

**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI  
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ**

**Katedra elektromechaniky a výkonové elektroniky**

# **DIPLOMOVÁ PRÁCE**

**Hluk pohonu s asynchronním motorem**

**Tomáš Novák**

**2012**



## **Anotace**

Předkládaná diplomová práce je zaměřena na výběr vhodné modulace, která by potlačila hluk asynchronního motoru, zejména hluku odpovídající spínací frekvenci při řízení pulsně šířkovou modulací. K tomu budou použity dvě vybrané metody, které by měly hluk pohonu snížit. V práci jsou ukázány výsledky simulace vybraných stavů a porovnání se skutečným pohonem.

## **Klíčová slova**

PWM, RPWM, EPWM, náhodné řízení, zvukový záznam, DSP, harmonické proudy

**Abstract**

The master theses focuses on the selection of the suitable modulation which would suppress the noise of asynchronous motor, especially the noise corresponding switching frequency produced by control of Pulse Width Modulation. To test above mentioned point will be used two selected methods which should reduce the noise of the drive. The thesis presents results of the simulation of the selected statuses and shows the comparison with the real drive.

**Key words**

PWM, RPWM, EPWM, random controlling, audio track, DSP, harmonic currents

## **Prohlášení**

Předkládám tímto k posouzení a obhajobě diplomovou práci, zpracovanou na závěr studia na Fakultě elektrotechnické Západočeské univerzity v Plzni.

Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci vypracoval samostatně, s použitím odborné literatury a pramenů uvedených v seznamu, který je součástí této diplomové práce.

Dále prohlašuji, že veškerý software, použitý při řešení této diplomové práce, je legální.

V Plzni dne 9.5.2012

Tomáš Novák

.....

## **Poděkování**

Tímto bych rád poděkoval vedoucímu diplomové práce Ing. Martinu Jandovi Ph.D. za cenné profesionální rady, připomínky a metodické vedení práce.

## Obsah

|  |           |
|--|-----------|
| <b>OBSAH</b> .....   | <b>7</b>  |
| <b>ÚVOD</b> .....  | <b>8</b>  |
| <b>CÍLE PRÁCE</b> .....  | <b>8</b>  |
| <b>SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK</b> .....                                      | <b>9</b>  |
| <b>1 PSYCHOAKUSTICKÁ A HLUKOVÁ KRITÉRIA</b> .....                          | <b>10</b> |
| 1.1 WEBER – FECHNERŮV ZÁKON .....  | 11        |
| 1.2 HLUK – PŘÍČINY VZNIKU U ASYNCHRONNÍHO MOTORU .....                     | 12        |
| <b>2 HARMONICKÁ ANALÝZA PROUDU <math>I_z</math> PŘI PROMĚNNÉ PWM</b> ..... | <b>13</b> |
| 2.1 OBECNĚ .....   | 13        |
| 2.1.1 První metoda RPWM .....  | 15        |
| 2.1.2 Druhá metoda RPWM .....  | 16        |
| 2.2 VÝSLEDKY SIMULACE .....  | 17        |
| 2.3 ZVUKOVÝ ZÁZNAM .....   | 20        |
| <b>3 MĚŘENÍ HLUKU NA LABORATORNÍM POHONU</b> .....                         | <b>21</b> |
| 3.1 POPIS MĚŘENÉ SOUSTAVY .....  | 21        |
| 3.1.1 Popis řídicí jednotky .....  | 21        |
| 3.1.2 Nastavení řídicí jednotky .....                                      | 22        |
| 3.1.3 Výsledky měření .....  | 23        |
| <b>ZÁVĚR</b> .....   | <b>26</b> |
| <b>SEZNAM LITERATURY A INFORMAČNÍCH ZDROJŮ</b> .....                       | <b>1</b>  |
| <b>PŘÍLOHY</b> .....   | <b>2</b>  |

## Úvod

Předkládaná práce je zaměřena na změnu spektra zvuku produkovaného asynchronními motory řízenými frekvenčním měničem. V dnešní době je využití tohoto řízení nejčastější. Nežádoucí vlastností je zvuk modulační frekvence, který působí nepříjemně na organismus člověka. Existuje několik metod změny modulační frekvence, které tyto vlastnosti potlačují. Jsou vybrány dvě rozdílné metody potlačení zvuku. Bude proveden teoretický rozbor obou metod, jejich simulace a realizace na skutečném pohonu.

První část práce bude věnována vlivu zvuku na organismus člověka. Jeho citlivosti na frekvenčním spektru, rychlosti změny frekvence a na subjektivním pocitu vnímání nepříjemných spekter jednotlivcem.

Ve druhé části bude zkoumáno spektrum proudu odebíraného napět'ovým střídačem z meziobvodu při řízení střídače proměnnou pulsně šířkovou modulací, které odpovídá frekvenčnímu spektru zvuku pohonu. Budou zde vysvětleny obě z výše zmíněných metod, jež budou použity pro simulaci vybraných stavů. Pro každou z metod bude použito několik parametrů, které budou navzájem porovnávány na simulačních průbězích.

V závěrečné části diplomové práce bude implementován řídicí algoritmus obou metod do digitálního signálového procesoru a změřen hluk produkovaný skutečným pohonem. Bude porovnán hluk při řízení s klasickou PWM oproti řízení s proměnnou PWM a poté bude vybráno spektrum s nejpříjemnějším zvukem.

## Cíle práce

Cílem práce je výběr modulačního algoritmu s ohledem na snížení hluku pohonu.



## Seznam symbolů a zkratk

|             |                                     |
|-------------|-------------------------------------|
| RPWM.....   | Náhodná pulsně šířková modulace     |
| EPWM.....   | Entropy pulsně šířkové modulace     |
| MATLAB..... | Matrix laboratoř                    |
| DSP.....    | Digitální signálový procesor        |
| $f_p$ ..... | Frekvence pily [Hz]                 |
| $f_s$ ..... | Frekvence statoru [Hz]              |
| $I_z$ ..... | Proud stejnosměrného meziobvodu [A] |
| A.....      | Hladina akustického tlaku [dB]      |

## 1 Psychoakustická a hluková kritéria

Vliv hluku na člověka je bezesporu škodlivý, rušivý, nepříjemný, a tedy i nežádoucí. Podle časového hlediska lze účinek hluku posuzovat v okamžiku působení hluku jako ztrátu koncentrace, snížení pracovní aktivity atd. Působí-li hluk na člověka dlouhodobě, dochází k posunu sluchového prahu již po několika minutách. Sluchový orgán se rychle adaptuje a hluk vnímá s menší hlasitostí.

Z hlediska současného působení hluku na člověka jej lze rozlišovat podle délky působení na:

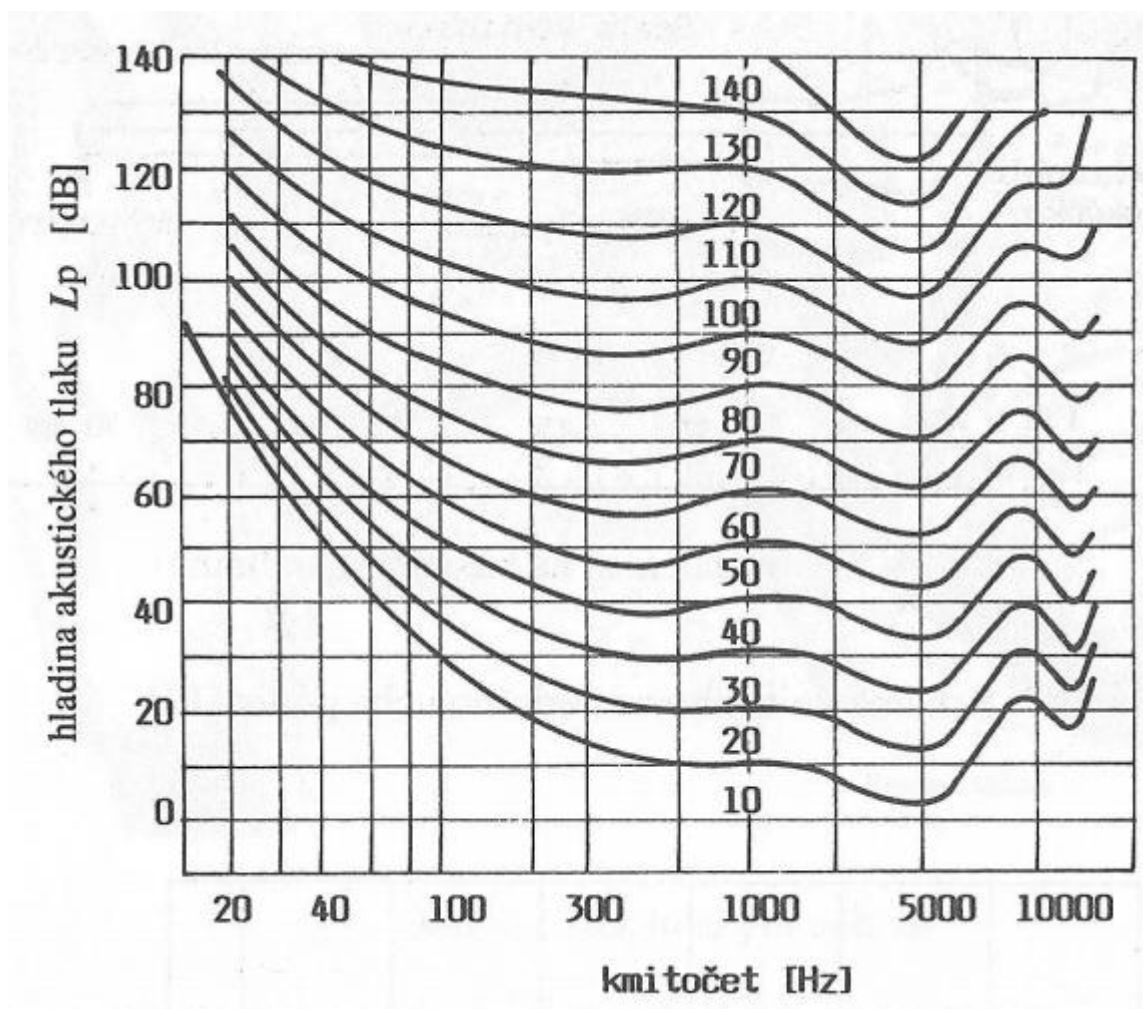
- **ustálený**, jeho hladina se v čase nemění o více jak 5 dB
- **proměnný**, hladina se v čase mění
- **přerušovaný**, mění se náhle
- **impulsní**, který je vytvářen řadou jednotlivých impulsů

Hladina akustického tlaku (0 dB) odpovídá minimálnímu podráždění, které působí na sluchový vjem. Práh bolestivosti (120 dB) představuje horní hranici sluchovému vjemu.

