

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

ÚSTAV VÝROBNÍCH STROJŮ, SYSTÉMŮ A ROBOTIKY  
KONSTRUKČNÍ A PROCESNÍ INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

INSTITUTE OF PRODUCTION MACHINES, SYSTEMS AND ROBOTICS  
DESIGN AND PROCESS ENGINEERING

# INTELEKTUÁLNÍ TESTOVACÍ PROCEDURY NÍZKONAPĚŤOVÝCH TRAKČNÍCH POHONŮ S ASYNCHRONNÍMI MOTORY

INTELLIGENT TEST PROCEDURES LOW-TENSION TRACTION DRIVES WITH INDUCTION  
MOTORS

ZKRÁCENÁ VERZE PhD. THESIS

AUTOR PRÁCE  
AUTHOR

Ing. MARTIN NESVADBA

VEDOUCÍ PRÁCE  
SUPERVISOR

Doc. Ing. VLADISLAV SINGULE, CSc.

BRNO 2011

## Klíčová slova

Asynchronní motor, hlučnost, testovací procedury, optimalizace, frekvenční spektrum, frekvenční analýza

## Key Words

Induction motor, noise, testing procedures, optimalization, frequency spectrum, frequency analyze

## NÁZEV PRACOVÍŠTĚ KDE JE ULOŽEN RUKOPIS

Disertační práce je uložena na Oddělení vědy a výzkumu Fakulty strojního inženýrství VUT v Brně, Technická 2, 616 69 Brno

© Martin Nesvadba 2011

*Tato práce vznikla díky zájmu a podpoře společnosti Kollmorgen,s.r.o. jako školní dílo na Vysokém učení technickém v Brně, Fakultě strojního inženýrství. Práce je chráněna autorským zákonem a její užití bez udělení oprávnění autorem je nezákonné, s výjimkou zákonem definovaných případů.*

ISBN

ISSN

## Obsah:

<b>1. Úvod</b> .....	5
<b>2. Současný stav řešené problematiky</b> .....	5
2.1. Standardní testovací procedury .....	5
<b>3. Cíle práce</b> .....	6
<b>4. Zvolené metody zpracování</b> .....	6
4.1. Konstrukce asynchronního trakčního motoru .....	6
4.2. Rozbor možných příčin hlučnosti asynchronních motorů.....	7
4.3. Ventilační hluk .....	7
4.4. Hluk mechanického původu.....	7
4.5. Elektromagnetický hluk .....	8
4.5.1. Magnetomotorické napětí.....	9
4.5.2. Magnetická vodivost vzduchové mezery .....	9
4.5.3. Vliv stupňových harmonických na radiální síly.....	10
4.5.4. Vliv drážkování statoru a rotoru.....	10
4.5.5. Vliv deformace vzduchové mezery.....	10
4.5.6. Vliv sycení železa.....	11
4.5.7. Vliv excentricity vzduchové mezery.....	11
4.5.8. Vliv uspořádání vinutí s několika paralelními větvemi .....	12
4.5.9. Vliv tangenciálních sil.....	12
4.5.10. Vliv společného účinku radiálních a tangenciálních sil .....	12
4.5.11. Zvýšení hluku při rozběhu.....	12
4.5.12. Vliv neharmonického napájení.....	13
4.5.13. Rezonanční vlivy statoru .....	13
<b>5. Hlavní výsledky práce</b> .....	13
5.1. Návrh a konstrukce pracoviště pro měření hluku a vibrací.....	13
5.2. Měření hlučnosti a rozbor výsledků .....	16
5.2.1. Vyhodnocení naměřených hodnot.....	16
5.2.2. Ověření použitelnosti rozboru frekvenčního spektra .....	18
5.3. Ověření konstrukce motoru .....	19
5.4. Možnosti snížení hluku asynchronních motorů .....	20
5.5. Výsledky experimentů ke snížení hluku u motoru TSP 112/4.....	23
5.5.1. Technická příprava .....	23
5.5.2. Porovnání standardní a optimalizované varianty motoru.....	23
<b>6. Závěr</b> .....	27
<b>7. Přínosy disertační práce</b> .....	27
<b>8. Literatura</b> .....	28
8.1. Vlastní publikace.....	29
8.2. Produkty a patenty.....	30
<b>Životopis</b> .....	31
<b>Abstrakt</b> .....	32



# 1. Úvod

Testování asynchronních motorů je obecně známé a srozumitelné, pokud ovšem chceme zajistit skutečně komplexní měření všech důležitých funkcí a vlastností motoru přímo na výrobních linkách, pak můžeme narazit na několik zásadních problémů.

Asynchronní trakční motory, jejichž testování je předmětem této práce, jsou primárně určeny pro použití ve vysokozdvizných vozících, a to jak k hlavnímu pohonu (většinou ve spojení s převodovým ústrojím), tak k pohonu čerpadel (pneumatického nebo hydraulického systému pro zdvih lyžin vozíku) a také pro pohon systému pro natáčení kol. Jedná se o třífázové čtyřpólové motory (většinou v zapojení DP – tedy dvě paralelní vinutí zapojené do trojúhelníku), které jsou řízeny frekvenčními měniči napájené bateriemi. V těchto aplikacích jsou na ně kladeny zvláštní nároky, ze kterých vyplývá nezbytnost měření neelektrických veličin, jakou jsou např. velikost vibrací, či hlučnost.

Obecně by se dalo říci, že význam testování spočívá v kontrole a verifikaci, zda je výrobek navržen (v případě el. motorů norma pro točivé elektrické stroje ČSN EN 60034-1) a vyroben dle předepsané dokumentace a ve shodě s na něj se vztahujícími požadavky. Testování odhalí, zda byly použité komponenty v bezvadném stavu a zda byl při výrobě dodržen předepsaný pracovní postup. Veškeré předepsané parametry motoru musejí být v předem definovaných tolerancích, což je základní předpoklad pro bezchybnou funkci a dlouhou životnost motoru.

Pokud chceme použít i automatické vyhodnocování těchto testovacích procedur, které je založeno jednak na předem definovaných tolerančních polích, tak na statistickém vyhodnocení předešlých testů, pak můžeme narazit na řadu překážek – zejména pokud chceme jít ještě dále a hlubší analýzou naměřených hodnot zjistit konkrétní příčinu možného problému (např. rozбором FFT analýzy naměřené hlučnosti poukázat na špatně nalisované „B“ ložisko nebo nesymetrii vzduchové mezery). Toto automatické inteligentní vyhodnocení musí mít základy ve znalosti konstrukce motoru, statistickém vyhodnocení předchozích měření a v bezvadném pochopení výsledků měření.

Znalost konstrukce motoru, teorie vzniku hlučnosti a zvládnutí metodiky měření umožňuje navrhnout konstrukční úpravy s cílem snížení hlučnosti motoru a tyto následně měřením ověřit.

## 2. Současný stav řešené problematiky

### 2.1. Standardní testovací procedury

Aby bylo dosaženo důkladné kontroly bezpečnosti, funkčnosti a kvality všech částí asynchronního motoru, musí být navrženy jednotlivé testy odpovídajícím způsobem a také vhodně stanovena jejich posloupnost. Základní měření odporů a indukčností je zajištěno již před těmito automatizovanými testy na testovací stanici. Pro veškeré testy, kde dochází k rozběhu motoru, je použit frekvenční měnič, a to z důvodu co nejvěrnější simulace skutečného provozu. Vzhledem k předpokládanému použití tohoto pohonu ve vysokozdvizných vozících a tedy bateriovému napájení (niskonapěťové, stejnosměrné) je pro tento účel navržen jak motor, tak frekvenční měnič, který má vstupní silové svorky připojeny ke zdroji stejnosměrného proudu s napětím 80V DC.

- **VN test** – Testovací napětí je určeno na základě jmenovitého napětí testovaného motoru (dle ČSN 350010). Postupně jsou provedeny následující VN testy: fáze-kostra, fáze-teplotní senzor, kostra-teplotní senzor, kdy se při těchto testech měří velikost unikajícího proudu – max. 10mA).

- **Test izolačního odporu** – je dalším testem, při kterém je testována izolace daného motoru. Testovací napětí je 0,5kV DC a naměřeného hodnota izolačního odporu musí být minimálně 20MΩ.
- **WarmUp test** – tento test slouží zejména k zahřátí ložisek, aby jejich pasivní odpor co nejméně ovlivnil další testy. Během tohoto testu je motor roztočen na otáčky 1500 min<sup>-1</sup>
- **Test snímače otáček** – tento test slouží k ověření funkčnosti zpětnovazebního členu, který je integrován v ložisku. Motor je roztočen na minimální otáčky (cca 15 min<sup>-1</sup>) a je zde ověřena funkčnost obou zpětnovazebních kanálů, které jsou testovány po dobu 5 s. Součástí tohoto testu je také test teplotního senzoru.
- **Akcelerační a NoLoad test** – tento test slouží k ověření schopnosti motoru akcelarovat v daném časovém limitu – od 0 do 1500 min<sup>-1</sup>. Při otáčkách 1500 min<sup>-1</sup> je poté změřen proud naprázdno (při pevně nastaveném napětí naprázdno).

### 3. Cíle práce

Cílem práce je vytvoření pracoviště pro měření hluku a vibrací elektrických motorů, které by umožňovalo měřit tyto veličiny přímo na výrobních linkách. Pro splnění tohoto cíle je proto nutné navrhnout měřící box s požadovaným útlumem a navrhnout pracoviště s nezbytným hardwarovým a softwarovým vybavením.

Následně bude ověřena možnost implementace pokročilých testovacích procedur, které by s využitím frekvenční analýzy naměřených výsledků hluku a vibrací, dokázaly určit konkrétní příčiny problému motoru. Dojde také ke zpřesnění vyhodnocovacích kritérií a přesnější definici „hlučného“ motoru – nejenom z pohledu normy EN 60034-9, ale zejména díky zkušenostem koncových zákazníků a jejich konkrétních aplikacích.

Dosažené výsledky byly prezentovány u SDZ a komisí bylo konstatováno, že komplex problémů spojených s testováním vybrané skupiny motorů je velmi obsáhlý a zasahuje do více vědních oborů. Na doporučení komise byly cíle práce modifikovány, ve smyslu rozvinutí pouze jednoho z dílčích problémů.

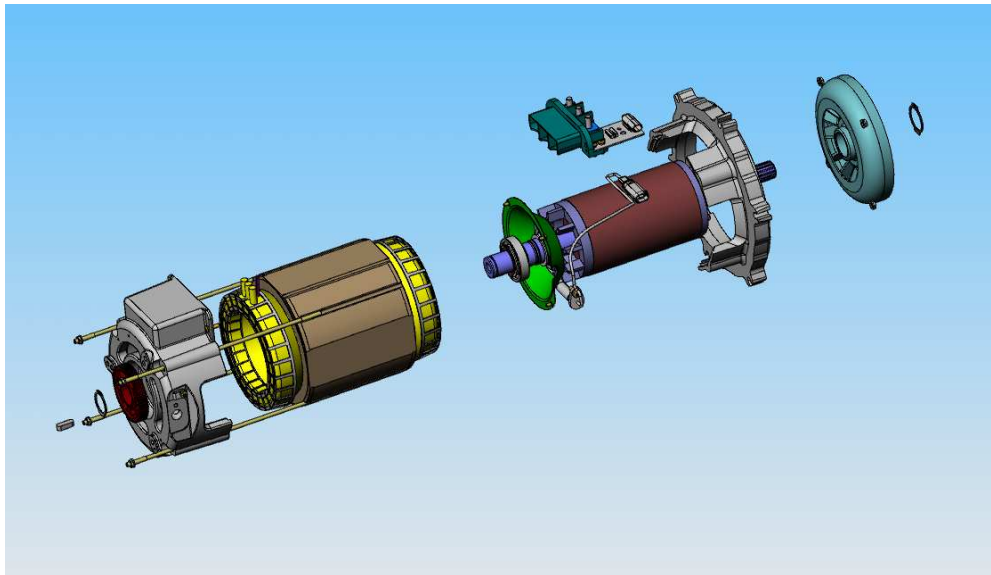
Cíle práce proto byly upřesněny na nalezení a ověření metodiky návrhu motoru s ohledem na minimalizaci elektromagnetického hluku.

Na základě detailního rozboru možných příčin hlučnosti stanovené skupiny asynchronních motorů bude ověřena konstrukce jednoho z existujících typů motoru s ohledem na podmínky konstrukce bezhlučných motorů. Následně bude s použitím jedné z metod pro snížení hlučnosti provedena úprava návrhu a konstrukce motoru s cílem minimalizaci elektromagnetického hluku. Metodika návrhu bude ověřena měřením a porovnáním standardní a optimalizované varianty motoru.

## 4. Zvolené metody zpracování

### 4.1. Konstrukce asynchronního trakčního motoru

Na uvedeném obrázku č. 1. je zobrazen motor, určený k přímé montáži na převodovku, což je dobře patrné na konstrukci pravého štítu a ozubení na pravé straně hřídele. Tento zobrazený motor je typ 112/4-165, tedy osová výška 112mm, 4póly a délka statorového paketu 165mm.



