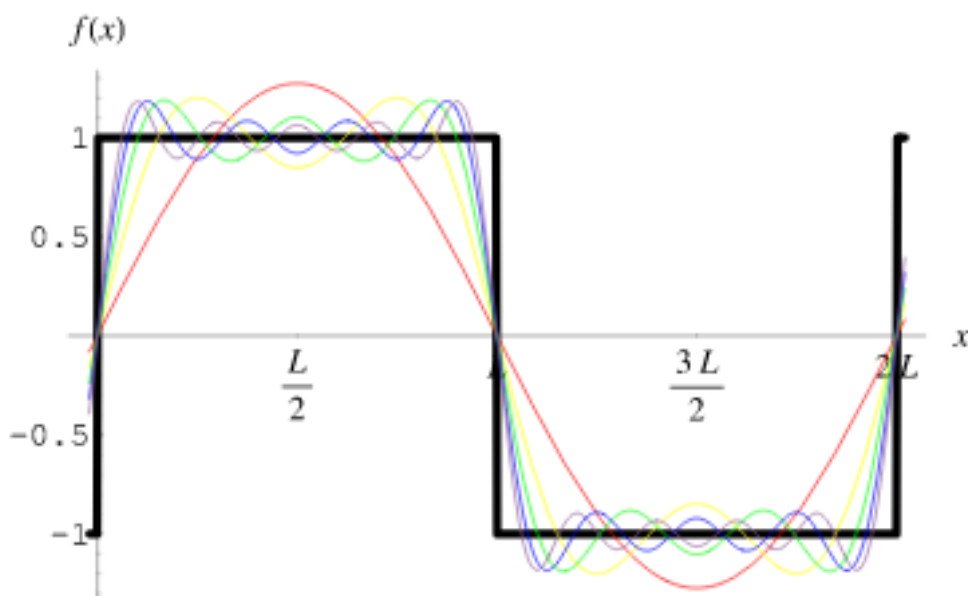
Prvý prípad predstavuje situáciu, kedy má prúd vo fáze A maximálnu hodnotu. V tomto okamihu majú prúdy vo fázach B a C polovičnú veľkosť a záporné znamienko. Výsledné pole má smer vektoru magnetickej indukcie vo fáze A . V druhom a treťom prípade je znázornená situácia v okamihu, kedy má maximálnu veľkosť prúd vo fáze B respektíve C .

Na Obr. 4 je znázornená rovnaká situácia ako v prvom prípade na Obr. 3 avšak ako priebeh veľkosti magnetickej indukcie po obvode statoru. Z tohto obrázku je zrejmé, že ak trojicou statorových vinutí pretekajú tri prúdy s fázovým posunom 120° , bude sa v čase meniť poloha výsledného vektoru magnetickej indukcie v statore tak, že sa bude tento vektor rovnomerne otáčať.



Obr. 4) Priebeh veľkosti magnetickej indukcie, upravené z [1].

Rozloženie veľkosti magnetickej indukcie po obvode statoru je stupňovitý. Tento stupňovitý priebeh je možné pomocou Fourierovej rady rozložiť na harmonické zložky, podobne ako na Obr. 5. Ďalej budeme uvažovať len prvú harmonickú zložku, pretože ostatné harmonické zložky vyvolávajú len rušivé javy. Za tohto predpokladu si dokážeme točivé pole predstaviť ako vlnu konštantnej amplitúdy, ktorá sa pohybuje konštantnou rýchlosťou po obvode statoru.



Obr. 5) Rozloženie magnetickej indukcie pomocou Fourierovej rady, prevzaté z [2].

Matematicky dokážeme túto situáciu popísať nasledujúcimi rovnicami,

$$B_A = B_{max} \cdot \sin(\omega t) = B_{max} \cdot \frac{e^{j\omega t} - e^{-j\omega t}}{2j} \quad (2)$$

$$B_B = B_{max} \cdot \sin\left(\omega t + \frac{2\pi}{3}\right) = B_{max} \cdot \frac{e^{j(\omega t + \frac{2\pi}{3})} - e^{-j(\omega t + \frac{2\pi}{3})}}{2j} \cdot e^{j\frac{2\pi}{3}} \quad (3)$$

$$B_C = B_{max} \cdot \sin\left(\omega t + \frac{4\pi}{3}\right) = B_{max} \cdot \frac{e^{j(\omega t + \frac{4\pi}{3})} - e^{-j(\omega t + \frac{4\pi}{3})}}{2j} \cdot e^{j\frac{4\pi}{3}} \quad (4)$$

$$B = B_A + B_B + B_C = \frac{-3 \cdot B_{max} \cdot e^{-j\omega t}}{2j} \quad (5)$$

kde $B_{A,B,C}$ je veľkosť magnetickej indukcie od jednotlivých fáz, B je veľkosť výslednej magnetickej indukcie, B_{max} je maximálna hodnota magnetickej indukcie, ω je uhlová frekvencia napájacieho napätia a t je čas.

Ak by sme vymenili pripojenie dvoch statorových fáz, zmenia sa v rovniaciach pre B_B a B_C znamienka konštanty v argumente funkcie \sin , z čoho dostaneme nasledovný vzťah (6).

$$B = B_A + B_B + B_C = \frac{-3 \cdot B_{max} \cdot e^{+j\omega t}}{2j} \quad (6)$$

Opačné znamienko v argumente exponenciálnej funkcie značí, že sa vymenením dvoch statorových fáz zmení smer otáčania točivého poľa.

Doteraz sme riešili prípad, kedy prúd jednej fáze pretekal len jednou cievkou, a teda každá fáza mala dva póly vinutia tzv. dvojpólový stroj, čo je znázornené aj na Obr. 3. Na Obr. 6. je znázornený prípad, kedy je vinutie jednej fáze tvorené štyrmi pólmi, celkovo je tak na statore 12 pólův, tzv. štvorpólový stroj. V tomto prípade dokážeme určiť výsledný vektor magnetickej indukcie pre jednu a druhú polovicu obvodu statoru samostatne. Takúto situáciu si môžeme predstaviť ako keby v statore pôsobila dvojica permanentných magnetov. Ak sa budú prúdy vo fázach statora meniť sínusovo, bude sa magnetické pole otáčať. Za jednu periódu prúdu sa však vektor magnetickej indukcie neotočí o 360° ako v prípade dvojpólového stroja, ale len o 180° . To zodpovedá prechodu výsledného vektora magnetickej indukcie cez šesť pólův vinutia. Rýchlosť otáčania poľa v statore štvorpólového stroja je teda polovičná oproti dvojpólovému stroju. Túto úvahu môžeme zovšeobecniť na stroje, ktoré majú na statore $2p_p$ pólův, kde p_p je počet pólův stroja. Rýchlosť točivého poľa pri viacpólovom stroji je potom p_p krát nižšia ako rýchlosť točivého poľa dvojpólového stroja. V praxi sa používajú stroje s rôznymi počtami pólův až po dvanásťpólové stroje.

Z tohto môžeme vytvoriť záver, že rýchlosť otáčania točivého poľa je závislá na počte pólův stroja a frekvencii napájacieho statorového prúdu resp. napätia. Rýchlosť točivého poľa sa

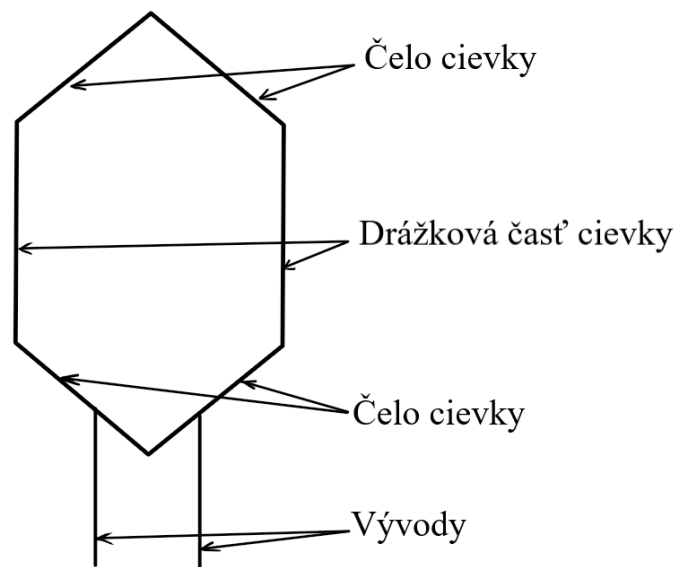
nazýva rýchlosťou synchronnou a dokážme je vypočítať na základe uhlovej rýchlosti resp. frekvencie napájacieho napätia vzťahom (7),

$$\omega_s = \frac{\omega_1}{p_p} = \frac{2 \cdot \pi \cdot f_1}{p_p} \quad (7)$$

kde ω_s je synchronná uhlová rýchlosť, ω_1 je uhlová rýchlosť napájacieho napätia, f_1 je frekvencia napájacieho napätia.

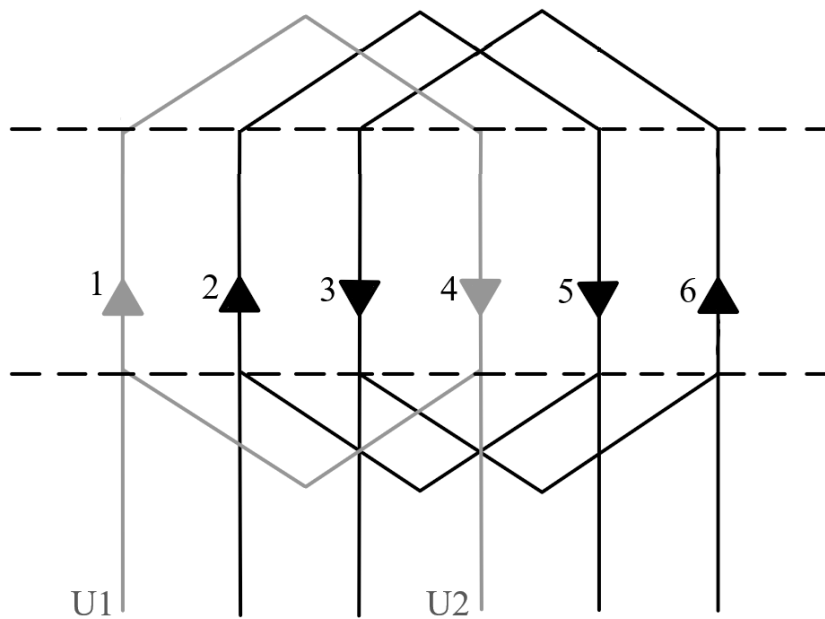
2.1.2 Konštrukcia statoru

Doteraz sme používali model, kde v jednom vinutí je len jeden závit. To malo za následok stupňovité rozloženie magnetickej indukcie po obvode statoru s veľkým obsahom harmonickým zložiek. V reálnych motoroch má jedno vinutie závitov viac. Vodiče vinutí sú uložené v drážkach magnetického obvodu statoru, obvykle v dvoch vrstvách ale môže byť aj viac vrstiev ak to použitie vyžaduje, a spojené sú v čele. Počet závitov vinutia musí byť celé číslo deliteľné dvoma tak, aby cievka začínala a končila na rovnakej strane. Cievky bývajú zapojené sériovo, len v špeciálnych prípadoch paralelne. Časť cievky, ktorá je uložená v drážke sa nazýva aktívna časť vodiča a je od statoru oddelená drážkovou izoláciou.



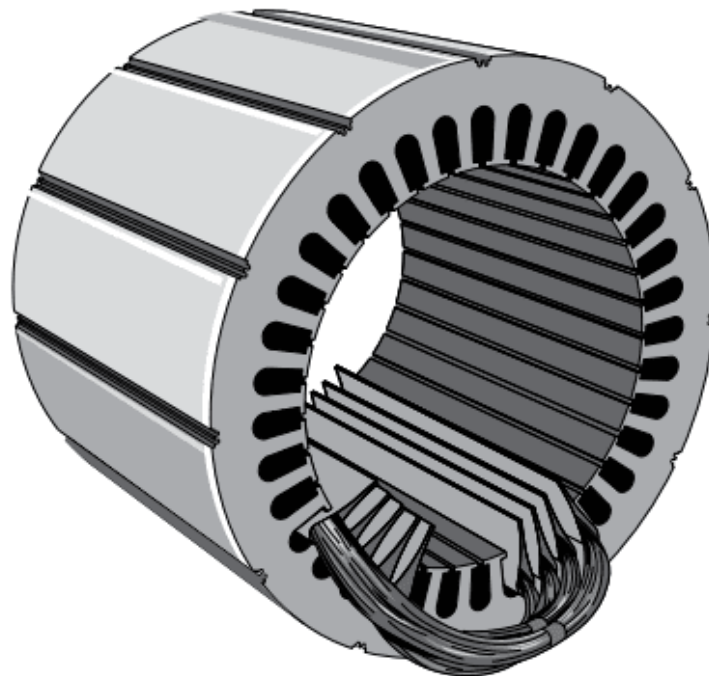
Obr. 6) Schéma cievky, upravené z [3].

Všetky cievky všetkých fáz sú rovnaké a sú rovnomerne rozložené (Obr. 7) po obvode statoru. Väčším počtom rovnomerne rozložených závitov cievok a tým, že v niektorých drážkach dvojvrstvového vinutia sú uložené časti cievok rôznych fáz, získame znova stupňovité rozloženie magnetickej indukcie po obvode statoru, avšak s podstatne menším odstupňovaním a tým pádom menším obsahom nežiadúcich harmonických zložiek. Konce vinutia sú vyvedené na svorkovnicu.



Obr. 7) Trojfázové vinutie v 6 drážkach, upravené z [3].

Magnetický obvod statoru s drážkami nie je tvorený jedným kusom železa, ale je zložený z jednotlivých, od seba vzájomne izolovaných plechov hrúbky cca 0,5 mm. Dôvodom skladania statoru z plechov je obmedzenie magnetizačných strát. Konštrukcia statoru (Obr. 8) musí tiež zabezpečiť krytie, upevnenie, elektrické pripojenie a prípadne chladenie motoru.



Obr. 8) Model statoru, prevzaté z [4].

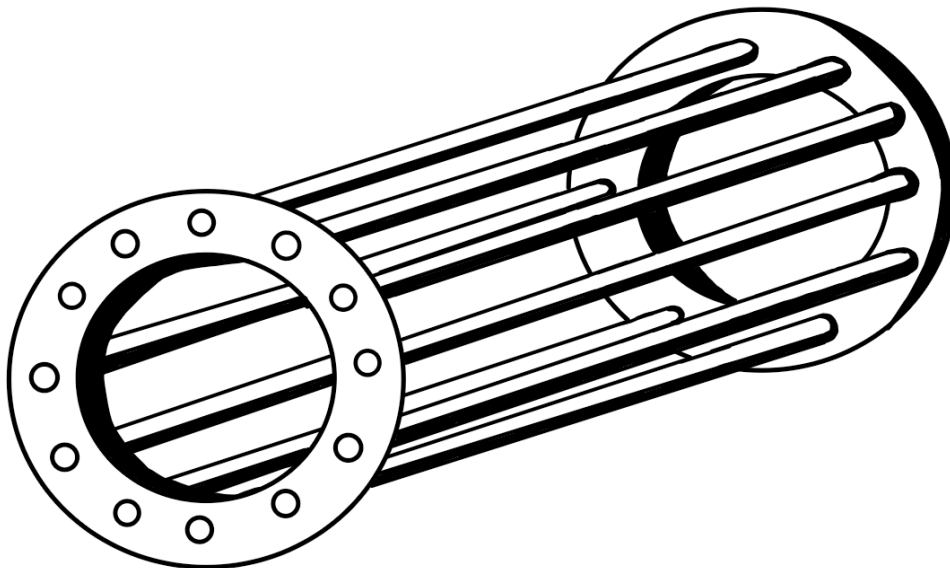
2.1.3 Konštrukcia rotoru

V statore asynchrónneho motora je otočne uložený rotor, tiež nazývaný kotva. Magnetický tok sa uzatvára z časti statorovým a z časti rotorovým magnetickým obvodom. Tieto dva magnetické obvody sú oddelené vzduchovou medzerou. Je snaha, aby bola vzduchová medzera

čo najmenšia kvôli zmenšeniu magnetického odporu medzi statorom a rotorom, čím sa zlepšujú účinky stroja. Veľkosť vzduchovej medzery závisí na výkone motora a býva v rozmeroch od 0,2 do 2 mm.

