

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI

FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ

KATEDRA ELEKTROMECHANIKY A VÝKONOVÉ ELEKTRONIKY

DIPLOMOVÁ PRÁCE

Eliminace elektromagnetického hluku trakčního pohonu

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Bc. Michal KRONEISL**
Osobní číslo: **E12N0063P**
Studijní program: **N2612 Elektrotechnika a informatika**
Studijní obor: **Průmyslová elektronika a elektromechanika**
Název tématu: **Eliminace elektromagnetického hluku trakčního pohonu**
Zadávající katedra: **Katedra elektromechaniky a výkonové elektroniky**

Z á s a d y p r o v y p r a c o v á n í :

1. Proveďte rešerši používaných řešení potlačení elektromagnetického hluku pohonu.
2. Vybrané modulační algoritmy nasimulujte ve vybraném SW.
3. Vybrané modulační algoritmy implementujte do signálového procesoru.
4. Na laboratorním modelu pohonu porovnejte dosažené snížení generovaného hluku.
5. Zhodnoťte dosažené výsledky.

Rozsah grafických prací: **podle doporučení vedoucího**
Rozsah pracovní zprávy: **30 - 40 stran**
Forma zpracování diplomové práce: **tištěná/elektronická**
Seznam odborné literatury:


Student si vhodnou literaturu vyhledá v dostupných pramenech podle doporučení vedoucího práce.

Vedoucí diplomové práce: **Ing. Martin Janda, Ph.D.**
Katedra elektromechaniky a výkonové elektroniky

Datum zadání diplomové práce: **14. října 2013**
Termín odevzdání diplomové práce: **12. května 2014**


Doc. Ing. Jirí Hammerbauer, Ph.D.
děkan




Prof. Ing. Václav Kůs, CSc.
vedoucí katedry

V Plzni dne 14. října 2013

Anotace

Kroneisl, M. Eliminace elektromagnetického hluku trakčního pohonu, Západočeská univerzita v Plzni, Fakulta elektrotechnická, Katedra elektromechaniky a výkonové elektroniky, 2014. Vedoucí práce: Ing. Martin Janda, Ph.D.

Tato diplomová práce se zabývá způsoby snížení elektromagnetického hluku trakčního pohonu s asynchronním motorem napájeného z napěťového střídače s využitím náhodné pulsně šířkové modulace. Jsou zde uvedeny výsledky simulace vybraných algoritmů a výsledky měření na reálném pohonu. Pozornost je věnována frekvenčním spektrům napětí, proudů a akustického hluku v závislosti na nastavení modulačního algoritmu.

Klíčová slova

RPWM, RSPWM, trakční pohon, elektrický pohon, elektromagnetický hluk

Abstract

Kroneisl, M. Elimination of electromagnetic noise of traction drive, University of West Bohemia, Faculty of electrical engineering. Head: Ing. Martin Janda, Ph.D.

This diploma thesis deals with methods of reduction of electromagnetic noise generated by traction drive with induction motor fed by inverter. This methods employ random pulse width modulation. There are results of simulation of selected modulation algorithms and results of accoustic noise measurement with real electric drive. Attention is paid to frequency spectrum of voltage, current and accoustic noise depending on modulation parameters.

Key words

RPWM, RSPWM, traction drive, electric drive, electromagnetic noise

Prohlášení

Předkládám tímto k posouzení a obhajobě diplomovou práci vypracovanou na závěru mého studia na Fakultě elektrotechnické Západočeské univerzity v Plzni. Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci vypracoval zcela samostatně, pouze s použitím literatury a zdrojů uvedených v seznamu, který je součástí práce.

V Plzni dne 10.5.2014

.....

Michal Kroneisl

Poděkování

Tímto bych rád poděkoval vedoucímu své diplomové práce Ing. Martinu Jandovi, Ph.D. za připomínky a konzultace v průběhu tvorby práce a za čas věnovaný měření v laboratoři.

Obsah

	Seznam použitých zkratk	8
1.	Úvod	9
2.	Elektromagnetický hluk	10
3.	Frekvenční spektrum PWM	11
4.	Metody potlačení elektromagnetického hluku	14
4.1.	RPWM s náhodnou spínací frekvencí	14
4.2.	RPWM s náhodnou pozicí pulsu	15
4.3.	RPWM s náhodným spínáním	17
4.4.	Potlačení vlivu statorové frekvence	18
5.	Generování náhodných čísel	20
6.	Frekvenční spektrum RPWM	23
6.1.	Spektrum RPWM s náhodnou spínací frekvencí	23
6.2.	Spektrum RPWM s náhodnou pozicí pulsu	28
6.3.	Spektrum RPWM s náhodným směrem pily	31
6.4.	Porovnání simulovaných metod RPWM	31
7.	Řízení střídače při použití RPWM	32
8.	Měření hluku a proudu	33
9.	Výsledky měření	35
10.	Závěr	41
	Literatura	43

Seznam použitých zkratek

f_s	statorová frekvence
f_{PWM}	spínací frekvence
f_{TAB}	frekvence opakování tabulky náhodných čísel
RPP	relativní pozice pulsu
RPWM	náhodná pulsně šířková modulace (Random Pulse Width Modulation)
u_{a0}, u_{b0}, u_{c0}	fázová napětí střídače
u_{sa}, u_{sb}, u_{sc}	fázová napětí motoru
T_{DOWN}	doba poklesu pilového signálu
T_{PWM}	spínací perioda
T_{UP}	doba nárůstu pilového signálu
T_{TAB}	perioda opakování tabulky náhodných čísel

1. Úvod

Hluk je jedním z nežádoucích jevů vznikajících při provozu elektrického pohonu. V lepším případě působí hluk rušivě na jemu vystavené osoby, při dlouhodobém působení (například na obsluhu vozidla či zařízení) může mít i negativní vliv na zdraví člověka. Z hlediska způsobu vzniku lze hluku pohonu rozdělit do několika skupin:

- Mechanický hluk – vzniká například třením v ložiskách, vlivem nevyvážené hmoty, atd.
- Ventilační hluk – vzniká prouděním chladícího vzduchu
- Elektromagnetický hluk – následek časově proměnných elektromagnetických sil působících na části magnetického obvodu motoru.

Elektromagnetický hluk vzniká v každém elektrickém motoru vlivem nedokonalostí magnetického obvodu (například díky zubům a drážkám), jeho podíl však nabývá na významu zvláště při napájení motoru ze spínaného zdroje, například střídače nebo pulsního měniče. V tomto případě tkví příčina elektromagnetického hluku ve způsobu řízení měniče a šíří se zejména z motoru, v menší míře pak také z přívodů a vyhlazovacích indukčností.

Tato práce se zabývá metodami modifikace pulsně šířkové modulace (PWM) použité pro řízení třífázového napěťového střídače za účelem snížení elektromagnetického hluku pohonu s asynchronním motorem. Tyto metody se nejčastěji označují pojmem RPWM (Random Pulse Width Modulation).

2. Elektromagnetický hluk

Funkce asynchronního stroje je podmíněna elektromagnetickými silami mezi statorem a rotorem. Ty jednak vytvářejí krouticí moment (tangenciální síly), ale také způsobují deformaci statoru (radiální síly, viz např. [2]). Vibrace statoru se následně přenášejí do okolního prostředí a způsobují hluk.

Elektromagnetický hluk asynchronního stroje (i když je napájen ze zdroje harmonického napětí) je podporován několika faktory (podle zdroje [1]):

- Konečný počet zubů a drážek způsobuje, že se magnetická indukce po obvodu stroje nemění plynule, ale skokově. To zvětšuje diferenční rozptyl, tzn. průběh magnetické indukce po obvodu stroje obsahuje vyšší harmonické.
- Drážky způsobují, že vzduchová mezera není po celém obvodu stroje stejná. Podle toho, jak se potkávají drážky a zuby rotoru a statoru, mění se magnetický odpor magnetického obvodu.
- Excentricita rotoru, která má za následek proměnnou šířku vzduchové mezery.

Pokud je stroj napájen ze střídače, obsahuje proud tekoucí vinutím další nežádoucí frekvenční složky, které se promítnou do magnetického toku ve vzduchové mezeře a tím i do elektromagnetických sil a hluku, který se ze stroje šíří do okolí.

3. Frekvenční spektrum PWM

Při napájení asynchronního motoru z napětového střídače obsahuje frekvenční spektrum výstupního napětí střídače kromě frekvence požadované 1. harmonické statorového napětí f_s (odpovídá frekvenci modulačního signálu PWM) také další frekvence vzniklé spínací činností střídače. Jelikož je PWM jev nelineární, vznikají tyto nežádoucí frekvence jako součtové a rozdílové složky spínací frekvence a statorové frekvence (a jejich násobků).

Spektrum fázového napětí střídače tedy obsahuje:

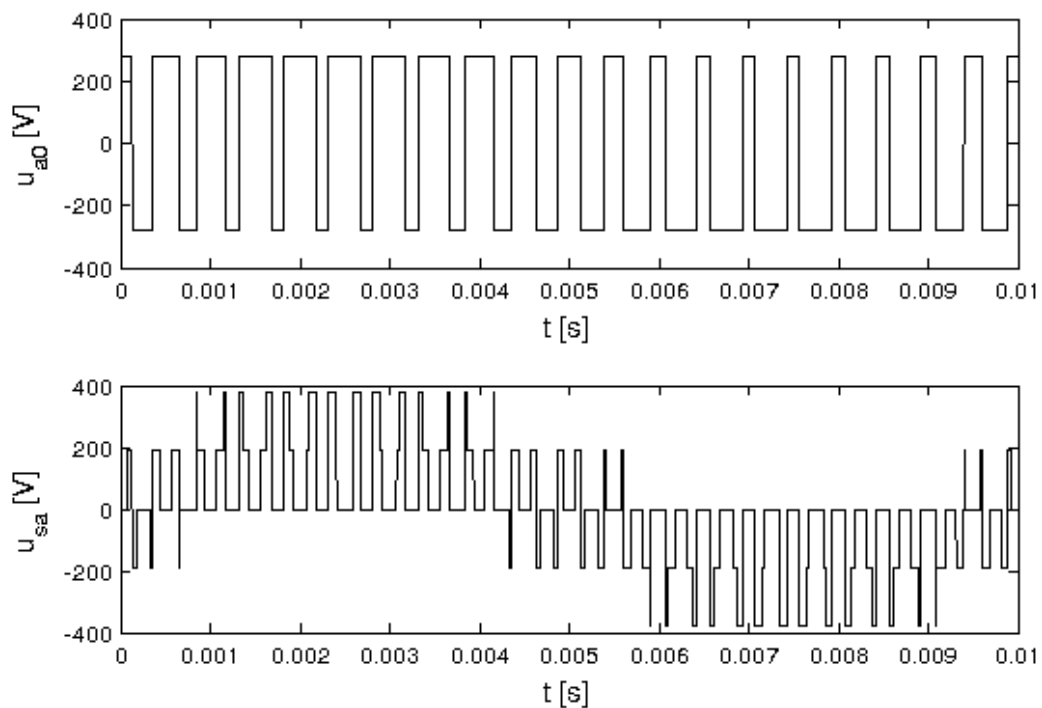
- statorovou frekvenci f_s
- liché násobky spínací frekvence f_{PWM} (podobně jako ve spektru obdélníkového signálu)
- okolo lichých násobků f_{PWM} sudé násobky f_s , např. $f_{PWM} \pm 2 f_s$, $f_{PWM} \pm 4 f_s$, $f_{PWM} \pm 6 f_s$, ..., $3 f_{PWM} \pm 2 f_s$, $3 f_{PWM} \pm 4 f_s$, ..., $5 f_{PWM} \pm 2 f_s$, $5 f_{PWM} \pm 4 f_s$, atd.
- Okolo sudých násobků f_{PWM} liché násobky f_s , např. $2 f_{PWM} \pm f_s$, $2 f_{PWM} \pm 3 f_s$, $2 f_{PWM} \pm 5 f_s$, ..., $4 f_{PWM} \pm f_s$, $4 f_{PWM} \pm 3 f_s$, $4 f_{PWM} \pm 5 f_s$, ..., $6 f_{PWM} \pm f_s$, $6 f_{PWM} \pm 3 f_s$, atd.

Tímto způsobem je spektrum popsáno například ve zdroji [3]. Výše uvedené platí pro generování PWM se symetrickým pilovým signálem.

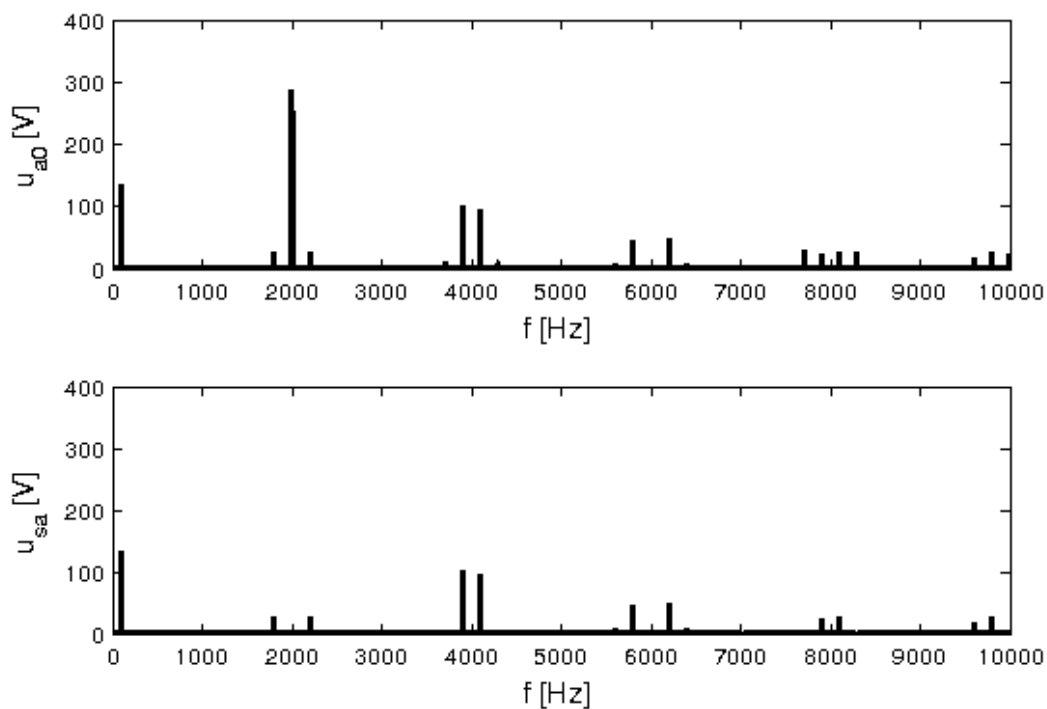
Spektrum fázového napětí motoru je téměř stejné, s tím rozdílem, že některé frekvence vypadnou. Je to dáno zapojením trojfázového střídače a motoru (střed vinutí motoru „plave“ vůči napájení střídače), takže se navzájem odečtou ty složky fázového napětí střídače, které se ve všech třech fázích objeví souhlasně (co do amplitudy i fáze). Vypadnou například:

- okolo lichých násobků f_{PWM} sudé násobky $3 f_s$, např. $f_{PWM} \pm 0 f_s$, $f_{PWM} \pm 6 f_s$, atd.
- okolo sudých násobků f_{PWM} liché násobky $3 f_s$, např. $2 f_{PWM} \pm 3 f_s$, $2 f_{PWM} \pm 9 f_s$, atd.

