

Fakulta elektrotechnická Regionální inovační centrum elektrotechniky

Využití FCS-MPC pro potlačení elektromagnetického hluku pohonu – nastavení parametrů

Pracoviště: RICE
Číslo dokumentu: 22190-047-2018
Typ zprávy: Výzkumná zpráva
Řešitelé: Ing. Michal Kroneisl, Ing. Martin Janda, Ph.D.,
Hlavní řešitel: prof. Ing. Zdeněk Peroutka, Ph.D.
Počet stran: 10
Datum vydání: prosinec 2018
Oborové zařazení: JA – Elektronika a optoelektronika, elektrotechnika

Zadavatel / zákazník:

Zpracovatel / dodavatel:

Západočeská univerzita v Plzni
Regionální inovační centrum
elektrotechniky
Univerzitní 8
306 14 Plzeň

Kontaktní osoba:

Ing. Michal Kroneisl
tel. 37763 4139, mikr@rice.zcu.cz

**Projekt č. TE01020038 „Centrum kompetence drážních vozidel“ je řešen s
finanční podporou TA ČR**

Anotace

Tato výzkumná zpráva se zabývá nastavením řídicího algoritmu FCS-MPC použitého pro řízení elektrického pohonu za účelem potlačení elektromagnetického hluku. Tento algoritmus využívá filtrů pro tvarování spektra. Algoritmus je implementován, změřen a porovnán se standardním řízením s PWM (pulsně šířkovou modulací).

Klíčová slova

elektromagnetický hluk, asynchronní motor, PWM, RPWM, FCS-MPC

Seznam symbolů a zkratek

FCS-MPC	Prediktivní řízení s matematickým modelem a konečnou množinou akčních zásahů (Finite Control Set - Model Predictive Control)
f_R	rotorová frekvence
f_S	statorová frekvence
f_{TAB}	frekvence opakování tabulky náhodných čísel
f_T	spínací frekvence
f_{y_d}, f_{y_q}	výstupy filtrů statorového proudu
g	ztrátová funkce
i_{pd1}, i_{pq1}	predikovaný statorový proud pro kompenzaci dopravního zpoždění (v rotujícím souřadném systému)
i_{pd2}, i_{pq2}	vektor predikovaných statorových proudů (v rotujícím souřadném systému)
i_{sx}, i_{sy}	statorový proud (ve stojícím souřadném systému)
i_{sd}, i_{sq}	statorový proud (v rotujícím souřadném systému)
i_{sdw}, i_{sqw}	požadovaný statorový proud (v rotujícím souřadném systému)
J	moment setrvačnosti
L_h	hlavní (magnetizační) indukčnost stroje
$L_{r\sigma}$	rozptylová indukčnost rotoru
$L_{s\sigma}$	rozptylová indukčnost statoru
M	hloubka modulace
p_p	počet pólů
PWM	pulsně šířková modulace (Pulse Width Modulation)
RPWM	náhodná pulsně šířková modulace (Random Pulse Width Modulation)
RPP	relativní pozice pulsu
R_r	rotorový odpor
R_s	statorový odpor
T_s	vzorkovací perioda
u_{a0}, u_{b0}, u_{c0}	fázové napětí střídače
U_d	napětí stejnosměrného obvodu
u_{sa}, u_{sb}, u_{sc}	fázové napětí motoru
u_{sx}, u_{sy}	vektor střídačem realizovatelných napětí (ve stojícím souřadném systému)
u_{sx}, u_{sy}	fázové napětí motoru (ve stojícím souřadném systému)
u_{sd}, u_{sq}	vektor střídačem realizovatelných napětí (v rotujícím souřadném systému)
u_{sd}, u_{sq}	fázové napětí motoru (v rotujícím souřadném systému)

ψ_{rx}, ψ_{ry}	rotorový tok (ve stojícím souřadném systému)
ψ_{rd}, ψ_{rq}	rotorový tok (v rotujícím souřadném systému)
ω_m	mechanická úhlová frekvence
ω_s	úhlová statorová frekvence

