

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

ANALÝZA DYNAMICKÉHO CHOVÁNÍ ZÁTĚŽE Z MĚŘENÍ STATOROVÝCH PROUDŮ ASYNCHRONNÍHO MOTORU

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

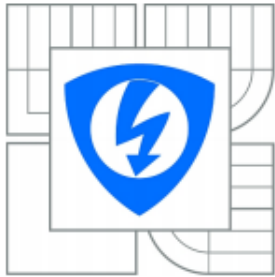
Bc. Jan Pavláček

BRNO 2014



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

**ANALÝZA DYNAMICKÉHO CHOVÁNÍ ZÁTĚŽE Z MĚŘENÍ
STATOROVÝCH PROUDŮ ASYNCHRONNÍHO MOTORU**

DIPLOMOVÁ PRÁCE
MASTER'S THESIS

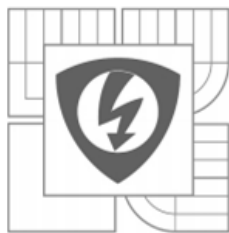
AUTOR PRÁCE
AUTHOR

Bc. Jan Pavláček

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

Ing. Rostislav Huzlík

BRNO 2014



VYSOKÉ UČENÍ
TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky
a komunikačních technologií

Ústav výkonové elektrotechniky a elektroniky

Diplomová práce

magisterský studijní obor

Silnoproudá elektrotechnika a výkonová elektronika

Student: Bc. Jan Pavláček

Ročník: 2

ID: 115250

Akademický rok: 2013/14

NÁZEV TÉMATU:

Analýza dynamického chování zátěže z měření statorových proudů asynchronního motoru

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

1. Provedte literární rešerši
2. Pomocí vhodných simulačních modelů zjistěte možnosti identifikace změn chování z analýzy statorových proudů
3. Na základě série měření proveďte analýzu dynamických změn zátěže z měření statorových proudů.
4. Na základě simulací a měření vytvořte metodiku analýzy pro vyhodnocení dynamických změn zátěže z měření statorových proudů

DOPORUČENÁ LITERATURA:

[1] Vas, P: Parameter Estimation, Condition Monitoring, and Diagnosis of Electrical Machines; Clarendon Press, 1993

[2] Ong, Chee-Mung: Dynamic Simulations of Electric Machinery: Using MATLAB/SIMULINK; Prentice Hall 1997

Termín zadání: 27.9.2013

Termín odevzdání: 28.5.2014

Vedoucí práce: Ing. Rostislav Huzlík

Konzultanti diplomové práce:

Ing. Ondřej Vítek, Ph.D.

Předseda oborové rady

UPOZORNĚNÍ:

Autor diplomové práce nesmí při vytváření diplomové 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 zákoníku č.40/2009 Sb.

Abstrakt

Tato diplomová práce je zaměřena na analýzu dynamického chování zátěže z měření statorových proudů asynchronního motoru. Práce je seřazena od základních poruch motoru, rovnic, matematické modely, druhy zpracování signálů, simulaci a měření. Praktická část se zabývá návrhem modelu motoru v prostředí Matlab Simulink, jeho odsimulování a dále měření čerpadla BETA 12 YC na pracovišti odboru fluidního inženýrství Victora Kaplana. Pomocí vhodných typů zpracování signálů jsou výsledky vyhodnoceny. Cílem této práce je analýza dynamických změn zátěže.

Abstract

This thesis focuses on the analysis of the dynamic behavior of the load from the measurement of stator currents of induction motor. Work is sorted from basic engine failures equations, mathematical models, types of signal processing, simulation and measurement. The practical part deals with the design of the motor model in Matlab Simulink, the simulated and the measurement of the pump BETA 12 YC On the Department of Fluid Engineering Victor Kaplan. Use appropriate types of signal processing evaluate the results. The aim of this work is to analyze the dynamic changes of the load.

Klíčová slova

asynchronní, motor, zátěž, model, stator, rotor, vinutí, moment, fázor, pohon, signál

Keywords

asynchronous, motor, load, model, stator, rotor, windings, torque, phasor, driv, signal

Bibliografická citace

PAVLÁČEK, J. *Analýza dynamického chování zátěže z měření statorových proudů asynchronního motoru*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2014. 55 s. Vedoucí diplomové práce Ing. Rostislav Huzlík.

Prohlášení

Prohlašuji, že svou diplomovou práci na téma Analýza dynamického chování zátěže z měření statorových proudů asynchronního motoru jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové 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 diplomové práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této diplomové 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 diplomové práce Ing. Rostislavu Huzlíkovi za účinnou metodickou, pedagogickou a odbornou pomoc a další cenné rady při zpracování mé diplomové práce. Mé poděkování patří též doc. Ing. Vladimíru Habánovi, Ph.D. a Ing. Martinu Hudcovi za odbornou pomoc a cenné rady v praktické části mé diplomové práce.

V Brně dne

Podpis autora

**OBSAH**

| | |
|---|-----------|
| SEZNAM OBRÁZKŮ | 8 |
| SEZNAM TABULEK | 10 |
| SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK | 11 |
| 1 ANALÝZA STATOROVÝCH PROUDŮ – PORUCHY | 13 |
| 1.1 EXCENTRICITA ROTORU | 13 |
| 1.2 PORUCHA ROTOROVÝCH TYČÍ | 14 |
| 1.3 ZMĚNA MECHANICKÉHO ZATÍŽENÍ | 15 |
| 1.3.1 ZMĚNA ZATĚŽOVACÍHO MOMENTU KMITÁNÍM | 15 |
| 1.3.2 JEDNOTLIVÁ FREKVENCE KMITÁNÍ ZATĚŽOVACÍHO MOMENTU | 15 |
| 1.3.3 OPAKOVANÝ POKLES ZATĚŽOVACÍHO MOMENTU | 15 |
| 1.3.4 NÁHODNÝ POKLES ZATĚŽOVACÍHO MOMENTU | 16 |
| 2 ZÁKLADNÍ ROVNICE ASYNCHRONNÍHO STROJE | 16 |
| 3 MATEMATICKÉ MODELY ASYNCHRONNÍHO MOTORU | 19 |
| 3.1 MATEMATICKÝ MODEL AS.MOTORU NAPÁJENÉHO Z NAPĚŤOVÉHO ZDROJE S UVAŽOVÁNÍM ELEKTROMAGNETICKÝCH DĚJŮ | 19 |
| 3.2 MATEMATICKÝ MODEL AS. MOTORU BEZ UVAŽOVÁNÍ NASYCENÍ HLAVNÍHO MAGNETICKÉHO OBVODU | 19 |
| 4 ORIGINLAB, MATLAB | 21 |
| 4.1 ORIGINLAB | 21 |
| 4.2 MATLAB | 21 |
| 5 MODEL ASYNCHRONNÍHO MOTORU V MATLABU | 22 |
| 6 ZPRACOVÁNÍ SIGNÁLU | 24 |
| 6.1 FOURIEROVA TRANSFORMACE (FFT) | 24 |
| 6.2 KRÁTKODOBÁ FOURIEROVA TRANSFORMACE A SPEKTROGRAM | 24 |
| 6.3 WAVELET TRANSFORMACE | 25 |
| 7 SIMULACE | 26 |
| 8 MĚŘENÍ | 31 |
| 9 ZÁVĚR | 54 |
| LITERATURA | 55 |



SEZNAM OBRÁZKŮ

| | |
|---|-----------|
| <i>Obrázek 1: Znázornění statické, dynamické a smíšené excentricity [1]</i> | <i>13</i> |
| <i>Obrázek 2: Prostorový vektor proudu v souřadných řadách [3]</i> | <i>19</i> |
| <i>Obrázek 3: Prostředí OriginPro</i> | <i>21</i> |
| <i>Obrázek 4: Prostředí Matlab</i> | <i>21</i> |
| <i>Obrázek 5: Obvodový model vztažený na osu q [4]</i> | <i>22</i> |
| <i>Obrázek 6: Obvodový model vztažený pro osu d [4]</i> | <i>22</i> |
| <i>Obrázek 7: Zjednodušený model [4]</i> | <i>22</i> |
| <i>Obrázek 8: Rozdělení v časo-frekvenční rovině STFT a Wavelet [5]</i> | <i>25</i> |
| <i>Obrázek 9: Model asynchronního motoru v Simulinku</i> | <i>26</i> |
| <i>Obrázek 10: Grafy závislosti proudu na čase pro buzení $f=10\text{Hz}$, motor 1</i> | <i>27</i> |
| <i>Obrázek 11: Grafy závislosti proudu na čase pro buzení $f=50\text{Hz}$, motor 1</i> | <i>28</i> |
| <i>Obrázek 12: Grafy závislosti proudu na čase probuzení $f=10\text{Hz}$, motor 2</i> | <i>29</i> |
| <i>Obrázek 13: Grafy závislosti proudu na čase probuzení $f=50\text{Hz}$, motor 2</i> | <i>30</i> |
| <i>Obrázek 14: Schéma zapojení pracoviště</i> | <i>31</i> |
| <i>Obrázek 15: Pohled na zapojené pracoviště</i> | <i>31</i> |
| <i>Obrázek 16: Měřicí tenzometrická hřídel [7]</i> | <i>32</i> |
| <i>Obrázek 17: Graf závislosti měrné energie čerpadla na průtoku</i> | <i>36</i> |
| <i>Obrázek 18: Graf závislosti příkonu čerpadla na hřídeli na průtoku</i> | <i>36</i> |
| <i>Obrázek 19: Graf závislosti účinnosti čerpadla na průtoku</i> | <i>37</i> |
| <i>Obrázek 20: Graf závislosti otáček čerpadla na průtoku</i> | <i>37</i> |
| <i>Obrázek 21: Grafy závislosti útlumu na frekvenci pro jednotlivé veličiny, $f=6\text{Hz}$, $Q=3l$</i> | <i>38</i> |
| <i>Obrázek 22: Grafy závislosti útlumu na frekvenci pro jednotlivé veličiny, $f=8\text{Hz}$, $Q=3l$</i> | <i>39</i> |
| <i>Obrázek 23: Grafy závislosti útlumu na frekvenci pro jednotlivé veličiny, $f=10\text{Hz}$, $Q=3l$</i> | <i>40</i> |
| <i>Obrázek 24: Grafy závislosti útlumu na frekvenci pro jednotlivé veličiny, $f=6\text{Hz}$, $Q=10l$</i> | <i>41</i> |
| <i>Obrázek 25: Grafy závislosti útlumu na frekvenci pro jednotlivé veličiny, $f=8\text{Hz}$, $Q=10l$</i> | <i>42</i> |
| <i>Obrázek 26: Grafy závislosti útlumu na frekvenci pro jednotlivé veličiny, $f=10\text{Hz}$, $Q=10l$</i> | <i>43</i> |
| <i>Obrázek 27: STFT proudu-poloviční zdvih $f=10\text{Hz}$, $Q=10l$</i> | <i>44</i> |
| <i>Obrázek 28: Grafy závislosti útlumu na frekvenci pro jednotlivé veličiny, $f=6\text{Hz}$, $Q=6l$</i> | <i>45</i> |
| <i>Obrázek 29: Grafy závislosti útlumu na frekvenci pro jednotlivé veličiny, $f=8\text{Hz}$, $Q=6l$</i> | <i>46</i> |
| <i>Obrázek 30: Grafy závislosti útlumu na frekvenci pro jednotlivé veličiny, $f=10\text{Hz}$, $Q=6l$</i> | <i>47</i> |
| <i>Obrázek 31: STFT proudu- plný zdvih, $f=10\text{Hz}$, $Q=6l$</i> | <i>48</i> |
| <i>Obrázek 32: Horní obálka proudu I_1 pro $f=10\text{Hz}$, $Q=6l$, $t=200\text{ ms}$</i> | <i>48</i> |
| <i>Obrázek 33: Fourierova transformace horní obálky $f=10\text{Hz}$, $Q=6l$, celý časový rozsah</i> | <i>49</i> |



| | |
|--|-----------|
| <i>Obrázek 34: Grafy závislosti proudu na čase pro buzení $f=10\text{Hz}$, $Q=10l$, motor 1.....</i> | <i>51</i> |
| <i>Obrázek 35: Grafy závislosti proudu na čase pro $f=10\text{Hz}$, $Q=10l$, motor 2</i> | <i>52</i> |
| <i>Obrázek 36: FFT proudu I_1 při buzení momentem</i> | <i>53</i> |



SEZNAM TABULEK

| | |
|---|-----------|
| <i>Tabulka 1: Porovnání souřadných soustav [3]</i> | <i>20</i> |
| <i>Tabulka 2: Tabulka středních hodnot veličin čerpadla.....</i> | <i>34</i> |
| <i>Tabulka 3: Tabulka středních hodnot s použitím pulsátoru - poloviční zdvih</i> | <i>50</i> |



SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK

| Značka | Název veličiny | Jednotka |
|-----------------|-----------------------------|-------------------|
| a | koeficient roztažení | - |
| b | posun počátku | - |
| f | frekvence | Hz |
| f _e | základní napájecí frekvence | Hz |
| f _n | nízká frekvence | Hz |
| f _v | vyšší frekvence | Hz |
| f _z | frekvence při změně zátěže | Hz |
| h | rozdílová výška snímačů | m |
| I | proud | A |
| i _{dr} | proud v podélné ose rotoru | A |
| i _{ds} | proud v podélné ose statoru | A |
| i _{qr} | proud v příčné ose rotoru | A |
| i _{qs} | proud v příčné ose statoru | A |
| i _u | proud první fáze | A |
| i _v | proud druhé fáze | A |
| i _w | proud třetí fáze | A |
| J | setrvačný moment | kg.m ² |
| L | indukčnost | H |
| L _m | magnetizační indukčnost | H |
| L _{1r} | rotorová indukčnost | H |
| L _{1s} | statorová indukčnost | H |
| L _u | indukčnost první fáze | H |
| L _v | indukčnost druhé fáze | H |
| L _w | indukčnost třetí fáze | H |
| m | počet fází | - |
| M | moment motoru | N.m |
| M _i | vnitřní moment | N.m |
| M _k | moment čerpadla | N.m |
| n | otáčky | min ⁻¹ |
| n _d | dynamická excentricita | mm |
| n _{sa} | saturace | - |



| Značka | Název veličiny | Jednotka |
|---------------|------------------------|----------|
| n_{ws} | počet harmonických | - |
| p | počet pólových dvojic | - |
| p_1 | tlak | Pa |
| p_2 | tlak | Pa |
| Q | průtok | m^3/s |
| R | činný odpor | Ω |
| r_r | odpor rotoru | Ω |
| R_s | statorový odpor | Ω |
| r_s | odpor statoru | Ω |
| R_u | odpor první fáze | Ω |
| R_v | odpor druhé fáze | Ω |
| R_w | odpor třetí fáze | Ω |
| s | skluz | - |
| S_1 | průřez potrubí | m^2 |
| S_2 | průřez potrubí | m^2 |
| t | čas | s |
| U | elektrické napětí | V |
| u_{ds} | napětí v podélné ose | V |
| U_i | indukované napětí | V |
| u_{qs} | napětí v příčné ose | V |
| Y | měrná energie čerpadla | J/kg |
| δ | zátěžný úhel | rad |
| η | účinnost | % |
| ω_{1m} | úhlový kmitočet | s^{-1} |
| Ψ | spřažený mag.tok | Wb |
| v | úhel natočení | rad |

1 ANALÝZA STATOROVÝCH PROUDŮ – PORUCHY

Elektrické stroje jsou klíčovým prvkem elektronických systémů. Mezi nejčastěji používané stroje patří asynchronní motory z důvodu jednoduché konstrukce a vysoké účinnosti. Mezi běžné elektrické poruchy, které se vyskytují v elektrických pohonech patří poruchy vinutí statoru, zlomený rotor, porucha kroužků, selhání měniče.

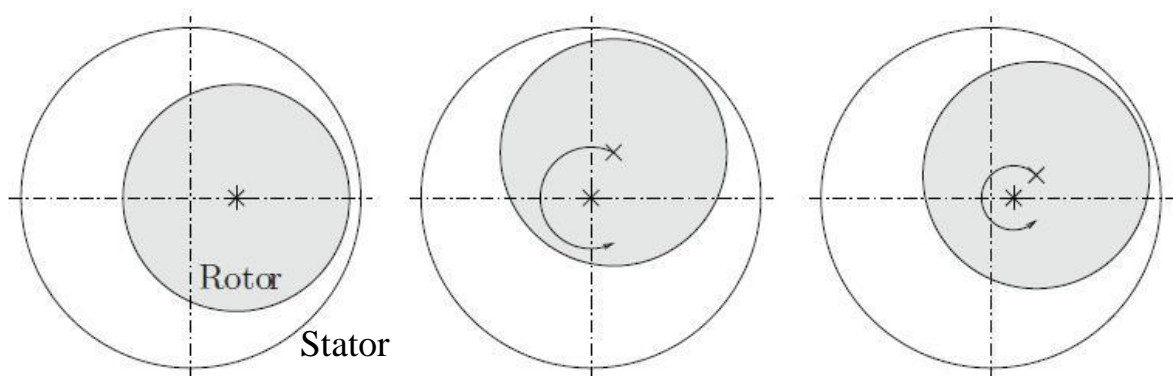
Mezi mechanické závady patří excentricita rotoru, porucha ložisek, vychýlení hřídele, nevyvážení. Spektrální analýza statorového proudu se používá k detekci poruch rotoru asynchronního stroje.

Magnetické pole ve vzduchové mezeře v důsledku poruch rotoru má za následek charakteristická pásma harmonických složek ve spektru statorového proudu, které může být změřeno jako charakteristická porucha rotoru. Stejný následek mohou mít i různé zatěžovací momenty.

1.1 Excentricita rotoru

V zásadě existují dva typy excentricity rotoru (statická a dynamická). U statické excentricity je rotor vychýlený ze středu motoru, ale stále se otáčí na jeho vlastní ose. Statická excentricita může být způsobena při nevhodném umístění jádra statoru a rotorové klece, nadměrným osovým zatížením nebo opotřebováním ložisek.

Dynamická excentricita může být způsobena ohnutou rotorovou tyčí nebo provozováním stroje v kritických rychlostech, které způsobí mechanickou rezonanci. Rotor se stále otáčí ve středu motoru, ovšem už ne kolem svého vlastního středu. V praxi se setkáváme s oběma druhy excentricity. Excentricity rotoru produkují radiální magnetické síly na hřídeli rotoru, což je známo jako nesouměrná magnetická přitažlivá síla (UMP). Toto posunutí rotoru způsobuje nadměrný tlak na stroj a zvyšuje opotřebení ložisek. Jestliže tato porucha není včas odhalena může to vést ke zničení jádra statoru, statorového vinutí a rotorové klece. Při selhání stroje jsou nutné nákladné opravy. [2]



Obrázek 1: Znáznornění statické, dynamické a smíšené excentricity [1]

Excentricita rotoru má za následek vznik vysoké frekvence, která je dána vztahem:

$$f_v = \left[(nR \pm n_d) \cdot \left(\frac{1-s}{p} \right) \pm 2n_{sa} \pm n_{ws} \right] \cdot f_e \quad (1)$$



Pro kombinovanou excentricitu se vyskytují nízké frekvence harmonických kmitů ve spektru statorového proudu:

$$f_n = \left(1 \pm k \cdot \frac{1-s}{p}\right) \cdot f_e \quad (2)$$

Kde k je celé číslo. Dominantní nízkofrekvenční charakteristické složky poruch je pro případ kdy se $k=1$. Tyto kmity existují díky vzájemnému působení mezi oběma druhy výstředností.

- n – počet rotorových drážek
- R – počet rotorových tyčí
- n_d – dynamická excentricita
- s – skluz
- p – počet pólových dvojic
- n_{sa} – saturace
- n_{ws} – počet harmonických
- f_e – základní napájecí frekvence

1.2 Porucha rotorových tyčí

Poruchy rotoru jsou způsobeny nedostatečným litím, výrobním postupem, nebo kombinací různých vlivů působících na motor např. elektromagnetické, mechanické, teplotní. Poruchy rotorových tyčí a kroužků, ve kterých jsou tyče uchycené, mají za následek asymetrický chod asynchronního stroje, což se projevuje jako nesymetrie výsledných proudů, pulzující točivý moment, nárůst ztrát, špatný rozběh a vyšší tepelné namáhání. Pro poruchu rotorových tyčí jsou odpovídající charakteristické harmonické kmity dané vztahem:

$$f_{pr} = (1 \pm 2 \cdot k \cdot s) \cdot f_e \quad (3)$$

Platí, že hlavní ukazatele poruch v přítomnosti tohoto typu poruchy rotoru odpovídají pro $k=1$. Pokud je s velmi malé (při částečném zatížení) nebo Fourierova transformace spektrálního rozlišení příliš hrubá, může to představovat potíže při detekci poruchy. Diagnostikování a zkoumání zabývající se poruchami přerušovaných rotorových tyčí a jejich vlivu na výkonové charakteristiky motoru je důležité, stejně jako z hlediska změn samotného chování motoru. [2]

1.3 Změna mechanického zatížení

Stav režimů monitorovacích programů pro detekci chyb rotoru jsou koncipovány za předpokladu stálého zatěžovacího momentu. Jiné mechanické podmínky zatížení a různé úrovně zatížení mají vliv na charakteristické chyby ve spektru. U mechanických poruch (nerovnoměrné zatížení, úhlové a radiální posunutí hřídele) dochází k excentricitě rotoru uvnitř motoru. K odhalování těchto závad lze využít ukazatele poruchy v rovnici 3.

