

Implementace redukováného Kalmanova filtru pro filtrování polohy a rychlosti stroje

Pracoviště: RICE
Číslo dokumentu: 22190-016-2024
Typ zprávy: Výzkumná zpráva
Řešitelé: Ing. Antonín Glac
Hlavní řešitel: Prof. Ing. Zdeněk Peroutka, Ph.D.
Počet stran: 16
Datum vydání: 20.9.2024
Oborové zařazení: 2.2 Electrical engineering, Electronic engineering, Information engineering - Electrical and electronic engineering

Zadavatel / zákazník:

Zpracovatel / dodavatel:

Západočeská univerzita v Plzni
Research and Innovation centre for Electrical
Engineering
Univerzitní 8
306 14 Plzeň

Kontaktní osoba:

Ing. Antonín Glac
tel. 377634108
glac@fel.zcu.cz

Tato zpráva vznikla s podporou projektu TA ČR TM03000034 EVBoat

Anotace

Tato výzkumná zpráva popisuje navržené algoritmy řízení a regulace vhodné pro pohon se synchronním motorem s permanentními magnety. V úvodní části je popsán celkový algoritmus vektorového řízení (FOC) a jeho jednotlivé komponenty. V hlavní části je popsán algoritmus redukovaného Kalmanova filtru pro vyhlazení polohy stroje a výpočet úhlové rychlosti na základě dat z čidla polohy.

Klíčová slova

vektorové řízení, redukovaný Kalmanův filtr, PMSM

Název zprávy v anglickém jazyce / Report title

Reduced Kalman Filter Implementation to Position and Velocity Signal Smoothing

Anotace v anglickém jazyce / Abstract

This research report deals with control algorithm of the permanent magnet synchronous drive. In the beginning, the Field oriented control (FOC) algorithm is described. In the main part, the Reduced Kalman Filter algorithm is described. The main goal of the filter is smoothing of the position signal from the sensor and the velocity signal computation.

Klíčová slova v anglickém jazyce / Keywords

FOC, Reduced Kalman Filter, PMSM

Seznam symbolů a zkratek

$PMSM$	Synchronní motor s permanentními magnety
I_{max}	Maximální RMS hodnota proudu statoru
I_{s_max}	Maximální amplituda proudu statoru
R_s	Odpor statorového vinutí jedné fáze
L_{sd}	Indukčnost v ose d
L_{sq}	Indukčnost v ose q
ψ_{pm}	Magnetický tok permanentních magnetů
p_p	Počet pólů stroje
J	Moment setrvačnosti rotoru
ϑ_m	Úhel natočení rotoru
ϑ_{el}	Úhel natočení rotoru v elektrických souřadnicích
ω_m	Mechanická úhlová rychlost rotoru
ω_{el}	Elektrická úhlová rychlost rotoru
k_p	Proporcionální zesílení regulátoru
τ	Časová konstanta integračního zesílení regulátoru
I_{sa}, I_{sb}, I_{sc}	Měřené fázové proudy statoru
I_{sd}	Měřená hodnota proudu v ose d
I_{sdw}	Požadovaná hodnota proudu v ose d
I_{sdw_R}	Výstup regulátoru hloubky modulace
I_{sdw_MTPA}	Výstup bloku MTPA
I_{sq}	Měřená hodnota proudu v ose q
I_{sqw}	Požadovaná hodnota proudu v ose q
I_{sqw_lim}	Hodnota proudu v ose q před omezením celkové amplitudy proudu
I_{sqw_unlim}	Požadovaná hodnota proudu v ose q bez omezení

U_{sd0}	Výstup napětí dopředného modelu v ose d
U_{sq0}	Výstup napětí dopředného modelu v ose q
ΔU_{sdw}	Výstup napětí regulátoru proudu v ose d
ΔU_{sqw}	Výstup napětí regulátoru proudu v ose q
U_{sdw}	Požadovaná hodnota napětí v ose d
U_{sqw}	Požadovaná hodnota napětí v ose q
R_{Isd}	Regulátor proudu v ose d
R_{Isq}	Regulátor proudu v ose q
R_{Urm}	Regulátor hloubky modulace
R_{ω}	Regulátor otáček
U_c	Hodnota napětí stejnosměrného meziobvodu
U_{c_filt}	Filtrovaná hodnota napětí stejnosměrného meziobvodu
U_{sw}	Amplituda požadovaného napětí
PWM	Pulzně šířková modulace