Rotorový magnetický obvod je zložený, podobne ako statorový, z plechov s drážkami. Drážky sú rozložené po vonkajšom obvode rotora. Stredom rotora prechádza hriadeľ, ktorý je uložený na oboch koncoch v ložiskách. V prípade motorov s vlastným chladením, je na hriadeľ umiestnený aj ventilátor. Prevedenie rotorového vinutia môže byť dvojaké. Rozlišujeme motor s kotvou vinutou (krúžkovou) a motor s kotvou na krátko.

Kotva vinutá má trojfázové vinutie usporiadané podobne ako vinutie na statore. Vinutie je najčastejšie zapojené do hviezdy a cez kontaktné krúžky a „kartáče“ je vyvedené na stator a na svorkovnicu. Kotva nakrátko (Obr. 9) má v drážkach rotorového magnetického obvodu umiestnené vodivé, často hliníkové, tyče spojené v čelách nakrátko. Táto konštrukcia je veľmi jednoduchá a preto sú tieto motory s kotvou nakrátko omnoho viac rozšírené.



Obr. 9) Kotva nakrátko, upravené z [1].

2.1.4 Princíp činnosti asynchrónneho motora

Ak pripojíme na statorové vinutie trojfázovú sústavu napätia, vytvorí sa v statore točivé magnetické pole. Siločiarly tohto poľa pretínajú vodiče rotorového vinutia a časovo premenlivý magnetický tok indukuje v rotore napätie, v dôsledku čoho začne rotorom prechádzať prúd. Frekvencia rotorového napätia a prúdu je pri stojacom rotore daná priamo frekvenciou statorového prúdu. Tento stav, kedy je statorové vinutie napájané trojfázovou sústavou napätí a rotor má nulové otáčky, sa nazýva stav počiatočnej prevádzky alebo štartovací stav. Vzájomným silovým pôsobením medzi točivým polom a rotorovými prúdmi dôjde k vyvodu momentu. Rotor začne zrýchľovať a točivé pole má tendenciu ho unášať. So zvyšovaním rýchlosti rotora klesá relatívna rýchlosť rotora voči točivému poľu a tým pádom klesá frekvencia rotorového prúdu. Ak z hriadele nie je odoberaný mechanický výkon, urýchli sa rotor na rýchlosť veľmi blízku rýchlosti synchronnej. Sám o sebe však nemôže synchronnú rýchlosť dosiahnuť vplyvom strát. Z tohto dôvodu sa popisovaný stroj nazýva asynchrónny. Rotor môže dosiahnuť synchronne otáčky len vtedy, ak mu je dodávaný z vonka mechanický

moment. V prípade, že rýchlosť rotoru sa rovná rýchlosti synchronnej, je relatívna rýchlosť točivého poľa a rotoru nulová. V rotore sa neindukujú žiadne prúdy motor nevyvíja žiadny moment. Jedná sa o tzv. stav naprázdno. Ak budeme ďalej zvyšovať moment, ktorým z vonka poháňame motor, začne rotor zrýchľovať a dosiahne nadsynchronne otáčky, kedy sa z rotoru začnú do statoru indukovať napätia. V dôsledku toho sa v statorovom prúde objaví činná zložka, ktorá prenáša energiu z motoru do napájacej siete. Z motoru sa stáva asynchrónny generátor, ktorý mení mechanickú energiu na energiu elektrickú. Moment má záporné znamienko, pretože sa snaží priblížiť otáčky motoru otáčkam synchronným a dochádza k brzdeniu.

Uvažujme znova stav, keď sa rotor otáča rýchlosťou blízkou rýchlosti synchronnej a z hriadele nie je odoberaný moment. Ak začneme motor v tomto stave zaťažovať mechanickým momentom, začnú klesať otáčky a bude sa zvyšovať veľkosť aj kmitočet rotorového prúdu. Motor zaťažený mechanickým momentom, otáčajúci sa podsynchronnou rýchlosťou, teda mení elektrickú energiu na mechanickú.

V praxi môže nastať aj prípad, kedy má točivé pole smer opačný ako smer otáčania rotoru. Tým sa ďalej zvyšuje frekvencia a veľkosť rotorového prúdu. Moment motoru pôsobí v smere točivého poľa a teda proti smeru otáčania rotoru. Jedná sa o takzvané proti prúdové brzdenie, pri ktorom však nie je do siete vrátená elektrická energia, ale mechanická energia a energia odoberaná zo siete sa mení na teplo.

Významnou veličinou pre popis asynchrónneho motora je sklz s (8), ktorý dáva do súvislosti uhlovú frekvenciu napájacieho napätia ω_1 a mechanickú uhlovú rýchlosť ω_m .

$$s = \frac{\omega_1 - p_p \cdot \omega_m}{\omega_1} = \frac{\omega_s - \omega_m}{\omega_s} \quad (8)$$

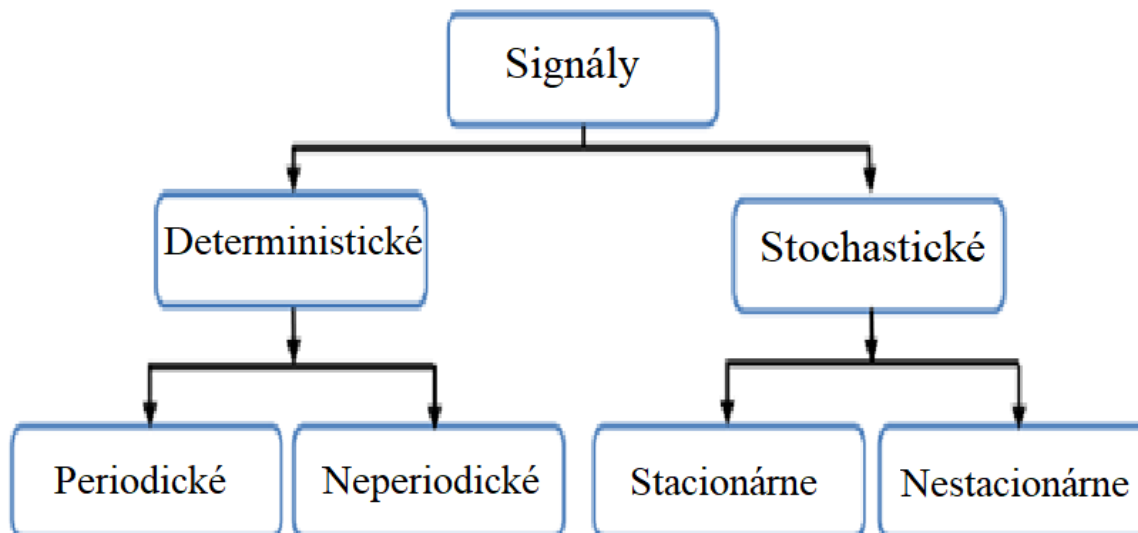
Pri menovitom zaťažení je sklz malý, obvykle v rozsahu 0,03 až 0,1. Pomocou sklzu a frekvencie napájacieho napätia f_1 dokážeme vyčísliť aj frekvenciu napätia indukovaného vo rotore f_2 pomocou jednoduchej rovnice (9).

$$f_2 = f_1 \cdot s \quad (9)$$

2.2 Signál

Vo všeobecnosti sa za signál považuje časová funkcia, ktorá reprezentuje časový priebeh fyzikálnej veličiny a obsahuje zmysluplné informácie ale aj šum. Podľa toho, aké informácie sa snažíme získať zo signálu môže byť pre nás dôležitý aj náhodný šum, ktorý môže popisovať štatistické charakteristiky. Z nich môže získať ďalšie informácie o objekte, ktorý tento signál generuje [5].

Základné rozdelenie signálov je zobrazené na Obr. 10. Hlavné rozdelenie je na deterministické a náhodné. Deterministický signál je taký, ktorého časový priebeh je determinovaný a preto môžeme jeho priebeh predvídať. Náhodný signál má nepredvídateľný vývoj. Signál môžeme rozdeliť aj na viac podskupín, no pre naše potreby spracovania signálu sú tieto podskupiny nepodstatné.



Obr. 10) Základné rozdelenie signálu, upravené z [5].

Dôležitejšie je rozdelenie spracovania signálu. To sa delí na periodické a stacionárne a na neperiodické a nestacionárne. Periodické a stacionárne signály môžeme analyzovať a upraviť klasickou Fourierovou transformáciou. Pre diagnostiku neperiodických a nestacionárnych signálov je nutné použiť časovo-frekvenčné analýzy. Pre spracovanie signálu je dôležité, či je signál spojitý alebo diskretný. Väčšina reálnych meraných signálov je spojitá a pre potreby diagnostiky dochádza k ich digitalizácií.

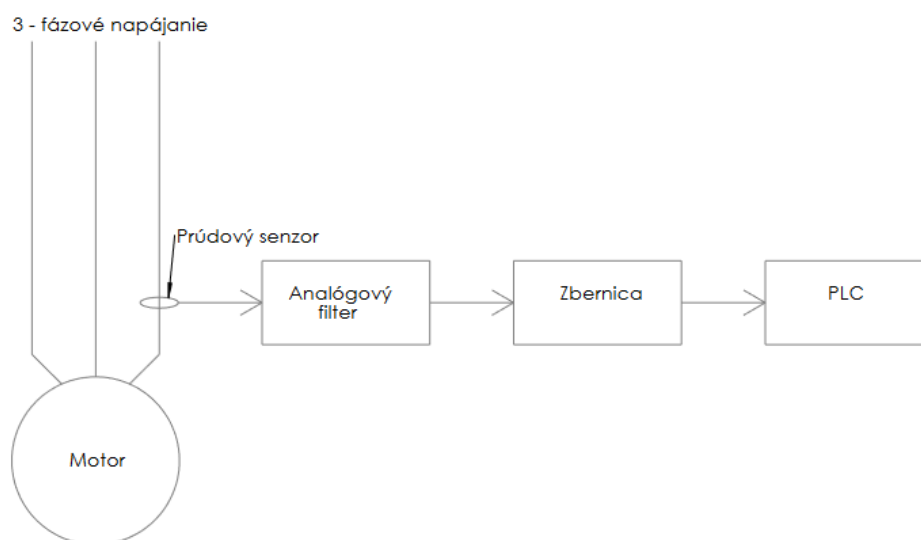
3 SÚČASNÝ STAV RIEŠENEJ PROBLEMATIKY

Jedným zo spôsobov monitorovania stavu asynchrónnych motorov je použitie metódy merania satorových prúdov, často označovanej ako MCSA (Motor Current Signature Analysis). Táto metóda funguje na princípe, že každá porucha motora sa špecificky prejaví v satorovom prúde, meranom na napájacích fázach. Správnym spracovaním a analýzou týchto satorových prúdov, dokážeme tieto špecifické prejavy identifikovať a ak je motor poškodený, vieme určiť presný typ poruchy. Prvýkrát sa táto metóda použila v 70-tych rokoch 20. storočia v Amerike ako spôsob sledovania stavu motorov v nedostupných alebo nebezpečných priestoroch ako napríklad v jadrových reaktoroch [6]. V dnešnej dobe ide o veľmi často využívanú metódu vo všetkých odvetviach priemyslu vďaka tomu, že meranie prebieha v reálnom čase za normálnych pracovných podmienok bez potreby vonkajšieho zásahu alebo obmedzenia prevádzky a vďaka množstvu porúch na motore, ktoré ňou dokážeme identifikovať [7].

3.1 Zapojenie MCSA

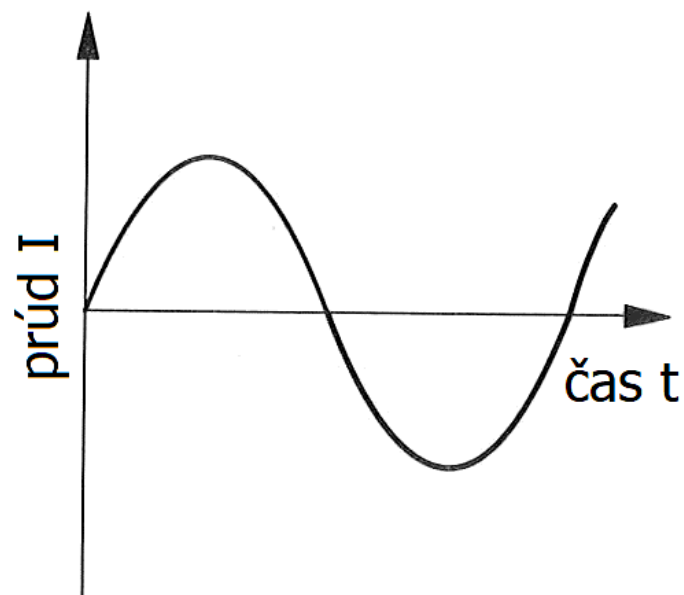
Výhodou MCSA je možnosť použitia už existujúcich senzorov prúdu a jednoduché hardvérové a softvérové vybavenie na zber a analýzu dát. Teda nie je potrebná veľká investícia na prevádzkovanie. Vo väčšine prípadov sa meria satorový prúd iba na jednej z napájacích fáz, avšak je potrebné zabezpečiť, aby senzory mali dostatočné rozlíšenie a vzorkovaciu frekvenciu. Meraný signál môže obsahovať vysokofrekvenčný šum alebo harmonické zložky, ktoré môžu ovplyvniť výsledky analýzy, a preto je potrebné použiť analógový filter. Tento analógový signál musí byť digitalizovaný pre ďalšiu analýzu. Na digitalizáciu sa používajú analógové a digitálne zbernice, ktoré môžu byť aj súčasťou iných zariadení ako napríklad PLC.

Mikroprocesorová jednotka alebo PLC môže byť použitá na spracovanie dát. Takéto jednotky môžu byť programované aj na vykonávanie analýzy a vyhodnocovanie stavu motora. Rovnako môžu byť použité na komunikáciu s inými systémami a počítačmi obsahujúcimi softvér na analýzu a vizualizáciu dát zo senzorov [8]. Príklad schémy typického zapojenia je na Obr. 11. Pri reálnych aplikáciách sa spôsob zapojenia môže líšiť podľa aktuálnych potrieb a možností.