Anotace	2
Klíčová slova	2
Seznam symbolů a zkratk	3
1 Úvod	5
2 Řídicí algoritmus pohonu	5
3 Pohon a měření.....	7
4 Výsledky měření.....	8
5 Závěr.....	10
6 Literatura.....	11

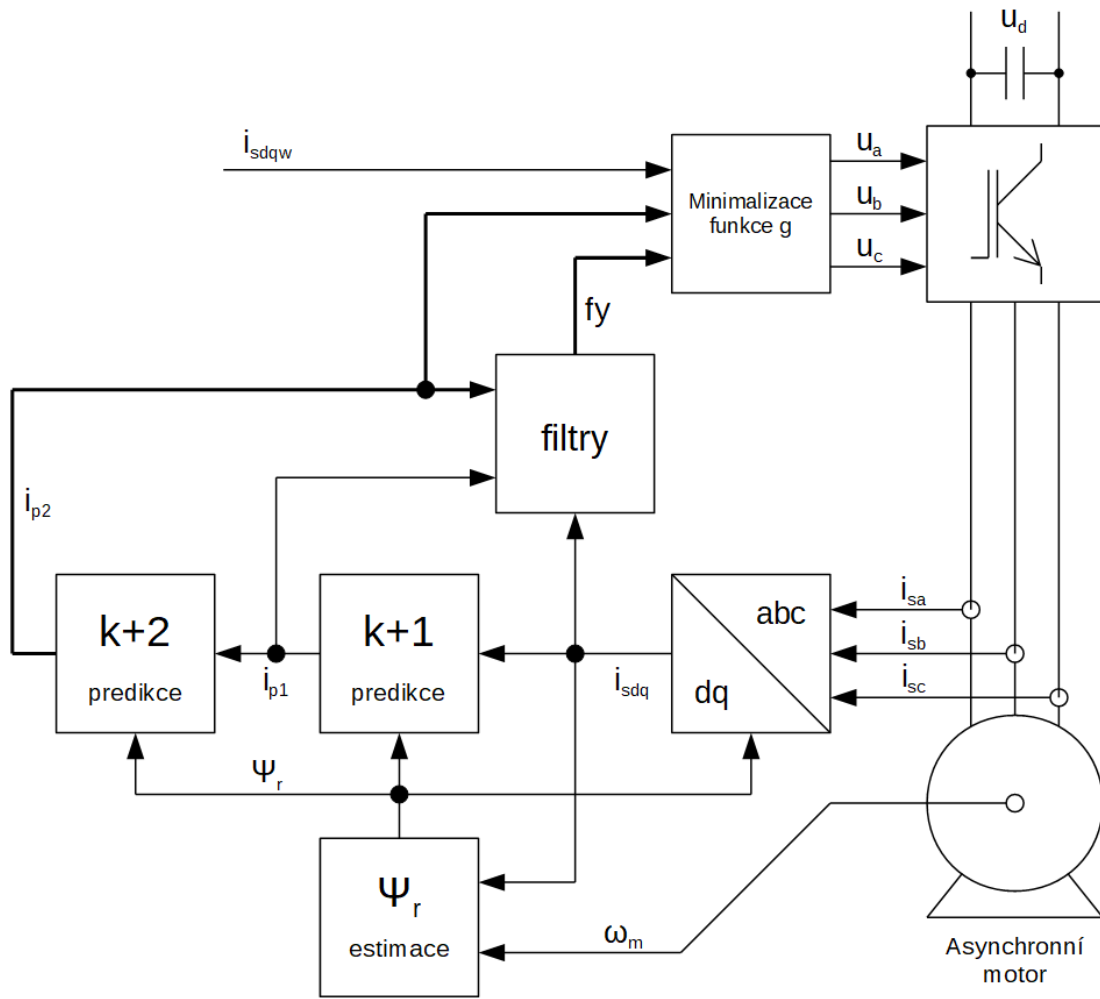
1 Úvod

Prediktivní řízení představuje perspektivní způsob, jak řídit elektrický pohon. Námi použitý algoritmus FCS-MPC využívá matematický model elektrického pohonu s asynchronním motorem k nalezení optimálního akčního zásahu – tedy výstupního napětí střídače. Algoritmus tak je schopen nahradit jak vektorové řízení pro regulaci motoru, tak modulaci pro řízení měniče. Kromě toho algoritmus umožňuje přidávat do ztrátové funkce další kritéria, která jsou zohledněna při regulaci a stanovení optimálního akčního zásahu.