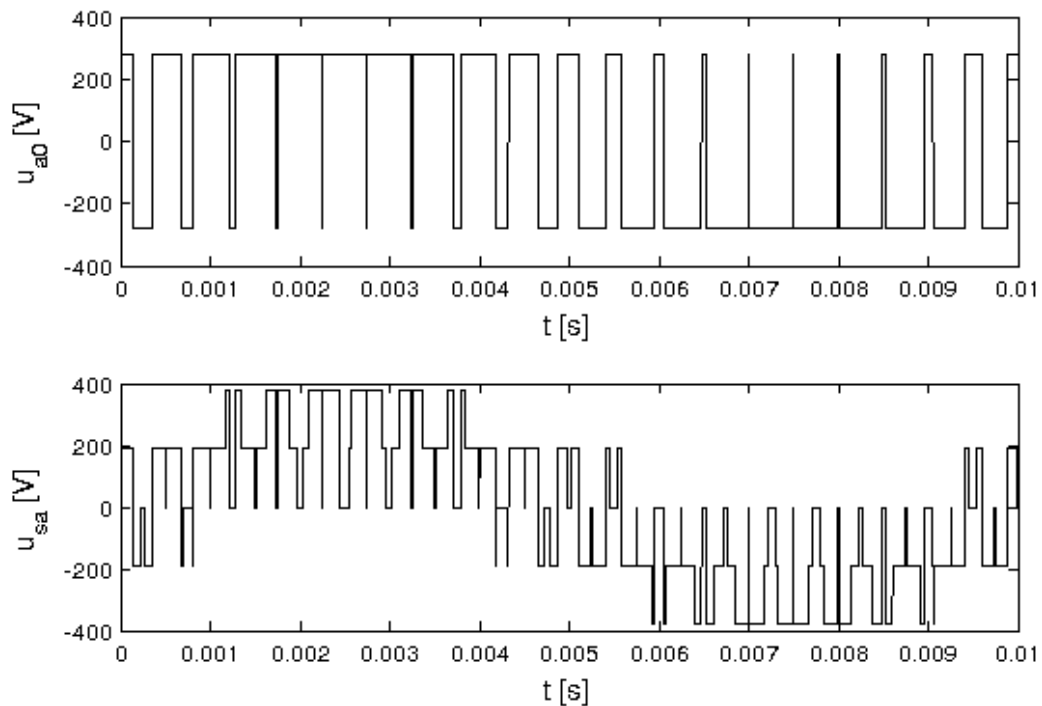
Na následujících obrázcích (obr. 3.1 až 3.4) jsou příklady průběhů a spekter fázového napětí měniče (u_{A0}) a fázového napětí motoru (u_{SA}) při různé hloubce modulace M . Při zvětšování hloubky modulace se snižuje amplituda násobků spínací frekvence a naopak vynikají součtové a rozdílové složky. Průběhy a spektra byly získána simulací a FFT. Statorová frekvence je 100 Hz, spínací frekvence 2 kHz, napětí na vstupním kondenzátoru 560 V. Nevýhodou klasické PWM je, že výkon přenášený do motoru je soustředěn do několika málo frekvencí (pokud počítáme jenom ty v akustickém pásmu), což se v akustickém hluku projeví jako pískavý tón.



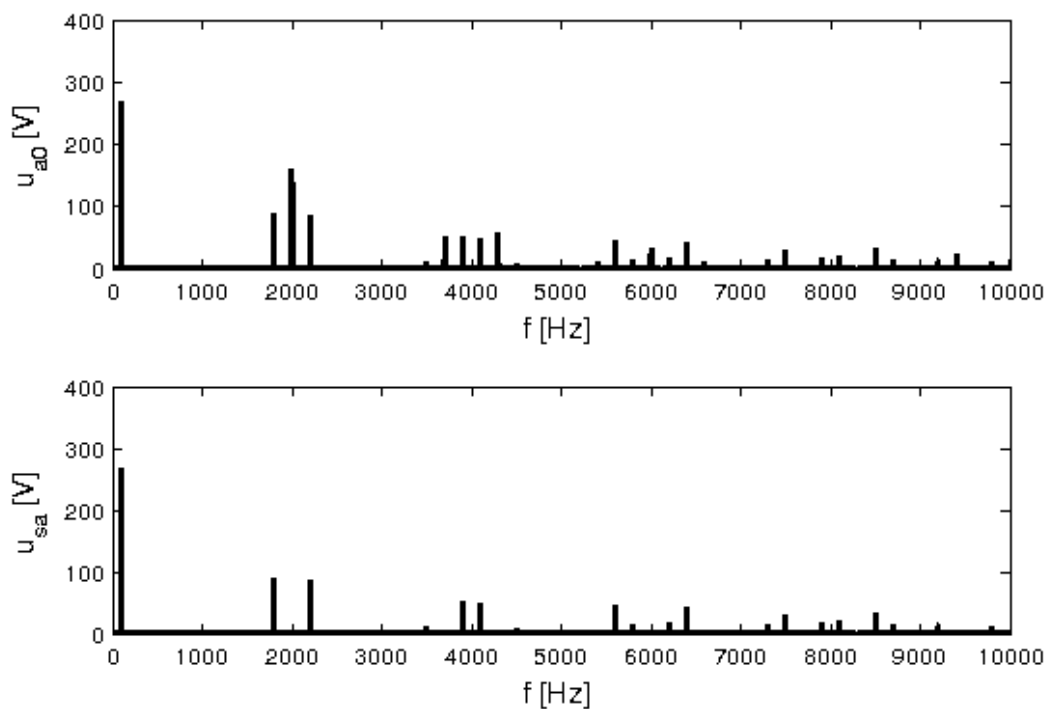
obr. 3.1: Průběh fázového napětí měniče a motoru, $M = 0,5$



obr. 3.2: Spektrum fázového napětí měniče a motoru, $M = 0,5$



obr. 3.3: Průběh fázového napětí měniče a motoru, $M = 1$



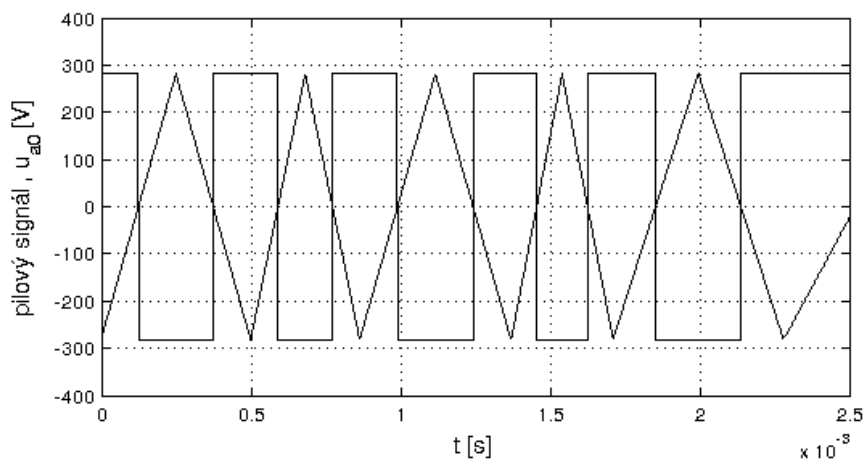
obr. 3.4: Spektrum fázového napětí měniče a motoru, $M = 1$

4. Metody potlačení elektromagnetického hluku

Podstatná část metod potlačení elektromagnetického hluku uváděných v literatuře se zabývá vlivem PWM a spínání střídače na hluk. Tyto metody spočívají v modifikaci PWM, konkrétně nosného (pilového) signálu. Nevýhody klasické (deterministické) PWM jsou řešeny tak, že se některý z parametrů nosného signálu mění (přepíná) náhodně v čase. Cílem těchto metod je rozprostit spektrum výstupního napětí střídače do více frekvencí a tím amplitudu jednotlivých frekvencí snížit. Tyto metody se označují jako RPWM (Random Pulse Width Modulation). Podle toho, který parametr nosného signálu se mění v čase, lze RPWM rozdělit do několika skupin, např. RPWM s náhodnou spínací frekvencí, RPWM s náhodnou pozicí pulsu, RPWM s náhodným směrem pily, atd. Popis těchto metod lze nalézt například ve zdroji [4]. Kromě těchto metod se někteří autoři zabývají modifikací modulačního signálu PWM, tzn. vlivem statorové frekvence a napětí.

4.1. RPWM s náhodnou spínací frekvencí

V případě asynchronní modulace s náhodnou spínací frekvencí má každá perioda pilového signálu má různou délku. To znamená, že se mění i strmost pilového signálu, proto se tato metoda někdy nazývá RSPWM (Random Slope PWM). Strmost pilového signálu se přepne vždy, když pilový signál dosáhne minimální nebo maximální hodnoty (tzn. jednou za spínací periodu). Pokud by se strmost signálu přepínala v obou dvou časech (tzn. dvakrát za spínací periodu), měnila by se v PWM signálu i pozice pulsu uvnitř periody. Příklad asynchronní RPWM je na obr. 4.1. Pro přehlednost je pilový signál roztažen na velikost napájecího napětí střídače a modulační signál je nulový.

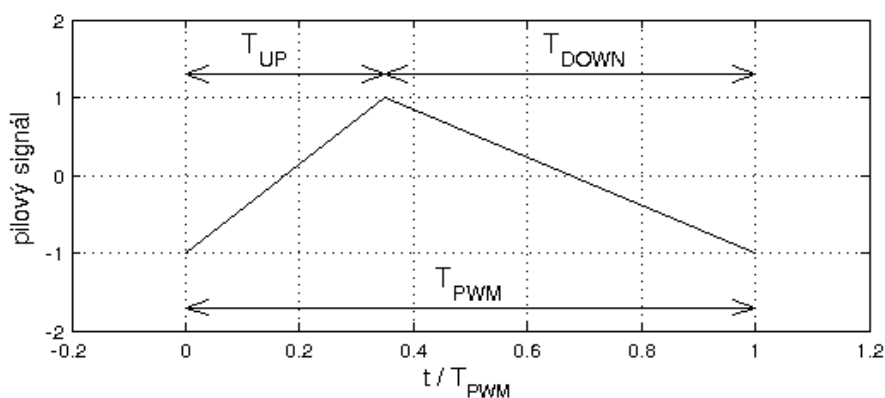


obr. 4.1: Fázové napětí střídače při RPWM s náhodnou frekvencí

RPWM s náhodnou spínací frekvencí lze použít i v případě synchronní modulace, kdy se náhodně mění počet spínacích period připadajících na jednu periodu modulačního signálu (tj. modulační poměr). U vektorových modulací se mění počet spínacích period připadající na jeden sektor (tzn. otočení vektoru napětí o 60°).

4.2. RPWM s náhodnou pozicí pulsu

Při použití této metody zůstává spínací frekvence konstantní, ale mění se poloha pulsu uvnitř jedné spínací periody. Toho lze dosáhnout tak, že doba nárůstu pilového signálu (T_{UP}) se liší od doby poklesu (T_{DOWN}), viz obr. 4.2.

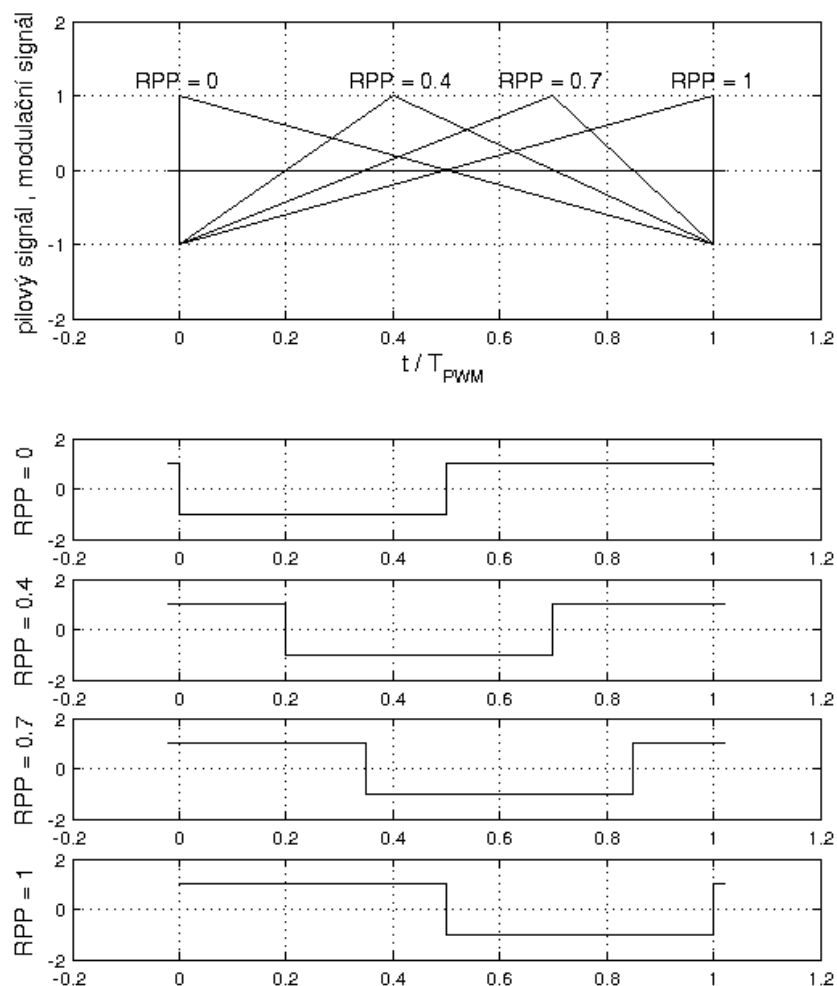


obr. 4.2: Pilový signál při náhodné pozici pulsu

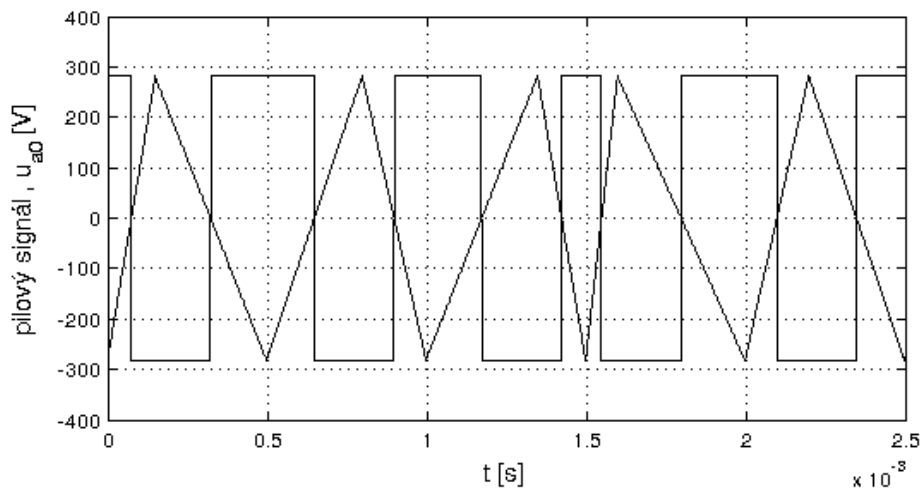
Pro určení polohy pulsu je výhodné zavést veličinu „relativní pozice pulsu“ (RPP), která udává pozici horního vrcholu pilového signálu uvnitř spínací periody:

$$RPP = \frac{T_{UP}}{T_{PWM}}$$

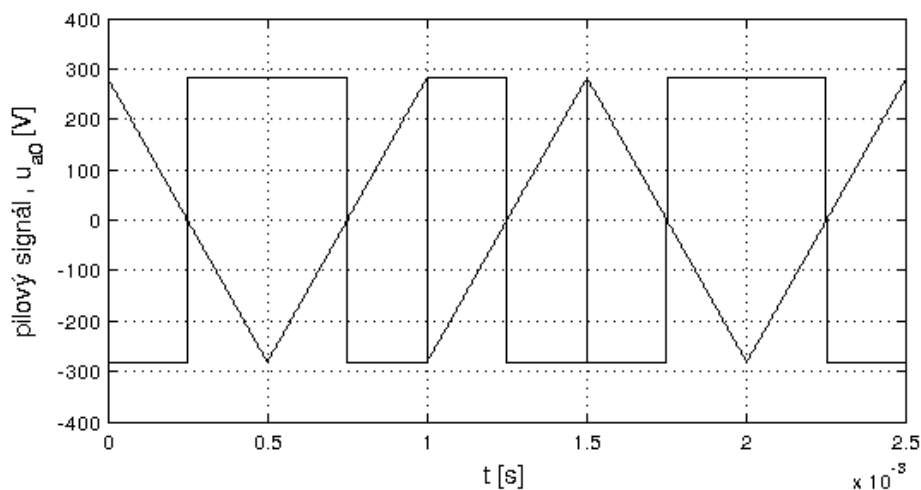
Skutečná pozice středu pulsu je závislá na RPP a aktuální velikosti modulačního signálu. Protože se pilový signál skládá z částí přímek, je závislost mezi RPP a pozicí středu pulsu při konstantním modulačním signálu lineární. RPP může nabývat hodnot z intervalu 0 až 1, při $RPP = 0$ je puls „nalepen“ na začátku periody, při $RPP = 1$ pak na konci periody (obr. 4.3). Při řízení s náhodnou pozicí pulsu má smysl měnit RPP maximálně jednou za periodu, v tomto případě bylo zvoleno přepínání RPP v dolním vrcholu pilového signálu. Příklad RPWM s náhodnou pozicí pulsu je na obr. 4.4. V tomto případě se hodnota RPP pro jednotlivé periody mění v celém rozsahu (0 až 1). Jiná možnost je RPP náhodně přepínat pouze mezi dvěma krajními hodnotami 0 a 1 (metoda RPWM s náhodným směrem pily, viz obr. 4.5).