Obr. 1 – 3D pohled na jednotlivé komponenty trakčního motoru

## 4.2. Rozbor možných příčin hlučnosti asynchronních motorů

Hluk asynchronních motorů bychom mohli definovat jako skupinu nežádoucích zvuků, které jsou vyvolány rychlými změnami tlaku vzduchu. Tyto změny tlaku mohou být způsobeny kmitáním povrchu motoru (nebo jeho částmi) nebo aerodynamickými jevy (tzv. ventilační hluk). Hluk těchto strojů pro můžeme rozdělit na tři základní složky hluku, kdy celkový hluk stroje je potom tvořen celkovým účinkem všech tří výše uvedených složek.

## 4.3. Ventilační hluk

Tato složka hluku je výrazná především u strojů s vysokým počtem otáček, kdy hlavním zdrojem hluku bývá zpravidla samotný ventilátor se svým nejbližším okolím. Charakter spektra ventilačního hluku může být širokopásmový (tlakové pulsace vznikající na hraně lopatek) nebo i diskretní (překážky před nebo za ventilátorem způsobující nerovnoměrnost rychlostního profilu vzdušného toku po celém obvodu kola a periodické tlakové pulsace).

## 4.4. Hluk mechanického původu

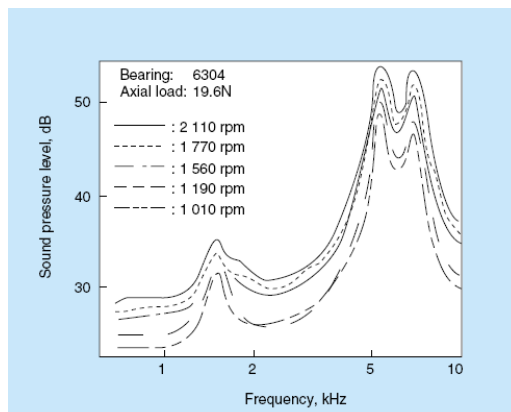
Je způsoben především valivými ložisky a také nevyvážením všech rotujících částí stroje. V konstrukcích asynchronních trakčních motorů se nejčastěji používají valivá ložiska kuličková, které mají několik charakteristických zvukových projevů. Tyto vycházejí zejména z jejich konstrukce, použitých materiálů, typu a množství plnění tukem maziva, atd. Výsledná hlučnost je značně závislá na rychlosti rotace s frekvencí valivých elementů dle [18]:

$$f_c = \frac{1}{60} \frac{n_i}{2} \left( \frac{d_m - D_a \cdot \cos \alpha}{d_m} \right) \quad (1)$$

kde:  $n_i$  – oběhová rychlost vnitřního kroužku [ $\text{min}^{-1}$ ],  
 $D_a$  – průměr valivých elementů (kuliček) [mm],  
 $d_m$  – PCD valivých elementů [mm],  
 $\alpha$  – kontaktní úhel.

### Charakteristické zvukové projevy:

- **Oběžný hluk (Race noise)** – tedy zvuk, způsobený valením kuliček po dané kruhové dráze, který je základním zvukovým projevem kuličkových ložisek – jedná se o ustálený a trvalý zvuk, jehož závislost na zvyšujících se otáčkách je možno vidět na obr. 2.



Obr. 2 – Akustický graf pro ložisko 6304 ukazuje frekvence s nejvyšší úrovní akustického tlaku a také závislost rychlosti otáčení na „Race noise“ (axiální zátěž 19,6N) [18]

- **“Click noise”** – cvakavý zvuk, který se ponejvíce vyskytuje u větších ložisek, která jsou zatížena radiálně – tento zvuk je generován převážně při nižších rychlostech.
- **„Squeal noise“** – jedná se o vrzavý kovový zvuk, který bývá v některých případech dosti výrazný – zvuk „železa posouvajícího se po železe“.
- **„Cage noise“** – jedná se o nízkofrekvenční zvuk, který vzniká při kontaktu valíček se elementů s ložiskovou klecí a ložiskovými prstenci (vnitřním a vnějším). Při nízké a vysoké rychlosti se mění poměr mezi hmotností valivého elementu a odstředivou silou.

### 4.5. Elektromagnetický hluk

Jedná se o nejtypičtější složku hluku elektrických točivých strojů, jehož příčinou je kmitání kostry motoru nebo jeho částí, způsobených elektromagnetickými silami působících mezi statorem a rotorem stroje. Obecný průběh indukce ve vzduchové mezeře mezi statorem a rotorem (a také průběh radiálních sil) by se dal vyjádřit podle Maxwella [7]:

$$p_r = \frac{B^2(\alpha, t)}{2\mu_0} \quad (2)$$

kde:  $p_r$  – radiální tlak ve vzduchové mezeře [Pa],  
 $B(\alpha, t)$  – okamžitá hodnota magnetické indukce ve vzduchové mezeře v místě vzdáleném o obvodový úhel  $\alpha$  od vytyčené osy a v čase  $t$  [ $T, Hm^{-1}$ ].

Rovnice tedy vyjadřuje, že v každém místě vzduchové mezery působí radiální síla, kterou je možné vyjádřit na jednotku plochy v soustavě SI. Protože zanedbáváme vliv nasycení železa (předpokládáme jeho permeabilitu  $\mu_{FE} = \infty$ ), můžeme do rovnice dosadit  $B(\alpha, t) = \mu_0 H(\alpha, t)$  [7]:



$$p_r = \frac{\mu_0}{2} H^2(\alpha, t) \quad (3)$$

kde:  $H(\alpha, t)$  – okamžitá hodnota intenzity magnetického pole v místě  $\alpha$  a čase  $t$  [ $Am^{-1}$ ].

Mezi statorom a rotorem mohou vznikat radiální časově proměnné síly, které mají různý počet prostorových vln (síly různého řádu). Vznikají tedy postupné silové vlny, jejichž obecný tvar je [7]:

$$p_r = A_r \cos(r\alpha - \Omega_r t) \quad (4)$$

kde:  $A_r$  – amplituda působící síly,  
 $\Omega_r$  - úhlový kmitočet síly řádu  $r$ ,  
 $r$  – libovolné celé číslo 1,2,3....

V libovolném místě obvodu je kmitočet časových změn tahu roven  $f_r = \Omega_r / 2\pi$ . Deformace statorového prstence bude největší, pokud  $f_r$  bude ležet v blízkosti vlastního mechanického kmitočtu statoru. Elektromagnetickými příčinami hluku jsou časově proměnlivé radiální síly, které jsou způsobeny interferencí pracovní a vyšších harmonických magnetické indukce ve vzduchové mezeře a vodivostí vzduchové mezery.

#### 4.5.1. Magnetomotorické napětí

a) Průchodem proudu statorovými cívkami vzniká magnetomotorické napětí  $F_m$ , které vyvolává magnetické pole stroje. Toto magnetomot. napětí je závislé na uspořádání vinutí.

Příklad výpočtu magnetomotorického napětí pro třífázové vinutí [7]:

$$F_m(\alpha, t) = \frac{3\sqrt{2}}{\pi} N_f I \sum_{c=0}^{\infty} \frac{1}{p(6c \pm 1)} k_{vv} \sin[(\omega t \pm (6c \pm 1)p\alpha] \quad (5)$$

kde:  $N_f$  – počet seriových závitů na fázi,  
 $\alpha$  – úhel obvodu stroje, vyjádřený v obloukové míře,  
 $k_{vv}$  – činitel vinutí pro  $v$ -tou harmonickou.

#### 4.5.2. Magnetická vodivost vzduchové mezery

Jedná se o druhý důležitý faktor ovlivňující radiální síly, který rovněž závisí na konstrukčním uspořádání stroje. Na velikost mag. vodivosti vzduchové mezery mají vliv:

- vliv drážkování na magnetickou vodivost
- vliv sycení na otevření drážek
- vliv excentricity rotoru
- vliv vyniklých pólů
- vliv průhybu jha

Vliv průhybu jha může být u asynchronních motorů velmi velký a může způsobit silnou deformaci vzduchové mezery. Tato má poté za následek deformaci magnetického pole ve vzduchové mezeře.

#### 4.5.3. Vliv stupňových harmonických na radiální síly

Nejvýznamnější harmonické magnetomotorických napětí jsou tzv. stupňové harmonické řádu  $\nu = Q_1 \pm p$  a  $\mu = Q_2 \pm p$ , u bezhlučných strojů proto nemá být [7]:

$$\begin{aligned} |Q_1 - Q_2| &= 0, 1, 2, \dots \\ |Q_1 - Q_2| &= 2p, 2p \pm 1, 2p \pm 2, \dots \end{aligned} \quad (6)$$

Kmitočet radiální síly  $f_c$  vyvolaný stupňovými harmonickými. Stator a rotor můžou rozechvát pouze radiální síly nízkého řádu, tedy síly vznikající při splnění podmínek uvedených v (10) a pro  $k=1$  v následující rovnici [7]:

$$f_c = f \left[ k \frac{Q_2}{p} (1-s) \pm 2 \right] \quad (7)$$

kde:  $p$  – počet pólových dvojic stroje,  
 $s$  – skluz,  
 $k$  – celé číslo 1,2,3...

#### 4.5.4. Vliv drážkování statoru a rotoru

Drážkové harmonické statoru a rotoru mají stejný počet pólů a stejnou rychlost jako příslušné stupňové harmonické, takže drážkové harmonické nepřinášejí nová kritéria pro vznik hluku. Nemá-li vznikat hluk, nesmí se řád nejsilnějších složek magnetomotorického napětí statoru a rotoru shodovat s řádem některé silně vyvinuté harmonické složky vodivosti vzduchové mezery. Nejsilnější harmonické složky magnetomotorického napětí jsou řádu  $\nu = Q_1 \pm p$  a  $\mu = Q_2 \pm p$ , hluk tedy vzniká pokud [7]:

$$|Q_1 - Q_2| = p, p \pm 1, p \pm 2, \dots \quad (8)$$

Vznikají přitom kmity nultého, druhého, čtvrtého atd. řádu. V daném místě pod úhlem  $\alpha$  můžeme určit kmitočet této síly [7]:

$$f_c = 2f \left[ \frac{Q_2}{p} (1-s) \pm 1 \right] \quad (9)$$

#### 4.5.5. Vliv deformace vzduchové mezery

K deformaci vzduchové mezery dochází vlivem radiálních sil, které způsobují periodickou deformaci jha statoru. Mezi statorem a rotorem tedy působí rad. síly vybuzené pracovní harmonickou magnetického pole ve vzduchové mezeře řádu  $p$ . Tyto síly mohou následně vyvolat deformaci vzduchové mezery, proto pro omezení hluku se nemá volit [7]:

$$|Q_1 - Q_2| = 3p, 3p \pm 1, 3p \pm 2, \dots \quad (10)$$

#### 4.5.6. Vliv sycení železa

K deformaci průběhu magnetického pole ve vzduchové mezeře dochází také vlivem sycení magnetického obvodu stroje. Jde především o nasycení hlavního magnetického obvodu, ale také o přesycování krčků zubů u polouzavřených nebo uzavřených drážek.

Významné složky magnetického tlaku vzniknou, pokud platí [7]:

$$\begin{aligned} |Q_1 - Q_2| &= 2p \\ |Q_1 - Q_2| &= 4p \end{aligned} \quad (11)$$

Pro omezení hluku by se tedy neměl volit tento rozdíl drážek. Kmitočet sil vyvolaný harmonickými lze určit dle rovnic (12) a (13), protože stupňová harmonická statoru vyvolává v každém místě statoru pulzaci pole o napájecím kmitočtu. [7]:

$$f_c = f \left[ \left( \frac{Q_2}{p} \pm 3 \right) (1 - s) \right] \quad (12)$$

$$f_c = f \left[ \left( \frac{Q_2}{p} \pm 3 \right) (1 - s) \pm 2 \right] \quad (13)$$

kde  $f$  je kmitočet napájecí sítě a  $Q_2$  je počet rotorových drážek. Dle těchto rovnic tedy vzniká šest kmitočtů budících sil. Pro hluk při rozběhu stroje, kdy se mění rotorový kmitočet, bude kmitočet budících sil záviset na skluzu a lze jej vyjádřit vztahem [7]:

$$f_c = f \left[ \left( \frac{Q_1}{2p} \pm \frac{Q_2}{2p} \right) (1 - s) \right] \quad (14)$$

#### 4.5.7. Vliv excentricity vzduchové mezery

Do průběhu magnetické vodivosti vzduchové mezery je nutno zahrnout i vliv excentrického uložení rotoru. Pokud jde o statickou excentricitu (vyosení nalisovaného rotoru), pak tyto harmonické kmitají úhlovou rychlostí  $\omega$  a nemohou přímo způsobovat hluk. Může ovšem nastat případ, že se při interferenci jiných harmonických, vyskytne jiná harmonická stejného řádu avšak jiného kmitočtu, což způsobuje kmity nultého řádu ( $r = 0$ ). Pokud chceme eliminovat tyto harmonické, nemělo by platit [7]:

$$|(Q_1 \pm p) - (Q_2 \pm p)| = p \pm 1 \quad (15)$$

S ohledem na tyto kmity je nutné velmi pečlivě střídit a vyvažovat stroje, kde [7]:

$$\begin{aligned} |Q_1 - Q_2| &= 3p \pm 1 \\ |Q_1 - Q_2| &= p \pm 1 \end{aligned} \quad (16)$$

Zvlášť pečlivé musí být zejména naklínování rotoru na hřídel, kde mohou při excentrickém naklínování vznikat jednostranně rotující síly, které způsobují silný hluk.