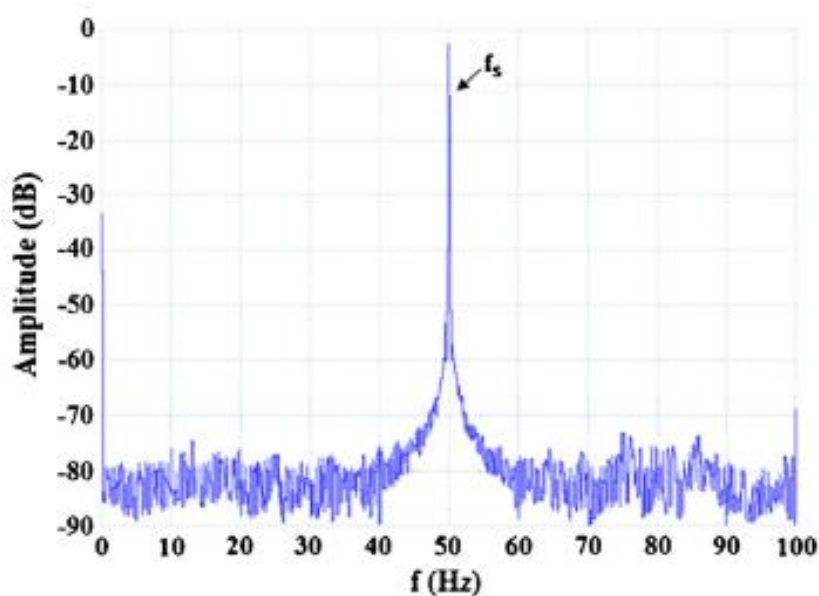
Obr. 11) Schéma príkladu zapojenia MCSA.

V prípade ideálneho motora by sme analýzou a úpravou signálu získali graf závislosti prúdu na čase, ktorého priebeh by bol sínusoidný (Obr. 12). V grafe závislosti amplitúdy na frekvenciách by bola iba jedna harmonická.



Obr. 12) Priebeh prúdu v ideálnom motore.

V reálnom prípade bude v signáli viac harmonických (Obr. 13). Každá porucha motora spôsobí anomálie v magnetickom poli a vlastnej indukčnosti motora. To sa prejaví v snímanom signáli ako harmonické v okolí frekvencie napájacieho prúdu. Amplifikáciou, úpravou a následnou analýzou takéhoto signálu je možné identifikovať poruchy motora. Podľa veľkosti harmonickej dokážeme určiť aj závažnosť poruchy [9]. Kvôli presnosti meraných dát je dôležité, aby pri bol motor pri meraní zaťažený aspoň na 70 % a treba brať v úvahu aj rušivé elementy ako napríklad iné motory zapojené v sieti.



Obr. 13) Frekvencie v reálnom motore, prevzaté z [8].

3.2 Spracovanie signálu v rámci diagnostiky MCSA

3.2.1 Fourierova transformácia (Fourier transformation – FT)

Na spracovanie a úpravu signálu do podoby, z ktorej je možné určiť záťaž a poruchy na motore, sa používa niekoľko metód. Prvou z nich je práve Fourierova transformácia.

Akúkoľvek vlnu dokážeme zložiť z konečného alebo nekonečného množstva sínusových a kosínusových vln s rôznymi frekvenciami. Fourierova transformácia je opačný proces a teda rozloženie zloženej vlny na sínusové a kosínusové vlny. Zložená vlna sa vynásobí sínusovou vlnou s danou frekvenciou. Výsledok tohto násobenia zintegrujeme a získame jedno číslo bez jednotky, ktoré vyjadruje ako veľmi sa daná frekvencia vyskytuje v pôvodnej zloženej vlně. Tento postup zopakujeme pre rôzne frekvencie a následne pre kosínusové vlny. Zo získaných hodnôt dokážeme vytvoriť graf závislosti amplitúdy na frekvencii (Obr. 13).

3.2.1.1 Diskrétna Fourierova transformácia

Diskrétna Fourierova transformácia (discrete Fourier transformation – DFT) je v podstate Fourierova transformácia aplikovaná na diskretný rad komplexných čísel [10]. Rozdeľuje vstupnú diskretnú postupnosť na rovnaký počet frekvenčných zložiek ako dĺžka vstupnej postupnosti. Ak máme vstupnú postupnosť s N vzorkami, potom bude N frekvenčných zložiek. Pracuje s obmedzeným počtom dát a na výpočet potrebujeme N^2 operácií s komplexnými číslami. Výpočet DFT je popísaný rovnicou (10),

$$X[k] = \sum_{n=0}^{N-1} x[n] \cdot e^{-j \cdot \frac{2 \cdot \pi}{N} \cdot k \cdot n} \quad (10)$$

kde k je frekvenčný index (0 až $N-1$), n je časový index (0 až $N-1$), j je imaginárna jednotka, N je počet vzoriek v diskretnéj časovej postupnosti, $x[n]$ je hodnota signálu v čase n a $X[k]$ je hodnota spektrálnej zložky pre frekvenciu k .

3.2.1.2 Rýchla Fourierová transformácia

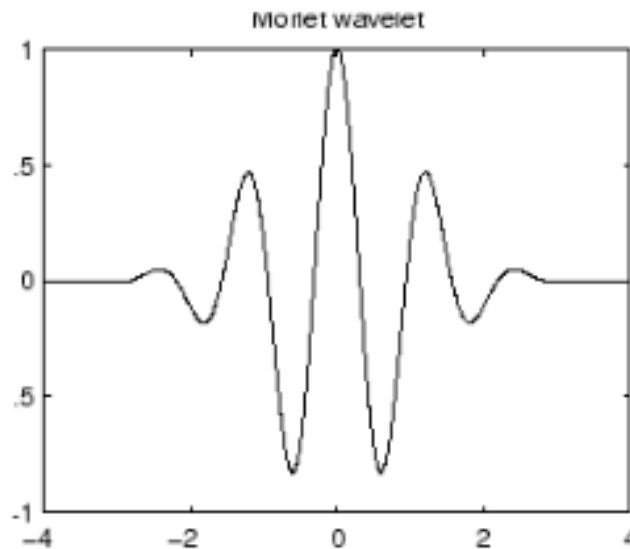
V skutočnosti sa najčastejšie používa rýchla Fourierová transformácia (fast Fourier transformation – FFT). Tento algoritmus vytvorili Cooley a Tuckey v roku 1965. Ide o vylepšenú verziu DFT, ktorá pracuje s menším počtom operácií a to konkrétne s $N \cdot \log(N)$, čím sa zvýši rýchlosť a efektívnosť výpočtu hlavne pri veľkých dĺžkach vstupnej postupnosti.

Jej princíp je založený na rozdelení a dobíhaní, kedy sa pôvodný signál N rozdelí na dva s dĺžkami $N/2$ a použije sa DFT. Po aplikácii FFT je potrebné normalizovať signál aby bola zabezpečená správna interpretácia výsledkov a tým sa uľahčilo porovnávanie výsledkov. FFT poskytuje výsledky vo forme komplexných čísel, ktorých amplitúda môže byť ovplyvnená dĺžkou vstupného signálu. Jednou z najčastejšie používaných normalizácií je normalizácia na maximálnu amplitúdu. V prípade diagnostiky MCSA by to bola amplitúda vstupného napätia.

3.2.2 Vlnková transformácia (Waveletová transformácia)

Druhou metódou na spracovanie a úpravu signálu do podoby, z ktorej je možné určiť záťaž a poruchy motora je vlnková (Waveletová) transformácia. Táto transformácia je integrálna metóda analýzy signálu, ktorá umožňuje získať časovo-frekvenčný popis signálu. Práve to je veľkou výhodou oproti klasickým analýzám, ktoré poskytujú iba informáciu o frekvenciách v signáli ale nie o časovom priebehu.

Princíp spočíva v dekompozícii signálu na rôzne frekvenčné a časové zložky použitím vlniek (waveletov). To je možné kvôli ich presnému určeniu v čase a frekvencii. Proces rozloženia je realizovaný pomocou škálovania (scaling) a posúvania (translation) waveletových funkcií [11]. Vzorec waveletovej analýzy môže byť pomerne zložitý na výpočet, pretože existuje viacero rôznych typov waveletov. Jeden z najčastejšie používaných je Morletov wavelet (Obr. 14), ktorý sa používa v kontinuálnej waveletovej transformácii.



Obr. 14) Morletov wavelet

Všeobecný vzorec waveletovej analýzy s použitím Morletovho waveletu môže byť vyjadrený nasledovne (11),

$$W(a,b) = \int_{-\infty}^{\infty} x(t) \cdot \psi_{a,b}^*(t) dt \quad (11)$$

kde $W(a,b)$ je transformovaný signál v konkrétnej škále a a posune b , $x(t)$ je pôvodný signál, $\psi_{a,b}^*$ je komplexná konjugácia Morletovho waveletu škálovaná na škálu a a posunutá o b . Výsledkom takéhoto výpočtu je potom matica hodnôt transformovaného signálu $W(a,b)$, ktorá obsahuje informácie o frekvencii a čase v signáli.

V reálnych aplikáciách sa viac používa diskretná waveletová transformácia (DWT). Na rozdiel od vyššie popísanej kontinuálnej waveletovej transformácie (CWT), ktorá môže mať nekonečno výsledkov. Diskretná waveletová transformácia má konečný počet výsledkov transformácie a je vykonávaná na diskretných úrovniach škály a posunu. Práve to ju robí efektívnejšou na výpočet a ukladanie dát. Nevýhodou DWT oproti CWT je hlavne menšia presnosť analýzy.

3.2.3 Porovnanie metód na spracovanie a úpravu signálu

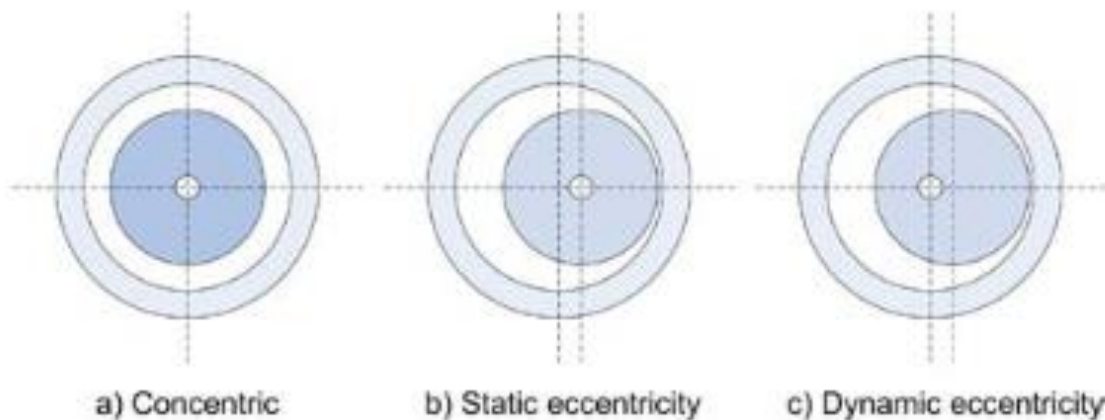
V závislosti od konkrétnej aplikácie a požiadaviek na analýzu, majú obe metódy svoje výhody a nevýhody. Veľkou výhodou DWT oproti FFT je presnejšia a kvalitnejšia analýza signálu. Práve vďaka tomu je užitočnejšia pri analýze signálov s viacerými poruchami alebo zmenami frekvencie. DWT má taktiež dobré časové rozlíšenie a schopnosť zachytiť časové zmeny v signáloch. To je pri použití FFT takmer nemožné a teda znamená stratu informácií o časových

zmenách. Napriek tomu sa FFT často používa vďaka nízkej výpočtovej náročnosti. Preto je vhodnejšou metódou pre analýzu veľkého počtu dát v reálnom čase. V reálnych aplikáciách sa často používa kombinácia týchto metód, vďaka čomu je možné získať komplexnejšie informácie o signáloch v prúde, a zároveň analyzovať v reálnom čase.

3.3 Identifikovateľné stavy motora metódou MCSA

3.3.1 Nesymetria vzduchovej medzery

O nesymetrii vzduchovej medzery alebo inak excentricite hovoríme vtedy, keď vzdialenosť medzi statorom a rotorom nie je v priestore, respektíve v čase konštantná [12]. Existujú dva druhy excentricity a to statická a dynamická (Obr. 15).



Obr. 15) Typy excentricity, prevzaté z [13]

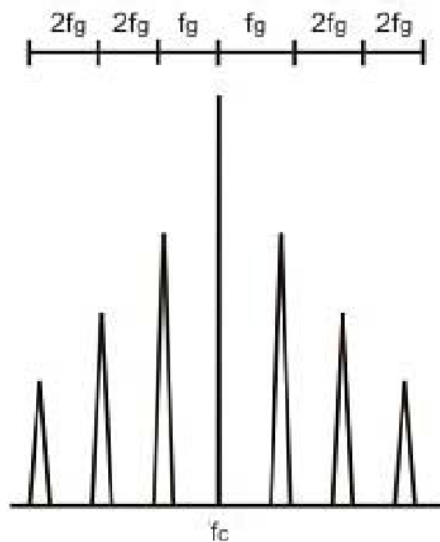
Statická excentricita je stav kedy je veľkosť vzduchovej medzery závislá na polohe v priestore. Môže byť spôsobená vyhnutím statorového jadra alebo nesprávnym umiestnením rotoru voči statoru a v malej miere aj nepresnosťami pri výrobe. Pri dynamickej excentricite sa veľkosť vzduchovej medzery mení s natočením rotoru teda v čase [13]. Medzi najbežnejšie dôvody vzniku dynamickej excentricity patria opotrebovanie ložísk, nepravidelné alebo náhle zaťaženie a nesprávna montáž [14]. Statická excentricita sa prejaví na frekvenciách (Obr. 16), ktoré vieme určiť na základe rovnice (12),

$$f_{ec} = f_g \left[(R \pm n_d) \cdot \left(\frac{1-s}{p} \right) \pm n_{ws} \right] \quad (12)$$

kde f_{ec} je frekvencia excentricity, f_g je frekvencia napájacieho prúdu, R je počet rotorových tyčí, s je sklz, p je počet pólov, $n_d = \pm 1$ a $n_{ws} = 1, 3, 5, 7$, atď. Sklz vieme určiť z otáčok motora a zo synchronných otáčok podľa rovnice (13),

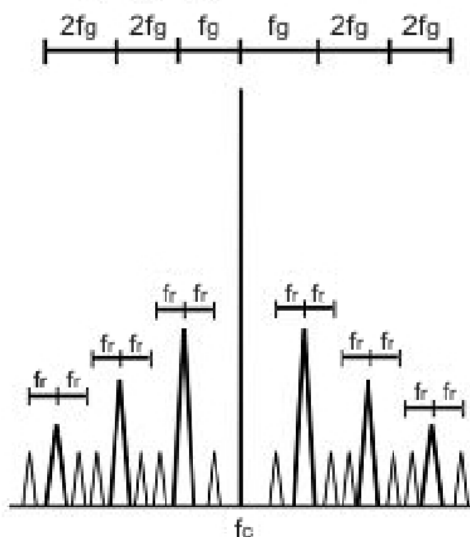
$$s = \frac{N_s - N_r}{N_s} \quad (13)$$

kde s je sklz, N_r sú otáčky rotora a N_s sú synchronne otáčky.



Obr. 16) Harmonické spôsobené statickou excentricitou, prevzaté z [15]

Pri dynamickej excentricite bude prítomná aj frekvencia otáčania. To je zobrazené na Obr. 17.