obr. 4.3: PWM signál při různé pozici pulsu



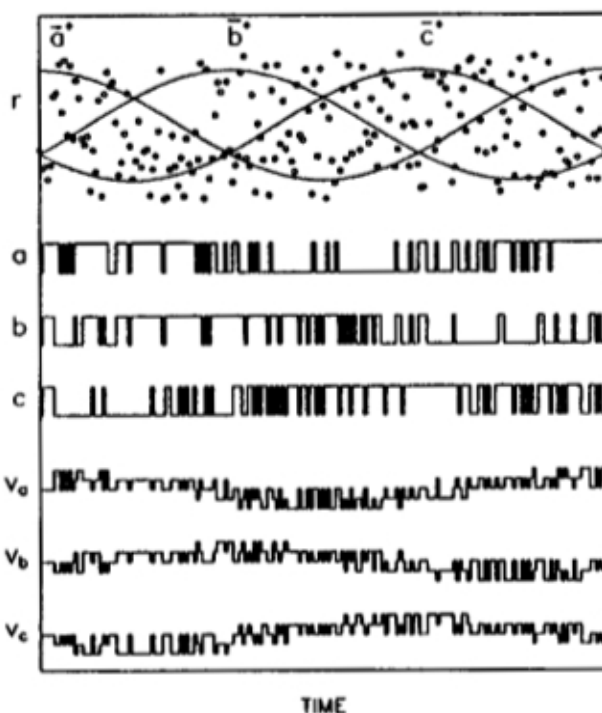
obr. 4.4: Fázové napětí střídače při RPWM s náhodnou pozicí pulsu



obr. 4.5: Fázové napětí střídače při RPWM s náhodným směrem pily

4.3. RPWM s náhodným spínáním

Princip RPWM s náhodným spínáním spočívá v nahrazení pilového signálu generátorem náhodných čísel. Příklad je na obr. 4.6. Tečky představují jednotlivé náhodné hodnoty, dále jsou na obrázku průběhy fázového napětí střídače a fázového napětí motoru. Tato metoda je poměrně jednoduchá a nenáročná na přesné časování spínání. Podle [4] se však tato metoda hodí spíše pro malé výkony, kde je kvalita výstupního proudu dosažena vyšší spínací frekvencí.

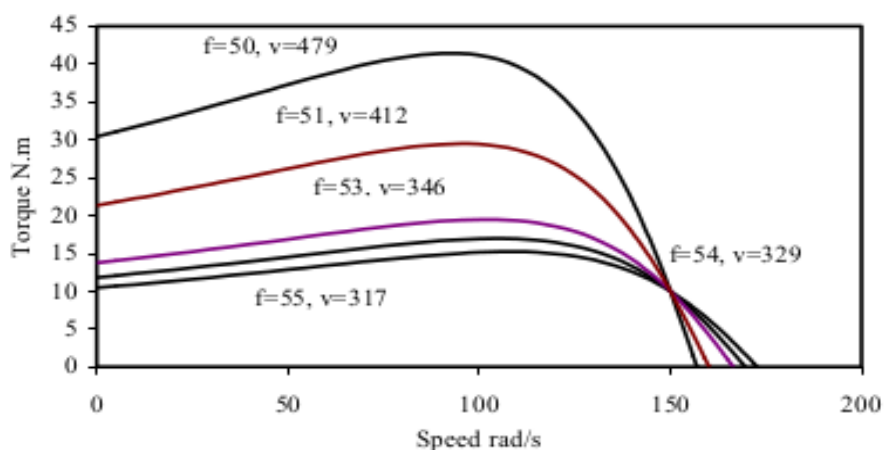


obr. 4.6: Náhodné spínání, průběh nosného a modulačního signálu a výstupních napětí [4]

4.4. Potlačení vlivu statorové frekvence

Kromě vlivu PWM (konkrétně nosného signálu) na hluk pohonu se některé práce zabývají i vlivem 1. harmonické statorového napětí, která je dána modulačním signálem PWM (např. zdroj [1]). Statorová frekvence je obvykle jednoznačně určena regulátorem momentu podle aktuálních otáček motoru a požadovaného momentu a statorové napětí pak vychází ze konstantního poměru U_s/f_s .

Ve skutečnosti lze se statorovou frekvencí v určitém rozmezí vybírat. Na obr. 4.7 je příklad momentových charakteristik pro různé statorové frekvence a napětí. Aktuální otáčky a požadovaný moment tvoří v tomto grafu bod, přičemž regulační algoritmus má na výběr z (nekonečně) mnoha momentových charakteristik, které tímto bodem prochází.



obr. 4.7: Momentové charakteristiky při různé statorové frekvenci a napětí [1]

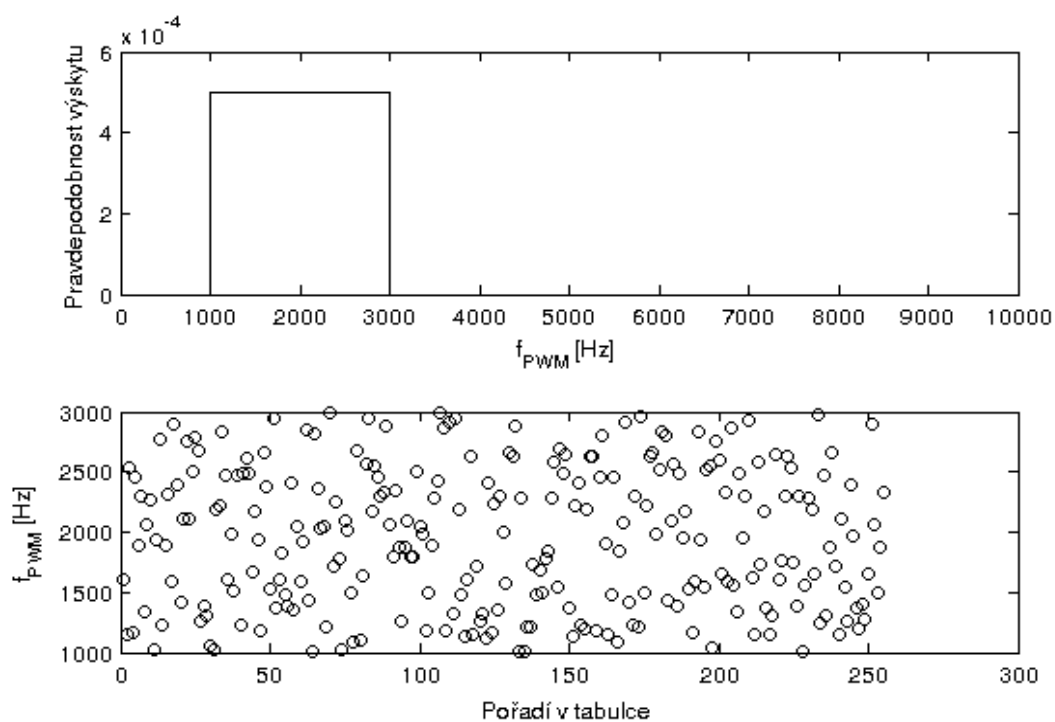
Regulační algoritmus tak může například vybrat takovou statorovou frekvenci, která způsobuje nejmenší hluk a naopak se vyhnout rezonančním frekvencím motoru a pohonu. Pokud bude algoritmus navíc vybírat charakteristiky s menším statorovým napětím (tj. menším poměrem U_s/f_s), zmenší se i magnetický tok ve vzduchové mezeře motoru, tím i radiální síly v motoru a poklesne i hluk. Toho lze využít zejména při částečném zatížení stroje, kdy není potřeba plný moment. Čím je požadovaný moment vyšší, tím je výběr možných charakteristik užší, jelikož moment zvratu musí být vždy vyšší než moment požadovaný.

5. Generování náhodných čísel

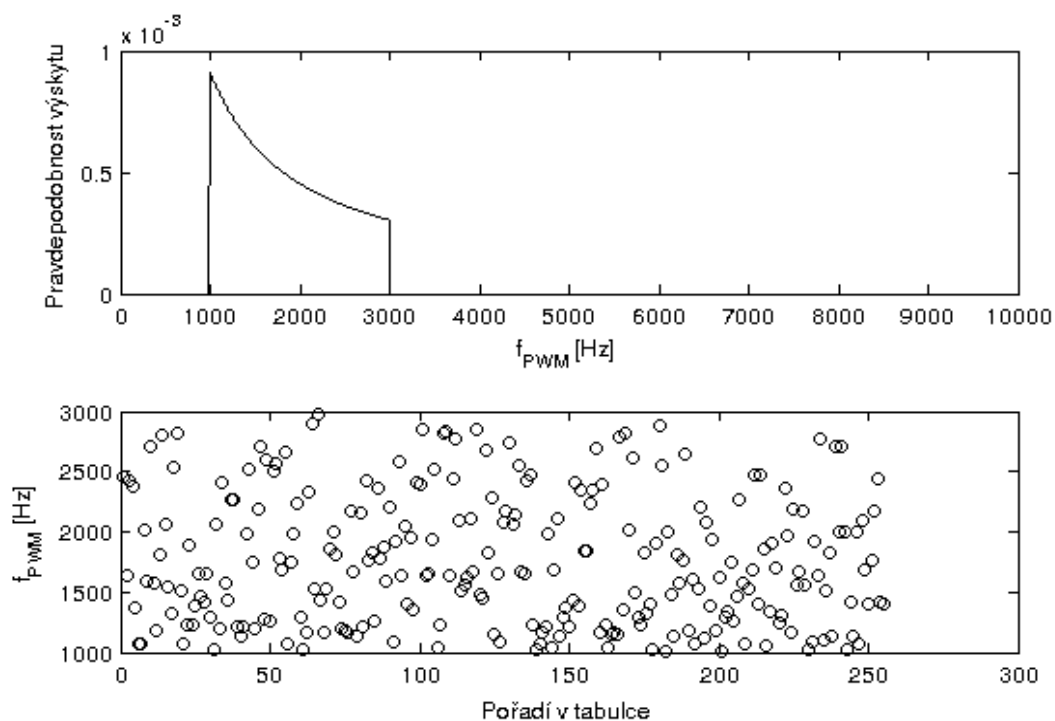
Všechny metody RPWM vyžadují generování posloupnosti náhodných čísel, ať už tyto čísla představují hodnotu frekvence (resp. periody), pozici pulsu nebo směr pily. Tyto náhodná čísla mohou být generována buď přímo v řídicím procesoru nebo mohou být vygenerována předem na počítači a následně nahrána do řídicího procesoru. Zvolili jsme druhou možnost, protože předem vygenerovaná posloupnost čísel umožňuje lepší předvídatelnost chování řídicího systému, představuje menší výpočetní nároky na procesor (i když tento argument při výkonu dnešních procesorů není tak podstatný) a dále tento způsob umožňuje porovnatelnost změřených výsledků se simulací.

Pokud je řada čísel generována předem mimo řídicí procesor, zřejmě z toho vyplývá, že počet náhodných čísel musí být konečný. Posloupnost čísel pak tvoří tabulku (vektor), ze které procesor vybírá jednu hodnotu po druhé. Pokud dojde na konec tabulky, začne opět od první hodnoty. Délka tabulky má zásadní vliv na složení spektra výstupního napětí měniče. Například RPWM s náhodnou spínací frekvencí, kde bude mít tabulka pouze jeden prvek, v podstatě odpovídá klasické PWM s konstantní spínací frekvencí. Čím delší bude tabulka, tím více frekvencí se v ní vystřídá a, jak bude vidět dále, tím příznivější spektrum napětí získáme. Na druhou stranu zdroj [5] uvádí, že tabulky s více jak 1024 prvky nemá smysl používat, protože zlepšení spektra už není tak výrazné.

Při generování náhodných čísel je třeba určit rozmezí, v jakém se mají čísla pohybovat (např. rozsah frekvencí) a hustotu pravděpodobnosti v závislosti na dané veličině (např. frekvenci). V případě, že jsou čísla vybírána z konečného počtu hodnot, hustota pravděpodobnosti pak přejde v pravděpodobnost výskytu jednotlivých hodnot. Příklad vygenerované tabulky náhodných čísel pro RPWM s náhodnou spínací frekvencí je na obr. 5.1. V tomto případě jsou frekvence rovnoměrně rozděleny v intervalu 1 až 3 kHz a tabulka obsahuje 255 hodnot. Horní graf ukazuje pravděpodobnost výskytu jednotlivých frekvencí, v dolním grafu jsou jednotlivé hodnoty frekvencí jako body v závislosti na pořadí v tabulce.



obr. 5.1: Generování náhodných frekvencí s rovnoměrným rozložením spínací frekvence



obr. 5.2: Generování náhodných frekvencí s rovnoměrným rozložením spínací periody

Mezi důležité parametry každé vygenerované tabulky patří doba, za kterou se při řízení měniče vystřídají všechny její hodnoty. Tato doba (perioda opakování tabulky neboli perioda nosného signálu PWM) má podstatný vliv na spektrum napětí a závisí na délce jednotlivých spínacích period PWM a počtu čísel v tabulce:

$$T_{TAB} = \sum_{k=1}^n T_k = \sum_{k=1}^n \frac{1}{f_k}$$

kde T_{TAB} je perioda opakování tabulky, f_k jsou hodnoty frekvencí v tabulce, T_k jim odpovídající spínací periody a n je počet hodnot v tabulce. Pro frekvenci opakování tabulky pak platí:

$$f_{TAB} = \frac{1}{T_{TAB}} = \frac{1}{\sum_{k=1}^n \frac{1}{f_k}}$$

U RPWM s náhodnou spínací frekvencí může být i při stejném nastavení generátoru náhodných čísel pokaždé trochu jiná, protože vygenerovaná čísla nejsou nikdy rozdělena absolutně rovnoměrně. V případě RPWM s náhodnou pozicí pulsu je spínací frekvence konstantní, takže perioda opakování tabulky závisí pouze na spínací frekvenci (periodě) a počtu čísel v tabulce.