V našem případě bylo cílem, aby pohon produkoval co nejmenší elektromagnetický hluk s co nejmenší tonalitou. Toho lze dosáhnout vhodným tvarováním frekvenčního spektra statorového proudu tak, abychom se vyhnuli mechanickým rezonančním frekvencím motoru.

2 Řídicí algoritmus pohonu

Námi použitý algoritmus je založen na FCS-MPC (Finite Control Set - Model Predictive Control). Tento algoritmus využívá matematického modelu pohonu k výběru optimálního akčního zásahu z konečné množiny. Regulovanou veličinu představuje statorový proud, konkrétně jeho tokotvorná složka (i_{sd}) a momentotvorná složka (i_{sq}). Akčními zásahy jsou vektory napětí realizovatelné střídačem.



Obr. 1: Blokové regulační schéma FCS-MPC v rotující souřadném systému

Řídicí algoritmus pracuje se vzorkovací frekvencí 37,5 kHz. Vstupem algoritmu je změřený proud a otáčky (poloha) rotoru. Z těchto veličin se estimuje rotorový tok. Následně probíhá kompenzace dopravního zpoždění (predikce k+1) a predikce proudu pro všechny vektory napětí (predikce k+2). Kromě toho řízení obsahuje filtry, které umožňují tvarovat spektrum proudu a tím se vyhnout mechanickým rezoncím.

Řídicí algoritmus využívá matematický model asynchronního motoru v rotujícím souřadném systému [2]. Standardní ztrátová funkce pro regulaci pohonu může vypadat například takto:

$$g(x_{\text{pred}}, S_i) = |i_{sd}^* - \hat{i}_{sd,k+2}(S_i)| + |i_{sq}^* - \hat{i}_{sq,k+2}(S_i)| \quad (1)$$

kde i_{sd}^* a i_{sq}^* jsou požadované hodnoty statorového proudu a $\hat{i}_{sd,k+2}(S_i)$ a $\hat{i}_{sq,k+2}(S_i)$ jsou predikované hodnoty, které jsou funkcí spínací kombinace střídače S_i . Při použití dvouúrovňového třífázového napěťového střídače je těchto kombinací celkem $2^3 = 8$, přičemž každá spínací kombinace odpovídá jednomu vektoru statorového napětí [1]. Kvůli potřebě tvarování spektra je použit filtr, jehož výstup je zahrnut do ztrátové funkce. Přenos filtru je v obvyklém tvaru:

$$F_f = \frac{b_0 + b_1 z^{-1} + b_2 z^{-2}}{a_0 + a_1 z^{-1} + a_2 z^{-2}} \quad (2)$$

Výpočet výstupu filtrů probíhá z predikovaných a změřených hodnot proudu dle vztahu:

$$y_{f,k}(S_i) = b_0 \hat{i}_{sd,k+2}(S_i) + b_1 \hat{i}_{sd,k+1} + b_2 i_{sd,k} - a_1 y_{f,k-1} - a_2 y_{f,k-2} \quad (3)$$

Ztrátová funkce pro řízení s tvarováním spektra pak vypadá následovně:

$$g(x_{pred}, S_i) = |i_{sd}^* - \hat{i}_{sd,k+2}(S_i)| + |i_{sq}^* - \hat{i}_{sq,k+2}(S_i)| + \lambda |y_{f1,k}(S_i)|^2 \quad (4)$$

kde λ je koeficient určující váhu výstupu filtru ve ztrátové funkci a tím i míru jeho vlivu na tvar frekvenčního spektra proudu. V našem případě byla jako filtr použita pásmová propust 2. řádu s propustným pásmem 5200 až 5400 Hz. Uprostřed tohoto pásma leží mechanická rezonance motoru. Chceme-li získat co nejnižší elektromagnetický hluk, je vhodné tuto frekvenci v proudu potlačit.