Obr. 17) Harmonické spôsobené dynamickou excentricitou, prevzaté z [15]

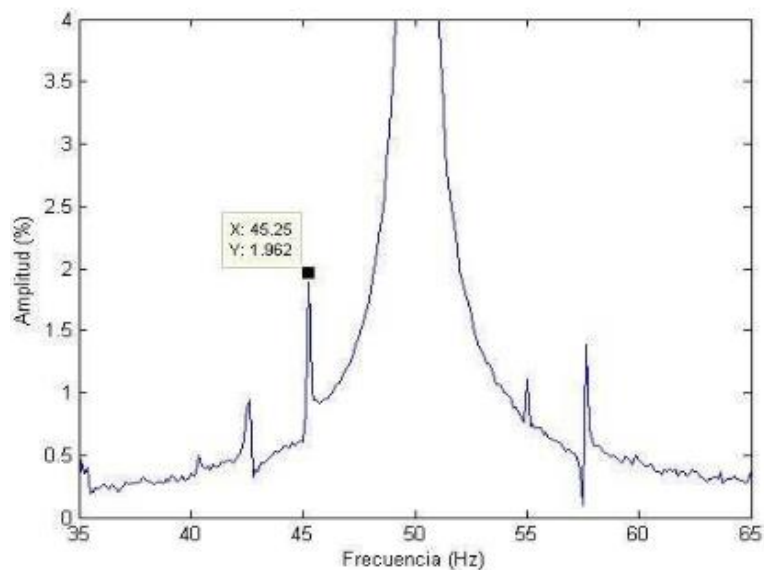
3.3.2 Porucha kľetky rotora

Rotorové tyče sú podstatnou súčasťou rotora asynchrónneho motora, ktorých poruchy majú významný vplyv na chod motora. Okrem straty účinnosti a výkonu motora, čo má za následok zvýšené náklady na prevádzku, môžu poškodené rotorové tyče spôsobiť aj jeho mechanické poškodenie. Jedným z následkov môže byť zvýšené trenie v motore, ktoré môže viesť k vážnejším poruchám, ako napríklad poškodenie vinutia alebo k opotrebovaniu ložísk. Zvýšenie teploty motora ako jeden z možných prejavov zvýšeného trenia vedie k poškodeniu izolácie vinutia a tesnenia. Tieto a ďalšie dôsledky poruchy rotorových tyčí majú významný vplyv na bezpečnosť a spoľahlivosť motora, a preto je dôležité ich včas detegovať [16].

V nepoškodenom rotore je vybudené iba rotujúce magnetické pole v rovnakom smere ako statorové, otáčajúce sa so sklzom. Keď sú však poškodené rotorové tyče, vznikne aj rotujúce magnetické pole, s opačným smerom rotácie. Toto rotujúce magnetické pole začne indukovať prúd v statorovom vinutí, ktorý sa prejaví v snímanom statorovom prúde [7]. Frekvenciu tohto indukovaného prúdu vieme určiť rovnicou (14),

$$f_{rt} = f_g \cdot \left[k \cdot \left(\frac{1-s}{p} \right) \pm s \right] \quad (14)$$

kde f_{rt} je frekvencia poškodených rotorových tyčí, f_g je frekvencia napájacieho prúdu, p je počet pólov, s je sklz a k je celé číslo 1, 2, 3, atď.



Obr. 18) Harmonické spôsobené poškodenými rotorovými tyčami, prevzaté z [17]

Pri vyhodnocovaní prítomnosti poškodených tyčí v rotore sa držíme jednoduchého pravidla. Ak je rozdiel medzi amplitúdou hlavnej harmonickej, v tomto prípade napájací prúd, a vedľajších, v tomto prípade rotorových tyčí, väčší ako 50 dB potom sú tyče nepoškodené. Ak je rozdiel v rozmedzí 40 až 50 dB, potom je pravdepodobne poškodená jedna tyč (Obr. 18). Ak je rozdiel menší ako 40 dB, potom je pravdepodobne poškodených viacero rotorových tyčí [7].

3.3.3 Poškodené ložiská

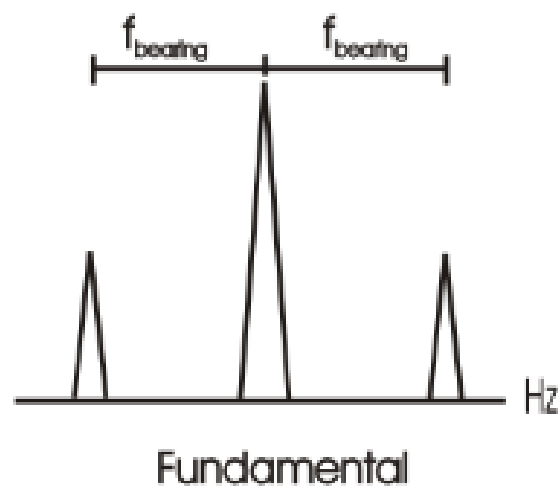
Jednou z najčastejších príčin poruchy elektromotorov sú poškodené ložiská. Poškodenie môže nastať z viacerých dôvodov ako napríklad nadmerná záťaž, zvýšená teplota, nesprávne mazanie, korózia a ďalšie. Podľa toho, kde poškodenie nastane rozdelíme poruchy na poruchy vonkajšieho krúžku, vnútorného krúžku a valivých elementov [18]. Medzi najbežnejšie typy porúch patrí pitting, teda únavové poškodenie, pri ktorom dochádza k odlupovaniu malých kúskov materiálu. Ďalším typom je abrazívne opotrebovanie, ktoré vzniká v dôsledku trenia medzi valivými elementami a povrchom drážok [19]. Poruchu ložiska si môžeme predstaviť ako malú dieru, jamku alebo chýbajúci materiál na povrchu. Takéto nerovnosti spôsobujú vibrácie a zvyšujú úroveň hluku. Pôsobením tlaku sa tieto malé trhliny zväčšujú a šíria do okolia, čo má za následok ešte výraznejší nárast vibrácií a hluku. To môže

nakoniec viesť až k fatálnemu poškodeniu ložiska [20]. Keďže ide o rotačný pohyb, dokážeme z rozmerov ložiska a otáčok stroja určiť na akých frekvenciách sa tieto poruchy prejavia (Obr. 19). Na výpočet môžeme použiť nasledovné rovnice (15) a (16) [21],

$$f_0 = 0,4 \cdot n \cdot f_g \quad (15)$$

$$f_1 = 0,6 \cdot n \cdot f_g \quad (16)$$

kde f_0 spodná frekvencia, f_1 je horná frekvencia, n je počet valivých elementov a f_g je frekvencia napájacieho prúdu.



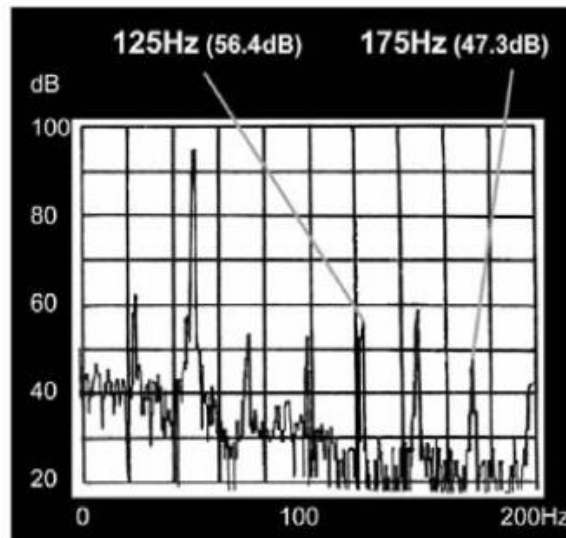
Obr. 19) Harmonické spôsobené poškodeným ložiskom, prevzaté z [15]

3.3.4 Skrat na vinutí statoru

Poškodené vinutie je jednou z najčastejších porúch statoru a má vážne následky na prevádzku motora, vo väčšine prípadov znamená vyradenie motora z funkcie [22]. Hlavnou príčinou vzniku skratu je poškodenie izolácie vodičov, často spôsobené zvýšenou teplotou nad kritickú hodnotu. Skrat môže nastať medzi vodičmi vinutia rovnakej fázy, kedy je ešte možné prevádzkovať motor. Taktiež môže nastať medzi vodičmi rôznych fáz alebo fázovým vodičom a uzemnením [23]. Pri druhom a treťom prípade je nemožné ďalej prevádzkovať motor, pričom jeho ochranné prvky, konkrétne motorová ochrana a prúdový chránič, okamžite odpoja napájacie napätie a prúd prerušením obvodu. Z tohto dôvodu je veľmi dôležité sledovať stav izolácie vinutia aby sme dokázali včas reagovať a vymeniť poškodený motor ešte predtým, než dôjde k skratu. Aj keď poškodená izolácia môže mať vplyv na magnetický a indukčný charakter vinutia, je ťažko identifikovateľná pomocou MCSA. Jediný prípad, kedy môžeme relatívne dobre odhaliť skrat na vinutí je v prípade skratu medzi časťami vinutia rovnakej fázy (Obr. 20). Frekvenciu, na ktorej dokážeme takýto skrat identifikovať, môžeme vypočítať podľa rovnice (17),

$$f_{st} = f_g \cdot \left(\frac{n}{p} \cdot (1 - s) \pm k \right) \quad (17)$$

kde f_{st} je frekvencia spojená so skratom, f_g je frekvencia napájacieho prúdu, n je celé číslo, p je počet pólových dvojíc, s je sklz a k je celé číslo.



Obr. 20) Harmonické spôsobené skratom na vinutí statoru, prevzaté z [7]

3.3.5 Zát'az

V dôsledku prítomnosti porúch v motore dochádza okrem iného k skokovým alebo nepravidelným zmenám zát'aže. Ich analýza umožňuje získať cenné informácie o technickom stave motora. Zároveň poskytuje nepriamy pohľad na stav celého pohonného systému, v ktorom je motor začlenený. Na základe priebehu zát'aže je napríklad možné diagnostikovať stav rôznych typov prevodoviek, ktoré sú s motorom priamo spojené. To umožní opraviť a vymeniť poškodené časti prevodoviek skôr, ako dôjde k vážnej poruche celého systému.

Analýzou zát'aže môžeme posúdiť efektívnosť motora na základe čoho je možné optimalizovať prevádzku. To sa prejaví znížením spotreby energie a predĺžením životnosti motora [24]. V špecifických prípadoch môžu byť zo zát'aže motora určené parametre dôležité pre výrobu. Napríklad pri miešacích zariadeniach môžeme zo zát'aže motora určiť viskozitu miešanej látky. Zvýšená zát'až sa spravidla prejaví zvýšením statorového prúdu a sklzu a znížením otáčok motora. Jedným zo spôsobov určenia zát'aže je porovnanie statorového prúdu, meraného priamo na statore alebo na napájacom kábli, s menovitým prúdom motora. Respektíve porovnaním otáčok motora so synchronnými otáčkami. Ďalší spôsob určenia zát'aže je použitie metódy MCSA, čomu sa budeme podrobnejšie venovať v ďalšej kapitole.

4 NÁVRH ALGORITMU

Cieľom tejto bakalárskej práce bolo navrhnutie a vytvorenie algoritmu na diagnostiku zmeny záťaže asynchrónneho motora na základe merania prúdu. Nasledujúca kapitola popisuje samotný algoritmus, ktorý bol vytvorený v programovacom prostredí MATLAB R2024a.

Navrhnutý algoritmus je možné koncepčne rozdeliť do troch hlavných častí. Prvou časťou je načítanie signálov určených na spracovanie a zadanie vstupných parametrov zo strany používateľa. Pre správne fungovanie algoritmu je nevyhnutné, aby sa všetky spracovávané signály nachádzali v podpriechinke s názvom „data“, ktorý musí byť uložený v rovnakom adresári ako samotný skript. V tomto priečinku musia byť súbory uložené vo formáte „mat“ a musia obsahovať minimálne dva číselné vektory, ktoré reprezentujú namerané prúdy zo statorových cievok asynchrónneho motora. Predpokladá sa, že ide o prvé dva vektory v súbore.

Po načítaní súborov skript automaticky prejde celý priečinok „data“, identifikuje všetky súbory s príponou „mat“ a načíta z nich dostupné vektory. V prípade, že sa v priečinku nenachádza žiadny vhodný súbor, je používateľ upozornený chybovým hlásením. Po úspešnom načítaní signálov skript vypíše počet spracovávaných súborov.

Následne je používateľ vyzvaný na zadanie niekoľkých dôležitých vstupných parametrov, ktoré sú nevyhnutné pre správne spracovanie a vyhodnotenie signálu. Medzi tieto parametre patrí vzorkovacia frekvencia f_s , ktorá musí zodpovedať frekvencii použitej pri meraní, ďalej menovitý prúd motora I_n , ktorý je potrebný na výpočet percentuálnej záťaže motora. Taktiež je potrebné zvoliť typ okna, ktoré sa použije pri Fourierovej transformácii – skript ponúka tri možnosti: obdĺžnikové okno, Hanningovo okno a Flat-top okno. Každé z týchto okien má svoje výhody a obmedzenia pri spracovaní frekvenčného spektra a ich výber má vplyv na presnosť identifikácie harmonických. Posledným vstupom od používateľa je tolerancia pre harmonické a vedľajšie frekvenčné píky. Tolerancia určuje frekvenčný rozsah (v Hz) okolo hlavnej a vedľajších harmonických, v ktorom algoritmus nebude vyhľadávať ďalšie harmonické. Tento parameter je kľúčový, aby nedochádzalo k chybnéj identifikácii vedľajších harmonických, ktoré by sa mohli nachádzať príliš blízko hlavnej zložky a tým skresľovať výsledky. Príliš malá tolerancia môže viesť k zachyteniu nežiaducich harmonických, zatiaľ čo príliš veľká môže naopak zamedziť detekciu relevantných frekvenčných komponentov, ktoré by mohli byť diagnosticky významné. Táto úvodná fáza (Obr. 21) zabezpečuje, že všetky vstupy do algoritmu sú správne pripravené a následné výpočty môžu byť vykonané presne a spoľahlivo.

```

cf = fileparts(mfilename('fullpath')); % Aktuálny priečinok
df = fullfile(cf, 'data'); % Zložka s dátami

% Získanie zoznamu všetkých .mat súborov
matFiles = dir(fullfile(df, '*.mat'));
p_s = length(matFiles);

if p_s == 0
    error('V zložke "data" sa nenašiel žiadny .mat súbor.');
```

```

end

disp(['Načítaných súborov: ' num2str(p_s)]);

% Parametre používateľa
fs = input('Zadaj vzorkovaciu frekvenciu s akou bol signál meraný [Hz] (test= 64000): ');
I_n = input('Zadaj menovitý prúd motora [A] (test= 2.3): ');
okno = input('Zvoľ okno (1 = obdĺžnikové, 2 = Hamming, 3 = Flat-top): ');
h_tolerancia = input('Zadaj toleranciu pre harmonické a vedľajšie píky, v ktorej nebude hľadať ďalšie píky [Hz]: ');

% Inicializácia
signals = cell(1, p_s); % signals{i}{j}

for i = 1:p_s
    filename_i = matFiles(i).name;
    fp = fullfile(df, filename_i);
    loaded = load(fp);
    disp(['Načítaný: ' filename_i]);

    vars = fieldnames(loaded);
    sig_vecs = {}; % dočasný buffer pre signal{i}

    for j = 1:length(vars)
        val = loaded.(vars{j});
        if isnumeric(val) && isvector(val)
            sig_vecs{end+1} = val; % ulož do zoznamu
        end
    end

    if isempty(sig_vecs)
        warning(['V súbore "' filename_i '" sa nenašiel žiadny číselný vektor.']);
    end
end

```

Obr. 21) Časť algoritmu spracúvajúca vstupné dáta

Druhou časťou výpočtu je samotná analýza a vyhodnotenie signálu. Podľa toho aké okno si používateľ vybral, prebehne analýza s daným oknom. Tento výber je kľúčový pre správnu interpretáciu výsledkov, pretože rôzne typy okien môžu mať výrazný vplyv na presnosť a kvalitu spektrálnej analýzy.