6. Frekvenční spektrum RPWM

Frekvenční spektrum RPWM bylo zjišťováno numerickými metodami, to znamená simulací činnosti střídače a následným provedení rychlé Fourierovy transformace (FFT) ze získaného průběhu napětí. Simulovány byly metody: RPWM s náhodnou spínací frekvencí, RPWM s náhodnou pozicí pulsu a RPWM s náhodně přepínaným směrem pily. Pro každou metodu bylo provedeno více simulací s různým nastavením. Krok výpočtu pro všechny simulace byl nastaven na 10^{-6} s, statorová frekvence 50 Hz, napájecí napětí střídače 560 V, hloubka modulace 1, délka okna pro FFT 1,28 s.

6.1. Spektrum RPWM s náhodnou spínací frekvencí

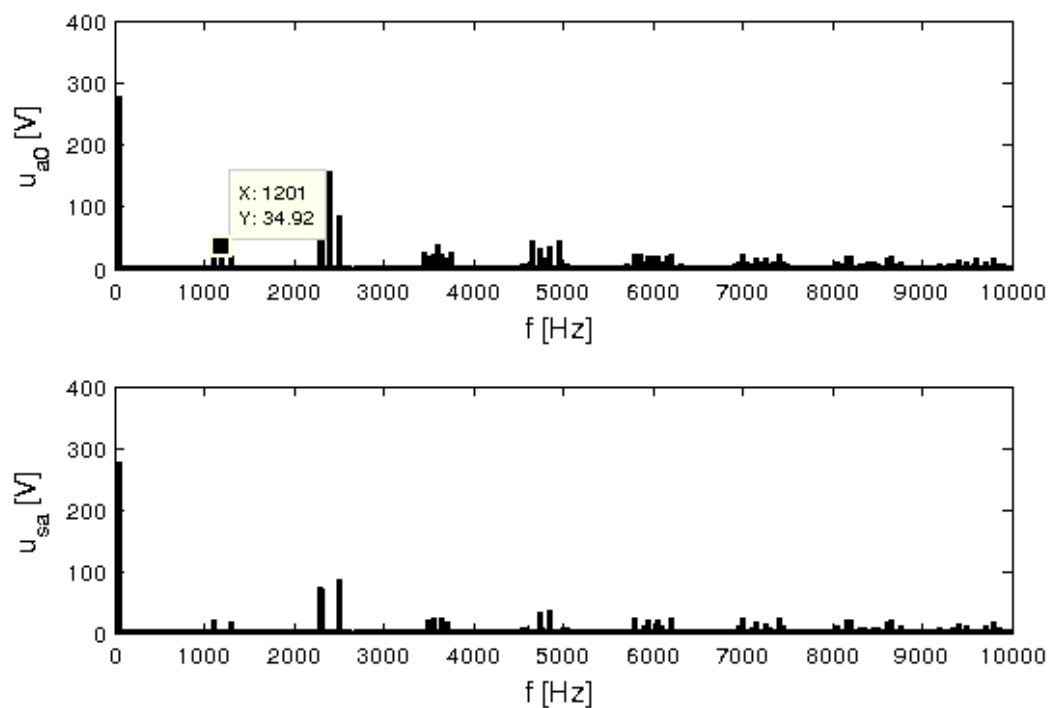
Spektrum výstupního napětí měniče při použití RPWM s náhodnou spínací frekvencí lze zkoumat v závislosti na různých parametrech tabulky frekvencí. Prvním takovým parametrem bude délka tabulky v počtu čísel. Na obr. 6.1 až 6.4 jsou příklady spekter napětí při různém počtu hodnot frekvencí v tabulce. Zvláště při menší délce tabulky je zřetelné, že spektrální čáry se seskupují okolo násobků určité frekvence, podobně jako v případě klasické PWM (viz kapitola 3). Zajímavým poznatkem je, že tato frekvence není žádná z frekvencí v tabulce (ty se ve spektru nevyskytují), ale frekvence opakování tabulky. Například na obr. 6.1, kde tabulka obsahuje pouze dvě frekvence (2000 Hz a 3000 Hz), vychází f_{TAB} :

$$f_{TAB} = \frac{1}{\frac{1}{2000} + \frac{1}{3000}} = 1200 \text{ Hz}$$

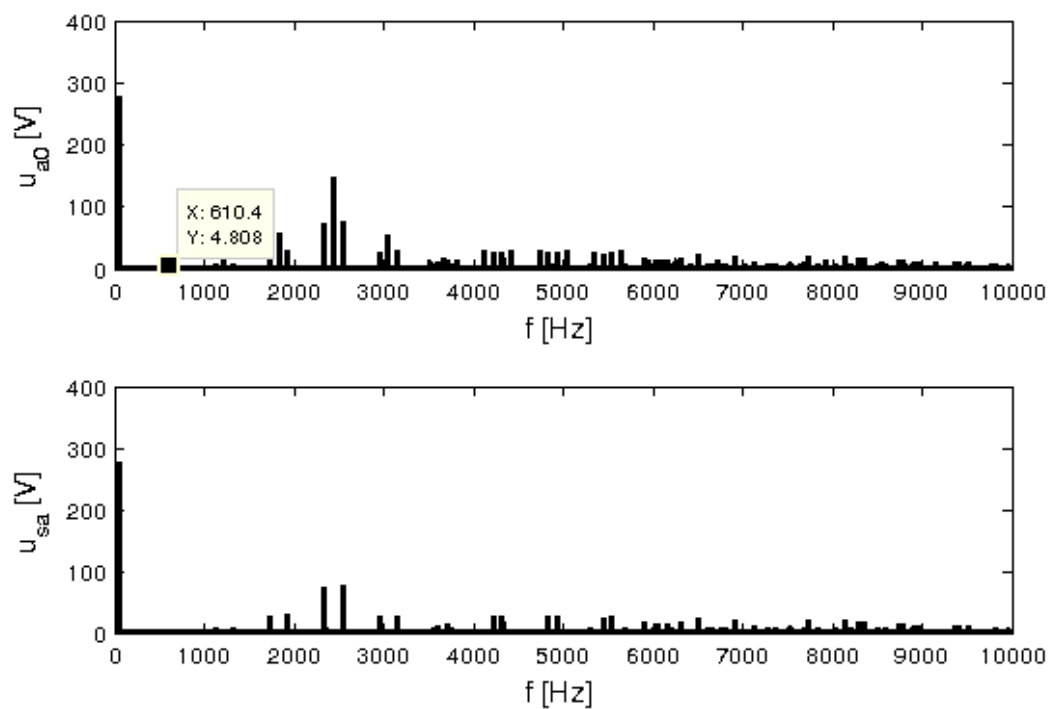
Na obr. 6.2, kdy tabulka obsahuje frekvence 2000, 2300, 2700 a 3000 Hz, je f_{TAB} :

$$f_{TAB} = \frac{1}{\frac{1}{2000} + \frac{1}{2300} + \frac{1}{2700} + \frac{1}{3000}} = 610 \text{ Hz}$$

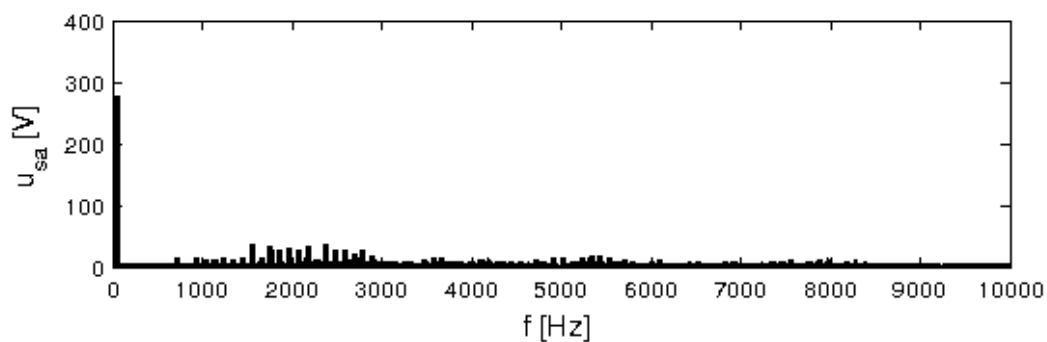
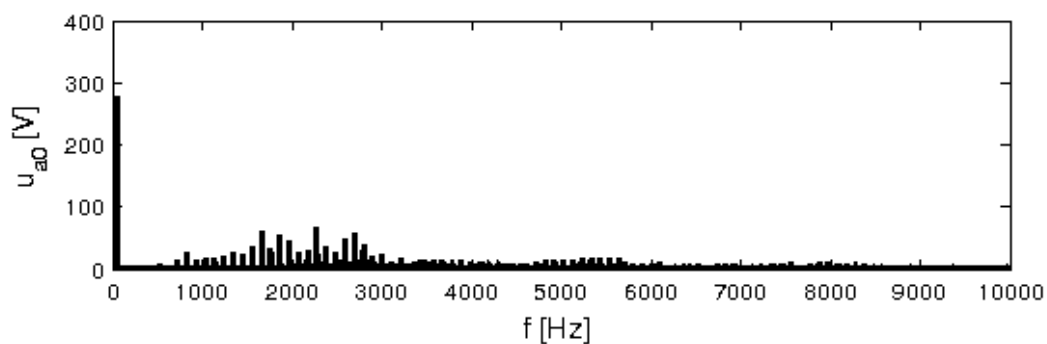
Na obr. 6.3 a 6.4 jsou už spektra při náhodném rozdělení frekvencí od 1000 do 3000 Hz a počtem hodnot v tabulce 20, respektive 255. Při větší délce tabulky se snižuje f_{TAB} , jednotlivé spektrální čáry se zhušťují a jejich velikost klesá. Dalším zajímavým poznatkem je, že funkce spojující vrcholy jednotlivých spektrálních čar má maximum uvnitř rozsahu spínacích frekvencí, pravděpodobně to bude na frekvenci odpovídající střední spínací periodě (tj. $n \cdot f_{TAB}$).



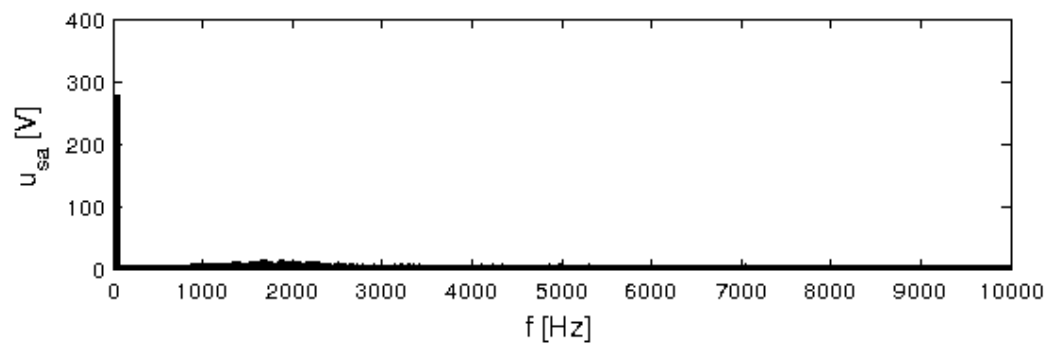
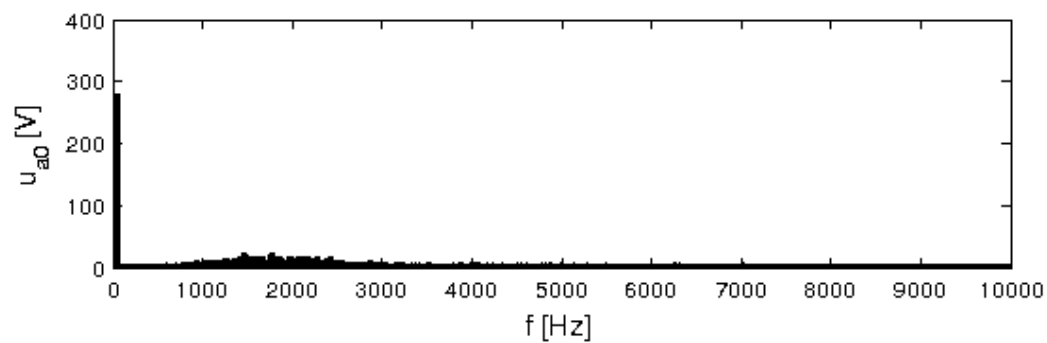
obr. 6.1: Spektrum napětí při délce tabulky $n = 2$



obr. 6.2: Spektrum napětí při délce tabulky $n = 4$

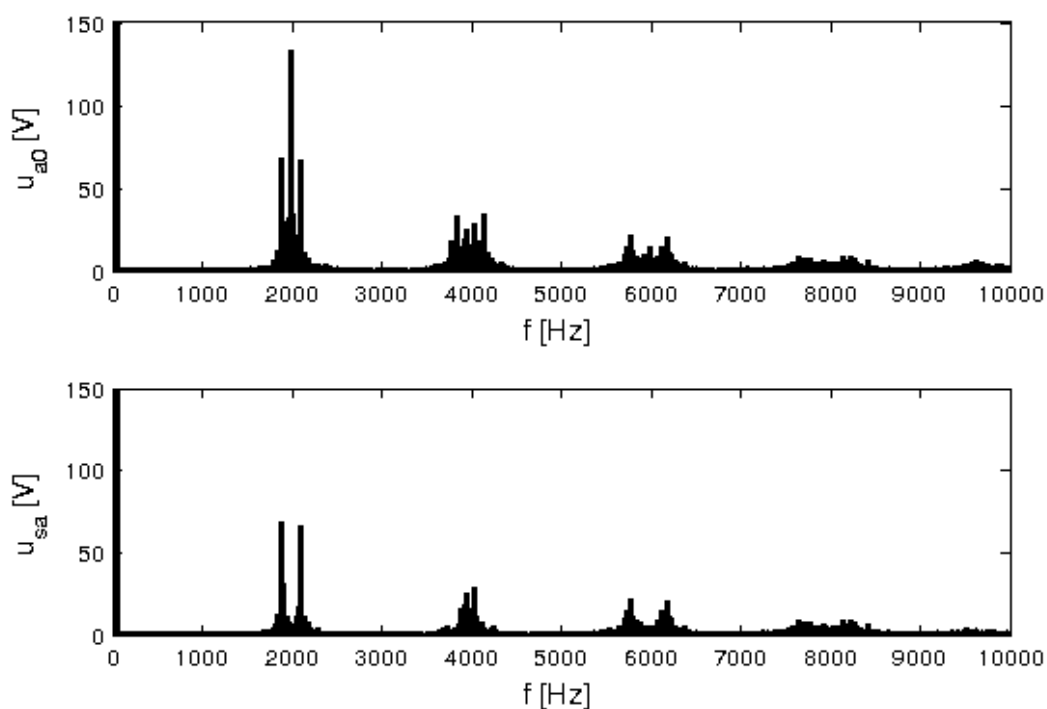


obr. 6.3: Spektrum napětí při délce tabulky $n = 20$

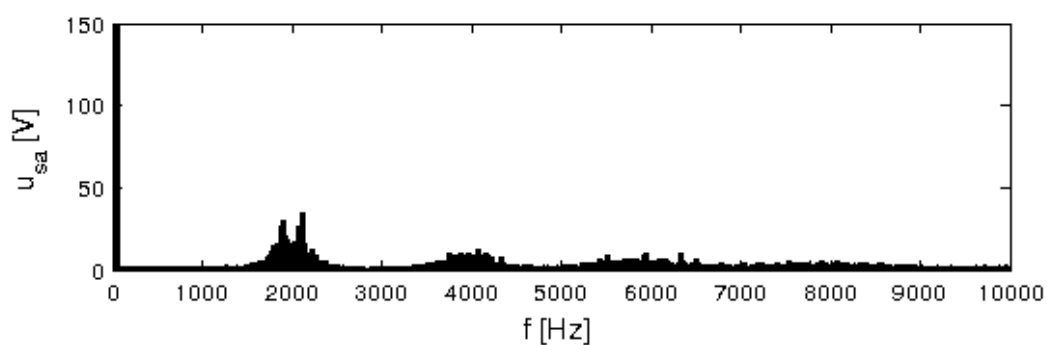
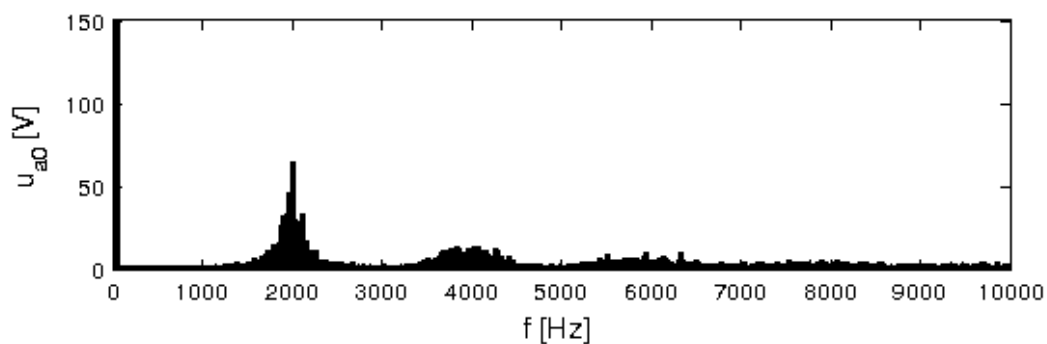


