

# Nastavení parametrů prediktivního řízení pro potlačení elektromagnetického hluku pohonu

Michal Kroneisl

Katedra elektromechaniky a výkonové elektroniky

Fakulta elektrotechnická

Západočeská univerzita v Plzni

mikr@rice.zcu.cz

## Predictive Control Parameters Tuning for Reducing of Electric Drive Electromagnetic Noise

**Abstract** – This paper shows how to tune control algorithm of electric drive to reduce its electromagnetic noise. The used algorithm is based on FCS-MPC (Finite Control Set – Model predictive control) and it employs filters for spectrum shaping. The algorithm is implemented, measured and compared with standard control with PWM (Pulse Width Modulation).

**Keywords** – Electromagnetic Noise; FCS-MPC; Induction Motor

### I. ÚVOD

Prediktivní řízení představuje perspektivní způsob, jak řídit elektrický pohon. Námí použitý algoritmus FCS-MPC využívá matematický model elektrického pohonu s asynchronním motorem k nalezení optimálního akčního zásahu – tedy výstupního napětí střídače. Algoritmus tak je schopný 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.

### II. ŘÍDÍCÍ ALGORITMUS POHONU

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

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

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 napětového 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:

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

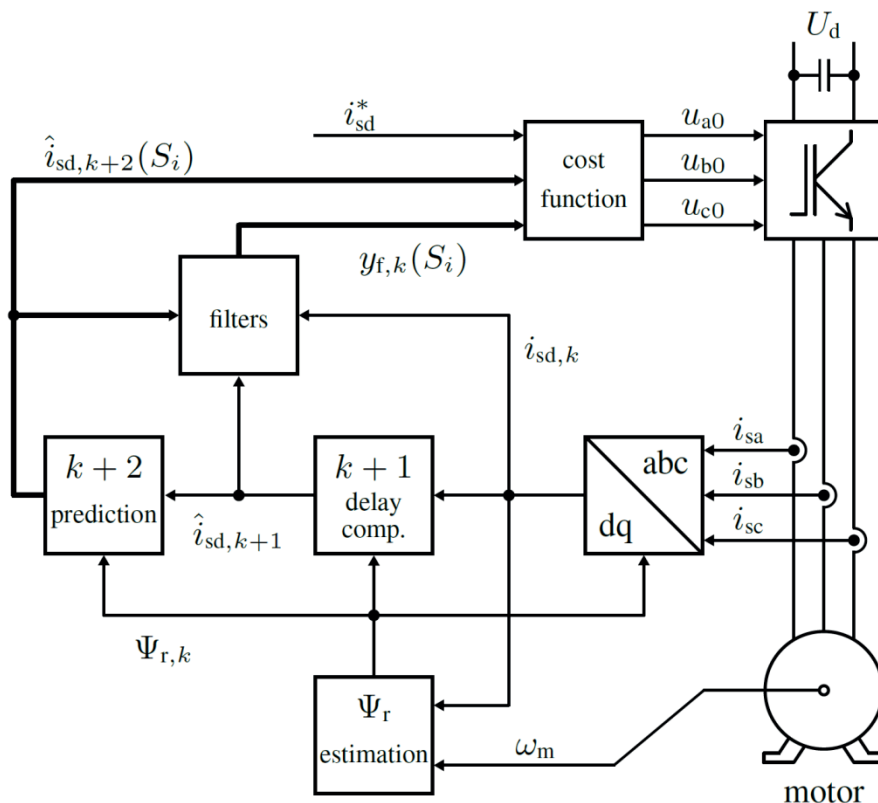
Výpočet výstupu filtrů probíhá z predikovaných a změřených hodnot proudu dle vztahu:

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

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  $\lambda$  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.