#### 4.5.8. Vliv uspořádání vinutí s několika paralelními větvemi

Pro stroje s vinutím s několika paralelními větvemi se vždy klade důraz na elektrickou i magnetickou symetrii jednotlivých větví, přesto se při výrobě vyskytne vždy nějaká nesymetrie, která může mít za následek nerovnoměrné rozložení proudu a tím následně i vznik vyšších harmonických magnetomotorických napětí.

$$\text{Maximální počet paralelních větví [7]:} \quad a_{\max} = 2p. \quad (17)$$

Vinutí je možné provést s počtem paralelních větví  $a = m$ , kde  $m$  je libovolný dělitel čísla  $2p$ . Pro vinutí se dvěma paralelními větvemi s plným krokem by nemělo platit [7]:

$$|Q_1 - 2k_1 Q_2| = 2p, 2 \pm 2... \quad (18)$$

#### 4.5.9. Vliv tangenciálních sil

Mezi statorom a rotorem působí tangenciální síla, kterou lze vyjádřit tangenciálním tlakem na jednotku plochy. Celková tangenciální síla na jednotku axiální délky stroje (N) se rovná momentu na jednotkovém poloměru při téže délce stroje (Nm). Nemají-li vznikat časově proměnlivé tangenciální síly, nesmí platit [7]:

$$\begin{aligned} Q_1 \pm p &= Q_2 \pm p \\ Q_1 &= Q_2 \end{aligned} \quad (19)$$

Ke vzniku tangenciální síly může také významným způsobem přispět interakce s příslušnou pracovní harmonickou lineární proudové hustoty řádu  $p$ , která je na statoru a rotoru nejvýraznější. Tyto tangenciální síly a tudíž i časově proměnlivé momenty mohou vznikat, pokud platí rovnice [7]:

$$|Q_1 - Q_2| = 2p \quad (20)$$

#### 4.5.10. Vliv společného účinku radiálních a tangenciálních sil

Účinky radiálních a tangenciálních sil se sčítají, je-li výsledná síla způsobena interakcí statorové harmonické řádu  $\nu$  a rotorové harmonické řádu  $\mu$  – zejména platí-li [7]:

$$\nu = \mu - 1 \quad (21)$$

V opačném případě ( $\nu = \mu + 1$ ) se účinky těchto sil odečítají, takže tento případ není pro vznik hluku tak nebezpečný. Další podmínka, která by pro omezení vzniku hluku neměla platit je [7]:

$$|Q_1 - Q_2| = 2p - 1 \quad (22)$$

#### 4.5.11. Zvýšení hluku při rozběhu

I při splnění všech doposud uvedených podmínek pro omezení vzniku hluku může docházet při rozběhu k výraznému zvýšení hluku. Asynchronní motor odebírá skoro po celou

dobu rozběhu statorový proud, který je několikanásobkem jmenovitého proudu ( $I_z = 5 - 8I_n$ ) a tím jsou zesíleny silové účinky všech vyšších harmonických magnetomot. napětí. Dále se při rozběhu mění otáčky a tudíž i skluz. Na skluzu stroje jsou závislé kmitočty hlavních budících sil od stupňových harmonických, které se tedy při rozběhu mění a mohou rozechvívat stator právě v jeho vlastních mechanických kmitočtech, kdy se vlivem rezonance zesiluje hluk. Kmitočty hlavních budících sil od stupňových harmonických jsou [7]:

$$f_c = f K \frac{Q_2}{2} (1-s) \quad (23)$$

#### 4.5.12. Vliv neharmonického napájení

Zdrojem neharmonického napětí jsou polovodičové měniče kmitočtu. Průběh neharm. napětí se obvykle liší od ideální sinusovky a obsahuje vyšší počet vyšších harmonických. Toto neharmonické napájení se projeví v průběhu magnetomotorických napětí zvýšeným obsahem tzv. časových harmonických.

Při napájení třífázového asynchronního motoru neharmonickým napětím o základním pracovním kmitočtu  $f$  vzniknou budící síly na kmitočtech [7]:

$$f_v = 6Kf \quad (24)$$

kde  $K$  je libovolné celé číslo. Například je-li základní kmitočet 50Hz, pak vznikají radiální síly o kmitočtech  $f_v = 300, 600, 900, \dots$  Hz.

#### 4.5.13. Rezonanční vlivy statoru

Magnetické příčiny hluku mohou záviset nejen na počtu drážek statoru a rotoru, ale také na rozměrech stroje. Vliv velikosti stroje na vznik hluku sledoval Jordan [9], který vyšel z poznatku, že síla zvuku na povrchu stroje závisí na množství vyzářené zvukové energie  $J$ , vztažené na jednotku plochy povrchu.

Rezonanční kmitočet statorového prstence  $f_0$  (Hz) určíme pro  $r = 0$  podle vztahu [9]:

$$f_0 = \frac{8,4 \cdot 10^2}{R_s} \sqrt{\frac{q_j}{q_j + q_z}} \quad (25)$$

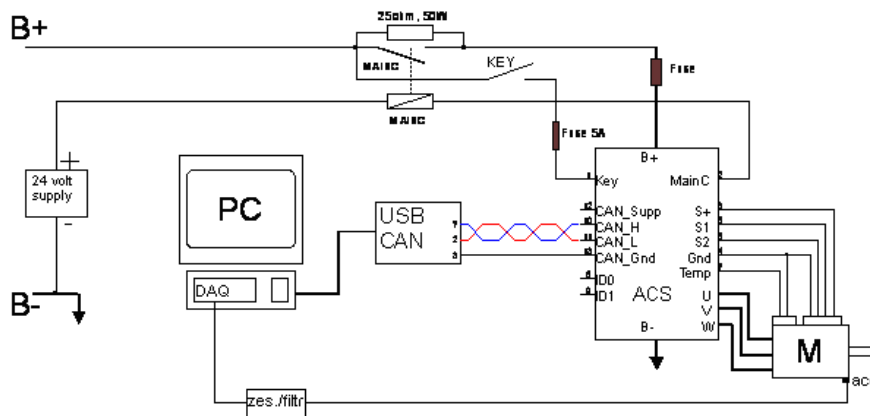
kde:  $R_s$  – střední poloměr jha (m),  
 $q_j, q_z$  – hmotnost jha a zubů (m),

## 5. Hlavní výsledky práce

### 5.1. Návrh a konstrukce pracoviště pro měření hluku a vibrací

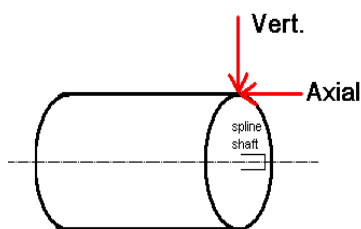
Abychom byli schopni měřit velikost vibrací, muselo být nejdříve navrženo a vytvořeno pracoviště, které by kromě pohonu umožňovalo i bezpečné uložení testovaného motoru, a dále navržena měřicí aparatura, schopná zajistit požadované měření a přenos naměřených hodnot do počítače.

- **Testovací procedura – naším** úkolem bylo zjistit hodnotu vibrací zkoušeného motoru při otáčkách  $3000 \text{ min}^{-1}$  a  $4000 \text{ min}^{-1}$ , a to na dvou měřicích bodech – viz obr. 3.



Obr. 3 – Zapojení signálního vedení testovací stanice

a) software “MotorTest“ – nastavení měniče pro požadované otáčky 3000 min<sup>-1</sup> a 4000 min<sup>-1</sup>



Obr. 4 – Měřicí body



Obr. 5 – Připevnění akcelerometru

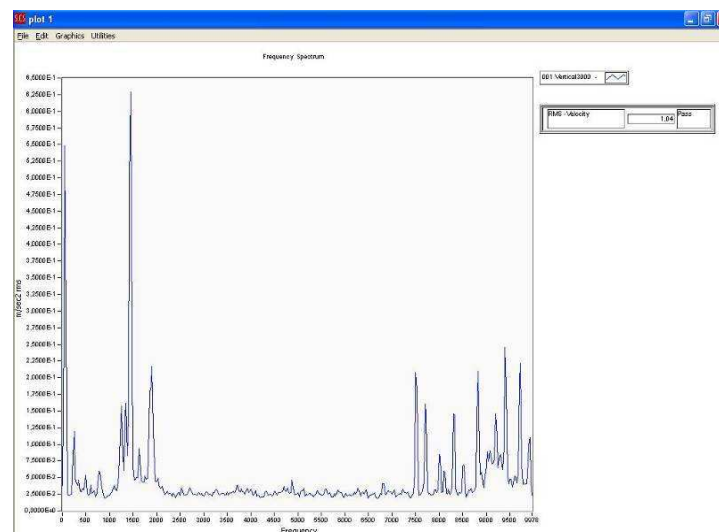
b) software “Test Execution“ – měření a vyhodnocování výsledků velikosti vibrací a hluku.

• **Výsledky měření a vyhodnocení naměřených dat vibrací**

Každé měření obsahuje graf frekvenčního spektra 0-10kHz naměřeného zrychlení a vypočítáme efektivní hodnotu velikosti vibrací – “overall vibration velocity level“ [20]:

$$X_{rms} = \sqrt{\frac{x_{max}^2 + x_{min}^2}{2}} \tag{26}$$

kde:  $x_{max}$  – maximální efektivní hodnota rychlosti, výchylky nebo zrychlení.  
 $x_{min}$  – minimální efektivní hodnota rychlosti, výchylky nebo zrychlení.

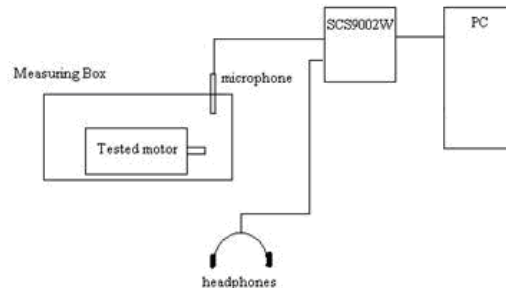


Obr. 6 – Naměřené frekvenční spektrum s výpočtem efektivní hodnoty rychlosti vibrací v mm/s

Vyhodnocení, zda byl daný test úspěšný či nikoliv, je provedeno kalkulací efektivní hodnoty velikosti vibrací (mm/s) porovnána s kritérii uvedenými v normě ČSN EN 60034–14.

- **Pracoviště pro měření hluku**

Konstrukce testovací pracoviště byla v tomto případě ztížena nutností zkonstruovat také měřicí box, který by zajistil potřebný útlum. Náčrves návrhu pracoviště je uveden na obr. 7.

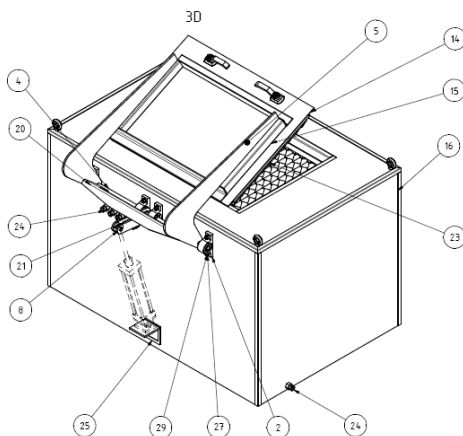


Obr. 7 – Základní schéma pracoviště pro měření hluku

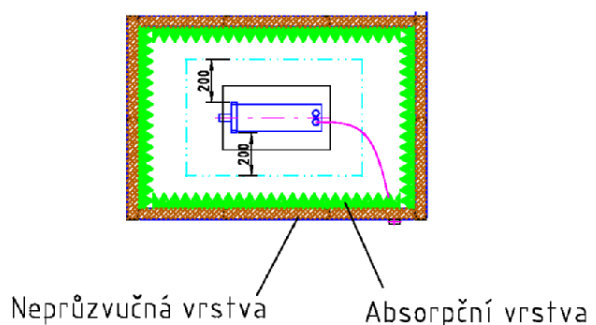
Pracoviště bylo doplněno sluchátky, která mohou pomoci zejména při počátcích testování – tedy kdy nejsou testovací limity (zejména ty interní) zcela přesně definovány. Bylo taky nutné zjistit úroveň hlučnosti pozadí, což je důležité pro stanovení potřebného odstupu mezi naměřenou hodnotou hluku na pozadí a mezi předpokládanou úrovní hlučnosti testovaného objektu. Předpokládaná hodnota akustického tlaku  $L_{PA}$  pro daný motor o výkonu 3kW je 60dB. Naměřená hodnota hluku  $L_{PA}$  pozadí byla 80dB. Pro dosažení objektivního měření je nutné dodržet odstup měřeného objektu min.10dB od hluku pozadí. V tomto případě je tedy nutné navrhnut zvukotěsný měřicí box s minimálním útlumem 30dB.