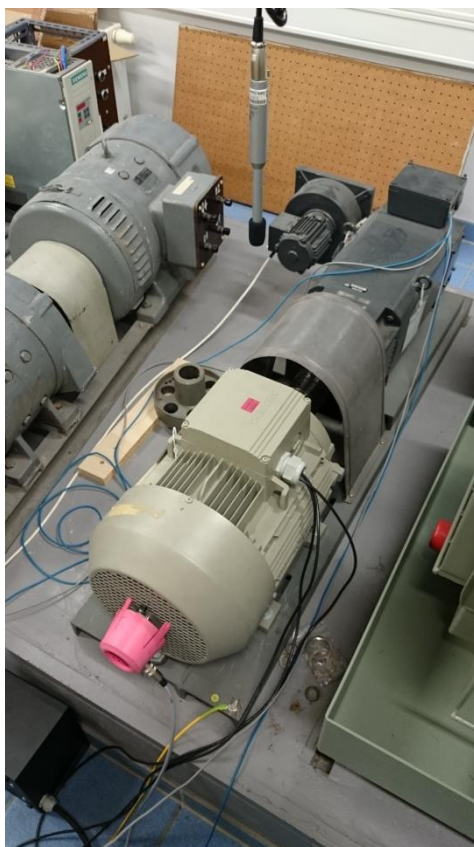
3 Pohon a měření

Řídicí algoritmus byl testován na pohonu s napěťovým střídačem, který napájel čtyřpólový asynchronní motor Siemens 1LA7163-4AA60-Z o výkonu 11 kW. Motor byl zatížen dynamem na 25 % svého jmenovitého momentu. Otáčky byly v průběhu měření nastaveny nadřazeným PI regulátorem na 750 ot./min. Střídač byl napájen ze stejnosměrného zdroje o napětí 560 V. K řízení střídače byl použit MLC interface s procesorem TMS320F28335. Vzorkovací frekvence algoritmu byla zvolena 37,5 kHz.

Pro každé nastavení koeficientů ve ztrátové funkci byl změřen průběh proudů a hluku. Délka každého měření byla 10 s a vzorkovací frekvence 100 kHz. Ze získaných dat bylo vypočítáno frekvenční spektrum, spektrální hustota, hlasitost vážená filtrem typu A (L_{pA}) a plochost spektra (SFM). Ta je definována jako poměr geometrického a aritmetického průměru spektra:

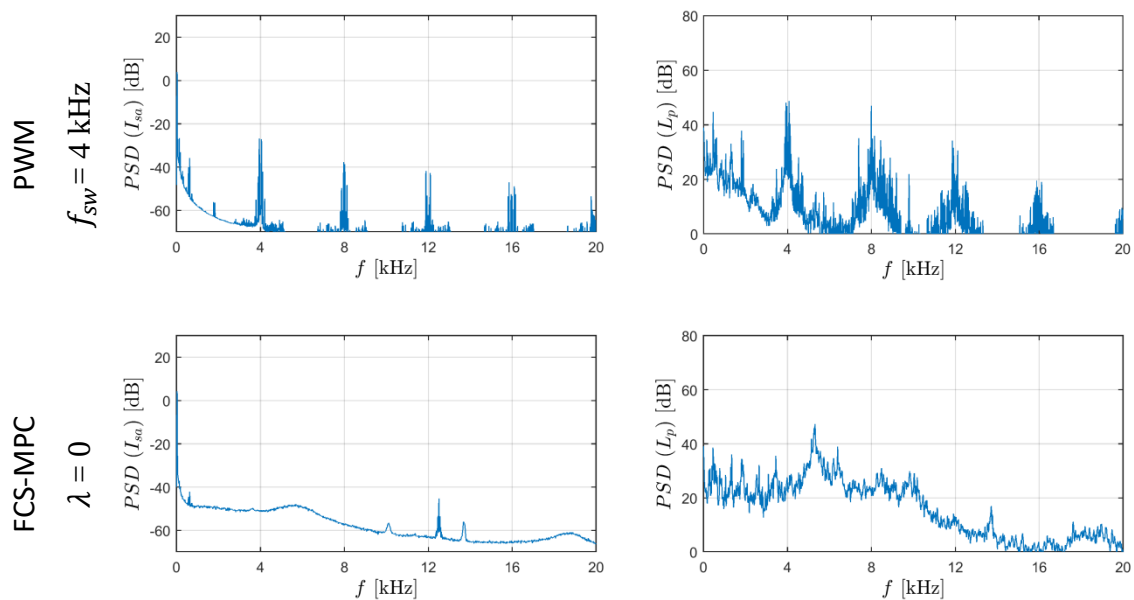
$$SFM = \frac{\sqrt[N]{\prod_{k=0}^{N-1} P(k)}}{\frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} P(k)} \quad (5)$$