Jestliže do ucha přicházejí dva tóny stejné intenzity, ale různých frekvencí, nejsou vnímány jako stejně hlasité, ačkoli tlak vyvolaný akustickým rozruchem v ušním bubínku je v obou případech stejný. Tento rozdíl subjektivní hlasitosti tónu je vyvolán nestejnou citlivostí sluchového orgánu pro různé frekvence. Nejvyšší citlivosti se jeví o oblasti přibližně od 2kHz do 4kHz, kde už tlaky nižší než  $2 \cdot 10^{-5}$  Pa vyvolávají sluchový vjem. Proto i v této práci byla zvolena spínací frekvence 2kHz, kde je citlivost lidského ucha největší. Směrem k dolní a horní mezi slyšení citlivost ucha klesá. Například tón o frekvence 100 Hz je slyšitelný teprve při akustickém tlaku kolem  $2 \cdot 10^{-3}$  Pa, a tón 10 kHz potřebuje pro slyšitelnost tlak přibližně  $10^{-4}$  Pa. [7]

## 1.1 Weber – Fechnerův zákon

Lidské ucho nevnímá hlasitosti tónů stejně v celém zvukovém spektru slyšitelné oblasti. Aby bylo dosaženo jednoty, byl mezinárodně normován svazek křivek stejné hlasitosti, který je uveden na *obr. 1.1*.



Obr. 1.1. Weber – Fechnerův zákon

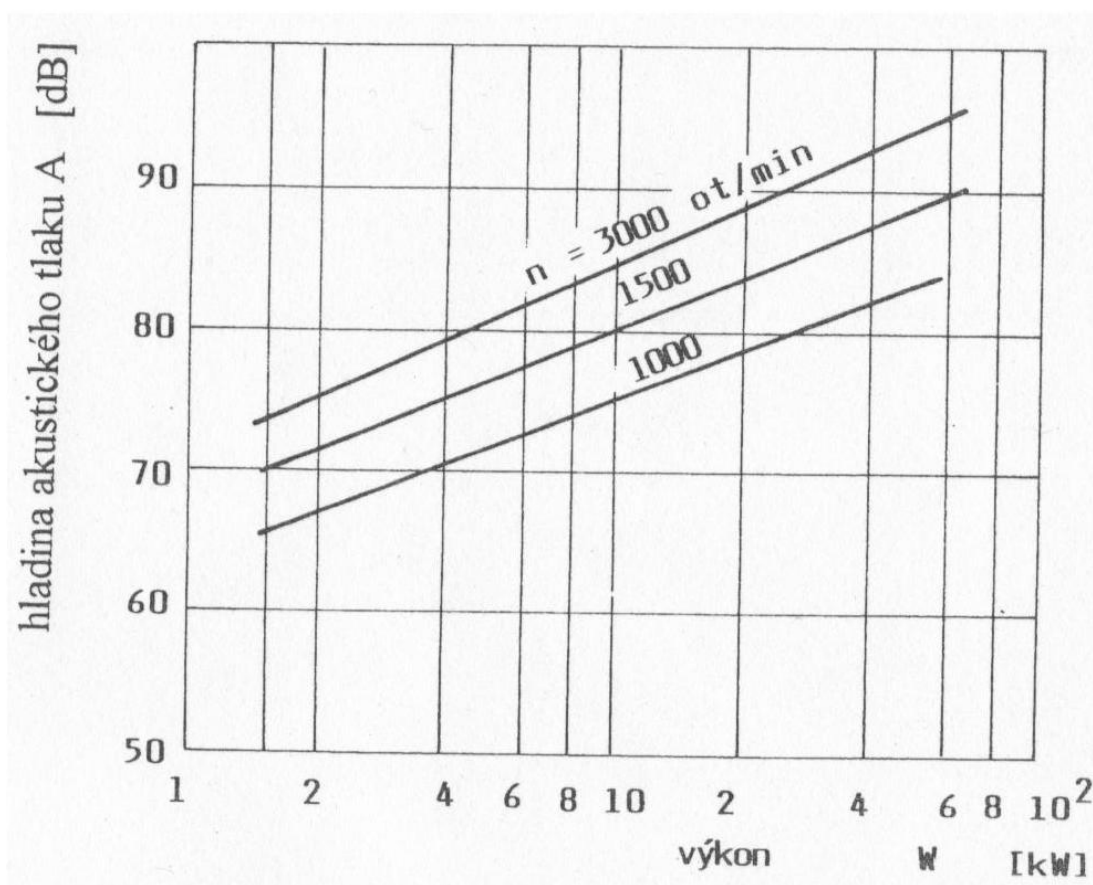
Uvedený diagram znázorňuje, jak jsou křivky stejné hlasitosti závislé na frekvenci. Svislá stupnice je logaritmická, což je v souladu s Weber-Fechnerovým fyziologickým zákonem, který říká, že hlasitost daného tónu roste řadou aritmetickou, roste-li jeho fyzikální intenzita řadou geometrickou. [6]

## 1.2 Hluk – příčiny vzniku u asynchronního motoru

Při provozu elektrických točivých strojů je v jejich okolí vždy přítomný hluk způsobený různými částmi a daného systému stroje. U točivých elektrických strojů jsou dominantní zejména následující tři skupiny hluku:

- **hluk elektromagnetického původu** – chvění kostry a jiných částí stroje způsobené elektromagnetickými silami nebo magnetostrické magnetického obvodu (vzniká při změnách délky plechů transformátoru jako následek přemagnetování střídavého pole)
- **hluk mechanického původu** – způsobený ložisky, nevyvážením rotujících částí
- **hluk ventilačního původu** – způsobován především chodem ventilátoru stroje a jeho nejbližším okolím

[5]



Obr. 1.2. Hlučnost elektrických točivých strojů

## 2 Harmonická analýza proudu $I_z$ při proměnné PWM

### 2.1 Obecně

Numerickým výpočtem

$$f(t) = \sum_{n=0}^{\infty} \left( a_n \cos\left(\frac{2\pi n}{T}t\right) + b_n \sin\left(\frac{2\pi n}{T}t\right) \right) \quad (2.1.)$$

kde

$$a_n = \frac{2}{T} \int_0^T f(t) \cos\left(\frac{2\pi n}{T}t\right) dt \quad (2.2.)$$

$$b_n = \frac{2}{T} \int_0^T f(t) \sin\left(\frac{2\pi n}{T}t\right) dt \quad (2.3.)$$

Pro výpočet spektra signálu, při kterém v půlce Fourierova okna změňíme spínací frekvenci z 1,8kHz na frekvenci 2,2kHz, bude Fourierova řada vypadat následovně:

$$a_n = \frac{2}{T} \left[ \int_0^{T_1} f_1(t) \cos\left(\frac{2\pi n}{T}t\right) dt + \int_{T_1}^{T_2} f_2(t) \cos\left(\frac{2\pi n}{T}t\right) dt \right] \quad (2.4.)$$

$$b_n = \frac{2}{T} \left[ \int_0^{T_1} f_1(t) \sin\left(\frac{2\pi n}{T}t\right) dt + \int_{T_1}^{T_2} f_2(t) \sin\left(\frac{2\pi n}{T}t\right) dt \right] \quad (2.5.)$$