obr. 6.4: Spektrum napětí při délce tabulky $n = 255$

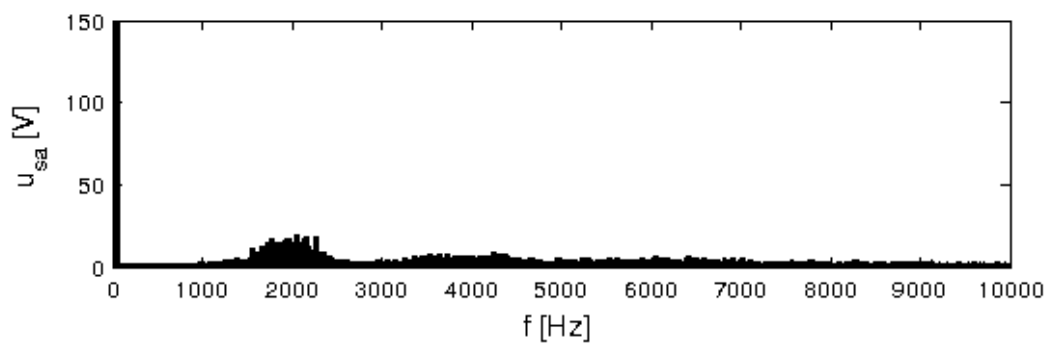
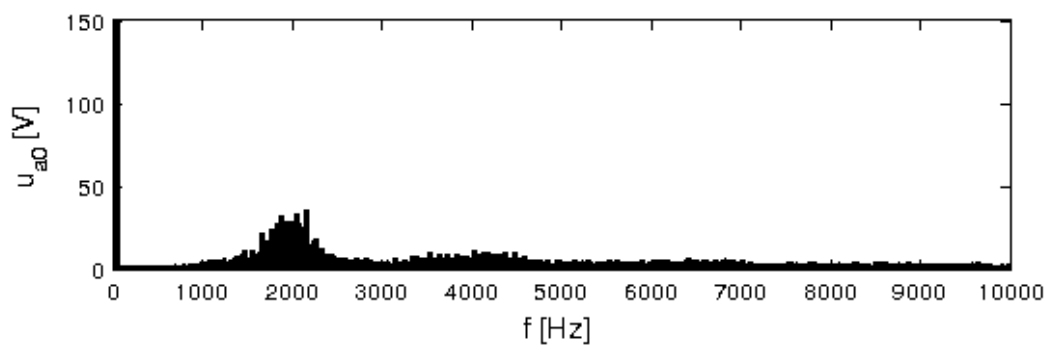
Dalším parametrem tabulky spínacích frekvencí, jehož vliv na spektrum lze sledovat, je rozsah spínacích frekvencí. Na obr. 6.5 až 6.8 je vidět, jak se mění spektrum napětí s rozšiřujícím se rozsahem frekvencí. Frekvence byly rovnoměrně rozloženy v daném intervalu, počet hodnot v tabulce 255. Svislá osa je přiblížena. Při rozsahu frekvencí 1900 až 2100 Hz je spektrum podobné spektru klasické PWM se spínací frekvencí 2000 Hz. Jak se rozsah frekvencí rozšiřuje, začnou vynikat i ostatní spektrální čáry a spektrum se začne „zplošťovat“.



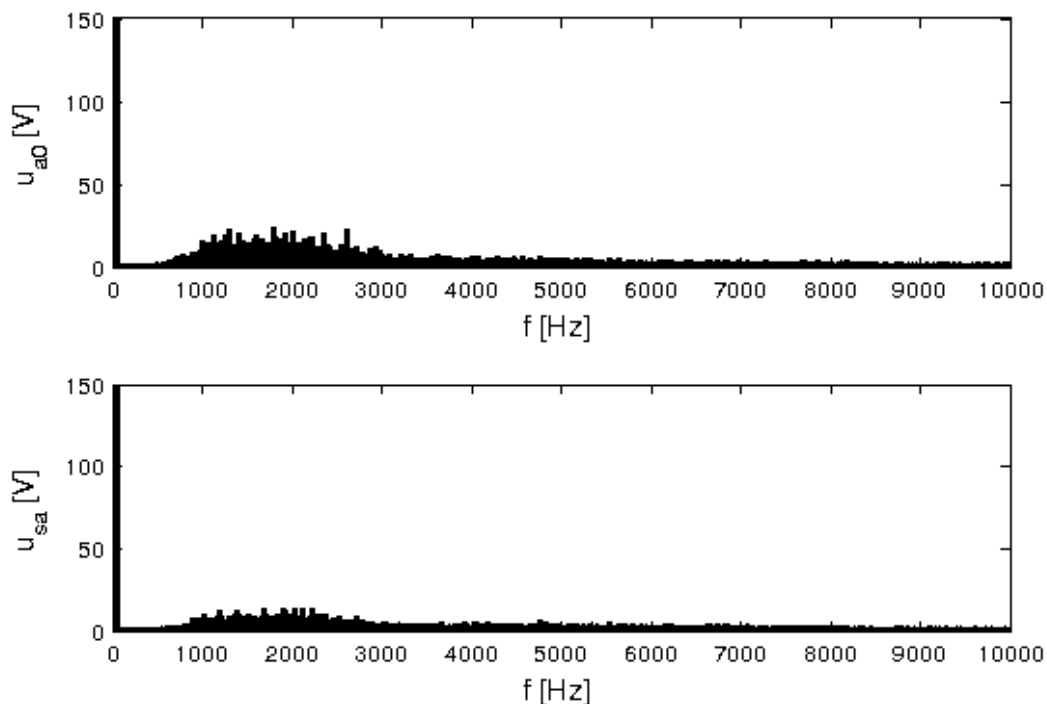
obr. 6.5: Spektrum napětí při rozsahu spínacích frekvencí 1900 - 2100 Hz



obr. 6.6: Spektrum napětí při rozsahu spínacích frekvencí 1750 - 2250 Hz



obr. 6.7: Spektrum napětí při rozsahu spínacích frekvencí 1500 - 2500 Hz



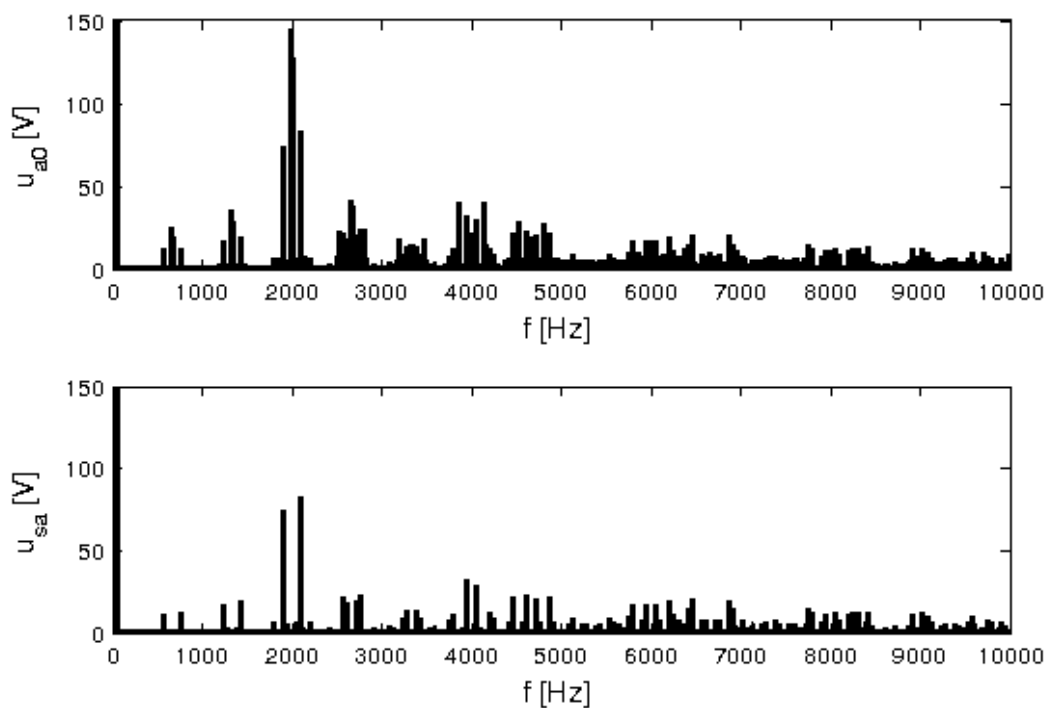
obr. 6.8: Spektrum napětí při rozsahu spínacích frekvencí 1000 - 3000 Hz

6.2. Spektrum RPWM s náhodnou pozicí pulsu

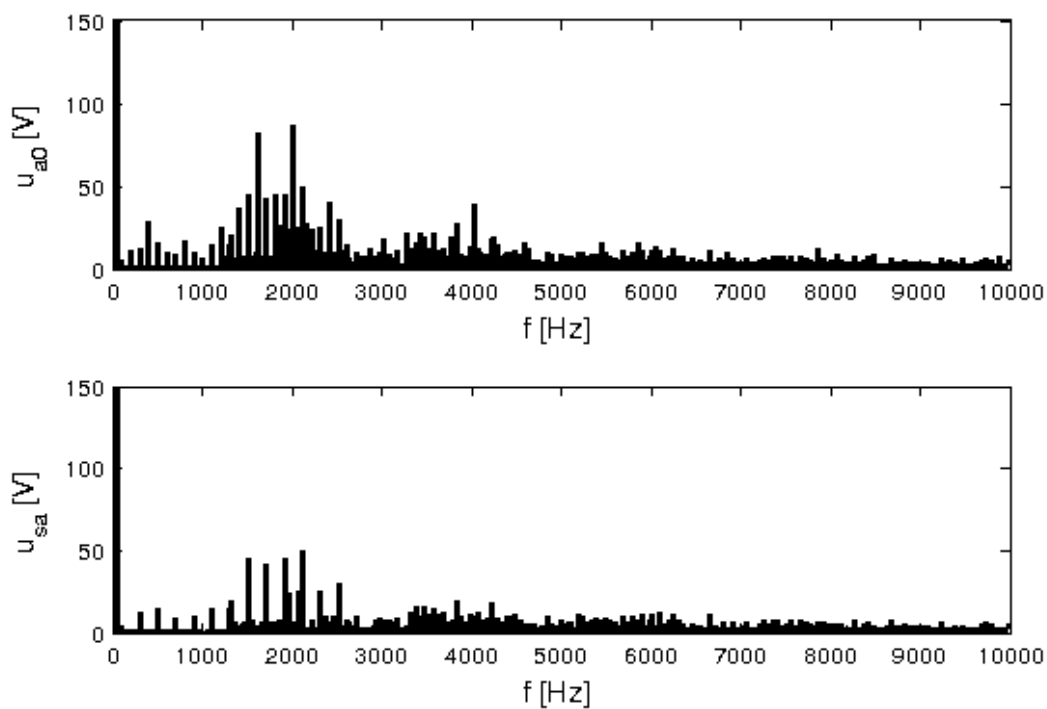
Podobně jako u RPWM s náhodnou spínací frekvencí, lze i u této metody experimentovat s délkou tabulky s náhodnými pozicemi, případně s rozsahem, v jakém se pozice pulsu mění. Pokud je spínací frekvence konstantní, platí pro frekvenci opakování tabulky vztah:

$$f_{TAB} = \frac{f_{PWM}}{n}$$

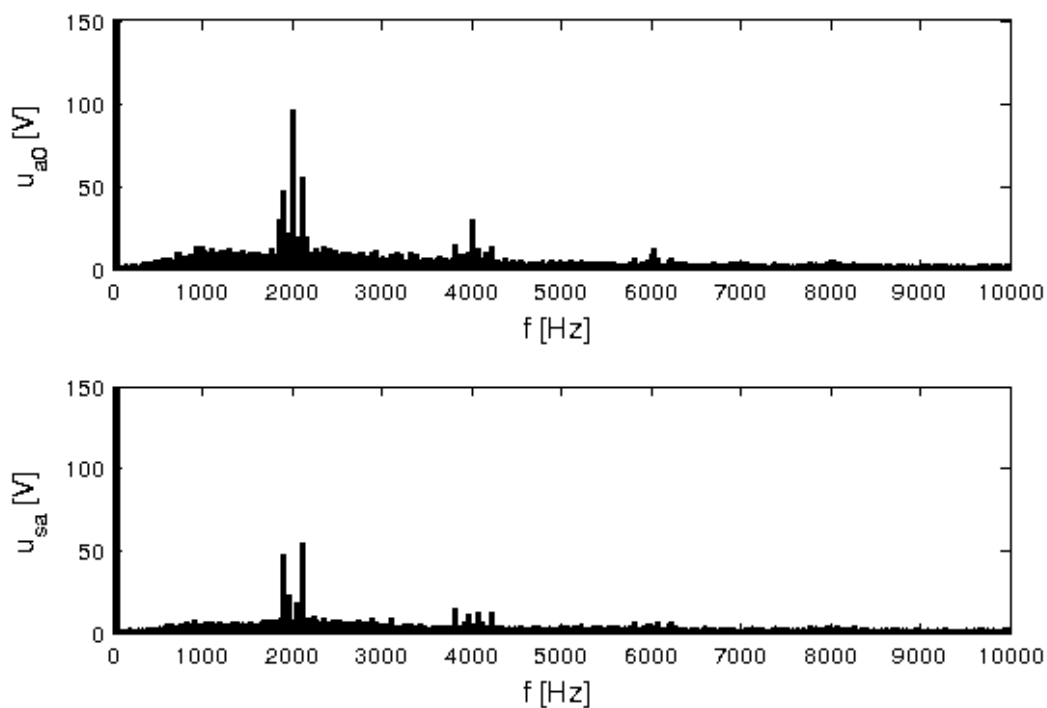
kde n je počet čísel v tabulce a f_{PWM} spínací frekvence. Spektrální čáry se opět seskupují okolo násobků f_{TAB} ., přičemž obvykle vynikají spektrální čáry okolo násobků f_{PWM} . Zajímavé je, že i přes zvětšování délky tabulky tyto frekvence stále svojí amplitudou převyšují zbytek spektra. To je zřejmá nevýhoda oproti RPWM s náhodnou spínací frekvencí. Na obr. 6.9 až 6.11 jsou příklady spekter při různé délce tabulky. Spínací frekvence je ve všech případech 2000 Hz, relativní pozice pulsu (RPP) se mění v rozmezí 0.01 až 0.99. Na obr. 6.12 je pro porovnání spektrum při počtu prvků v tabulce 255, ale s rozsahem RPP zúženým na 0,2 až 0,8. Podobně jako u RPWM s náhodnou spínací frekvencí, i zde platí, že zmenšováním rozsahu náhodné veličiny se se spektrum blíží ke spektru klasické PWM.