Obsah

1	Úvod	5
2	Popis algoritmu řízení	5
2.1	Regulační schéma	5
2.2	Kalmanův filtr pro výpočet rychlosti	6
2.2.1	Model 2. řádu	6
2.2.2	Model 3. řádu	6
2.2.3	Generování kódu	7
2.3	Rozšířený Kalmanův filtr pro vyhlazení polohy	8
2.3.1	Ladění filtru	10
2.4	Doporučené nastavení regulátorů a filtrů	10
3	Měření	11
3.1	Výpočet rychlosti	13
4	Závěr	14

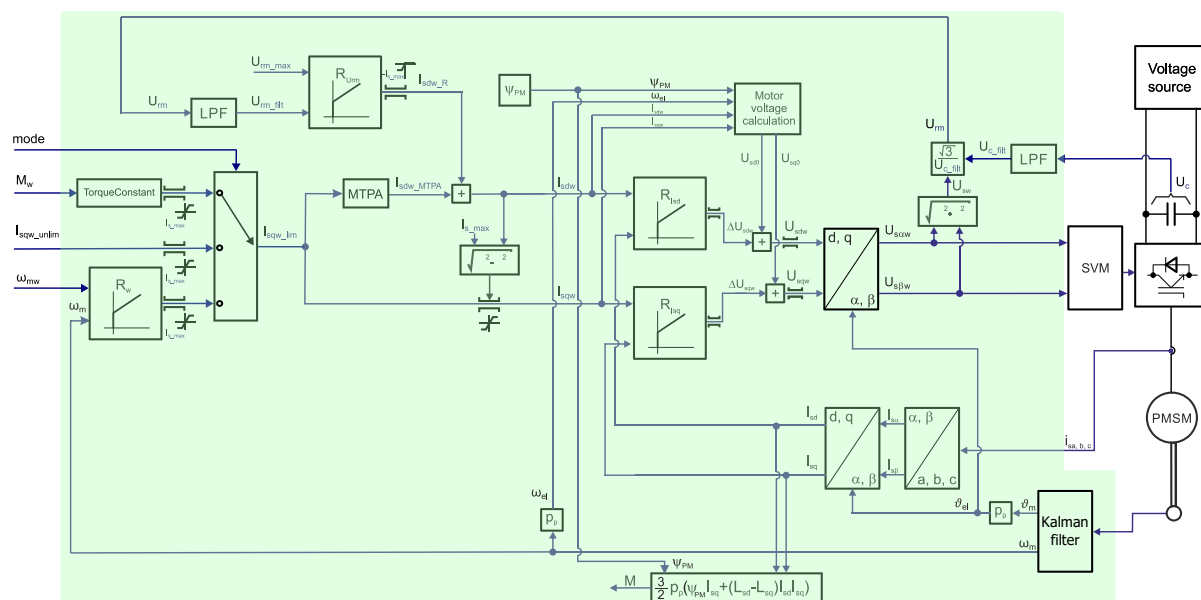
1 Úvod

Tato výzkumná zpráva popisuje navržené algoritmy řízení a regulace vhodné pro pohon se synchronním motorem s permanentními magnety. Zpráva popisuje celkový algoritmus vektorového řízení (FOC) a jeho jednotlivé komponenty. V hlavní části je popsán algoritmus redukovaného Kalmanova filtru pro vyhlazení polohy stroje a výpočet úhlové rychlosti na základě dat z čidla polohy.

2 Popis algoritmu řízení

2.1 Regulační schéma

Kompletní regulační schéma je na 2.1. Dodávaný algoritmus řízení je vyznačen zelenou barvou. Vstupní požadavek je zadáván pomocí struktury Command. Pomocí parametru *mode* (výčtový typ s hodnotami - SPEED_CONTROL, TORQUE_CONTROL, ISQ_CONTROL) lze zvolit vstupní veličinu regulace - požadovanou rychlost, požadovaný moment, nebo požadovaný proud v ose q . Každý ze vstupů má zajištěné omezení proudu na maximální povolenou hodnotu. Regulace pohonu s PMSM vyžaduje měření fázových proudů a polohy rotoru (resolver). S ohledem na široký rozsah povoleného napětí napájecího zdroje je nutné měřit napětí ve stejnosměrném meziobvodu měniče.