1.3.1 Změna zatěžovacího momentu kmitáním

Změna zatěžovacího momentu kmitáním má následující výraz:

$$M_z = MT_S + \eta \cdot M_s \cdot \cos(\theta_{rm}) \quad (4)$$

Kde M_s je průměrný zatěžovací moment. θ_{rm} je mechanický rotorový úhel natočení vzhledem ke statoru. η značí kmitající úroveň momentu zátěže. Hodnota η může být i vyšší než 1 například u pístových kompresorů. Jestliže je mechanický systém lineární, všechny frekvenční složky v zátěži točivého momentu se objeví na hřídeli a to vede ke zvlnění momentu M_{zv} . U ideálního modelu asynchronního motoru se sinusovým výstupním napětím a zanedbatelným statorovým odporem obsahuje soustava dq statoru jen základní složky.

Okamžitý točivý moment v libovolné vztažné soustavě:

$$M_{zv} = \frac{3}{2} \cdot p \cdot (\Psi_{ds} i_{qs} - \Psi_{qs} i_{ds}) \quad (5)$$

je patrné, že každá změna kmitání momentu zatížení na násobek rychlosti otáčení k.f vyvolá odpovídající harmonické frekvenční složky statorového proudu:

$$f_z = f_e \pm k \cdot f_{rm} = \left(1 \pm k \frac{1-s}{p}\right) f_e \quad (6)$$

f_{rm} – frekvence mechanického otáčení rotoru

Změna zatěžovacího momentu kmitáním vyvolává větší chyby než poruchy vyplývající z excentricity rotoru. [2]

1.3.2 Jednotlivá frekvence kmitání zatěžovacího momentu

Podobně jako v předchozím případě se lze domnívat, že kmitající zatěžovací moment v jednotlivé četnosti frekvence f_0 se překrývá s konstantní střední hodnotou točivého momentu. Moment zátěže můžeme vyjádřit:

$$M_z = M_s + \eta \cdot M_s \cdot \cos(2\pi f_0 t) = M_s + M_{osc} \cdot \cos(2\pi f_0 t) \quad (7)$$

1.3.3 Opakovaný pokles zatěžovacího momentu

Porucha opakovaného zatížení je pokles točivého momentu. Spektrum zatěžovacího momentu. Spektrum momentu zátěže za předpokladu, že je doba rovná $1/f_0$ bude obsahovat základní složku f_0 a sekvence vyšších harmonických frekvencí k. f_0 , jehož veličiny závisí na zatížení pokleslého točivého momentu. [2]



1.3.4 Náhodný pokles zatěžovacího momentu

Při náhodném poklesu zatěžovacího momentu hraje důležitou roli posuvné okno ve spektrální analýze.

2 ZÁKLADNÍ ROVNICE ASYNCHRONNÍHO STROJE

Při odvozování základních rovnic uvažujeme asynchronní stroj se souměrným 3-fázovým vinutím statoru i rotoru. Souměrné vícefázové vinutí rotoru se dá převést na souměrné 3-fázové vinutí. Uvažovaný stroj má celkem 6 vinutí, a to tři statorová vinutí u,v,w a tři rotorová vinutí K,L,M

Napěťová rovnice pro jednotlivá vinutí má tvar:

$$u_k = R_k \cdot i_k + \frac{d\Psi_k}{dt} \quad (k=u,v,w,K,L,M) \quad (8)$$

Pro činné odpory souměrných statorových a rotorových vinutí platí:

$$R_u = R_v = R_w = R_1 \quad (9)$$

$$R_K = R_L = R_M = R_2 \quad (10)$$

Rovnice pro spřažené magnetické toky můžeme pomocí vlastních a vzájemných indukčností psát ve tvaru:

$$\Psi_u = L_{uu} \cdot i_u + L_{uv} \cdot i_v + L_{uw} \cdot i_w + L_{uK} \cdot i_K + L_{uL} \cdot i_L + L_{uM} \cdot i_M \quad (11)$$

$$\Psi_v = L_{vu} \cdot i_u + L_{vv} \cdot i_v + L_{vw} \cdot i_w + L_{vK} \cdot i_K + L_{vL} \cdot i_L + L_{vM} \cdot i_M \quad (12)$$

$$\Psi_w = L_{wu} \cdot i_u + L_{wv} \cdot i_v + L_{ww} \cdot i_w + L_{wK} \cdot i_K + L_{wL} \cdot i_L + L_{wM} \cdot i_M \quad (13)$$

$$\Psi_K = L_{Ku} \cdot i_u + L_{Kv} \cdot i_v + L_{Kw} \cdot i_w + L_{KK} \cdot i_K + L_{KL} \cdot i_L + L_{KM} \cdot i_M \quad (14)$$

$$\Psi_L = L_{Lu} \cdot i_u + L_{Lv} \cdot i_v + L_{Lw} \cdot i_w + L_{LK} \cdot i_K + L_{LL} \cdot i_L + L_{LM} \cdot i_M \quad (15)$$

$$\Psi_M = L_{Mu} \cdot i_u + L_{Mv} \cdot i_v + L_{Mw} \cdot i_w + L_{MK} \cdot i_K + L_{ML} \cdot i_L + L_{MM} \cdot i_M \quad (16)$$

Protože vzduchová mezera asynchronního stroje je konstantní, nezávisí na poloze rotoru. vlastní indukčnosti statoru:

$$L_{uu} = L_{vv} = L_{ww} = L_1 \quad (17)$$

vlastní indukčnosti rotoru:

$$L_{KK} = L_{LL} = L_{MM} = L_2 \quad (18)$$

vzájemné indukčnosti statoru:

$$L_{uv} = L_{vu} = L_{vw} = -M_1 \quad (19)$$

vzájemné indukčnosti rotoru

$$L_{KL} = L_{KM} = L_{LM} = -M_2 \quad (20)$$



Vzájemné indukčnosti vinutí statoru nebo vinutí rotoru jsou záporné, protože osy těchto vinutí svírají úhel 120° elektrických.

Vzájemná indukčnost vinutí fáze statoru u a vinutí fáze rotoru K je největší pro úhel $\vartheta=0$, nulová pro úhel $\vartheta=(\pi/2)$, záporná maximální pro úhel $\vartheta=\pi$ atd.

Tyto závislosti můžeme vyjádřit kosinovou funkcí:

$$L_{uK} = L_{Ku} = L_{vL} = L_{Lv} = L_{wM} = L_{Mw} = M \cdot \cos \vartheta \quad (21)$$

Fáze rotoru L je proti fázi K natočena v kladném smyslu o $(2/3)\pi$ a pro odpovídající vzájemné indukčnosti platí proto vztahy:

$$L_{uL} = L_{Lu} = L_{vM} = L_{Mv} = L_{wK} = L_{Kw} = M \cdot \cos\left(\vartheta + \frac{2}{3}\pi\right) \quad (22)$$

Fáze rotoru M je proti fázi K natočena v záporném smyslu o $(2/3)\pi$ a pro odpovídající vzájemné indukčnosti platí vztahy:

$$L_{uM} = L_{Mu} = L_{vK} = L_{Kv} = L_{wL} = L_{Lw} = M \cdot \cos\left(\vartheta - \frac{2}{3}\pi\right) \quad (23)$$

Dosazením výše uvedených vztahů do rovnic sprážených magnetických toků dostaneme rovnice s periodickými časově závislými činiteli, které můžeme přehledně psát v maticové formě:

$$\begin{bmatrix} \Psi_u \\ \Psi_v \\ \Psi_w \\ \Psi_K \\ \Psi_L \\ \Psi_M \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_1 & -M_1 & -M_1 & M \cos(\vartheta) & M \cos\left(\vartheta + \frac{2}{3}\pi\right) & M \cos\left(\vartheta - \frac{2}{3}\pi\right) \\ -M_1 & L_1 & -M_1 & M \cos\left(\vartheta - \frac{2}{3}\pi\right) & M \cos(\vartheta) & M \cos\left(\vartheta + \frac{2}{3}\pi\right) \\ -M_1 & -M_1 & L_1 & M \cos\left(\vartheta + \frac{2}{3}\pi\right) & M \cos\left(\vartheta - \frac{2}{3}\pi\right) & M \cos(\vartheta) \\ M \cos(\vartheta) & M \cos\left(\vartheta - \frac{2}{3}\pi\right) & M \cos\left(\vartheta + \frac{2}{3}\pi\right) & L_2 & -M_2 & -M_2 \\ M \cos\left(\vartheta + \frac{2}{3}\pi\right) & M \cos(\vartheta) & M \cos\left(\vartheta - \frac{2}{3}\pi\right) & -M_2 & L_2 & -M_2 \\ M \cos\left(\vartheta - \frac{2}{3}\pi\right) & M \cos\left(\vartheta + \frac{2}{3}\pi\right) & M \cos(\vartheta) & -M_2 & -M_2 & L_2 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_u \\ i_v \\ i_w \\ i_K \\ i_L \\ i_M \end{bmatrix} \quad (24)$$



V obecném případě, kdy je úhlová rychlost otáčení motoru proměnná, je nutno tuto soustavu ještě doplnit o rovnici pro vnitřní moment. V případech symetrického napájení bude mít rovnice tvar:

$$M_i = -\frac{3}{2} pM \left((i_u i_K + i_v i_L) \sin \vartheta - i_u i_L \sin \left(\vartheta - \frac{2}{3} \pi \right) - i_v i_K \sin \left(\vartheta + \frac{2}{3} \pi \right) \right) \quad (25)$$

V případech, kdy není symetrické napájení (vlivem přerušení fáze apod.) je výhodnější počítat moment zvlášť pro vlivy jednotlivých proudů následovně:

$$M_i = M_{i1} + M_{i2} + M_{i3} \quad (26)$$

$$M_{i1} = -\frac{p \cdot M}{2} \left((i_u i_K + i_v i_L) \sin \vartheta - i_u i_L \sin \left(\vartheta - \frac{2}{3} \pi \right) - i_v i_K \sin \left(\vartheta + \frac{2}{3} \pi \right) \right) \quad (27)$$

$$M_{i2} = -\frac{p \cdot M}{2} \left((i_v i_L + i_w i_M) \sin \vartheta - i_v i_M \sin \left(\vartheta - \frac{2}{3} \pi \right) - i_w i_L \sin \left(\vartheta + \frac{2}{3} \pi \right) \right) \quad (28)$$

$$M_{i3} = -\frac{p \cdot M}{2} \left((i_w i_M + i_u i_K) \sin \vartheta - i_w i_K \sin \left(\vartheta - \frac{2}{3} \pi \right) - i_u i_M \sin \left(\vartheta + \frac{2}{3} \pi \right) \right) \quad (29)$$

Obecně opět platí momentová rovnice:

$$M_i = J \frac{d\omega_m}{dt} + M_{mech} \quad (30)$$

3 MATEMATICKÉ MODELY ASYNCHRONNÍHO MOTORU

3.1 Matematický model as. motoru napájeného z napěťového zdroje s uvažováním elektromagnetických dějů

Obecně lze uvažovat as. motor jako nelineární s mnoha parametry. Proto se přijímají zjednodušené předpoklady.

3.2 Matematický model as. motoru bez uvažování nasycení hlavního magnetického obvodu

Zde přijímáme tyto předpoklady:

- stroj je symetrický se sinusově rozloženým vinutím po obvodu stroje s konstantní vzduchovou mezerou
- není připojen nulový vodič
- zanedbáme ztráty v železe
- odpory a indukčnosti ve všech fázích jsou konstantní
- činný odpor a indukčnost napájecího zařízení se zanedbá [3]

Uvažujeme běžný třífázový stator, rotor v provedení nakrátko nebo vinutý s kroužky. Napěťové rovnice pro okamžité hodnoty:

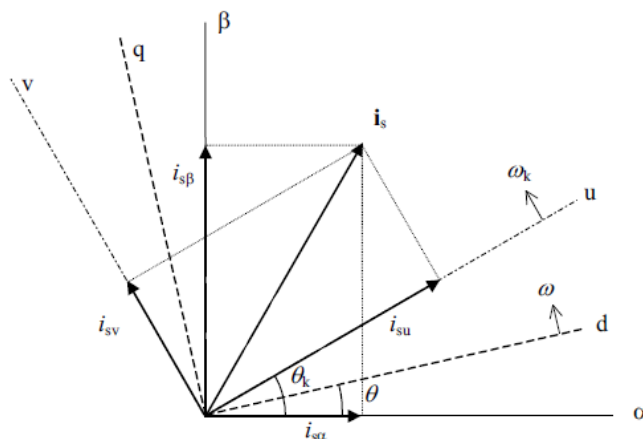
$$u_k = R_k i_k + \frac{d\psi_k}{dt} \quad (31)$$

$$\psi_a = L_{sa} i_a - M_s i_b - M_s i_c + M_{sr} \cos \nu i_A + M_{sr} \cos \nu(\nu - 2\pi/3) i_B + M_{sr} \cos \nu(\nu + 2\pi/3) i_C \quad (32)$$

Pro zjednodušení modelu motoru aplikujeme metodu lineární, Parkovy transformace trojfázové soustavy na ekvivalentní dvojfázovou pomocí prostorových vektorů. Tím odstraníme závislost koeficientů na úhlu natočení rotoru. [3]

Platí:

$$i_a + i_b + i_c = 0 \text{ a } u_a + u_b + u_c = 0 \quad (33)$$



Obrázek 2: Prostorový vektor proudu v souřadných řadách [3]



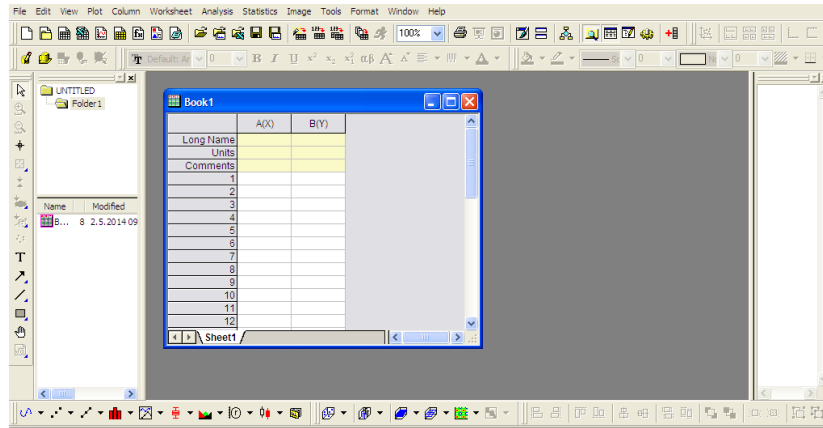
Tabulka 1: Porovnání souřadných soustav [3]

| Komplexní rovina | Úhlová rychlost | Označení os | Název souřadné soustavy | Příklad použití |
|------------------|-----------------|-----------------|---------------------------------------|--|
| s | 0 | α, β | spojený se statorem | při simulaci v časové oblasti dostáváme skutečné průběhy veličin – zkoumání neharmonického napájení motoru z měniče kmitočtu |
| p | ω_s | x, y | spojený s magnet. polem | při harmonickém napájení se střídavé veličiny zobrazují jako stejnosměrné – zkoumání přechodových dějů motoru jako členu regulačního systému |
| r | ω | d, q | spojený s rotorem | při zkoumání motoru zapojeného do kaskády, tj. při dalším zpracování veličin rotoru |
| k | ω_k | u, v | rotující všeobecnou úhlovou rychlostí | při vysvětlování, když se neklade důraz na žádný ze souřadnicových systémů |

4 ORIGINLAB, MATLAB

4.1 OriginLab

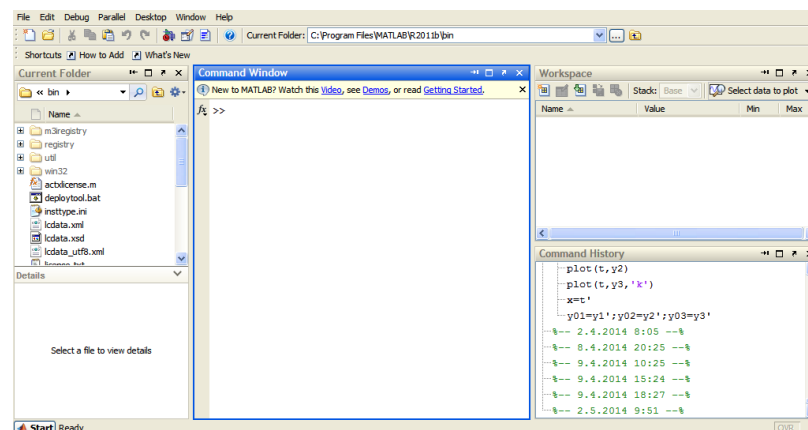
Software pro vizualizaci dat, analýzu dat a tvorbě grafů. Je možné vytvářet vektorové, ternární, vrstevnicové grafy. Dále je možné importovat velkou škálu souborů (ASCII, CSV, EXCEL, MATLAB, TDM, TDMS atd.)



Obrázek 3: Prostředí OriginPro

4.2 Matlab

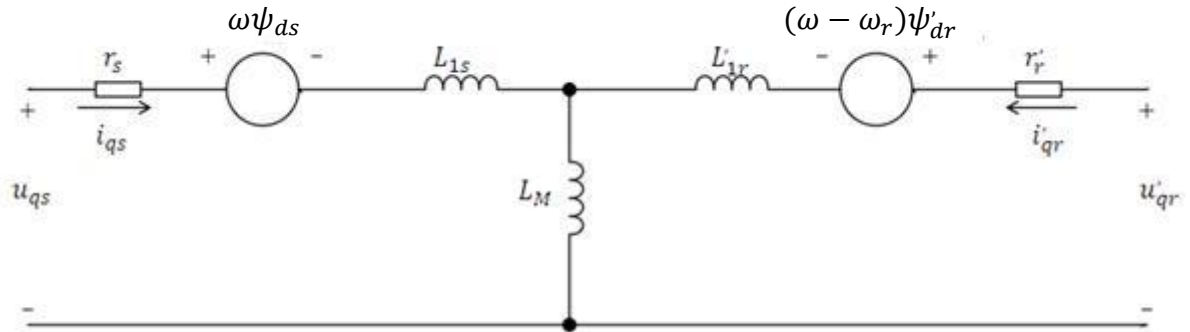
Je integrované prostředí pro vědeckotechnické výpočty, modelování, návrhy algoritmů, simulace, analýzu a prezentaci dat, paralelní výpočty, měření a zpracování signálů, návrhy řídicích a komunikačních systémů. MATLAB je nástroj jak pro pohodlnou interaktivní práci, tak pro vývoj širokého spektra aplikací.