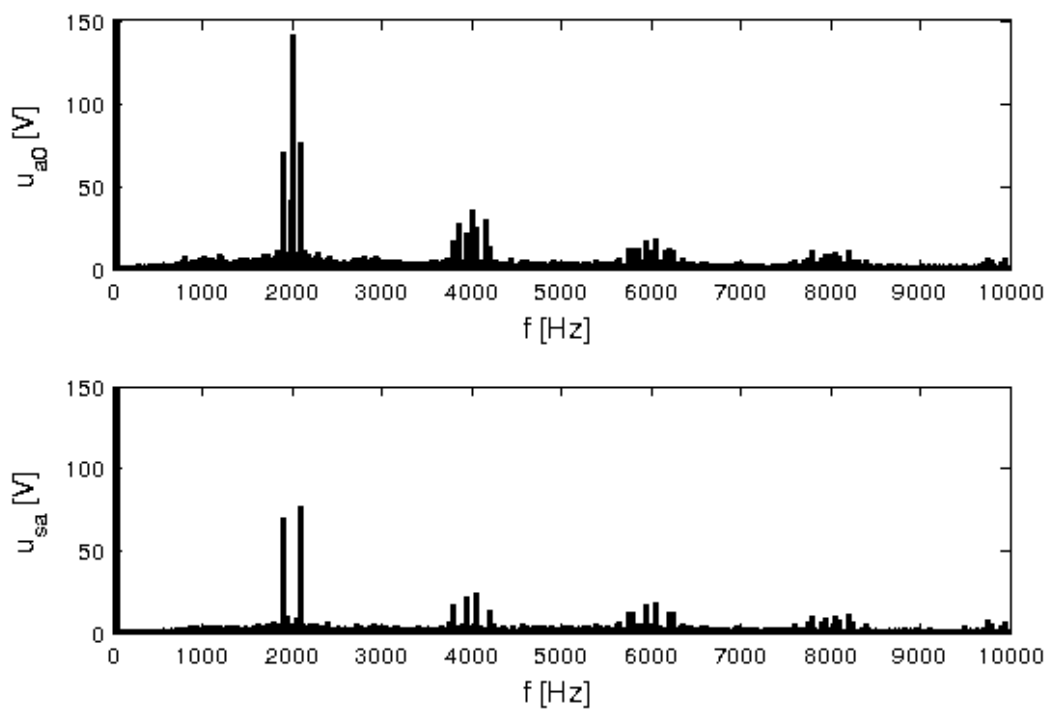
obr. 6.9: Spektrum napětí RPWM s náhodnou pozicí pulsu, počet hodnot v tabulce: 3



obr. 6.10: Spektrum napětí RPWM s náhodnou pozicí pulsu, počet hodnot v tabulce: 10



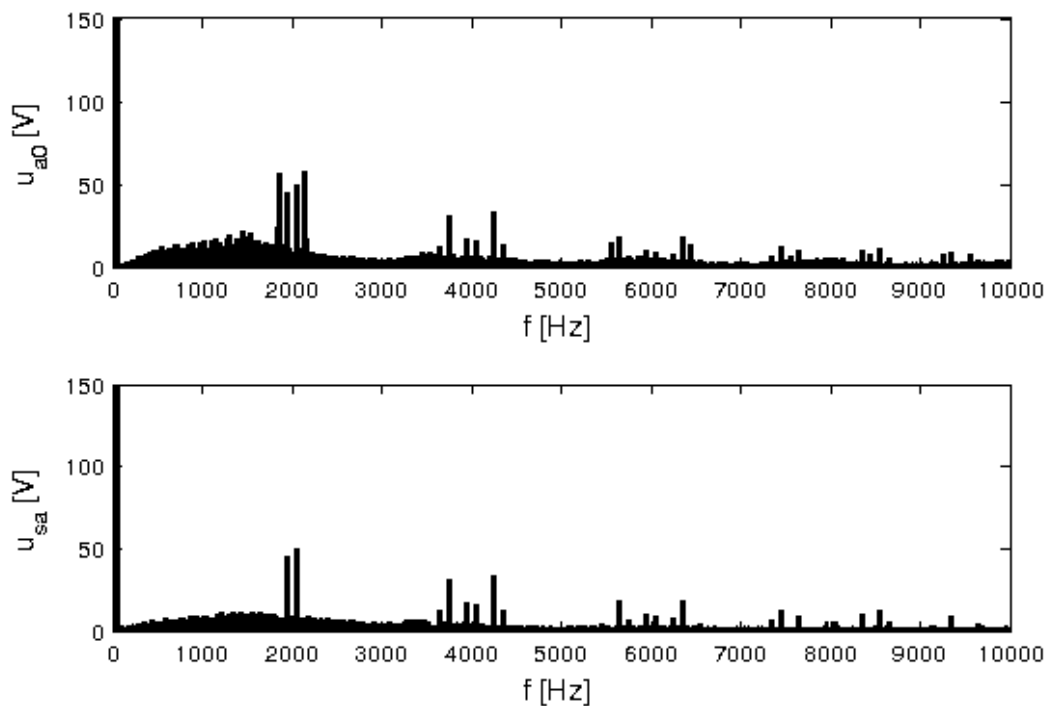
obr. 6.11: Spektrum napětí RPWM s náhodnou pozicí pulsu, počet hodnot v tabulce: 255



obr. 6.12: Spektrum napětí RPWM s náhodnou pozicí pulsu, počet hodnot v tabulce: 255, rozsah RPP: 0,2 až 0,8

6.3. Spektrum RPWM s náhodným směrem pily

RPWM s náhodným směrem pily je v podstatě speciální případ RPWM s náhodnou pozicí pulsu, kdy relativní pozice pulsu (RPP) může nabývat pouze dvou krajních hodnot (0 a 1). Puls je tedy buď na začátku nebo na konci spínací periody. Příklad spektra napětí při počtu hodnot v tabulce 255 je na obr. 6.13. Stejně jako u RPWM s náhodnou pozicí pulsu, i v tomto případě ve spektru vynikají frekvence okolo násobku spínací frekvence (2000 Hz).



obr. 6.13: Spektrum RPWM s náhodným směrem pily, počet hodnot v tabulce: 255

6.4. Porovnání simulovaných metod RPWM

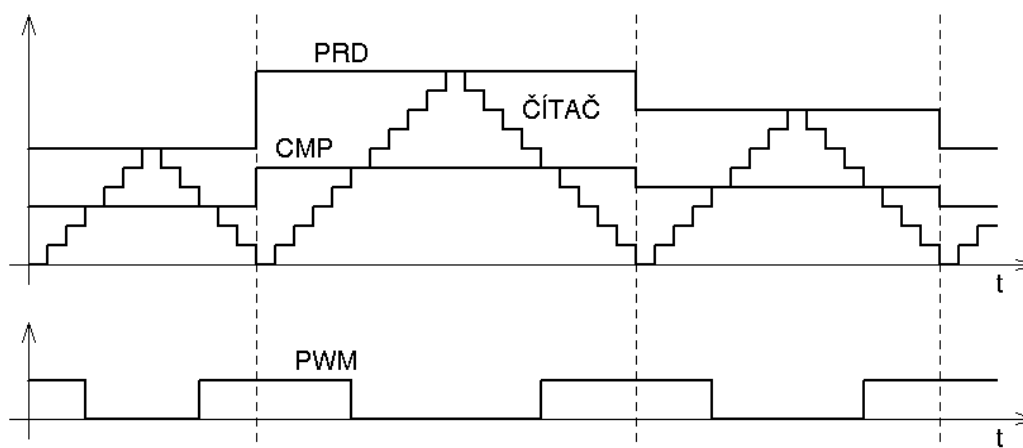
Vzhledem k výsledkům získaným simulací se jeví jako nejperspektivnější RPWM s náhodnou spínací frekvencí. Při použití této metody se spektrum oproti klasické PWM „zplošťuje“ a amplitudy jednotlivých složek se zmenšují. Tento jev je tím výraznější, čím je větší počet hodnot v tabulce a čím větší mají rozsah. V případě druhých dvou metod lze tento jev pozorovat také, nicméně nepodařilo se zcela eliminovat frekvence v okolí násobků spínací frekvence. Navíc se ve spektru objevují nízké frekvence (řádově stovky Hz). Je možné, že se tyto frekvence (nebo frekvence od nich odvozené) objeví i v proudu, který střídač odebírá ze zdroje, což by při použití pohonu v elektrické trakci mohlo způsobovat problémy z hlediska rušení zabezpečovacího zařízení.

7. Řízení střídače při použití RPWM

K řízení střídače během měření byla použita deska s digitálním signálovým procesorem TMS320F28335 od firmy Texas Instruments. Program pro RPWM s náhodnou spínací frekvencí byl vytvořen za pomoci softwaru Simulink (Matlab).

Při generování PWM v procesoru je pilový (nosný) signál realizován čítačem a modulační signál je programem ukládán do porovnávacího CMP (compare) registru. Výstupní signál PWM modulu pak určuje komparátor, který porovnává hodnotu uloženou v CMP registru se stavem čítače. V případě symetrického pilového signálu čítač počítá od nuly až do hodnoty uložené v PRD (period) registru a zase zpět k nule. Protože rychlost inkrementování (dekrementování) čítače nelze plynule měnit, nastavuje se perioda (a tím i frekvence) PWM hodnotou v registru PRD.

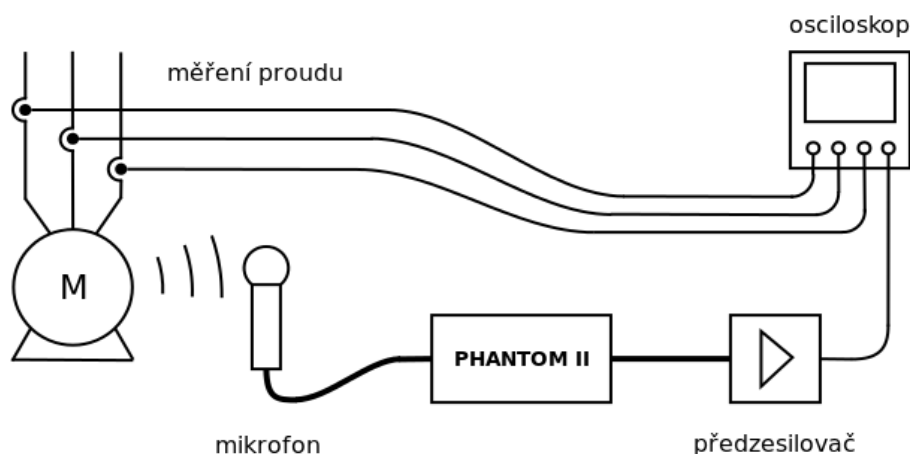
V případě RPWM s náhodnou spínací frekvencí je tedy třeba každou spínací periodu měnit obsah PRD registru. Vždy když čítač dosáhne maxima, nahraje program do PRD registru jeho novou hodnotu, kterou se procesor řídí od okamžiku, kdy čítač dosáhne nuly. Zároveň s hodnotou PRD registru je třeba nastavit i hodnotu CMP registru, tak aby střední hodnota napětí v rámci periody stále odpovídala modulačnímu signálu. Princip generování PWM signálu s proměnnou frekvencí je na obr. 7.1.



obr. 7.1: Generování PWM signálu o proměnné frekvenci

8. Měření hluku a proudu

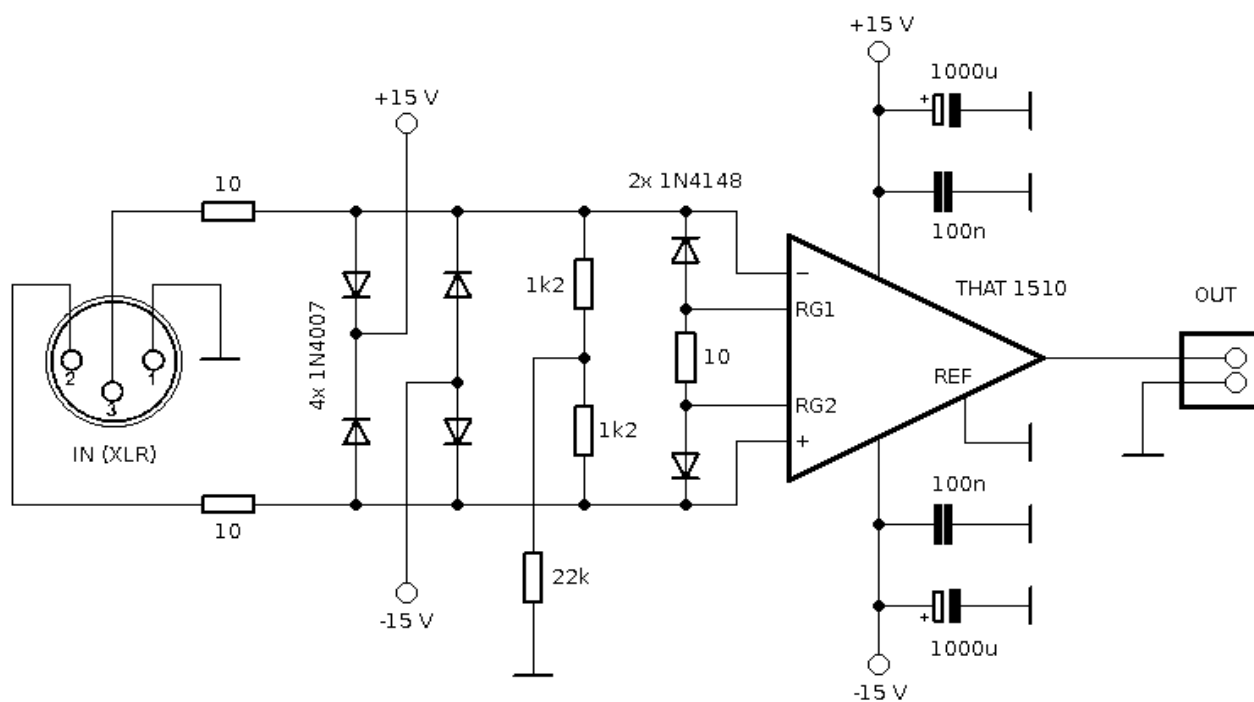
Během testování na skutečném asynchronním stroji byla provedena řada měření, a to jak při použití PWM, tak i RPWM. Měřenými veličinami byl hluk a proudy ve všech třech fázích. Celý měřicí řetězec je na obr. 8.1. K měření byl použit 4-kanálový osciloskop LeCroy wavePro 725Zi. Proudů byly změřeny proudovými sondami Tektronix A622, které převádí proud na napětí. Hluk byl změřen kapacitním mikrofonom RØDE NT55. Mikrofon má třípinový konektor XLR, přičemž signál je přenášen jako rozdíl napětí mezi piny 2 (HOT) a 3 (COLD). Pin 1 je zem (GND). Toto řešení se používá v profesionální audiotechnice pro potlačení naindukovaného rušení, které se projeví jako souhlasný signál na obou vodičích. Přes tento konektor je mikrofon zároveň napájen stejnosměrným předpětím 48 V, které zajišťuje fantomový napáječ PHANTOM II od firmy ARTcessories. Na jeho výstupu je už signál zbavený stejnosměrné složky. Signál je přiveden do předzesilovače a následně změřen osciloskopem.



obr. 8.1: Měřicí řetězec pro měření hluku a proudů

Předzesilovač má za úkol převést rozdílový signál mezi vodiči HOT a COLD z XLR kabelu na jeden signál proti zemi, který lze změřit osciloskopem a navíc signál i zesiluje. Předzesilovač s integrovaným obvodem THAT1510 byl postaven podle schématu na obr. 8.2, které vychází ze zapojení doporučeného výrobcem obvodu [W2]. Zisk zesilovače je nastaven odporem mezi vývody RG1 a RG2 na hodnotu 60 dB.