- **Měřicí box**

Měřicí pracoviště je také tvořeno měřicím boxem, jehož konstrukce je závislá na velikosti potřebného útlumu – pro dosažení útlumu nad 30dB bude nutná sendvičová konstrukce s minimální tloušťkou bočních stěn 100mm. Po vyrobení zvukotěsného akustického boxu bylo nutné ověřit jeho útlum, a to měření uvnitř a vně boxu. Tímto měření ověříme nejenom celkový požadovaný útlum, ale i schopnost boxu na jednotlivých frekvencích.

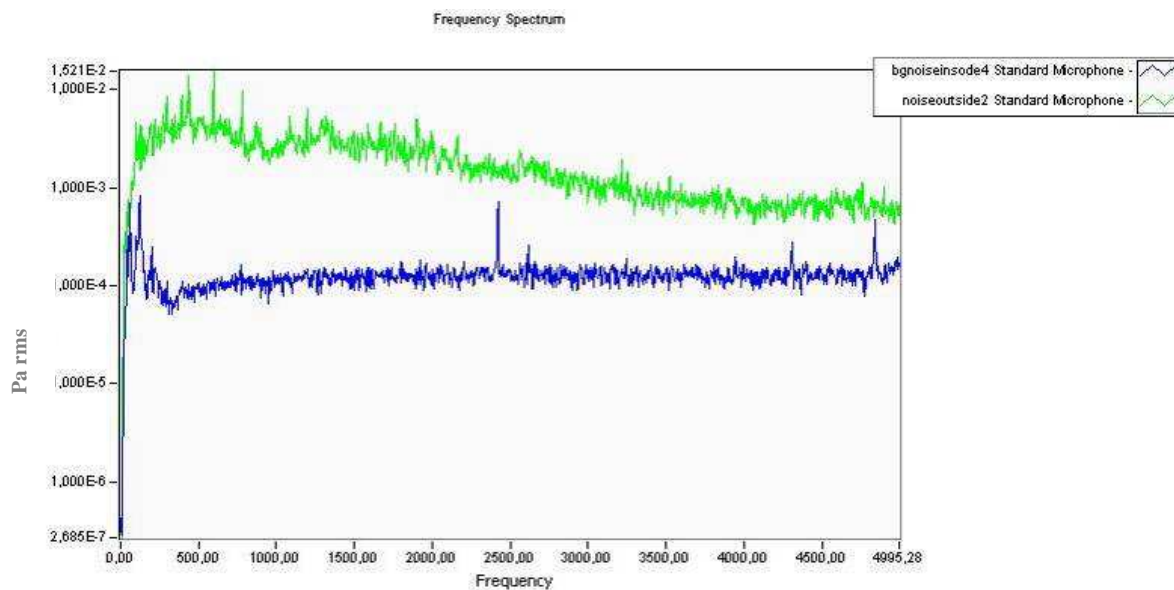


Obr. 8 – Zvukotěsný box



obr. 9 – Konstrukce stěn zvukotěsného boxu

- **Umístění mikrofону** – aby bylo dosaženo porovnatelnosti naměřených výsledků, bylo nutné dodržet správnou orientaci mikrofону vzhledem k měřenému objektu, zejména pak jeho vzdálenost (v našem případě 200mm).

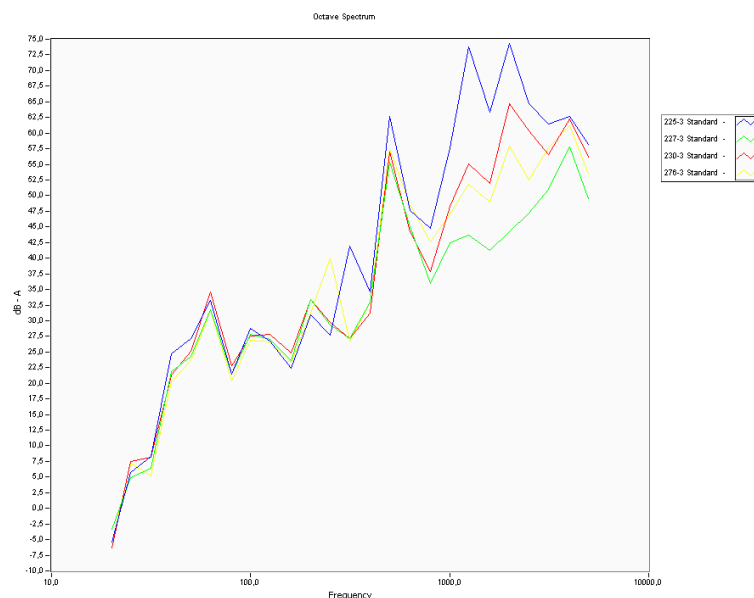


Obr. 10 – Frekvenční spektrum uvnitř a vně měřicího boxu

## 5.2. Měření hlučnosti a rozbor výsledků

### 5.2.1. Vyhodnocení naměřených hodnot

jako příklad použijeme měření čtyř motorů stejného typu AKM43E. Dva z těchto motorů byly vráceny zákazníkem, který tyto motory analyzoval ve své aplikaci a jeden z nich vyhodnotil jako hlučný (označení motoru 225–3) a druhý byl vyhodnocen jako „dobrý“ (označení motoru 227–3).



Obr. 11 – 1/3 Oktávy pro čtyři měřené motory

Tab.1 – Naměřené hodnoty akustického tlaku  $L_{PA}$  (barevně znázorněny referenční motory)

Označení motoru	Naměřená hodnota akustického tlaku $L_{PA}$ [dB]
227-3	61,16
225-3	77,92
230-3	68,79
276-3	65,63



- a) **Vyhodnocení dle normy EN 60034-9** - Zde je nutný přepočítání naměřených hodnot akustického tlaku na akustický výkon. **Maximální hodnota akustického výkonu  $L_{WA}$  pro tento typ motoru (dle EN 60034-9) je 81dB.**

Tab. 2 – Vyhodnocení dle EN60034-9

Označení motoru	Naměřená hodnota akustického tlaku $L_{PA}$ [dB]	Vypočtená hodnota $L_{WA}$ dle (28) v [dB]
227-3	61,16	<b>64,26</b>
225-3	77,92	<b>81,02</b>
230-3	68,79	<b>71,89</b>
276-3	65,63	<b>68,73</b>

- b) **Stanovení vlastních limitů hodnoty akustického tlaku  $L_{PA}$**  – většinou přísnější kritéria stanovená po dohodě se zákazníkem
- c) **Pomocné vyhodnocení pomocí přidavných sluchátek** – použitelné pouze v případě vyhodnocení zkušeným a dobře proškoleným operátorem.
- d) **Vytvoření limitů pouze pro specifické frekvence** – (ty s největším odstupem naměřených hodnot „dobrého“ a „hlučného“ motoru). Pro větší jistotu a potvrzení naměřených údajů bylo měření těchto stejných motorů zopakováno v akustické komoře mateřského podniku v Radfordu USA

Tab. 3 – Naměřené hodnoty akustického tlaku  $L_{PA}$  (barevně znázorněny referenční motory)

Označení motoru	Naměřená hodnota akustic. tlaku $L_{PA}$ [dB] v Brně	Naměřená hodnota akustického tlaku $L_{PA}$ [dB] v Radfordu
227-3	61,16	56,9
225-3	77,92	73,3
230-3	68,79	63,9
276-3	65,63	61,4

Naměřené hodnoty akustického tlaku  $L_{PA}$  v Radfordské akustické komoře jsou o 4,2 až 4,9 dB nižší, což značí velmi porovnatelné měření v obou místech (Brno a Radford), kdy naměřená odchylka je stabilní při různých úrovních naměřených hodnot akustického tlaku  $L_{PA}$ . Toto je způsobeno nižší hladinou hlučnosti pozadí v akustické komoře v Radfordu.

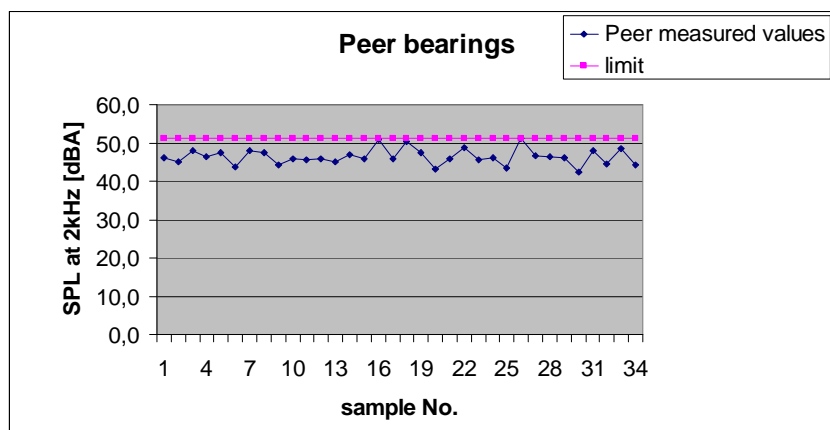
Dále bylo ve frekvenčním spektru 1/3 oktávy nalezeno místo s největším odstupem naměřených hodnot „dobrého“ (227-3) a „hlučného“ (225-3) motoru – obr. č. 11, toto místo s odstupem naměřených hodnot akustického tlaku  $L_{PA} = 28\text{dB}$  bylo nalezeno na frekvenci  $f=2\text{kHz}$ , což bylo pravděpodobně způsobeno rozdílným stavem ložisek měřených motorů.

Tab. 4 – Naměřené hodnoty akustického tlaku  $L_{PA}$  na frekvenci 2kHz (barevně znázorněny referenční motory)

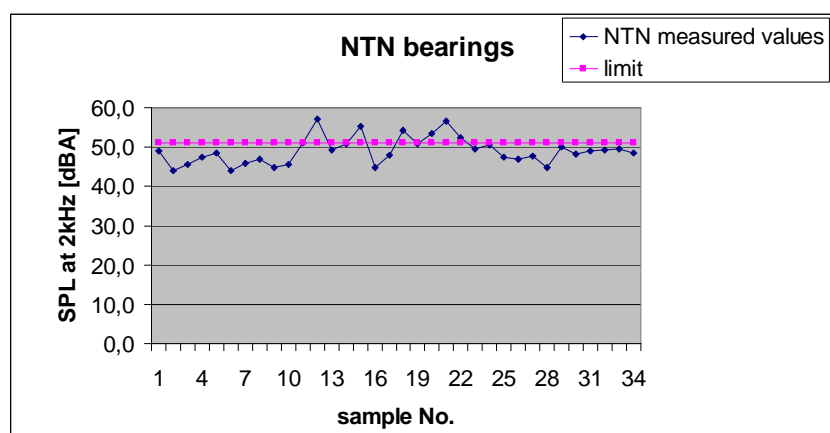
Označení motoru	Naměřená hodnota akustic. tlaku $L_{PA}$ [dB] v Brně	Naměřená hodnota akustického tlaku $L_{PA}$ [dB] v Radfordu
227-3	44,2	41,9
225-3	73,1	69,9
230-3	61,4	58,7
276-3	55,1	52,5

### 5.2.2. Ověření použitelnosti rozboru frekvenčního spektra

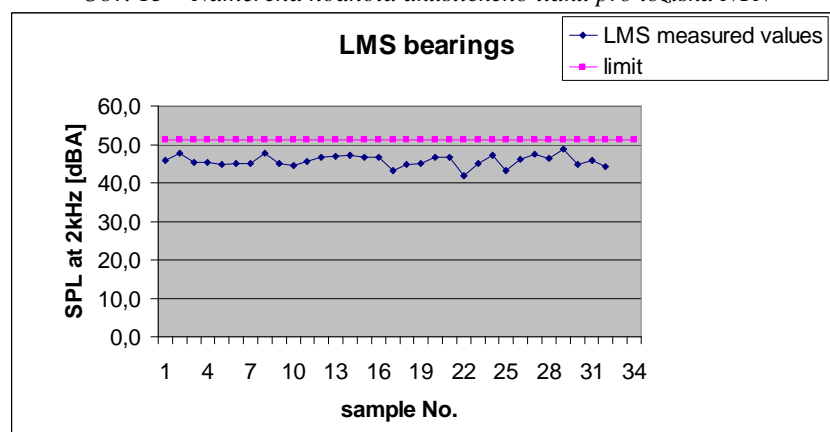
V praxi se při výrobě jediného typu motoru setkáváme s několika modifikacemi tohoto motoru – ať už jde o použití jiných typů zpětnovazebních snímačů, brzd či zesílených ložisek. Každá z těchto variant může vnést další vlivy do testování hluku a rozboru jednotlivých frekvencí. Velikost těchto vlivů názorně dokládá následující test, kdy byl jeden typ motor postupně vybaven identickým typem ložiska, ovšem od tří různých výrobců:



Obr. 12 – Naměřená hodnota akustického tlaku pro ložiska 6003 Peer



Obr. 13 – Naměřená hodnota akustického tlaku pro ložiska NTN



Obr. 14 – Naměřená hodnota akustického tlaku pro ložiska LMS

Jak ukazují obrázky 12 – 14, bylo změřeno a vyhodnoceno 100 motorů stejného typu se stejným typem ložiska – vždy 33 kusů s ložisky od jednoho výrobce. Výsledky těchto měření poukázaly na značné odlišnosti, které byly způsobeny jen rozdílným výrobcem ložisek.

