VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ

ÚSTAV VÝKONOVÉ ELEKTROTECHNIKY A ELEKTRONIKY

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

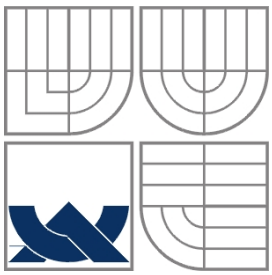
DEPARTMENT OF POWER ELECTRICAL AND ELECTRONIC ENGINEERING

MĚŘENÍ HLUKU ELEKTRICKÝCH STROJŮ

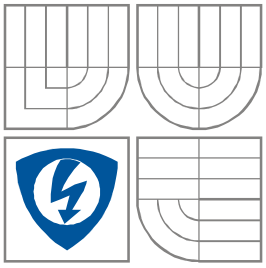
BAKALÁŘSKÁ PRÁCE
BACHELOR THESIS

AUTOR PRÁCE Viktor Fodor
AUTHOR

BRNO 2011



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ
ÚSTAV VÝKONOVÉ ELEKTROTECHNIKY A ELEKTRONIKY
FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION
DEPARTMENT OF POWER ELECTRICAL AND ELECTRONIC ENGINEERING

MĚŘENÍ HLUKU ELEKTRICKÝCH STROJŮ

NOISE MEASUREMENT OF ELECTRIC MACHINES

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE
BACHELOR THESIS

AUTOR PRÁCE Viktor Fodor
AUTHOR

VEDOUCÍ PRÁCE Ing. Marcel Janda, Ph.D.
SUPERVISOR

BRNO 2011

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií

Ústav výkonové elektrotechniky a elektroniky

Bakalářská práce

bakalářský studijní obor
Silnoproudá elektrotechnika a výkonová elektronika

Student: Viktor Fodor ***ID:*** 106429
Ročník: 3 ***Akademický rok:*** 2010/11

NÁZEV TÉMATU:

Měření hluku elektrických strojů

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

1. Na zvoleném typu elektrického stroje proveďte měření pracovních charakteristik.
2. Proveďte měření hluku stroje v různých pracovních stavech.
3. Vyhodnoťte získané hodnoty a určete jednotlivé příčiny hluku měřeného elektrického stroje.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

Dle doporučení vedoucího

Termín zadání: 23.09.2010 ***Termín odevzdání:*** 26.05.2011

Vedoucí projektu: Ing. Marcel Janda Ph.D.

doc. Ing. Petr Toman, Ph.D.
předseda oborové rady

UPOZORNĚNÍ:
Autor semestrální práce nesmí při vytváření bakalářské práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákonu č 40/2009 Sb.

Anotácia

Táto práca pojednáva o problematike tvorby hluku v elektrických točivých strojoch, motoroch. Najprv si objasníme čo vlastne je hluk a zvuk, jeho vlastnosti, jeho šírenie v strojoch. Potom si preberieme možné zdroje hluku v elektrických motoroch a potom možnosti zníženia hluku. Pre overenie teórie uvedenej v tejto práci vykonáme meranie hluku na asynchrónnom elektrickom motore. Ďalej ešte prevedieme meranie pracovnej charakteristiky stroja. Nakoniec popíšeme jednotlivé merania.

Abstract

This work discusses the problem of generating noise in electrical rotating machines, engines. First we explain what noise and sound is, its characteristics, its distribution in machines. Then we discuss the possible sources of noise in electrical motors and the possible reduction of noise. To verify the theory mentioned in this work, we will execute a noise measuring on an induction engine. Further we realize a measurement of the operating curve of the machine. Finally, we describe various measurements.

Kľúčové slová

Akustický tlak, akustický výkon, asynchrónny motor, frekvencia, hluk, hlukomer, ložiská, mikrofón, vibrácia, vlny.

Keywords

Sound pressure, sound power, induction engine, frequency, noise, noise-meter, bearings, microphone, vibration, waves.

Bibliografická citace

FODOR, V. *Měření hluku elektrických strojů.* Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2011. 51 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Marcel Janda, Ph.D..

Prohlášení

Prohlašuji, že svou bakalářskou práci na téma Měření hluku elektrických strojů jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedené bakalářské práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této bakalářské práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení § 152 trestního zákona č. 140/1961 Sb.

V Brně dne …… Podpis autora ……..

Poděkování

Děkuji vedoucímu bakalářské práce Ing. Marcelovi Jandovi Ph.D. za účinnou metodickou, pedagogickou a odbornou pomoc a další cenné rady při zpracování mé bakalářské práce.

V Brně dne …… Podpis autora …….

OBSAH

ÚVOD **12**

1 VZNIK A ROZŠIROVANIE HLUKU V ELEKTRICKÝCH STROJOCH **13**

1.1 VIBRÁCIA, ZVUK A HLUK **13**

1.2 ZVUKOVÉ VLNY **14**

2 ZDROJE HLUKU V ELEKTRICKÝCH STROJOCH **17**

2.1 ELEKTROMAGNETICKÉ ZDROJE HLUKU **17**

2.2 MECHANICKÉ ZDROJE HLUKU **18**

2.2.1 MECHANICKÝ HLUK SPÔSOBENÝ HRIADEĽOVÝMI A ROTOROVÝMI NEROVNOMERNOSŤAMI. 19
2.2.2 LOŽISKOVÝ HLUK 19
2.2.3 HLUK SPÔSOBENÝ OZUBENÝM PREVODOVÝM SÚKOLESÍM 22

2.3 AERODYNAMICKÝ HLUK **23**

3 PROCES PREMENY ENERGIE **25**

3.1 HLADINY HLUKU A POSTUPY MERANÍ PRE ELEKTRICKÉ STROJE **25**

3.2 DETERMINISTICKÉ A ŠTATISTICKÉ METÓDY PREDVÍDANIA HLUKU **27**

4 OVLÁDANIE HLUKU – MOŽNOSTI ZNÍŽENIA HLUKU **28**

4.1 UPEVNENIE **28**

4.2 ZAROVNANIE HRIADEĽA **29**

4.3 ŠTANDARDNÉ METÓDY ZNIŽOVANIA HLUKU **29**

5 HLUKOMERY **32**

6 MERANIE HLUKU NA ASYNCHRÓNNOM STROJI **37**

6.1 MERANIE HLUKU PRI RÔZNYCH CHODOCH STROJA **37**

6.2 VÝPOČET FREKVENCIÍ **41**

6.3 ANALÝZA JEDNOTLIVÝCH MERANÍ **43**

7 MERANIE PRACOVNEJ CHARAKTERISTIKY. **48**

ZÁVER **50**

LITERATÚRA **51**

ZOZNAM OBRÁZKOV

Obr. 1.1: Intenzity zvuku a zóny počuteľnosti v závislosti na frekvencii. [1] 15

Obr. 1.2: Porovnanie niektorých hladín hluku vo vonkajškom prostredí [1] 15

Obr. 2.1: Vznik a prenos hluku v elektrických strojoch [1] 18

Obr. 2.2: Hladina vibrácií v závislosti na rýchlosti pre 1-jednoradové guľôčkové ložisko, 2-dvojradové guľôčkové ložisko [1] 21

Obr. 2.3:Rez guľôčkovým ložiskom kde D je priemer, d_b je priemer guľôčky ložiska a α je dotykový uhol [1] 21

Obr. 3.1: Schémy na predpoveď hluku: a) deterministická metóda, b) štatistické metódy [1] 27

Obr. 4.1: Spoločná posteľ ako základ, 1 – motor, 2 – spojka, 3 – zaťažovací stroj, 4 – spoločná postel [1] 28

Obr. 5.1: Schéma typického hlukomeru [1] 32

Obr. 5.2: Funkcie frekvenčného váženia [1] 34

Obr. 5.3: Schematický diagram condenzátorového mikrofónu [1] 35

Obr. 6.1: Časový priebeh ticha, vypnutý stroj 37

Obr. 6.2: Časový priebeh hluku pri rozbehu stroja pri napätí 100 V 38

Obr. 6.3: Časový priebeh hluku pri rozbehu stroja pri napätí 200 V 38

Obr. 6.4: Časový priebeh hluku stroja pri chode pri 100 V 39

Obr. 6.5: Časový priebeh hluku stroja pri chode pri 200 V 39

Obr. 6.6: Časový priebeh hluku stroja pri dobehu pri 100 V 40

Obr. 6.7: Časový priebeh hluku stroja pri dobehu pri 200 V 40

Obr. 6.8: Rýchla Fourierova transformácia merania pri vypnutom stroji (ticho) 43

Obr. 6.9: Rýchla Fourierova transformácia merania rozbehu stroja pri 100 V 43

Obr. 6.10: Rýchla Fourierova transformácia merania rozbehu pri 200 V 44

Obr. 6.11: Rýchla Fourierova transformácia merania chodu stroja pri 100 V 44

Obr. 6.12: Rýchla Fourierova transformácia merania chodu stroja pri 200 V 45

Obr. 6.13: Rýchla Fourierova transformácia merania dobehu stroja pri 100 V 45

Obr. 6.14: Rýchla Fourierova transformácia merania dobehu stroja pri 200 V 46

Obr. 6.15: Priblíženie Fft merania chodu stroja pri 100 V 46

Obr. 6.16: Priblíženie Fft merania chodu stroja pri 200 V *47*

Obr. 7.1: Meraný asynchrónny motor *48*

Obr. 7.2: Momentová charakteristika elektrického motora v ideálnom stave [2] *48*

Obr. 7.3: Pracovná charakteristika elektrického motora v motorovom režime. *49*

ZOZNAM TABULIEK:

Tab. 1.1: Rýchlosť vlny v rôznych prostrdiach pri 0 °C a 1 atmosfére *13*

Tab. 4.1: Tabuľka opatrení a ich účinkov znižovania hluku z ložiska *31*

Tab. 6.1: Dominantné namerané frekvencie a ich možné príčiny *47*

Tab. 7.1: Namerané hodnoty momentu v závislosti na otáčkach *49*

ZOZNAM SYMBOLOV A SKRATIEK

f	-	frekvencia v *Hz*
I	-	intenzita
L_P	-	hladina akustického tlaku (SPL), *dB*
L_W	-	hladina akustického výkonu (SWL), *dB*
n	-	počet vyšších harmonických; rýchlosť otáčania za min^{-1}
M	-	moment
P	-	výkon vo *W*
p	-	počet pólových dvojíc; akustický tlak
S	-	plocha
φ	-	uhol účinníku; fázový uhol magnetickej indukčnej vlny
ω	-	uhlová rýchlosť $\omega = 2\pi f$

BEM	-	metóda hranice prvkov
FEM	-	metóda konečných prvkov
ODP	-	odolné kvapkám
RMS	-	efektívna hodnota
SED	-	hustota akustickej energie
SPL	-	hladina akustického tlaku
SWL	-	hladina akustického výkonu
SIL	-	hladina akustickej intenzity
TEFC	-	uzavreto ventilátorom chladené
WPII	-	vode odolné typu II

Magnetostrikcia	-	zmena tvaru a rozmerov vzorky pri zmagnetizovaní

ÚVOD

Elektrické asynchrónne motory majú v dnešnej dobe veľmi široký spektrum využitia a nielen v priemysle alebo výrobe, ale aj v domácnostiach. Sú to točivé elektrické stroje, ktoré menia elektrickú energiu na mechanickú. Asynchrónne motory sú stroje, ktoré využívajú striedavý prúd a tieto typy sú najrozšírenejšie. A to pre ich konštrukčnú jednoduchosť a prevádzkovú bezpečnosť.

Samozrejme majú aj radu nedostatkov a jedným z nich je hluk. Hluk je problematikou väčšinu strojov či už točivých alebo netočivých.

V prvej kapitole sa budeme venovať vzniku a rozširovaniu hluku v strojoch. Povieme si ako vzniká hluk, aké sú jeho vlastnosti, výkon zvuku, rozdelenie.

V druhej kapitole si preberieme rôzne zdroje hluku v elektrických strojoch, čím sú tieto nežiaduce hluky spôsobené.

V tretej kapitole sa budeme zaoberať premenou energie na akustickú, postupom merania hluku, hladinami hluku a okrajovo si povieme aké sú metódy predvídania hluku.

Vo štvrtej kapitole sa oboznámime s niektorými možnosťami a opatreniami na zníženie hluku rôzneho charakteru z elektrických motorov.

V piatej kapitole sa zoznámime s meracími prístrojmi hluku, hlukomermi.

V ďalšej kapitole uvedieme priamo meranie na stroji a rozbor a popis hlukov pri rôznych stavoch motora t.j. vypnutý stav, rozbeh, chod, dobeh alebo vypnutie stroja pre napätie 100 *V* a 200 *V*. Tieto štyri stavy aj graficky znázorníme a uvedieme aj výpočty hlukov mechanického pôvodu.

V poslednej kapitole sa oboznámime s momentovou charakteristikou motora a uvedieme aj charakteristiku nášho analyzovaného motora.

1 VZNIK A ROZŠIROVANIE HLUKU V ELEKTRICKÝCH STROJOCH

1.1 Vibrácia, zvuk a hluk

Vibrácia je ohraničený, obmedzený vratný pohyb častice elastického telesa alebo prostredia (média) striedavo proti smere jeho rovnovážnej polohy, ak bola narušená rovnováha. Aby mohli vzniknúť vibrácie, teleso alebo systém musia mať dve charakteristiky: elasticita a masu. Amplitúda vibrácie je maximálna výchylka vibrujúcej častice alebo telesa z jej kludovej polohy.

Zvuk je definovaný ako vibrácia prenášané cez elastické pevné teleso, kvapalinu alebo plyn s frekvenciami o rozsahu 20 až 20 000 *Hz*, ktorý je schopný vyvolať v ľudskom uchu sluchový vnem. Zvuk s vysokou frekvenciou má vysokú výšku tónu, kým zvuk s nízkou frekvenciou má nízku výšku tónu. Rýchlosť mechanického vlnenia závisí na zotrvačných a elastických vlastnostiach prostredia.

$$v = \sqrt{\frac{\tau}{\mu}} \qquad [m/s] \qquad (1.1)$$

Čím je prostredie hustejšie, tým sú vlny rýchlejšie.

Prostredie	Rýchlosť *[m/s]*
Vzduch 0 °C	331
Vzduch 20 °C	343
Hélium	965
Vodík	1284
Hliník	6420
Ocel	5941
Žula	6000

Tab. 1.1: Rýchlosť vlny v rôznych prostrdiach pri 0 °C a 1 atmosfére

Hluk je každý zvuk, ktorý je nežiaduci, nepríjemný, rušivý alebo dokonca škodlivý. Je rozdiel medzi hlukom neseným vzduchom a hlukom prenášaným pevným objektom. Hluk prenášaný vzduchom je zapríčinený pohybom veľkého objemu vzduchu a použitím vysokého tlaku.

1.2 Zvukové vlny

Zvuková vlna je generovaná vibrujúcim objektom a môže byť definovaná ako mechanické rušenie postupujúce s konečnou rýchlosťou cez médium. Tieto vlny majú malú amplitúdu, adiabatickú osciláciu charakterizované vlnovou rýchlosťou, vlnovou dĺžkou, frekvenciou a amplitúdou. Vo vzduchu, zvukové vlny sú pozdĺžne vlny a to je posuvom vo smere šírenia. Inými slovami, pohyb jednotlivých častíc média je vo smere, ktorý je rovnobežný so smerom prenosu energie. Zvukové vlny sa šíria trojrozmerným prostredím od zdroja.