Změřené průběhy hluku a proudů změřené osciloskopem byly uloženy do souborů a přesunuty do počítače pro další analýzu v Matlabu.



obr. 8.2: Předzesilovač pro měření hluku s obvodem THAT1510

9. Výsledky měření

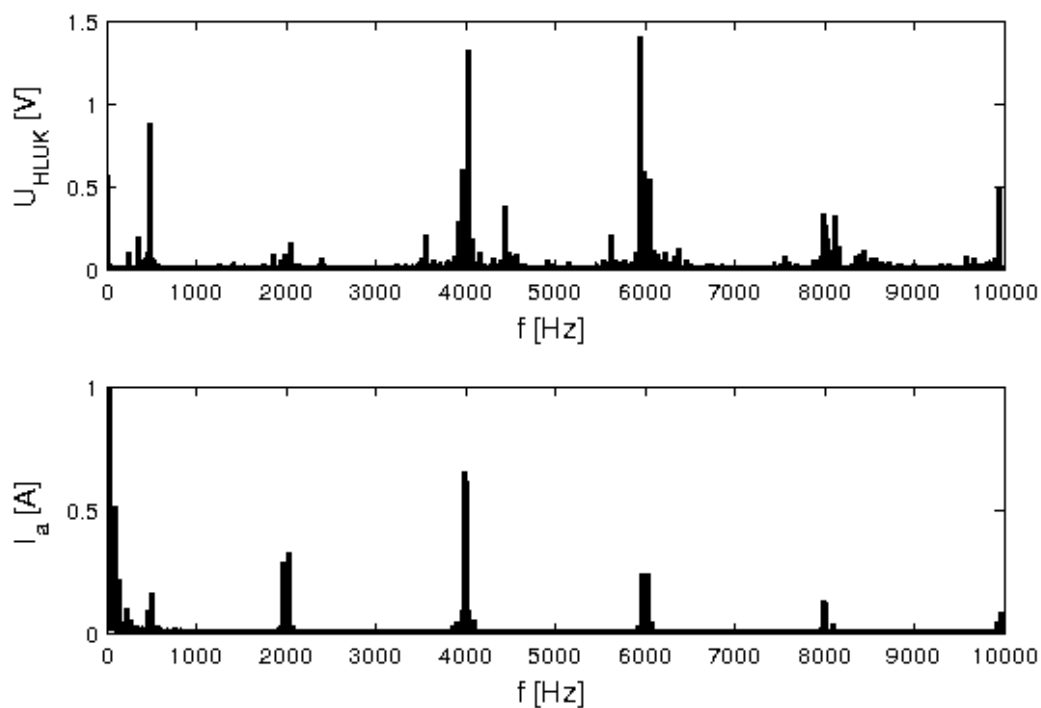
Měření bylo prováděno na čtyřpólovém asynchronním stroji Siemens o těchto parametrech:

Výkon:	11 kW	Napětí:	400/630 V D/Y
Proud:	21,5/12,4 A	Účinitk:	0,84
Otáčky:	1460 ot./min		

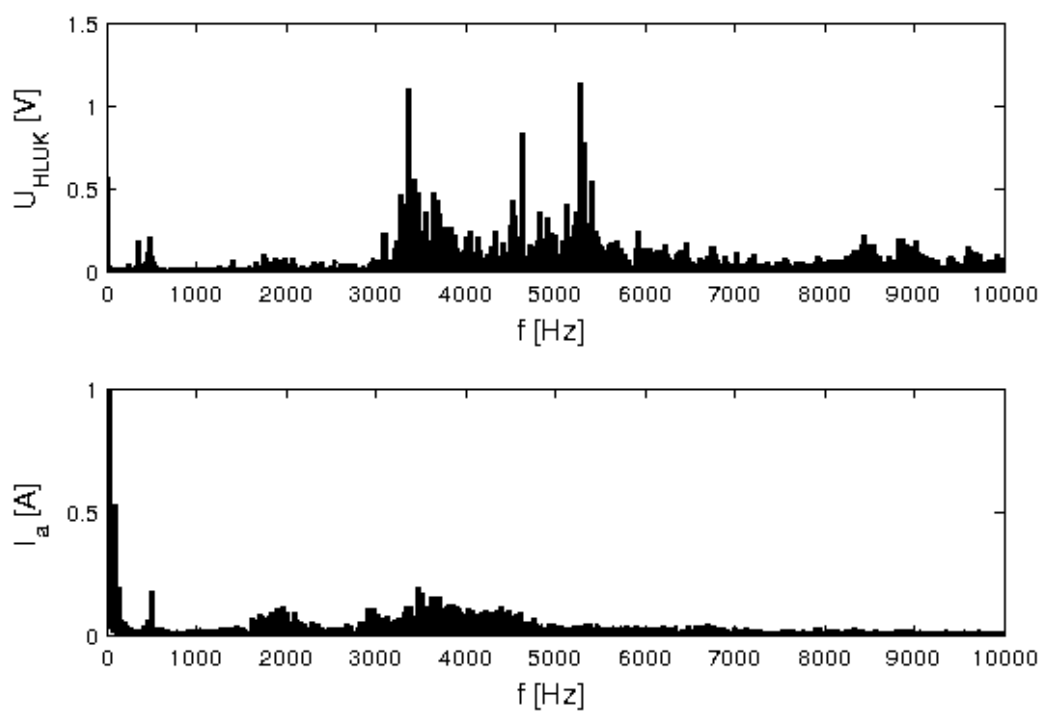
Změřené průběhy hluku a proudů byly analyzovány v Matlabu pomocí FFT stejným způsobem, jako průběhy získané simulací. Vzorkovací frekvence osciloskopu byla $5 \cdot 10^{-7}$ s, délka okna pro FFT 1,28 s. Napájecí napětí bylo 560 V, statorová frekvence 20 Hz (při této frekvenci se ještě příliš neprojevuje hluk ventilátoru).

Byla provedena řada měření při použití klasické PWM o různých spínacích frekvencích a při použití RPWM s náhodnou spínací frekvencí s různými tabulkami. Měřením hluku a proudu při použití klasické PWM bylo zjištěno, že motor reaguje na různé frekvence s velmi různou odezvou. Některé frekvence byly v hluku mnohem výraznější, než by odpovídalo jejich zastoupení ve spektru proudu. Může to být způsobeno mechanickými rezonancemi různých částí motoru, případně i vlivem prostředí, ve kterém měření probíhalo (laboratoř elektrických pohonů). V hluku se také vyskytují některé frekvence, které v proudu vůbec nejsou. To by se dalo vysvětlit nelineární závislostí hluku na proudu. Kromě toho se v hluku i v proudu z neznámých příčin vyskytuje frekvence okolo 480 Hz.

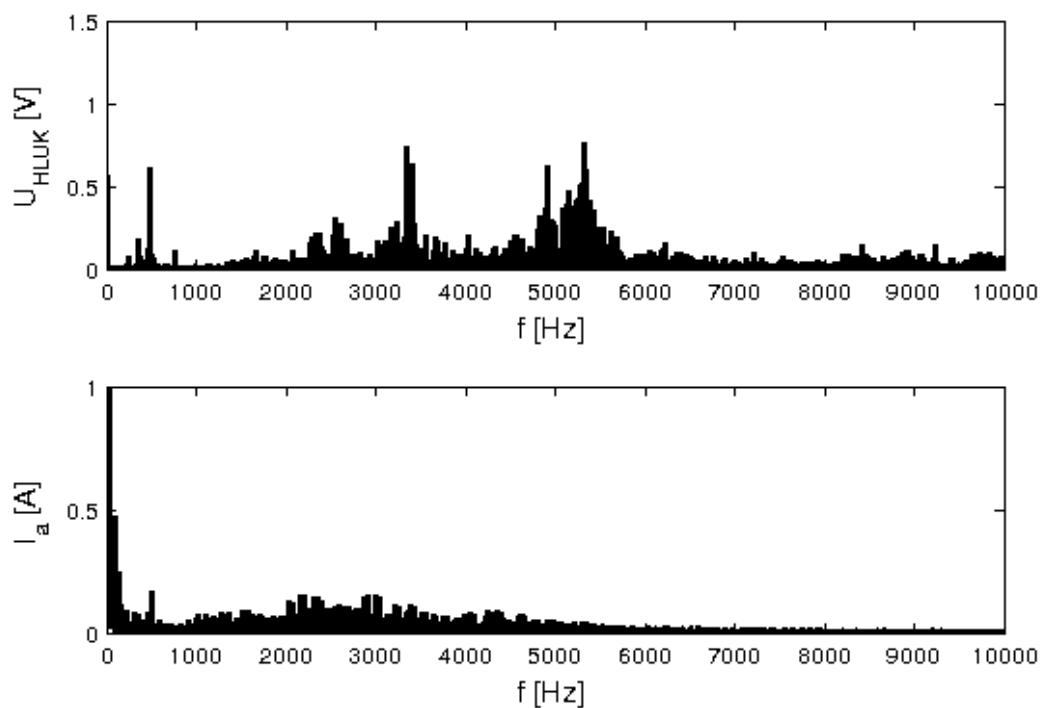
Při měření RPWM bylo vyzkoušeno několik předem vygenerovaných tabulek se spínacími frekvencemi, přičemž byl zkoumán zejména vliv délky tabulky v počtu čísel a rozsahu spínacích frekvencí. Na obr. 9.1 je pro srovnání spektrum proudu a hluku s klasickou PWM o spínací frekvenci 2000 Hz. Na obr. 9.2 a 9.3 jsou výsledná spektra pro RPWM s délkou tabulky 100 hodnot lišící se různým rozsahem generovaných frekvencí. Na obr. 9.4 až 9.7 jsou výsledky při tabulce o délce 255 hodnot a na obr. 9.8 a 9.9 pro tabulku o 1000 hodnotách. Ve všech případech je pravděpodobnostní rozdělení spínacích frekvencí v daném rozsahu rovnoměrné. Podobně jako u spekter napětí získaných simulací, lze i zde říci, že spektrum se zlepšuje se zvětšováním počtu hodnot v tabulce a rozšiřováním rozsahu generovaných čísel. Pokud jde o spektrum hluku, bohužel jsou v něm oproti spektru proudu zvýrazněny některé frekvence, což může mít za příčinu například mechanickou rezonanci.



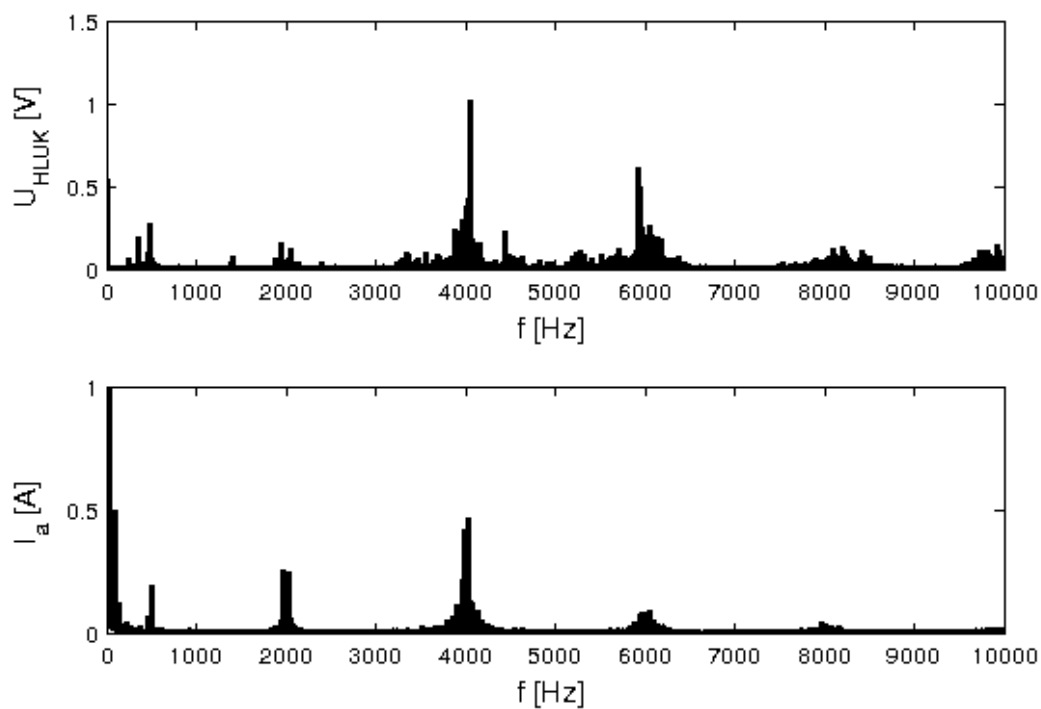
obr. 9.1. Spektrum hluku a proudu u klasické PWM, spínací frekvence 2000 Hz



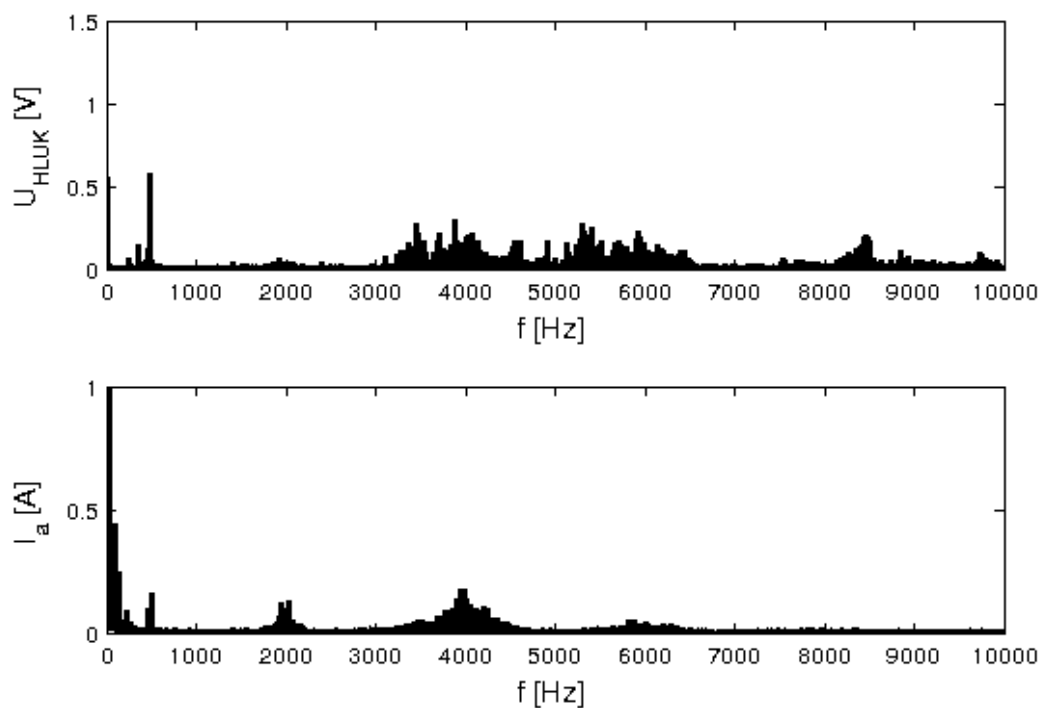
obr. 9.2. Spektrum hluku a proudu při RPWM, počet hodnot: 100, rozsah: 1500 - 2500 Hz