### 5.3. Ověření konstrukce motoru

Ověření konstrukčního uspořádání na existujícím typu motoru TSP 112/4

Parametry motoru TSP 112/4:

$$\begin{aligned} \text{Vinutí - 2paralelní větve zapojené do trojúhelníka} & & 2p \quad 2p = 4 \\ Q_1 = 36 & & P = 1,5\text{kW} \\ Q_2 = 28 & & \\ |Q_1 - Q_2| = 8 \rightarrow |Q_1 - Q_2| = 2p + 4. & & \end{aligned}$$

Podmínka vlivu stupňových harmonických (6)

$$|Q_1 - Q_2| = 2p, 2p \pm 1, 2p \pm 2, \dots \quad \text{VYHOVUJE.}$$

Podmínka vlivu drážkování statoru a rotoru (8)

$$|Q_1 - Q_2| = p; |Q_1 - Q_2| = p, p \pm 1, p \pm 2, \dots \quad \text{VYHOVUJE.}$$

Podmínka vlivu deformace vzduchové mezery (10)

$$|Q_1 - Q_2| = 3p, 3p \pm 1, 3p \pm 2, \dots \quad \text{NEVYHOVUJE podmínce}$$

$$|Q_1 - Q_2| = 3p + 2.$$

Podmínka vlivu sycení železa (11)

$$|Q_1 - Q_2| = 2p; |Q_1 - Q_2| = 4p \quad \text{NEVYHOVUJE podmínce}$$

$$|Q_1 - Q_2| = 4p.$$

Podmínka vlivu excentricity vzduchové mezery (15, 16)

$$|(Q_1 \pm p) - (Q_2 \pm p)| = p \pm 1 \quad \text{VYHOVUJE.}$$

$$|Q_1 - Q_2| = 3p \pm 1 \quad \text{VYHOVUJE.}$$

$$|Q_1 - Q_2| = p \pm 1 \quad \text{VYHOVUJE.}$$

Podmínka vlivu uspořádání s několika paralelními větvemi (17)

$$|Q_1 - 2k_1 Q_2| = 2p, 2 \pm 2, \dots \quad \text{VYHOVUJE.}$$

Podmínka vlivu tangenciálních sil (19, 20)

$$Q_1 \pm p = Q_2 \pm p \quad \text{VYHOVUJE.}$$

$$Q_1 = Q_2 \quad \text{VYHOVUJE.}$$

$$|Q_1 - Q_2| = 2p \quad \text{VYHOVUJE.}$$

Podmínka vlivu společného účinku radiálních a tangenciálních sil (21)

$$|Q_1 - Q_2| = 2p - 1 \quad \text{VYHOVUJE.}$$

#### Ověření kritických frekvencí na existujícím typu motoru TSP 112/4

Kmitočet radiální síly vyvolané stupňovými harmonickými (7):

$$f_c = fK \frac{Q_2}{p} (1-s) = 50K \frac{28}{2} (1-0) = 700, 1400, 2100, \dots \text{Hz}$$

Kmitočet síly vyvolané drážkováním statoru a rotoru (9):

$$f_c = 2f \left[ \frac{Q_2}{p} (1-s) \pm 1 \right] = 100 \left[ \frac{28}{2} 1 \pm 1 \right] = 1300, 1500 \text{Hz}$$

Kmitočet sil vyvolaných stupňovými harmonickými (12, 13):

$$f_c = f \left[ \left( \frac{Q_2}{p} \pm 3 \right) (1-s) \right] = 550,850 \text{ Hz}$$

$$f_c = f \left[ \left( \frac{Q_2}{p} \pm 3 \right) (1-s) \pm 2 \right] = 750,950 \text{ Hz}$$

Kmitočet budících sil při rozběhu stroje (23):

$$f_c = f \left[ \left( \frac{Q_1}{2p} \pm \frac{Q_2}{2p} \right) (1-s) \right] = 800 \text{ Hz}$$

**Závěr:** ověřovaný asynchronní motor TSP 112/4 vyhověl téměř všem požadavkům pro zajištění co možná nejméně hlučného návrhu elektromotoru. Nevyhověl pouze jedné z pěti podmínek deformace vzduchové mezery  $|Q_1 - Q_2| = 3p + 2$  a jedné ze dvou podmínek vlivu sycení železa  $|Q_1 - Q_2| = 4p$ .

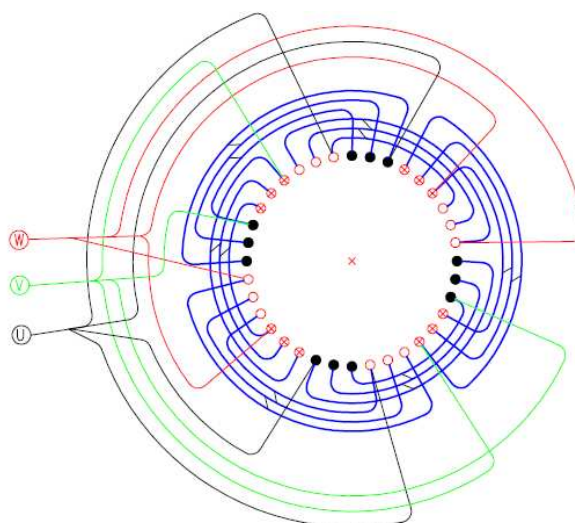
## 5.4. Možnosti snížení hluku asynchronních motorů

Na hlučnost motoru mají rozhodující vliv rezonanční frekvence statoru. Statorové jho musí být dostatečně tuhé a pevně uchycené ve statorové kostře, vhodně musí být volen počet drážek. Hluk lze také snížit např. zvětšením vzduchové mezery nebo menším magnetickým nasycením stroje, což ale vede ke zhoršování vlastností daného stroje. Osvědčenou metodou, která málo ovlivňuje vlastnosti stroje, je zešíkmení drážek, kde například při zešíkmení o jednu statorovou drážku ( $C=1$ ) dojde k zamezení radiálních kmitů a příčné kmity nabývají asi 75% své maximální hodnoty.

Další možností jak dosáhnout snížení hlučnosti potlačením vyšších harmonických magnetické indukce ve vzduchové mezeře, je odstupňování vzduchové mezery pod jednotlivými zuby statoru. Toho lze dosáhnout rozborem magnetomotorického napětí statorového vinutí, čehož lze dosáhnout pomocí Görgesova diagramu.

### Aplikace Görgesova diagramu na motoru TSP 112/4

parametry vinutí:  $2p = 4$ ,  $q = 3$ ,  $Q = 36$

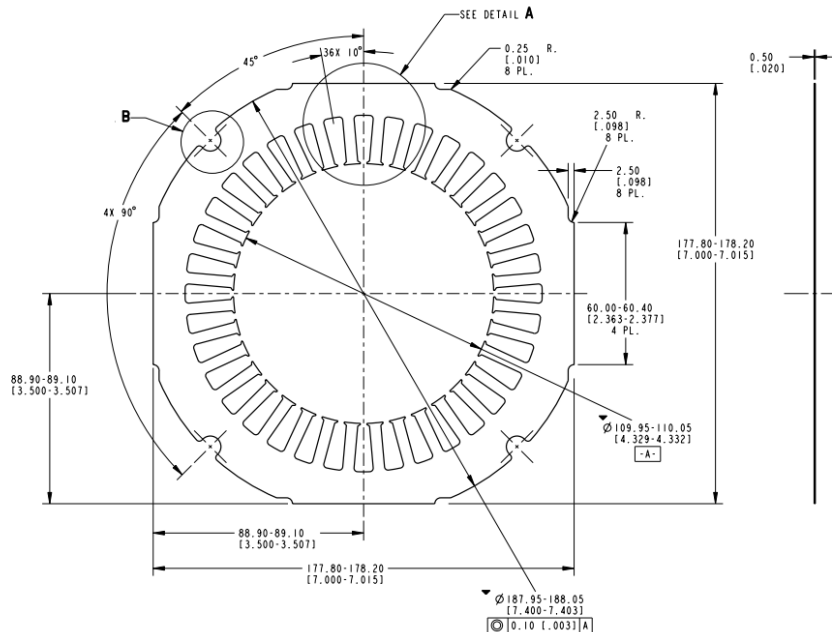


Obr. 15 – Vinutí motoru TSP112/4

Pro jednovrstvé vinutí se volí proudový obsah drážky roven jedné straně trojúhelníkové sítě. Okamžitou hodnotu fázoru magnetomotorického napětí  $F_{m(r)t}$  nad drážkou  $r$  vyjádříme sečtením fázorů proudových obsahů drážek s přihlédnutím na příslušnost proudů k jednotlivým fázím [7]:

$$F_{m(r)t} = \overline{SR}_r \cos(\omega t + \varphi_r) \quad (27)$$

kde:  $\overline{SR}_r$  – paprsek vedený ze středu S Gorgesova diagramu ke koncovému bodu  $R_r$  fázoru proudového obsahu drážky  $r$ .



Obr. 16 – Výkres statorové laminace motoru TSP112/4

Průběh magnetomotorických napětí ve vzduchové mezeře je naznačen na obr. 17. Rozdíl modulů jednotlivých paprsků  $\overline{SR}_r$  udává kolísání amplitudy magnetomotorických napětí pod jednotlivými drážkami, což naznačuje vyznačený stupňovitý průběh magnetomotorických napětí ve vzduchové mezeře.

Pro potlačení těchto stupňovitých harmonických se může použít dvouvrstvé vinutí s velkým počtem drážek na pól a fázi a se zkráceným krokem, jejichž Gorgesův diagram se blíží kružnici. Z technologických a ekonomických důvodů jsou ale výhodnější statory s minimálním počtem drážek a bez zkráceného kroku a se strojním navíjením.

Průběh magnetické indukce ve vzduchové mezeře můžeme vyjádřit [7]:

$$B_{(r,t)} \approx \frac{\overline{SR}_r}{\delta_r} \cos(\omega t + \varphi_r) \quad (28)$$

V ideálním případě by tedy měl být výsledný diagram kružnicí, musí tedy být průběh magnetické indukce sinusový, což znamená [7]:

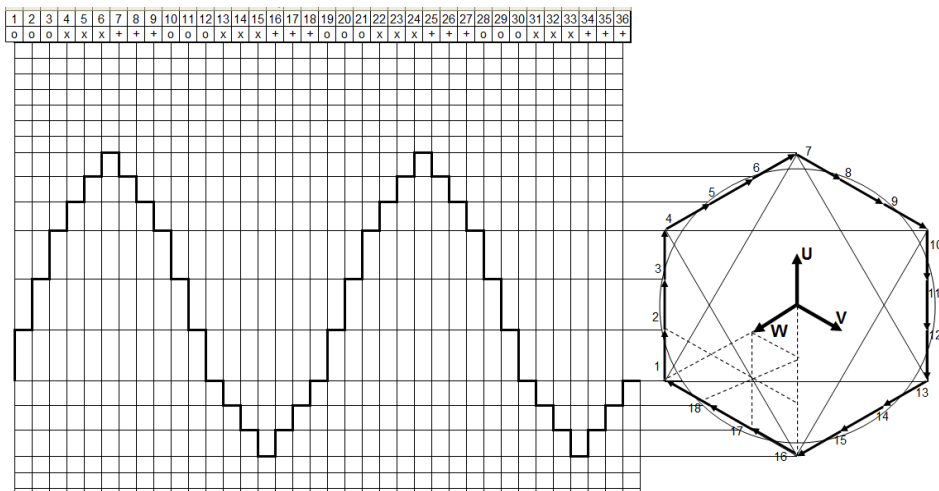
$$\frac{\overline{SR}_r}{\delta_r} = konst. \quad (29)$$

Aby byla splněna tato podmínka, musí být vzduchová mezera  $\delta$  nad každým zubem jiná, protože paprsek  $\overline{SR}_r$  určuje okamžitou hodnotu magnetomotorického napětí nad drážkovou roztečí  $r$ . Musí tedy platit [7]:

$$\frac{\delta_{\max}}{\delta_{\min}} = \frac{\overline{(SR_r)_{\max}}}{\overline{(SR_r)_{\min}}} \quad (30)$$

Pro vinutí TSP 112/4 tedy platí (30):

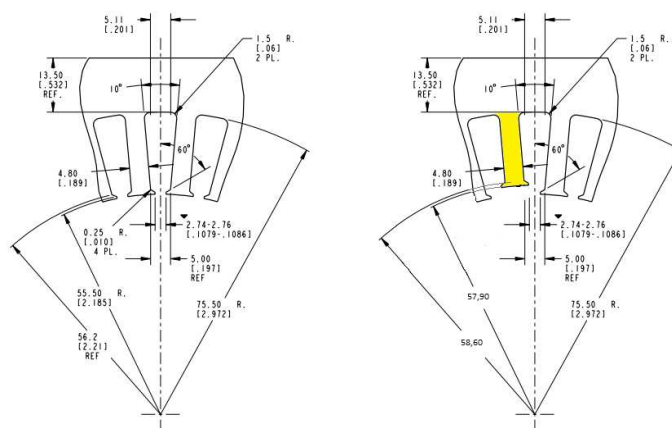
$$\frac{\delta_{\max}}{\delta_{\min}} = \frac{3}{3 \sin 60^\circ} = 1,154$$



Obr. 17 – Aplikace Görgešova diagramu pro motor TSP112/4

Pro vyloučení stupňových harmonických je tedy nutné u tohoto vinutí zvětšit vzduchovou mezera nad mezifázovými zuby o 15%. Vlivem tohoto zvětšení vzduchové mezery dojde sice k malému poklesu pracovní harmonické, ale vymizí veškeré stupňové harmonické nízkých řádů. Aby však nedocházelo k poklesu pracovní harmonické, doporučuje se zvětšit vzduchovou mezera pod mezifázovými zuby maximálně o 10%.