Po dosazení za

$$f_x(t) = \sin(2\pi f_x t) \quad (2.6.)$$

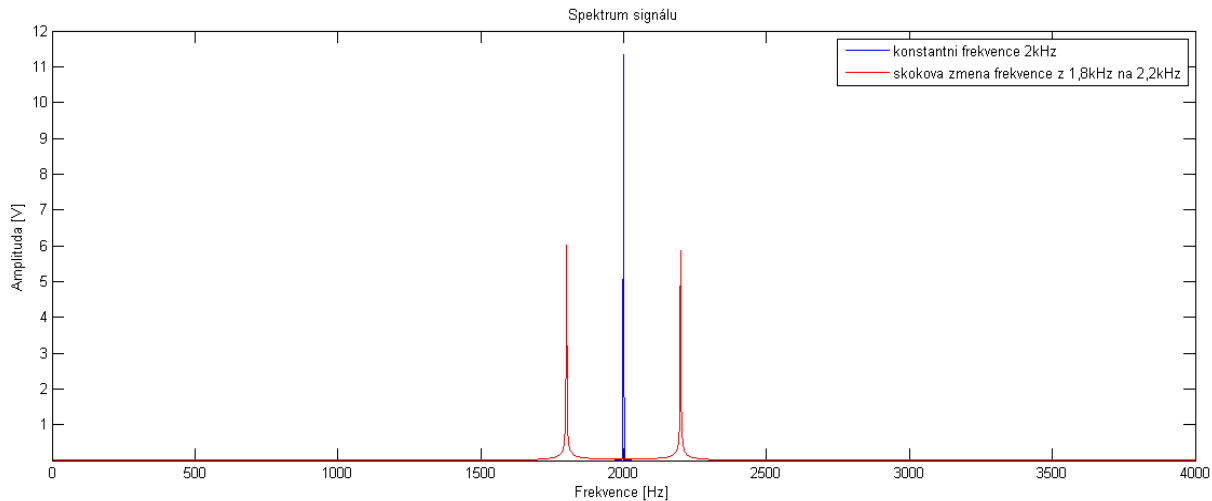
frekvencemi 1,8kHz a 2,2kHz dostaneme:

$$a_n = \frac{2}{T} \left[ \int_0^{T_1} \sin(2\pi \cdot 1800t) \cos\left(\frac{2\pi n}{T}t\right) dt + \int_{T_1}^{T_2} \sin(2\pi \cdot 2200t) \cos\left(\frac{2\pi n}{T}t\right) dt \right] \quad (2.7.)$$

$$b_n = \frac{2}{T} \left[ \int_0^{T_1} \sin(2\pi \cdot 1800t) \sin\left(\frac{2\pi n}{T}t\right) dt + \int_{T_1}^{T_2} \sin(2\pi \cdot 2200t) \sin\left(\frac{2\pi n}{T}t\right) dt \right] \quad (2.8.)$$

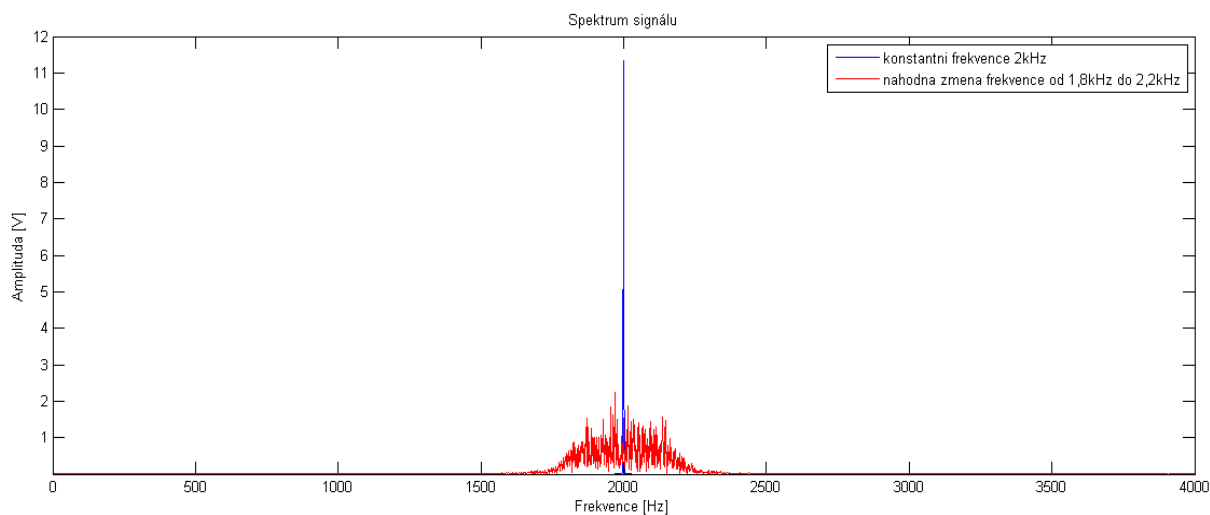
[3]

Obr. 2.1. ukazuje frekvenční spektrum pilového signálu, při němž se změnila spínací frekvence z 1,8kHz na 2,2kHz v polovině Fourierova okna. Původní spektrální čára na frekvenci 2kHz se rozdělila na dvě čáry s poloviční velikostí.



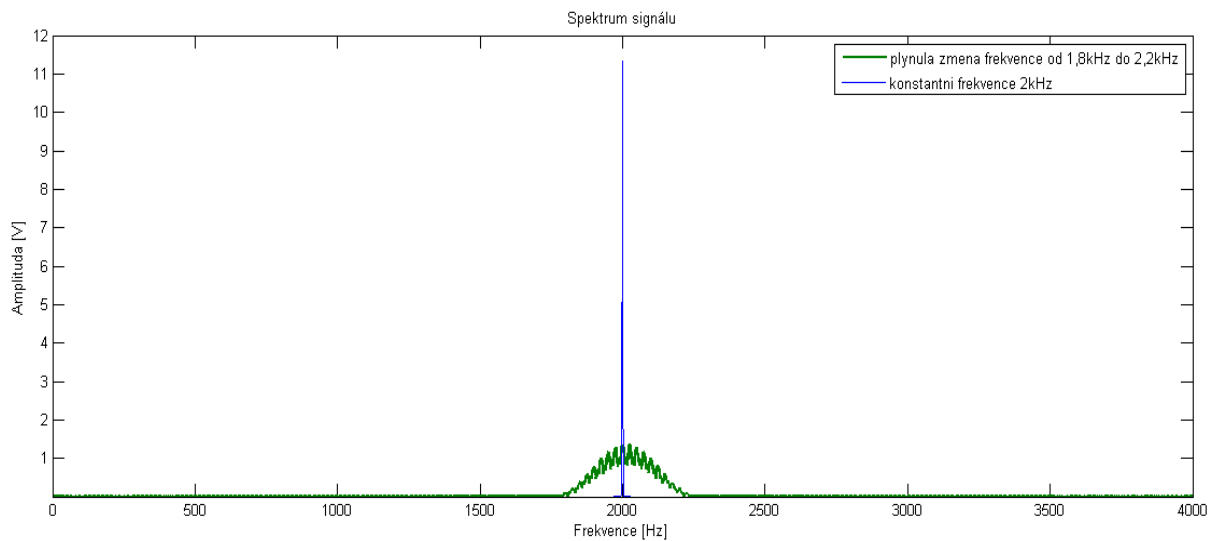
Obr. 2.1. Změna spínací frekvence z 1,8kHz na 2,2kHz

Na obr.2.2. je frekvenční spektrum při náhodně změně frekvence v rozmezí od 1,8kHz do 2,2kHz, kde je vidět „rozmazání“ spektra v rozsahu měnící se frekvence



Obr. 2.2. Náhodná změna frekvence od 1,8kHz do 2,2kHz

Na obr. 2.3. je plynulá změna frekvence během fourierova okna postupně od 1,8kHz až do 2,2kHz.

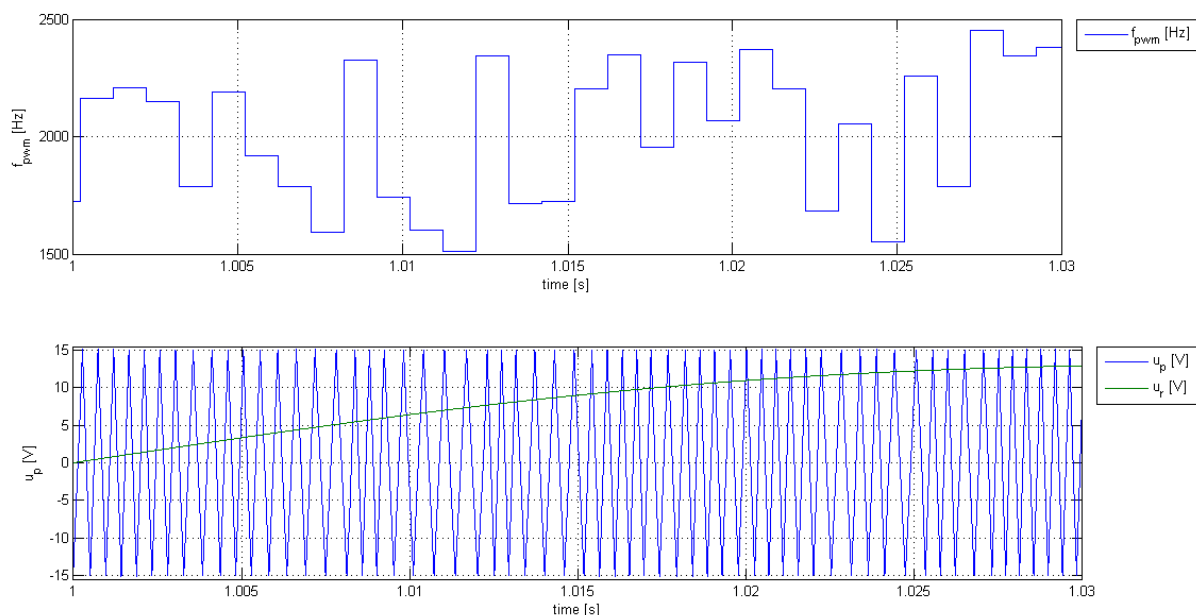


Obr. 2.3. Plynulá změna frekvence od 1,8kHz do 2,2kHz

Pro změnu frekvence pily existuje mnoho algoritmů jak softwarového, tak i hardwarového řešení, nazývané random PWM, entropy PWM aj.