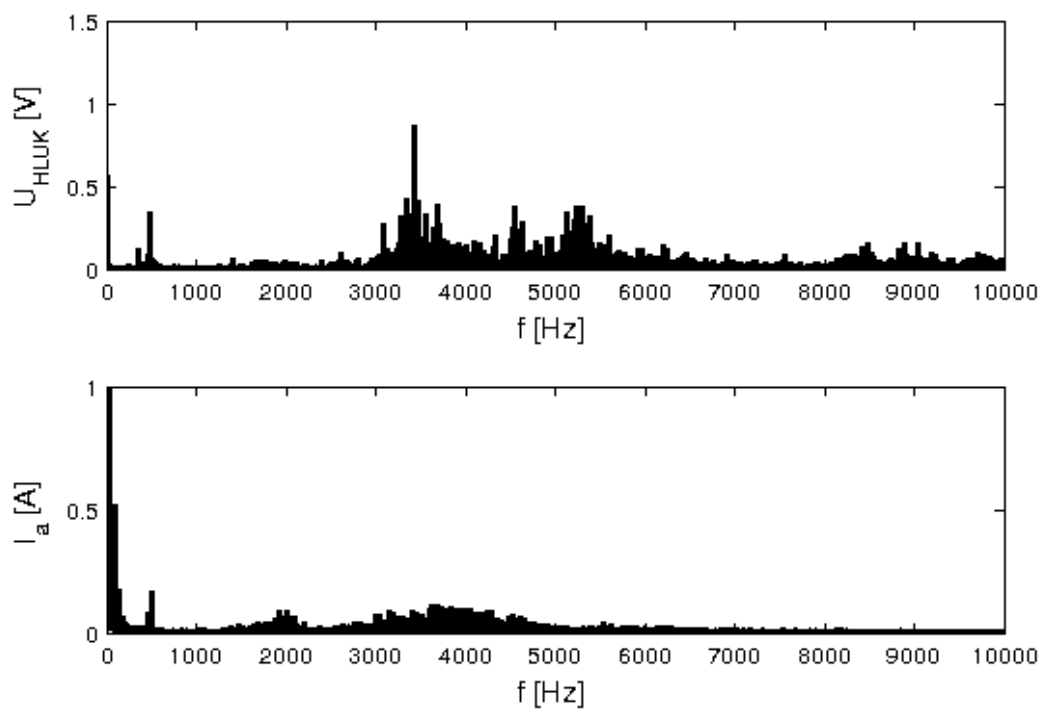
obr. 9.3. Spektrum hluku a proudu při RPWM, počet hodnot: 100, rozsah: 1000 - 3000 Hz



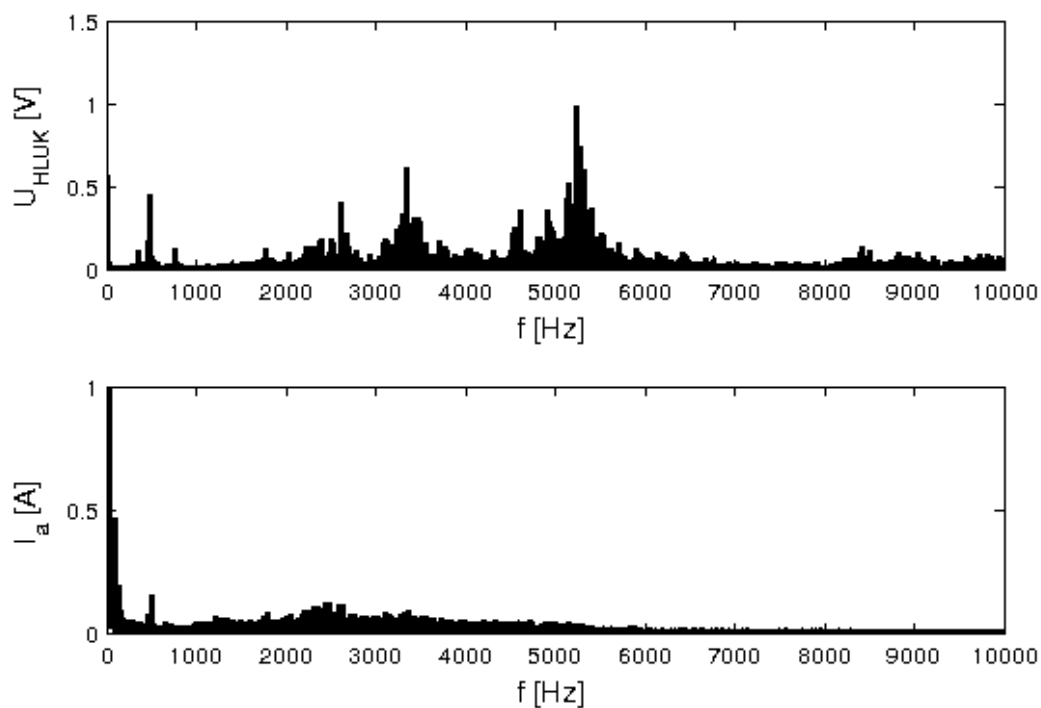
obr. 9.4: Spektrum hluku a proudu při RPWM, počet hodnot: 255, rozsah: 1900 - 2100 Hz



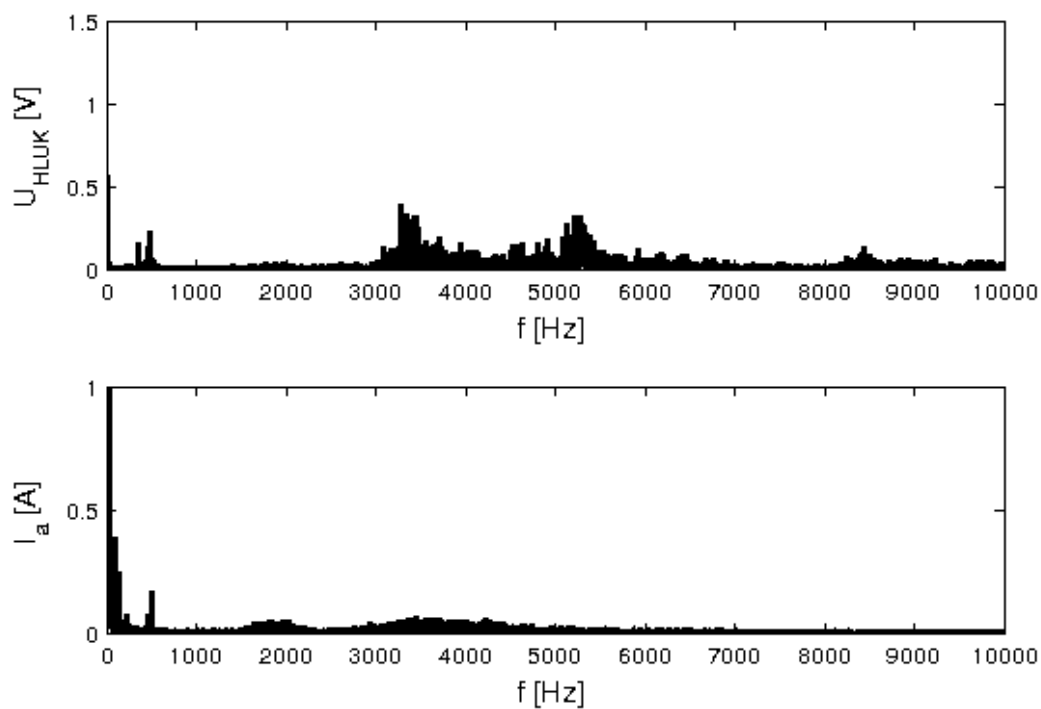
obr. 9.5: Spektrum hluku a proudu při RPWM, počet hodnot: 255, rozsah: 1750 - 2250 Hz



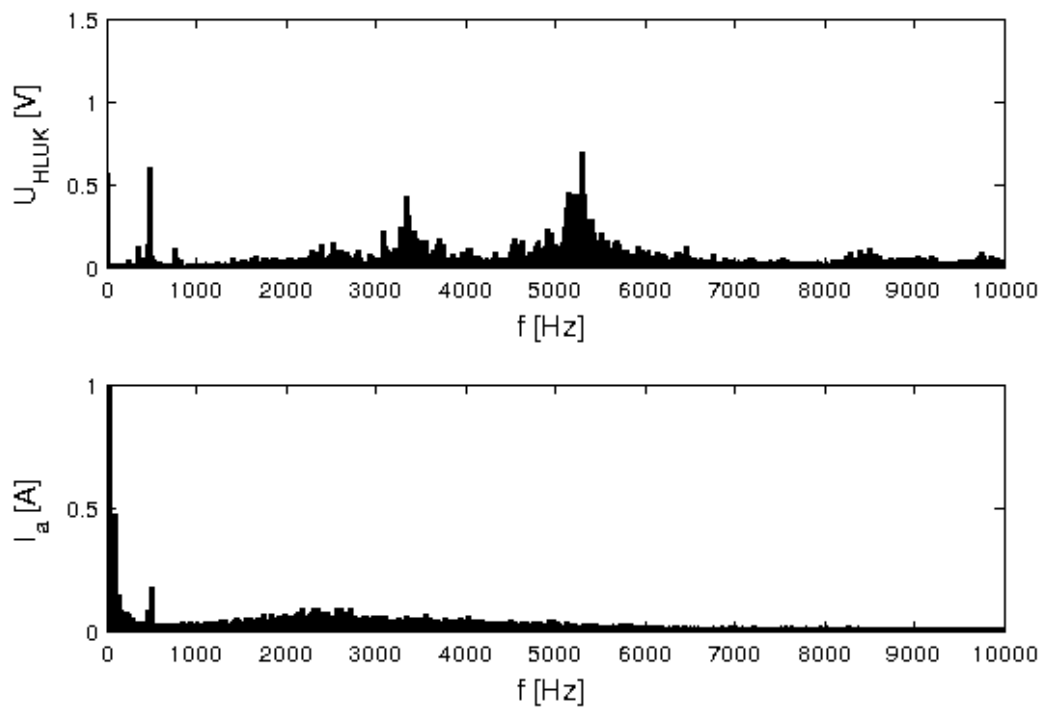
obr. 9.6: Spektrum hluku a proudu při RPWM, počet hodnot: 255, rozsah: 1500 - 2500 Hz



obr. 9.7: Spektrum hluku a proudu při RPWM, počet hodnot: 255, rozsah: 1000 - 3000 Hz



obr. 9.8: Spektrum hluku a proudu při RPWM, počet hodnot: 1000, rozsah: 1500 - 2500 Hz



obr. 9.9: Spektrum hluku a proudu při RPWM, počet hodnot: 1000, rozsah: 1000 - 3000 Hz

10. Závěr

V této práci byly popsány některé z variant náhodné pulsně šířkové modulace (RPWM). Metody RPWM s náhodnou spínací frekvencí, RPWM s náhodnou pozicí pulsu a RPWM s náhodným směrem pily byly nasimulovány v Matlabu při různých podmínkách (délka tabulky, rozsah náhodné veličiny). V případě RPWM s náhodnou spínací frekvencí lze vhodnou volbou parametrů tabulky dosáhnout poměrně výrazného snížení amplitudy jednotlivých frekvenčních složek. V případě RPWM s náhodnou pozicí pulsu a s náhodným směrem pily tento jev nebyl tak výrazný a spektrum napětí se nepodařilo vyhladit tak dokonale, jako v prvním případě.

Zajímavým poznatkem v případě RPWM s náhodnou spínací frekvencí je, že ve frekvenčním spektru se neobjevují frekvence odpovídající frekvencím uloženým v tabulce. Každá z hodnot v tabulce se totiž uplatňuje vždy pouze po dobu jedné spínací periody a ne v celém průběhu. Velký vliv na spektrum napětí má naopak perioda opakování tabulky, to znamená jak dlouho procesoru při řízení měniče trvá, než vystřídá všechny její hodnoty. Tato perioda je v podstatě skutečnou periodou nosného (pilového) signálu PWM. To platí pro všechny simulované metody.

Jako nejperspektivnější metoda pro testování na reálném pohonu byla vzhledem k nasimulovaným spektrům napětím vybrána RPWM s náhodnou spínací frekvencí. K výsledkům měření hluku na reálném pohonu lze říci, že příznivější (tzn. hladší) spektrum napětí vede obecně i k hladšímu průběhu hluku. Nelze na to ale zcela spoléhat, některé frekvence jsou motorem zesíleny mnohem výrazněji než jiné a výsledné spektrum hluku nemusí být tak hladké jako spektrum proudu. Velký vliv zřejmě budou mít mechanické rezonanční frekvence jednotlivých částí stroje, případně i nelineární závislost mezi hluken a proudem.

Pokud jde o parametry tabulky náhodných čísel, zůstává otázkou, do jaké míry lze ovlivnit spektrum napětí úpravou rozložení pravděpodobnosti u generátoru náhodných čísel. Ideální by bylo některé frekvence ze spektra napětí vyloučit (například rezonanční frekvence pohonu). To ale zřejmě nebude tak jednoduché, jelikož o tom, které frekvence se ve spektru vyskytnou, rozhoduje především frekvence opakování tabulky. Na druhou stranu pravděpodobnostní rozdělení má vliv na amplitudy jednotlivých frekvenčních složek.

Dalším problémem je subjektivní vnímání hluku pohonu při použití RPWM. Dosažení příznivého spektra hluku nemusí automaticky znamenat, že tento hluk bude jemu vystavenými osobami skutečně vnímán méně rušivě. Možným řešením by mohla být i kombinace RPWM s

akustickým odstíněním pohonu, které by eliminovalo rezonanční frekvence zejména vyšších kmitočtů (řádově jednotky kHz), které působí obzvláště rušivě.

Literatura

- [1] Hashemi, N., Lisner, R., Holmes, D. G.: Acoustic Noise Reduction for an Inverter-Fed Three-Phase Induction Motor. Industry Applications Conference, 2004. 39th IAS Annual Meeting. Conference Record of the 2004 IEEE, vol. 3
- [2] Nau, S.L., Mello, H.G.G.: Acoustic Noise In Induction Motors: Causes And Solutions. Petroleum and Chemical Industry Conference, 2000. Record of Conference Papers. Industry Applications Society 47th Annual.
- [3] Liaw, C.M., Lin, Y.M.: Random slope PWM inverter using existing system background noise: analysis, design and implementation. Electric Power Applications, IEE Proceedings, vol. 147, no. 1, 2000
- [4] Trzynadlowski, A.M., Blaabjerg, F., Pedersen, J.K., Kirlin, R.L., Legowski, S.: Random pulse width modulation techniques for converter-fed drive systems-a review. IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 30, no. 5, 1994
- [5] Almarri, K.A., Balda, J.C., Carr, K.: Optimized selection of the random PWM switching frequencies in a limited pool. Applied Power Electronics Conference and Exposition. Fifteenth Annual IEEE, vol.1, 2000
- [6] Janda, M.: Hluk trakčního pohonu - analýza a shrnutí hlavních poznatků. Výzkumná zpráva, ZČU, 2012
- [7] Novák, T.: Hluk pohonu s asynchronním motorem. Diplomová práce, ZČU, Plzeň, 2012

- [W1] TMS320x2833x, 2823x Enhanced Pulse Width Modulator (ePWM) Module Reference Guide. Texas Instruments, 2009.
- [W2] Katalogový list k obvodu THAT1510. THAT Corporation, 2009.