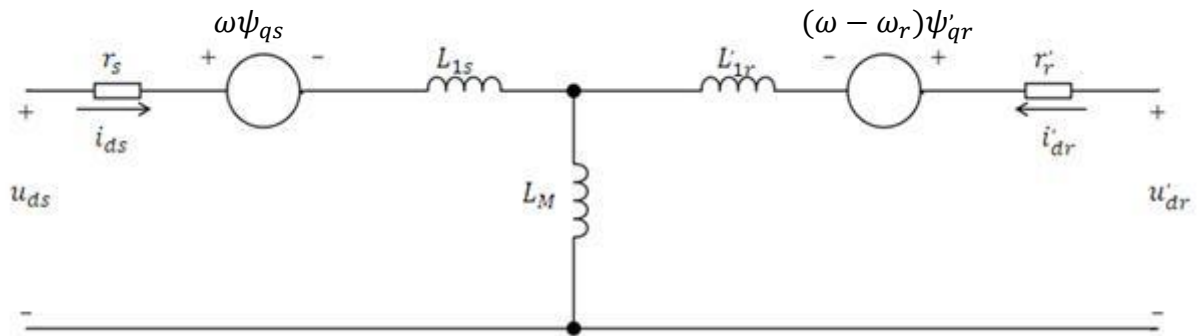
Obrázek 4: Prostředí Matlab

5 MODEL ASYNCHRONNÍHO MOTORU V MATLABU

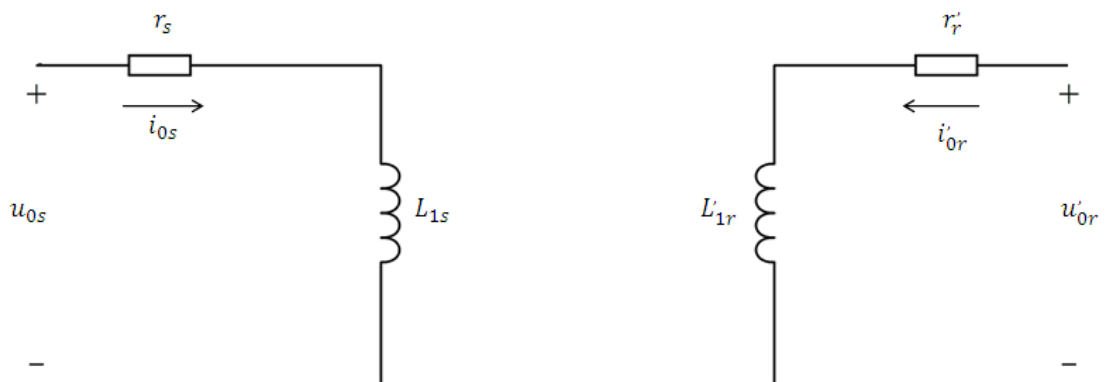
Obvodové modely pro souřadnicové systémy dq symetrického asynchronního motoru



Obrázek 5: Obvodový model vztažený na osu q [4]



Obrázek 6: Obvodový model vztažený pro osu d [4]



Obrázek 7: Zjednodušený model [4]



Napěťové rovnice:

$$u_{qs} = r_s i_{qs} + \omega \Psi_{ds} + p \Psi_{qs} \quad (34)$$

$$u_{ds} = r_s i_{ds} - \omega \Psi_{qs} + p \Psi_{ds} \quad (35)$$

$$u_{0s} = r_s i_{0s} + p \Psi_{ds} \quad (36)$$

$$u'_{qr} = r'_r i'_{qr} + (\omega - \omega_r) \Psi'_{dr} + p \Psi'_{qr} \quad (37)$$

$$u'_{dr} = r'_r i'_{dr} - (\omega - \omega_r) \Psi'_{qr} + p \Psi'_{dr} \quad (38)$$

$$u'_{0r} = r'_r i'_{0r} + p \Psi'_{0r} \quad (39)$$

Rovnice pro magnetické toky:

$$\Psi_{qs} = L_{1s} i_{qs} + L_M (i_{qs} + i'_{qr}) \quad (40)$$

$$\Psi_{ds} = L_{1s} i_{ds} + L_M (i_{ds} + i'_{dr}) \quad (41)$$

$$\Psi_0 = L_{1s} i_{0s} \quad (42)$$

$$\Psi'_{qr} = L'_{1r} i'_{qr} + L_M (i_{qs} + i'_{qr}) \quad (43)$$

$$\Psi'_{dr} = L'_{1r} i'_{dr} + L_M (i_{ds} + i'_{dr}) \quad (44)$$

$$\Psi'_{0r} = L'_{1r} i'_{0r} \quad (45)$$

Protože jsou parametry elektrického stroje uváděny téměř vždy v ohmech nebo procentech, nebo na jednotku základní impedance, je vhodné vyjádřit rovnice spojením napěťových a tokových rovnic. Proto jsou psány ve tvaru:

$$u_{qs} = r_s i_{qs} + \frac{\omega}{\omega_b} \psi_{ds} + \frac{p}{\omega_b} \psi_{qs} \quad (46)$$

$$u_{ds} = r_s i_{ds} + \frac{\omega}{\omega_b} \psi_{qs} + \frac{p}{\omega_b} \psi_{ds} \quad (47)$$

$$u_{0s} = r_s i_{0s} + \frac{p}{\omega_b} \psi_{0s} \quad (48)$$

$$u'_{qr} = r'_r i'_{qr} + \left(\frac{\omega - \omega_r}{\omega_b} \right) \psi'_{dr} + \frac{p}{\omega_b} \psi'_{qr} \quad (49)$$

$$u'_{dr} = r'_r i'_{dr} + \left(\frac{\omega - \omega_r}{\omega_b} \right) \psi'_{qr} + \frac{p}{\omega_b} \psi'_{dr} \quad (50)$$

$$u'_{0r} = r'_r i'_{0r} + \frac{p}{\omega_b} \psi'_{0r} \quad (51)$$

6 ZPRACOVÁNÍ SIGNÁLU

6.1 Fourierova transformace (FFT)

Vyjadřuje časově závislý signál pomocí harmonických signálů. Pracuje ve frekvenční oblasti s časem spojitým nebo diskrétním.

FFT definujeme integrálním vztahem:

$$S(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} s(t)e^{-j\omega t} dt \quad (52)$$

Inverzní FFT:

$$s(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} S(\omega)e^{j\omega t} dt \quad (53)$$

- U Fourierovy transformace odpovídá lineární kombinace signálů k spektru
- Rozšíření signálu v časové oblasti má za následek zúžení spektra
- Amplitudové spektrum posunutého signálu se nemění, mění se fázové spektrum

6.2 Krátkodobá Fourierova transformace a spektrogram

U rozboru nestacionárního signálu v určitém čase t , je vhodné signál rozdělit na dostatečně krátké úseky, u nichž je možné předpokládat stacionaritu a tím potlačit vliv složek signálu v ostatních časech. Toho je dosaženo pomocí okénkové funkce $h(t)$, se středem v čase t , která rozděluje signál ve výše popsaném smyslu [5]:

$$s_t(\tau) = s(\tau)h(\tau - t) \quad (54)$$

Upravený signál je funkce dvou časů (fixovaného t a průběžného τ)

$$s_t(\tau) \sim s(\tau) \quad \text{pro } \tau \text{ blízke } t$$

$$s_t(\tau) \sim 0 \quad \text{pro } \tau \text{ vzdálené od } t$$

Užitím okénkové funkce pak FT zohlední rozložení frekvence v okolí t

$$s_t(\omega) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int e^{-j\omega\tau} s_t(\tau) d\tau = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int e^{-j\omega\tau} s(\tau)h(\tau - t) d\tau \quad (55)$$

Spektrum hustoty v čase je:

$$P_{SP}(t, \omega) = |s_t(\omega)|^2 = \left| \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int e^{-j\omega\tau} s(\tau)h(\tau - t) d\tau \right|^2 \quad (56)$$

Signál byl modifikován a zkrácen na okolí času t a jedná se o **krátkodobou Fourierovu transformaci STFT (short-time Fourier transform)**.

6.3 Wavelet transformace

Je druh transformace, která taktéž rozkládá signál do frekvenčních složek (jako Fourierova transformace) s tím rozdílem, že se v rozkladu nepoužívají harmonické signály ale množinu tzv. ortonormálních funkcí (báze kde jsou všechny vektory ortonormální). Tyto funkce jsou generovány posouváním a roztahováním základního tzv. maticního waveletu, označovaného jako Ψ . Posunutí waveletu b a jeho roztažení a se řídí následujícím předpisem [5]:

$$\psi_{a,b}(t) = \frac{1}{\sqrt{|a|}} \psi\left(\frac{t-b}{a}\right) \quad (57)$$

Wavelet transformace:

$$W(a, b, s, \Psi) = \frac{1}{\sqrt{|a|}} \int_{-\infty}^{\infty} s(t) \Psi\left(\frac{t-b}{a}\right) dt \quad (58)$$

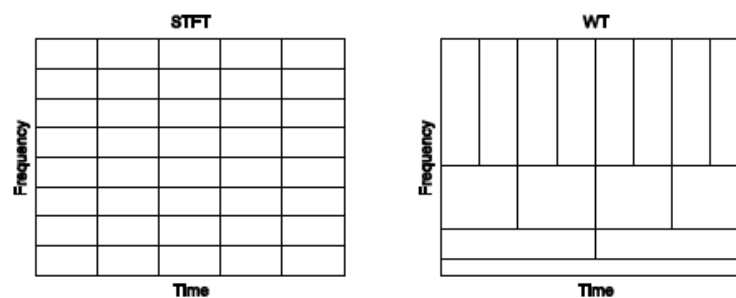
ψ - maticní waveletová funkce

a - koeficient roztažení

b – posun počátku

$1/a$ – frekvenční měřítko

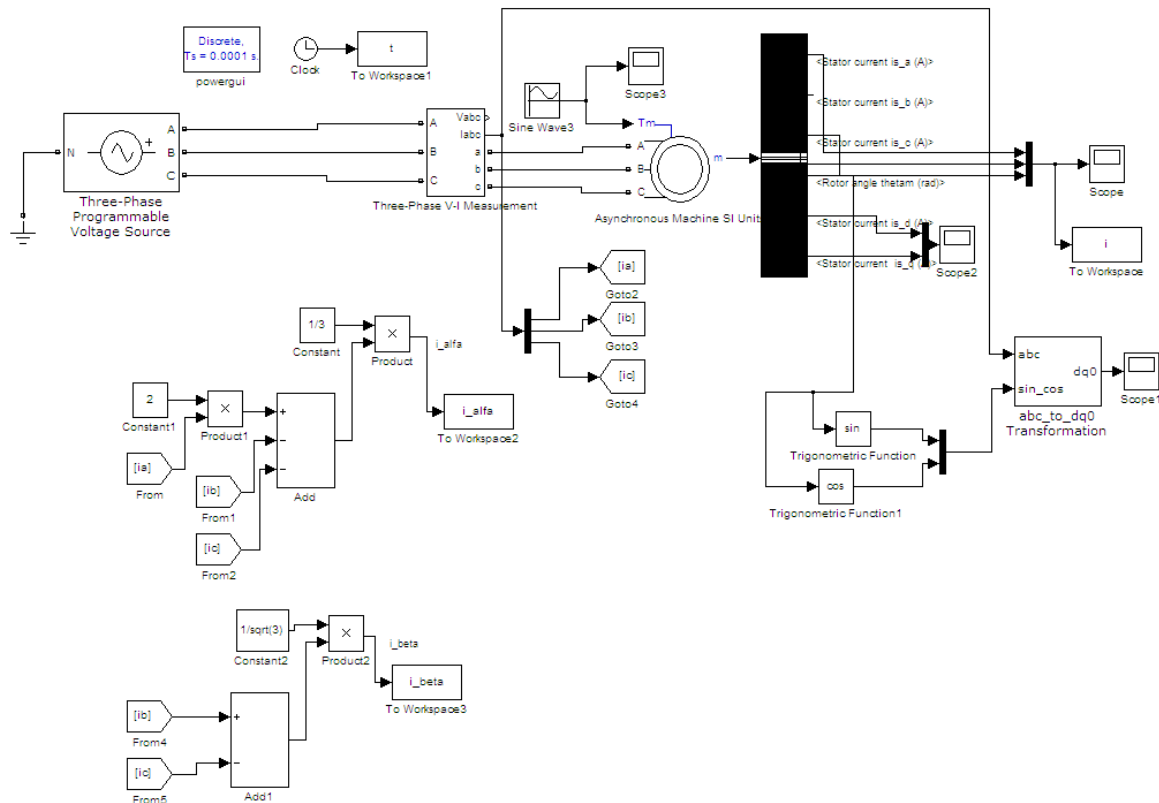
Pomocí wavelet transformace lze získat přesné informace o změnách chování signálu ve vyšších frekvencích (na úkor frekvenčního rozložení). Wavelet transformace totiž používá okno proměnné délky, kde se nachází stále jedna vlnka. U Fourierovy transformace má okno konstantní délku a pro vyšší frekvence je v okně obsaženo více period harmonické funkce. Pro zjednodušení byla v našem případě použita krátká Fourierova transformace (STFT).



Obrázek 8: Rozdělení v časo-frekvenční rovině STFT a Wavelet [5]

7 SIMULACE

V prostřední Matlab Simulink byl sestaven model třífázového asynchronního motoru. Perioda T_s byla zvolena $1e^{-4}$ s. Na asynchronním stroji byl nastavován moment setrvačnosti J a na budícím sinusovém zdroji byla měněna frekvence f . Poté jako buzení byl importován moment z reálné části měření. Výsledkem simulace jsou průběhy třífázových statorových proudů.



Obrázek 9: Model asynchronního motoru v Simulinku

V simulaci byly použity dva druhy modelu motorů a dvě frekvence buzení $f=10\text{Hz}$, $f=50\text{Hz}$. Poté se použil jako zdroj buzení moment, který byl importován z reálného měření pro $Q=101$ a $f=10\text{Hz}$.

Parametry motorů:

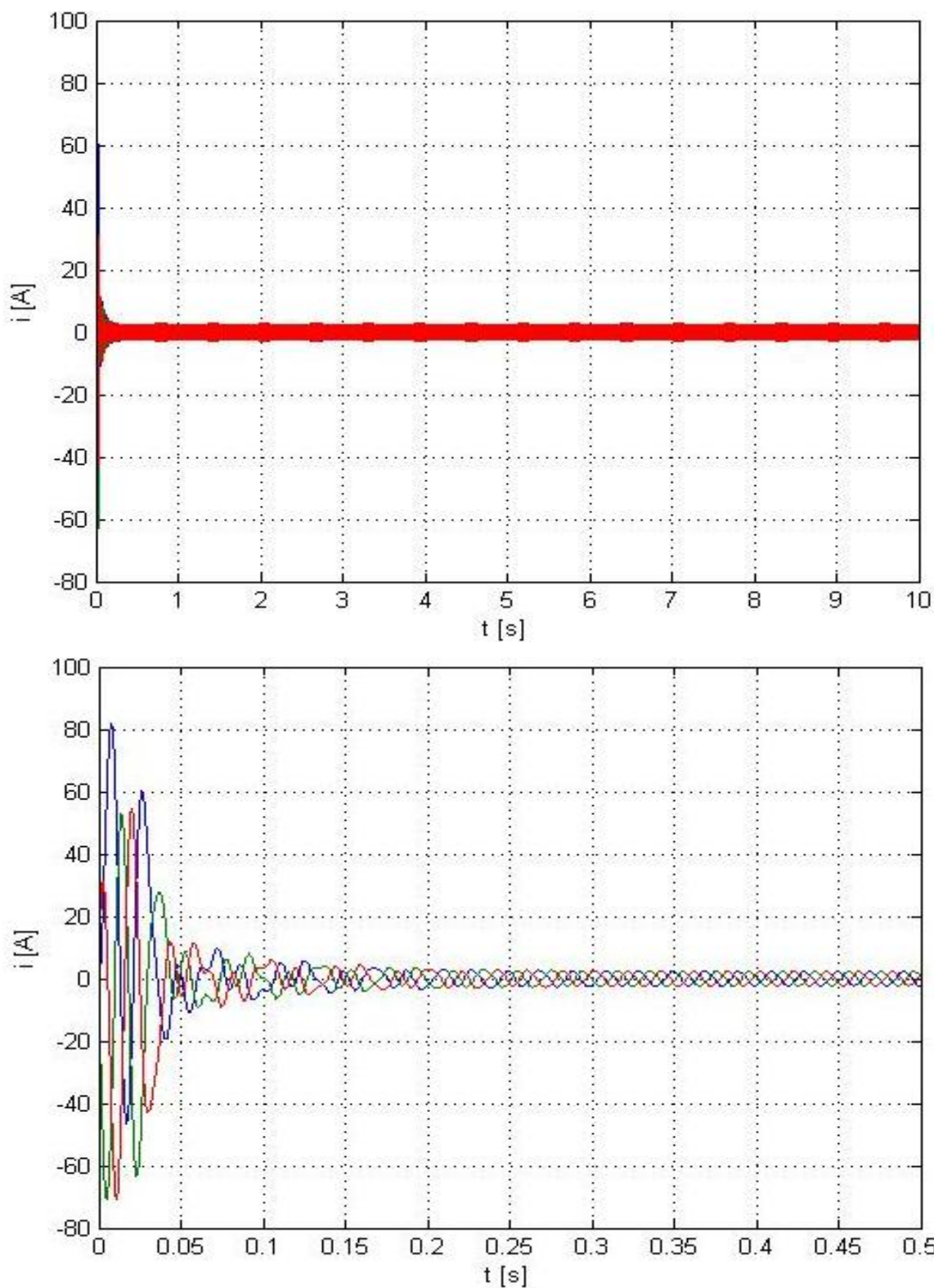
Motor 1

$P=4\text{kW}$; $U=400\text{V}$; $f=50\text{Hz}$; $n=1430\text{min}^{-1}$; $R_s=1,405\Omega$; $L_s=0,005839\text{H}$; $R_r=1,395\Omega$; $L_r=0,005849\text{H}$; $L_m=0,1722\text{H}$; $J=0,0131\text{kg}\cdot\text{m}^2$

Motor 2

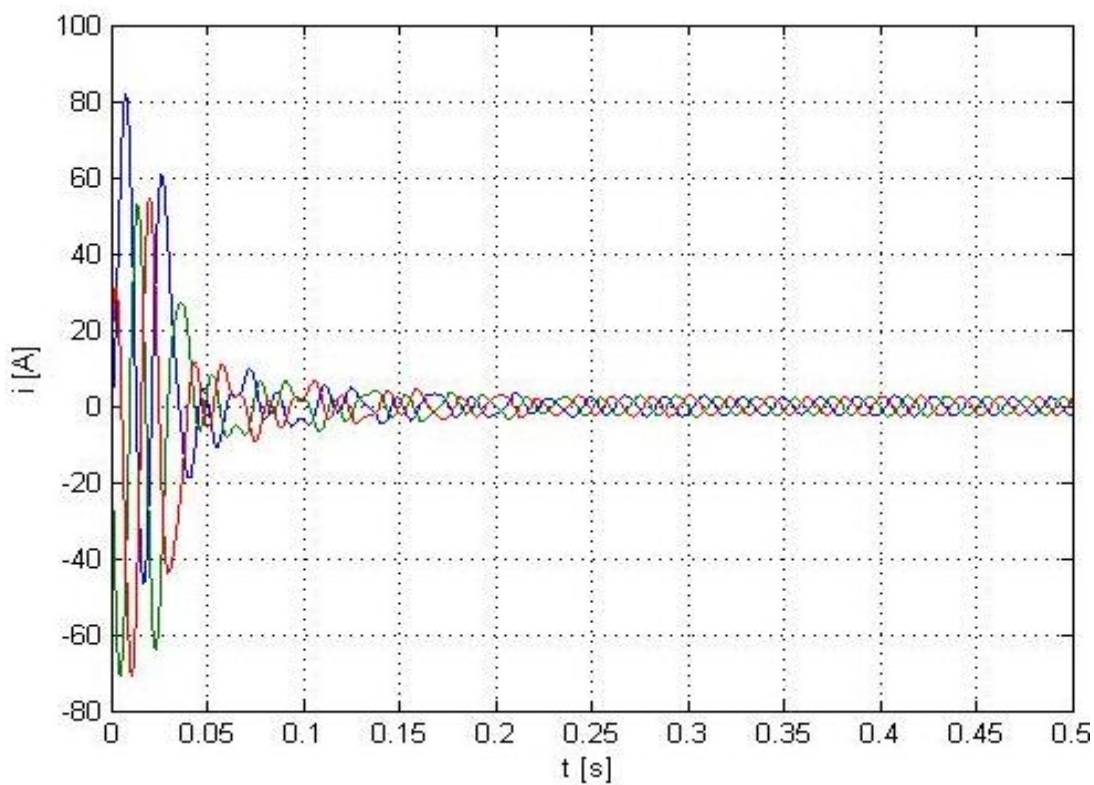
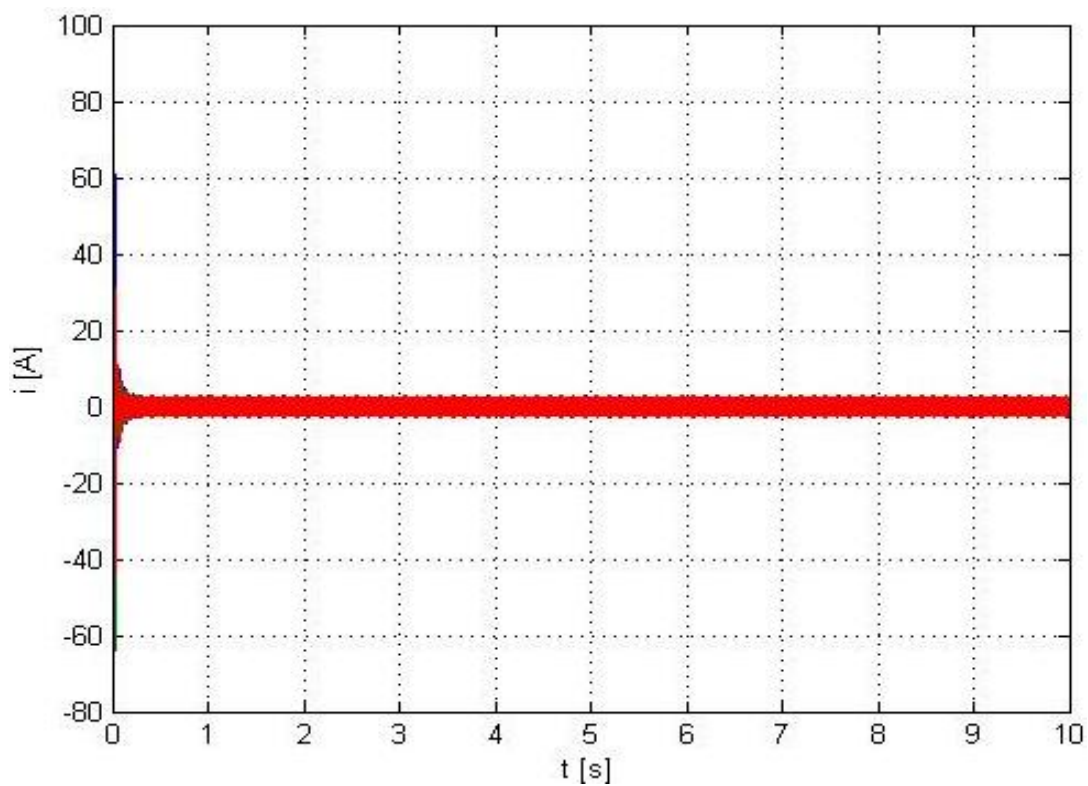
$P=4\text{kW}$; $U=400\text{V}$; $f=50\text{Hz}$; $n=1430\text{min}^{-1}$; $R_s=1,405\Omega$; $L_s=0,005839\text{H}$; $R_r=1,395\Omega$; $L_r=0,005849\text{H}$; $L_m=0,1722\text{H}$; $J=0,0050\text{kg}\cdot\text{m}^2$

Buzení frekvencí pro model motoru 1:



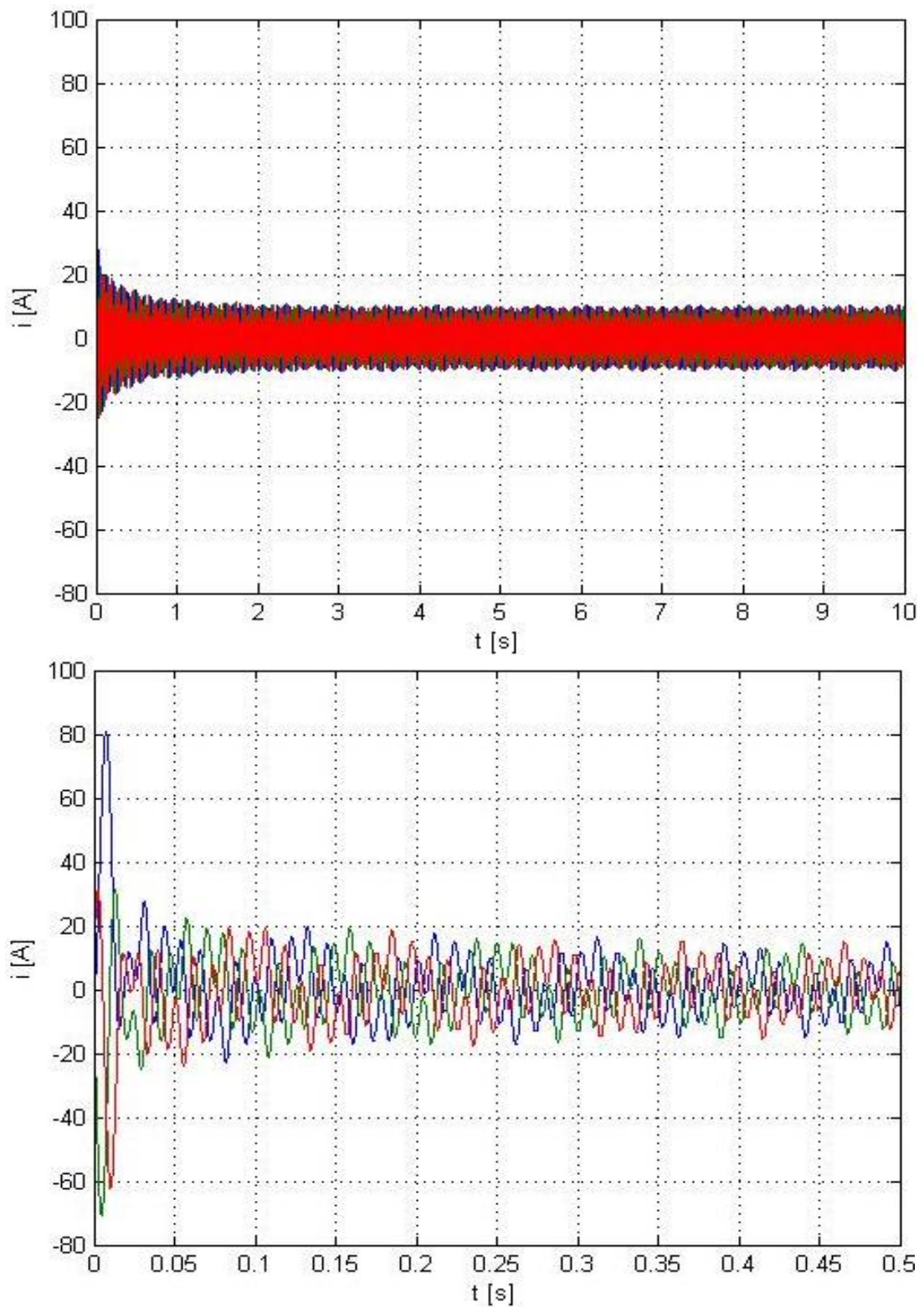
Obrázek 10: Grafy závislosti proudu na čase pro buzení $f=10\text{Hz}$, motor 1

Buzení frekvencí pro model motoru 1:



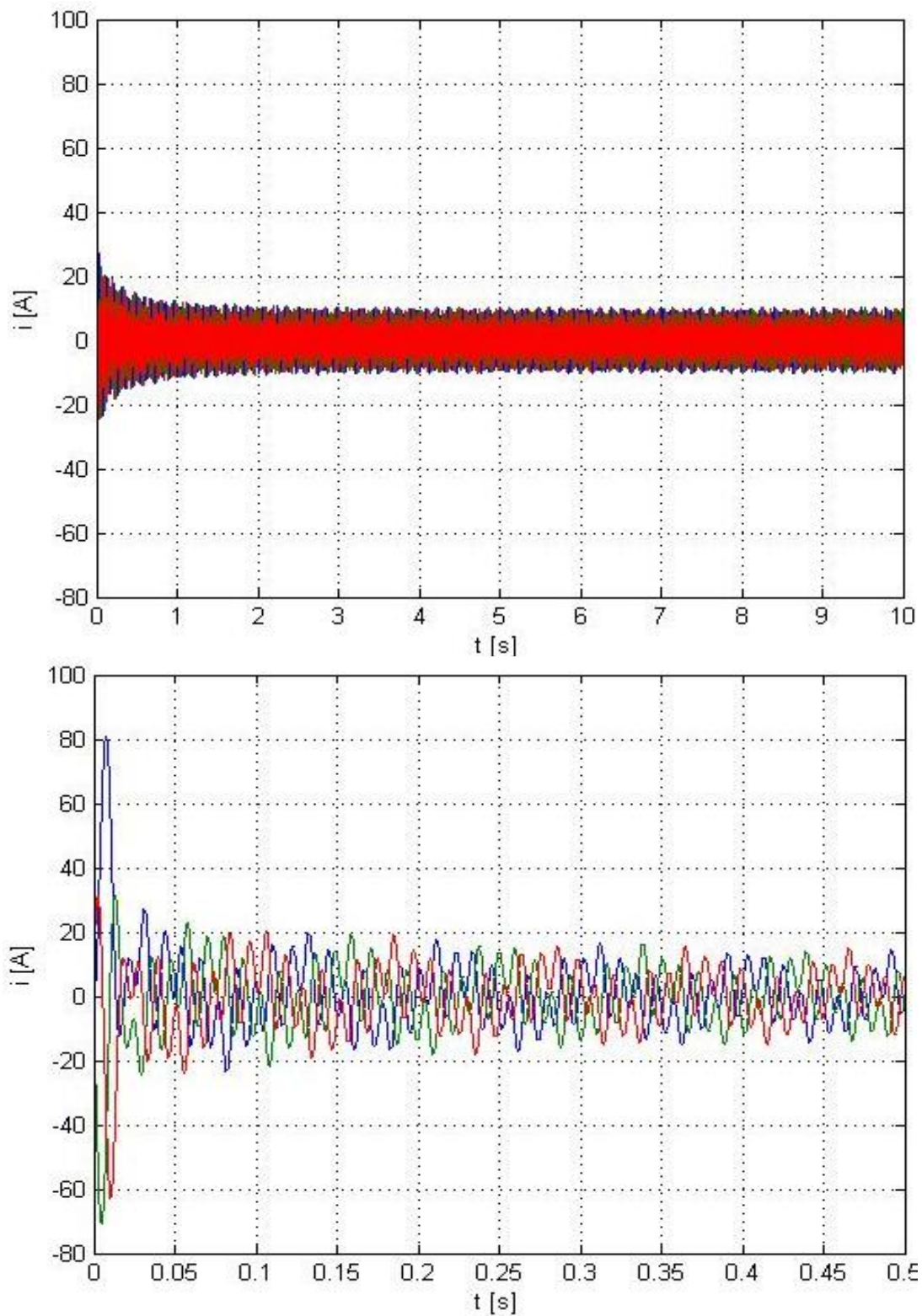
Obrázek 11: Grafy závislosti proudu na čase pro buzení $f=50\text{Hz}$, motor 1

Buzení frekvencí pro model motoru 2:



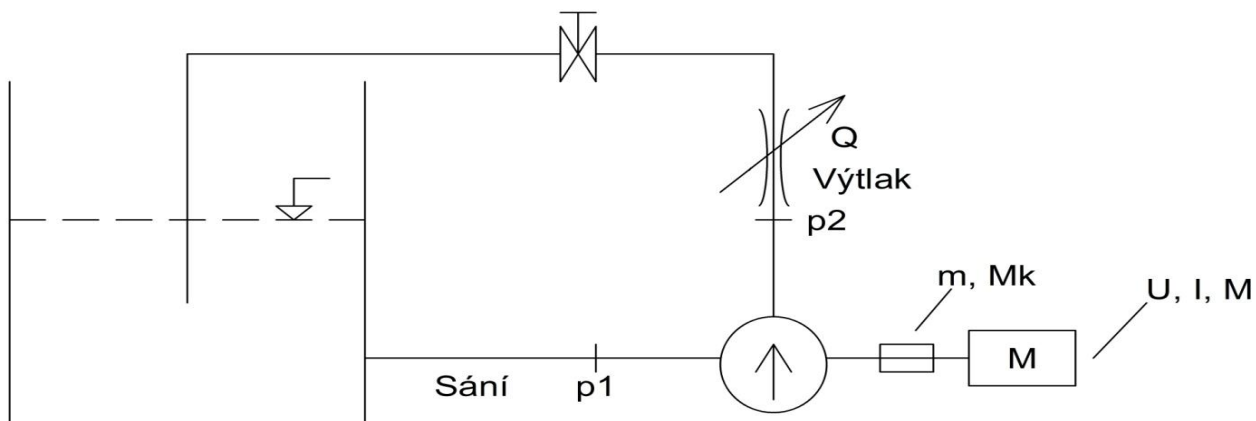
Obrázek 12: Grafy závislosti proudu na čase probuzení $f=10\text{Hz}$, motor 2

Buzení frekvencí pro model motoru 2:

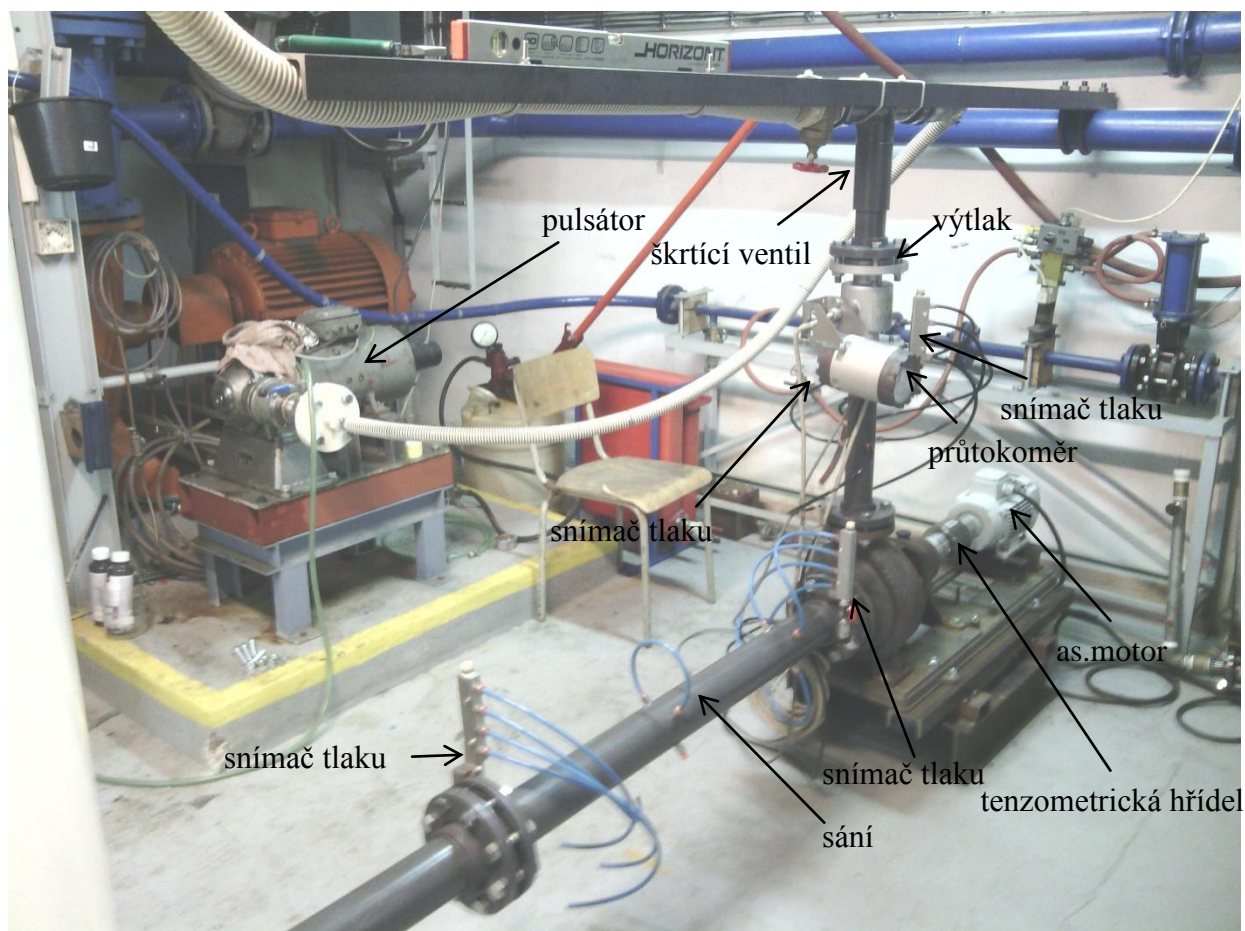


Obrázek 13: Grafy závislosti proudu na čase probuzení $f=50\text{Hz}$, motor 2

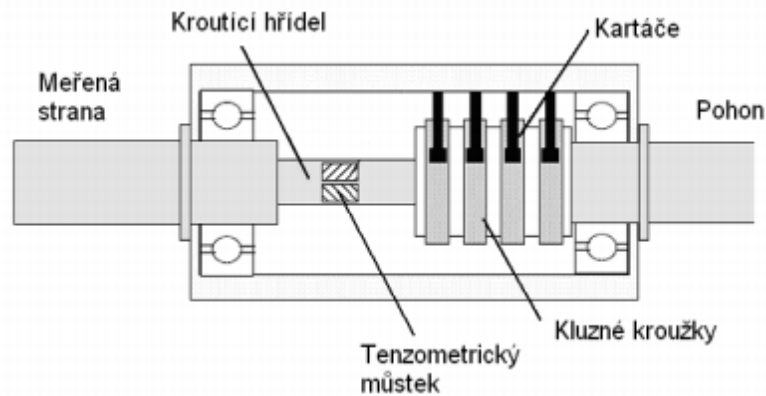
8 MĚŘENÍ



Obrázek 14: Schéma zapojení pracoviště



Obrázek 15: Pohled na zapojené pracoviště



Obrázek 16: Měřicí tenzometrická hřídel [7]

Analýza průtoku z měření elektrických veličin na motoru

Měřicí trať:

Měřicí trať je složena ze sací nádrže, která slouží jako zásobník kapaliny a má vliv na tlumení tlakových pulsací v měřicí trati. Dále sací a výtlačného potrubí DN 80, a DN 50, měřeného čerpadla, průtokoměru, regulačního uzávěru SV. Měření bylo prováděno při plném a polovičním zdvihu pulsátoru a bez použití pulsátoru. Pulsátor nám sloužil jako zdroj tlakových pulsací.

Měřené veličiny:

| | | |
|-------|-----------------------------------|-------|
| p_1 | tlak před sacím hrdlem čerpadla | kPa |
| p_2 | tlak za výtlačným hrdlem čerpadla | kPa |
| Q | průtok | l/s |
| M_k | moment elektromotoru čerpadla | N.m |
| n | otáčky čerpadla | 1/min |

Použitá technika:

- Čerpadlo BETA 12YC; asynchronní motor TM90-4xBC; 2,2kW; 400/230V; 50Hz; 1400ot/min; 9,5A; $\cos\varphi=0,83$; v.č.00296776
- Tenzometrická hřídel KTR, DATAFLEX 22/20, rozsah: $\pm 20\text{Nm}$
- Snímač tlaku DMP 331, výrobce BD SENSORS s. r. o. Uh. Hradiště, měřicí rozsah 0-4bar abs., přesnost $\pm 0,25\%$, proudový výstup 0 – 20 mA, $U_b=14-36\text{V DC}$
- Snímač tlaku DMP 331, výrobce BD SENSORS s. r. o. Uh. Hradiště, měřicí rozsah 0-2,5bar abs., přesnost $\pm 0,25\%$, proudový výstup 0 – 20 mA, $U_b=14-36\text{V DC}$
- Snímač tlaku DMP 331, výrobce BD SENSORS s. r. o. Uh. Hradiště, měřicí rozsah 0-6bar abs., přesnost $\pm 0,25\%$, proudový výstup 0 – 20 mA, $U_b=14-36\text{V DC}$



- Snímač tlaku DMP 331, výrobce BD SENSORS s. r. o. Uh. Hradiště, měřicí rozsah 0-10bar abs., přesnost $\pm 0,25 \%$, proudový výstup 0 – 20 mA, $U_b=14-36V$ DC
- Průtokoměr MQI 99-SN; 85-260V, 50Hz; 150 mA, IP67, 1,6MPa, $Q_{max}=10$ l/s; v.č.09739
- Převodník Dewetron Dewe 30-8; 8 slotů; 115/230V_{AC}; výstup $\pm 5V$; v.č 52130599-CZE
- Měřicí karta National instruments NI – 9215, NI - 9222
- 3x klešťový ampérmetr 1146 Agilent; E3N 10A/1V; 100/1V

Počítané veličiny:

| | | |
|---------------|----------------------------|------|
| Y | měrná energie čerpadla | J/kg |
| $P_{\dot{r}}$ | příkon čerpadla na hřídeli | W |
| η | účinnost čerpadla | % |

Vztahy:

Rozměry potrubí:

Sání - DN80 (světlost potrubí $D_1=76,6$ mm)

Výtlač - DN50 (světlost potrubí $D_2=53,6$ mm)

Při zpracování naměřených hodnot bylo provedeno:

- Výpočet měrné energie čerpadla v měřených pracovních bodech podle vztahu:

$$Y = \frac{p_2 - p_1}{\rho} + \frac{c_2^2 - c_1^2}{2} + g \cdot h = \frac{p_2 - p_s}{\rho} + \frac{Q^2}{2} \cdot \left(\frac{1}{S_2^2} - \frac{1}{S_1^2} \right) + g \cdot h \quad (59)$$

$$S_1 = \frac{\pi \cdot D_1^2}{4}$$

$$S_2 = \frac{\pi \cdot D_2^2}{4}$$

$$\rho = 998,942 \text{ kg} \cdot \text{m}^3$$

$$g = 9,81 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$$

$$h = 0,42 \text{ m} - \text{rozdílová výška snímaču tlaků}$$

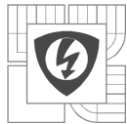
- výpočet příkonu čerpadla:

$$P_{\dot{r}} = M_k \cdot 2\pi \cdot n \quad (60)$$

- výpočet účinnosti čerpadla:

$$\eta = \frac{\rho \cdot Q \cdot Y}{P} \quad (61)$$

U postupu zpracování výsledků bylo čerpáno z [6]

**Zpracování průtokové charakteristiky:**

1. Ve všech měřených průtocích vypočítat měrnou energii čerpadla
2. Ve všech měřených průtocích vypočítat účinnost čerpadla.
3. Graficky znázornit závislosti $Y=f(Q)$, $\eta=f(Q)$, $P_{\dot{r}}=f(Q)$.