Obr. 2.1: Kompletní regulační schéma

2.2 Kalmanův filtr pro výpočet rychlosti

Pro výpočet úhlové rychlosti otáčení stroje na základě signálu z čidla polohy lze využít Kalmanův filtr (KF). Jako stavové veličiny zde jsou elektrická úhlová rychlost otáčení rotoru ω_{el} a elektrická poloha rotoru ϑ_{el} .

2.2.1 Model 2. řádu

Stavové matice jsou uvedeny (2, 3)

$$x_2 = \begin{bmatrix} \omega_{el} \\ \vartheta_{el} \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$A_2 = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ \Delta t & 1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

$$C_2 = \begin{bmatrix} 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3)$$

Pro konkrétní aplikaci byly použity následující hodnoty nastavení: $R = 0$, $Q = \text{diag}(0.000001, 0.000001)$.

2.2.2 Model 3. řádu

Dále je možné přidat do stavového vektoru odhadovaný zátěžný moment stroje T_L , viz. rovnice (5, 6) .

$$x_3 = \begin{bmatrix} \omega_{el} \\ \vartheta_{el} \\ T_L \end{bmatrix} \quad (4)$$

$$A_3 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & -\frac{p_p \Delta t}{J} \\ \Delta t & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (5)$$

$$C_3 = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \quad (6)$$

Pro konkrétní aplikaci byly použity následující hodnoty nastavení: $R = 0.025^2$, $Q = \text{diag}(0.001, 0.0000001, 0.0000001)$.

2.2.3 Generování kódu

Stavové matice jsou pro obě varianty konstantní, je proto možné vypočítat optimální Kalmanovo zesílení filtru předem. Pomocí Matlabu lze vygenerovat výsledný kód pro mikrokontrolér.

```
% parametry_pohonu;
dt = 50e-6;
% x = om th
KF.A = [1 0 ; dt 1 ];
KF.C = [0 1];
KF.Q = diag([0.00001,0.000001]);
std_th = 0.00;
KF.R = std_th^2;
KF.x = [0;0];
KF.P=eye(2);

for i = 1:5000
    KF = kalman(KF,0);
    KK(:,i) = KF.K;
end

x = {'wp', 'th', 'TL'};
disp('== init ==');
disp('th_om_iq=TSample*Fmag/J;')
disp('== prediction ===');
disp('wp = wp + th_om_iq*iq-TL');
disp('th = th + TSample *wp');
disp('== correction ===');
disp('ydif = Position.fVal - th');
disp(['wp += ' num2str(KK(1,end)) '*ydif ']);
disp(['th += ' num2str(KK(2,end)) '*ydif ']);
disp(['#define KALM_KW_k (' num2str(KK(1,end)) ') ']);
disp(['#define KALM_kth_k (' num2str(KK(2,end)) ') ']);
```

```

function [KF, ll]=kalman(KF,y)
% function evaluates the Kalman filter given by KF:
% KF.A — state transition matrix
% KF.Q — state noise covariance
% KF.C — observation matrix
% KF.R — observation noise matrix
% KF.x — state estimate
% KF.P — state variance
mu = KF.A*KF.x;
KF.P = KF.A*KF.P*KF.A' + KF.Q;
%Data update Ry = KF.C*KF.P*KF.C' + KF.R;
iRy = inv(Ry);
K = KF.P*KF.C'*iRy;
KF.P = KF.P - K*KF.C*KF.P; % P = P -KCP;
yp=KF.C*mu;
mu = mu + K*(y-yp);
KF.x = mu;
KF.K = K;

```

2.3 Rozšířený Kalmanův filtr pro vyhlazení polohy

Z důvodu rušení na signálu polohy rotoru je implementován rozšířený Kalmanův filtr (EKF) pro vyhlazení polohy. Plný model je uveden v rovnicích (7 - 11), kde i_α a i_β jsou složky statorového proudu přepočtené pomocí Clark transformace z fázových proudů, ω_{el} je elektrická úhlová rychlost otáčení rotoru, ϑ_{el} je elektrická poloha rotoru, T_L je odhadovaný zátěžný moment stroje, $a = (1 - \frac{R_s}{L_s} \Delta t)$, $b = \frac{\Psi_{pm}}{L_s} \Delta t$, $c = \frac{\Delta t}{L_s}$, $e = \Delta t \frac{k_p p_p^2 \Psi_{pm}}{J}$, $g = \frac{p_p \Delta t}{J}$. R_s odpovídá hodnotě statorového odporu; L_s je indukčnost statoru; Ψ_{pm} je magnetický tok permanentních magnetů na rotoru; J je moment setrvačnosti rotoru; p_p je počet pólpárů stroje; k_p je konstanta Parkovy transformace.