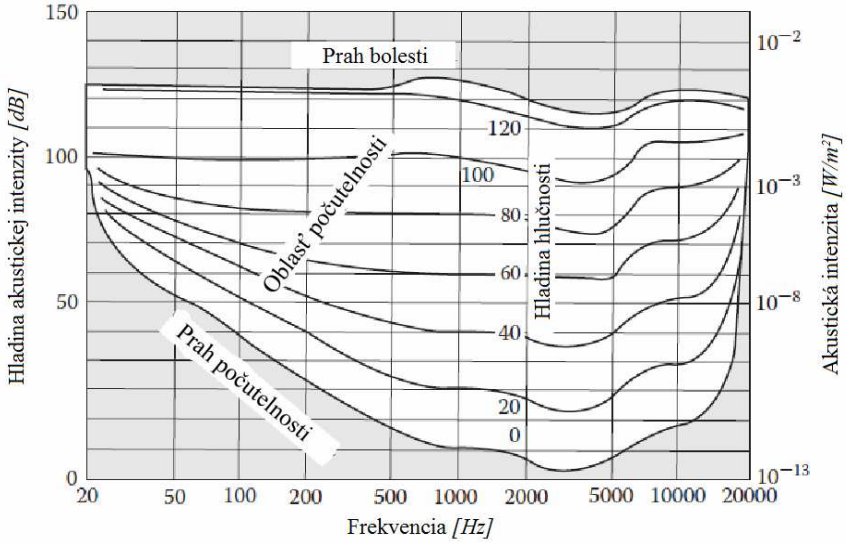
Zvukové vlny nemôžu byť polarizované, nemôžu mať orientáciu. Nepolarizované vlny môžu oscilovať v akomkoľvek smere v rovine kolmej na smer šírenia a nemajú uprednostnenú rovinu polarizácie.

Všetky zvuky majú spoločné správanie pod počtom normálnych situácií a ukážok:

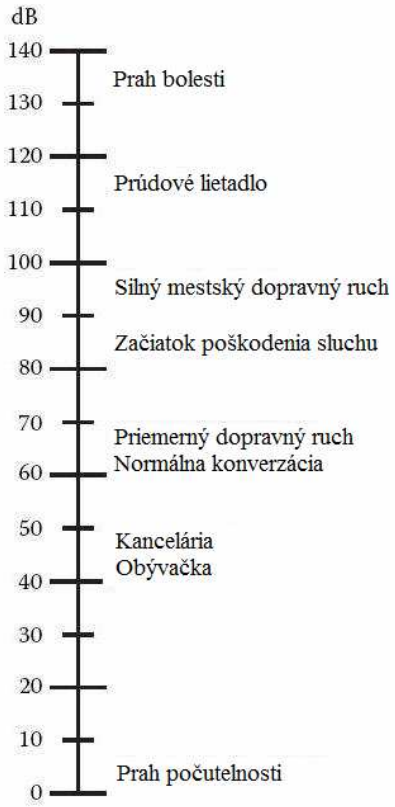
- Reflekcia – odraz: jav keď sa šíriaca sa vlna odrazí od povrchu medzi dvoma prostrediami s rôznymi mechanickými vlastnosťami
- Refrakcia – lom: zmena smeru šíriacej sa vlny pri prechode z jedného média do druhého
- Difrakcia – ohyb: proces rozširovania vĺn, napríklad pri prechode cez malú štrbinu alebo pri obchádzaní malej prekážky
- Scattering – rozptyl: zmena vo smere pohybu
- Interferencia – rušenie: vzájomný vplyv dvoch vĺn, napríklad pridaním dvoch vĺn, ktoré navzájom prichádzajú do kontaktu
- Absorpcia – pohltenie: keď zvuk dopadne na materiál a neodrazí sa od neho
- Disperzia – rozptyl: rozdelenie vlny v závislosti na frekvencii.

Zvuková amplitúda sa dá merať ako hladina akustického tlaku (SPL), hladina akustickej intenzity (SIL), hladina akustického výkonu (SWL) a intenzita akustickej energie (SED).

Ľudské ucho dokáže vnímať zvukové vlny dostatočnej intenzity, ktorých frekvencia je v rozsahu 20 – 20 000 *Hz*. Minimum zvukovej intenzity je rozdielny pre rôzne frekvencie a nazýva sa prahom počuteľnosti. Rozsah zvukovej intenzity, ktoré sa dá vnímať uchom je od 10^{-12} do 1 W/m^2 odpovedajúci 20 *mPa* tlaku zvuku. Maximum intenzity zvuku, pri ktorom ucho pociťuje bolesť sa nazýva prahom bolesti. Zvukové amplitúdy, ktoré sú veľmi hlasné, majú tlak 100 *Pa*.



Obr. 1.1: Intenzity zvuku a zóny počuteľnosti v závislosti na frekvencii. [1]



Obr. 1.2: Porovnanie niektorých hladín hluku vo vonkajškom prostredí [1]

Akustický tlak

Akustický tlak alebo tlak zvuku je lokálna odchylka tlaku od okolitého priemerného atmosferického tlaku spôsobený akustickou vlnou. Akustický tlak je možné merať pomocou mikrofónu vo vzduchu a pomocou hydrofónu vo vode. Jednotka pre akustický tlak p je pascal.

Hladina akustického tlaku (SPL) alebo akustický tlak je logaritmická miera efektívnej hodnoty akustického tlaku zvuku v pomere k referenčnej hodnote. Bežná "nulová" referenčná hladina akustického tlaku vo vzduchu je 20 μPa RMS, ktorá je považovaná za prah ludského počutia pri 1 kHz.

Hladina akustického tlaku

$$L_P = 20\log_{10}\frac{p_e}{p_{ref}} = 20\log p_e + 94 \qquad [dB] \qquad (1.2)$$

kde p_{ref} je referenčný akustický tlak 2.10^{-5} Pa a pe je efektivna hodnota akustického tlaku.

$$p_e = \sqrt{\frac{1}{T_p}\int_0^{T_p}[p(t)]^2\,dt} \qquad [N/m^2] \qquad (1.3)$$

kde T_p je perióda a p je akustický tlak.

Akustický výkon

Hladina akustického výkonu je logaritmickou mierou akustického výkonu v pomere zo špecifickou referenčnou úrovňou.

$$L_W = 10\log_{10}\frac{\Pi}{\Pi_{ref}} = 10\log\Pi + 120 \qquad [dB] \qquad (1.4)$$

kde Π je akustický výkon vo W, Π_{ref} je referenčný akustický výkon 10^{-12} W.

Akustická intenzita:

Je daná priemernou energiou vlnenia, ktorá prejde plochou kolmou na smer šírenia. Závisý na kadrátu amplitúdy vlny.

$$I = \frac{P}{S} \qquad [W/m^2] \qquad (1.5)$$

Hladina akustickej intenzity sa spočíta:

$$L_I = 10\log\frac{I}{I_{ref}} = 10\log I + 120 \qquad [dB] \qquad (1.6)$$

kde I_{ref} je štandardná referenčná intenzita 10^{-12} W/m. Každému zvýšeniu intenzity o desaťnásobok odpovedá nárast akustickej hladiny o 10 dB.

2 ZDROJE HLUKU V ELEKTRICKÝCH STROJOCH

Frekvencia pre vibráciu je obvykle od 0 po 1 000 *Hz* a pre hluk je to nad 1 000 *Hz*. Vibrácie a hluky produkované elektrickými strojmi sa dajú rozdeliť do troch kategórií :

- elektromagnetické vibrácie a hluk súvisiace s parazitnými vplyvmi spôsobené vyššími priestorovými a časovými harmonickými vlnami, excentricitou, fázovou ne symetriou, drážkovými otvormi, magnetickým nasýteným a magnetostrikčná expanzia jadrových doštičiek,
- mechanické vibrácie a hluk spojené s mechanickou súpravou v partikulárnych ložiskách,
- aerodynamické vibrácie a hluk spojené s prúdom vetracieho vzduchu cez alebo nad motorom.

Do zdrojov hluku vyvolané zaťažením patria :

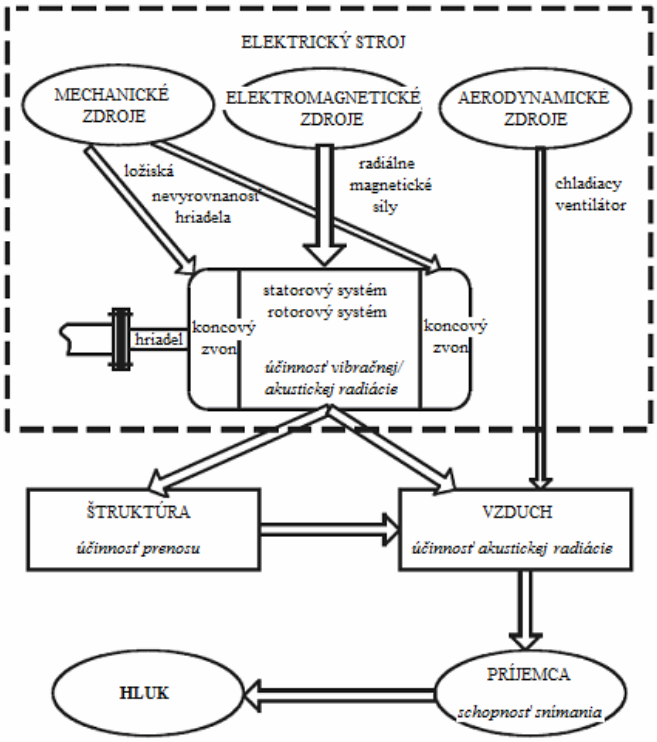
- hluk spôsobený nevyrovnanosťou hriadeľa, pásovým prevodom, výťahovou kladkou s lanami, ozubenými kolesami, spojkou, vratným kompresorom,
- hluk z dôvodu montáže stroja na podklad alebo inú konštrukciu.

Hluk od prameňa je vysielaný cez médium ku príjemcu, za príjemcu sa môže považovať ľudské ucho, hlukomer alebo zvukomer.

2.1 Elektromagnetické zdroje hluku

Elektromagnetické vibrácie a hluk sú zapríčinené tvorbou elektromagnetických polí. Aj stator aj rotor budia indukčný magnetický tok vo vzduchovej medzere.

Magnetická tlaková vlna pôsobí v radiálnych smeroch na statorové a rotorové aktívne plochy spôsobujúce deformácie a tak vibrácie a hluk.



Obr. 2.1: Vznik a prenos hluku v elektrických strojoch [1]

Drážky, rozloženie vinutia v drážkach, skreslenie priebehu vstupného prúdu, výstrednosť rotora a fázová ne symetria vedie k zvýšeniu deformácií a vibrácií. Najme radiálne silové vlny v AC strojoch, ktoré pôsobia ako na rotor tak i na stator, produkujú deformáciu magnetického obvodu.

Stavba rotora je hlavným vyžarovačom hluku stroja. Ak frekvencia radiálnej sily je blízka alebo rovnaká niektorej prirodzenej frekvencii statorového systému, nastáva rezonancia čo vedie k deformácii statorového systému, vibrácii a hluku.

Magnetostrikčný hluk elektrického stroja môže byť vo väčšine prípadov zanedbaný vďaka nízkej frekvencii $2f$ a vysokému usporiadaniu $r = 2p$ radiálnych síl, kde f je základná frekvencia a p je počet pólových dvojíc. Avšak radiálne sily kvôli magnetostrikcii môžu dosiahnuť až 50 % z radiálnych síl produkovaných vo vzduchovej medzere magnetického pola.

2.2 Mechanické zdroje hluku

Mechanické vibrácie a hluk sú hlavne spôsobované ložiskami, kĺznými kontaktmi, ohnutou hriadeľov, nerovnováhou motora, nevyrovnanosťou hriadeľa, spojkami, u-kĺbmi, rýchlosťami atd. Rotor by mal byť presne vyvážený, čo podstatne zníži vibrácie. . Nevyváženosť rotora spôsobuje dynamické vibrácie, ktorých výsledkom je emisia hluku zo statoru a rotoru.

2.2.1 Mechanický hluk spôsobený hriadeľovými a rotorovými nerovnomernosťami

Hriadeľ a rotor produkujú vibrácie a hluk pri nasledujúcich frekvenciách ako výsledky:

- nevyváženosť rotora, ohnutá hriadeľ, výstrednosť a trecie časti

$$f_{unb} = kn_m \qquad k = 1,2,3... \qquad [Hz] \qquad (2.1)$$

Charakterizované sínusovou vibráciou o frekvencii jedna za otáčku (počet otáčok za sekundu n_m) alebo ako násobok otáčok za sekundu.

- oválne čapy a dvojitá tuhosť hriadeľa (o frekvencii 2 krát za otáčku)

$$f_{ov} = 2kn_m \qquad [Hz] \qquad (2.2)$$

- nesúososť hriadeľa

$$f_{sh} = 2n_m \qquad [Hz] \qquad (2.3)$$

- voľne statorové plechy ktoré vedú k vibračnej frekvencii f_{lam} dvojnásobnej frekvencii siete s frekvenčnými postrannými pásmami f_{sdb} rovnajúcimi sa približne 1 000 *Hz*

$$f_{lam} = 2f \qquad f_{sdb} \approx \pm 1000Hz \qquad [Hz] \qquad (2.4)$$

- mechanická voľnosť buď motorového uloženia alebo ložiskových krytov, ktorých výsledkom je smerová vibrácia s veľkým počtom harmonických
- prevodové problémy charakterizované frekvenciami počtov zubov za otáčku, väčšinou modulované rýchlosťou
- tepelná nesúmernosť, ktorá vedie k pomalej zmene vibrácií pri zohrievaní motora

2.2.2 Ložiskový hluk

Zvýšenie hladiny vibrácií a hluku ložísk keď sa rýchlosť otáčania zmení z n_1 na n_2 môže byť vyjadrená takto:

$$\Delta L_n = 20\log\frac{n_2}{n_1} \qquad [dB] \qquad (2.5)$$

Zvýšenie záťaže z Q_1 na Q_2 ma menší účinok na hladinu vibrácie ako zmena rýchlosť:

$$\Delta L_Q = 0,3\log\frac{Q_2}{Q_1} \qquad [dB] \qquad (2.6)$$

Vibrácia a nevyrovnanosť značne urýchľuje opotrebovanie ložísk a zvyšuje prevádzkovú teplotu. Hladiny vibrácií by mali byť monitorované pribežne, keďže zvýšenie vibrácií je často indikácia následnej poruchy ložísk. Motory pracujúce pri 1 500 otáčkach za minútu by mali mať vibráciu o amplitúde maximálne 0,025 *mm.*

Valivé ložiská

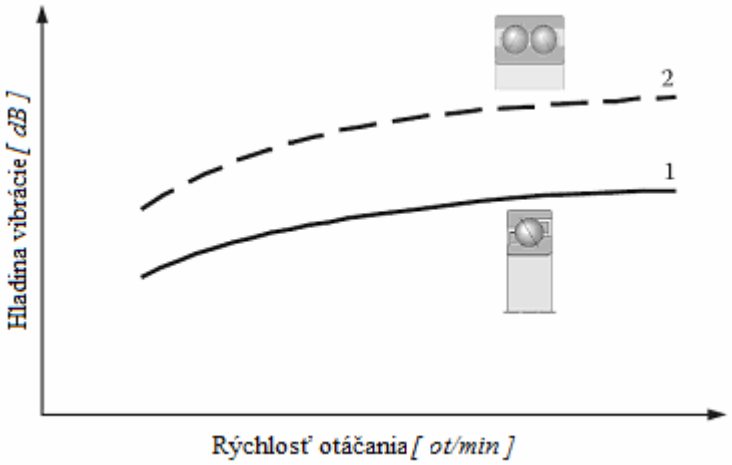
Vibrácie generované priamo alebo nepriamo ložiskami a prenášané na susedné časti alebo konštrukciu produkujú počuteľný efekt, ktorí sa volá ložiskový hluk.