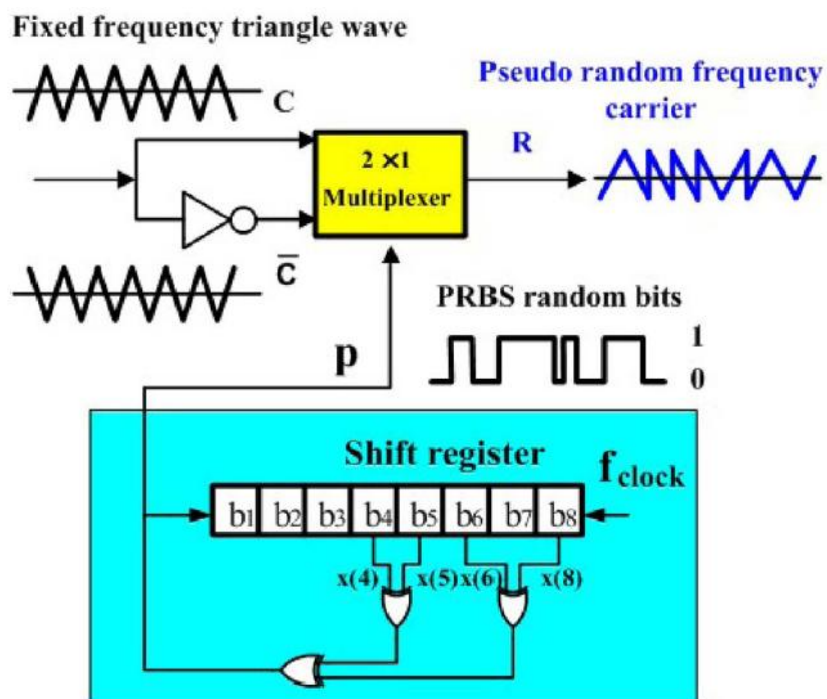
### 2.1.1 První metoda RPWM

Tato metoda spočívá v závislosti polohy spektrálních čar na spínací frekvenci. Změnami frekvence v určitém spektru dosáhneme náhrady jedné spektrální čáry blokem nižších čar v rozsahu spektru měnící se frekvence. V simulacích i v měření budou zkoumány změny parametrů, které lze nastavit. Jedná se o to, v jak širokém spektru a jak často frekvence měnit. Aby byla zaručena reprodukovatelnost, nemůže být změna frekvence čistě náhodná. Proto bude zvolena pseudonáhodná změna frekvence, tedy vygenerováno pole náhodných frekvencí, ze kterých budou jednotlivé prvky vyčítány. Vliv velikosti tohoto pole bude také zkoumán v simulacích i v měření.

Obr. 2.4. Výběr  $f_{pwm}$  v určitém rozsahu, koincidence pilového signálu s řídicím napětím

### 2.1.2 Druhá metoda RPWM

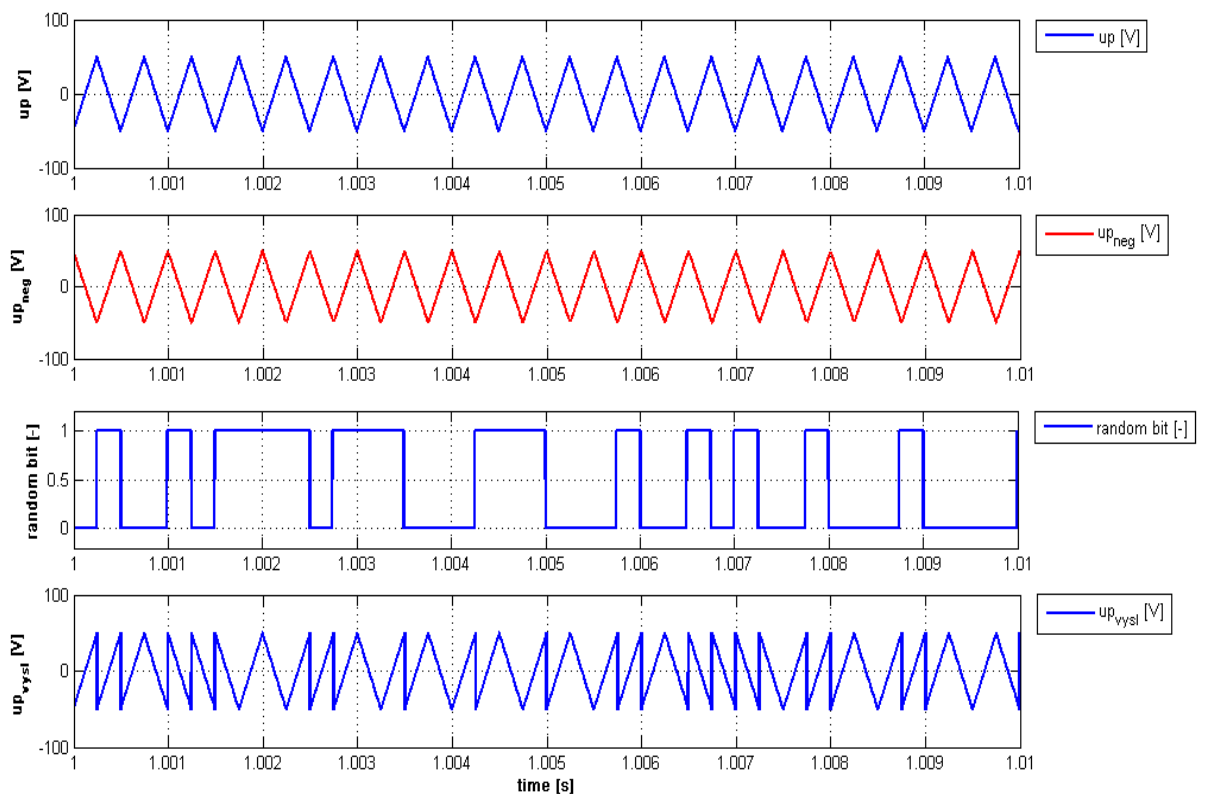
Tato metoda je založena na skládání dvou synchronních pilových signálů. Oba mají stejnou pevnou frekvenci, ale opačnou fází. V našem případě je frekvence 2kHz. Náhodným výběrem z pseudonáhodné posloupnosti čísel bitem "0" a "1" vybereme příslušný pilový signál (bit "0" normální pilu, bit "1" negovanou pilu). Tato metoda může být řešena čistě hardwarovými obvody, jak je ukázáno na obr. 2.5.



Obr. 2.5. Základní princip hardwarového řešení [1]



Na obr. 2.6. je ukázána simulace skládání výsledného pilového signálu "up<sub>vysl</sub> [V]" z pilového signálu "up [V]" a negovaného signálu "up<sub>neg</sub> [V]" bitem "random bit [-]". V kapitole 2.2. bude ukázáno, jak se projeví velikost bitového registru (např. 16, 32, 64, 128bitů) na výsledné spektrum signálu. [1]