$$i_{\alpha,t+1} = ai_{\alpha,t} + b\omega_{el,t} \sin \vartheta_{el,t} + cu_{\alpha,t} + w_{\alpha}, \quad (7)$$

$$i_{\beta,t+1} = ai_{\beta,t} - b\omega_{el,t} \cos \vartheta_{el,t} + cu_{\beta,t} + w_{\beta}, \quad (8)$$

$$\omega_{el,t+1} = \omega_{el,t} + e(i_{\beta,t} \cos \vartheta_{el,t} - i_{\alpha,t} \sin \vartheta_{el,t}) - gT_{L,t} + w_{\omega}, \quad (9)$$

$$\vartheta_{el,t+1} = \vartheta_{el,t} + \omega_{el,t}\Delta t + w_{\vartheta}, \quad (10)$$

$$T_{L,t+1} = T_{L,t} + w_T, \quad (11)$$

Rezidua $w_{\alpha}, w_{\beta}, w_{\omega}, w_{\vartheta}, w_T$ jsou uvažovány jako bílý šum s variancemi $q_{\alpha}, q_{\beta}, q_{\omega}, q_{\vartheta}, q_T$.

Pro snížení výpočetní náročnosti je použit redukovaný EKF 3. řádu.

$$A = \begin{bmatrix} 1 & 0 & -\frac{p_p \Delta t}{J} \\ \Delta t & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (12)$$

$$C = \begin{bmatrix} b \sin \vartheta_{el} & b \omega_{el} \cos \vartheta_{el} & 0 \\ -b \cos \vartheta_{el} & b \omega_{el} \sin \vartheta_{el} & 0 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \quad (13)$$

Rovnice pozorování:

$$\begin{aligned} \bar{i}_{\alpha,t} &= i_{\alpha,t} + \epsilon_{\alpha,t}, \\ \bar{i}_{\beta,t} &= i_{\beta,t} + \epsilon_{\beta,t}, \\ \bar{\vartheta}_{el,t} &= \vartheta_{el,t} + \epsilon_{\vartheta,t} \end{aligned} \quad (14)$$

$$Q = \text{diag}(q_{\omega}, q_{\vartheta}, q_T) \quad (15)$$

$$R = \text{diag}(r_{\alpha}, r_{\beta}, r_{\vartheta}) \quad (16)$$

Predikce:

$$\begin{aligned}
\omega_{me,t+1} &= \omega_{el,t} - gT_{L,t}, \\
\vartheta_{e,t+1} &= \vartheta_{el,t} + \omega_{el,t}\Delta t, \\
T_{L,t+1} &= T_{L,t},
\end{aligned} \tag{17}$$

Výpočet:

$$\begin{aligned}
P &= APA' + Q \\
R_y &= CPC' + R \\
iR_y &= inv(R_y) \\
K &= PC'iR_y \\
P &= P - KCP
\end{aligned} \tag{18}$$

Predikce výstupu:

$$i_{\alpha,t+1} = ai_{\alpha,t} + b\omega_{el,t} \sin \vartheta_{e,t} + cu_{\alpha,t}, \tag{19}$$

$$i_{\beta,t+1} = ai_{\beta,t} - b\omega_{el,t} \cos \vartheta_{e,t} + cu_{\beta,t}, \tag{20}$$

$$\vartheta_{e,t+1} = \vartheta_{el,t} + \omega_{el,t}\Delta t, \tag{21}$$

2.3.1 Ladění filtru

Kovarianční matice filtru byly laděny bez zatížení motoru. Vzhledem k velkému zvlnění proudu vlivem spínání je nutné nastavit vysokou hodnotu variance pro měření proudu: $R = \text{diag}(1.0, 1.0, 0.0001)$. Pro vyhlazení polohy a korektní výpočet rychlosti mají variance modelu nízké hodnoty: $Q = \text{diag}(0.00000001, 0.00000001, 0.00001)$. Další snižování hodnot vede k nárůstu fázového zpoždění mezi vstupním a filtrovaným signálem polohy.