Pri spracovaní signálu s použitím obdĺžnikového okna (Obr. 22) algoritmus postupuje nasledovne. V prvom kroku je zo súboru načítaný prvý vektor, ktorý reprezentuje signál statorového prúdu jednej fázy motora. Zo samotnej dĺžky vektora sa určí počet vzoriek, ktorý sa následne využíva pri frekvenčnej analýze. Na prevedenie signálu z časovej do frekvenčnej oblasti sa použije rýchla Fourierova transformácia (FFT). Výsledkom tejto transformácie je komplexné spektrum, ktoré je ďalej spracované tak, že sa najskôr normalizuje a prevedie na absolútnu hodnotu, čím sa získa amplitúdové spektrum. Keďže vstupný signál je reálny, výsledné spektrum je zrkadlovo symetrické. Z tohto dôvodu sa ďalej pracuje len s jeho kladnou časťou, takzvaným jednostranným spektrom, ktoré sa ešte upraví zosilnením všetkých stredných frekvenčných zložiek (okrem prvej a poslednej), aby sa zachovala správna energetická interpretácia. Na základe takto upraveného spektra sa identifikuje dominantná frekvenčná zložka, teda tá, ktorá má najvyššiu amplitúdu. Príslušná frekvencia tejto zložky je označená ako budiaca frekvencia, zatiaľ čo jej amplitúda sa zaznamenáva samostatne. Získaná amplitúda sa následne využíva na výpočet efektívnej hodnoty prúdu, ktorá sa vypočíta

vydelením amplitúdy konštantou $\sqrt{2}$. Zátáž motora sa následne určí ako pomer efektívneho prúdu k menovitému prúdu, vyjadrený v percentách. Použitie obdĺžnikového okna znamená, že vstupný signál nie je nijako vážený, teda všetky vzorky majú rovnakú váhu. Tento prístup má výhodu vo forme veľmi dobrého frekvenčného rozlíšenia, čo umožňuje rozlíšiť aj veľmi blízko ležiace frekvenčné zložky.

Na druhej strane má však zásadné obmedzenia – najmä v presnosti identifikácie amplitúd jednotlivých zložiek. V dôsledku takzvaného spektrálneho úniku dochádza k rozptýleniu energie dominantných frekvencií do okolitých binov, čo môže viesť k vzniku falošných harmonických a zároveň k skresleniu reálnych amplitúd. Preto, aj keď obdĺžnikové okno poskytuje presné určenie frekvencií, jeho využitie na diagnostiku na základe amplitúdového spektra môže byť problematické.

```

for i = 1:p_s
    if isempty(signals{i})
        warning(['Žiadny signál pre súbor č. ' num2str(i)]);
        continue;
    end

    sig{i} = signals{i}{1}; % prvý vektor zo súboru i

    N(i) = length(sig{i});
    f{i} = (0:N(i)-1)*(fs/N(i));
    Y{i} = fft(sig{i});
    P2{i} = abs(Y{i}/N(i));
    P1{i} = P2{i}(1:round(N(i)/2)+1);
    P1{i}(2:end-1) = 2 * P1{i}(2:end-1);

    [~, idx(i)] = max(P1{i});
    z_f(i) = f{i}(idx(i));
    z_a(i) = P1{i}(idx(i));
    I_ef(i) = z_a(i) / sqrt(2);
    zataz_(i) = (I_ef(i) / I_n) * 100;

```

Obr. 22) Výpočet zátáže pomocou obdĺžnikového okna

Pri zvolení analýzy s použitím Hanningovho okna zostávajú prvé kroky algoritmu rovnaké ako v prípade obdĺžnikového okna (Obr. 23). Zo súboru sa načíta prvý vektor signálu, ktorý predstavuje jednu fázu statorového prúdu, a určí sa jeho dĺžka. Táto dĺžka slúži na vytvorenie samotného Hanningovho okna. Ide o typ váhovacej funkcie, ktorá sa využíva na zníženie vplyvu okrajových efektov spôsobených konečnou dĺžkou signálu. Jeho aplikácia vedie k potlačeniu vedľajších lalokov vo frekvenčnom spektre, čím sa eliminuje spektrálny únik, rozptyl energie dominantných frekvencií do okolitých frekvenčných zložiek. Keďže aplikácia okna spôsobuje útlm amplitúd, výsledný signál je pred ďalším spracovaním normalizovaný vydelením priemernou hodnotou použitého okna. Týmto spôsobom sa zabezpečí, že amplitúdy v spektre budú zodpovedať skutočnej energii signálu. Po aplikácii okna sa signál prevedie do frekvenčnej oblasti pomocou rýchlej Fourierovej transformácie (FFT). Výsledné spektrum sa

spracuje podobne ako v predchádzajúcom prípade. Vytvorí sa jednostranné amplitúdové spektrum, v ktorom sa identifikuje dominantná frekvenčná zložka.

Na zlepšenie presnosti určenia tejto zložky (tzv. budiacej frekvencie) sa v tomto prípade využíva Jacobsenova interpolácia. Ide o techniku, ktorá umožňuje určiť presnejšiu hodnotu frekvencie aj v prípade, že maximum amplitúdy nespadá presne na diskretnú frekvenčnú hodnotu (tzv. „bin“) spektra. Jacobsenova interpolácia pracuje s amplitúdami troch po sebe idúcich bodov – pred, v, a za maximom – a na ich základe vypočíta korekčný faktor. Ten umožňuje dopočítať interpolovanú frekvenciu a amplitúdu, čím sa dosahuje vyššia presnosť analýzy. Ak dominantná frekvenčná zložka leží presne na diskretnej binovej frekvencii, interpolácia sa neaplikuje a použijú sa pôvodné hodnoty zo spektra. Rovnako ako v predchádzajúcom prípade, efektívna hodnota prúdu sa vypočíta z amplitúdy dominantnej zložky (Obr. 24). Závaž motoru sa následne určí ako pomer efektívneho prúdu k menovitému prúdu, vyjadrený v percentách.

Hanningovo okno je veľmi vhodné na analýzu reálnych signálov, kde sa často vyskytujú ostré hrany alebo šumy, ktoré môžu spôsobiť artefakty v spektre. Aj keď mierne znižuje frekvenčné rozlíšenie v porovnaní s obdĺžnikovým oknom, jeho výhoda spočíva v zvýšenej presnosti určovania frekvencií a potlačení nežiaduceho spektrálneho úniku. V dôsledku toho sa dosahuje spoľahlivejšia identifikácia dôležitých frekvenčných komponentov signálu, čo je kľúčové pri diagnostike stavu motora na základe analýzy prúdov.

```

for i = 1:p_s
    if isempty(signals{i})
warning(['Žiadny signál pre súbor č. ' num2str(i)]);
continue;
    end

sig{i} = signals{i}{1}; % prvý vektor zo súboru i

N(i) = length(sig{i});
n = (0:N(i)-1)';
window = 0.5 * (1 - cos(2*pi*n/(N(i)-1)));

sig{i} = sig{i}(:);          % Zabezpečí stĺpcový vektor
win = window(:);           % Zabezpečí stĺpcový vektor okna

% Aplikácia okna s normalizáciou
x_windowed = sig{i} .* win;
x_windowed = x_windowed / mean(win); % Kompenzácia útlmu amplitúdy

% Frekvenčný vektor
f{i} = (0:N(i)-1)*(fs/N(i));

% Fourierova transformácia a spektrum
Y{i} = fft(x_windowed);
P2{i} = abs(Y{i}/N(i));
P1{i} = P2{i}(1:round(N(i)/2)+1);
P1{i}(2:end-1) = 2 * P1{i}(2:end-1); % Jednostranné spektrum

% Identifikácia základnej frekvencie
[~, idx(i)] = max(P1{i});

% Podmienka na interpoláciu: ak je maximum presne na bine, interpolovať nie je potrebné
if idx(i) > 1 && idx(i) < length(P1{i});
    % Parametre okolo maxima
    alpha = P1{i}(idx(i) - 1); % Amplitúda pred maximom
    beta = P1{i}(idx(i));      % Amplitúda maxima
    gamma = P1{i}(idx(i) + 1); % Amplitúda za maximom

    % Jacobsenova interpolácia na frekvenciu (použitie hodnôt okolo maxima)
    p = (alpha - gamma) / (2 * (alpha - 2*beta + gamma)); % Korekcia pozície (frekvencia)

```

Obr. 23) Prvá časť výpočtu pomocou Hanningovho okna

```

    % Určenie interpolovanej frekvencie
    z_f(i) = f{i}(idx(i)) + p * (f{i}(2) - f{i}(1)); % Oprava frekvencie
    z_a(i) = beta - 0.25 * (alpha - gamma) * p;     % Interpolovaná amplitúda
else
    % Ak maximum je presne na bine, použijeme len základné hodnoty
    z_f(i) = f{i}(idx(i)); % Presná frekvencia
    z_a(i) = P1{i}(idx(i)); % Amplitúda bez interpolácie
end

% Výpočet efektívnej hodnoty prúdu
I_ef(i) = z_a(i) / sqrt(2);

% Výpočet záťaže
zataz_(i) = (I_ef(i) / I_n) * 100;

```

Obr. 24) Druhá časť výpočtu pomocou Hanningovho okna

Posledným oknom, ktoré je možné zvoliť pri analýze signálu, je Flat-Top okno (Obr. 25). Jeho hlavnou výhodou je vysoká presnosť merania amplitúd vo frekvenčnej oblasti, čo ho predurčuje na úlohy, kde je práve presnosť amplitúdy dominantných zložiek kľúčová.

Na začiatku algoritmu je opäť načítaný prvý vektor signálu (jedna fáza statorového prúdu), pričom sa určí jeho dĺžka. Na základe tejto dĺžky sa vytvorí Flat-Top okno pomocou príslušnej váhovacej funkcie. Táto funkcia má špecifický tvar, ktorý zabezpečuje veľmi plochý vrchol, preto názov „Flat-Top“, čo vedie k veľmi malým zmenám amplitúd medzi susednými frekvenciami vo frekvenčnom spektre. To výrazne znižuje chyby pri určení amplitúd. Po aplikácii okna je signál normalizovaný pomocou priemernej hodnoty samotného okna. Táto kompenzácia slúži na odstránenie útlmu amplitúd, ktorý je spôsobený tvarom a vlastnosťami Flat-Top okna. Takto upravený signál je transformovaný do frekvenčnej oblasti pomocou FFT, z ktorého sa vytvorí jednostranné spektrum. V tomto spektre sa identifikuje dominantná frekvenčná zložka pomocou maximálnej hodnoty amplitúdy.

V tejto analýze sa používa parabolická interpolácia na spresnenie frekvencie a amplitúdy maximálnej zložky. Táto metóda pracuje s amplitúdami troch po sebe nasledujúcich bodov v spektre – pred maximom, v maxime a za maximom – a na ich základe vytvorí parabolu, ktorá umožní presnejšie určiť polohu frekvenčného maxima medzi diskretnými bodmi FFT. Výsledkom je interpolovaná hodnota frekvencie a amplitúdy. Ak maximum leží presne na binovej frekvencii, napríklad prvý alebo posledný bod spektra, interpolácia sa neaplikuje a použijú sa pôvodné hodnoty.

Rovnako ako v predošlých prípadoch, sa efektívna hodnota prúdu vypočíta z interpolovanej, alebo pôvodnej, amplitúdy. Zátťaž motora sa následne určí ako pomer efektívneho prúdu k menovitému prúdu, vyjadrený v percentách.

Flat-Top okno je obzvlášť vhodné pri meraniach, kde je rozhodujúca presnosť amplitúdy, napríklad pri kalibrácii alebo testovaní. Jeho nevýhodou však môže byť znížené časové a frekvenčné rozlíšenie, čo znamená, že nie je také presné pri rozlišovaní blízko ležiacich frekvenčných zložiek ako napríklad Hanningovo okno. Preto je jeho použitie výhodné najmä v situáciách, kde presnosť frekvencie nie je prioritou, ale rozhoduje presná identifikácia amplitúdy signálu.

```

sig{i} = signals{i}{1}; % prvý vektor zo súboru i

N(i) = length(sig{i});
n = (0:N(i)-1)';
windowft = 1 - 1.93*cos(2*pi*n/(N(i)-1)) + 1.29*cos(4*pi*n/(N(i)-1)) ...
- 0.388*cos(6*pi*n/(N(i)-1)) + 0.028*cos(8*pi*n/(N(i)-1));

% Kompenzácia útlmu okna (amplitúdová korekcia)
sig{i} = sig{i}(:);
winft = windowft(:);
x_windowed = (sig{i} .* winft) / mean(windowft);

% FFT a spektrum
Y{i} = fft(x_windowed);
f_step = fs/N(i); % rozlíšenie FFT
f{i} = (0:N(i)-1)*(f_step);
P2{i} = abs(Y{i}/N(i));
P1{i} = P2{i}(1:round(N(i)/2)+1);
P1{i}(2:end-1) = 2 * P1{i}(2:end-1); % zrkadlenie pre jedno-sided spektrum

% Nájdenie maxima v spektre
[~, idx_peak] = max(P1{i});
if idx_peak > 1 && idx_peak < length(P1{i})
    % Parabolická interpolácia ak maximum nie je na okraji
    alpha = P1{i}(idx_peak - 1);
    beta = P1{i}(idx_peak);
    gamma = P1{i}(idx_peak + 1);

    % Korekcia pozície pomocou parabolickej aproximácie
    p = 0.5 * (alpha - gamma) / (alpha - 2*beta + gamma);

    % Interpolovaná frekvencia a amplitúda
    z_f(i) = (idx_peak - 1 + p) * f_step;
    z_a(i) = beta - 0.25 * (alpha - gamma) * p;
else
    % Bez interpolácie (maximum je na okraji)
    z_f(i) = f{i}(idx_peak);
    z_a(i) = P1{i}(idx_peak);
end

% Výpočet efektívnej hodnoty prúdu a zaťaženia
I_ef(i) = z_a(i) / sqrt(2);
zataz_(i) = (I_ef(i) / I_n) * 100;

```

Obr. 25) Výpočet použitím Flat-Top okna

Nezávisle na tom, aké okno je používateľom zvolené, je použitá Clarkova transformácia (Obr. 26). Tento spôsob sa v elektrotechnike často používa na spracovanie trojfázových signálov v jednoduchej dvojfázovej sústave, čo je veľmi výhodné napríklad pri diagnostike, riadení pohonov či analýze symetrie. Predpokladá sa, že v každom meranom súbore sa nachádzajú vektory dvoch fáz motora, pričom tretia fáza nie je meraná, ale

dopočítavaná pomocou Kirchhoffovho zákona pre ideálne symetrické trojfázové sústavy. Následne sa vykoná Clarkova transformácia, ktorá prevedie trojfázové hodnoty do dvojrozmerného systému zložiek i_α a i_β .

```

    % Inicializácia premennej
    vek3 = cell(1, p_s);
    i_alfa = cell(1, p_s);
    i_beta = cell(1, p_s);
    Q = cell(1, p_s);
    Im = cell(1, p_s);

    for i = 1:p_s
        vek1{i} = signals{i}{1}; % prvý vektor zo súboru i
        vek2{i} = signals{i}{2}; % druhý vektor zo súboru i

        % Vytvorenie vek3 ako - (vek1 + vek2)
        vek3{i} = -(vek1{i} + vek2{i});

        % Výpočet i_alfa a i_beta pre každý súbor
        i_alfa{i} = vek1{i} - 0.5 * vek2{i} - 0.5 * vek3{i};
        i_beta{i} = ((sqrt(3) / 2) * vek2{i}) - ((sqrt(3) / 2) * vek3{i});

        % Výpočet Q a Im pre každý súbor
        Q{i} = abs(sqrt(i_alfa{i}.^2 + i_beta{i}.^2));
        Im{i} = 2 / 3 * Q{i};
    end

```

Obr. 26) Clarkova transformácia

Tieto zložky predstavujú premietnutie prúdového vektora do ortogonálneho súradnicového systému, takzvaná α - β rovina. Z týchto dvoch zložiek sa vypočíta veľkosť výsledného prúdového vektora pomocou Pytagorovej vety. Nakoniec sa vypočíta vektor okamžitej amplitúdy I_m vynásobením konštantou $2/3$. Tento krok slúži na korektnú rekonštrukciu amplitúdy v dvojrozmernom priestore, zodpovedajúcu reálnym hodnotám prúdu v trojfázovom systéme.