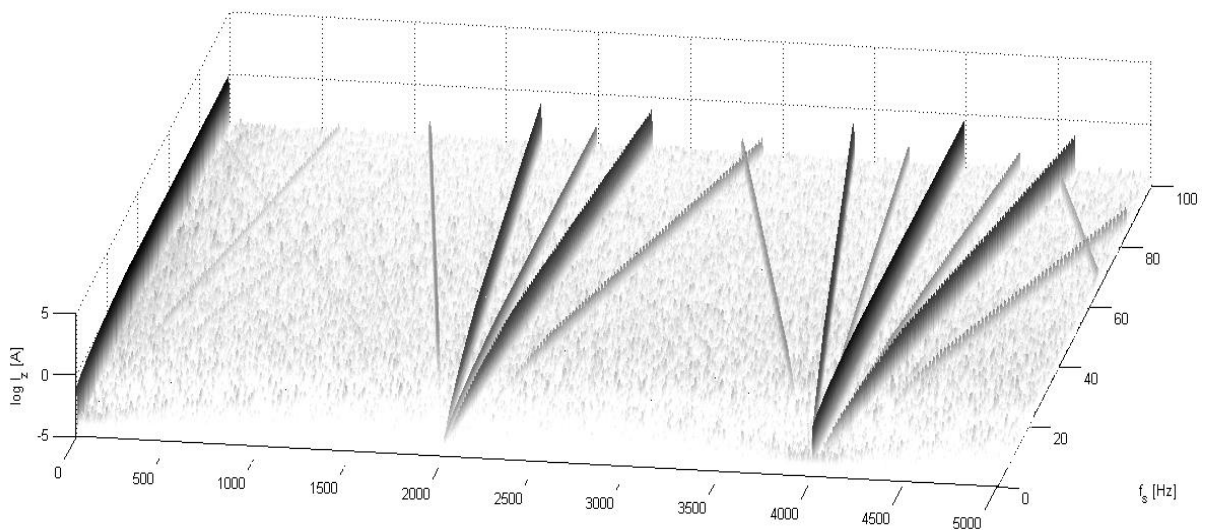


Obr. 2.6. Skládání výsledného pilového signálu

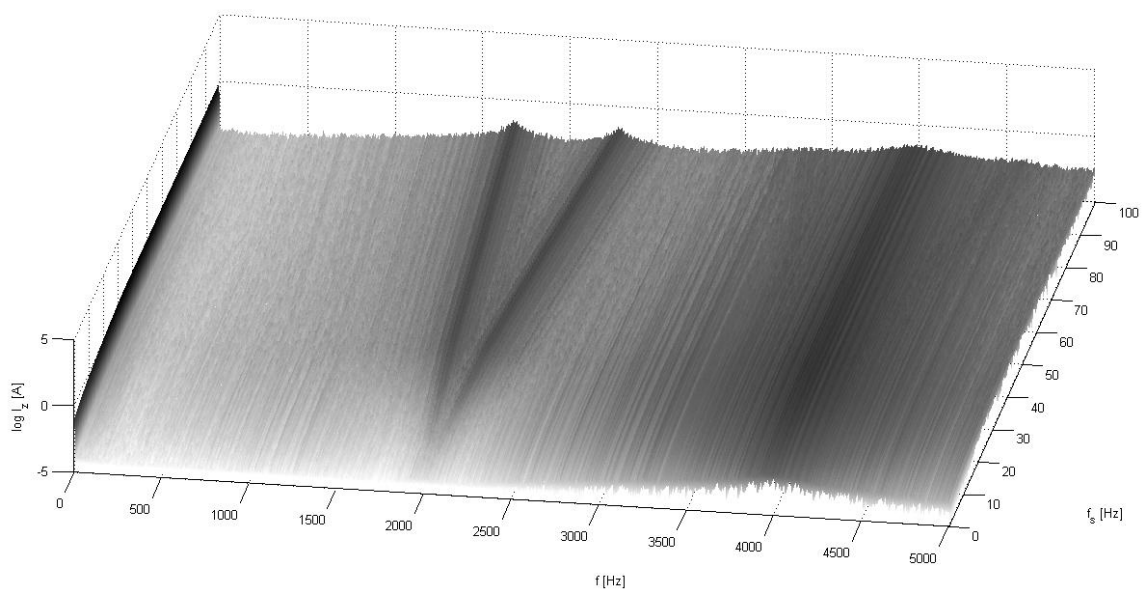
## 2.2 Výsledky simulace

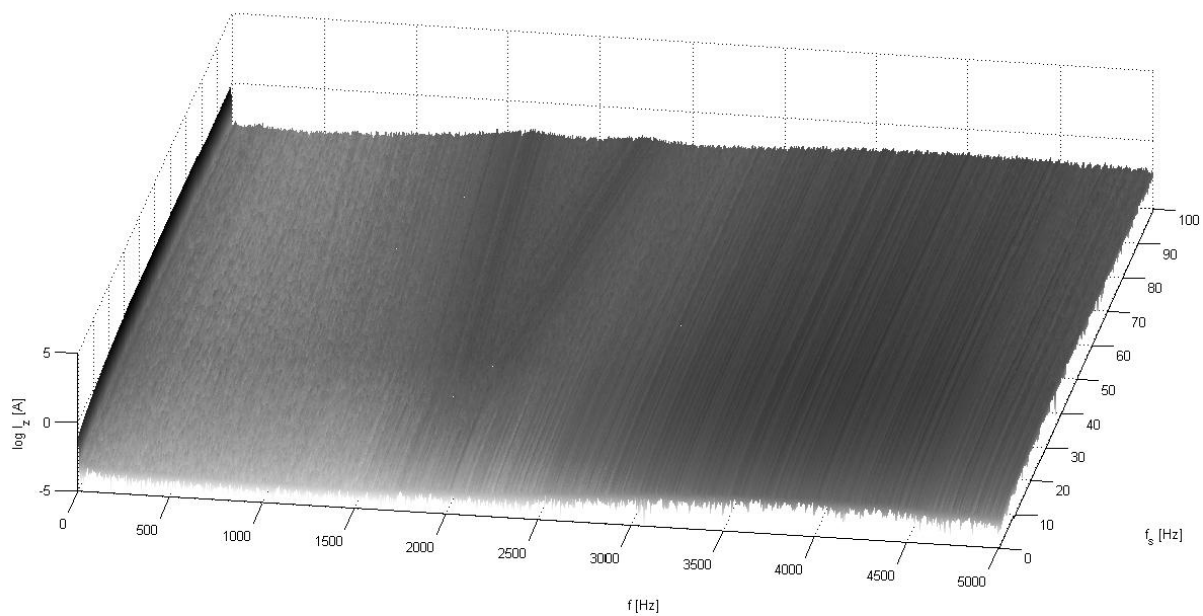
Spektrum proudu  $I_z$  vynesené do 3D grafu v závislosti na statorové frekvenci tvoří tzv. V-křivky. Kolem lichých násobků modulačního kmitočtu jsou čáry na frekvencích lichých násobků trojnásobku statorového kmitočtu, tedy o frekvencích  $(1, 3, 5, 7...) \cdot f_p + (3, 9, 15, 21...) \cdot f_s$ . Samotný spínací kmitočet by se ve spektru neměl objevit. Zde ho však můžeme vidět, chyba je zřejmě v použití malého kroku simulace a absence antialiasing filtru. Kolem sudých násobků modulačního kmitočtu jsou čáry na frekvencích sudých násobků trojnásobku statorového kmitočtu, tedy o frekvencích  $(0, 2, 4...) \cdot f_p + (0, 6, 12, 18...) \cdot f_s$ . Čáry  $(6, 12, 18...) \cdot f_s$  nejsou z důvodu předpokladu sinusových proudů v motoru. Předpoklad harmonických proudů není zcela nesprávný.

Vzhledem k induktivnímu charakteru zátěže amplitudy harmonických fázových proudů velmi rychle klesají. Protože je prakticky nemožné spočítat harmonické větvových napětí a proudů až do nekonečné frekvence, ukázal se jako vhodný kompromis mezi přesností a časovou náročností výpočtu výpočet do cca 5kHz. Proudové harmonické nad touto frekvencí jsou již tak malé, že již nemá viditelný vliv. [2]

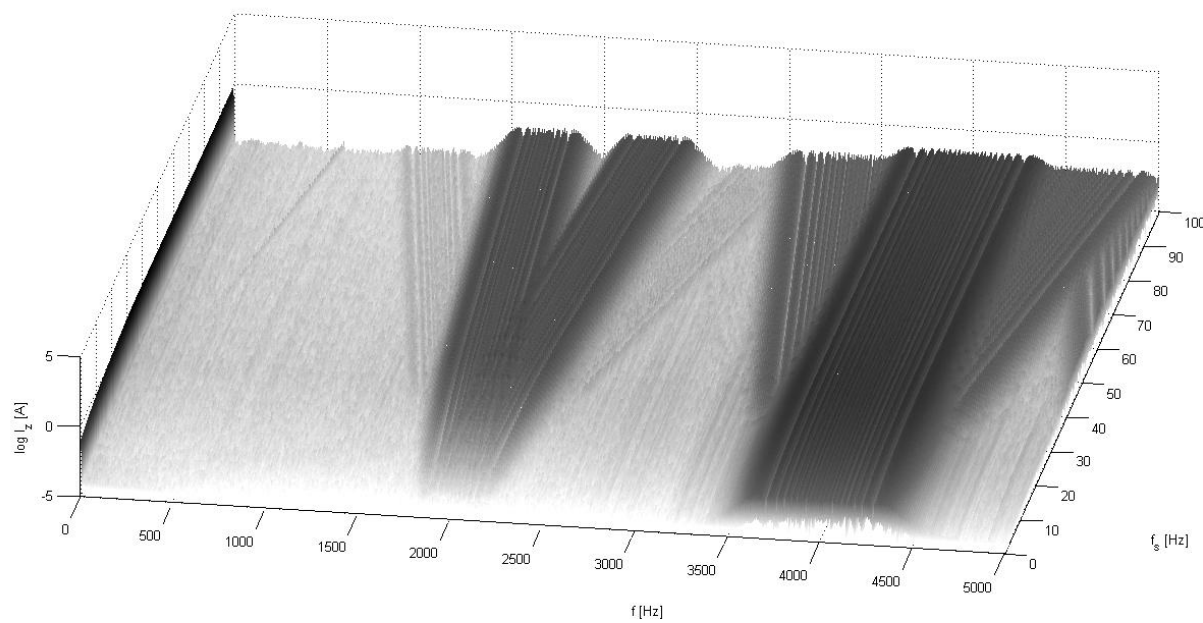


Obr. 2.7. PWM s pevnou frekvencí 2kHz

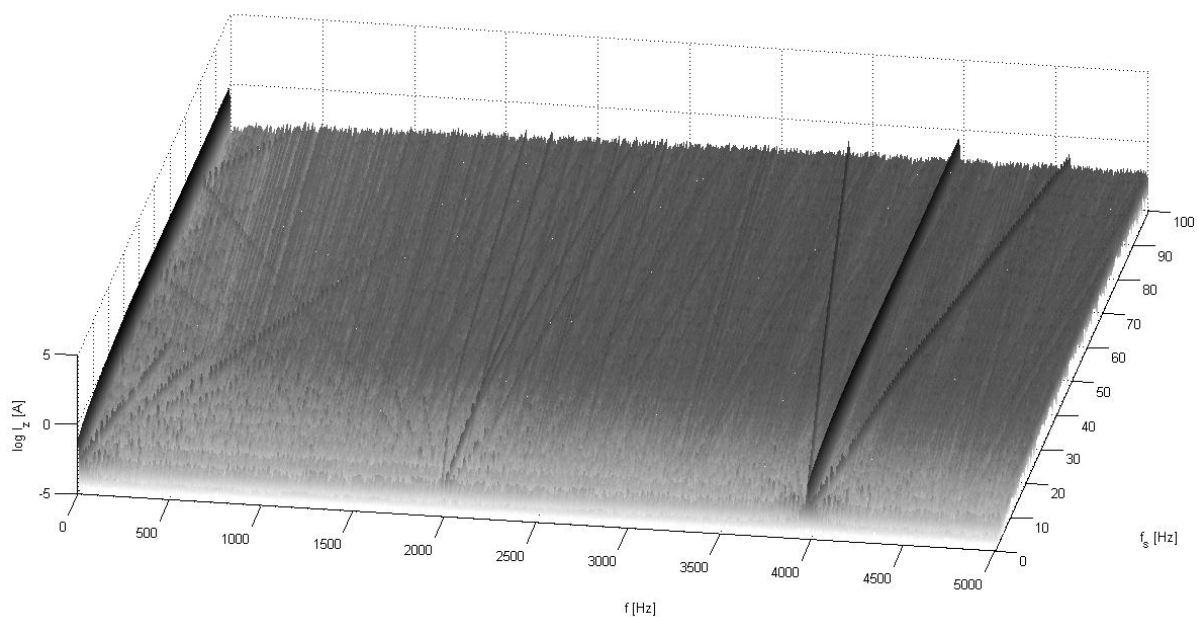
Obr. 2.8. Random PWM 2kHz $\pm$ 300Hz, pole o velikosti 128prvku



Obr. 2.9. Random PWM 2kHz±500Hz, pole o velikosti 512prvku



Obr. 2.10. Random PWM postupný nárůst frekvence z 1,8kHz do 2,2kHz



Obr. 2.11. Random PWM druhá metoda, 512prvku

### 2.3 Zvukový záznam

Samotné frekvenční spektrum proudu meziobvodu  $I_z$  nemusí být rozhodující pro posouzení hlučnosti pohonu, proto byla využita funkce WAVWRITE programu Matlab, která vytvoří zvukový záznam vybraného signálu.