Aby bylo dosaženo co největší eliminace stupňových harmonických nízkých řádů a přitom k co nejmenšímu poklesu pracovní harmonické, bylo pro motor TSP 112/4 navrženo zvětšení vzduchové mezery pod mezifázovými zuby o 12%.

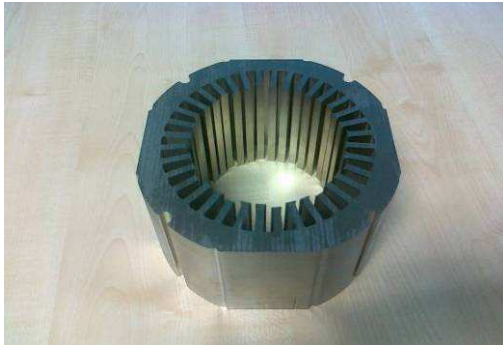


Obr. 18 – Návrh zkrácení mezifázového zubu pro TSP112/4

## 5.5. Výsledky experimentů ke snížení hluku u motoru TSP 112/4

### 5.5.1. Technická příprava

Nejprve bylo nutno upravit stávající výkres pro standardní provedení motoru TSP112/4 a dle takto připraveného výkresu nechat vyrobit prototyp statorového paketu. Délka statorového paketu byla zvolena na 90mm se standardním vinutím (dle obr. 15) s 10ti závitů. Vyrobený prototyp statorového paketu byl následně navinut s použitím veškerých materiálů (drážková izolace, měděný drát, impregnační lak...) jako pro standardní stator TSP112/4.



Obr. 19 – Pohled na vyrobený vzorek stat.paketu



Obr. 20 – Pohled na prototyp statoru

### 5.5.2. Porovnání standardní a optimalizované varianty motoru

Měření probíhala v laboratoři a s přístrojovým vybavením firmy Kollmorgen, s.r.o. Uchycení motoru a pohled na měřicí pracoviště (ukotvení mikrofону vpravo dole) je znázorněno na obr. 21. Pro zajištění stejných podmínek probíhala všechna měření při teplotě vinutí motorů  $\sim 100^{\circ}\text{C}$ . Pro jednodušší identifikaci obou zkoušených motorů budou nadále motory označovány jako "01" a "02":

**01 ~ Standardní motor TSP112/4 ( $15,6\text{m}\Omega$ ,  $130\mu\text{H}$ )**

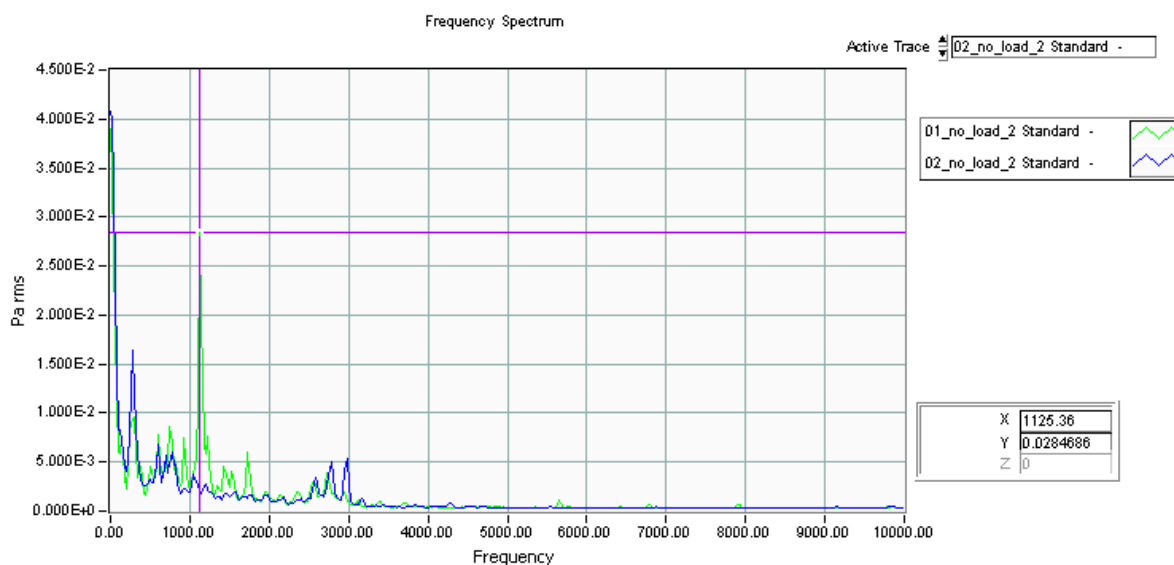
**02 ~ Optimalizovaný motor TSP112/4 ( $15,8\text{m}\Omega$ ,  $122\mu\text{H}$ )**



Obr. 21 – Měřicí pracoviště s motorem TSP112/4 na dynamometru

• **Standardní a optimalizované TSP 112/4 harmonicky napájené naprázdno ( $1500 \text{ min}^{-1}$ ):**

Při tomto měření byly oba zkoušené motory napájeny z napěťově regulovatelného zdroje (booster) při frekvenci 50Hz a nastaveném napětí 30V.



Obr. 22 – Frekvenční spektrum pro standardní a optimalizované TSP112/4 bez zatížení

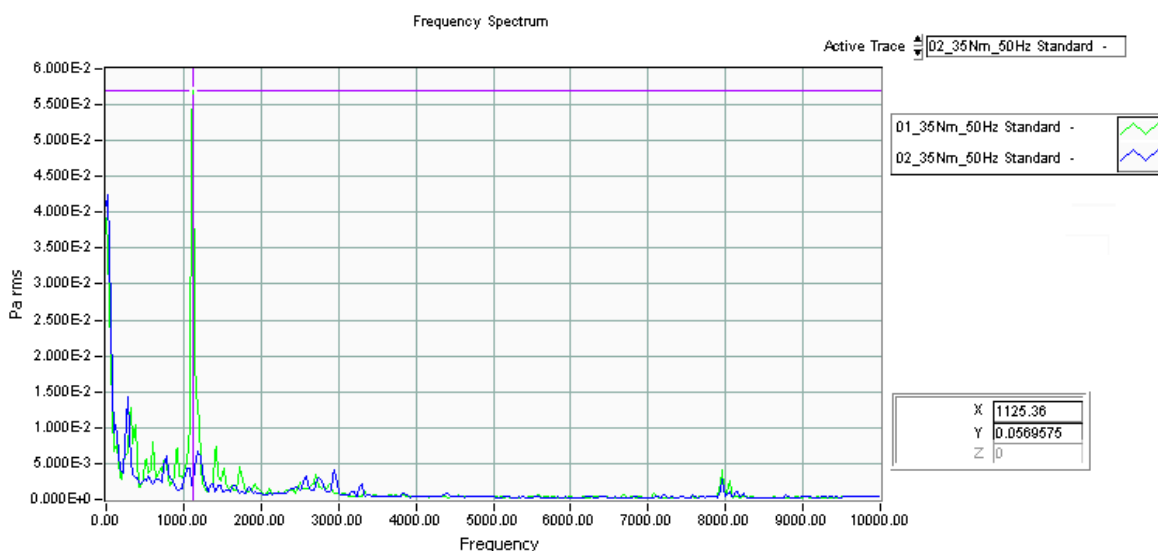
Graf frekvenčního spektra na obr. 22 ukazuje rozdíl v naměřeném akustickém tlaku na frekvencích 800 – 1800Hz. Rozdíl potvrzuje i celková "overall" hodnota akustického tlaku  $L_pA$  [dB], kde je rozdíl mezi zkoušenými motory 3,1 dB – viz tab. 5.

Tab. 5 – Standardní a optimalizované TSP112/4 při no-load testu

Podmínky zkoušky	Motor	Naměřená hodnota akustického tlaku $L_pA$ [dB]	$\Delta L_pA$ [dB]
No-load	01	63,34	-3,11
	02	60,23	

• **Standardní a optimalizované TSP 112/4 harmon. napájené; 30Nm, 50Hz ( $1500 \text{ min}^{-1}$ ):**

Zde byly opět oba zkoušené motory napájeny z napěťově regulovatelného zdroje (booster) při frekvenci 50Hz a nastaveném napětí 30V, ovšem nyní při zátěži 30Nm.



Obr. 23 – Frekvenční spektrum pro standardní a optimalizované TSP112/4 harmonické nap.; 30Nm



Nevýraznější rozdíl mezi standardní a optimalizovanou variantou je vidět na frekvenci ~ 1125Hz, což poukazuje na druhou harmonickou kmitočtu sil vyvolaných stupňovými harmonickými. Tyto síly byly optimalizací výrazně potlačeny. Optimalizace motoru ovšem způsobila i pokles pracovní harmonické, výkon optimalizovaného motoru klesl o 1,2%.

Tab. 6 – Standardní a optimalizované TSP112/4, souhrn naměřených dat při 30Nm, 50Hz

Podmínky zkoušky	Motor	Výkon $P_{out}$ (W)	$\Delta P_{out}$ (%)	Naměřená hodnota akustického tlaku $LpA$ [dB]	$\Delta LpA$ [dB]
30Nm, 50Hz	01	4446,0	-1,2	64,05	-3,22
	02	4391,7		60,83	

Kmitočty sil vyvolaných stupňovými harmonickými (12, 13):

$$f_c = f \left[ \left( \frac{Q_2}{p} \pm 3 \right) (1 - s) \right] = 550,850 Hz$$

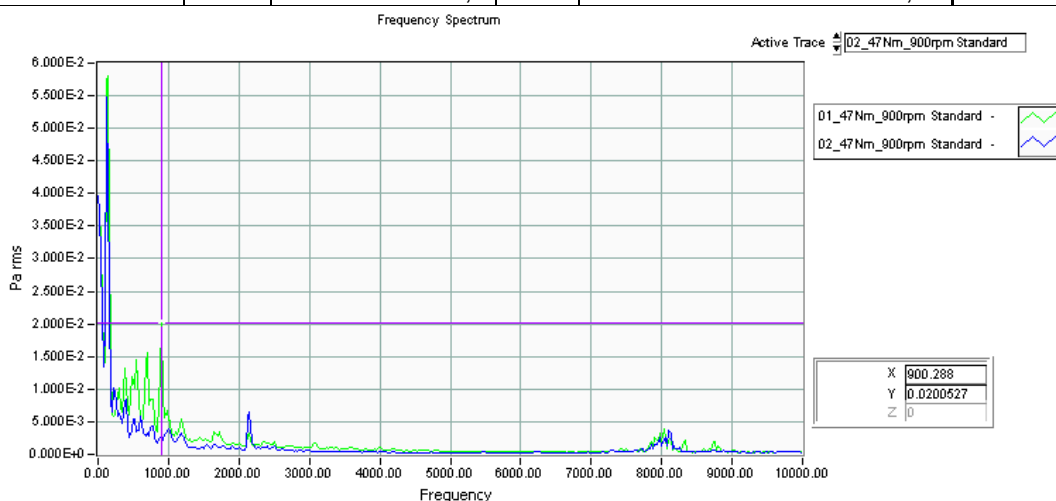
$$f_c = f \left[ \left( \frac{Q_2}{p} \pm 3 \right) (1 - s) \pm 2 \right] = 750,950 Hz$$

• **Standardní a optimalizované TSP 112/4 neharmonicky napájené, 47Nm, 900 min<sup>-1</sup>:**

Pro další neharmonicky napájené zkoušky byl použit frekvenční měnič Super Drive ACS 8020-440C s PWM frekvencí 8kHz, který byl napájen přímo do meziobvodu usměrněným napětím 80V DC. Zátěž dynamometru byla u této zkoušky nastavena na 47Nm (v momentové vazbě) při nastavených otáčkách zkoušených motorů 900 min<sup>-1</sup> (v otáčkové vazbě).