Ďalšou časťou výpočtu, ktorá je spoločná pre všetky tri varianty, je určenie štyroch najväčších vedľajších harmonických (Obr. 27). Na začiatku sa stanoví frekvenčný rozsah záujmu, ktorý je obmedzený na interval od 1 Hz po dvojnásobok základnej frekvencie. Následne sa v tomto rozsahu vyhľadajú indexy, ktoré spĺňajú podmienku, že sú v danom rozsahu. Zo zoznamu vybraných frekvencií sa potom vylúčia hlavná a druhá harmonická zložka. Tým sa zabezpečí, že v ďalšom hľadaní sa nebudú znovu vyberať dominantné frekvencie, ktoré sú očakávané a nezaujímavé z hľadiska diagnostiky porúch. Po tomto filtrovaní sa zo zvyšných frekvencií a ich príslušných amplitúd vyberajú takzvané vedľajšie harmonické, teda najvýraznejšie ďalšie frekvenčné komponenty. Zo zostávajúcich frekvencií sa nájde taká, ktorá má najvyššiu amplitúdu. Táto frekvencia a jej amplitúda sa uložia. Potom sa zo zoznamu kandidátov odstránia všetky frekvencie, ktoré sa nachádzajú v okolí \pm tolerancia, zadaná používateľom, tejto práve pridanej frekvencie. Toto zabezpečuje, že sa v ďalších krokoch nevyberú ďalšie frekvencie, ktoré patria k tej istej harmonickej, napríklad šum v okolí

maxima alebo mierne rozdelené harmonické. Týmto spôsobom sa zabezpečí, že medzi výslednými vedľajšími harmonickými budú dobre oddelené dominantné zložky, ktoré sú potenciálne nositeľmi informácií o anomáliách v systéme, ako napríklad poškodenia ložísk, mechanická nevyváženosť alebo chyby v rotoroch.

```

% Platný frekvenčný rozsah
freq_limit = 2 * z_f(i);
valid_idx = find(f{i} > 1 & f{i} < freq_limit);

% Vylúčenie hlavnej a 2. harmonickej
harmonic_freqs = [z_f(i), 2*z_f(i)];
for h = harmonic_freqs
    exclude = abs(f{i}(valid_idx) - h) < h_tolerancia;
    valid_idx(exclude) = [];
end

% Pripravenie kandidátov
candidate_freqs = f{i}(valid_idx);
candidate_amps = P1{i}(valid_idx);

% Inicializácia výsledkov
extra_freqs = [];
extra_amps = [];

% Maximálne 4 výrazné píky
max_peaks = 4;
remaining_idx = 1:length(candidate_freqs);

while length(extra_freqs) < max_peaks && ~isempty(remaining_idx)
    % Nájdi index maxima zo zostávajúcich
    [~, local_max_idx] = max(candidate_amps(remaining_idx));
    best_idx = remaining_idx(local_max_idx);

    % Ulož aktuálny peak
    extra_freqs(end+1) = candidate_freqs(best_idx);
    extra_amps(end+1) = candidate_amps(best_idx);

    % Vylúč všetky frekvencie v itolerancii od tohto peaku
    peak_tolerance = h_tolerancia;
    nearby = abs(candidate_freqs - candidate_freqs(best_idx)) < peak_tolerance;

    % Odstráň indexy z remaining_idx, ktoré sú v blízkosti
    remaining_idx = setdiff(remaining_idx, find(nearby));
end
% Uloženie do buniek
extra_freqs_all{i} = extra_freqs;
extra_amps_all{i} = extra_amps;
end

```

Obr. 27) Hľadanie vedľajších harmonických

Poslednou časťou algoritmu je vykreslenie grafov a vypísanie vypočítaných hodnôt do tabuľky. Účelom je nielen uložiť spracované údaje do prehľadnej tabuľky, ale aj umožniť používateľovi tieto výsledky vizuálne posúdiť prostredníctvom grafov. Po spracovaní jednotlivých signálov sa vytvára súhrnná tabuľka, do ktorej sa pre každý meraný prípad uloží viacero údajov vrátane

názvu súboru, základnej budiacej frekvencie, jej amplitúdy, efektívnej hodnoty prúdu, vypočítanej záťaže a zoznamu vedľajších harmonických frekvencií spolu s ich amplitúdami. Skript zároveň vytvára hlavičku s informáciami o meraní, ako je použitá vzorkovacia frekvencia, menovitý prúd motora a typ okna použitý počas spektrálnej analýzy. Následne sa tabuľka automaticky ukladá do textového súboru v aktuálnom adresári skriptu. Skript skontroluje, či už súbor s predvoleným názvom existuje, a v prípade potreby priraduje číslovanie, aby sa zabránilo prepísaniu existujúcich dát. V poslednej časti skriptu sa pre každý signál vytvorí samostatné okno, v ktorom sú zobrazené tri grafy. Prvý graf znázorňuje časový priebeh signálu, teda surový signál v časovej doméne, čo umožňuje vizuálne posúdiť jeho symetriu či šum. Druhý graf zobrazuje spektrum signálu až do dvojnásobku budiacej frekvencie v logaritmickej mierke, čo slúži na zvýraznenie slabších harmonických zložiek. Tretí graf ukazuje okamžitú hodnotu prúdu v čase, ktorá môže byť použitá ako ukazovateľ momentálneho zaťaženia alebo dynamického správania sa stroja.

Týmto algoritmom bolo vyhodnotených desať signálov. Pri meraniach signálov bol motor napájaný cez frekvenčný menič striedavým prúdom s frekvenciou 60 Hz. Menovitý prúd motora I_n bol 2,3 A. Meranie signálu prebiehalo štyri sekundy so vzorkovacou frekvenciou 64 kHz. Vyhodnocované dáta boli získané z projektu fakulty strojného inžinierstva Paderborskej Univerzity v Nemecku [20]. Tento projekt sa zaoberal vyhodnocovaním signálu motora s poškodeným ložiskom. V rámci tej práce, bolo meraných viacero signálov, za rôznych pracovných podmienok. Na začiatku boli vykonané meranie na motore bez porúch, ktoré slúžili ako referenčný stav. Výsledkom týchto meraní bola séria signálov, ktoré okrem statorových prúdov, obsahovali aj ďalšie informácie o motore ako teplota, otáčky atď. Z týchto signálov, boli pomocou iného, jednoduchého algoritmu, vybraté iba dva vektory statorových prúdov, a uložené do súboru. Takto bolo z desiatich rôznych meraní získaná skupina signálov, ktoré obsahujú iba tieto vektory a boli vyhodnocované.

5 VÝSLEDKY A GRAFY

Po spracovaní prúdových signálov bola pre každý zo súborov vytvorená sada výstupov vo forme grafických znázornení a tabuľkovej sumarizácie. Tieto výstupy slúžia na komplexnú analýzu stavu motora a na identifikáciu prípadných anomálií či vedľajších frekvenčných zložiek, ktoré môžu indikovať mechanické alebo elektrické poruchy. Hlavné zameranie bolo však na diagnostiku záťaže motora.

Pre každý spracovaný súbor signálov boli vygenerované tri samostatné grafy, ktoré boli zobrazené v jednom okne (Obr. 28). Prvý graf znázorňuje časový priebeh prúdového signálu v doméne času. Na osi x je zobrazený čas v sekundách a na osi y amplitúda prúdu v ampéroch. Tento priebeh umožňuje vizuálne zhodnotiť základné charakteristiky signálu, ako sú periodickosť, výskyt porúch alebo šum.

Druhý graf reprezentuje amplitúdové spektrum signálu získané pomocou rýchlej Fourierovej transformácie (FFT). Spektrum je obmedzené do rozsahu dvojnásobku budiacej frekvencie, čo zaisťuje dostatočné zobrazenie hlavnej harmonickej a prípadných vedľajších frekvenčných komponentov. Vzhľadom na rozdiely v amplitúdach jednotlivých zložiek je spektrum znázornené v logaritmickom meradle na osi y . Táto vizualizácia umožňuje jednoducho identifikovať dominantné frekvencie a odhaliť zložky, ktoré by mohli naznačovať poškodenie ložísk, excentrickosť alebo iné mechanické poruchy.

Tretí graf zobrazuje okamžitú hodnotu prúdu vypočítanú pomocou transformácie do α - β roviny. Ide o odhad amplitúdy vektorového prúdu v čase, ktorý je získaný kombináciou zložiek i_α a i_β . Tento priebeh poukazuje na dynamické zmeny zaťaženia a môže byť použitý pri sledovaní nestacionárnych stavov.

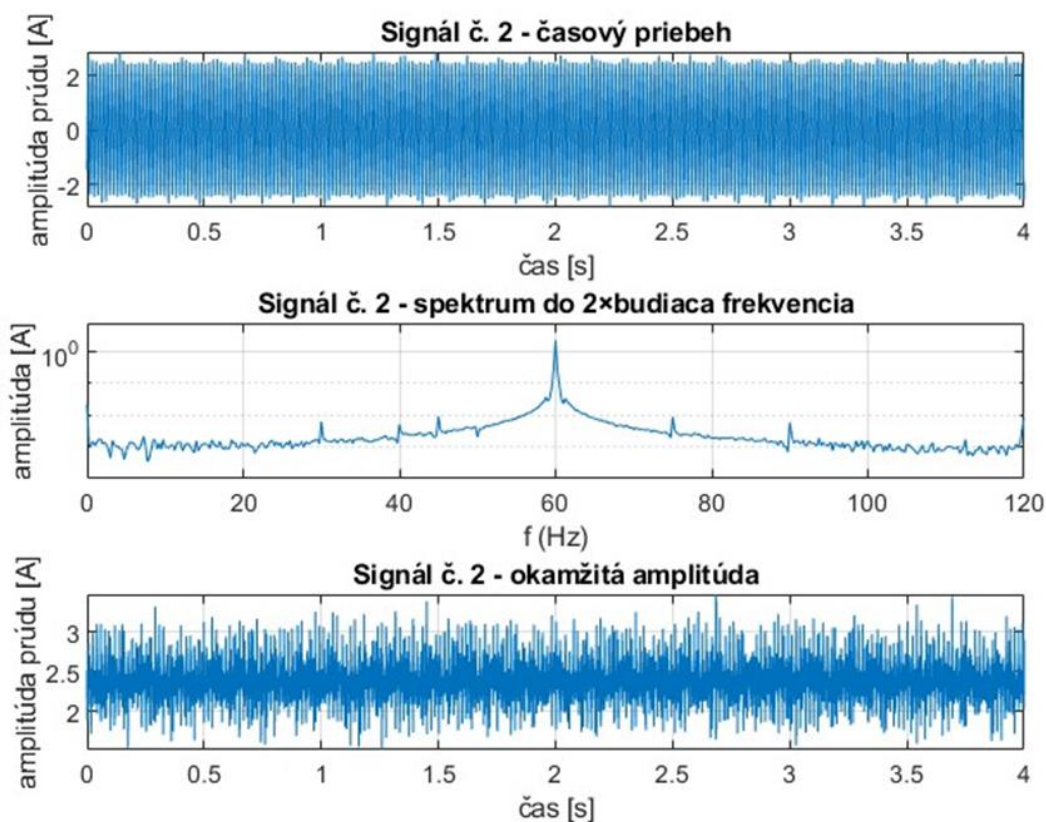
Súhrnné numerické výsledky boli automaticky zapísané do tabuľky, ktorá obsahuje jeden riadok pre každý spracovaný signál (Tabuľka 1). V jednotlivých stĺpcoch výsledkovej tabuľky sa nachádzajú kľúčové údaje získané zo spracovania prúdových signálov. Prvý stĺpec označený ako „Súbor“ obsahuje názov zdrojového súboru, z ktorého bol analyzovaný signál načítaný. Nasleduje stĺpec „Budiaca frekvencia [Hz]“, ktorý uvádza identifikovanú hlavnú frekvenciu signálu, zodpovedajúcu základnej harmonickej zložke, pričom táto frekvencia bola určená pomocou spektrálnej analýzy vrátane interpolácie maxima, ak to bolo potrebné. Ďalší stĺpec, „Amplitúda [A]“, predstavuje amplitúdu hlavnej frekvenčnej zložky, ktorá bola buď priamo odčítaná zo spektra, alebo spresnená pomocou interpolácie okolo spektrálneho maxima. V stĺpci „Efektívny prúd [A]“ sa nachádza efektívna hodnota prúdu, vypočítaná z amplitúdy hladnej zložky. Táto hodnota je kľúčová pre posúdenie elektrického zaťaženia motora. Stĺpec „Záťaž [%]“ udáva percentuálne vyjadrenie zaťaženia motora vzhľadom na jeho menovitý prúd, čím poskytuje praktickú informáciu o prevádzkovom stave zariadenia. Posledné dva stĺpce obsahujú informácie o ďalších výrazných zložkách v spektre, ktoré nepatria medzi základnú a druhú harmonickej. Konkrétne, stĺpec „Vedľajšie frekvencie [Hz]“ obsahuje zoznam týchto dodatočných frekvencií, zatiaľ čo „Vedľajšie amplitúdy [A]“ uvádza ich zodpovedajúce amplitúdy. Tieto údaje môžu byť významné pre diagnostiku nežiaducich javov, ako sú harmonické poruchy alebo mechanické nerovnováhy.

Údaje v tabuľke umožňujú rýchly prehľad o frekvenčnom správaní jednotlivých signálov a pomáhajú identifikovať vzory, ktoré by mohli súvisieť s konkrétnym typom poruchy. Zároveň poskytujú porovnateľné hodnoty pre rôzne zaťaženia.

Vizualizované a numerické výsledky poskytujú komplexný pohľad na stav motora. Základná frekvencia a jej amplitúda predstavujú hlavný chod motora, zatiaľ čo vedľajšie zložky môžu indikovať poruchové javy. Výpočet efektívnej hodnoty prúdu a záťaže umožňuje kvantifikovať pracovný stav motora a odhadnúť, či pracuje v normálnych alebo nadmerne zaťažených podmienkach. Tieto informácie môžu byť následne využité pri plánovaní údržby, detekcii začínajúcich porúch a vylepšovaní prevádzkových stratégií.

Z dôvodu zvýšenia presnosti analýzy a demonštrovania funkčnosti, bol celý diagnostický algoritmus aplikovaný trikrát, pričom pri každom spustení bol použitý iný typ okna pre spektrálnu analýzu: Obdĺžnikové, Hanningovo a Flat-Top okno. Každé z týchto okien má špecifické vlastnosti z hľadiska rozlíšenia a amplitúdovej presnosti vo frekvenčnej oblasti. Týmto spôsobom bolo možné porovnať, ktoré z použitých okien poskytuje najstabilnejšie a najpresnejšie výsledky pri diagnostike záťaže a identifikácii harmonických zložiek.