Hluk valivých ložísk závisí na:

- typu ložiska a jej konštrukcii;
- presnosť častí ložiska;
- toleranciách;
- zarovnaní;
- vlnitosti častí;
- rýchlosti;
- počtu valných súčiastok, ktoré nesú záťaž;
- znečistení a prítomnosti častíc špiny;
- mazacích podmienok;
- teplote.

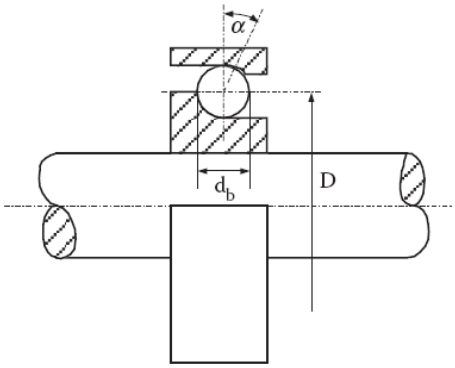
Zvýšenie rýchlosti produkuje približne úmerné zvýšenie hladiny hluku až po saturačnú rýchlosť. Ak sa rýchlosť zvyšuje nad túto saturačnú rýchlosť, hladina hluku sa už nezvyšuje. Hladina hluku sa málo zvyšuje so záťažou. Ak sa viskozita mazadla v ložiskách zvýši, hladina hluku sa znamenite zníži.

Nasledujúci obrázok ukazuje porovnanie hladín vibrácií jednoradového a dvojradového ložiska. Je to závislosť hladiny vibrácie na rýchlosti.



Obr. 2.2: Hladina vibrácií v závislosti na rýchlosti pre 1-jednoradové guľôčkové ložisko, 2-dvojradové guľôčkové ložisko [4]

Valivé ložiská generujú mechanické impulzy, keď valivý element prechádza cez ryhu v drážke. Toto spôsobuje malý radiálny pohyb rotoru. Aj keď frekvencia týchto mechanických impulzov je odlišná od prirodzenej frekvencii statorového systému, výsledkom môže byť závažná vibrácia elektrického stroja.



Obr. 2.3:Rez guľôčkovým ložiskom kde D je priemer, d_b je priemer guľôčky ložiska a α je dotykový uhol [1]

Žiadny typický vzor frekvencie nie je produkovaný z dôvodu znečistenia. Hladina vibrácie závisí na množstve, veľkosti, a zložení častíc prachu.

Hluk spôsobovaný valivými ložiskami závisí od presnosti ložiskových častí, mechanickej frekvencii vonkajšieho krúžku, rýchlosti motora, mazacích podmienok, zarovnanosti, záťaži, teplote a prítomnosti cudzích materiálov.

Klzné ložiská

Pozostávajú z dvoch valcových plôch s drážkami distribuujúce olej, jedna pohybujúca sa v závislosti s druhou.

V samomazacích ložiskách povrch ložiska obsahuje mazivo, zväčša pevného zloženia, ktorý je uvoľňovaný alebo aktivovaný pri trení v ložisku. V malých klzných ložiskách je mazací olej impregnovaný v pórovom medenom ložisku a je podávaný malými pórovými otvormi do vrtu ložiska. V ideálnom prípade tenký olejový film vytvorený mazacím olejom zabraňuje kontaktu kovu na kov a vylúči takmer všetok hluk z ložiska. Pretože šachta a ložisko majú drsný povrch, aj keď len v mikroskopickej mierke, ložisko môže vytvárať škrabací alebo drviaci zvuk.

Hluk z klzných ložísk je väčšinou širokopásmový a od prírody trochu nespojitý. Hladina akustického tlaku klzných ložísk je nižšia ako valivých ložísk. Väčšina klzných ložísk je veľmi tichá a také aj ostanú, pokiaľ sa im neminie olej.

Vibrácie a hluk produkované klznými ložiskami závisia na drsnosti klzných povrchov, mazivu, stabilite, vírení olejového filmu v ložisku, výrobe a na montáži.

Hluk spôsobený klznými ložiskami je všeobecne nižší ako hluk spôsobený valivými ložiskami. Vibrácie a hluk závisia od drsnosti klzných plôch, mazania, stability a vírenia olejového filmu v ložiskách, kvality, inštalácie, výrobného procesu.

2.2.3 Hluk spôsobený ozubeným prevodovým súkolesím

Niektoré elektrické motory sú vybavené ozubeným prevodovým súkolesím. Prenášanie sily prostredníctvom dvoch ozubených kolies vyvoláva intenzívny hluk mechanického pôvodu. Hlavnými príčinami takéhoto hluku sú:

- náraz zubov,
- trenie medzi povrchmi zubov,
- vibrácie vzduchu alebo oleja vytlačovaný z priestoru medzi zubami,
- vibrácie prevodu spôsobené prenosom síl.

Všeobecne, hladina hluku ozubenej prevodovky závisí od typu prevodovky, jej geometrie, konštrukcie, profilu zubov, uhlu záberu, vôli kolies, materiálu, presnosti výroby, hladkosti povrchov.

2.3 Aerodynamický hluk

Základným zdrojom hluku aerodynamickej povahy je chladiaci ventilátor. Akákoľvek prekážka umiestnená do prúdu vzduchu vydáva hluk. Pri neuzavretých motoroch hluk vnútorného ventilátoru je emitovaný vetracími otvormi. Pri úplne uzatvorených motoroch prevažuje hluk vonkajšieho ventilátoru.

Podľa spektrálneho rozloženia hluku ventilátora, vyskytuje sa tam širokopásmový hluk (100 až 10 000 *Hz*) a sirénový hluk (tónový). Sirénoví efekt je čistý tón produkovaný, ako interakcia medzi lopatkami ventilátora, rotorovými drážkami, alebo rotorovými axiálnymi ventilačnými kanálmi a nepohyblivými prekážkami. Frekvencia čistého tónu spôsobovaný lopatkami ventilátora je:

$$f_p = kN_{bl}n_m \qquad [Hz] \qquad (2.7)$$

kde k = 1, 2, 3,..., N_{bl} je počet lopatiek ventilátora a n_m je obvodová rýchlosť ventilátora v *ot/s*. Frekvencia čistého tónu spôsobovaná chladiacim vzduchom prechádzajúcim axiálnym kanálom rotora je:

$$f_{rd} = kN_d n_m \qquad [Hz] \qquad (2.8)$$

kde N_d je počet kanálov.

Sirénový hluk môže byť odstránený zvýšením vzdialenosti medzi lopatkovým kolesom a nepohyblivou prekážkou.

Hladina akustického výkonu závisí na výkone stroja a na kapacite ventilátora, t.j. prietok vzduchu. Hladina akustického výkonu ventilátora môže byť približne odhadnutý použitím nasledujúcich rovníc:

$$\begin{aligned} L_w &= 67 + 10\log_{10}(P_{out}) + 10\log_{10}(p) \\ L_w &= 40 + 10\log_{10}(Q) + 20\log_{10}(p) \qquad [dB] \qquad (2.9) \\ L_w &= 94 + 20\log_{10}(P_{out}) - 10\log_{10}(Q) \end{aligned}$$

kde P_{out} je menovitý výkon motora v *kW*, p je statický tlak ventilátora v *Pa* a Q je prietok v m^3s^{-1}.

Malé motory s hriadeľom poháňaným ventilátorom vyžarujú oveľa menej hluku keď sa rýchlosť zníži pod menovitú rýchlosť. Hladina ventilátorového hluku klesne približne o 10 *dB* pri 75 % menovitej rýchlosti, o 20 *dB* pri 50 % a o 0 *dB* pri 25 % menovitej rýchlosti podľa rovnice:

$$L_p = 24{,}4\sqrt[3]{v} \qquad [dB] \qquad (2.10)$$

kde v je rýchlosť lopatiek v *m/s*. Táto rovnica platí len pre motory (TEFC) úplne uzavreté ventilátorom chladené.

Ako sa rýchlosť zvyšuje, chladiaci ventilátor sa stáva hlavným zdrojom hluku. Pre dvojpólové asynchrónne motory napájané z pevnej siete pri frekvenciách 50 *Hz* alebo 60 *Hz*, dominujúcim hlukom je vždy hluk aerodynamického pôvodu.

Na druhej strane pre motory zo samostatne poháňaným ventilátorom sa nedosiahne žiadne zlepšenie aerodynamického hluku pri znížení rýchlosti.

Podľa Biesa a Hansena *[5]*, akustický výkon vyžarovaný prívodom a výstupom ventilátora je možné odhadnúť s primeranou presnosťou na základe nasledujúceho vzorca:

$$L_w = C_F + 10\log_{10} Q + 20\log_{10} p + \frac{1}{3}\eta_p - 48 \qquad [dB] \qquad (2.11)$$

kde C_F je empirický koeficient daný pre každé oktávové pásmo, Q je prietok v m^3s^{-1}, η_p je percento maximálnej účinnosti a p je statický tlak v Pa.

3 PROCES PREMENY ENERGIE

Ako sa premieňa elektrická energia na akustickú? Vstupný prúd vzájomne pôsobí s magnetickým tokom produkujúc vysokofrekvenčné sily, ktoré pôsobia na vnútorný povrch jadra statora. Tieto sily budia statorové jadro v odpovedajúcom frekvenčnom rozsahu a tak generujú mechanické vibrácie a hluk. Okolité médium, vzduch, je tiež budený a tiež generuje hluk.

Vyžarovaná akustická sila je veľmi malá, približne 10^{-6} až 10^{-4} *W* pre elektrický motor o výkonu do 10 *kW*.

Elektromagnetické silové vlny budia mechanický systém k výrobe vibrácií. Amplitúda vibrácie je funkcia rozsahu a frekvencie týchto síl.

3.1 Hladiny hluku a postupy meraní pre elektrické stroje

Akustické množstvá môžu byť vyjadrené ako tlaková úroveň zvuku (SPL) alebo ako hladina akustického výkonu (SWL). Tlaková úroveň zvuku je bežným popisovačom charakterizujúcim hlasitosť okolitej zvukovej hladiny. Všeobecne je zložitejšie odmerať hladinu akustického výkonu ako odmerať tlakovú úroveň.

Tlaková úroveň zvuku L_{pa} môže súvisieť s hladinou akustického výkonu L_{wa} v *dB* :

$$L_{pA} = L_{WA} - 10\log_{10}\left(\frac{2\pi r_d^2}{S_0}\right) \qquad [dB] \qquad (3.1)$$

kde r_d = 1,0 + 0,5 *lm* , *lm* maximálny lineárny rozmer testovaného stroja, S_0 = 1,0 m^2 a L_{pa} je priemerná tlaková úroveň zvuku vo voľnom priestranstve vo vzdialenosti 1m od stroja.

Hluk elektrického stroja závisí na type stroja, na jej topológia, veľkosti, dezignu, konštrukcii, puzdre, materiáloch, výrobe, rýchlosti, toleranciách, montáži, na väzbe, ložiskách, na záťaži atd. Niektoré dôsledky hluku ako napríklad výroby, montáže alebo podpory je veľmi ťažké predvídať.

Platí, že rovnice akustického tlaku alebo hladiny akustického výkonu ako funkcia racionálnej rýchlosti *n*, výstupného výkonu P_{out}, alebo krútiaceho momentu *T*, majú tieto tvary:

$$\begin{aligned} L_{p1} &= A_1 + B_1 \log_{10} n \\ L_{p2} &= A_2 + B_2 \log_{10} P_{out} \\ L_{p3} &= A_3 + B_3 \log_{10} T \end{aligned} \qquad [dB] \qquad (3.2)$$

kde A1, A2, A3, B1, B2, B3 sú konštanty.

Kryté motory sú typu odolávajúce kvapkám tekutín (ODP), úplne uzatvorené ventilátorom chladené (TEFC), a voči počasiu chránené typ (WPII). WPII stroj je chránený stroj so svojimi ventilačnými priechodmi navrhnutými tak, že vzduch vysokej rýchlosti a vzduchové častice fúknuté do stroja búrkou alebo veľkými vetrami môžu vyť odklonené bez toho aby vnikli do vnútorných ventilačných okruhov vedúce priamo k elektrickým častiam samotného stroja. Zvýšenie hladiny akustického výkonu pri zaťažení je väčšinou spôsobené zmenou harmonickej amplitúdy magnetickej indukcii vo vzduchovej medzere. Tento efekt sa môže vyjadriť pomocou vzorca *[6]*:

$$\Delta L_W = 10\log_{10}\left(\frac{B_{load}}{B_{noload}}\right)^2 \qquad [dB] \qquad (3.3)$$

Spektrum hladiny akustického tlaku je distribúcia efektívneho akustického tlaku ako funkcia frekvencie v uvedených pásmach. Môže to byť definovane ako rozloženie signálu do zložiek, každá s inou frekvenciou a amplitúdou.

Ak je spektrum hladiny akustického tlaku daný vo forme Fourierovej rady,

$$p = \sum_{k=1}^{k_{\max}} P_{mk} \sin(\omega_k t + \phi_k) \qquad (3.4)$$

kde P_{mk} je amplitúda k-tej harmonickej, $\omega_k = 2\pi k f$ je uhlová frekvencia k-tej harmonickej a ϕ_k je fázový uhol k-tej harmonickej, celková hladina akustického tlaku je počítaný ako súčet štvorcov amplitúd:

$$P = \sum_{k=1}^{k_{\max}} P_{mk}{}^2 \qquad [W] \qquad (3.5)$$

Široko-pásmový hluk je hluk v ktorom je akustická energia rozložená na relatívne dlhom frekvenčnom rozsahu. Obvykle je spektrum hladký a spojitý.

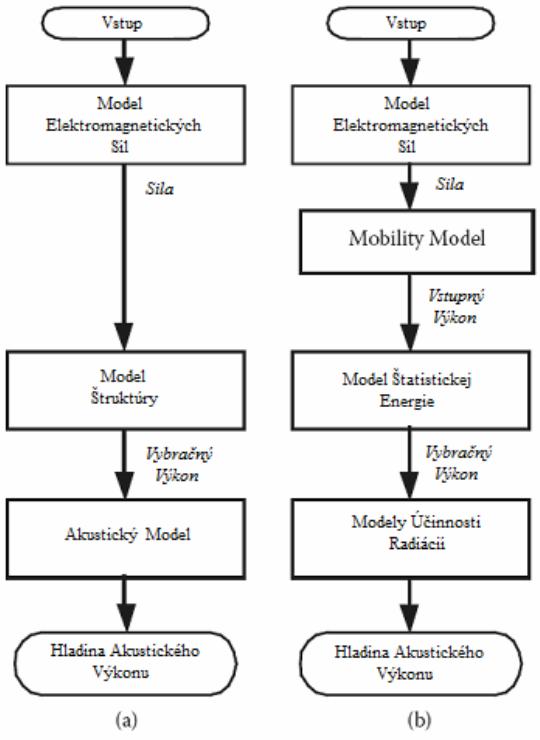
Úzko-pásmový hluk je hluk v ktorom je akustická energia rozložená na relatívne úzkom frekvenčnom rozsahu. Spektrum obyčajne ukáže miestny ´´hrb´´ alebo vrchol v amplitúde. Úzko-pásmový zvuk môže byť (navrstvený) prekrytý v široko-pásmovom zvuku.