Tab. 7 – Standardní a optimalizované TSP112/4, souhrn naměřených dat při 47Nm, 900 min<sup>-1</sup>

Podmínky zkoušky	Motor	Výkon $P_{out}$ (W)	$\Delta P_{out}$	Naměřená hodnota akustického tlaku $LpA$ [dB]	$\Delta LpA$ [dB]
47Nm, 900rpm	01	4484,6	-4,0	66,22	-5,48
	02	4306,7		60,74	



Obr. 24 – Frekvenční spektrum pro standardní a optimalizované TSP112/4 neharmonicky nap., 47Nm 900 min<sup>-1</sup>

Při tomto testu se nejvýrazněji projevil rozdíl mezi standardní a optimalizovanou variantou na frekvenci ~ 900Hz, což je společná kritická frekvence sil vyvolaných drážkováním statoru a rotoru a pátá harmonická budících sil způsobených neharmonickým napájením. Pokles výkonu u optimalizovaného motoru o již výraznější 4%.

Kmitočty síly vyvolané drážkováním statoru a rotoru (9):

$$f_c = 2f \left[ \frac{Q_2}{p} (1 - s) \pm 1 \right] = 60 \left[ \frac{28}{2} 1 \pm 1 \right] = 780,900 Hz$$

Kmitočet budících sil při neharmonickém napájení při kmitočtu  $f = 30\text{Hz}$  (24):

$$f_v = 6Kf = 180, 360, 540, 720, 900, \dots \text{Hz}$$

• **Standardní a optimalizované TSP 112/4 neharmonicky napájené, 45Nm, 1500 min<sup>-1</sup>:**

Zde se nevýrazněji projevil rozdíl mezi standardní a optimalizovanou variantou na frekvenci ~ 1150Hz, což je blízko společnému působení kritické frekvence sil vyvolaných stupňovými harmonickými a čtvrtá harmonická sil způsobených neharmonickým napájením.

Tab. 8 – Standardní a optimalizované TSP112/4, souhrn naměřených dat pro 45Nm, 1500 min<sup>-1</sup>

Podmínky zkoušky	Motor	Výkon $P_{\text{out}}$ (W)	$\Delta P_{\text{out}}$	Naměřená hodnota akustického tlaku $L_p$ [dB]	$\Delta L_p$ [dB]
45Nm, 1500rpm	01	7017,6	-2,9	70,25	-5,76
	02	6816,1		64,49	

Kmitočet sil vyvolaných stupňovými harmonickými a neharmonickým nap. (12, 24):

$$f_c = f \left[ \left( \frac{Q_2}{p} \pm 3 \right) (1 - s) \right] = 550,850\text{Hz}$$

$$f_v = 300, 600, 900, 1200, \dots \text{Hz}$$

• **Standardní a optimalizované TSP 112/4 neharmonicky napájené, 35Nm, 2100 min<sup>-1</sup>:**

Rozdíl mezi standardní a optimalizovanou variantou nejvýraznější na frekvenci ~ 1625Hz, tedy v blízkosti působení čtvrté harmonické budících sil způsobených neharmonickým napájením. Při této zkoušce měl optimalizovaný motor celkovou "overall" hodnotu akustického tlaku  $L_p$  [dB] nejvýrazněji nižší, a to o 11,87dB, kdy výkon poklesl o 4,7%.

Tab. 9 – Standardní a optimalizované TSP112/4, souhrn naměřených dat pro 35Nm, 2100 min<sup>-1</sup>

Podmínky zkoušky	Motor	Výkon $P_{\text{out}}$ (W)	$\Delta P_{\text{out}}$	Naměřená hodnota akustického tlaku $L_p$ [dB]	$\Delta L_p$ [dB]
35Nm, 2100rpm	01	7757,9	-4,7	76,99	-11,87
	02	7391,8		65,12	

Budící síly způsobené neharmonickým napájením nám při základním kmitočtu 70Hz (24):

$$f_v = 420, 840, 1260, 1680, \dots \text{Hz}$$

• **Standardní a optimalizované TSP 112/4 harmonicky napájené, 10Nm, 3000 min<sup>-1</sup>:**

Při tomto testu se nevýrazněji projevil rozdíl mezi standardní a optimalizovanou variantou na frekvenci ~ 2300Hz, což je blízko společnému působení druhé harmonické frekvence sil vyvolaných stupňovými harmonickými a čtvrté harmonické budících sil způsobených neharmonickým napájením. Pokles výkonu u optimalizovaného motoru o 4,2%.

Tab. 10 – Standardní a optimalizované TSP112/4, souhrn naměřených dat pro 10Nm, 3000 min<sup>-1</sup>

Podmínky zkoušky	Motor	Výkon $P_{\text{out}}$ (W)	$\Delta P_{\text{out}}$	Naměřená hodnota akustického tlaku $L_p$ [dB]	$\Delta L_p$ [dB]
10Nm, 3000rpm	01	3003,1	-4,2	71,94	-6,95
	02	2875,5		64,99	

Kmitočet sil vyvolaných stupňovými harmonickými (12):

$$f_c = f \left[ \left( \frac{Q_2}{p} \pm 3 \right) (1 - s) \right] = 1100,1700\text{Hz}$$

Budící síly způsobené neharmonickým napájením nám při základním kmitočtu 100Hz (24):

$$f_v = 600, 1200, 1800, 2400, \dots \text{Hz}$$

## 6. Závěr

V první části práce bylo ukázáno použití základních metod měření (kapitola 2. 1.) asynchronních motorů, což umožňuje vytvoření dobrého obrazu o aktuálním stavu motoru. Pro hlubší analýzu a predikci stavu, je ale nutné použití některých ze speciálních měřících technik (kapitoly 5.1 a 5.2) a provést detailnější rozbor výsledků. Aplikace těchto měřících a vyhodnocovacích technik je dobře ukázána na použitém příkladu „hlučného“ referenčního motoru, kde hodnota akustického výkonu  $L_{WA}$  pouze o dvě setiny překračovala povolenou horní hranici tolerance dle EN 60034–9, což mohlo vést k tomu, že obdobně hlučný motor by byl při použití pouze těchto limitů dle EN 60034–9 označen jako vyhovující. Detailnější rozbor naměřených hodnot akustického tlaku ukázal kritickou frekvenci tohoto typu motoru (2kHz), kde se nejvíce projeví rozdíl mezi „dobrým“ a „hlučným“ motorem (28dB). Proto se v tomto případě jeví jako více vhodné použití vyhodnocovacích kritérií na této specifické frekvenci, namísto vyhodnocení pouze dle EN 60034–9.

Bylo vytvořeno pracoviště pro měření vibrací a hluku motorů, které díky měřicímu boxu s útlumem až 30dB mohlo být implementováno přímo ve výrobní hale do výrobní linky. Následně byly implementovány i pokročilé testovací procedury na frekvenční analýzu výsledků měření hluku a vibrací s cílem zpřesnit vyhodnocovací kritéria (kapitoly 5. 1. a 5. 2.). Pomocí statistických vyhodnocení předešlých měření a ve spolupráci se zákazníky jsou vyhodnocovací kritéria dále upravována na základě potřeb v konkrétních aplikacích.

Následně po detailním rozboru příčin hluku asynchronních motorů byla provedena praktická kontrola návrhu motoru s ohledem na podmínky konstrukce bezhlučných motorů a následně byla provedena úprava konstrukce existujícího typu motoru s cílem eliminace vzniku hluku při provozu stroje. Takto konstrukčně upravený motor byl sestaven a měřením porovnán se standardním neoptimalizovaným provedením. Výsledky ukazují, že má smysl zabývat se optimalizací konstrukce asynchronních motorů z pohledu hlučnosti, kdy rozdíl mezi optimalizovanou a standardní variantou byl až 11,87dB při neharmonickém napájení. Rozdíl 11,87dB je až nečekaně výrazný rozdíl, který ale mohl být zkreslen např. nastavením frekvenčního měniče (použité parametry měniče byly stejné, ovšem parametry motorů se vlivem optimalizace trochu lišily – kapitola 5.5.2) nebo také kvalitou mechanického upevnění. Pokles hlučnosti optimalizované varianty motoru byl ovšem vykoupen poklesem výkonu až o 4,7%, tedy není vhodná pro aplikace vyžadující maximální výkony.

## 7. Přínosy disertační práce

Problematika měření hluku elektrických strojů je stále aktuálnějším tématem. V dnešní době již není jednoduché neustále vylepšovat konstrukci asynchronních motorů (když pomínu snahy o použití co možná nejlevnějších komponent), protože jejich konstrukce je již natolik propracovaná a využití všech materiálů je velmi efektivní. Přijít proto na trh "s něčím novým", odlišit se od konkurence je stále obtížnější. Jednou z těchto možností je zaměřit se na hlučnost motorů, která je pro stále se zvětšující skupinu zákazníků velmi důležitým parametrem. Hlavní teoretické přínosy disertační práce je možno shrnout do následujících bodů:

- ověření možnosti implementace pokročilých testovacích procedur s využitím frekvenční analýzy výsledků měření hluku a vibrací včetně možnosti zpřesnění vyhodnocovacích kritérií a určení konkrétní příčiny problému v motoru.
- nalezení a ověření metodiky návrhu stanovené skupiny asynchronních motorů s ohledem na minimalizaci elektromagnetického hluku, spočívající v úpravě geometrie mezifázového zubu statorového paketu.

Přínosy disertační práce pro technickou praxi byly ověřeny ve spolupráci s externí společností Kollmorgen, s. r. o., spočívají v oblasti bezdemontážní diagnostiky a optimalizace návrhu asynchronních motorů a je možno je shrnout do následujících bodů:

- úspěšná implementace výše uvedených pokročilých testovacích procedur pro měření vibrací a hluku, která vyústila v originální zákaznická řešení v konkrétních aplikacích.
- metodika měření hlučnosti motorů přímo ve výrobních linkách včetně úskalí při vyhodnocování výsledků při malosériové až kusové výrobě.
- ověření možnosti optimalizace konstrukce výrobního portfolia asynchronních motorů s ohledem na zajištění co možná nejmenší hlučnosti.

V oblasti pedagogické pak výsledky práce představují přínos využitelný ve všech stupních studia konstrukčních studijních oborů vysokých škol technického zaměření, především pak v možnostech implementace nových metod bezdemontážní diagnostiky a snižování ekologické zátěže strojních zařízení.

## 8. Literatura

- [1] ARBAUER, J., aj.: Izolanty a izolácie, ALFA, Bratislava, 1969
- [2] BARTÁK, A., MRAVINÁČ, L., NEUMANN, J., VAŘÁK, J.: Diagnostika poruch izolací elektrických strojů, 1984, ISBN 04-523-84
- [3] BAŠTEK, M.: Vplyv neharmonického napájania na hluk asynchronného motora v stave naprázdno. Kandidátská disertační práce VŠDS Žilina 1979
- [4] BERG, S.: EVS Final Tester documentation, 2003, Danaher Motion (Kollmorgen) Sweden
- [5] BOLDEA, I., NASAR SYED, A.: The induction machine handbook, CRC Press, Boca Raton, Florida, 2002, ISBN 0-8493-0004-5
- [6] GJAERDE, A. C.: Multifactor Ageing Models – Origin and Similarities, IEEE Electrical Insulation Magazine, Vol.13, No.1, 1997
- [7] HAMATA, V.: Hluk elektrických strojů, ACADEMIA, Praha, 1987
- [8] JALAHALLIWEST:[http://www.kv1jalahalli.org/tutorials/vault/3\\_Pulse\\_modulation.ppt](http://www.kv1jalahalli.org/tutorials/vault/3_Pulse_modulation.ppt), Jalahalli West University Bengalury India, 2010
- [9] JORDAN, H.: Der geräuscharme Elektromotor, Gorardet, Essen. 1950
- [10] KOUTSKÝ, J.: Degradáční procesy a predikce životnosti, ZČU, FST, Plzeň, 1995, ISBN 80-7082-177-9
- [11] KUHL, W.: Messungen zu den Theorien der Eigenschwingungen von Kreisringen baliebigiger Wandstärke. Akust. Zeitschrift /78, 1942
- [12] LÅFTMAN, L.: The Contribution to Noise from Magnetostriction and PWM Inverter in a Induction machine, IEA, LUND, Sweden, 1995
- [13] LÅFTMAN, L.: Acoustical Noise Generating Factors in PWM Induction Motor Drives, IEA, LUND, Sweden, 1991
- [14] MAZZANTI, G., MONTANARI, G. C., DISSADO, L. A.: Electrical Aging and Life Models – The Role of Space Charge, In: IEEE Transaction on Dielectrics and Electrical Insulation., 2005, ISSN 1070–9878, Vol. 12, No.5