Tabulka:*Tabulka 2: Tabulka hodnot veličin čerpadla*

| | M_k | Q | p_1 | p_{1k} | p_2 | p_{2k} | n | Y | $P_{\dot{r}}$ | η |
|-------|--------|--------|---------|----------|---------|----------|----------------------|--------|---------------|--------|
| | [N.m] | [l/s] | [kPa] | [kPa] | [kPa] | [kPa] | [min ⁻¹] | [J/Kg] | [W] | [%] |
| bod1 | 5,196 | 0,0001 | 106,624 | 107,45 | 246,527 | 248,534 | 1449,949 | 145,35 | 788,92 | 0,00 |
| bod2 | 5,745 | 1,021 | 106,255 | 106,434 | 246,888 | 248,333 | 1448,732 | 146,25 | 871,59 | 17,12 |
| bod3 | 6,237 | 1,941 | 106,038 | 106,022 | 247,299 | 247,659 | 1447,29 | 146,19 | 945,26 | 29,98 |
| bod4 | 6,872 | 3,001 | 105,65 | 105,611 | 246,821 | 247,543 | 1445,026 | 146,88 | 1039,87 | 42,34 |
| bod5 | 7,521 | 3,998 | 104,988 | 104,889 | 245,036 | 247,177 | 1442,908 | 146,75 | 1136,49 | 51,58 |
| bod6 | 8,214 | 5,006 | 104,6 | 104,419 | 242,819 | 245,008 | 1441,087 | 146,73 | 1239,51 | 59,20 |
| bod7 | 8,85 | 5,928 | 103,937 | 103,709 | 239,527 | 241,803 | 1428,681 | 144,98 | 1324,04 | 64,84 |
| bod8 | 9,431 | 6,864 | 103,363 | 103,041 | 235,907 | 238,273 | 1417,185 | 143,01 | 1399,65 | 70,06 |
| bod9 | 10,135 | 7,955 | 102,259 | 101,775 | 230,623 | 233,075 | 1414,894 | 140,28 | 1501,65 | 74,24 |
| bod10 | 10,729 | 8,883 | 101,169 | 100,589 | 224,435 | 226,971 | 1411,919 | 136,53 | 1586,41 | 76,37 |
| bod11 | 11,367 | 9,909 | 99,922 | 99,195 | 216,635 | 219,284 | 1399,793 | 131,67 | 1666,19 | 78,22 |
| bod12 | 11,933 | 10,952 | 98,61 | 97,725 | 207,645 | 210,537 | 1393,417 | 126,01 | 1741,20 | 79,17 |
| bod13 | 12,513 | 11,909 | 98,816 | 98,046 | 200,351 | 203,583 | 1392,708 | 120,36 | 1824,94 | 78,46 |
| bod14 | 13,141 | 13,076 | 96,95 | 96,025 | 188,672 | 192,05 | 1391,996 | 113,01 | 1915,57 | 77,06 |

M_k – moment elektromotoru čerpadla

Q – průtok

p_1 - první tlak sání

p_{1k} - tlak kolektor sání

p_2 - první výtlak

p_{2k} - kolektor výtlak

n – otáčky čerpadla



Příklad výpočtu pro poslední řádek tabulky 2:

$$Y = \frac{P_2 - P_1}{\rho} + \frac{c_2^2 - c_1^2}{2} + g \cdot h = \frac{P_{2k} - P_{1k}}{\rho} + \frac{Q^2}{2} \cdot \left(\frac{1}{S_2^2} - \frac{1}{S_1^2} \right) + g \cdot h$$

$$S_1 = \frac{\pi \cdot D_1^2}{4} = \frac{\pi \cdot (76,6 \cdot 10^{-3})^2}{4} = 4,608 \cdot 10^{-3} m^2$$

$$S_2 = \frac{\pi \cdot D_2^2}{4} = \frac{\pi \cdot (53,6 \cdot 10^{-3})^2}{4} = 2,256 \cdot 10^{-3} m^2$$

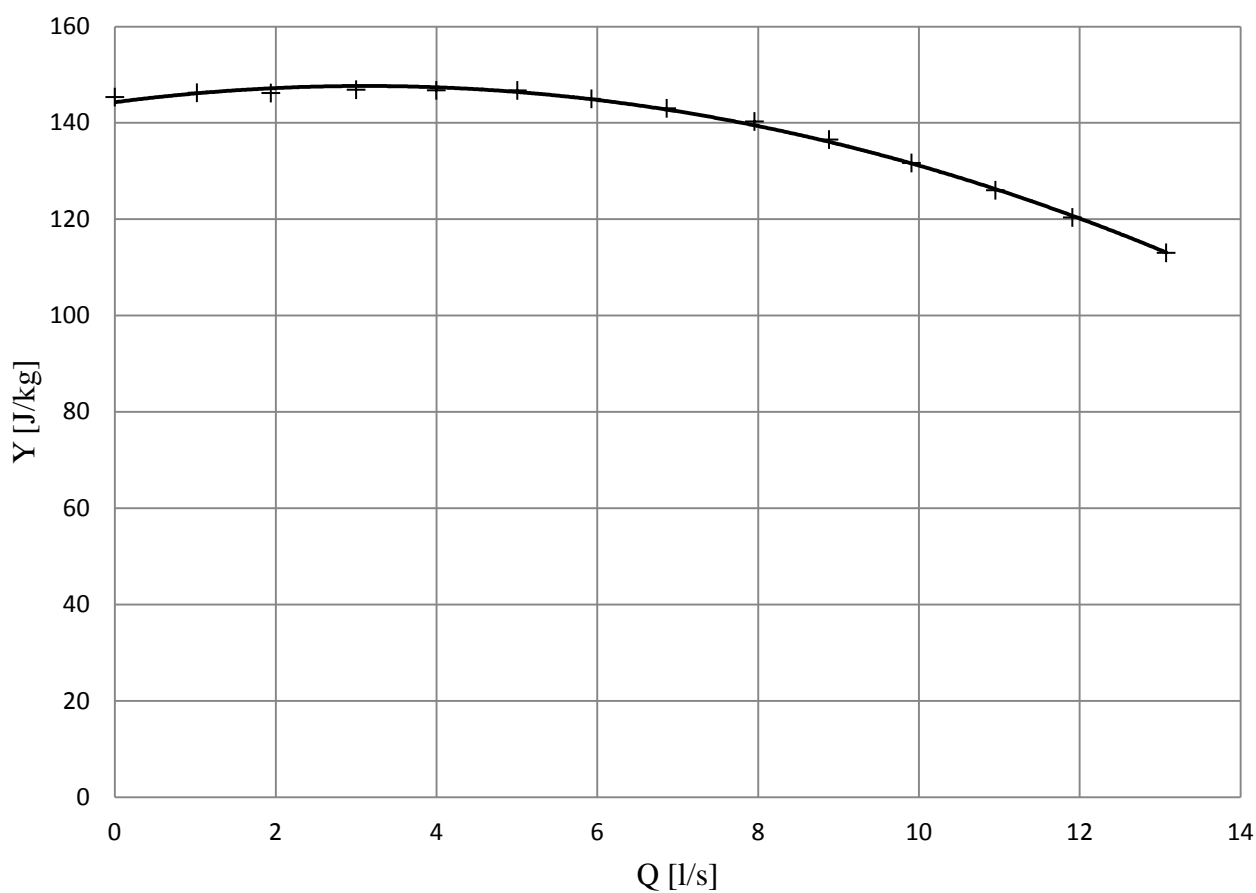
$$Q = 13,075644 \text{ l/s} = 1,31 \cdot 10^{-2} m^3/s$$

$$Y = \frac{192,05 \cdot 10^3 - 96,0248 \cdot 10^3}{998,942} + \frac{(1,31 \cdot 10^{-2})^2}{2} \cdot \left(\frac{1}{(2,256 \cdot 10^{-3})^2} - \frac{1}{(4,608 \cdot 10^{-3})^2} \right) + 9,81 \cdot 0,42 = \mathbf{113,011 J/Kg}$$

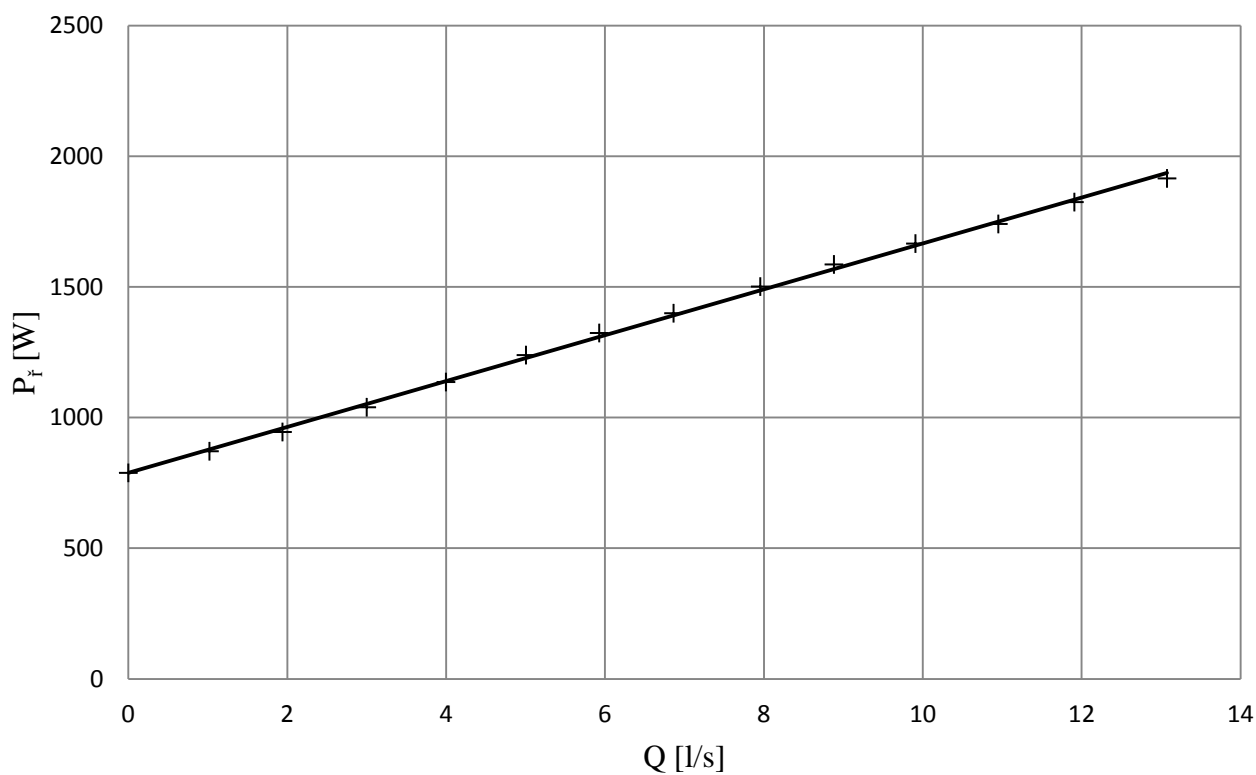
$$P_{\dot{r}} = M_k \cdot 2 \cdot \pi \cdot n = 13,141 \cdot 2 \cdot \pi \cdot \left(\frac{1391,996}{60} \right) = \mathbf{1915,56 W}$$

$$\eta = \frac{\rho \cdot Q \cdot Y}{P_{\dot{r}}} = \frac{998,942 \cdot 1,31 \cdot 10^{-2} \cdot 113,011}{1915,56} = 0,772$$

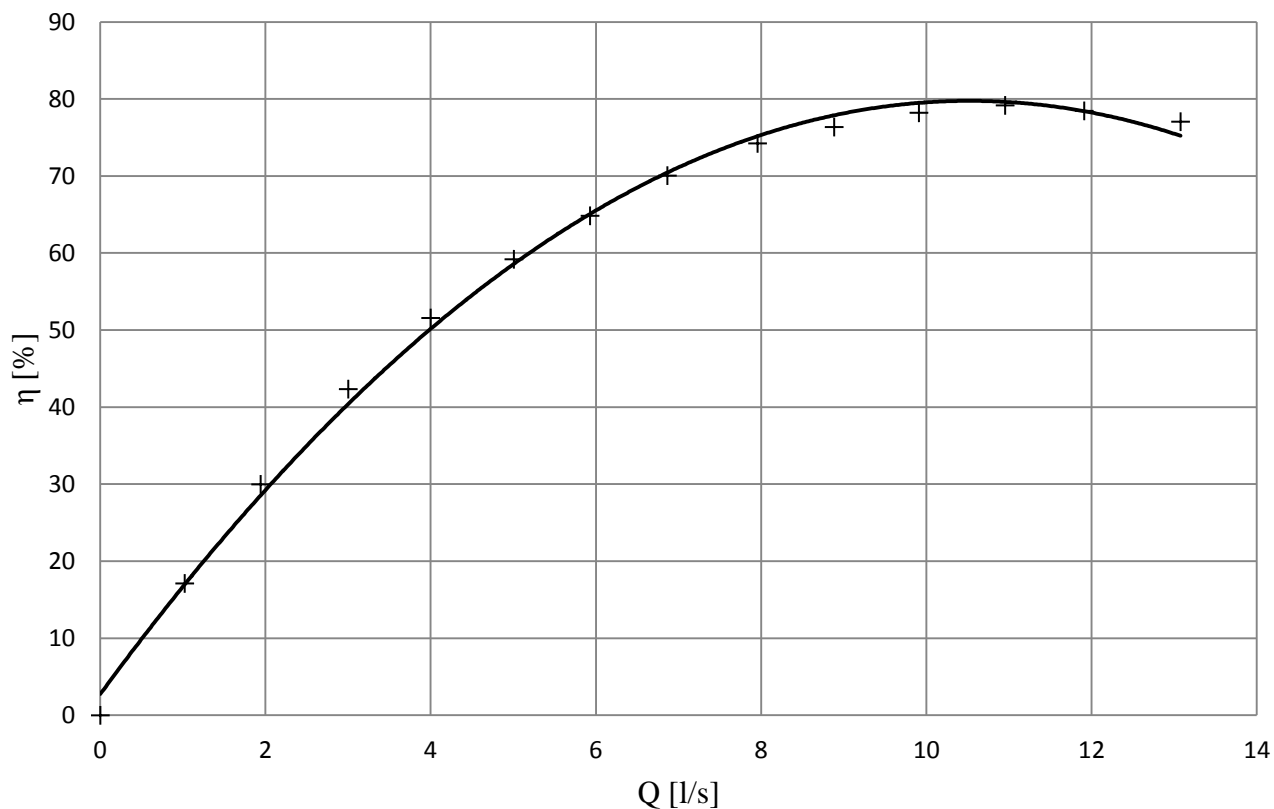
$$\eta = 0,772 \cdot 100 = \mathbf{77,2\%}$$



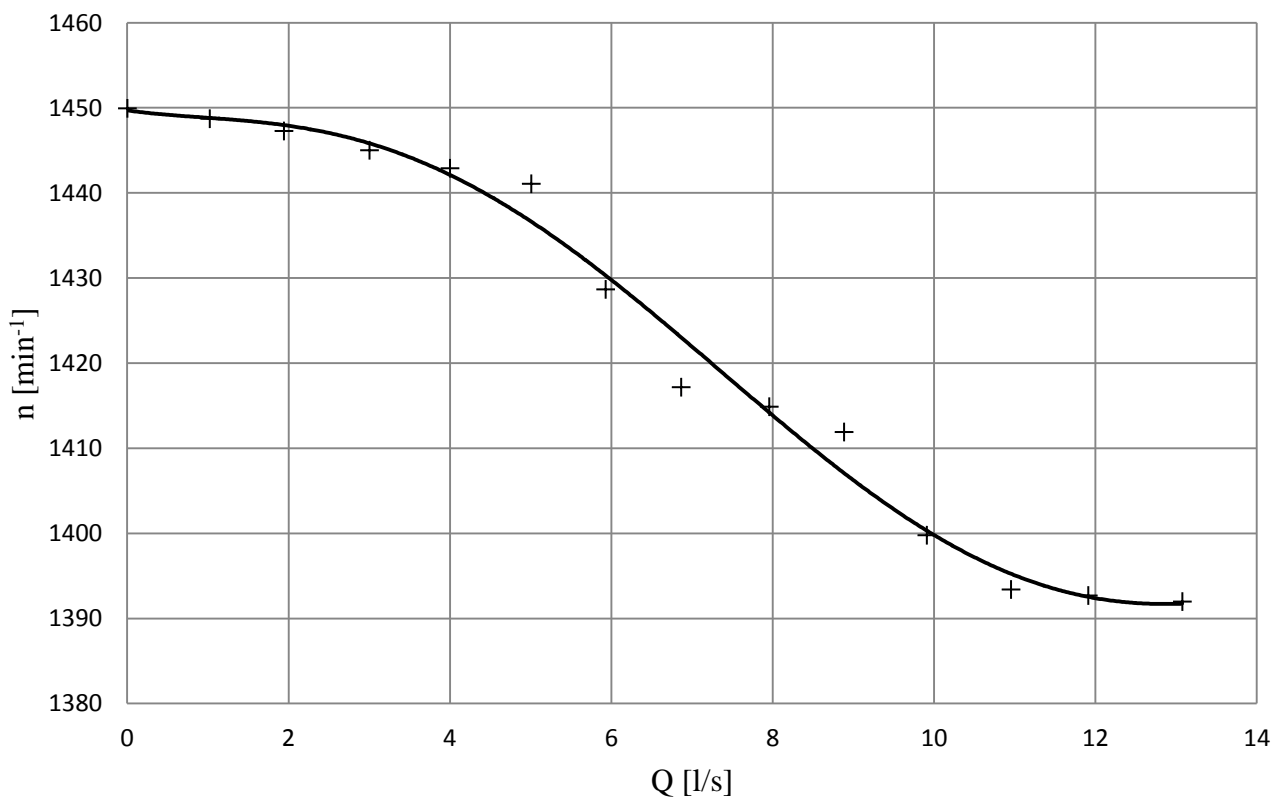
Obrázek 17: Graf závislosti měrné energie čerpadla na průtoku



Obrázek 18: Graf závislosti příkonu čerpadla na hřídeli na průtoku

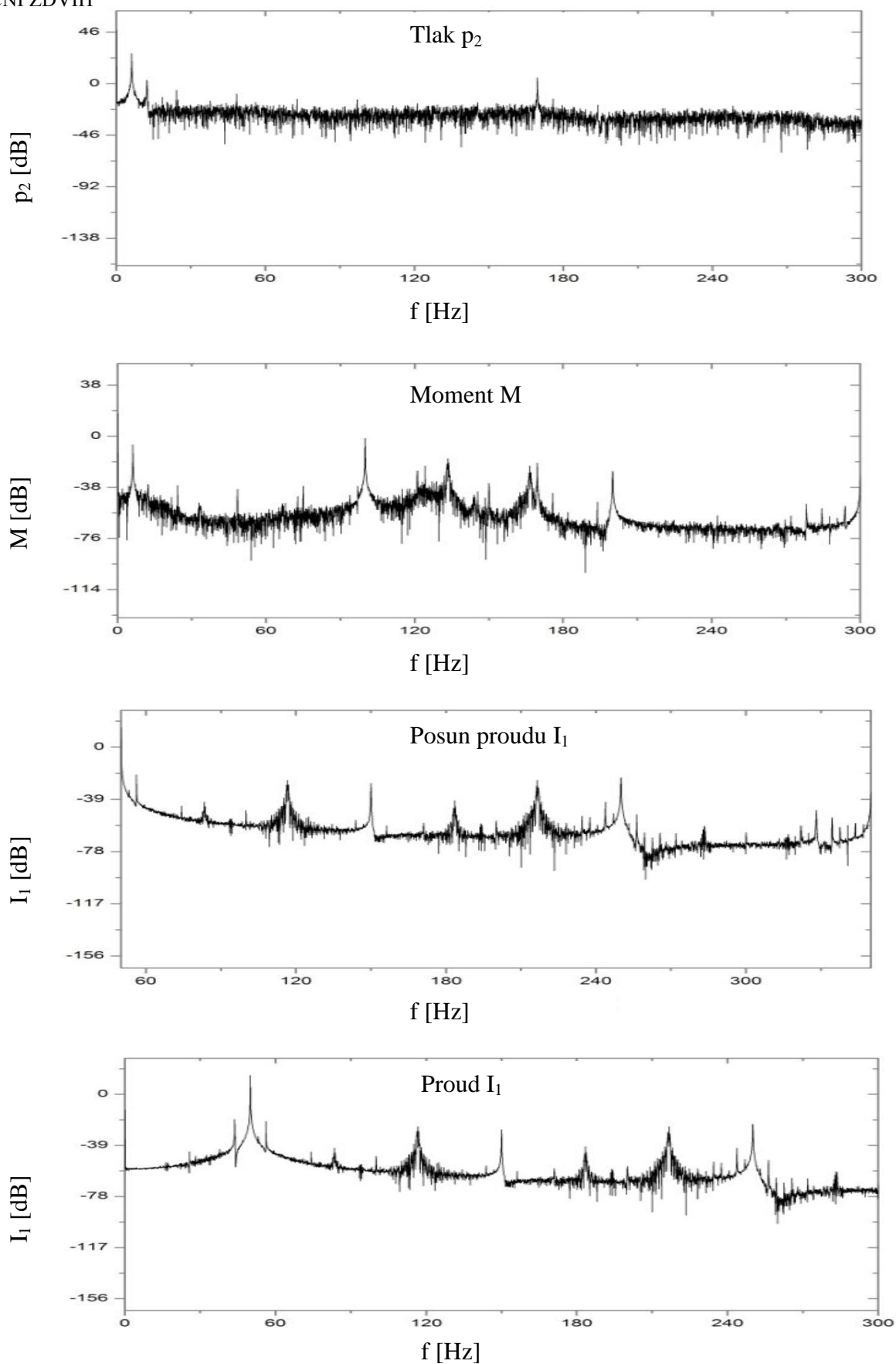


Obrázek 19: Graf závislosti účinnosti čerpadla na průtoku



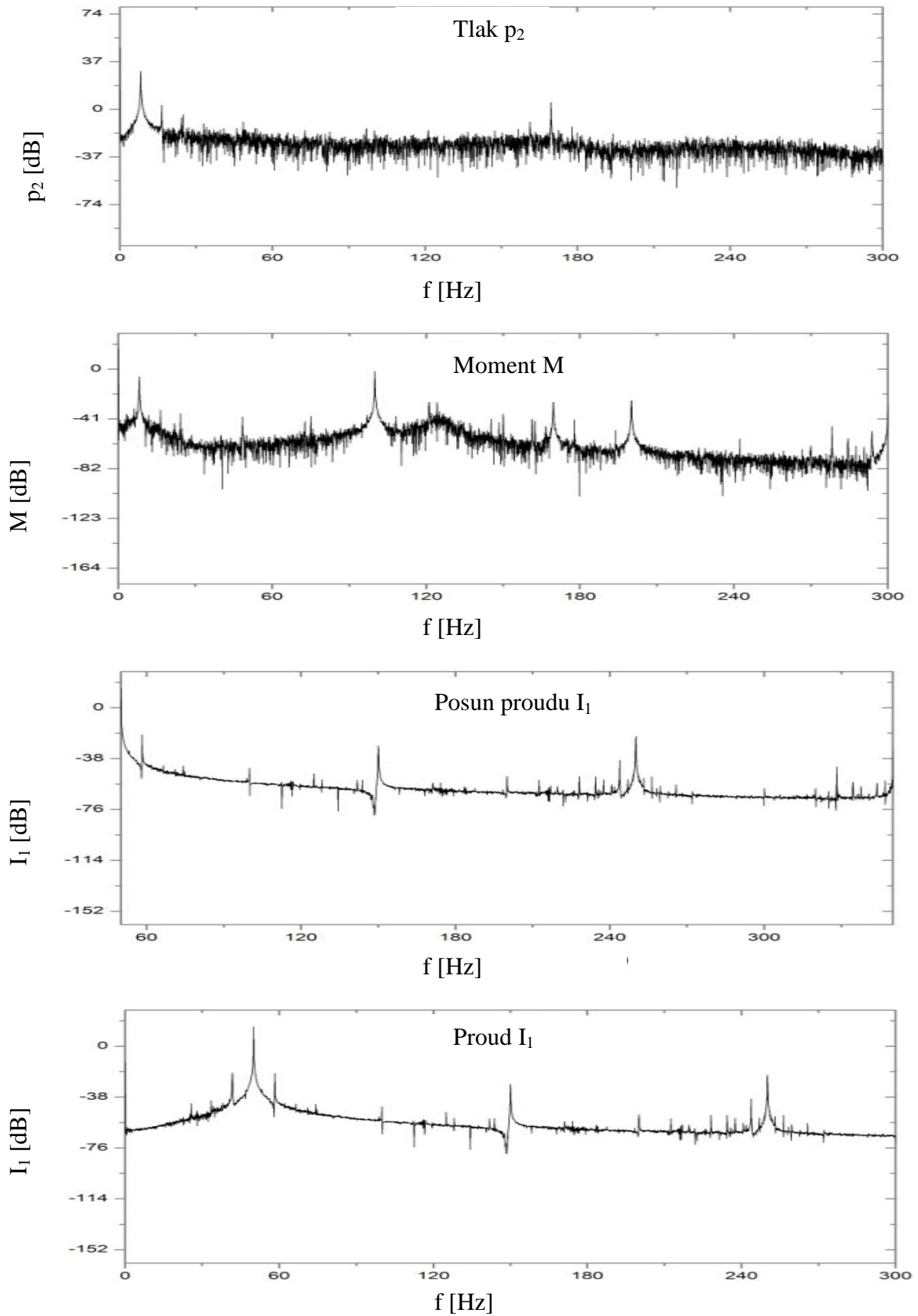
Obrázek 20: Graf závislosti otáček čerpadla na průtoku