Obdĺžnikové okno predstavuje základné okno bez akéhokoľvek váhania, kde majú všetky vzorky rovnakú hodnotu. Jeho výhodou je vysoké frekvenčné rozlíšenie, avšak za cenu výrazného postranného prieniku energie do okolitých frekvencií. V kontexte spracovania motorických prúdových signálov sa toto okno ukázalo ako nevhodné najmä pri detekcii vedľajších frekvencií, pretože silné postranné zložky zatieňujú menej výrazné harmonické komponenty. Pri výpočte záťaže tak môže dôjsť k skresleniu, najmä ak sa v okolí dominantnej zložky nachádzajú ďalšie spektrálne línie.

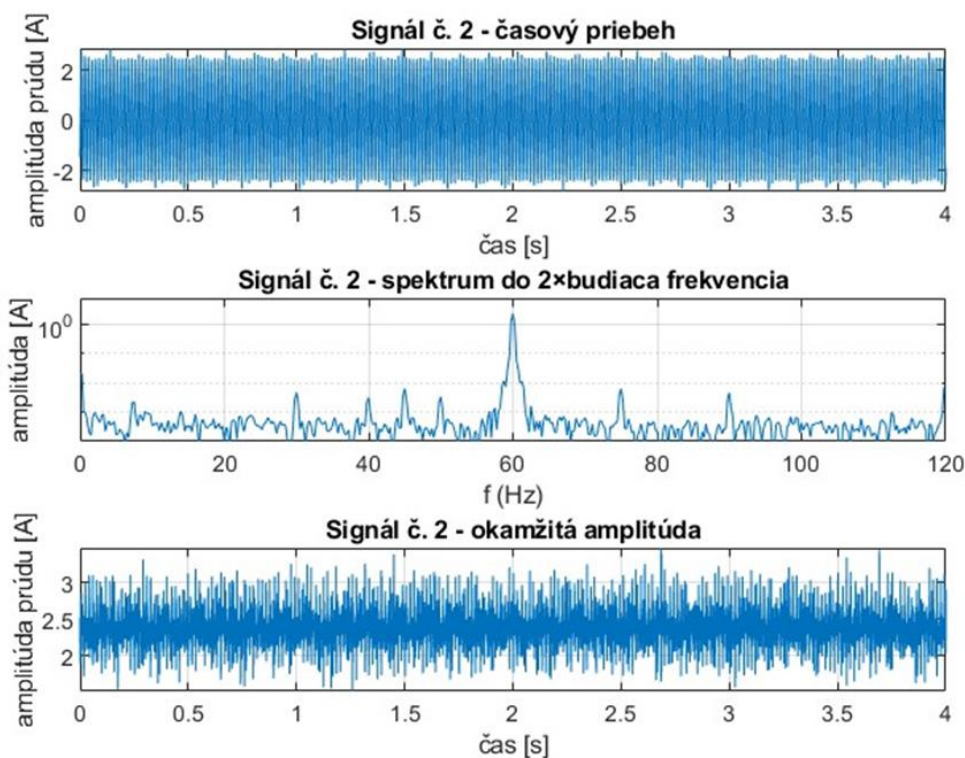


Obr. 28) Vykreslené grafy pre jeden zo signálov analyzovaných pomocou obdĺžnikového okna

Tabuľka 1: Výsledky analýzy pomocou obdĺžnikového okna

Vzorkovacia frekvencia : 64000 Hz						
Menovitý prúd : 2.3 A						
Okno: Obdĺžnikové						
Súbor	Budiaca frekvencia [Hz]	Amplítuda [A]	Efektívny prúd [A]	Zát'az [%]	Vedľajšie frekvencie [Hz]	Vedľajšie amplitúdy [A]
N09_M07_F10_K001_1_export	60.05669	1.9831	1.4023	60.9679	57.81, 62.3, 55.57, 64.54	0.068, 0.063, 0.035, 0.032
N09_M07_F10_K001_2_export	59.99976	2.32520	1.6441	71.4855	57.75, 62.25, 45, 55.5	0.018, 0.018, 0.009, 0.009
N09_M07_F10_K002_1_export	59.99976	2.41172	1.7053	74.1454	57.75, 62.25, 55.5, 64.5	0.026, 0.024, 0.013, 0.013
N09_M07_F10_K002_2_export	59.99976	2.37943	1.6825	73.1528	57.75, 62.5, 55.5, 64.75	0.015, 0.014, 0.007, 0.007
N09_M07_F10_K002_3_export	59.99976	2.38445	1.6860	73.3072	57.5, 62.25, 64.5, 55.25	0.015, 0.015, 0.009, 0.008
N09_M07_F10_K003_1_export	60	2.28419	1.6151	70.2247	58, 62, 64, 56	0.027, 0.027, 0.013, 0.013
N09_M07_F10_K003_2_export	59.99976	2.32417	1.6434	71.4539	62.25, 57.75, 64.5, 55.5	0.017, 0.017, 0.009, 0.008
N09_M07_F10_K004_1_export	59.99953	1.78170	1.2598	54.7764	62.25, 57.75, 64.5, 55.5	0.045, 0.035, 0.02, 0.018
N09_M07_F10_K004_2_export	60.06246	1.91438	1.3536	58.8554	57.85, 62.28, 55.63, 64.49	0.075, 0.068, 0.038, 0.034
N09_M07_F10_K004_3_export	59.99976	2.31282	1.6354	71.1050	57.75, 62.25, 64.5, 55.5	0.019, 0.018, 0.01, 0.01

Hanningovo okno znižuje amplitúdu postranných lalokov výraznejšie než obdĺžnikové okno, čím znižuje únik spektra (Obr. 29). Má mierne širší hlavný lalok, čo spôsobuje nižšie frekvenčné rozlíšenie, ale zároveň výrazne potláča okolité šumové alebo parazitné zložky. V testovaných prípadoch poskytlo stabilné výsledky pre výpočet efektívneho prúdu aj zát'aze a umožnilo dostatočne presne identifikovať dominantnú frekvenciu (Tabuľka 2). Vedľajšie frekvencie však boli detegované s menšou amplitúdovou presnosťou než pri použití Flat-Top okna.

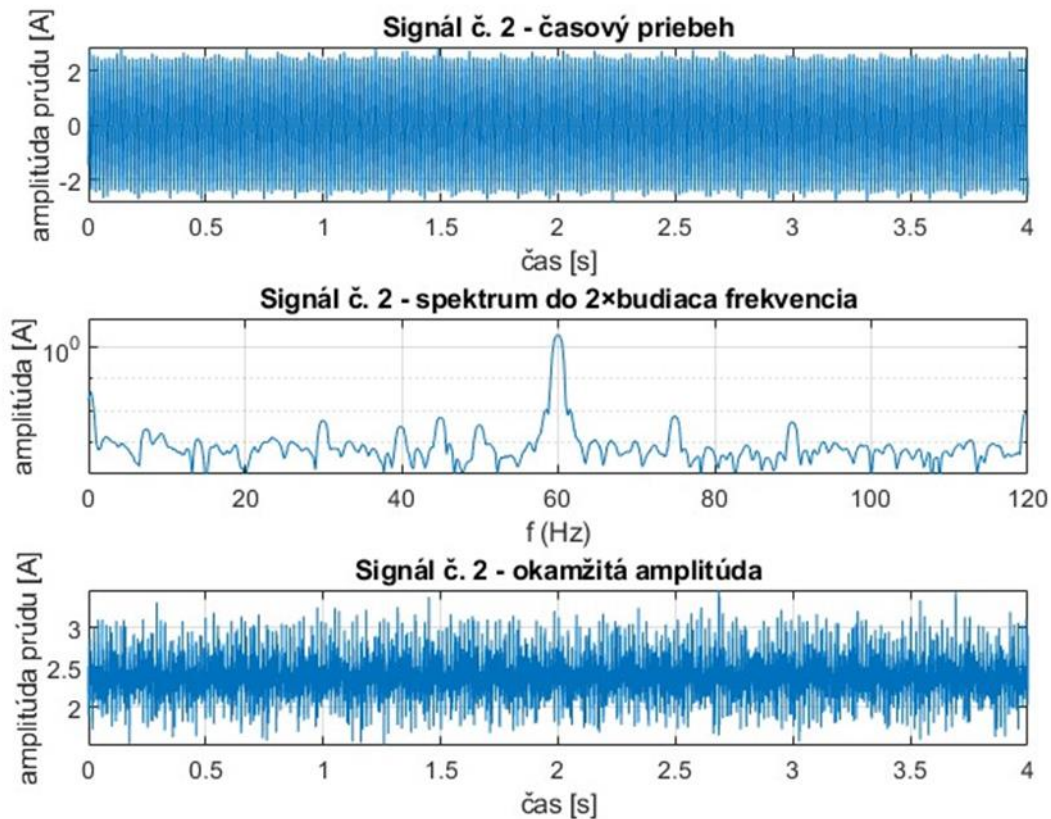


Obr. 29) : Vykreslené grafy pre jeden zo signálov analyzovaných pomocou Hanningovho okna

Tabuľka 2: Výsledky analýzy pomocou Hanningovho okna

Vzorkovacia frekvencia : 64000 Hz Menovitý prúd : 2.3 A Okno: Hanning						
Súbor	Budiaca frekvencia [Hz]	Amplitúda [A]	Efektívny prúd [A]	Zát'až [%]	Ved'ajšie frekvencie [Hz]	Ved'ajšie amplitúdy [A]
N09_M07_F10_K001_1_export	60.05669	1.9831	1.4023	60.9679	57.81, 62.3, 55.57, 64.54	0.068, 0.063, 0.035, 0.032
N09_M07_F10_K001_2_export	59.99976	2.32520	1.6441	71.4855	57.75, 62.25, 45, 55.5	0.018, 0.018, 0.009, 0.009
N09_M07_F10_K002_1_export	59.99976	2.41172	1.7053	74.1454	57.75, 62.25, 55.5, 64.5	0.026, 0.024, 0.013, 0.013
N09_M07_F10_K002_2_export	59.99976	2.37943	1.6825	73.1528	57.75, 62.5, 55.5, 64.75	0.015, 0.014, 0.007, 0.007
N09_M07_F10_K002_3_export	59.99976	2.38445	1.6860	73.3072	57.5, 62.25, 64.5, 55.25	0.015, 0.015, 0.009, 0.008
N09_M07_F10_K003_1_export	60	2.28419	1.6151	70.2247	58, 62, 64, 56	0.027, 0.027, 0.013, 0.013
N09_M07_F10_K003_2_export	59.99976	2.32417	1.6434	71.4539	62.25, 57.75, 64.5, 55.5	0.017, 0.017, 0.009, 0.008
N09_M07_F10_K004_1_export	59.99953	1.78170	1.2598	54.7764	62.25, 57.75, 64.5, 55.5	0.045, 0.035, 0.02, 0.018
N09_M07_F10_K004_2_export	60.06246	1.91438	1.3536	58.8554	57.85, 62.28, 55.63, 64.49	0.075, 0.068, 0.038, 0.034
N09_M07_F10_K004_3_export	59.99976	2.31282	1.6354	71.1050	57.75, 62.25, 64.5, 55.5	0.019, 0.018, 0.01, 0.01

Flat-Top okno je optimalizované pre presné meranie amplitúd spektrálnych komponentov. Má široký hlavný lalok, čo znamená nižšie frekvenčné rozlíšenie, ale veľmi plochý tvar a minimalizovaný útlm hlavných frekvencií (Obr. 30). V kontexte tejto analýzy sa ukázalo ako najpresnejšie pre určenie amplitúdy budiacej frekvencie a výpočtu efektívneho prúdu. Taktiež umožnilo najspoľahlivejšiu detekciu vedľajších frekvenčných zložiek, a to aj pri ich nízkych amplitúdach.



Obr. 30) Vykreslené grafy pre jeden zo signálov analyzovaných pomocou Flat-Top okna

Na základe porovnania výsledkov z algoritmu možno za najvhodnejšie okno na určenie záťaže považovať Flat-Top okno. Jeho amplitúdová presnosť zabezpečila najstabilnejší a najrealistickejší výpočet efektívnej hodnoty prúdu, čo je kľúčové pre spoľahlivé určenie zaťaženia motora (Tabuľka 3). Napriek nižšiemu frekvenčnému rozlíšeniu poskytlo najlepší kompromis medzi potlačením rušivých zložiek a zachovaním relevantných diagnostických informácií v spektre. Preto bolo zvolené ako najlepší spôsob určenia záťaže, a namerané hodnoty v tabuľke sú najpresnejšie.

Tabuľka 3: Výsledky analýzy pomocou Flat-Top okna

Vzorkovacia frekvencia : 64000 Hz						
Menovitý prúd : 2.3 A						
Okno: Flat-Top						
Súbor	Budiaca frekvencia [Hz]	Amplitúda [A]	Efektívny prúd [A]	Zát'az [%]	Ved'ajšie frekvencie [Hz]	Ved'ajšie amplitúdy [A]
N09_M07_F10_K001_1_export	60.05669	1.9831	1.4023	60.9679	57.81, 62.3, 55.57, 64.54	0.068, 0.063, 0.035, 0.032
N09_M07_F10_K001_2_export	59.99976	2.32520	1.6441	71.4855	57.75, 62.25, 45, 55.5	0.018, 0.018, 0.009, 0.009
N09_M07_F10_K002_1_export	59.99976	2.41172	1.7053	74.1454	57.75, 62.25, 55.5, 64.5	0.026, 0.024, 0.013, 0.013
N09_M07_F10_K002_2_export	59.99976	2.37943	1.6825	73.1528	57.75, 62.5, 55.5, 64.75	0.015, 0.014, 0.007, 0.007
N09_M07_F10_K002_3_export	59.99976	2.38445	1.6860	73.3072	57.5, 62.25, 64.5, 55.25	0.015, 0.015, 0.009, 0.008
N09_M07_F10_K003_1_export	60	2.28419	1.6151	70.2247	58, 62, 64, 56	0.027, 0.027, 0.013, 0.013
N09_M07_F10_K003_2_export	59.99976	2.32417	1.6434	71.4539	62.25, 57.75, 64.5, 55.5	0.017, 0.017, 0.009, 0.008
N09_M07_F10_K004_1_export	59.99953	1.78170	1.2598	54.7764	62.25, 57.75, 64.5, 55.5	0.045, 0.035, 0.02, 0.018
N09_M07_F10_K004_2_export	60.06246	1.91438	1.3536	58.8554	57.85, 62.28, 55.63, 64.49	0.075, 0.068, 0.038, 0.034
N09_M07_F10_K004_3_export	59.99976	2.31282	1.6354	71.1050	57.75, 62.25, 64.5, 55.5	0.019, 0.018, 0.01, 0.01

6 POUŽITIE A OBMEDZENIA ALGORITMU

Algoritmus použitý na spracovanie prúdových signálov elektrického motora je založený na frekvenčnej analýze pomocou diskkrétnej Fourierovej transformácie. Jeho hlavným cieľom je identifikovať základnú harmonickú zložku signálu, určiť jej amplitúdu, a na jej základe vypočítať efektívnu hodnotu prúdu. Tá následne slúži ako vstup pre výpočet percentuálneho zaťaženia motora vo vzťahu k jeho menovitému prúdu. Okrem hlavnej harmonickej algoritmus deteguje aj ďalšie výrazné frekvenčné zložky, ktoré sa v spektre vyskytujú po vylúčení základnej a druhej harmonickej. Tieto vedľajšie frekvencie môžu byť indikatívne pre rôzne typy porúch, ako sú napríklad poškodenia ložísk, mechanická nerovnováha či elektrické asymetrie.