Proud  $I_z$  je navzorkován frekvencí 44100Hz, takže mohou být zaznamenány frekvence do 22kHz. Počet kvantizačních úrovní je roven  $N$ -té mocnině čísla 2, náš kvantovaný signál má  $N=16$  bitů tzn. 65536 úrovní. Odstup signálu od šumu je 96,32dB.

Zvukový záznam je proveden pro všechny typy náhodně se měnících frekvencí, porovnán mezi sebou a vybrán ten s nepříjemnějším nebo spíše nejméně rušivým zvukem.

## 3 Měření hluku na laboratorním pohonu

### 3.1 Popis měřené soustavy

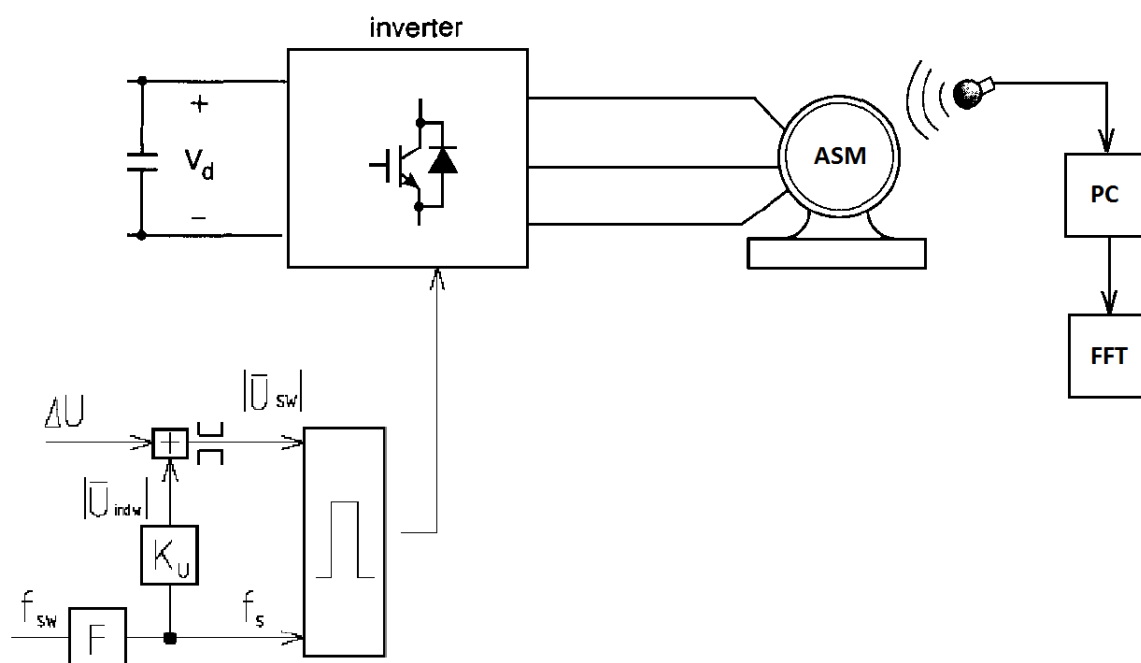
Měření bylo provedeno na následující soustavě:

**Motor:** Siemens D-91056 D/Y 400/690V;  $\cos\varphi=0,84$ ; 11kW, 21,5/12,4A, 1460ot/min

**Měnič:** Semikron SKCB 4m7, napětí meziobvodu 238Vss

**Diktafon:** Tascam DR-1 WAC recording: 44.1kHz/48kHz, 16-bit or 24-bit

**DSP:** Texas Instruments TMS320F2812



Obr. 3.1. Schéma měřené soustavy

#### 3.1.1 Popis řídicí jednotky

Byla použita řídicí jednotka Texas Instruments TMS320F2812. Jedná se o moderní DSP pro řízení elektrických pohonů. Je vybaven 32bitovým signálovým procesor s typickou taktovací frekvencí 150Mhz. Doba instrukčního cyklu je tedy 6,667ns. Tento procesor je hojně využíván v regulačních a řídicích aplikacích. V základním jádru obsahuje obvod tři 32bitové časovače, šest paralelních portů, A/D převodník, watchdog a jiné. A/D převodník je v regulaci využíván pro snímání polohy.

### 3.1.2 Nastavení řídicí jednotky

Jádro procesoru a jeho periférie je nutno nastavit pomocí tzv. konfiguračních registrů. Při práci s registrem, např. při zapisování do registru je možno zapisovat do celého registru najednou nebo po jednotlivých bitech. Při aplikaci v reálném čase je třeba řešit pojem přerušení, které je definováno jako zastavení běhu programu nějakou událostí (vnější nebo vnitřní). Dojde ke skoku na adresu rutiny přerušení ISR (Interrupt Service Routine). Po vykonání rutiny přerušení dojde k návratu na místo v programu, na kterém byl běh přerušen. Po provedení přerušení musí být vymazán příznak přerušení – „flag“, aby bylo možné znovu přijmout přerušení od příslušného zdroje. Vymazání příznaku přerušení se provádí u tohoto procesoru zápisem „1“ na příslušný bit flag registru. Procesor má omezený počet vývodů, a proto je třeba sdílet funkci pinů. Je možné volit, zda je daný pin využíván jako GPIO (General Purpose Input Output) pin nebo jako pin periférie. Výběr z těchto možností se provádí nastavením registrů GPxMUX a GPxDIR, kde „x“ označuje příslušnou stupně/výstupní bránu procesoru. GPxMUX určuje, zda bude daný pin pracovat v režimu GPIO nebo v režimu periferním. Registr GPxDIR určuje, zda půjde o vstupní nebo výstupní pin (v případě GPIO, jinak se neuplatní).

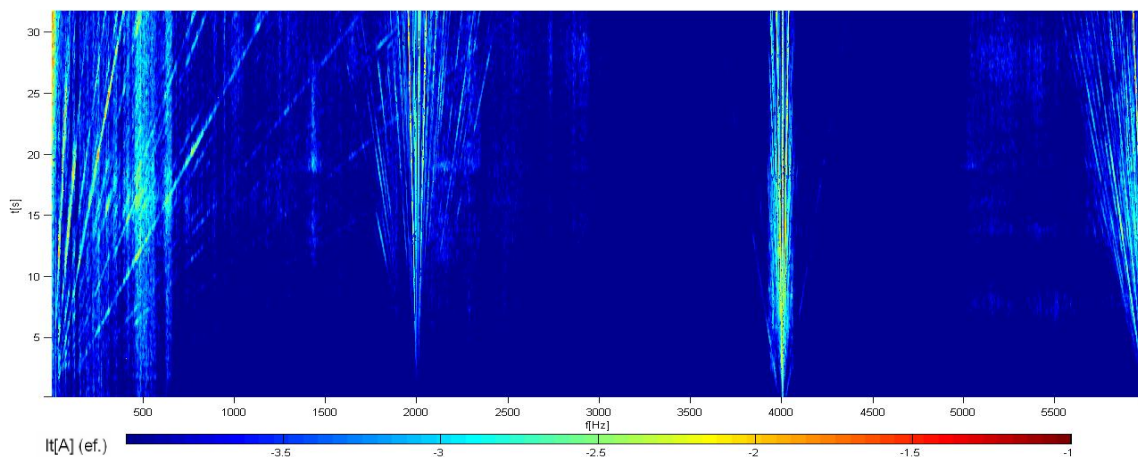
Event Manager je periferní jednotka nacházející uplatnění především v aplikacích pro řízení elektrických pohonů. Obsahuje univerzálně použitelné časovače, komparační registry, obvody pro vyhodnocení polohy a rychlosti otáčení a obvody pro generování PWM. TxCON je řídicí registr čítače a je možno v něm nastavit např. spuštění čítače, předděličku vstupního hodinového signálu, zdroj hodinových pulzů, povolení komparace, chování čítače při ladění programu, směr čítání a další. Čítače mohou pracovat v různých režimech čítání. Pro řešení diplomové práce byl pro první metodu zvolen mód nepřerušovaného čítání nahoru a dolů. V tomto případě začne čítač čítat vzestupně až do hodnoty Period Registru TxPR, poté se směr čítání změní a čítač čítá sestupně. Perioda čítače je poté 2.TxPR hodinových taktů. Pro druhou metodu se využívalo i samotného čítání nahoru.. Perioda čítače je poté TxPR hodinových taktů.