POLOVIČNÍ ZDVIH



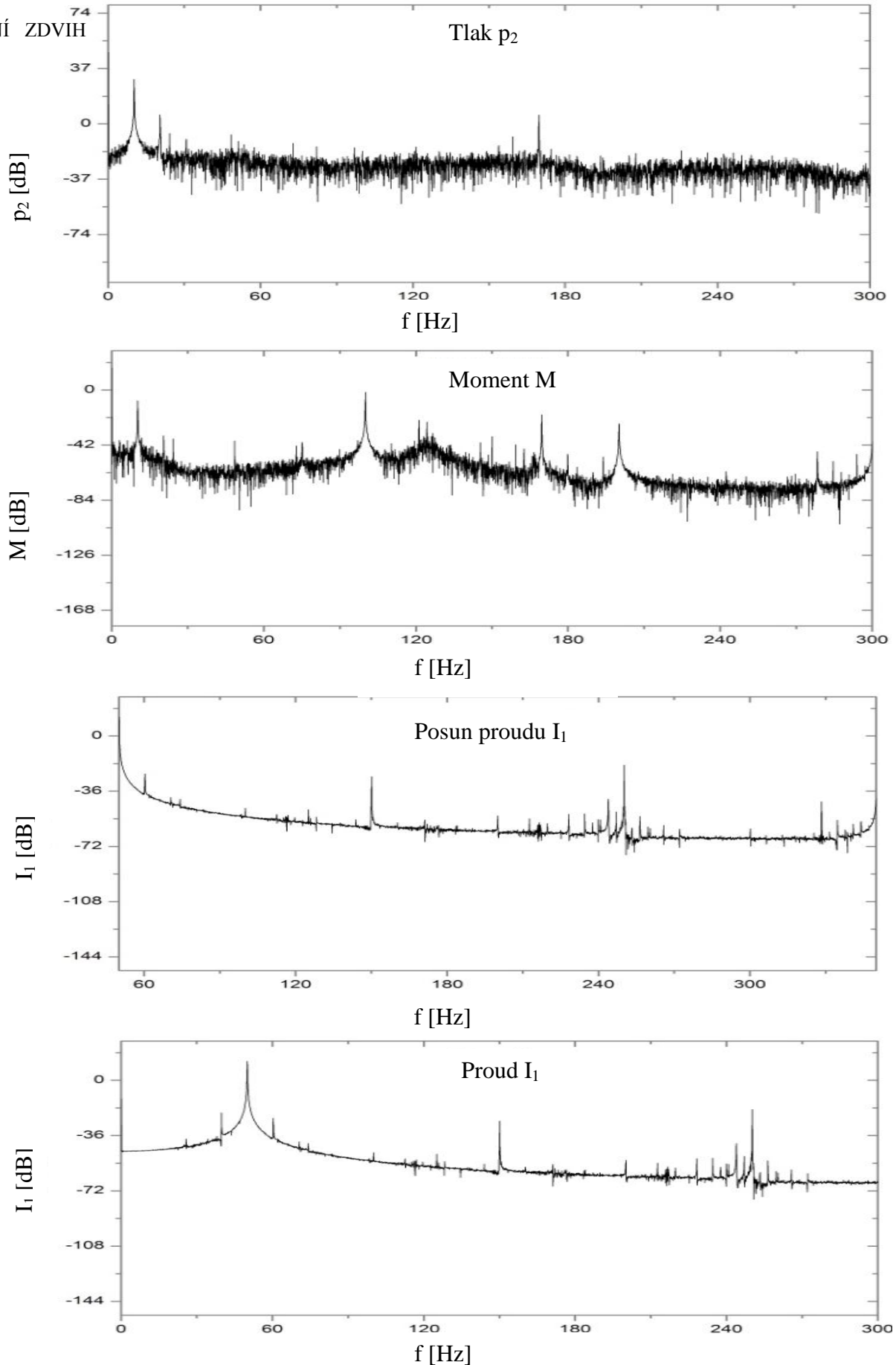
Obrázek 21: Grafy závislosti útlumu na frekvenci pro jednotlivé veličiny, $f=6\text{Hz}$, $Q=31$

POLOVIČNÍ ZDVIH



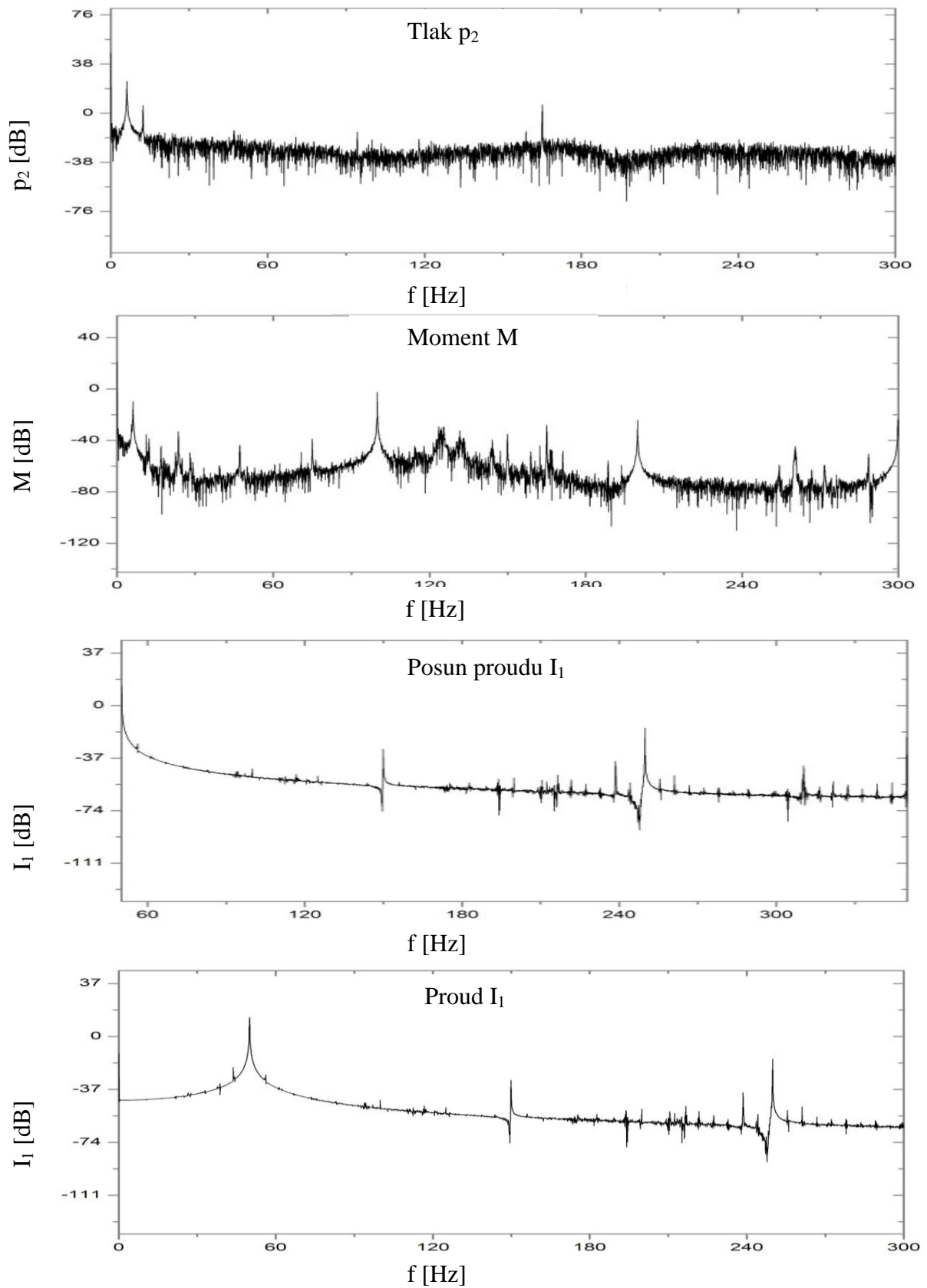
Obrázek 22: Grafy závislosti útlumu na frekvenci pro jednotlivé veličiny, $f=8\text{Hz}$, $Q=3l$

POLOVIČNÍ ZDVIH



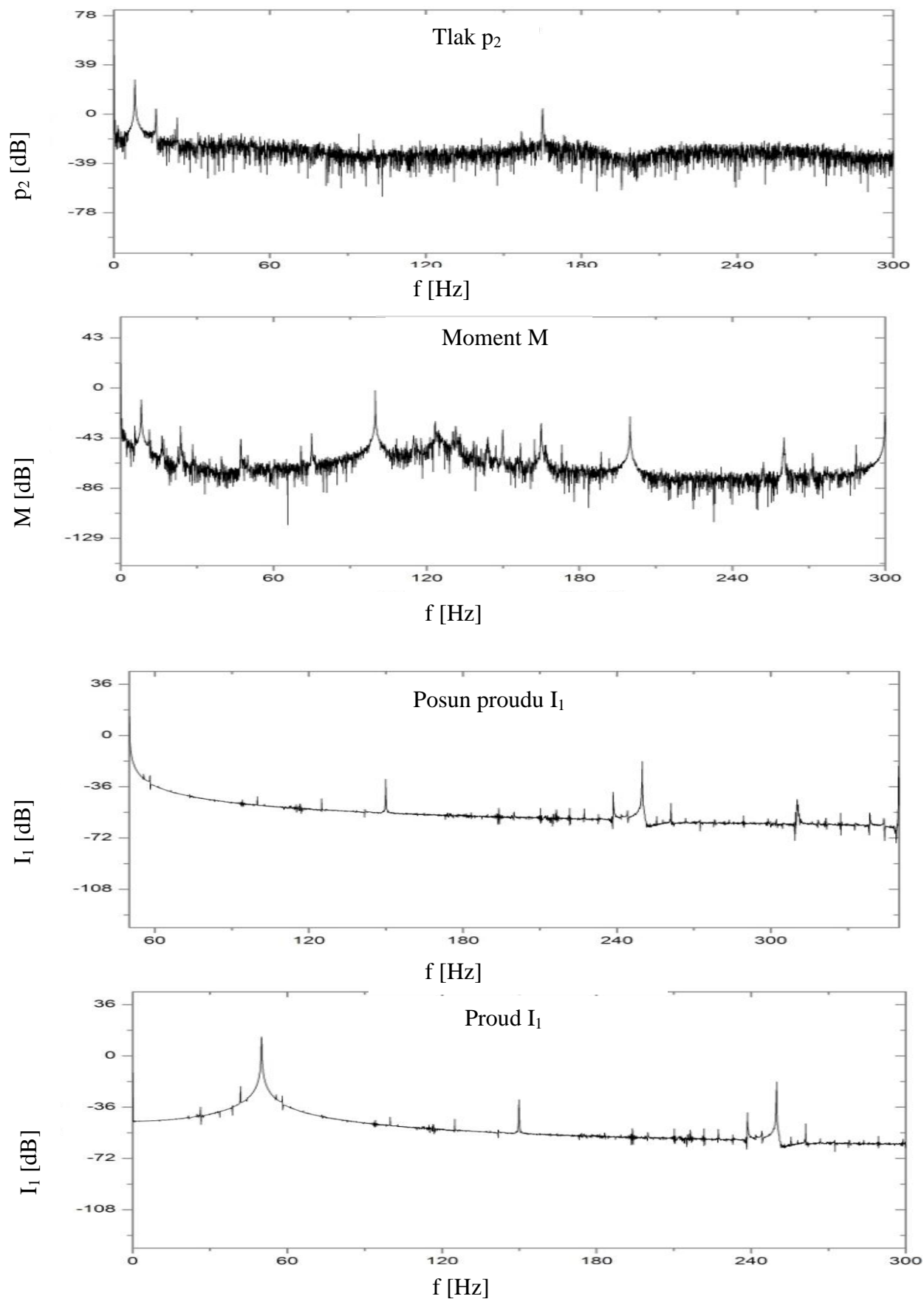
Obrázek 23: Grafy závislosti útlumu na frekvenci pro jednotlivé veličiny, $f=10\text{Hz}$, $Q=31$

POLOVIČNÍ ZDVIH



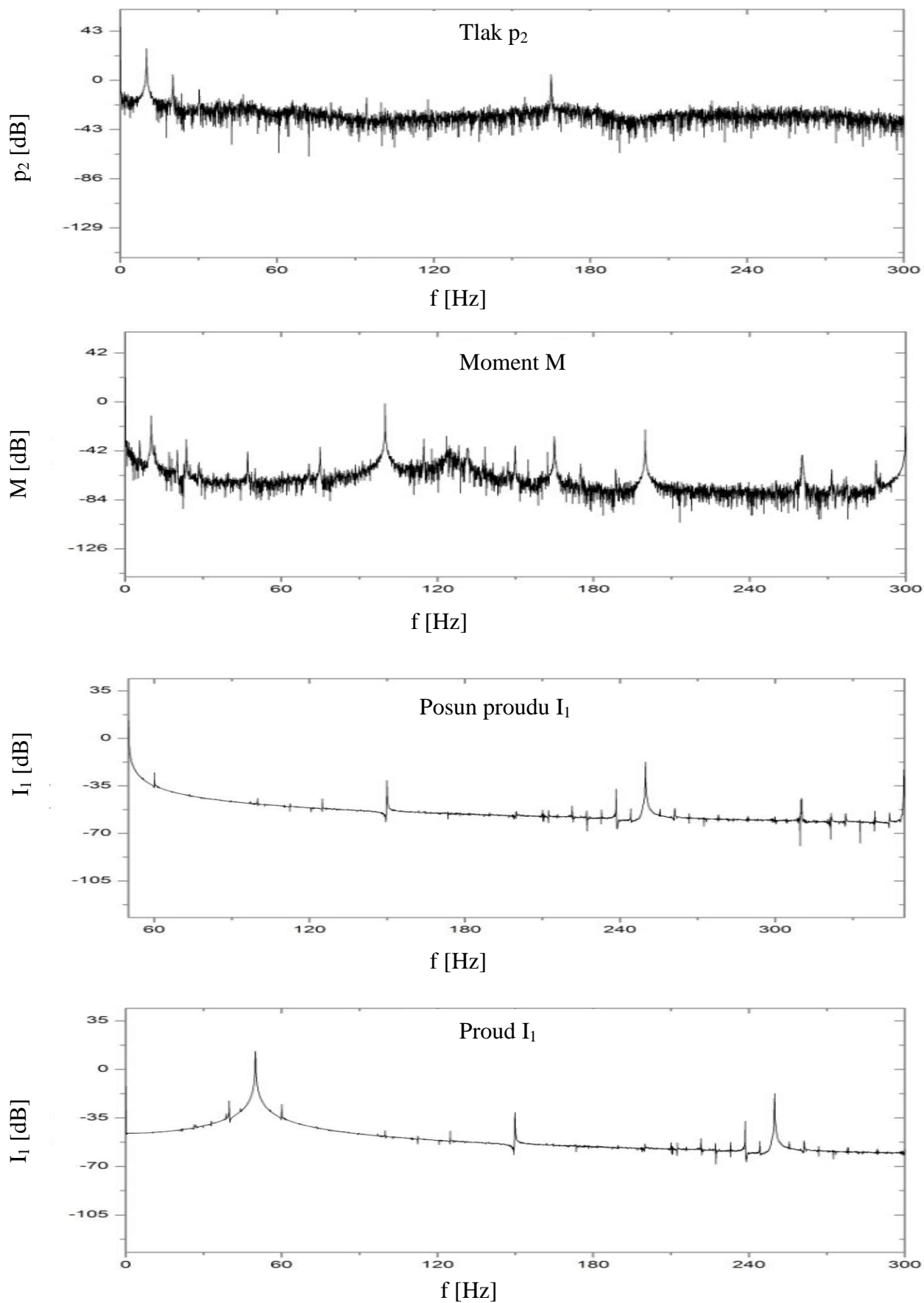
Obrázek 24: Grafy závislosti útlumu na frekvenci pro jednotlivé veličiny, $f=6\text{Hz}$, $Q=101$

POLOVIČNÍ ZDVIH



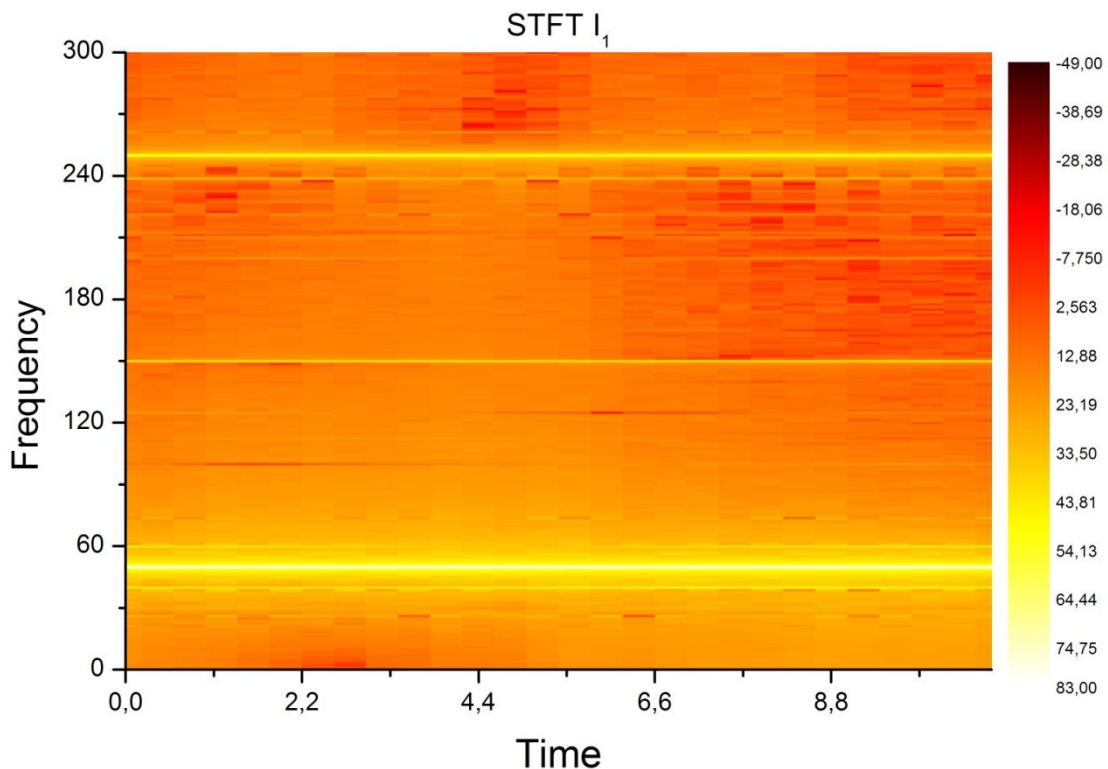
Obrázek 25: Grafy závislosti útlumu na frekvenci pro jednotlivé veličiny, $f=8\text{Hz}$, $Q=10l$

POLOVIČNÍ ZDVIH



Obrázek 26: Grafy závislosti útlumu na frekvenci pro jednotlivé veličiny, $f=10\text{Hz}$, $Q=10l$