a nabývá hodnot od 0 (čistý tón) do 1 (bílý šum). Plochost spektra je převrácenou hodnotou veličiny zvané tonalita. Spektrální hustota byla vyhodnocena Welchovou metodou.

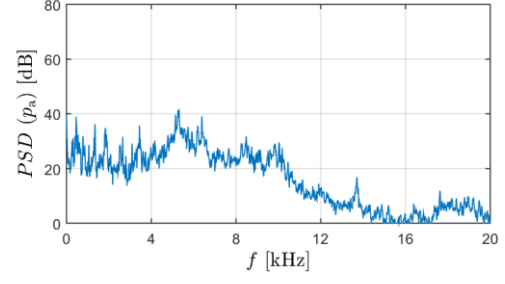
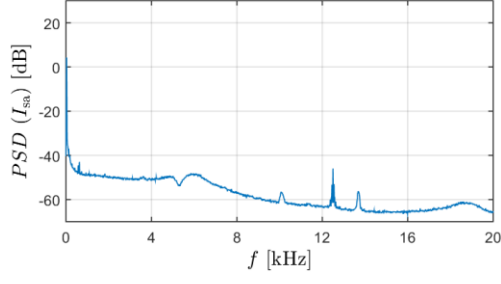


Obr. 2: Měřené soustrojí asynchronní motor + stejnosměrný stroj

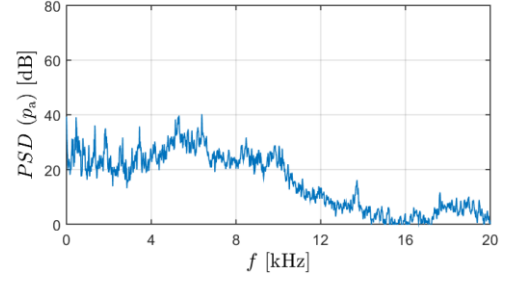
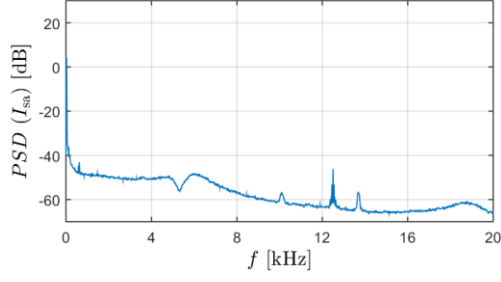
4 Výsledky měření



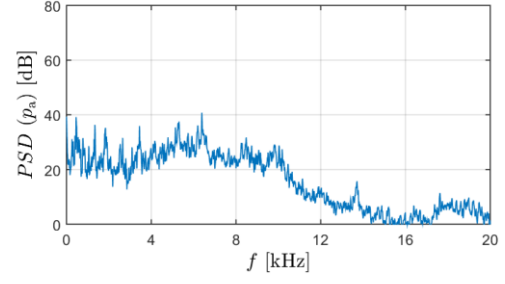
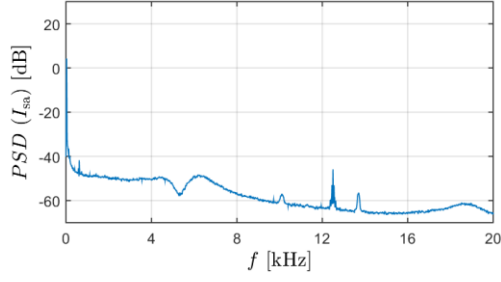
FCS-MPC