Dôležitou súčasťou algoritmu je aplikácia váhovacích okien na časové signály pred samotným výpočtom spektra. Tým sa potláča spektrálny únik, takzvaný „leakage“, znižuje sa vplyv okrajových efektov a zlepšuje sa rozlíšenie frekvencií a amplitúd.

Použité boli tri typy okien – obdĺžnikové, Hanningovo a Flat Top – pričom každé z nich má odlišné vlastnosti, ktoré ovplyvňujú výslednú presnosť analýzy. Na zvýšenie presnosti identifikácie hlavnej frekvencie algoritmus využíva interpoláciu spektrálneho maxima. Táto interpolácia umožňuje presnejšie určenie polohy harmonickej v spektre, aj keď daný harmonický bod neleží presne na diskrétnom frekvenčnom indexe spektra. V závislosti od toho, kde sa maximum nachádza, a aké okno je zvolené, sa použije buď Jacobsenova, alebo parabolická interpolácia.

Aj napriek svojim výhodám má algoritmus niektoré obmedzenia. Je citlivý na kvalitu vstupných dát – prítomnosť šumu, rušenia alebo nelineárnych javov môže negatívne ovplyvniť presnosť výpočtov. Výsledky sú do značnej miery ovplyvnené výberom spektrálneho okna, pretože každé z nich preferuje iný aspekt. Napríklad Hanningovo okno zabezpečuje lepšie frekvenčné rozlíšenie, zatiaľ čo Flat Top okno poskytuje presnejšie údaje o amplitúde. Ďalej algoritmus predpokladá, že najvýraznejšia harmonická zložka v spektre korešponduje s budiacou frekvenciou, čo však nemusí vždy platiť, najmä v prípade komplikovanejších porúch alebo viacerých zdrojov excitácie. Napriek týmto obmedzeniam algoritmus poskytuje dostatočne presné a spoľahlivé výsledky pre potreby technickej diagnostiky a hodnotenia zaťaženia elektrických pohonov. Jeho silnou stránkou je najmä kombinácia frekvenčnej analýzy, interpolácie a práce s rôznymi typmi okien, čo umožňuje flexibilné prispôsobenie analýzy rôznym typom signálov a diagnostickým požiadavkám.

7 ZÁVER

Prvá časť tejto bakalárskej práce sa venovala analýze princípu činnosti asynchrónneho motora. Podrobne bol vysvetlený vznik a priebeh točivého magnetického poľa, ako aj jeho vzájomné pôsobenie medzi statorom a rotorom. Boli popísané konštrukčné časti motora a objasnený princíp jeho činnosti, ktorý je nevyhnutné poznať pre správne pochopenie ďalšej časti práce. Kľúčovým aspektom pri diagnostike motora na základe prúdových signálov je totiž pochopenie toho, ako sa točivé magnetické polia vytvárajú a ovplyvňujú a akým spôsobom sa tieto interakcie odrážajú v statorovom prúde.

V nadväznosti na to bola v ďalšej kapitole stručne objasnená problematika signálov, ich základné rozdelenie a princípy spracovania. Hoci samotné spracovanie signálu nie je hlavnou témou práce, pre správnu interpretáciu výstupov algoritmu je základná orientácia v tejto oblasti nevyhnutná.

Druhá časť práce bola zameraná na prehľad aktuálne využívaných metód pri diagnostike elektrických motorov na základe prúdových meraní, pričom bol hlavný dôraz kladený na metódu známej ako Motor Current Signature Analysis (MCSA). V tejto časti bol predstavený princíp metódy a jej praktické aplikácie. Opísané boli aj dve najčastejšie používané analytické techniky – Fouriérova transformácia a vlnková transformácia – ktoré sa používajú na extrakciu frekvenčných komponentov z prúdového signálu, pričom tieto komponenty následne poskytujú informácie o prípadných poruchách v systéme. Taktiež bolo vysvetlené, že poruchy v motoroch sa prejavujú ako špecifické frekvenčné zložky v spektre prúdu, a ich výskyt či absencia tak môže indikovať nielen samotnú prítomnosť poruchy, ale aj jej typ.

Experimentálna časť práce sa sústredila na samotnú realizáciu výpočtu zaťaženia asynchrónneho motora na základe meraného statorového prúdu. Výpočet bol realizovaný v programe MATLAB R2024a. Vyhodnocované dáta boli získané z projektu fakulty strojného inžinierstva Paderborskej Univerzity v Nemecku [20]. Tento projekt sa zaoberal vyhodnocovaním signálu v prípade poškodeného ložiska. Pre tento účel bol okrem iného meraný aj statorový prúd na motore s nepoškodenými ložiskami, z ktorých boli použité a analyzované niektoré signály, respektíve namerané hodnoty statorových prúdov. Samotné prevedenie daného výpočtu bolo podrobne popísané v predchádzajúcich kapitolách.

Pre účely porovnania bola výpočtová metóda testovaná s použitím troch rôznych okien. Konkrétne obdĺžnikového, Hanningovho a Flat Top okna. Každé okno bolo aplikované na rovnaké vstupné dáta a výsledky boli porovnané z hľadiska presnosti detekcie hlavnej harmonickej, amplitúdy prúdu a stability výpočtu záťaže. Z analýzy vyplynulo, že Flat Top okno poskytovalo najpresnejšie a najspoľahlivejšie výsledky pri výpočte efektívneho prúdu, a teda aj samotnej záťaže. Je to spôsobené tým, že toto okno minimalizuje amplitúdové skreslenie a umožňuje najvernejšie zachytenie veľkosti hlavných spektrálnych komponentov, čo je pri diagnostike záťaže kľúčové.

Aj napriek nevýhodám spomínaným v poslednej kapitole sa navrhnutý algoritmus ukázal byť efektívnym nástrojom pre diagnostiku záťaže asynchrónneho motora. Vďaka kombinácii spektrálnej analýzy, amplitúdovej korekcie a výpočtu efektívnej hodnoty umožňuje určiť nielen aktuálnu záťaž motora, ale zároveň identifikovať aj prípadné anomálie vo frekvenčnom spektre, ktoré by mohli signalizovať vznikajúce poruchy. Jeho výhodou je modularita a možnosť prispôbiť výpočtové kroky rôznym typom meraní či špecifikám konkrétneho diagnostického

systemu. Algoritmus umožňuje spoľahlivú identifikáciu prevádzkovej záťaže a zároveň otvára priestor pre jeho ďalšie rozšírenie smerom k pokročilej diagnostike porúch a prediktívnej údržbe elektrických pohonov.

8 ZOZNAM POUŽITEJ LITERATÚRY

- [1] UHLÍŘ, Ivan. *Elektrické stroje a pohony*. Vyd. 2., přeprac. Praha: Nakladatelství ČVUT, 2007. ISBN isbn978-80-01-03730-0.
- [2] *Stack Exchange, Electrical Engineering*. Online. Stack Exchange, Electrical Engineering. 2022. Dostupné z: <https://electronics.stackexchange.com/questions/619153/why-is-a-capacitor-considered-a-short-circuit-at-start-up>. [cit. 2024-05-24].
- [3] HOLÝ, Tadeáš. *Analýza a porovnání vlastností asynchronních strojů s různými typy statorového vinutí*. Diplomová práce. Praha: České vysoké učení technické v Praze, Fakulta elektrotechnická, Katedra elektrických pohonů a trakce, 2019.
- [4] *Electro-Magnetic World*. Online. Electro-Magnetic World. 2017. Dostupné z: <https://electromagneticworld.blogspot.com/2017/11/ac-motor-construction.html>. [cit. 2024-05-24].
- [5] TŮMA, Jiří. *Zpracování signálů získaných z mechanických systémů užitím FFT*. Praha: Sdělovací technika, 1997. ISBN isbn80-901936-1-7.
- [6] B. E., Aditya Korde. *ON-LINE CONDITION MONITORING OF MOTORS USING ELECTRICAL SIGNATURE ANALYSIS*. Online. In: PowerSight. 2020. Dostupné z: https://www.powersight.com/FILES/APPLICATION_NOTES/Online%20Condition%20Monitoring%20of%20Motors.pdf. [cit. 2024-04-14].
- [7] THOMSON, William T. a GILMORE, Ronald J. MOTOR CURRENT SIGNATURE ANALYSIS TO DETECT FAULTS IN INDUCTION MOTOR DRIVES— FUNDAMENTALS, DATA INTERPRETATION, AND INDUSTRIAL CASE HISTORIES. In: *PROCEEDINGS OF THE THIRTY-SECOND TURBOMACHINERY SYMPOSIUM*. Texas: Turbomachinery Laboratory, Texas Engineering Experiment Station, the Texas A & M University System, 2003, s. 145-156.
- [8] PIRES, V. Fernão; KADIVONGA, Manuel; MARTINS, J.F. a PIRES, A.J. Motor square current signature analysis for induction motor rotor diagnosis. Online. *Measurement*. 2013, roč. 46, č. 2, s. 942-948. ISSN 02632241. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2012.10.008>. [cit. 2024-04-14].
- [9] KAR, Chinmaya a MOHANTY, A.R. Monitoring gear vibrations through motor current signature analysis and wavelet transform. Online. *Mechanical Systems and Signal Processing*. 2006, roč. 20, č. 1, s. 158-187. ISSN 08883270. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.ymsp.2004.07.006>. [cit. 2024-04-14].
- [10] MITRA, Sanjit Kumar. *Digital signal processing: a computer-based approach*. 2nd ed. McGraw-Hill series in electrical and computer engineering. Boston: McGraw-Hill/Irwin, 2001. ISBN 978-0072522617.
- [11] AKANSU, Ali N. a HADDAD, Richard A. Wavelet Transform. Online. In: *Multiresolution Signal Decomposition*. Elsevier, 2001, s. 391-442. ISBN 9780120471416. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/B978-012047141-6/50006-9>. [cit. 2024-04-14].

- [12] PETRYNA, Janusz; DUDA, Arkadiusz a SUŁOWICZ, Maciej. Eccentricity in Induction Machines—A Useful Tool for Assessing Its Level. Online. *Energies*. 2021, roč. 14, č. 7. ISSN 1996-1073. Dostupné z: <https://doi.org/10.3390/en14071976>. [cit. 2024-04-14].
- [13] ALWAN, Hayder O.; FARHAN, Noor M. a SABBAGH, Qais S-AI-. Detection of Static Air-Gap Eccentricity in Three Phase induction Motor by Using Artificial Neural Network (ANN). Online. *International Journal of Engineering Research and Applications*. 2017, roč. 07, č. 05, s. 15-23. ISSN 22489622. Dostupné z: <https://doi.org/10.9790/9622-0705031523>. [cit. 2024-04-14].
- [14] POLAT, A.; ERTUGRUL, Y. D. a ERGENE, L. T. Static, dynamic and mixed eccentricity of induction motor. Online. In: *2015 IEEE 10th International Symposium on Diagnostics for Electrical Machines, Power Electronics and Drives (SDEMPED)*. IEEE, 2015, s. 284-288. ISBN 978-1-4799-7743-7. Dostupné z: <https://doi.org/10.1109/DEMPED.2015.7303703>. [cit. 2024-04-14].
- [15] LEANDRO, Erik; LACERDA DE OLIVEIRA, Levy Ely de; DA SILVA, Jonas Guedes Borges; LAMBERT-TORRESM, Germano a DA SILV, Luiz Eduardo Borges. Predictive Maintenance by Electrical Signature Analysis to Induction Motors. Online. In: ARAJO, Rui Esteves (ed.). *Induction Motors - Modelling and Control*. InTech, 2012. ISBN 978-953-51-0843-6. Dostupné z: <https://doi.org/10.5772/48045>. [cit. 2024-04-14].
- [16] WELSH, Mark S. *Detection of Broken Rotor Bars in Induction Motors Using Stator Current Measurements*. Diplomová práca. Massachusetts: MASSACHUSETTS INST OF TECH CAMBRIDGE DEPT OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMPUTER SCIENCE, 1988.
- [17] TERRA, José Ignacio; CASTELLI, Marcelo; FOSSATI, Juan Pablo; ANDRADE, Marcos; CONDE, Analía et al. Faults Detection and Remote Monitoring System for Induction Motors using MCSA Technique. Online. S. 8. Dostupné z: <https://docplayer.net/1914521-Faults-detection-and-remote-monitoring-system-for-induction-motors-using-mcsa-technique.html>. [cit. 2024-04-14].
- [18] MEHALA, Neelam. *CONDITION MONITORING AND FAULT DIAGNOSIS OF INDUCTION MOTOR USING MOTOR CURRENT SIGNATURE ANALYSIS*. Dizertačná práca. India: National institute of technology, 2010.
- [19] JACOBS, Georg a PLOGMANN, Michael. Rolling Bearing Damages. Online. In: MANG, Theo (ed.). *Encyclopedia of Lubricants and Lubrication*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2014, s. 1600-1618. ISBN 978-3-642-22646-5. Dostupné z: https://doi.org/10.1007/978-3-642-22647-2_296. [cit. 2024-04-14].
- [20] SINGH, Sukhjeet; KUMAR, Amit a KUMAR, Navin. Motor Current Signature Analysis for Bearing Fault Detection in Mechanical Systems. Online. *Procedia Materials Science*. 2014, roč. 6, s. 171-177. ISSN 22118128. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.mspro.2014.07.021>. [cit. 2024-04-14].
- [21] BLODT, M.; GRANJON, P.; RAISON, B. a ROSTAING, G. Models for Bearing Damage Detection in Induction Motors Using Stator Current Monitoring. Online. *IEEE*

- Transactions on Industrial Electronics*. 2008, roč. 55, č. 4, s. 1813-1822. ISSN 0278-0046. Dostupné z: <https://doi.org/10.1109/TIE.2008.917108>. [cit. 2024-04-14].
- [22] KUMAR, K.Vinoth a KUMAR, S.Suresh. LabVIEW based Condition Monitoring of Induction Machines. Online. *International Journal of Intelligent Systems and Applications*. 2012, roč. 4, č. 3, s. 56-62. ISSN 2074904X. Dostupné z: <https://doi.org/10.5815/ijisa.2012.03.08>. [cit. 2024-04-14].
- [23] CARDENAS-CORNEJO, Juan-Jose; IBARRA-MANZANO, Mario-Alberto; GONZÁLEZ-PARADA, Adrián; CASTRO-SANCHEZ, Rogelio a ALMANZA-OJEDA, Dora-Luz. Classification of inter-turn short-circuit faults in induction motors based on quaternion analysis. Online. *Measurement*. 2023, roč. 222. ISSN 02632241. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2023.113680>. [cit. 2024-04-14].
- [24] EL BOUCHIKHI, El Houssin; CHOQUEUSE, Vincent a BENBOUZID, Mohamed. Induction machine faults detection using stator current parametric spectral estimation. Online. *Mechanical Systems and Signal Processing*. 2015, roč. 52-53, s. 447-464. ISSN 08883270. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.ymsp.2014.06.015>. [cit. 2024-04-14].
- [25] *Index of /kat/BearingDataCenter*. Online. In: Fakultät für Maschinenbau. 2016. Dostupné z: <https://groups.uni-paderborn.de/kat/BearingDataCenter/>. [cit. 2024-05-24].