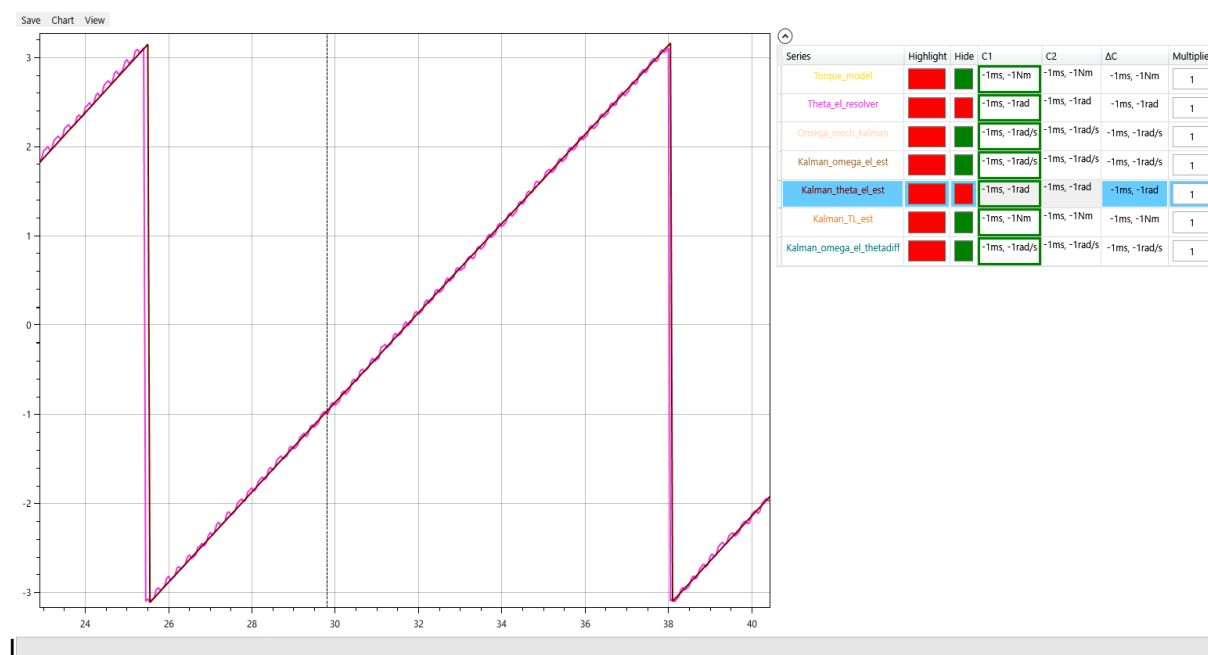
2.4 Doporučené nastavení regulátorů a filtrů

Na základě simulace byly zvoleny doporučené hodnoty regulátorů, omezovačů a filtrů. Hodnoty byly naladěny během testování na měřicím standu v laboratoři.

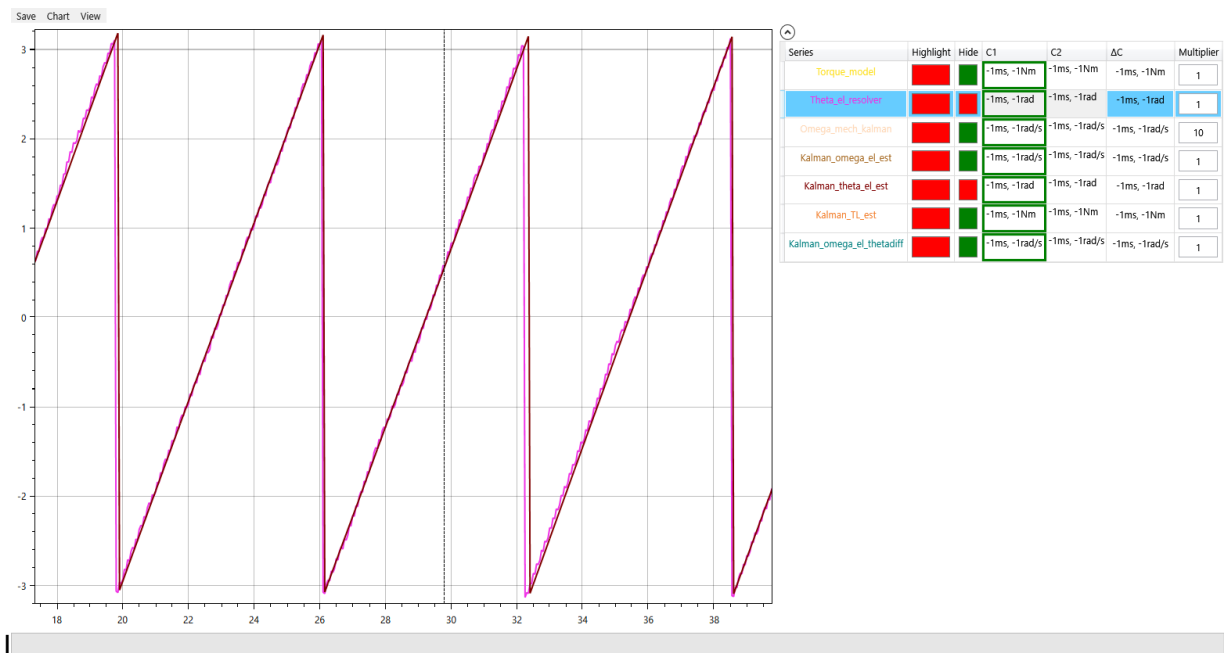
$k_p \text{ reg } I_{sd}$	1.0
$\tau \text{ reg } I_{sd}$	0.01
$k_p \text{ reg } I_{sq}$	1.0
$\tau \text{ reg } I_{sq}$	0.01
$k_p \text{ reg } \omega$	0.8
$\tau \text{ reg } \omega$	0.8
$k_p \text{ reg } U_{rm}$	2400
$\tau \text{ reg } U_{rm}$	0.25