[4]

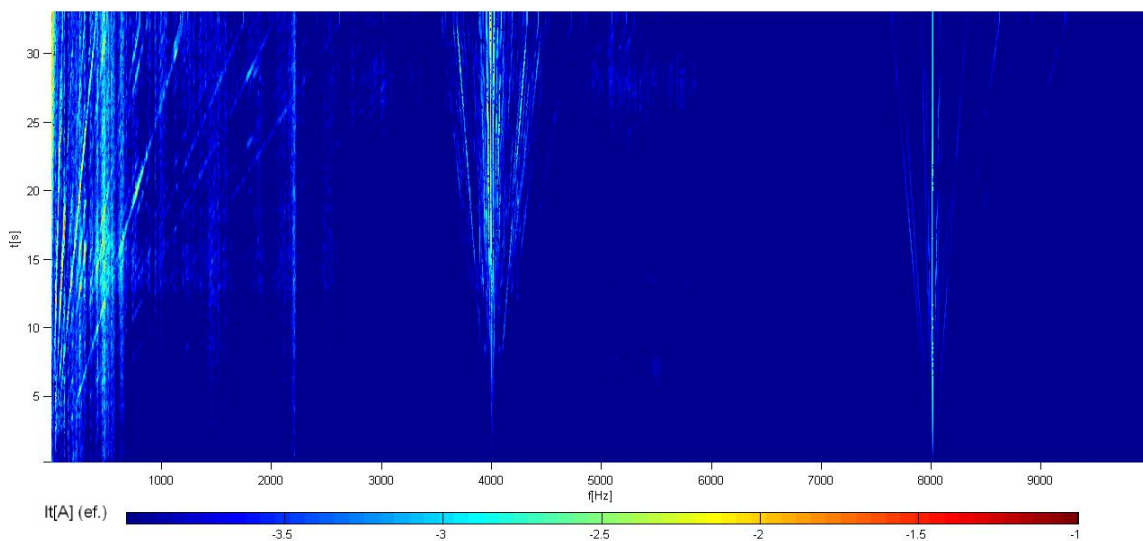
### 3.1.3 Výsledky měření

Pro měření bylo použito skalárního řízení bez zpětné vazby s rozběhovou rampou. Rozběh byl nastaven jen do 17Hz z důvodu zvyšujícího se hluku mechanického původu způsobeného zejména ložisky popř. nevyvážením rotujících částí a hluku ventilačního původu. Doba rozběhu na 17 Hz byla 30sekund.

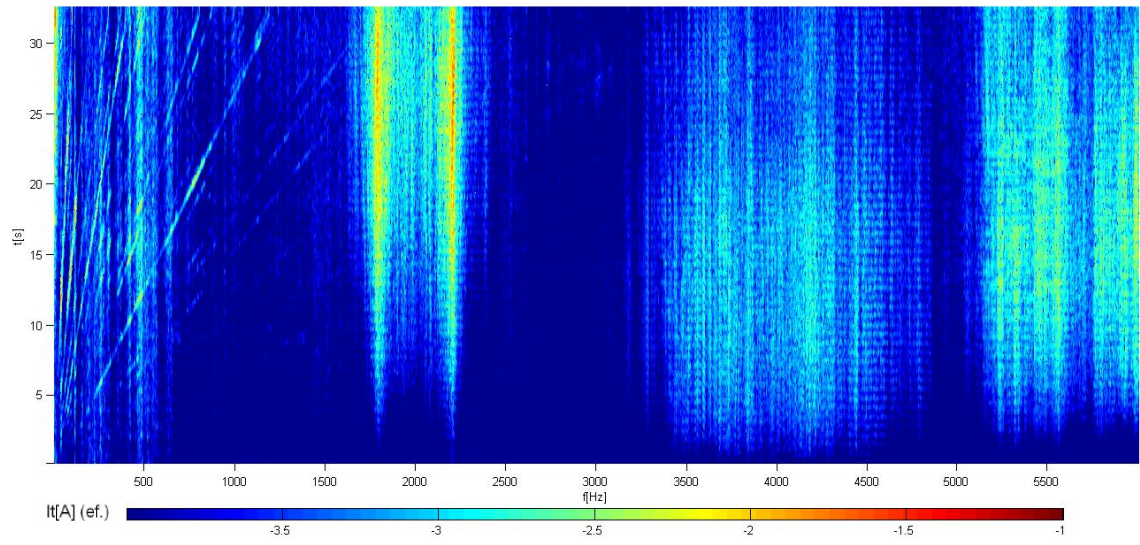
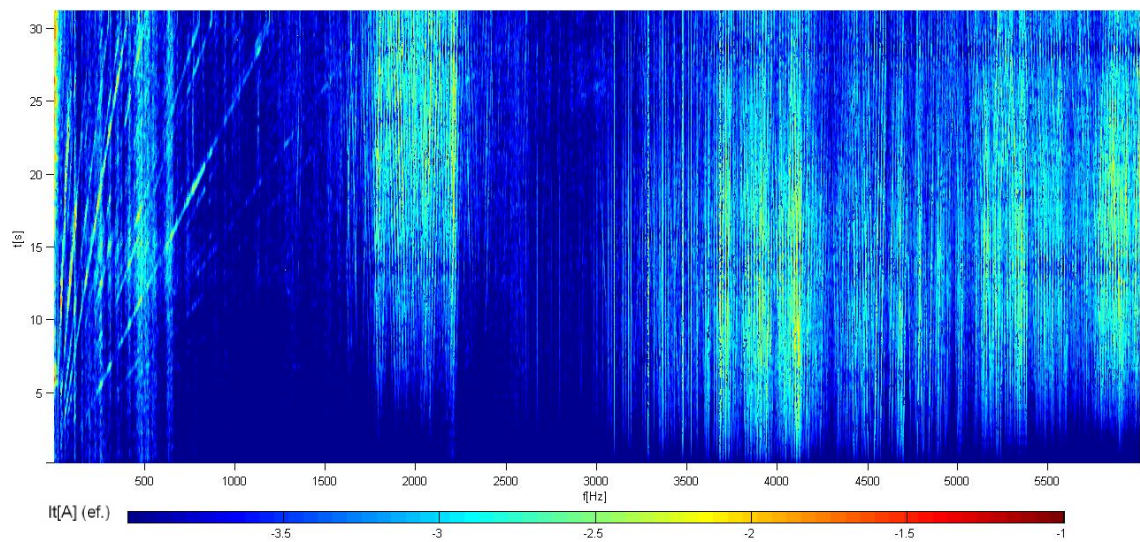
Bylo vybráno deset různých nastavení náhodné PWM. Ty byly následně změřeny a bylo porovnáno, jaký bude mít vliv nastavení jednotlivých parametrů.



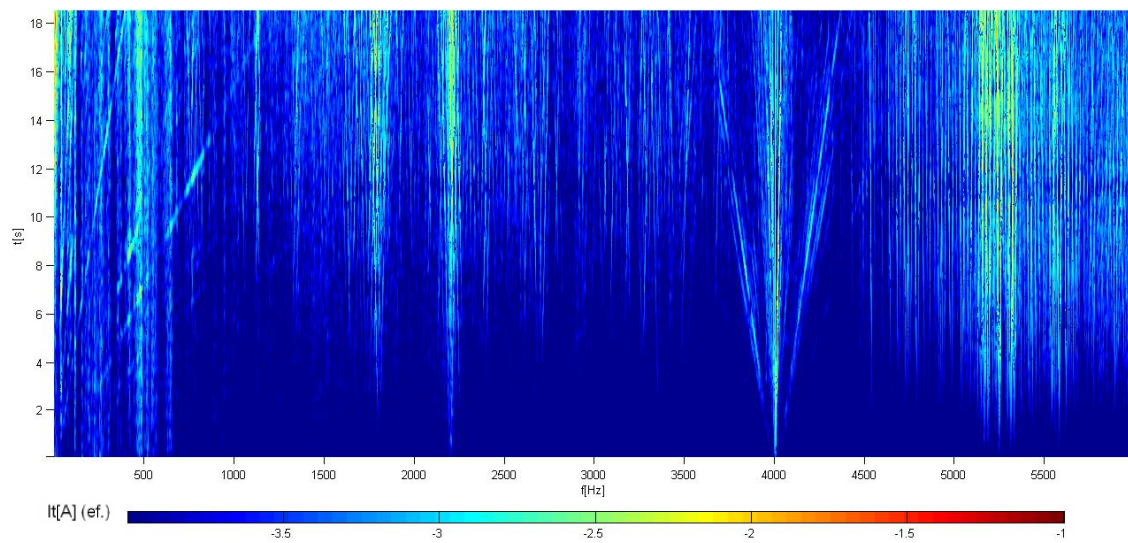
Obr. 3.2. PWM, spínací kmitočet 2kHz



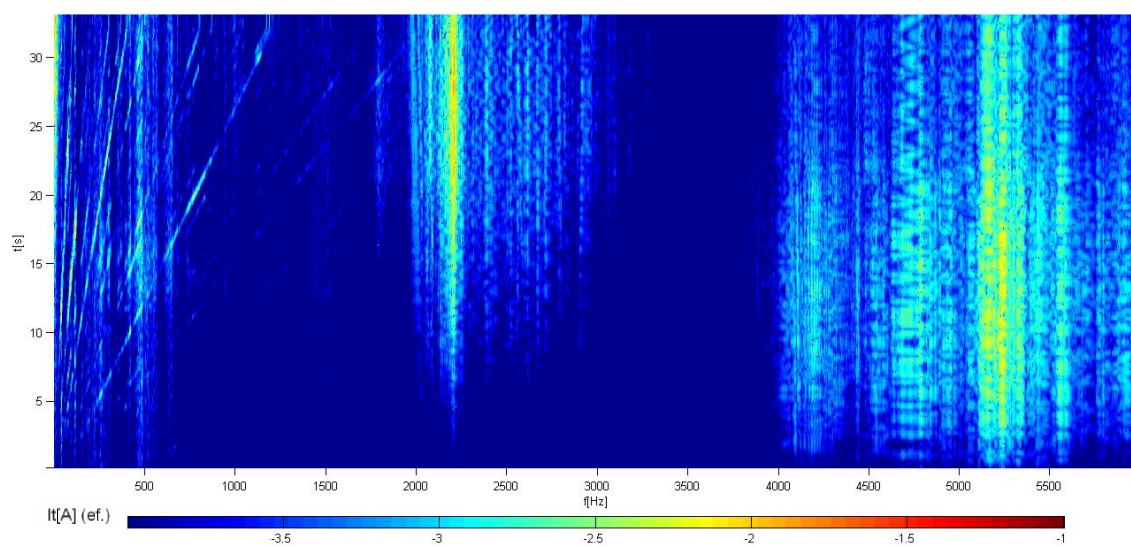
Obr. 3.3. PWM, spínací kmitočet 4kHz

Obr. 3.4. Random PWM 2kHz  $\pm$  300Hz pole 128prvků, změna každé 10té přerušeníObr. 3.5. Random PWM 2kHz  $\pm$  300Hz pole 128prvků, změna každé přerušení





Obr. 3.6. Druhá metoda random PWM, pole 128prvků



Obr. 3.7. Random PWM od 1700Hz do 2300Hz čítání nahoru a dolů, změna každé 5té přerušování

## Závěr

Cílem této diplomové práce bylo vybrat vhodnou modulaci, která by potlačila hluk asynchronního motoru. Byly nasimulovány a zrealizovány dvě metody, na nichž byl zjišťován vliv změny parametrů těchto metod na výsledné spektrum zvuku.