3.2 Deterministické a štatistické metódy predvídania hluku

V snahe predvídať hluk elektrického stroja existujú dva prístupy: deterministické a štatistické metódy. V deterministickej metóde elektromagnetické sily pôsobiace na štruktúru motora musia byť vypočítané zo vstupného prúdu a napätia, použijúc elektromagnetický analytický model alebo FEM model. Charakteristika vibrovania je potom určená pomocou štrukturálneho modelu zvyčajne založenom na FEM.

Akustický model môže byť formulovaný pomocou FEM alebo metódy ohraničených prvkov (BEM).

Obvykle pre výpočet hluku vyžarovaného do priestoru, je preferovaná metóda BEM, lebo len povrch motora potrebuje byť uvážený a priestor nemusí byť.



Obr. 3.1: Schémy na predpoveď hluku: a) deterministická metóda, b) štatistické metódy [1]

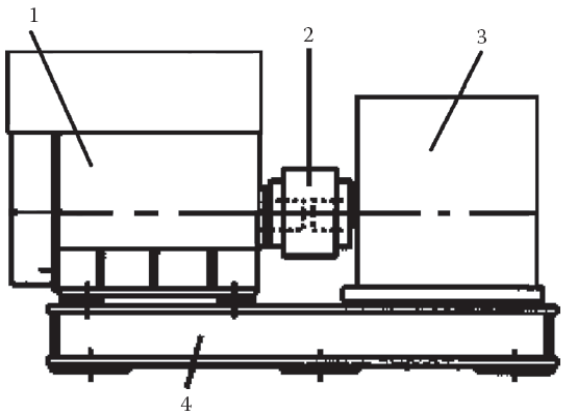
4 OVLÁDANIE HLUKU – MOŽNOSTI ZNÍŽENIA HLUKU

4.1 Upevnenie

Základ – podklad

Pevný základ je dôležitý pre minimálne vibrácie a správne vyrovnanie medzi motorom a záťažou. Zvyčajne, tuhá a pevná základová doska alebo spoločná posteľ je použitá ako základ. Posilnený betón alebo železobetón je najlepším základom pre veľké motory a veľké hnané záťaže. Betónový základ by mal vážiť najmenej 3 až 5 násobok kombinovanej váhy motora, spojky a zaťažovacieho stroja. Ak je hmotnosť dostatočná, poskytuje tuhý podklad, ktorý minimalizuje pohyb a vibrácie celého systému.

K dispozícii sú štyri upevňovacie body pre montáž elektrického motora, jedna na každom rohu montážnej základne. Najlepšie skrutky na ukotvenie stroja sú tvaru L alebo T.



Obr. 4.1: Spoločná posteľ ako základ, 1 – motor, 2 – spojka, 3 – zaťažovací stroj, 4 – spoločná postel [1]

Princípy izolácie vibrácií a nárazov

Izolácia vibrácií sa používa zabránenie alebo obmedzenie premennej sily, prestupujúcej do nosnej konštrukcie, motora v prevádzke. Premenné sily sú nežiaduce, pretože môžu byť rušivé alebo deštruktívne pre niektoré procesy. V extrémnych prípadoch, môžu byť vibrácie natoľko nebezpečné, že príde k zničeniu nosnej konštrukcii.

Prístroj je podopieraní zariadeniami izolujúce vibrácie ako napríklad pružiny, tlmiče, podložky využívajúce rôzne metódy, v závislosti od namontovaného zariadenia a tuhosti nosnej konštrukcii.

Existujú napríklad metódy:

- vibrácie izolujúce koľajnice,
- vibrácie izolujúci základ,
- vibrácie izolujúci základ plnený betónom,
- rôzne podložky a pružiny.

4.2 Zarovnanie hriadeľa

Hriadeľ motora a poháňaná hriadeľ by mali byť zosúladené v tolerancii ± 0,03 *mm* v uhlovom a aj v rovnobežnom zarovnaní. Toto je nevyhnutné pre zabránenie mechanických vibrácií vďaka posunutiu hriadeľa. Uhľové posunutie je hodnota, o ktorú sú osi motora a hnanej hriadele asymetrické. Rovnobežné posunutie hodnota, o ktorú sú osi motora a hnanej hriadele nerovnobežné.

4.3 Štandardné metódy znižovania hluku

Zníženie hluku z nevyváženosti rotora

Hluk spôsobený nevyváženosťou rotora je znížený, ak dynamická nevyváženosť sa nachádza v primeranom rozmedzí. Existuje niekoľko kritérií vo všeobecnom užití, ktorá sú založené na praktických skúsenostiach výrobcov elektrických strojov.

Továrensky vyvážený stroj môže vystavovať nežiaduci hluk a vibrácie na mieste, keď je spojovaný s inými strojmi, z dôvodu:

- nevyrovnanosti spojenia alebo nevyváženosti spojenia,
- nevyváženosti spojených zariadení.

Odporúča sa vykonávať vyvažovacie práce na mieste spojovania a to preto, aby vyvažovanie celého rotačného systému prebiehalo v skutočných prevádzkových podmienkach.

Znižovanie hluku rotorového stohu

Voľné statorové plechy a mechanické namáhanie sú zdrojom hluku. Frekvencie hluku a vibrácií ako dôsledok voľných statorových plechov je rovná dvojnásobku frekvencie siete aj s postrannými pásmami približne ± 1 000 *Hz*.

Tento mechanický hluk môže byť znížený:

- impregnácia (zapustenie) statorového stohu,
- dobrý statorový stoh a rám.

Zníženie pulzujúceho hluku

Homopolárne prúdenie vĺn je zodpovedné za produkciu pulzujúceho hluku a vibrácií v dvojpólových strojoch. Tieto vlny sú produkované statickou a dynamickou výstrednosťou rotora a magnetických priepustných zmien v statorom a rotorovom jadre.

Nasledujúce opatrenia sú potrebné na zníženie pulzujúceho hluku u dvojpólových strojoch:

- použitie dynamicky vyváženého rotora,
- minimalizácia spätného rotujúceho pola,
- minimalizácia magnetických priepustných zmien v jadre statora a rotora.

Zníženie dynamických vibrácií povrchu stroja

Zníženie dynamickej výchylky povrchu systému statorového rámu vyžaduje veľmi presnú analýzu prírodných a budiacich frekvencií.

Nasledujúce metódy môžu byť použité na zníženie dynamických vibrácií:

- rozpor prírodnej frekvencie štruktúry stroja a frekvencie dôležitých budiacich síl. Je potrebné určiť s veľmi vysokou presnosťou prírodnú frekvenciu štruktúry statorového rámu a štruktúry rotorového hriadeľa a potom porovnať mechanické frekvencie s frekvenciami dôležitých síl,
- úprava mechanického spojenia medzi statorovými plechmi a statorovým rámom. Úpravou tuhosti spojenia medzi rámom a jadrom, tuhosti rámu a hmoty rámu, vibrácie vonkajšieho rámu môžu byť znížené iba o malý zlomok statorového jadra,

- zvýšením hrúbky statorového jadra sa zvýši aj jeho tuhosť. Približne v prípade zvýšenia hrúbky jadra o 50 *%*, hladina akustického výkonu je znížená o 10,5 *dB*. Vzhľadom na nárast nákladov, je táto metóda doporučené pre malé stroje.

Zníženie ložiskového hluku

Okrem správneho výberu typu a veľkosti ložiska sa odporúča uplatňovanie návrhov opatrení uvedených v tabuľke.

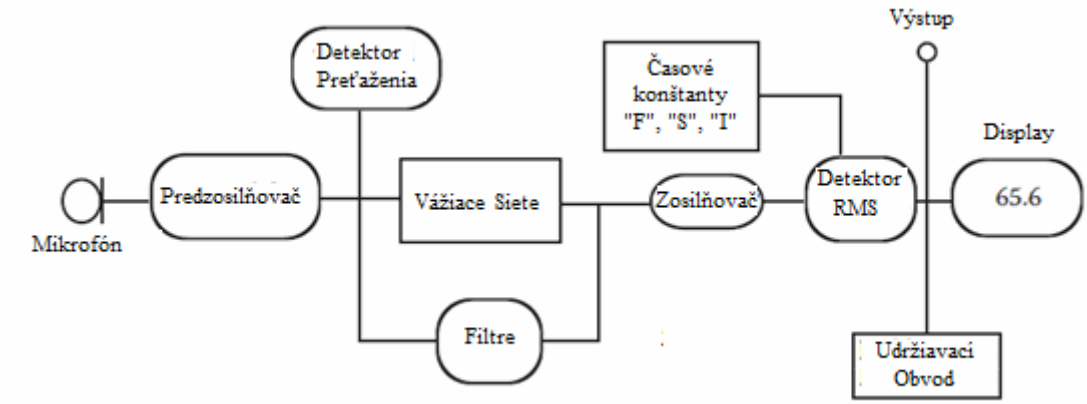
OPATRENIE	ÚČINOK
vinuté pružiny ako axiálne predpätie na ložisku	redukcia vibrácií v dôsledku nekontrolovateľného pohybu valivích elementov. Modifikácia elastických vlastností ložiska
elastické tlmiace prvky v podperovej štruktúre	zníženie hluku a vibrácií pri frekvenciách niekoľko stoviek Hz
ložiská s klietkami vyrobené z syntetických plastických materiálov alebo pevné obrábaná klietky	tichšia prevádzka pri vysokých rýchlostiach
ložiská zo štítmi alebo tesneniami	zábrana vniknutiu nečistôt a cudzích predmetov
zabránenie nedokonalej pozícii ložiskového krytu-plášťa	minimalizácia uhlovej odchýlky ložiska
vzatie do úvahy oteplenie stroja v medzery medzi valivými elementmi	vhodná vzdialenosť, medzera (trieda) na minimalizáciu indukovanej vibrácie ložiska
presné ložiská	pre stroje s požiadavkou špeciálne nízkej hladiny hluku a vibrácií
výber vhodného maziva	minimalizácia hluku z trenia

Tab. 4.1: Tabuľka opatrení a ich účinkov znižovania hluku z ložiska

5 HLUKOMERY

Je to základný prístroj na meranie hladinu akustického tlaku. Tento prístroj sa skladá z nasledujúcich komponentov:

- mikrofón
- predzosilňovač
- detektor preťaženia
- ústredná jednotka
  - vážiacy sieť
  - filtre
  - zosilňovač
  - detektor rms
- výstup a display



Obr. 5.1: Schéma typického hlukomeru [1]

Frekvenčné rozsahy:

Keďže akustická intenzita I je rozptýlená po rozsahu frekvencie, toto rozptýlenie v rámci pásma s nižšou a vyššou frekvenciou f_1 a f_2 môže byť popísaná spektrálnou hustotou $I(f)$ takto

$$I = \int_{f_1}^{f_2} I(f)df \qquad [W/m^2] \qquad (5.1)$$

kde $I(f) = \Delta I/\Delta f$, a ΔI je intenzita vo frekvenčnom intervale $f = 1$ *Hz*.

Hladina spektralnej intenzity (ISL) L_{Is} je definovaná:

$$L_{Is} = 10\log\left[I(f)/I_{ref}\right] \qquad [dB] \qquad (5.2)$$

kde I_{ref} je referenčná hladina intenzity (10^{-12} W/m^2 pre vzduch).

Ak je hladina spektrálnej intenzity konštantná po šírke pásma f, potom hladina intenzity L_I súvisí s hladinou spektrálnej intenzity L_{Is} takto:

$$L_I = L_{Is} + 10\log(\Delta f) \qquad [dB] \qquad (5.3)$$

Podobne, hladina akustického tlaku L_p súvisí s hladinou spektrálneho akustického tlaku L_{ps} takto:

$$L_p = L_{ps} + 10\log(\Delta f) \qquad [dB] \qquad (5.4)$$

$$\Delta f = f_u - f_l \qquad [Hz] \qquad (5.5)$$

kde f_l a f_u sú dolná a horná frekvencia polvýkonu.

Vážiaca sieť:

Vzhladom k tomu, že ludské ucho je najcitlivejšie na frekvencie v rozsahu 500 *Hz* – 5 000 *Hz* sa vážiaca funkcia bežne aplikovaná na akustický tlak tak, že odozva zvukomeru sa priblíži ku hlasitostným kontúram v obrázku *1.1*.

Existujú štyri typy váženia, ktoré môžu byť použité:

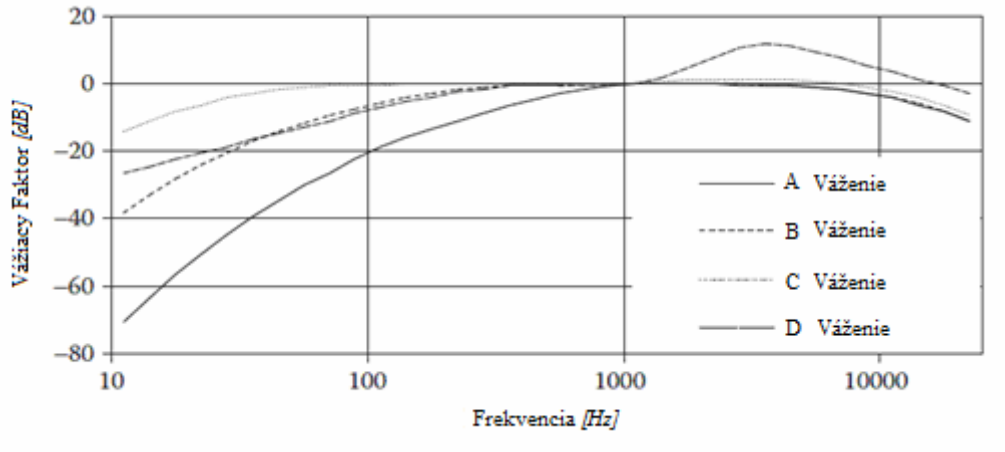
A-váženie – táto funkcia váži signál takým spôsobom, ktorý sa blíži prevrátenej 40-fónovej hlasitosťnej kontúre a je určená pre meranie hladiny akustického tlaku pod 55 *dB*.

B-váženie – táto funkcia odpovedá prevrátenej 70-fónnej hlasitostnej kontúre a je určená pre meranie hladiny akustického tlaku medzi 55 a 85 *dB*.

C-váženie – táto funkcia má približne plochú odozvu s výnimkou pri velmi nízkych a velmi vysokých frekvenciách a je určená pre použitie nad 85 *dB*.

D-váženie – táto funkcia bola štandardizovaná na použitie pri meraní hluku lietadiel.

Väčšina zvukomerov je vybavená vážiacou sieťou A a C a vážiaca sieť A je najrozšírenejšia.