 $\lambda = 50$ 

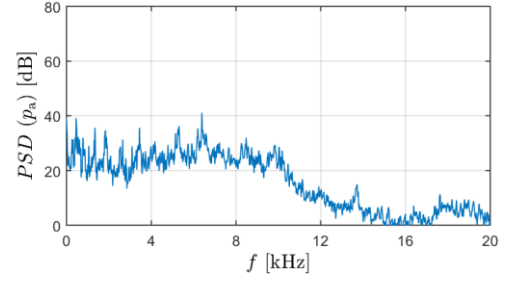
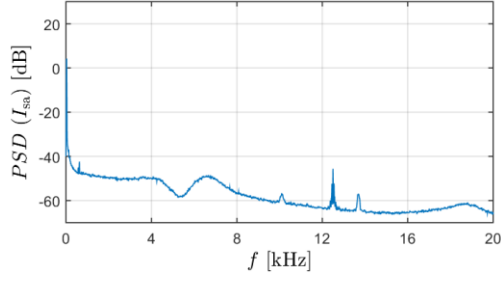
FCS-MPC

 $\lambda = 100$ 

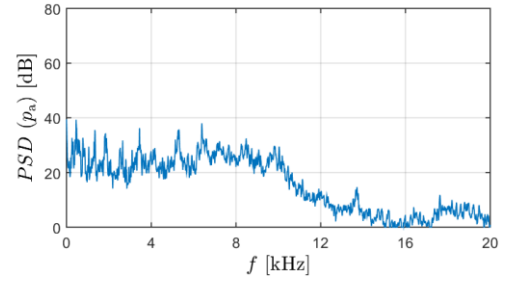
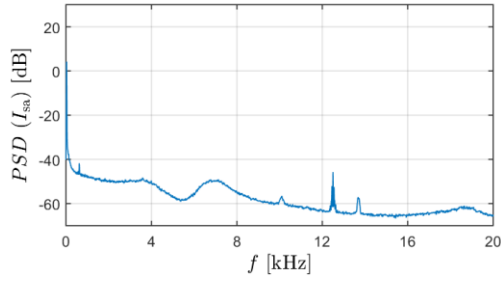
FCS-MPC