POLOVIČNÍ ZDVIH



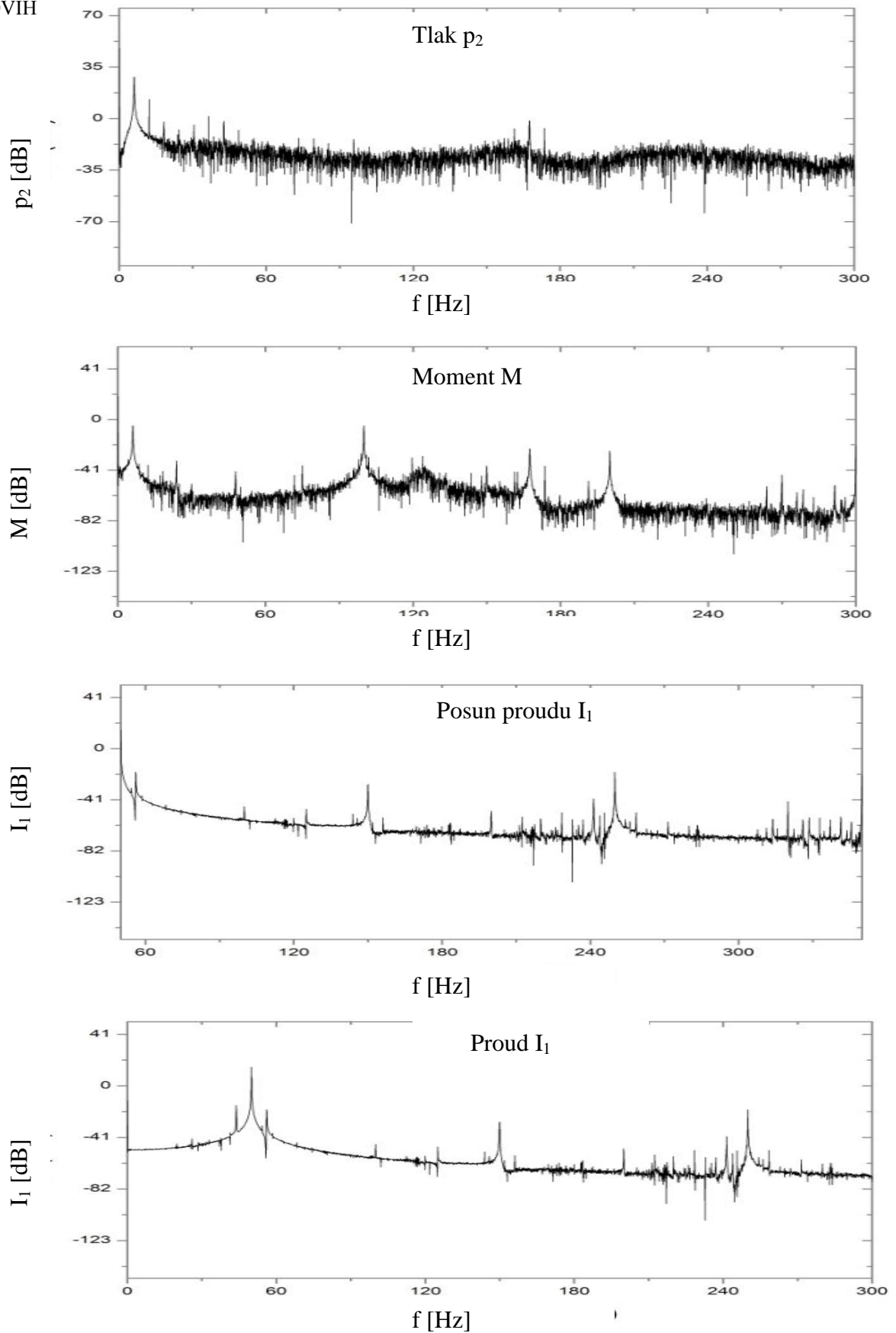
Obrázek 27: STFT proudu-poloviční zdvih $f=10\text{Hz}$, $Q=10\text{l}$

Použitím pulsátoru docházelo k vytváření pulsních tlaků, které ovlivňovali měřené veličiny na motoru. Frekvence pulsů se měnila v rozmezí 6 Hz – 10 Hz. Hodnoty jsou zpracovány pro minimální hodnotu průtoku $Q=3\text{ l}$ a maximální hodnotu průtoku $Q=10\text{ l}$. U pulsátoru byl nastaven poloviční zdvih (mechanické pootočení pístu pulsátoru). Pro dané veličiny (tlak p_2 na výtlaku, moment, proud) byla provedena Fourierova transformace a graficky zobrazena.

Byl zobrazen i posun proudu tj. posunutí hodnoty pracovní frekvence 50 Hz do počátku soustavy souřadnic. Obrázky 21-26 jsou grafické průběhy FFT pro poloviční zdvih. Při rozboru obrázku 21 (závislosti útlumu na frekvenci pro jednotlivé veličiny, $f=6\text{ Hz}$, $Q=3\text{ l}$) jsou patrné u tlaku p_2 špičky na pracovní frekvenci 50 Hz a další špička na lopatkové frekvenci cca. 175 Hz. Lopatková frekvence je dána počtem lopatek a frekvencí otáčení. $f_{LOP} = \text{počet lopatek} \cdot f_{OT}$. Frekvence otáčení je v našem případě 25 Hz.

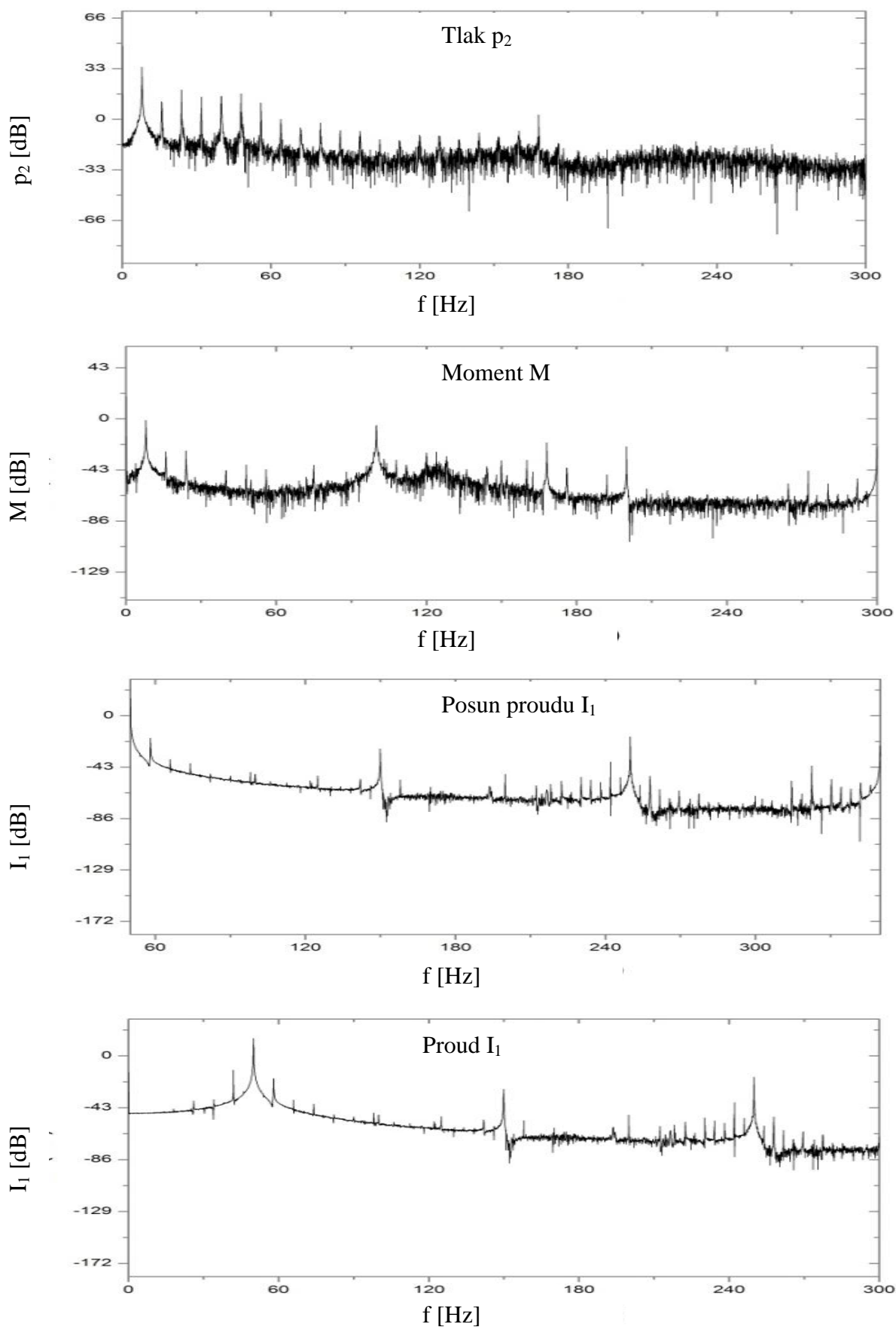
U momentu a posunutého proudu jsou patrné špičky dané vlivem magnetizace. Velmi výrazná je špička u pracovní frekvence 50 Hz. Je patrné, jak se kopírují jednotlivé frekvence přes tlak do momentu a proudu. Pro frekvenci $f=10\text{ Hz}$ a $Q=10\text{ l}$ a poloviční zdvih byla provedena krátká Fourierova transformace proudu (STFT). Tento průběh je zobrazen na obrázku 27 (závislost frekvence na čase). Jsou zde právě patrné frekvence 50 Hz, 150 Hz, 250 Hz.

PLNÝ ZDVIH



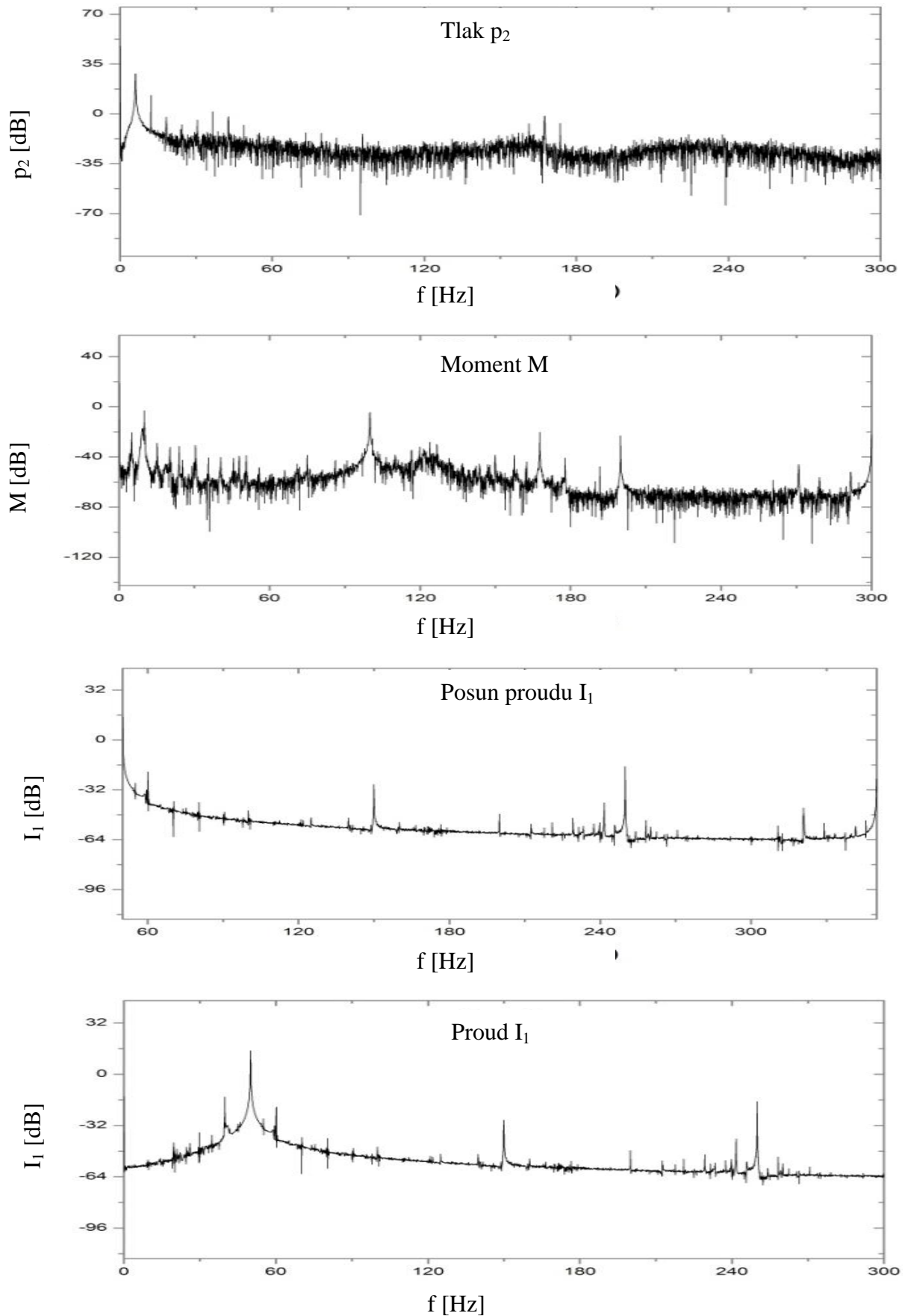
Obrázek 28: Grafy závislosti útlumu na frekvenci pro jednotlivé veličiny, $f=6\text{Hz}$, $Q=61$

PLNÝ ZDVIH



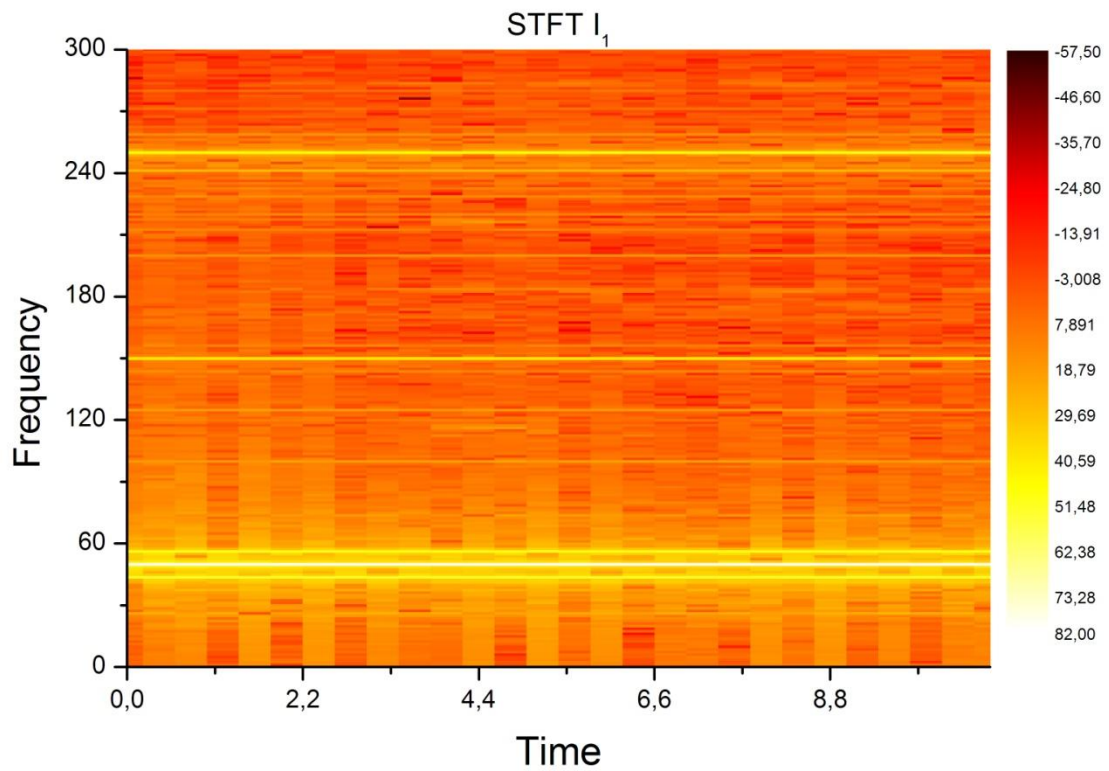
Obrázek 29: Grafy závislosti útlumu na frekvenci pro jednotlivé veličiny, $f=8\text{Hz}$, $Q=61$

PLNÝ ZDVIH

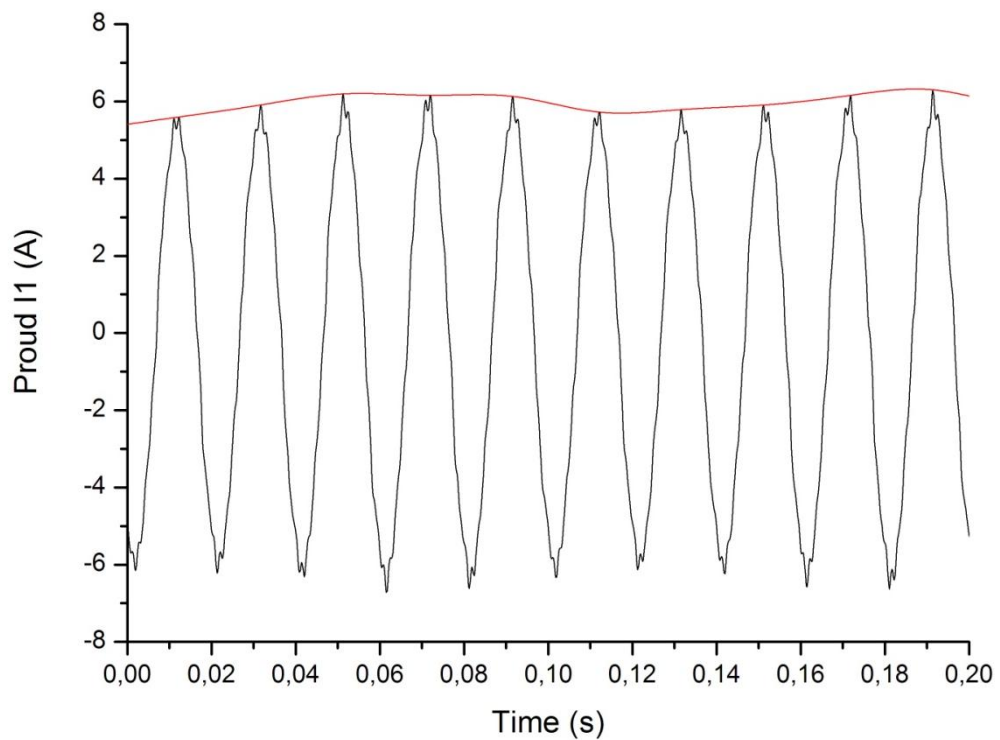


Obrázek 30: Grafy závislosti útlumu na frekvenci pro jednotlivé veličiny, $f=10\text{Hz}$, $Q=61$

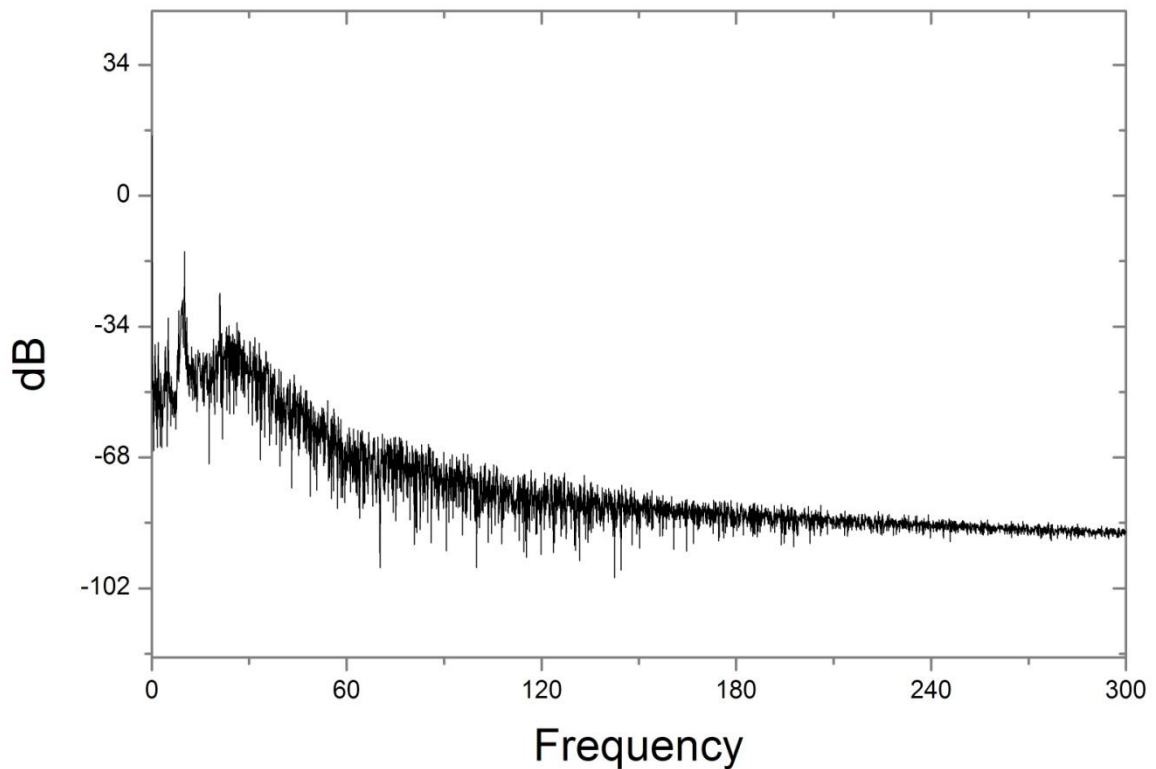
PLNÝ ZDVIH



Obrázek 31: STFT proudu- plný zdvih, $f=10\text{Hz}$, $Q=6l$



Obrázek 32: Horní obálka proudu I_1 pro $f=10\text{Hz}$, $Q=6l$, $t=200\text{ ms}$



Obrázek 33: Fourierova transformace horní obálky $f=10\text{Hz}$, $Q=6$ l, celý časový rozsah

Fourierova transformace byla provedena pro celý časový úsek. Grafické zpracování veličin při plném zdvihu pulsátoru je zobrazeno na obrázcích 28 – 30. Při rozboru na obrázku 28 je zřejmé větší množství kmitů než při polovičním zdvihu. U tlaku p_2 je opět patrný kmit u pracovní frekvence a lopatkové frekvence. Na obrázku 31 je STFT proudu při $f=10\text{ Hz}$ a $Q=6$ l. U těchto parametrů je vykreslena i obálka (obrázek 32) a její Fourierova transformace (obrázek 33). Obálka je vykreslena tak, aby co nejvíce „plula“ po signálu.