Tab. 2.1: Parametry regulátorů

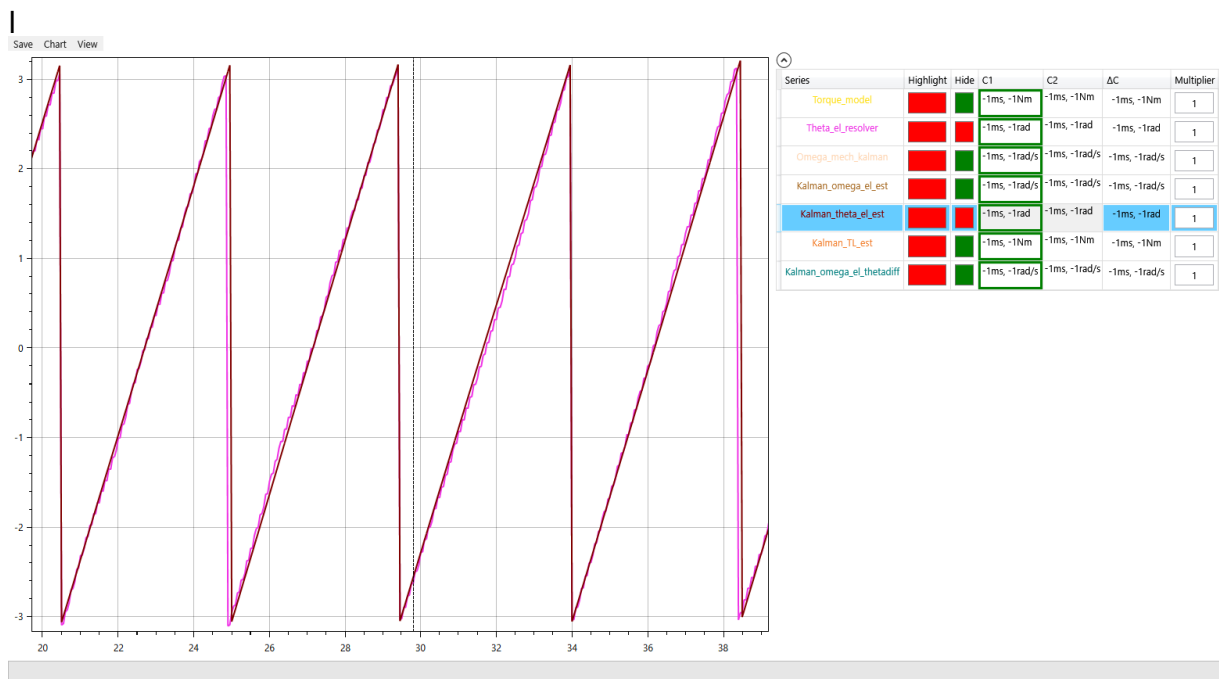
3 Měření



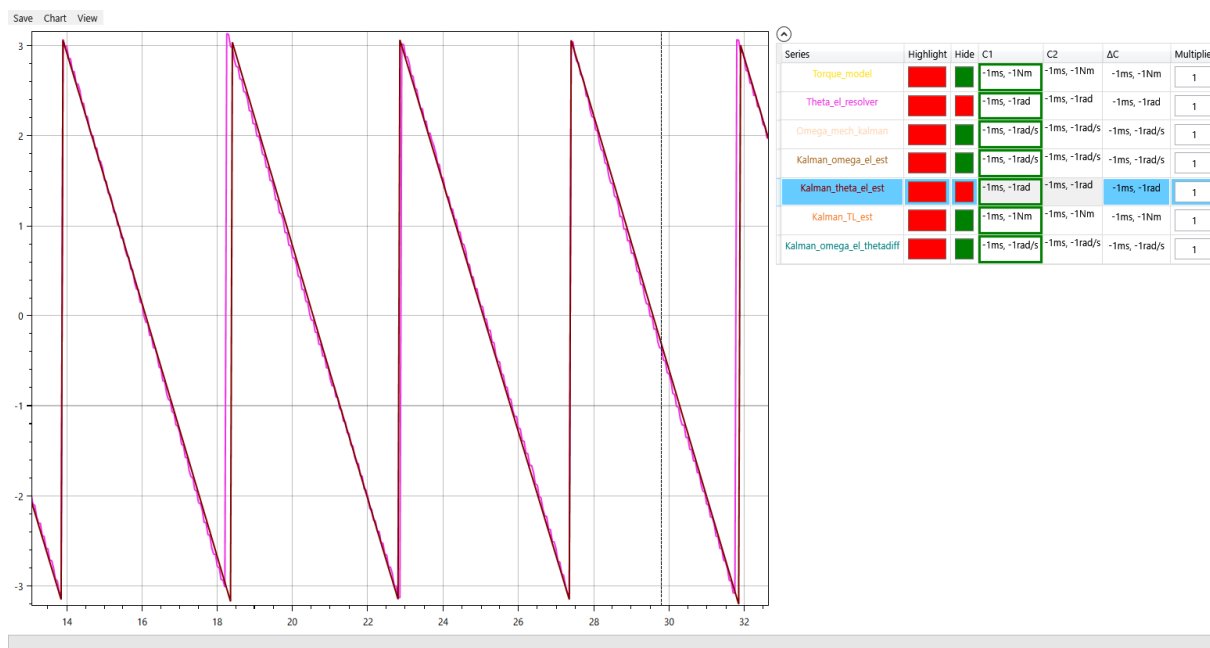
Obr. 3.1: Poloha z čidla otáček (světle fialová) a poloha z Kalmanova filtru (tmavě fialová),
 $\omega_m = 50 \text{ rad/s}$



Obr. 3.2: Poloha z čidla otáček (světle fialová) a poloha z Kalmanova filtru (tmavě fialová),
 $\omega_m = 100 \text{ rad/s}$



Obr. 3.3: Poloha z čidla otáček (světle fialová) a poloha z Kalmanova filtru (tmavě fialová) ,
 $\omega_m = 157 \text{ rad/s}$