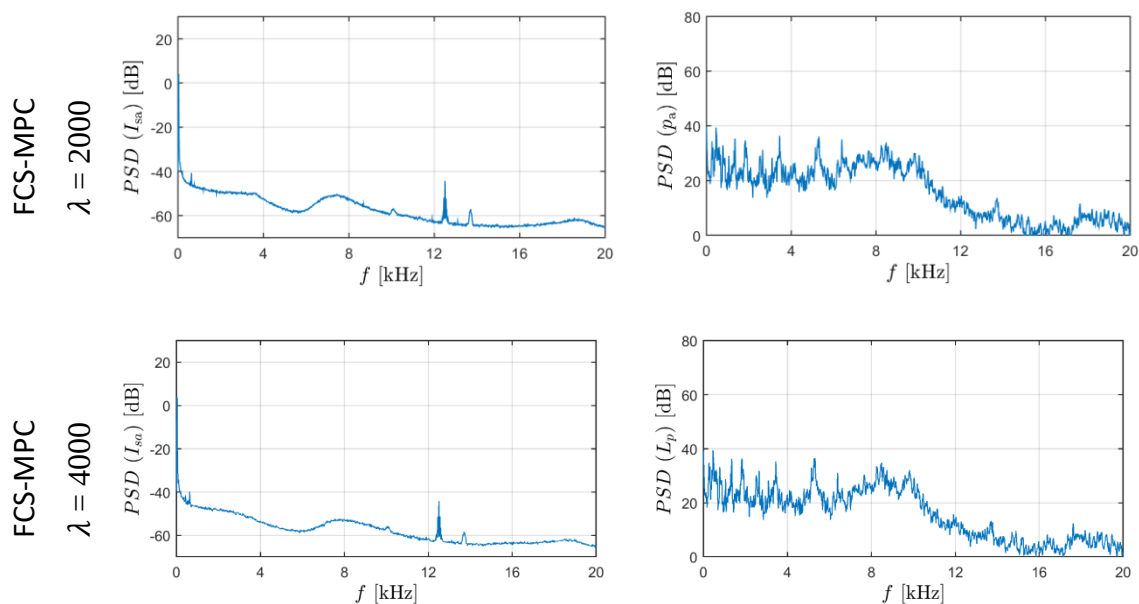
 $\lambda = 200$ 

FCS-PC

 $\lambda = 500$ 

FCS-MPC

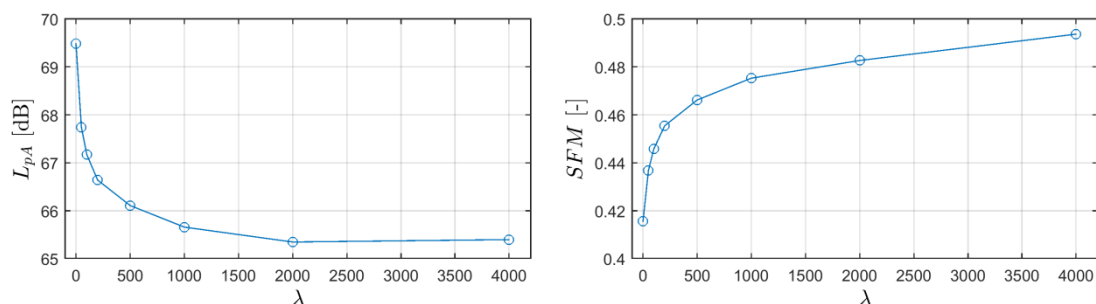
 $\lambda = 1000$ 



Obr. 3: Spektrální hustota (PSD) hluku a proudu pro PWM a FCS-MPC

5 Závěr

Bylo provedeno několik měření algoritmu založeného na FCS-MPC pro různé hodnoty váhového koeficientu λ . Kromě toho bylo pro srovnání provedeno měření při použití obvyklého řízení s pulsně šířkovou modulací (PWM) a skalárním řízením otáček. Spektrální hustota (PSD) z fázového proudu a hluku pro různá nastavení a PWM je na obr. 3. Na obr. 4. je pak závislost hlasitosti a plochosti spektra na nastavení koeficientu λ . Ze spekter je vidět, že PWM produkuje frekvenční spektrum plné špiček a výsledný hluk vykazuje vysokou tonalitu a tedy nízkou plochost spektra. Algoritmus založený na FCS-MPC vykazuje při $\lambda = 0$ (tedy bez použití tvarování spektra) sice vyšší hlasitost L_{pA} , ale zároveň menší tonalitu (vyšší SFM). Pohon tedy při provozu méně „píská“. Použijeme-li tvarování spektra (FCS-MPC při $\lambda = 4000$), hlasitost klesne opět pod hlasitost PWM a navíc získáme ještě více ploché spektrum (viz tabulka I).



Obr. 4: Závislost hlasitosti (L_{pA}) a plochosti spektra (SFM) na nastavení koeficientu λ

Řídicí algoritmus	L_{pA} [dB]	SFM [dB]
PWM (4 kHz)	66,6	0,250
FCS-MPC ($\lambda = 0$)	69,5	0,416
FCS-MPC ($\lambda = 50$)	67,7	0.437

FCS-MPC ($\lambda = 100$)	67.2	0.446
FCS-MPC ($\lambda = 200$)	66.6	0.455
FCS-MPC ($\lambda = 500$)	66.1	0.466
FCS-MPC ($\lambda = 1000$)	65.7	0.475
FCS-MPC ($\lambda = 2000$)	65.4	0.483
FCS-MPC ($\lambda = 4000$)	65,4	0,494

Hlasitost a plochost spektra pro různé řídicí algoritmy a nastavení

6 Literatura

- [1] Vondrášek, F.: Výkonová elektronika: Měníče s vlastní komutací a bez komutace. Západočeská univerzita v Plzni, 2003
- [2] Zeman, K., Peroutka, Z., Janda, M.: Automatická regulace pohonů s asynchronními motory. Západočeská univerzita v Plzni, 2007
- [3] Rodríguez, J., Cortés, P.: Predictive Control of Power Converters and Electrical Drives. Wiley 2012