Při řízení klasickou PWM vzniká čárové spektrum, které je ukázáno na *obr. 2.7.*, zvuková stopa má nepříjemný pískající zvuk. Zatímco při řízení random PWM dochází z rozmazání spektra v rozsahu měnicích se frekvencí spínání. Jako nejpříjemnější se zdál rozsah  $2,3\text{kHz} \pm 300\text{Hz}$ , kdy zvuk pohonu namísto pískání šelestil. Z důvodu reprodukovatelnosti, např. při použití na vozidlech, nemůže být změna frekvence čistě náhodná, proto bylo generováno pole frekvencí, ze kterého byly prvky vyčítány. Při použití pole o velikosti menším než 64prvků se zvukový záznam neprojevoval jako šelestění, ale jako velmi nepříjemný hluk složený z mnoha frekvencí. Když bylo použito pole větší než 256prvků, zvukový projev se již podobal nekonečné řadě prvků. Dalším parametrem byla četnost změny frekvence, jako nejpříjemnější se zdála změna každé přerušení. Pokud se měnila frekvence každé 5té, 10té nebo větší přerušení, zvukový projev zněl kolísavě.

Ve druhé metodě nebylo možné nastavit rozsah změny frekvence spínání, proto byly nastavovány jen ostatní dva parametry. Výsledky byly obdobné jako v první metodě, nejpříjemnější je pole o velikosti více než 256prvků, změny každé přerušení, avšak první metoda měla mnohem lepší zvukový projev a menší šum ve spektru.

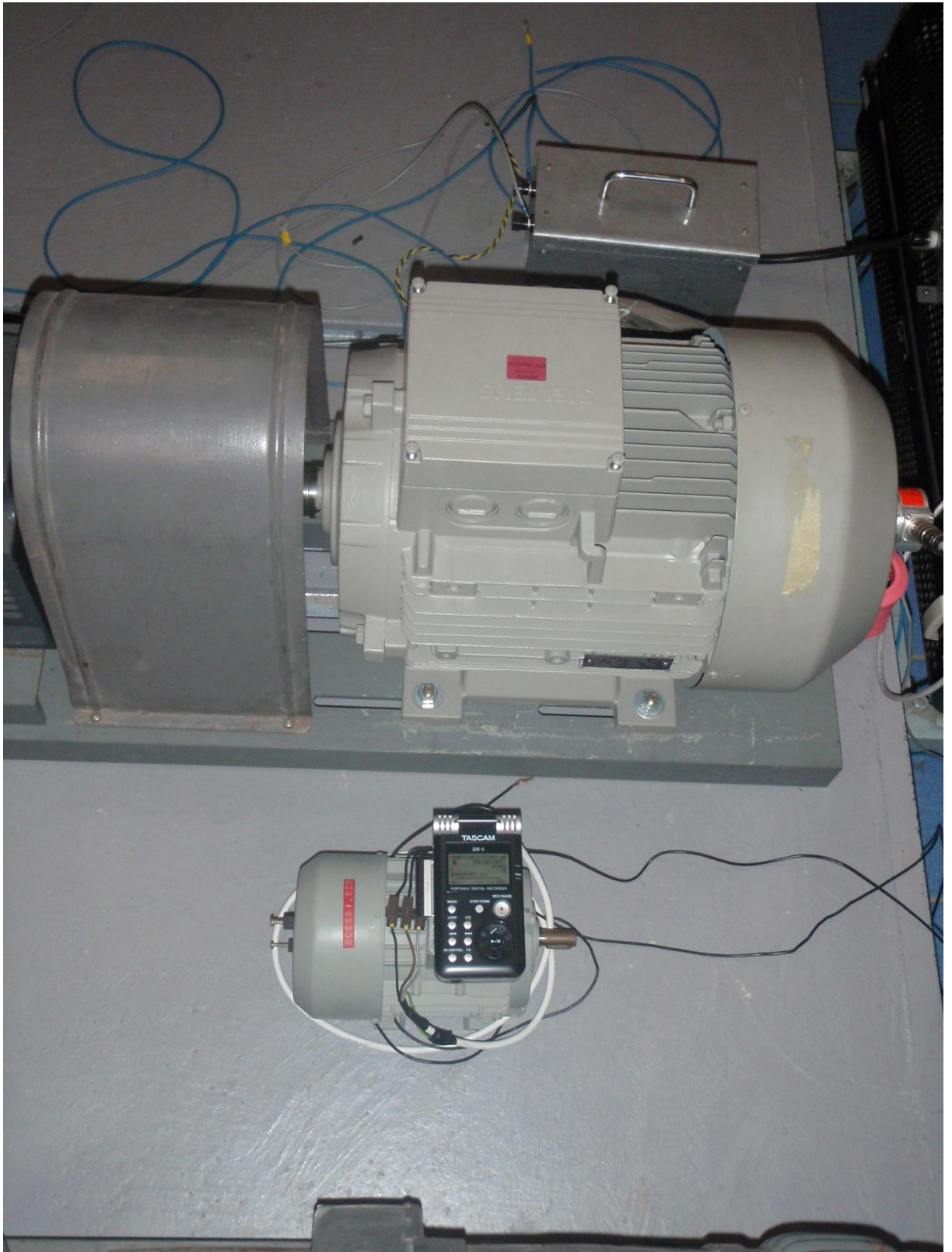
Jako nejlepší se tedy projevila první metoda při nastavení  $2,3\text{kHz} \pm 300\text{Hz}$ , pole o velikosti 512prvků, změna frekvence každé přerušení.

Protože spektrum změřené diktafonem nelze přesně porovnat s výsledky simulace, při dalším zkoumání bych změřil spektrum proudu stejnosměrného meziobvodu reálného pohonu a porovnal s výsledky simulace a se spektrem změřené diktafonem.

## Seznam literatury a informačních zdrojů

- [1] Young-Cheol Lim, Member, IEEE, Seog-Oh Wi, Jong-Nam Kim, and Young-Gook Jung A Pseudorandom Carrier Modulation Scheme IEEE TRANSACTIONS ON POWER ELECTRONICS, VOL. 25, NO. 4, APRIL 2010
- [2] JANDA, M.: Harmonické v meziobvodu trakčního pohonu s asynchronním motorem. Plzeň, ZČU, vedoucí disertační práce Doc. Ing. Karel Zeman, CSc.,2007
- [3] Majorský, J.: Harmonické v napěťovém střídači řízeném Entropy PWM. Plzeň: Západočeská univerzita v Plzni, Fakulta elektrotechnická, 2009, 36stran, Vedoucí diplomové práce Ing. Martin Janda, Ph.D.
- [4] Mužíková, V.: Řízení napěťového střídače, Plzeň: Západočeská univerzita v Plzni, Fakulta elektrotechnická, 2010, 56stran, Vedoucí bakalářské práce Ing. Tomáš Glasberger, Ph.D.
- [5][http://www.ueen.feec.vutbr.cz/cz/images/stories/images\\_laboratory/Diagnostika/Files/03\\_Mereni\\_hlukovych\\_emisi\\_elektrickyh\\_stroju.pdf](http://www.ueen.feec.vutbr.cz/cz/images/stories/images_laboratory/Diagnostika/Files/03_Mereni_hlukovych_emisi_elektrickyh_stroju.pdf) citace:23.4.2012
- [6] BERAN, V.: Chvění a hluk, Plzeň, ZČU, 2010
- [7] NOVÝ, R.: Hluk a chvění, Praha, Vydavatelství ČVUT Praha, 2000
- [8] DANZER, J.: Proudý o nízkých kmitočtech ve stejnosměrném meziobvodu napěťového střídače. Plzeň, 2003, 20 s.
- [9] MathWorks. Product Documentation. [online]. Poslední změna 26.4.2012. Dostupné z: <http://www.mathworks.com/access/helpdesk/help/techdoc/matlab.html>
- [10] LIAW, C. M., LIN, Y. M., WU, C. H., HWU, K.I. Analysis, Design, and Implementation of a Random Frequency PWM Inverter. IEEE TRANSACTIONS ON POWER ELECTRONICS, VOL. 15, NO. 5, 2000

## Přílohy



Příloha 1: Měření hluku motoru Siemens D-91056 diktafonem Tascam DR-1



Příloha 2: Štítek měřeného motoru