- [15] MĚŘIČKA, J., HAMATA, V., VOŽENÍLEK, P.: Elektrické stroje, ČVUT, 1993, ISBN 80-01-01020-1
- [16] PAJAK, M.: SKF sensorbearings, 2007, SKF GmbH
- [17] RYNDOVÁ, A., DOLOŽÍLEK, M., VAŇKOVÁ, M.: Hodnoty hladin akustického tlaku od jednotlivých component turbosoustrojí v 1m od měřicí plochy: Protokol č.244 VUT v Brně, 2006
- [18] TATSUNOBU MOMONO, BANDA NODA: Sound and Vibration in Rolling Bearings, 1999, Motion & Control – NSK Technical Journal 1999
- [19] VAŇKOVÁ, M., DOLOŽÍLEK, M., NOVÁK, J., RYNDOVÁ, A., HOUŠKA, A., MACUR, M., ČURDA, Z.: Hluk, vibrace a ionizující záření I, 1995, ISBN 80-214-0695-X
- [20] VAŇKOVÁ, M., DOLOŽÍLEK, M., NOVÁK, J., RYNDOVÁ, A., VÁLA, K., VOŽNÁK, R., MACUR, M.: Hluk, vibrace a ionizující záření II, 1996, ISBN 80-214-0818-9

## 8.1. Vlastní publikace

- [1] NESVADBA, M.; SINGULE, V.: **TESTING OF ASYNCHRONOUS TRACTION MOTORS**, International PhD Conference on Mechanical Engineering – PhD 2006, pp. 1 – 2, ISBN 80-7043-486-4, (2006), Západočeská universita v Plzni *článek ve sborníku akce: International PhD Conference on Mechanical Engineering PhD 2006, Pilsen, 11. 09. 2006 – 13. 09. 2006*
- [2] NESVADBA, M.; SINGULE, V.: **NOISE IN-LINE TESTING**, Research in the Field of Production Machines, Production systems and Robotics, VUT-FSI v Brně *článek ve sborníku akce: 1<sup>st</sup> Ph.D. Students Workshop 2007, Brno 30. 5. 2007*
- [3] NESVADBA, M.; SINGULE, V.: **ELECTRIC MOTORS NOISE IN LINE MEASURING**, Proceedings of 10th international symposium on mechatronics MECHATRONIKA 2007, pp. 29 - 32, ISBN 978-80-8075-210-1, (2007), AD University of Trenčín *článek ve sborníku akce: 10th International symposium on mechatronics MECHATRONIKA 2007, Trenčianske Teplice, 06. 06. 2007 - 08. 06. 2007*
- [4] NESVADBA, M.; SINGULE, V.: **NOISE TESTING OF ELECTRICAL MOTORS – THE TEST RESULTS EVALUATION**, ENGINEERING MECHANICS 2008, Centrum mechatroniky – ÚT AV ČR – pobočka Brno *článek ve sborníku akce: Engineering Mechanics 2008, Svratka 12 – 15. 5. 2008*
- [5] NESVADBA, M.; SINGULE, V.: **INSULATION SYSTEM LIFE TIME – VOLTAGE SPIKES AND dv/dt RATE DEPENDENCE ON DRIVE SUPPLY VOLTAGE**, Research in the field of Production machines, Production systems and Robotics, VUT-FSI v Brně *článek ve sborníku akce: 2<sup>nd</sup> Ph.D. Students Workshop 2008, Brno 29. 5. 2008*
- [6] NESVADBA, M.; SINGULE, V.: **EL. MOTORS INSULATION LIFE TIME – IMPACT OF DRIVE SUPPLY VOLTAGE (AND dv/dt SPIKES)**, Proceedings of 11<sup>th</sup> international symposium on mechatronics MECHATRONIKA 2008, pp.2, ISBN 978-80-8075-306-1, (2008), AD University of Trenčín *článek ve sborníku akce: 11th International symposium on mechatronics MECHATRONIKA 2008, Trenčianske Teplice, 04. 06. 2008 – 06. 06. 2008*

- [7] NESVADBA, M.; DUROŇ, J.; SINGULE, V.: **STUDY OF INCREASED BUS VOLTAGE INFLUENCE ON MOTOR INSULATION SYSTEM**, Low voltage electrical machines, FEEC BUT *článek ve sborníku akce: Low voltage electrical machines, Brno-Šlapanice, 03. 11. 2008 – 04. 11. 2008*
- [8] NESVADBA, M.; DUROŇ, J.; SINGULE, V.: **INFLUENCE OF INCREASED BUS VOLTAGE TO MOTOR INSULATION SYSTEM**, ENGINEERING MECHANICS 2009, *Centrum mechatroniky – ÚT AV ČR – pobočka Brno článek ve sborníku akce: Engineering Mechanics 2009, Svratka 11. – 14. 5. 2009*
- [9] NESVADBA, M.; DUROŇ, J.; SINGULE, V.: **STUDY OF INCREASED BUS VOLTAGE INFLUENCE ON MOTOR INSULATION SYSTEM**, MECHATRONIC SYSTEMS AND MATERIALS 2009, *Mechanical Faculty of Vilnius Gediminas Technical University – článek v recenzovaném zahraničním časopise Solid State Phenomena, akce: Mechatronic systems and mat. 2009, Vilnius 22. – 25. 10. 2009*
- [10] NESVADBA, M.; DUROŇ, J.; SINGULE, V.: **STUDY OF CABLE LENGTH AND INCREASED BUS VOLTAGE INFLUENCE ON MOTOR INSULATION SYSTEM**, Proceedings of 12<sup>th</sup> international symposium on mechatronics MECHATRONIKA 2009, AD University of Trenčín *článek ve sborníku akce: 12th International symposium on mechatronics MECHATRONIKA 2009, Trenčianske Teplice, 03. 06. 2009 – 05. 06. 2009*
- [11] NESVADBA, DUROŇ, J.; M.; SINGULE, V.: **CABLE LENGTH AND INCREASED BUS VOLTAGE INFLUENCE ON MOTOR INSULATION SYSTEM**, MECHATRONICS 2009, *Faculty of Mechanical Engineering of the Brno University of Technology – článek ve sborníku akce: Mechatronics 2009, Luhačovice 18. – 20. 11. 2009*
- [12] DUROŇ, J.; NESVADBA, M.; VEČEŘA, J.; KOŤARA, P.: **HIGH EFFICIENCY PERMANENT MAGNET SYNCHRONOUS MOTOR**, Low voltage electrical machines, FEEC BUT *článek ve sborníku akce: Low voltage electrical machines, Brno-Šlapanice, 02. 11. 2009 – 03. 11. 2009*
- [13] NESVADBA, M.; SINGULE, V.: **NOISE TESTING OF ELECTRICAL ON THE ASSEMBLY LINES AND THE TEST RESULTS EVALUATION**, XLVI International symposium on electrical machines SME 2010, Polish Academy of Sciences ISSM 0239-3646, *článek v recenzovaném zahraničním časopise Maszyny elektryczne, akce: XLVI International symposium on electrical machines SME 2010, Gliwice-Ustroń, 21.06.2010-24.06.2010*
- [14] NESVADBA, M.; SINGULE, V.: **INDUCTION MOTOR DESIGN OPTIMISATION – NOISE REDUCTION**, Proceedings of 14<sup>th</sup> international symposium on mechatronics MECHATRONIKA 2011, AD University of Trenčín *článek ve sborníku akce: 14th International symposium on mechatronics MECHATRONIKA 2011, Trenčianske Teplice, 01.06.2011-03.06.2011*

## 8.2. Produkty a patenty

- [1] NESVADBA, M.; SINGULE, V.: **ELECTRICAL MOTORS IN-LINE NOISE TEST STAND**; Kollmorgen,s.r.o. Brno, Evropská 864, 66442 Brno (funkční vzorek)
- [2] NESVADBA, M.; SINGULE, V.: **INDUCTION ELECTRICAL MOTOR**; Kollmorgen,s.r.o. Brno, Evropská 864, 66442 Brno-Modřice (funkční vzorek)

## Životopis

**Ing. Martin Nesvadba***Jírova 1, Brno 62800; martin.nesvadba@email.cz*

- Datum narození 13. 5. 1977
- Vzdělání
- 1992 – 1995 Studium na SOU stavebním Jílová 36g. Ukončeno v roce 1995 výučním listem v oboru elektromechanik pro rozvodná zař.
  - 1995 – 1997 Maturitní nadstavba na SOU elektrotechnickém. Ukončeno v roce 1997 maturitní zkouškou.
  - 1997 – 2002 Studium VUT v Brně Fakulta strojní – obor průmyslové roboty a manipulátory. Studium ukončeno v roce 2002 SSZ.
- Praxe
- Od 1. 5. 2001 RWMO,s.r.o. již při studiu VUT zaměstnán ve firmě zabývající se vývojem a výrobou elektrotechnických zařízení, jako projektanta – vývojáře.
- Od 1. 9. 2004 Danaher Motion, s.r.o. jako Electrical Design Engineer (mj. účast na několika transferech výrobních linek ze zahraničí – zodpovědnost za produkt/zařízení z elektrotechnického hlediska)
- Od 1. 7. 2006 ve stejné firmě pověřen jako Lead Engineer vedením skupiny test inženýrů a vybudováním laboratoře pro zatěžovací zkoušky el. motorů. K pracovní náplni dále patří veškeré testovací procedury, návrhy testovacích zařízení. Dále dodavatelské audity a správa výrobních certifikací UL (Gate Keeper), CE, TÜV, CCC Free, GOST-R, ATEX...
- Ostatní znalosti
- AJ slovem i písmem (denní komunikace se zahraničními zákazníky, dodavateli a kolegy), pasivně NJ; ŘP sk. B; vyhl.50 §8 o odborné způsobilosti v elektrotechnice; administrátorská znalost práce s OS Windows na PC, znalost Microsoft Office (včetně FrontPage, Access a PowerPoint), základní znalosti programování (VisualBasic, LabView), VISA do USA. Absolvování kurzu soudního znaleství na VUT Brno, pro posuzování stavu a oceňování strojů a strojních zařízení
- Zájmy
- Sledování nových trendů v oblasti vědy a techniky; elektrotechnika; výpočetní a komunikační technika; aktivně sport, cestování.

## Abstrakt

Motivací pro vypracování disertační práce na toto téma byl zájem mého zaměstnavatele, firmy Kollmorgen, s.r.o., na implementaci měřicího pracoviště k měření hluku elektrických motorů. Toto pracoviště mělo být umístěno ve výrobní hale přímo ve výrobní lince s cílem nejen identifikovat hlučné motory, ale také rozbohem naměřených dat poukázat na konkrétní příčinu hlučnosti motoru – neboli implementace inteligentní testovací procedury.

Hlučnost elektrických strojů je v poslední době velmi diskutovaným tématem, kdy je ze strany zákazníků vyvíjen značný tlak právě na zajištění co možná nejméně hlučného pohonného ústrojí. Toho lze dosáhnout jednak zajištěním 100% kvality již vyráběných produktů implementací měřicího pracoviště s inteligentní bezdemontážní diagnostikou a následně také konstrukčními změnami produktu.

V úvodní části práce je proveden rozbor konstrukce testových asynchronních trakčních motorů a také návrh měřicího pracoviště. Následuje popis konstrukce měřicího pracoviště, návrh testovacích procedur, vlastní měření a analýza naměřených hodnot.

Druhá část práce je věnována detailnímu rozboru možných příčin vzniku hluku asynchronních motorů a konstrukčních řešení vedoucích k jeho eliminaci. Aplikací jednoho z těchto konstrukčních postupů pro potlačení hlučnosti byl sestrojen optimalizovaný prototyp, který byl následně testován a porovnán se standardní neoptimalizovanou verzí.

## Abstract

This dissertation thesis is focused on the problem of the noise measurement and construction of the noise test station what was also interest of my employer - company Kollmorgen,sr.o.

This testing station should be located directly in the assembly line with target of the noise motor s identification. On base of these measured values and implemented intelligent testing procedures, we should be able to identify real root cause of the noise

The noise of electrical machines is actual issue. There is a big pressure for low-noise driving system construction created by many end-customers. We can achieve these requirements with 100% quality of all parts of current product, implementation of noise testing station and also with design optimization of the current product.

Basic testing procedures of induction motors were showed in first part of this work (chapter 4.1.). These procedures are able to provide good picture of the motor condition. For the motor noise measurements was constructed a workplace including noise box with acoustical absorption up to 30dB what allowed the workplace implementation directly into the motor assembly line. Testing techniques and frequency analysis procedures were implemented sequentially with the target of the test evaluation improvement.

After the detailed analyze of the motor noise root causes was performed check of the current motor design with respect of the “noiselessness” motor construction principles. As next step was created the motor prototype with optimized construction with target of the motor noise reduction. This optimized motor was tested and compared with standard motor design.