**Obrázek I. Blokové schéma řídicího algoritmu pohonu**

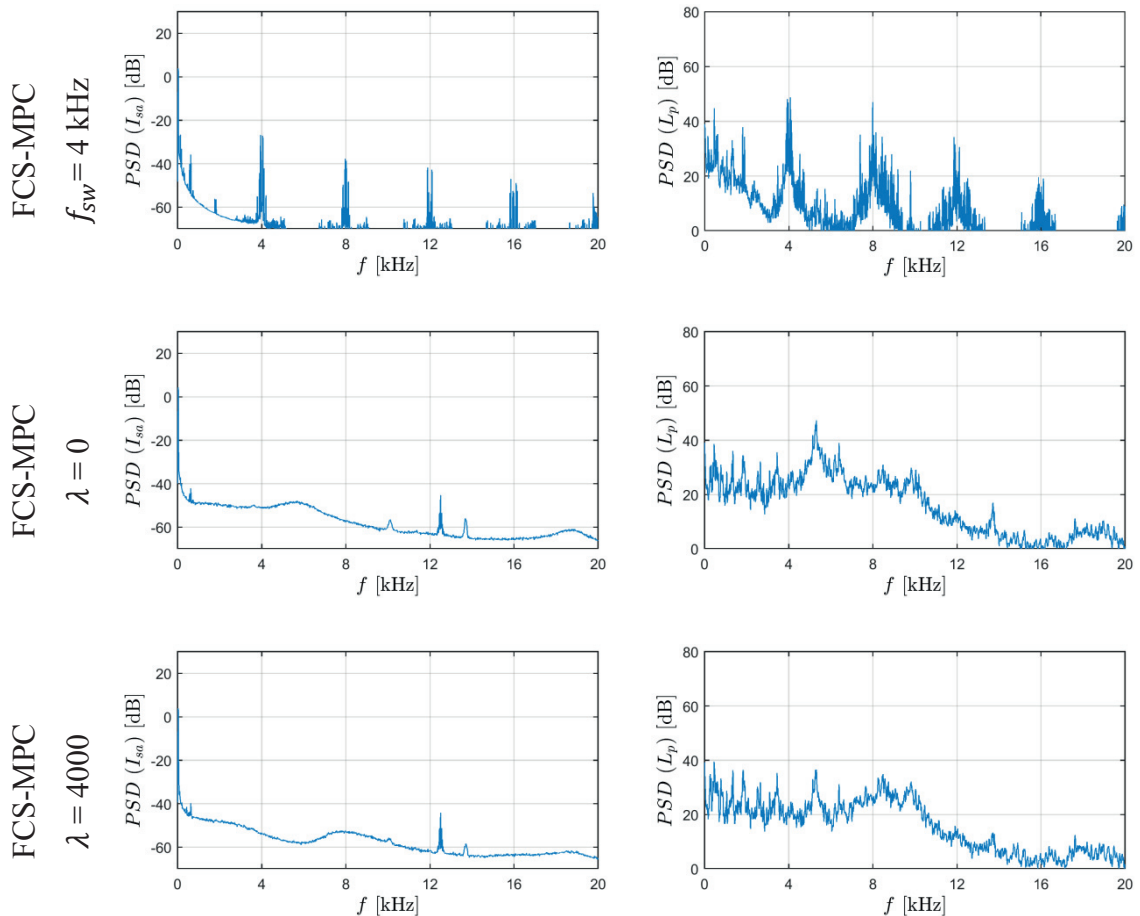
### III. POHON A MĚŘENÍ

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. Vzorovací 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.

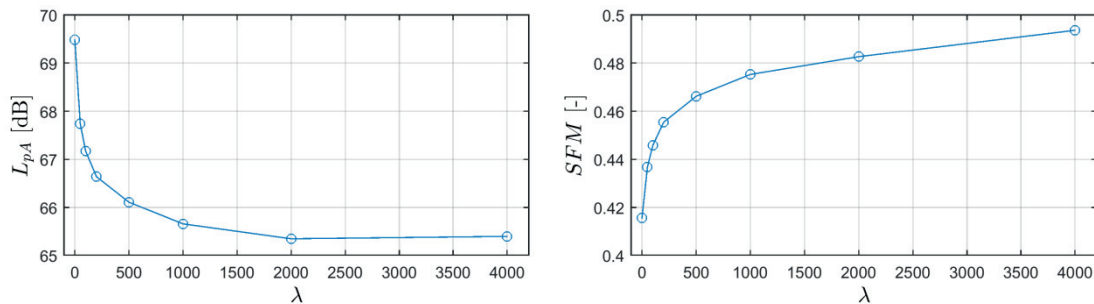


**Obrázek II.** Spektrální hustota (PSD) hluku a proudu pro PWM a FCS-MPC

#### IV. ZÁVĚR

Bylo provedeno několik měření algoritmu založeného na FCS-MPC pro různé hodnoty váhového koeficientu  $\lambda$ . 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 2 různá nastavení a PWM je na obr. II. Na obr. III. je pak závislost hlasitosti a plochosti spektra na nastavení koeficientu  $\lambda$ . 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).



**Obrázek III. Závislost hlasitosti ( $L_{pA}$ ) a plochosti spektra ( $SFM$ ) na nastavení koeficientu  $\lambda$**

**TABULKA I. HLASITOST A PLOCHOST SPEKTRA PRO RŮZNÉ ŘÍDÍCÍ ALGORITMY A NASTAVENÍ**

Řídící algoritmus	$L_{pA}$ [dB]	$SFM$ [dB]
PWM (4 kHz)	66,6	0,250
FCS-MPC ( $\lambda = 0$ )	69,5	0,416
FCS-MPC ( $\lambda = 4000$ )	65,4	0,494

### PODĚKOVÁNÍ

Tento článek vznikl za podpory interního projektu na podporu studentských vědeckých konferencí SVK-2018-005 a projektu SGS-2018-009: Výzkum a vývoj perspektivních technologií v elektrických pohonech a strojích III.

### LITERATURA

- [1] Vondrášek, F.: Výkonová elektronika: Měniče 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