Obr. 5.2: Funkcie frekvenčného váženia [1]

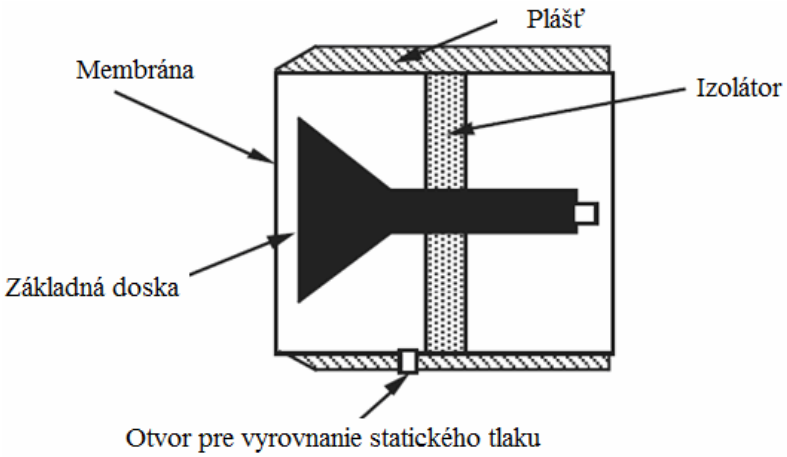
Výber mikrofonu:

Faktory, ktoré treba brat do úvahy pri výbere vhodného typu mikrofónu sú nasledovné:

1. Očakávané vlastnosti zvukového pola :
    - Volné pole pre uzavretú komoru
    - Dôležitý rozsah hladiny tlaku zvuku
    - Dôležitý frekvenčný rozsah
2. požadovaná presnosť merania :
    - tolerancia citlivosti
    - tolerancia frekvenčného skreslenia
    - tolerancia fázového skreslenia
    - tolerancia nelineárneho skreslenia
    - tolerancia vlastného šumu
3. podmienky prostredia :
    - hladina hluku pozadia
    - teplota
    - vlhkosť
    - atmosferický tlak
    - vietor
    - silné elektromagnetické polia
    - mechanický ráz

Akusticko tlakový senzor-kondenzátorový mikrofón

Keďže kolísanie tlaku vo vzduchu pôsobiaceho na ušný bubienok spôsobuje to že počujeme zvuky, univerzálnym prostriedkom pre zistenie prítomnosti zvuku je snímanie tlaku. Sú početné typy snímačov tlaku, najmä mikrofóny. Tu sa budú uvažovať len kondenzátorové mikrofóny.



Obr. 5.3: Schematický diagram condenzátorového mikrofónu [1]

Princíp činnosti:

V podstate sa skladá z tenkej kovovej membrány s tuhou zadnou doskou, čo tvorí vzduchový kondenzátor. Konštantné zaťaženie je pripojené na kondenzátor pomocou jednosmerného napätia, takže akákolvek zmena v kapacite spôsobená zmenou tlaku na bránicu bude premenená na napätie. Hned za mikrofónom je zaradený predzosilovač, ktorý zvyšuje citlivosť mikrofónu znižovaním jeho rozptylovej kapacity.

Dynamický rozsah

Dolná hranica dynamického rozsahu je stanovená elektrickým šumom alebo vnútorným tepelným šumom a horná hranica je stanovená hladinou akustického tlaku, ktorý má za následok nelineárne správanie membrány. Kedze velké membrány potrebujú ovela menej akustického tlaku na vyprodukovanie nelineárneho správania, horná hranica malích mikrofónov je vyššia.

Dlhodobá stabilita

Citlivosť mikrofónu sa mierne zvýši po dlhsej dobe, bránica sa dotvaruje a tým sa napätie na membráne znižuje. Hodnota zmeny citlivosti je najhorsia pri vysokých teplotách.

Vplyv teploty

Relatívna citlivosť sa znižuje pri zvyšovaní teploty, lebo to ovplivňuje napnutie bránice a hustotu a vyskozitu vzduchu. V rámci bežnom prevádzkovom rozsahu teploty 0 až 50 °*C* je táto zmena citlivosti zanedbatelná.

Vplyv tlaku okolia

Vzhladom k tomu, že odozva mikrofónu pri nízkych frekvenciách je stanovená tuhosťou, jeho citlivosť sa zvyšuje s poklesom okolitého tlaku. Pri vysokých frekvenciách je odozva daná masou membrány. Vzhladom k tomu, že vzduch vo vzduchovej medzere medzi membránou a zadnou doštičou, ktorá pridáva masu membrány, je ovplyvnena zmenou statického tlaku, citlivosť pri vysokých frekvenciách sa tiež mení so zmenou okolitého tlaku.

Vplyv vlhkosti

Zmena vlhkosti má zvyčajne zanedbateľný vplyv na citlivosť mikrofónu. Zmeny citlivosti mikrofónu pri 20 °*C* je rádovo ± 0,1 *dB* na rozsahu relatívnej vlhkosti 20 – 90 %.

Vplyv vybrácie

Vibrácia má maximálny účinok keď je na membránu aplikovaný normálne. Stredná kvadratická hodnota amplitúdy vibrácie (kmitu) pri 1 m/s^2 aplikovaná normálnym spôsobom na mikrofón o priemere 1,25 *cm* (≅1/2 palca) je rovná hladine akustického tlaku približne 60 *dB*.

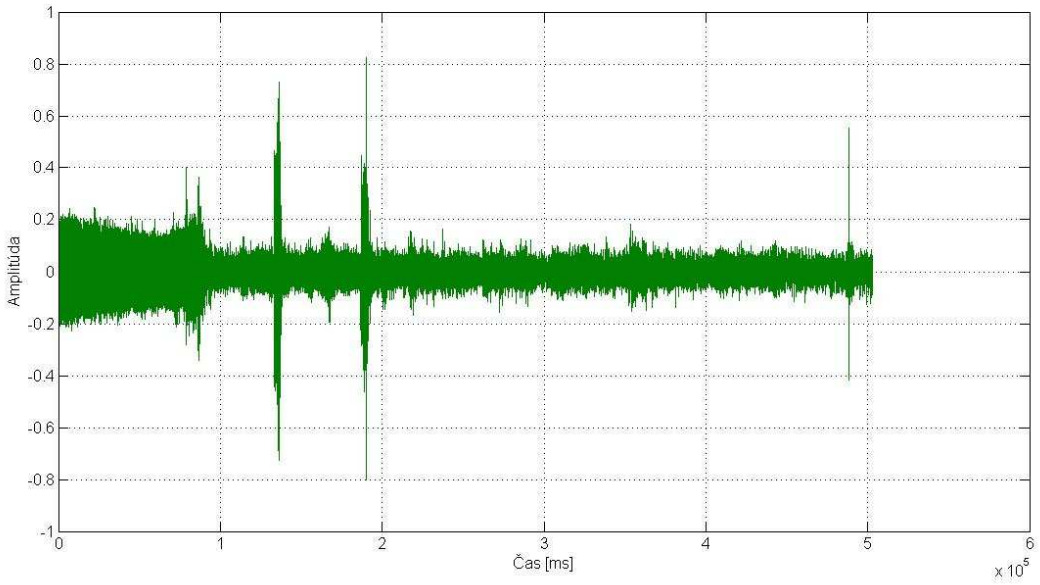
Vplyv vetra

Hluk vybudený vetrom cirkuláciou vzduchu vznikajúci buď prirodzene alebo od prevádzkovaného stroja je zvyčajne nízkej frekvencie. Pri rýchlosti vetra pod 20 *km/h* by sa mala vonku použiť veterná clona, ktorá znižuje hluk od vetra okolo 20 až 30 *dB*. Pri vyšších rýchlostiach vetra by sa vonkajsie merania nemali prevádzať. Veterná clona má tendenciu upravovať frekvenčnú odozvu pri stredných a vysokých frekvenciách a preto by sa nemala používať pri vnútorných meraniach, ktoré nezahŕňajú cirkuláciu vzduchu.

6 MERANIE HLUKU NA ASYNCHRÓNNOM STROJI

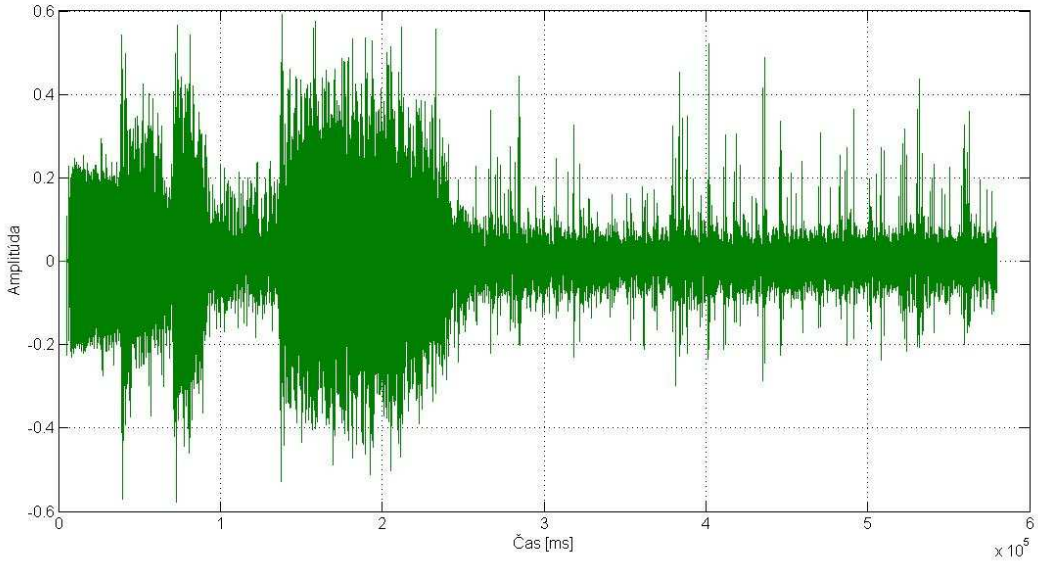
6.1 Meranie hluku pri rôznych chodoch stroja

Tieto merania sú znázornené na nasledujúcich obrázkoch. Tieto obrázky boli vytvorené pomocou programu MATLAB z pôvodných meraní pomocou hlukomeru, ktoré boli ukladané v súboroch .wav. Obrázky jednak zobrazujú meraný hluk v časovej závislosti a Fourierovu transformáciu jednotlivých priebehov.



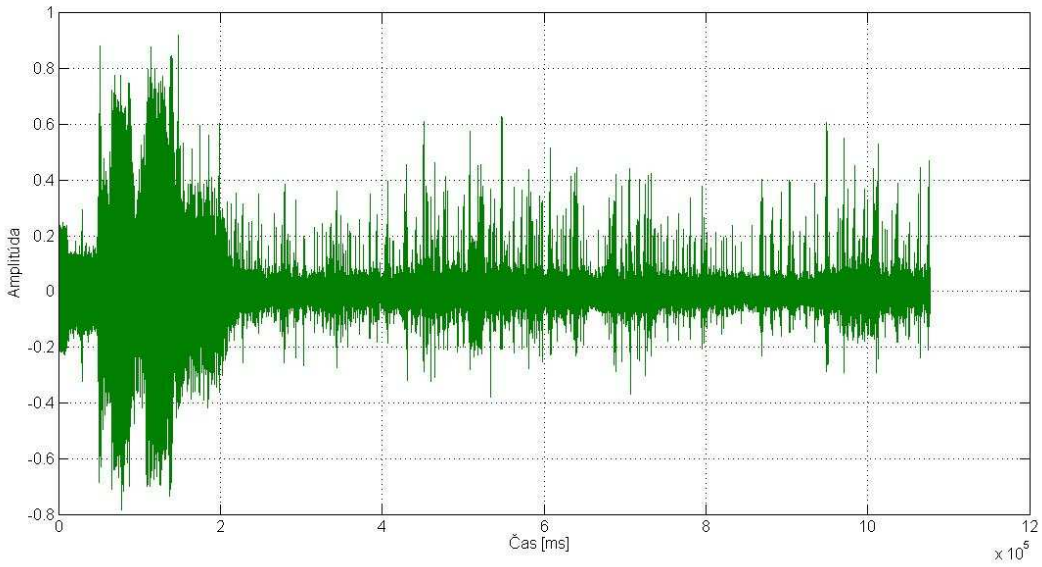
Obr. 6.1: Časový priebeh ticha, vypnutý stroj

Obrázok zobrazuje meranie ticha, to znamená, že v okamihu, keď meraný asynchrónny stroj bol mimo prevádzky. Toto meranie bolo prevedené len na porovnanie s meraním pri rôznych chodoch stroja. Vidíme však, že priebeh nie je rovnomerný, zo začiatku nadobúda nejakú hodnotu a potom sa ustáli. To je pravdepodobne spôsobené zapnutím meracieho prístroja a jeho samo-nastavením do režimu merania. Ostatné výkyvy sú spôsobené tým, že v miestnosti, kde bolo meranie realizované, boli prítomné ešte aj iné zdroje hluku, napríklad počítač v zapnutom stave, alebo ďalšou možnosťou je odraz zvuku od stien, keďže laboratórium je pomerne veľké. Kebyže je meranie realizované vo zvukotesnej komore alebo miestnosti, priebeh by bol oveľa hladší a bez toľkých výkyvov.



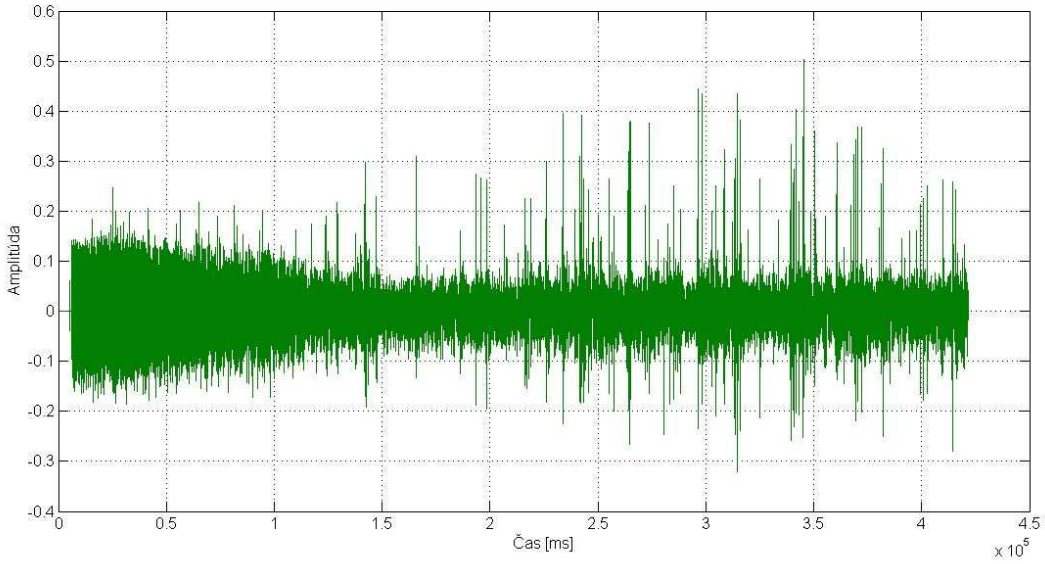
Obr. 6.2: Časový priebeh hluku pri rozbehu stroja pri napätí 100 V

Na tomto obrázku vidíme hluk spôsobený zapnutím meraného asynchrónneho stroja a jeho rozbehom na určité otáčky. Maximálna hodnota zobrazuje hluk spôsobený záberovým momentom stroja a vidíme, že klesá a ustáli sa, keď rotor dosiahne menovité otáčky pri napätí 100 *V*.