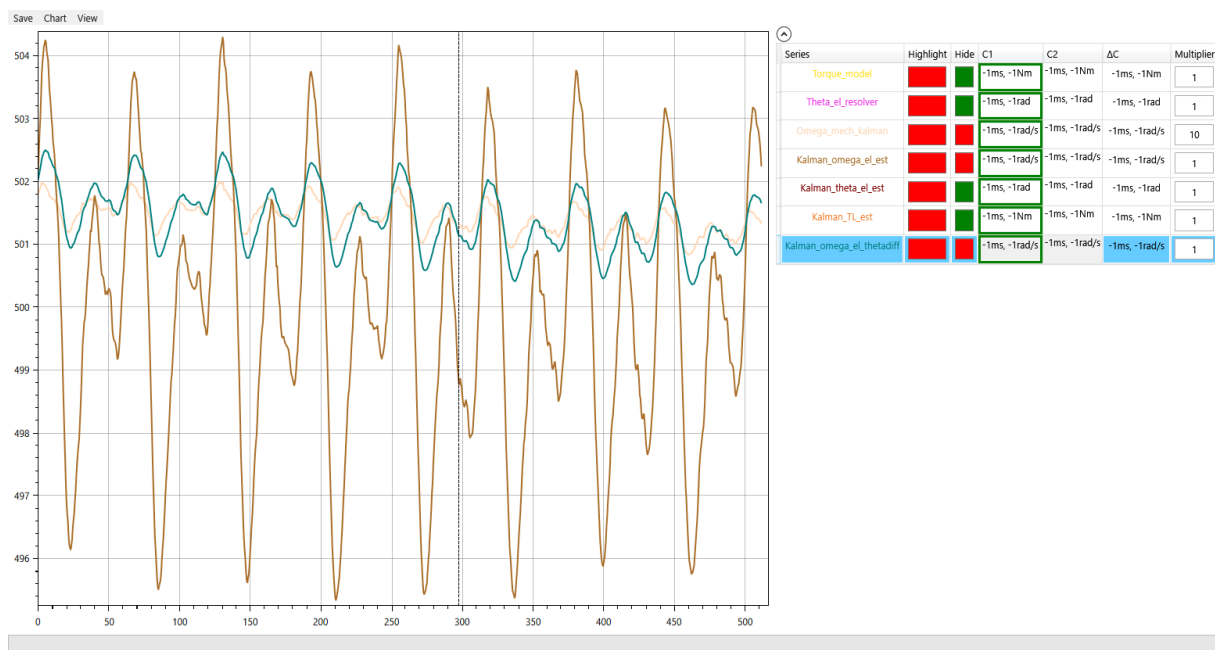


Obr. 3.4: Poloha z čidla otáček (světle fialová) a poloha z Kalmanova filtru (tmavě fialová) ,
 $\omega_m = -157 \text{ rad/s}$

3.1 Výpočet rychlosti

Redukovaný Kalmanův filtr vrací hodnotu rychlosti (3.5, hnědá), ale vlivem zvlnění proudu je výrazně zvlněná i hodnota rychlosti a dalším laděním už není možné zvlnění snížit.

Druhou možností je použít samostatný Kalmanův filtr řádu 2 (3.5, světle hnědá) nebo 3, který není ovlivněn proudy (dle kapitoly 2.2). Další možností je výpočet rychlosti pomocí difference polohy získané z redukovaného Kalmanova filtru. Jednokroková difference je opět zvlněná, proto je možné ještě filtrovat tuto hodnotu pomocí exponenciálního filtru typu dolní propust (3.5, modrá). Delší časová konstanta filtru více vyhlazuje hodnotu rychlosti, ale na druhou stranu zavádí dopravní zpoždění do zpětné vazby regulátoru otáček.



Obr. 3.5: Úhlová rychlost stroje, redukováný EKF (hnědá), samostatný KF 2. řádu (světle hnědá), výpočet na základě difference polohy (modrá) , $\omega_m = -157$ rad/s

4 Závěr

Tato výzkumná zpráva popisuje algoritmy pro vyhlazení hodnot polohy a rychlosti rotoru PMSM. Signály z čidla polohy (resolveru) jsou vlivem elektromagnetického rušení ovlivněny. Dalším důvodem vzniku “zubů” na signálu polohy může být nevhodná konfigurace čidla polohy (resolveru). Kalmanův filtr je schopen vyhladit signál polohy a zlepšit chování celého stroje v reálném provozu. Redukovaná varianta EKF má nízké výpočetní nároky a lze ji provozovat v reálném čase. Pro výpočet hodnoty rychlosti otáčení stroje je možné využít výstup z EKF, ale při nastavení s ohledem na vyhlazení polohy hodnota rychlosti kmitá. Zde byl využit samostatný Kalmanův filtr 2. řádu (stavové veličiny jsou poloha a rychlost) s předpočtenými koeficienty.

Seznam obrázků

2.1	Kompletní regulační schéma	5
3.1	Poloha z čidla otáček (světle fialová) a poloha z Kalmanova filtru (tmavě fialová), $\omega_m = 50$ rad/s	11
3.2	Poloha z čidla otáček (světle fialová) a poloha z Kalmanova filtru (tmavě fialová), $\omega_m = 100$ rad/s	12
3.3	Poloha z čidla otáček (světle fialová) a poloha z Kalmanova filtru (tmavě fialová), $\omega_m = 157$ rad/s	12
3.4	Poloha z čidla otáček (světle fialová) a poloha z Kalmanova filtru (tmavě fialová), $\omega_m = -157$ rad/s	13
3.5	Úhlová rychlost stroje, redukováný EKF (hnědá), samostatný KF 2. řádu (světle hnědá), výpočet na základě difference polohy (modrá), $\omega_m = -157$ rad/s	14

Seznam tabulek

2.1	Parametry regulátorů	11
-----	--------------------------------	----

Historie revizí

Rev.	Kapitola	Popis změny	Datum	Jméno
1	Všechny	První revize zprávy	20.09.2024	Antonín Glac