Tabulka 3: Tabulka hodnot s použitím pulsátoru - poloviční zdvih

| f | M _k | Q | p _{1k} | p _{2k} | Y |
|-------|----------------|-------|-----------------|-----------------|--------|
| [Hz] | [N.m] | [l/s] | [kPa] | [kPa] | [J/Kg] |
| 6,00 | 6,78 | 2,95 | 107,14 | 248,50 | 146,28 |
| 8,00 | 6,78 | 2,89 | 107,16 | 248,63 | 146,36 |
| 10,00 | 6,78 | 2,89 | 107,15 | 248,78 | 146,52 |
| 6,00 | 7,52 | 3,96 | 106,65 | 246,93 | 145,72 |
| 8,00 | 7,52 | 4,04 | 106,67 | 247,09 | 145,91 |
| 10,00 | 7,5 | 4,03 | 106,7 | 247,26 | 146,05 |
| 6,00 | 8,06 | 4,99 | 106,15 | 244,93 | 144,91 |
| 8,00 | 8,06 | 4,65 | 106,17 | 245,07 | 144,78 |
| 10,00 | 8,07 | 4,82 | 106,16 | 245,20 | 145,04 |
| 6,00 | 8,73 | 6,01 | 105,52 | 241,70 | 143,14 |
| 8,00 | 8,72 | 5,87 | 105,53 | 241,78 | 143,09 |
| 10,00 | 8,72 | 5,93 | 105,48 | 241,85 | 143,26 |
| 12,00 | 8,74 | 5,89 | 105,43 | 241,07 | 142,49 |
| 6,00 | 9,42 | 6,88 | 104,69 | 237,42 | 140,52 |
| 8,00 | 9,41 | 6,85 | 104,61 | 237,24 | 140,39 |
| 10,00 | 9,41 | 6,89 | 104,59 | 237,26 | 140,48 |
| 6,00 | 10,25 | 8,12 | 103,32 | 229,68 | 135,54 |
| 8,00 | 10,04 | 7,91 | 103,67 | 231,91 | 137,17 |
| 10,00 | 10,04 | 7,92 | 103,56 | 231,83 | 137,21 |
| 6,00 | 10,7 | 8,98 | 102,54 | 224,75 | 132,48 |
| 8,00 | 10,7 | 8,97 | 102,48 | 224,60 | 132,38 |
| 10,00 | 10,7 | 8,99 | 102,42 | 224,50 | 132,36 |
| 6,00 | 11,29 | 9,98 | 101,36 | 216,61 | 126,92 |
| 8,00 | 11,27 | 9,96 | 101,33 | 216,92 | 127,24 |
| 10,00 | 11,29 | 9,95 | 101,27 | 216,79 | 127,15 |

Výpočet měrné energie při použití pulsátoru f=10Hz, Q=10l (poslední řádek tabulky 3), poloviční zdvih

$$Y = \frac{p_2 - p_1}{\rho} + \frac{c_2^2 - c_1^2}{2} + g \cdot h = \frac{p_{2k} - p_{1k}}{\rho} + \frac{Q^2}{2} \cdot \left(\frac{1}{S_2^2} - \frac{1}{S_1^2} \right) + g \cdot h$$

$$S_1 = \frac{\pi \cdot D_1^2}{4} = \frac{\pi \cdot (76,6 \cdot 10^{-3})^2}{4} = 4,608 \cdot 10^{-3} m^2$$

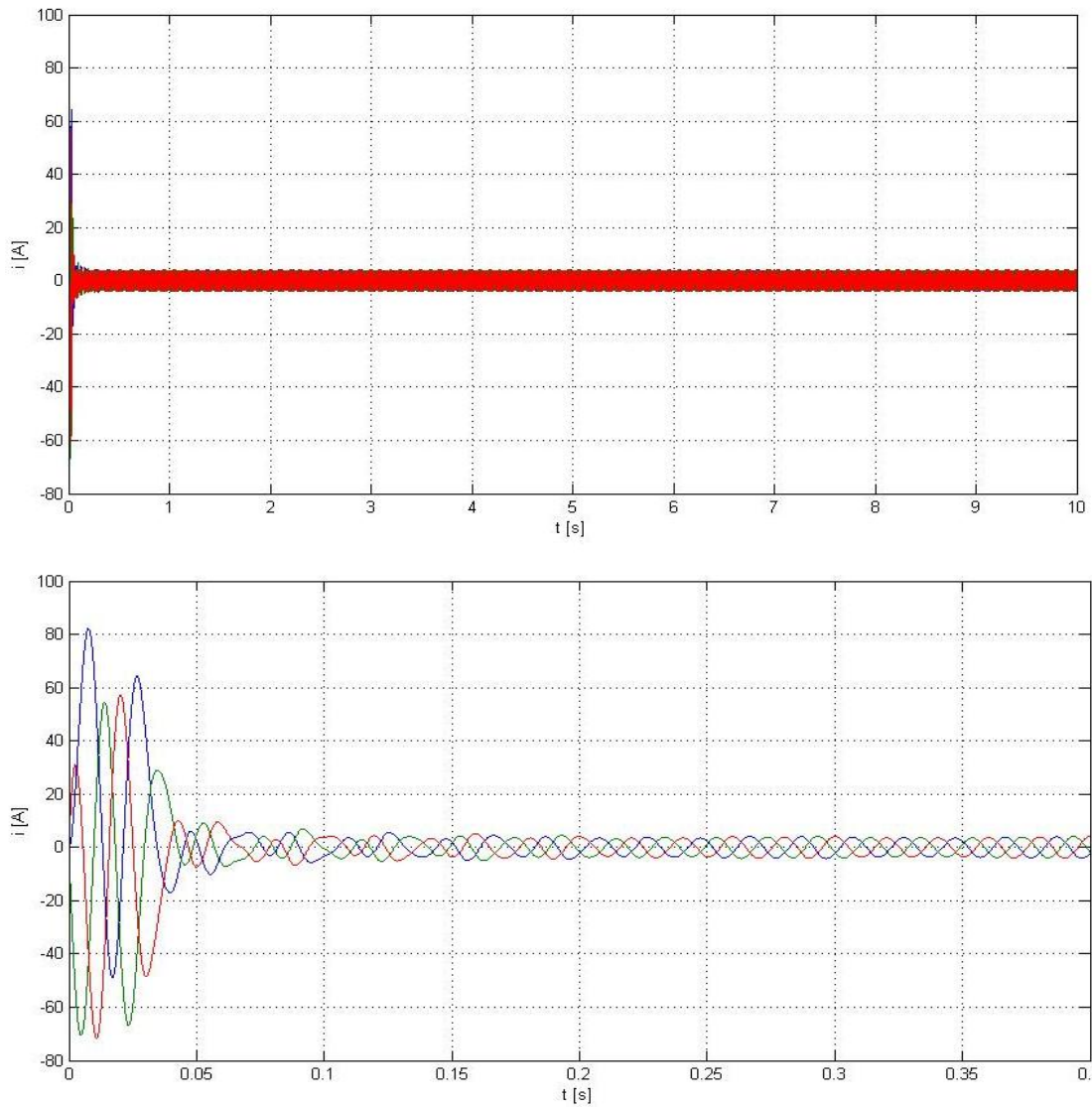
$$S_2 = \frac{\pi \cdot D_2^2}{4} = \frac{\pi \cdot (53,6 \cdot 10^{-3})^2}{4} = 2,256 \cdot 10^{-3} m^2$$

$$Q = 9,95 l/s = 0,995 \cdot 10^{-2} m^3/s$$

$$Y = \frac{216,785 \cdot 10^2 - 101,267 \cdot 10^2}{998,942} + \frac{(0,995 \cdot 10^{-2})^2}{2} \cdot \left(\frac{1}{(2,256 \cdot 10^{-3})^2} - \frac{1}{(4,608 \cdot 10^{-3})^2} \right) + 9,81 \cdot 0,42$$
$$= 127,154 J/Kg$$

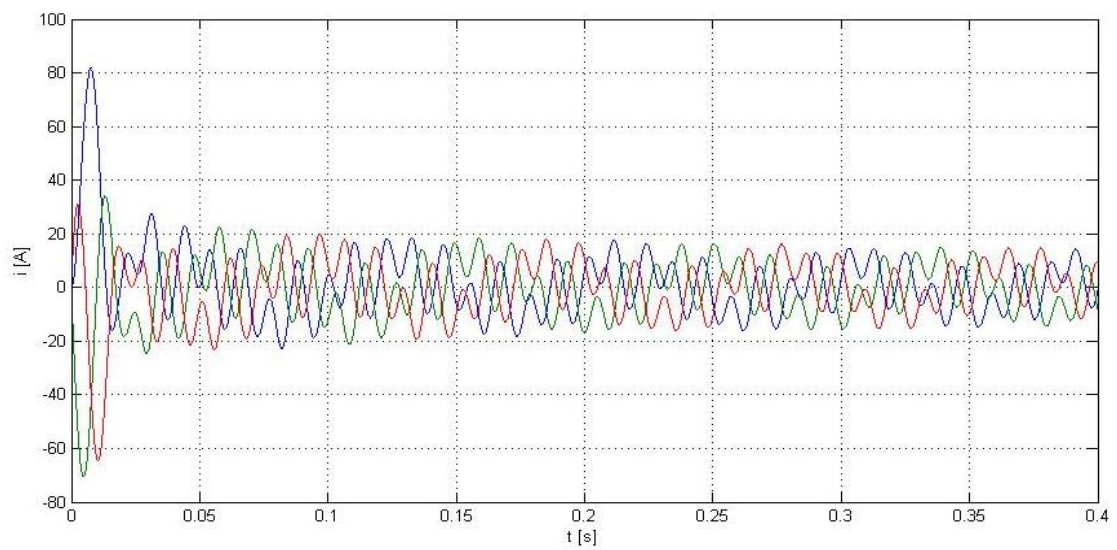
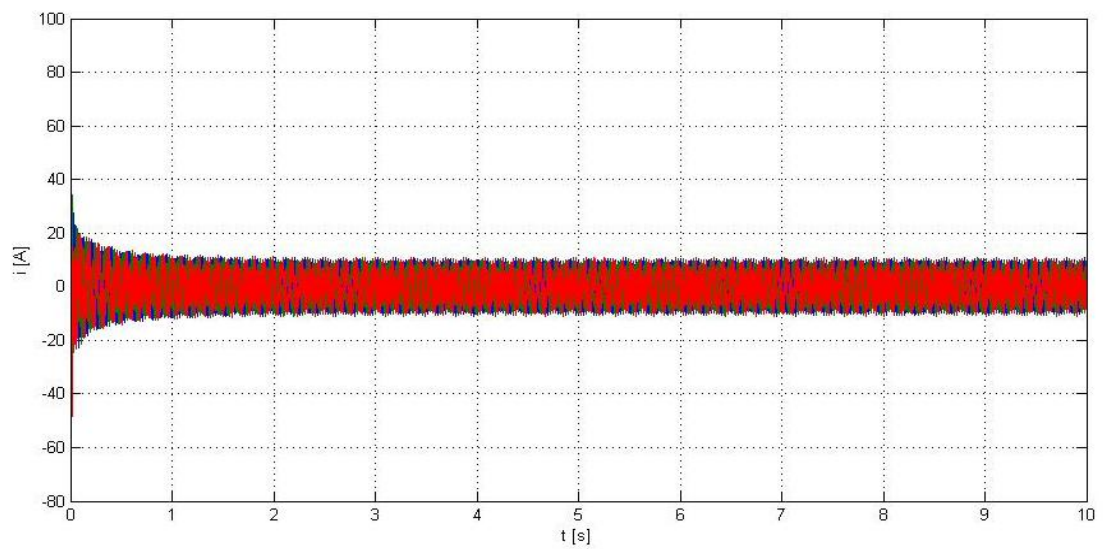
Simulace buzení pomocí momentu:

Buzení momentem z měření pro model motoru 1:

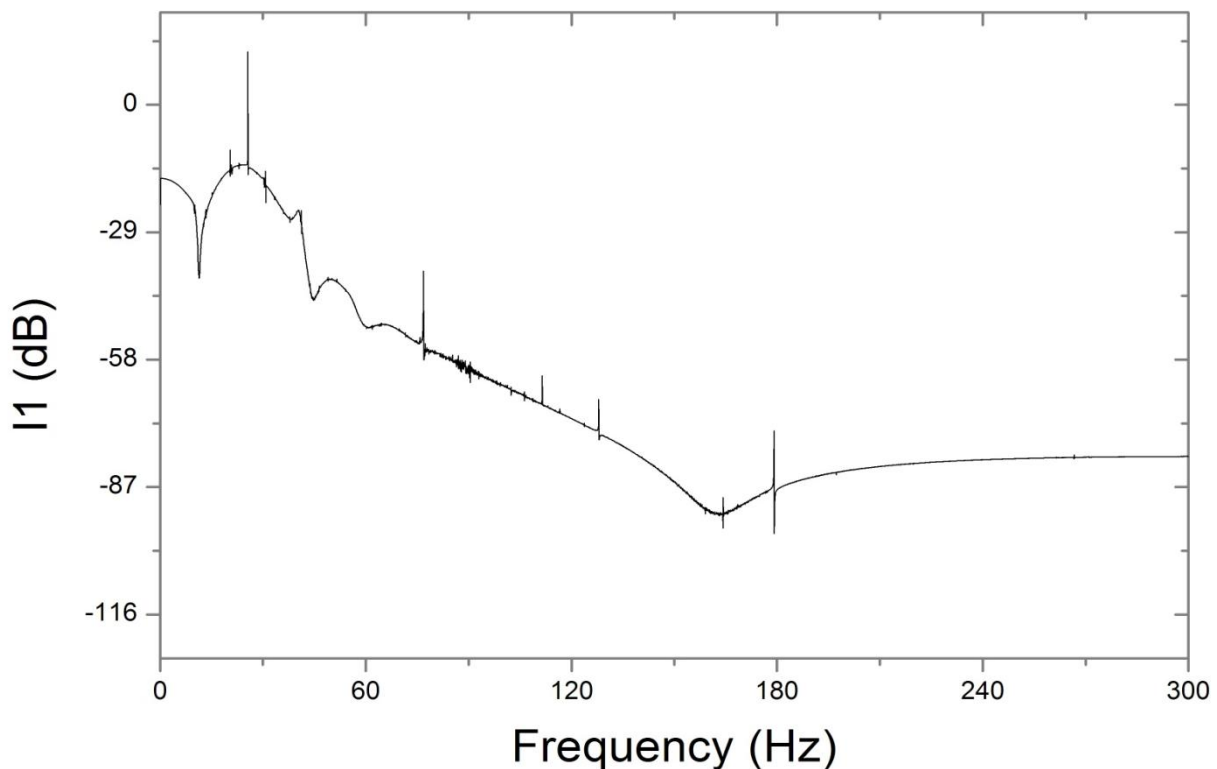


Obrázek 34: Grafy závislosti proudu na čase pro buzení $f=10\text{Hz}$, $Q=10l$, motor 1

Buzení momentem z měření pro model motoru 2:



Obrázek 35: Grafy závislosti proudu na čase pro $f=10\text{Hz}$, $Q=10\text{l}$, motor 2



Obrázek 36: FFT proudu I_1 při buzení momentem

Na obrázku 36 je průběh FFT proudu. Jedná se o průběh, kdy byl průběh momentu z měření importován do simulační části a použit jako zdroj buzení motoru. Průběh momentu byl importován pro $f=10$ Hz a $Q=6$ l a plný zdvih pulsátoru. Při porovnání s měřením (obrázek 30) je patrný velký kmit opět na pracovní frekvenci $f=50$ Hz. Menší kmity jsou dané vlivem magnetizace. Kmity mezi 60 Hz a 120 Hz se vyskytují v obou případech.

9 ZÁVĚR

Cílem práce byla analýza dynamického chování zátěže z měření statorových proudů asynchronního motoru. Předpoklad pro sestavení modelu je analýza a simulace asynchronního motoru v prostředí Matlab. Hodnoty získané měřením byly zpracovány v programu OriginLab. Využívalo se buzení dvěma frekvencemi (10 Hz, 50 Hz) a dále pomocí momentu, jehož průběh byl importován z dat reálného měření. Kompletní model motoru v Simulinku je zobrazen na obrázku 9. V simulační části byly použity dva druhy motorů (s rozdílným momentem setrvačnosti J). První model motoru je z nabídky Simulink Library a druhý je s reálným momentem setrvačnosti (typ TM90-4X, firma EMP). Grafické závislosti proudu na čase jsou zobrazeny na obrázcích 10 – 13. Je zde vykreslen celý časový průběh $t=10$ s a poté zkrácený průběh $t=0,4$ s z důvodu zobrazení rozběhu motoru. Při rozboru průběhu na obrázku 10 (grafy závislosti proudu na čase pro buzení $f=10$ Hz, motor 1) je patrný velký záběrný proud při rozběhu motoru. Ustálená hodnota (její amplituda) má velikost cca. 3 A. Při rozboru průběhu na obrázku 12 (grafy závislosti proudu na čase probuzení $f=10$ Hz, motor 2) je patrný velký záběrný proud při rozběhu motoru. Ustálená hodnota proudu (její amplituda) má velikost cca. 18 A. Při buzení momentem získaným z dat reálného měření na obrázku 14 (pro motor 1) má hodnota ustáleného proudu (amplituda) velikost cca. 3,5 A.

Reálné měření se zabývalo analýzou průtoku z měření elektrických veličin na motoru. Docházelo k propojení reálného měření a simulační části. Cílem byla analýza průtoku z měření elektrických veličin na motoru a dále rozbor veličin získaných měřením. Měření bylo prováděno na čerpadlu BETA 12 YC. V první části měření nebyl využit pulsátor (stroj na vytváření tlakových vodních pulsů). Škrticím ventilem se měnil průtok a snímali se příslušné veličiny v prostředí LabView. Takto byly odečteny požadované veličiny. Na obrázcích 17 – 20 jsou graficky zpracovány. Měrná energie Y se zvyšujícím se průtokem klesá. Maximální hodnota je $Y=146,88$ J/kg. Závislost příkonu čerpadla na hřídeli je rostoucí křivka. Hodnota maximálního příkonu je $P_f=1,9$ kW. Účinnost má rostoucí charakter ale při dosažení optima ($Q=11$ l) účinnost klesá. V poslední části práce je výpočet měrné energie Y při použité pulsátoru a polovičního zdvihu. Výsledky jsou uvedeny v tabulce 3.



LITERATURA

- [1] ZHANG, Wei. *Fault Detection* [online]. InTech, 2010 [cit. 2014-05-10]. ISBN 978-953-307-037-7. Dostupné z:<http://www.intechopen.com/books/fault-detection/mechanical-fault-detection-in-induction-motor-drives-through-stator-current-monitoring-theory-and-ap>
- [2] LONG, Wu. *SEPARATING LOAD TORQUE OSCILLATION AND ROTOR FAULTS IN STATOR CURRENT BASED-INDUCTION MOTOR CONDITION MONITORING*. Georgia Institute of Technology, 2007. Disertační práce. Georgia Institute of Technology.
- [3] NEBORÁK, Ivo. *Modelování a simulace elektrických regulovaných pohonů*. Ostrava: Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava, Fakulta elektrotechniky a informatiky, 2002. ISBN 9788024800837
- [4] KRAUSE, Paul, Oleg WASYNCZUK a Scott SUDHOFF. *Analysis of electric machinery and drive systems*. Druhé vydání. USA: IEEE Press, 2002. ISBN 0-471-14326-X.
- [5] LIŠKA, Jindřich. Zpracování signálů pro diagnostiku a jeho aplikace. In: [online]. [cit. 2014-05-10]. Dostupné z:http://www.crr.vutbr.cz/system/files/brozura_08_1012.pdf
- [6] *Měření průtokové a účinnostní charakteristiky čerpadla BETA 12 YC: Návod k laboratornímu cvičení*. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Energetický ústav, Odbor fluidního inženýrství Victora Kaplana.
- [7] JON, V. *Elektrický pohon zkušebního pracoviště*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2008. 39s. Vedoucí diplomové práce doc. Ing. Josef Koláčný, CSc.