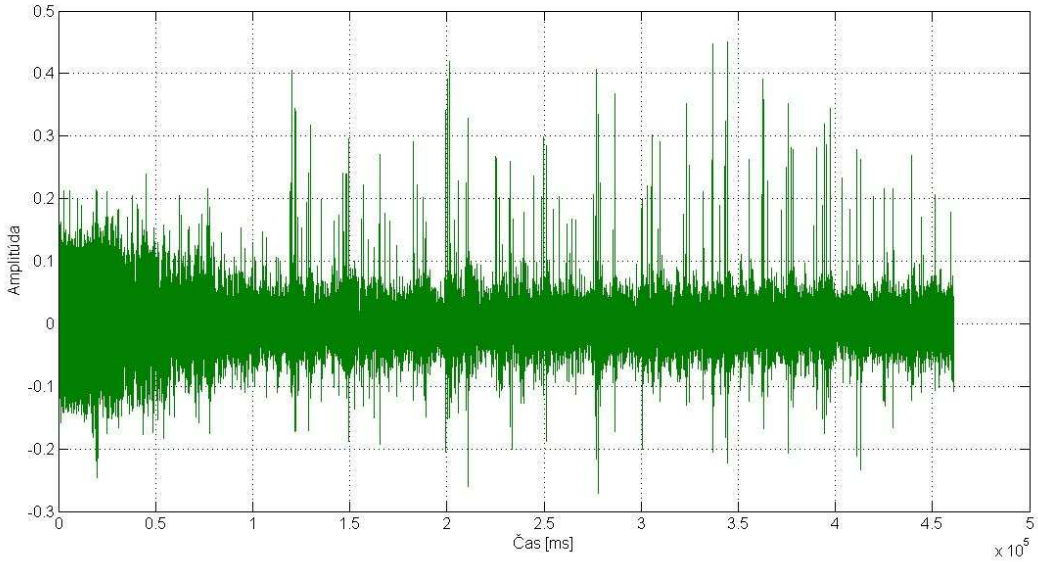


Obr. 6.3: Časový priebeh hluku pri rozbehu stroja pri napätí 200 V

Vidíme, že pri rozbehu stroja pri napätí 200 *V* je amplitúda priebehu hluku väčšia ako pri napätí 100 *V*. Toto je preto, lebo moment je závislí na napätí, a tým pádom aj záberový moment.



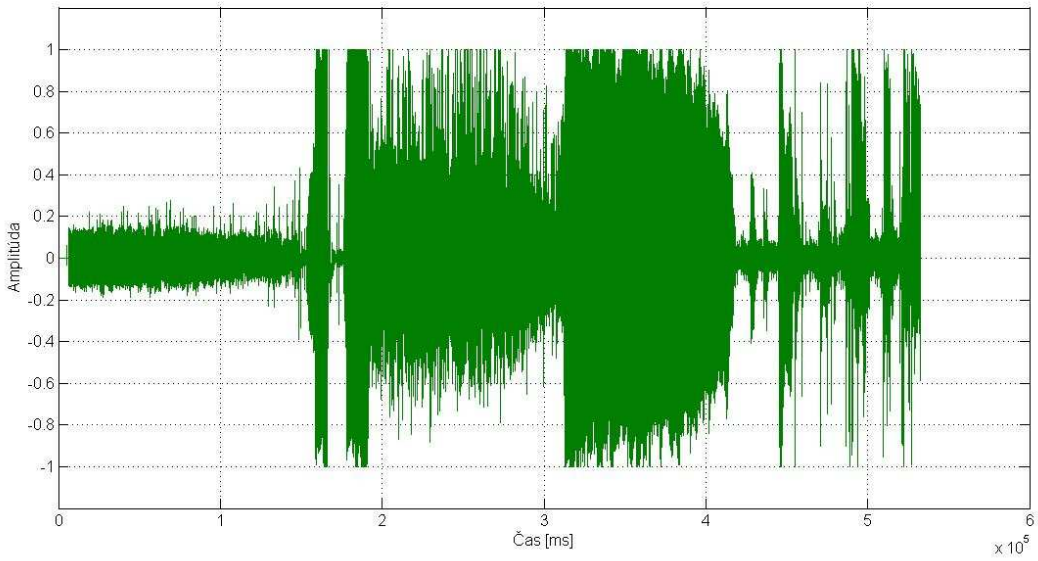
Obr. 6.4: Časový priebeh hluku stroja pri chode pri 100 V



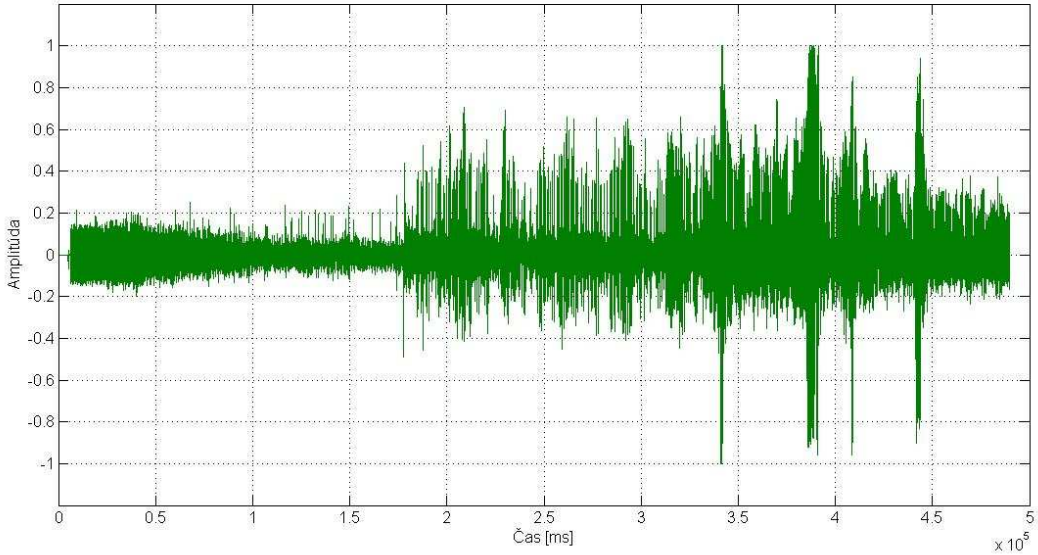
Obr. 6.5: Časový priebeh hluku stroja pri chode pri 200 V

Tieto dva obrázky znázorňujú ustálené chody stroja pri napätí 100 *V* a 200 *V*. Môžeme povedať, že hluk v tomto stavu stroja je prevažne mechanického pôvodu. Zdrojom sú ložiská na koncoch hriadeľa rotora a chladiaci ventilátor. Môže to byť už opotrebovaním ložísk alebo nedostatkom mazania v ložiskách alebo aj prítomnosťou nejakých nečistôt či iných cudzích častíc. Samozrejme je tu aj elektromagnetický zdroj hluku ale v porovnaní s mechanickým zdrojom respektíve zdrojmi je veľmi malý.

Vidíme tiež, že tieto dva priebehy sa od seba veľmi nelíšia a to preto lebo obi dva priebehy sú nameraná pri menovitých chodoch stroja, čo znamená, že stroj dosiahol menovité otáčky a už sa nemenia.



Obr. 6.6: Časový priebeh hluku stroja pri dobehu pri 100 V



Obr. 6.7: Časový priebeh hluku stroja pri dobehu pri 200 V

Na týchto obrázkoch vidíme vypínanie alebo zastavovanie stroja pri napätí 100 *V* a 200 *V*. Vidíme, že zo začiatku sú priebehy rovnaké, keďže sa ešte stroj nachádzal v ustálenom chode a potom pri vypínaní narastajú amplitúdy. Z obrázka s napätím 100 *V* vidíme, že zrejme bol nameraný aj nežiaduci hluk, ktorý nepochádzal z meraného stroja. Ďalej vidíme tiež, že konce priebehov sú takisto približne rovnaké. Z obrázka pri 200 *V* vidíme, že hluk narastá pri zmene otáčkach.

6.2 Výpočet frekvencií

Parametre ložiska:

Typ: NSK 6201 DU – Poland

Otáčky: 1000 min^{-1}

Počet guličiek: 8

Priemer guličky: 8 *mm*

Roztečný priemer: 22 *mm*

Frekvencie spôsobené ložiskom:

Otáčky za sekundu:

$$n_m = \frac{n}{60} = \frac{1000}{60} = 16{,}67 ot.\min^{-1} \qquad (6.1)$$

Frekvencia spôsobená závadou na vonkajšom krúžku ložiska:

$$f_{or} = \frac{N_b}{2}.n_m.\left(1 - \frac{d_b}{D}.\cos\alpha\right) = \frac{8}{2}.16{,}67.\left(1 - \frac{6}{22}.\cos 0\right) = 48{,}5Hz \qquad (6.2)$$

Frekvencia spôsobená závadou na vnútornom krúžku ložiska *[4]*:

$$f_{ir} = \frac{N_b}{2}.n_m.\left(1 + \frac{d_b}{D}.\cos\alpha\right) = \frac{8}{2}.16{,}67.\left(1 + \frac{6}{22}.\cos 0\right) = 84{,}87Hz \qquad (6.3)$$

Frekvencia točiacej sa ložiskovej guličky alebo valčeka *[4]*:

$$f_{bs} = \frac{D}{2.d_b}.n_m.\left[1 - \left(\frac{d_b}{D}.\cos\alpha\right)^2\right] = \frac{22}{2.6}.16{,}67.\left[1 - \left(\frac{6}{22}.\cos 0\right)^2\right] = 28{,}29Hz \qquad (6.4)$$

Frekvencia spôsobená závadou na klietke ložiska:

$$f_{cf} = \frac{1}{2}.n_m.\left(1 + \frac{d_b}{D}.\cos\alpha\right) = \frac{1}{2}.16{,}67.\left(1 + \frac{6}{22}.\cos 0\right) = 10{,}61Hz \qquad (6.5)$$

Ďalšie frekvencie vibrácií a hluku spôsobené valivými ložiskami sú *[7]* :

Frekvencia spôsobená neregulárnosťou guličkovej klietky:

$$f_{bc} = n_m.\frac{d_i}{d_i + d_o} = 16{,}67.\frac{18}{18+26} = 6{,}82Hz \qquad (6.7)$$

Frekvencia spôsobená nereguláŕnymi tvarmi točiacich sa elementov v ložisku, pri otáčaní okolo vlastných ôs:

$$f_{re} = n_m.\frac{d_i.d_o}{d_b\left(d_i + d_o\right)} = 16{,}67.\frac{18.26}{6.\left(18+26\right)} = 29{,}55Hz \qquad (6.8)$$

Frekvencia spôsobená variáciou tuhosti ložísk:

$$f_{st} = N_b.k.n_m.\frac{d_i}{d_i + d_o} = 8.k.16{,}67.\frac{18}{18+26} = k.54{,}56 = 54{,}56;109{,}12;163{,}68;...Hz$$

$$k = 1,2,3... \qquad (6.9)$$

kde D je roztečný priemer, N_b je počet guličiek, n_m je rýchlosť rotora v otáčok za sekundu, d_b je priemer guličky a α je dotikový uhol, viz. Obrázok 2.3. Ďalej d_i je dotykový priemer guličky s vnútorným krúžkom a d_o je dotykový priemer guličky s vonkajším krúžkom.

Frekvencie spôsobené hriadeľovými a rotorovými nerovnomernosťami:

Nevyváženosť rotora, ohnutá hriadeľ, výstrednosť a trecie časti:

$$f_{unb} = kn_m = k.16{,}67 = 16{,}67;33{,}34;50{,}01;...Hz \qquad (6.10)$$

$$k = 1,2,3...$$

Oválne čapy ložísk a dvojitá tuhosť hriadeľa (o frekvencii 2 krát za otáčku):

$$f_{ov} = 2kn_m = 2.k.16{,}67 = k.33{,}34 = 33{,}34;66{,}68;100{,}02;...Hz \qquad (6.11)$$

$$k = 1,2,3...$$

Nesúososť hriadeľa:

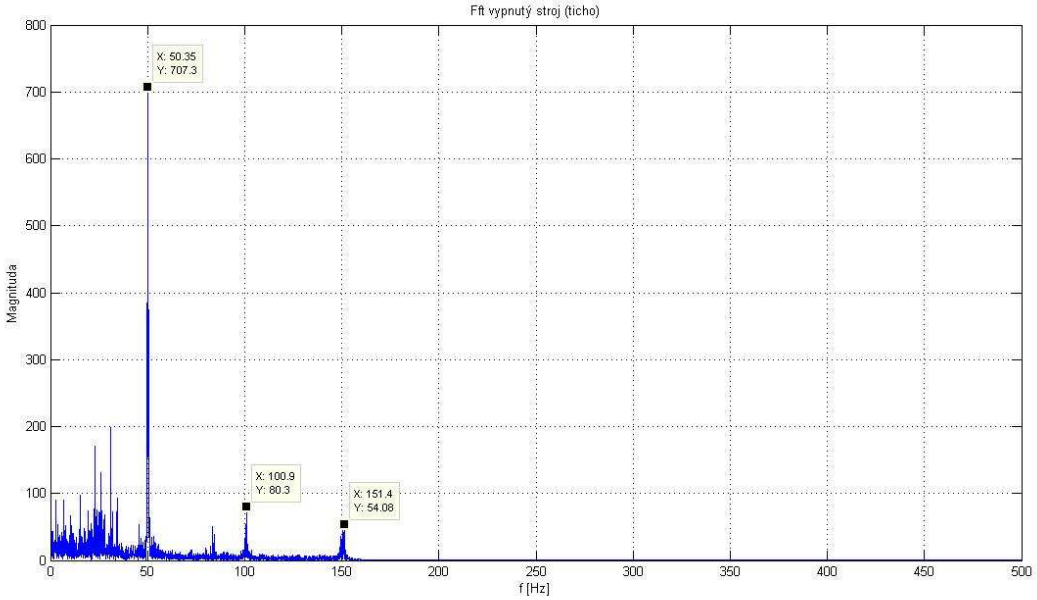
$$f_{sh} = 2n_m = 2.16{,}67 = 33{,}34Hz \qquad (6.12)$$

Voľné statorové plechy ktoré vedú k vibračnej frekvencii f_{lam} dvojnásobnej frekvencii siete s frekvenčnými postrannými pásmami f_{sdb} rovnajúcimi sa približne 1 000Hz:

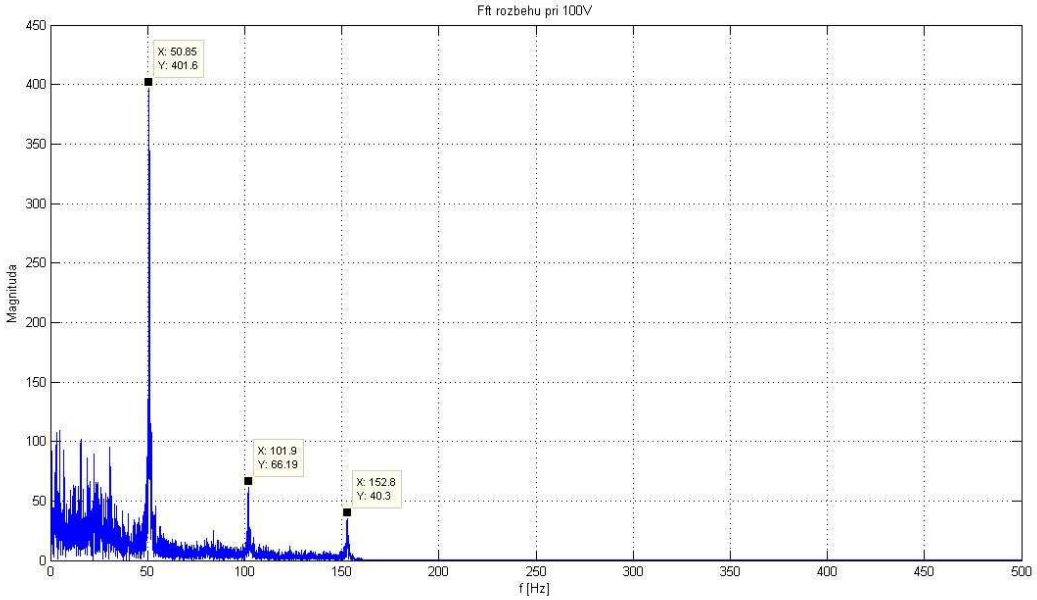
$$f_{lam} = 2f = 2.50 = 100Hz \qquad f_{sdb} \approx \pm 1000Hz \qquad (6.13)$$

6.3 Analýza jednotlivých meraní

Z tohto obrázku môžeme pozorovať tak povediac hluk okolia, ktorý bol zaznamenaný pri vypnutom meranom stroji. Vidíme, že sa tu vyskytuje hluk o frekvencii približne 50 *Hz* a jeho násobky. Toto naznačuje na nejaký iný elektrický stroj.

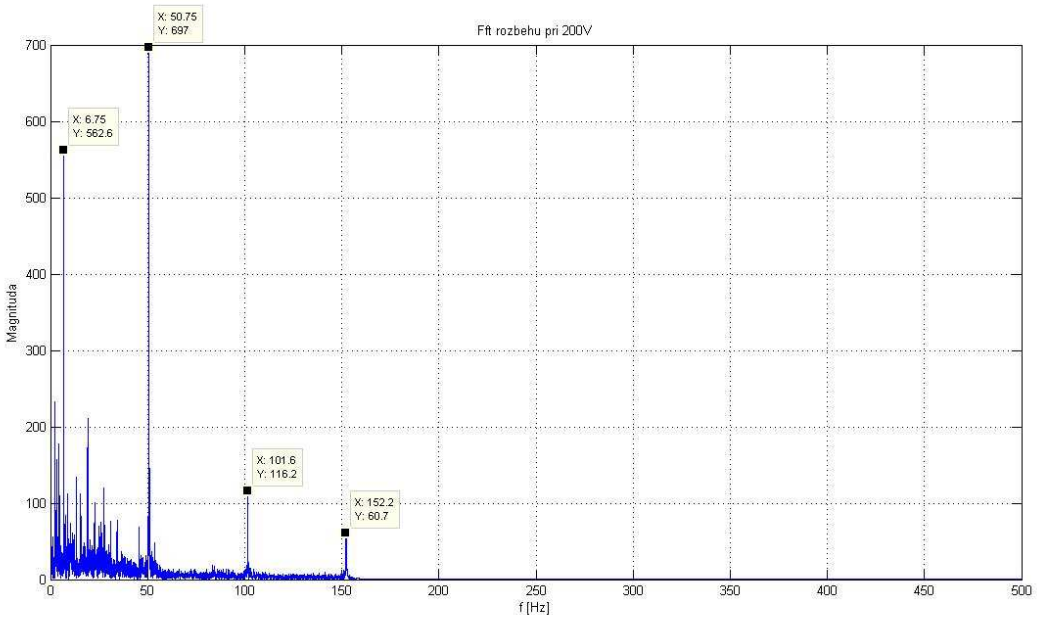


Obr. 6.8: Rýchla Fourierova transformácia merania pri vypnutom stroji (ticho)



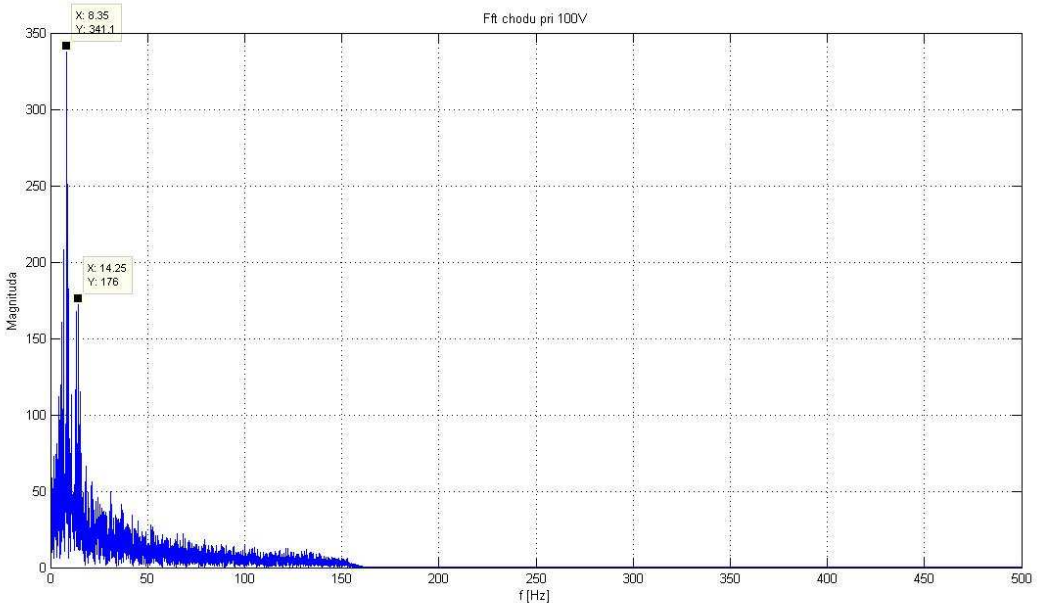
Obr. 6.9: Rýchla Fourierova transformácia merania rozbehu stroja pri 100 V

Je zaujímavé, že obrázok *6.9* je veľmi podobný predošlému aj napriek tomu, že znázorňuje rozbeh stroja. Pravdepodobne hluk okolia do značnej miery ovplyvnil meranie stroja.



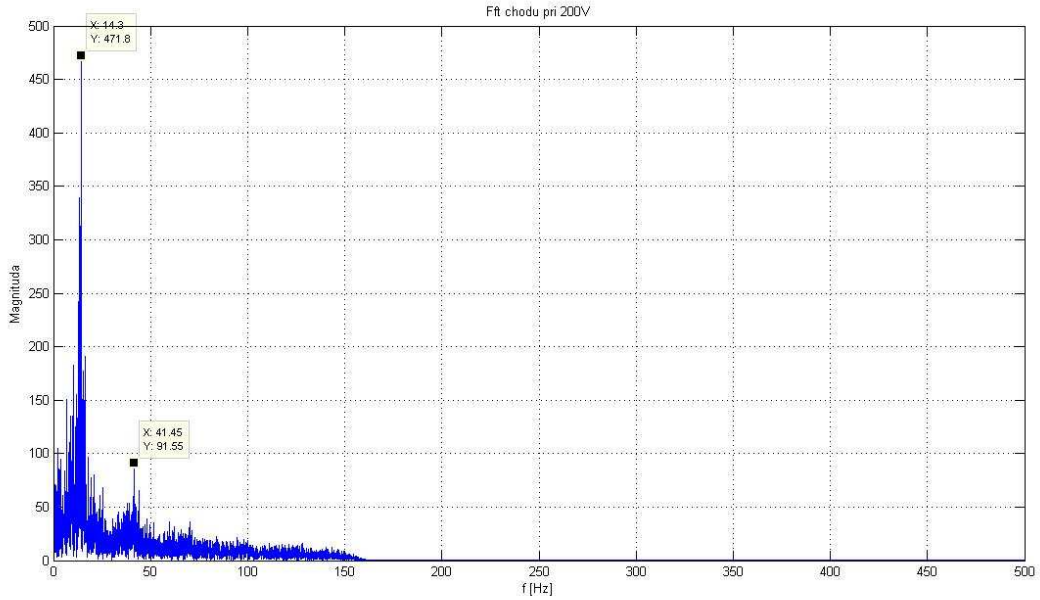
Obr. 6.10: Rýchla Fourierova transformácia merania rozbehu pri 200 V

Ten istý problém sa vyskytol aj pri tomto meraní (*obr. 6.10*), ale môžeme vidieť, že sa tu vyskytuje ešte jeden zdroj hluku o frekvencii približne 6,78 *Hz*, čo môžeme podľa výpočtov priradiť neregulárnosti guličkovej klietky.



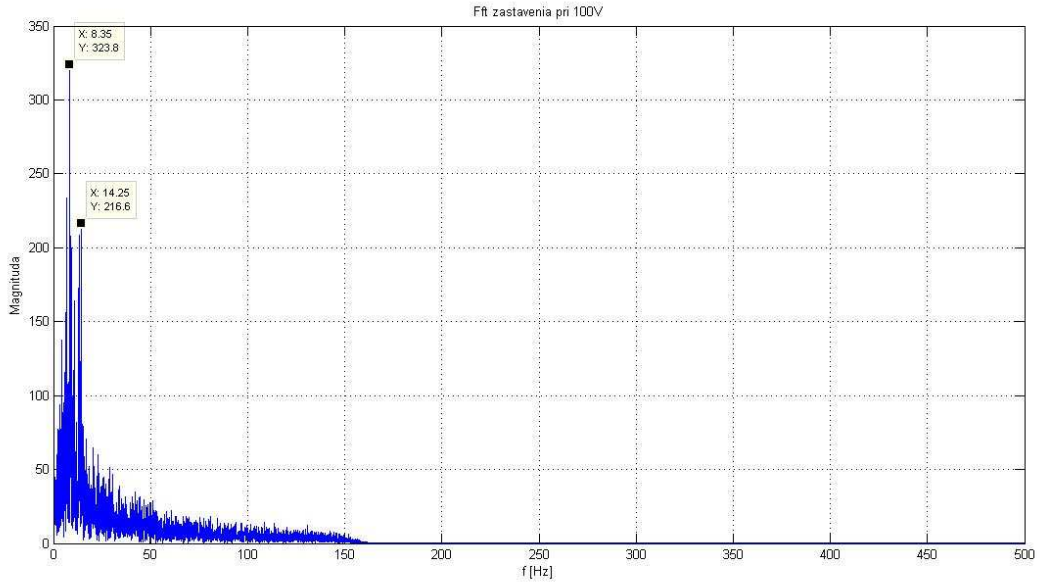
Obr. 6.11: Rýchla Fourierova transformácia merania chodu stroja pri 100 V

Tento obrázok znázorňuje už ustálený chod meraného stroja pri napájaní 100 *V* a vidíme dve výrazné frekvencie a to 8,35 *Hz* a 14,25 *Hz*. Tieto dve frekvencie s veľkou pravdepodobnosťou nie sú mechanického pôvodu, keďže ich nevieme priradiť k žiadnej vypočítanej frekvencii.



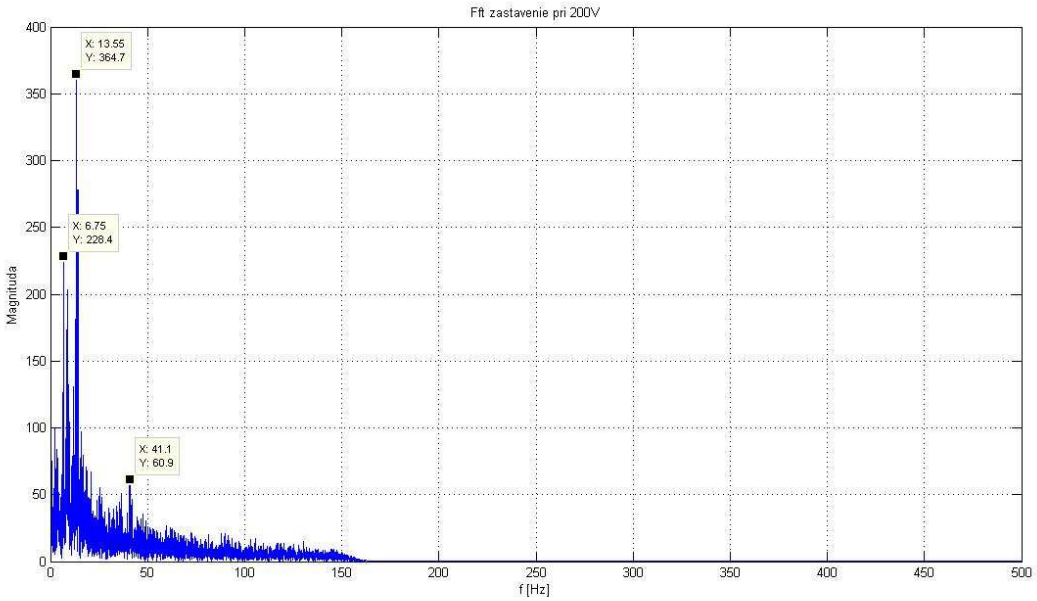
Obr. 6.12: Rýchla Fourierova transformácia merania chodu stroja pri 200 V

Pri tomto meraní sa takisto vyskytla frekvencia 14,3 *Hz* a keďže nevieme tuto frekvenciu presne priradiť k vypočítanej hodnote mechanického pôvodu, bude to zrejme hluk elektromagnetického pôvodu, keďže sa vyskytuje ako v týchto dvoch meraniach tak aj v ďalších.



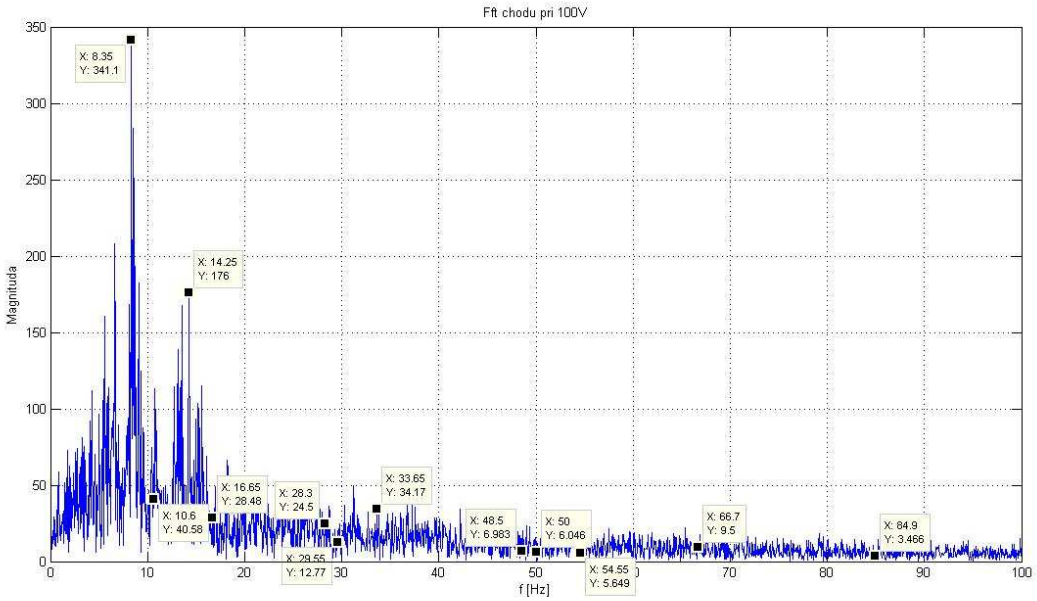
Obr. 6.13: Rýchla Fourierova transformácia merania dobehu stroja pri 100 V

Frekvencia 8,35 *Hz* sa už vyskitla v *obr. 6.11*, ktoré zobrazuje meranie takisto pri 100 *V* a toto naznačuje na elktromagnetický pôvod hluku.



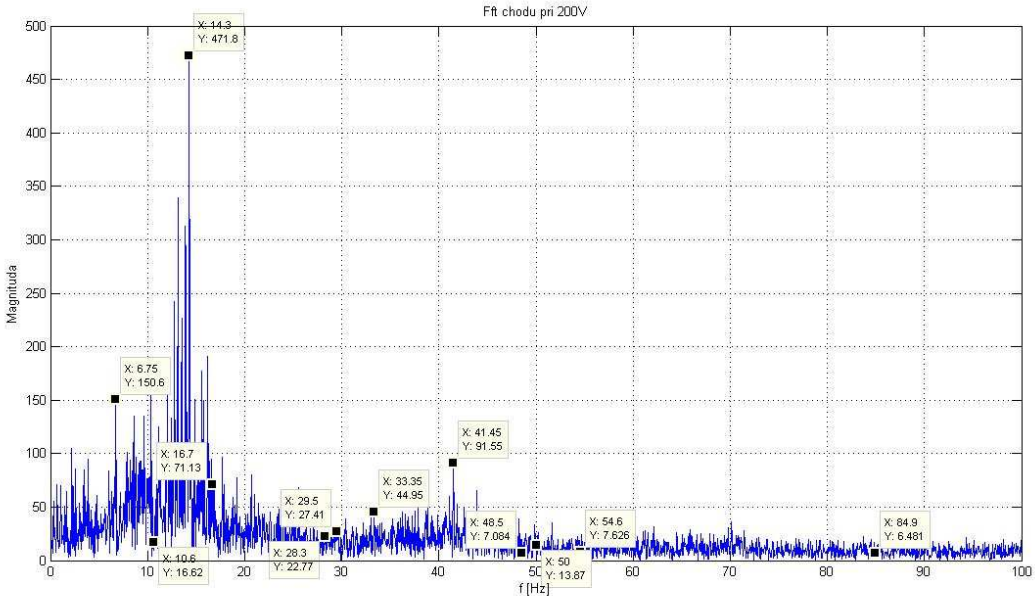
Obr. 6.14: Rýchla Fourierova transformácia merania dobehu stroja pri 200 V

Frekvencia 41 *Hz* sa už tiež vyskitla raz a takisto to bolo pri meraní stroja napájaného 200 *V* (*obr. 6-12*). Tato frekvencia takisto neni mechanického pôvodu.



Obr. 6.15: Priblíženie Fft merania chodu stroja pri 100 V

Tuto vidíme priblíženú Fft merania chodu stroja pri 100 *V*, kde sú vyznačené všetky vypočítané fekvencie mechanického pôvodu. Vidíme, že ani jedna sa nevyznačuje zvýšenou magnitúdou a to znamená, že zaznamenaný hluk nevychádzal z ložisiek a ani nebol spôsobený rotorom. Toto isté môžeme pozorovať na ďalšom obrázku čo je priblížená Fft merania chodu stroja pri 200 *V*. Največšie hodnoty frekvencií sú pravdepodobne spôsobené vyššími harmonickými napájacieho napätia.



Obr. 6.16: Priblíženie Fft merania chodu stroja pri 200 V

Dominantné frekvencie		
[Hz]	Pravdepodobné príčiny	
50	Vonkajší zdroj hluku	
100		Môže byť aj statická excentricita vzduchovej medzery
150		
6,75	Neregulárnosť guličkovej klietky	
8,35	Vyššie harmonické napájacím napätím 100 V	
14,25	Dynamická excentricita hriadeľa	Mechanická chyba alebo porucha
41,45	Vyššie harmonické napájacím napätím 200 V	

Tab. 6.1: Dominantné namerané frekvencie a ich možné príčiny

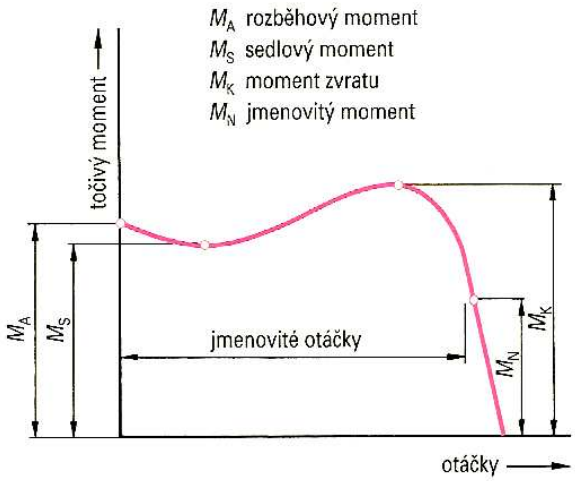
7 MERANIE PRACOVNEJ CHARAKTERISTIKY.

Elektrický stroj, na ktorom bolo celkové meranie realizované, je asynchrónny motor o napätí 3 x 230 *V*, frekvencii 50 *Hz*, výkonu 400 *W* a s menovitými otáčkami 970 min^{-1} a s rotorom nakrátko. Stroj má synchrónne otáčky teda 1000 min^{-1} a to znamená, že má 3 pólové dvojice čiže 3 severné a 3 južné póly.

Obr. 7.1: Meraný asynchrónny motor

Priebeh momentu v závislosti na otáčkach, čo je momentová charakteristika, v ideálnom stave ukazuje nárast momentu až do hodnoty momentu zvratu. Pri menovitých otáčkach pôsobí menovitý moment M_N. V jeho okolí sú zmeny sklzu úmerné zmenám zaťaženia, lebo charakteristika je tu takmer lineárna. Sedlový moment M_S odpovedá sedlu v momentovej charakteristike, teda najmenšiemu momentu medzi rozbehom a maximálnou hodnotou momentu M_K.

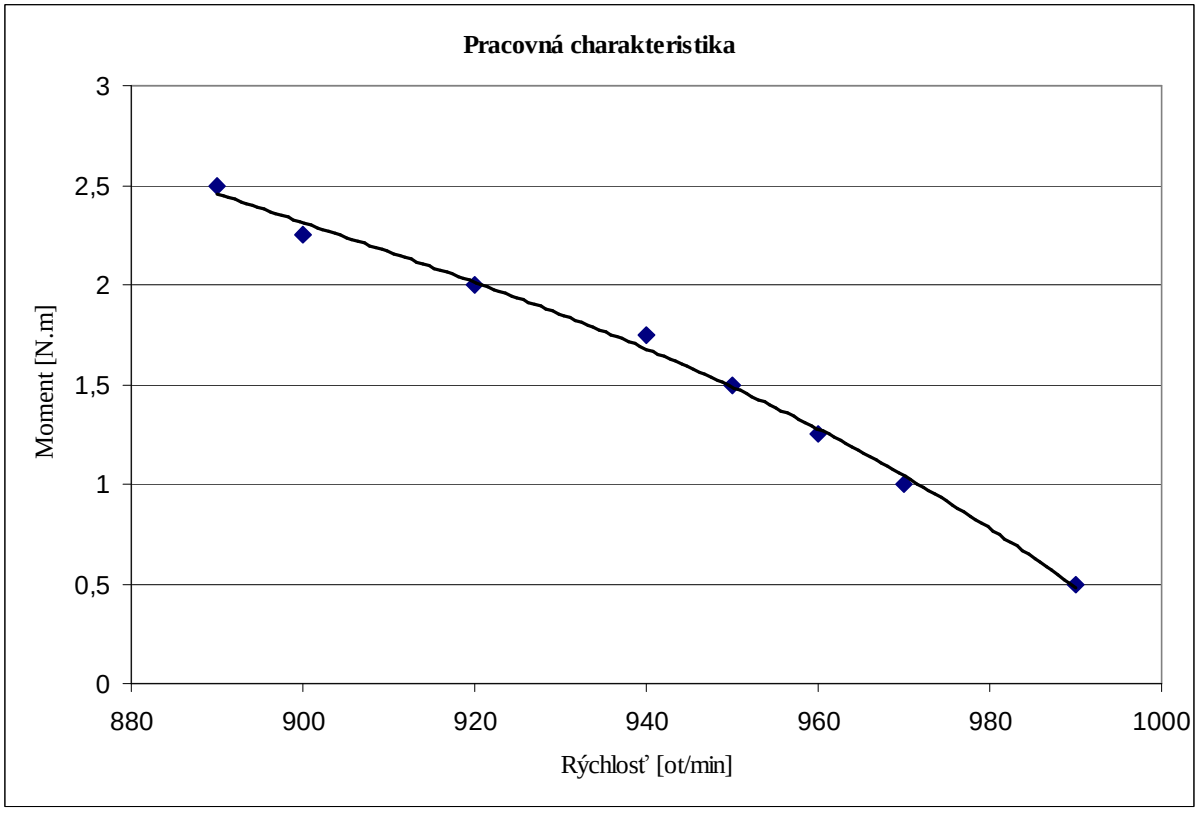
Pracovná charakteristika elektrického motora je vlastne časť momentovej charakteristiky elektrického motora, ktorá sa nachádza vpravo od maximálnej hodnoty momentu M_K.



Obr. 7.2: Momentová charakteristika elektrického motora v ideálnom stave [8]

n	M
[ot/min]	[N.m]
890	2,5
900	2,25
920	2
940	1,75
950	1,5
960	1,25
970	1
990	0,5

Tab. 7.1: Namerané hodnoty momentu v závislosti na otáčkach



Obr. 7.3: Pracovná charakteristika elektrického motora v motorovom režime.

Vidíme, že charakteristika meraného motoru sa nezhoduje s charakteristikou v ideálnom stave. Keďže je to pracovná charakteristika začína až pri otáčkach 890 min^{-1}. Charakteristika pri týchto otáčkach by mala byť pri takomto motore oveľa strmšia, to znamená, väčší moment a rýchly pokles tohto momentu pri približovaní sa k synchrónnym otáčkam, keďže motor nie je regulovateľný zmenou sklzového výkonu pomocou zaradených odporov v rotore. Toto je ale z toho dôvodu, že tento meraný motor nie je veľmi zaťažitelný, čiže je konštruovaný len na veľmi malé záťaže, veď má len výkon 400 *W*.

ZÁVER

Všetky pokyny stanovene na začiatku tejto práce boli splnené. V tejto práci sme si pripomenuli čo je zvuk respektíve hluk jeho definíciu, zvukovými vlnami, vlastnosťami, šírenie cez materiály a šírenie v stroji. Potom sme sa zoznámili s rôznymi zdrojmi hluku a ich príčinami v elektrických točivých strojoch. Ďalej sme prebrali procesy a možnosti premeny elektrickej energie na akustickú, hladinami hluku a postupom merania hluku. Uviedol som aj niektoré možnosti zníženia hluku rôznych pôvodov z elektrického točivého stroja.

Zoznámili sme sa s hlukomermi, ich konštrukciou, zaznamenývacím mikrofónom, a taktiež s faktormi ovplyvňujúce meranie týmito prístrojmi.

Ako ďalšie sme realizovali meranie hluku pri asynchrónnom stroji pri rôznych stavoch a to pri vypnutom stroji, čo bolo vlastne ticho, pri rozbehu stroja na menovité otáčky, potom chod stroja pri menovitých otáčkach a nakoniec vypnutie stroja, respektíve dobeh stroja. Tieto stavy boli namerané pri napätí 100V a potom pri napätí 200 *V*. Ako elektrický točivý stroj sme použili asynchrónny motor, ktorého parametre sú uvedené v kapitole 7. Na meranie hluku sme použili hlukomer Chauvin Arnoux C.A Sonometer 832. Tento hlukomer zaznamenával hluk vydávaný strojom do audio súborov typu Wave. Z týchto súborov sme potom na počítači pomocou programu MATLAB premenili na vizuálne priebehy, ktoré môžeme vidieť vyššie.

Predpokladal som pri meraní, že najväčším zdrojom hluku budú ložiská. Hluk aerodynamického pôvodu sme mohli hneď vylúčiť, keďže stroj nemá chladiaci ventilátor ani drážky, ktorými by prúdil vzduch alebo chladiace médium. Ďalej sme mohli vylúčiť aj hluk prevodovky či hluk spôsobený záťažou a to z toho dôvodu, že sme motor merali pri nulovom zaťažení. Keďže som sa zameral ne hluk mechanického pôvodu nevedel som presne určiť zdroj hluku prítomného pri meraní, ale môže to byť kľudne nesprávnym spracovaním či výrobou, alebo aj prítomnosťou nečistôt. Ale samozrejme zdrojom hluku môže byť s veľkou pravdepodobnosťou elektrické točivé pole (elektromagnetický zdroj) a vyššie harmonické napájacieho napätia.

V priemysle a výrobe môžu byť stroje hlučné 60 až 80 *dB*. Keď ich hluk presahuje túto hodnotu, musia byť uzavreté v samostatnej miestnosti a pracovníci musia nosiť bezpečnostné prípravky, aby sa im neporušil sluch.

Táto metóda merania je vo veľkej miere nepresná a ovplyvnená rôznymi faktormi. Takéto meranie by bolo treba realizovať vo zvukotesných priestoroch s absorbérmi, aby sa neodrážala ani najmenšia frakcia zvuku alebo hluku od stien a stropu a samozrejme použiť presnejší merací prístroj, alebo sústavu prístrojov, ktoré sú na to určené. Náš použitý merací prístroj bol skôr na informatívne meranie.

Ďalšou možnosťou presného merania frekvencií je meranie akcelerometrom a následné vibrodiagnostika.

LITERATÚRA

[1] Jacek F. Gieras, Chong Wang, Joseph Cho Lai.*: Noise of Polyphase Electric Motors*. U.S.A. 2006 by Taylor & Francis Group, ISBN: 0-8247-2381-3.

[2] H. Hallyday, R. Resnick, J. Walker: *Fyzika.* Vysoké učení technické v Brně, nakladatelství VUTIUM a PROMETHEUS, 2000.

[3] Roman Kubínek, Hana Kolářová: *Rychlokurz fyziky*. Olomouc, nakladatelství Rubico, ISBN: 80-85837-37-7.

[4] Grigoriev, N.V.: *Vibration of Power Mechanics*, Handbook (in Russian), Machinostroenie, Leningrad, 1974.

[5] Bies, D. and Hansen, C.H.: *Engineering Noise Control*, Unwin Hyman, 1988.

[6] Lisner, R.P., Timar, P.L.: *A new approach to electric motor acoustic noise standards and test procedures*, IEEE Trans. on EC, Vol. 14(3), 1999, ISSN**:** 0885-8969.

[7] Timar, P.L., Fazekas, A., Kiss, J., Miklos, A. and Yang, S.J.*: Noise and Vibration of Electrical Machines*, Elsevier, Amsterdam – Oxford – New York – Tokyo, Japan, 1989.

[8] Klaus Tkotz a kolektív: *Příručka por elektrotechnika*. Germany 2006 by Verlag Europa-Lehrmittel, Nourney, Vollmer GmbH & Co. KG, ISBN: 80-86706-13-3.