

Ing. David Vošmik, Ph.D., prof. Ing. Zdeněk Peroutka, Ph.D.

Synchronní filtr pro estimátor polohy založený na vyhodnocování magnetické anisotropie rotoru PMSM

Technická zpráva

Pracovní balíček:

11 – Elektrické části pohonů

Rok řešení:

2015



**FAKULTA
ELEKTROTECHNICKÁ**
ZÁPADOČESKÉ
UNIVERZITY
V PLZNI

2015

Pracoviště: Regionální inovační centrum elektrotechniky,
Fakulta elektrotechnická

Výzkumná zpráva č.: 22190-042-2015

Synchronní filtr pro estimátor polohy založený na vyhodnocování magnetické anisotropie rotoru PMSM

Druh úkolu: vědecko-výzkumný
Řešitelé: Ing. David Vošmik, Ph.D.
Vedoucí úkolu: prof. Ing. Zdeněk Peroutka, Ph.D.
Počet stran: 19
Datum: Prosinec 2015
Revize: 1

Tato práce vznikla s podporou projektu TE01020038 „Centrum kompetence drážních vozidel“.

Anotace

Výzkumná zpráva se zabývá bezsenzorovým řízením PMSM. Je zde popsán algoritmus vyhodnocování magnetické anisotropie rotoru pomocí EKF, který využívá synchronní filtr pro účinnou selekci signálu nesoucího informaci o poloze vektoru toku permanentních magnetů. Chování je dokladováno výsledky simulací a experimenty na laboratorním prototypu o jmenovitém výkonu 10,7 kW.

Abstract

This research report deals with sensorless control of the PMSM. This report describes anisotropy based algorithm that uses EKF for current response evaluation. This estimator use synchronous filter for selection of injection current signal from the current measured by drive sensor. All the behavior are proved by simulations and experiments on the laboratory prototype of rated power 10,7 kW.

Seznam symbolů a zkratek

EKF	Extended Kalman Filter (rozšířený Kalmanův filtr)
PLL	Phase Locked Loop (fázový závěs)
PMSM	synchronní motor s permanentními magnety na povrchu rotoru
$\mathbf{C}$	výstupní matice systému
$\mathbf{i}_c$	proudová odezva na injektovaný signál
$i_{c,d}, i_{c,q}$	složky vektoru proudové odezvy na injektovaný signál
L_{sd}, L_{sq}	indukčnost statoru
t	čas
$\mathbf{u}_c$	injektovaný napěťový signál
ϑ_{me}	poloha vektoru toku permanentních magnetů (poloha osy d souřadného systému d, q)
ϑ_{inj}	injektážní metodou estimovaná poloha vektoru toku permanentních magnetů
ω_{me}	mechanická úhlová rychlost rotoru přepočtená na elektrickou [rad/s], $\omega_{me} = \omega_m \cdot p$

Obsah

1 Úvod	5
2 Popis magnetické anisotropie kolem obvodu stroje	5
3 Estimace polohy vektoru toku permanentních magnetů	6
4 Závěr	17

Revize	Změny
1	První verze dokumentu

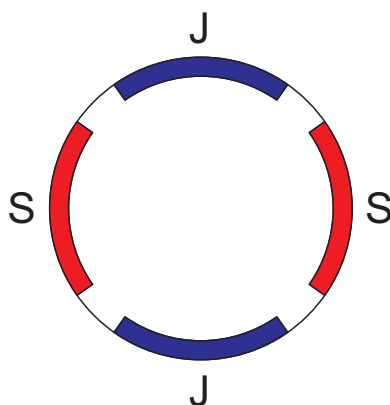
1 Úvod

Bezsenzorové řízení PMSM je objektem této zprávy. Navazuje na zprávu [1] a zabývá se injektážním algoritmem s využitím synchronního filtru, pro selekci proudového signálu vzniklého jako odezva na injektovaný napěťový signál. Problémem injektážních metod je obecně izolace jednotlivých frekvenčních komponent, které nesou informaci o poloze vektoru toku permanentních magnetů, případně o vyšších složkách magnetické anisotropie jako je magnetická polarita, či rušivé anisotropie vzniklé například zubováním statoru. Synchronní filtr umožňuje tyto jednotlivé složky izolovat. V rámci této zprávy je popsán základní návrh algoritmu se synchronním filtrem a jsou nastíněny další možnosti využití.

2 Popis magnetické anisotropie kolem obvodu stroje

Magnetická anisotropie byla popsána již v práci profesora Holtze [2]. Klasický model PMSM předpokládá zjednodušení takové, že indukčnost se podél obvodu stroje nemění. Vlivem skutečného uspořádání motoru toto ovšem neplatí. U PMSM se rozdíl mezi příčnou a podélnou indukčností může lišit až o 5 %. Této drobné anisotropie lze využít pro injektážní algoritmy. Anisotropie vzniká z důvodu rozdílného sycení magnetického obvodu a vlivem konstrukčního uspořádání. V magnetickém obvodu statoru, v místě které se nachází nad permanentním magnetem, dochází k vyššímu sycení a tím pádem ke změně indukčnosti. Z hlediska konstrukce je vhodné umisťovat permanentní magnety do drážek a omotat bandáží, jak je zjednodušeně znázorněno na Obr. 1. Permeabilita permanentních magnetů se blíží permeabilitě vzduchu. Jelikož jsou magnety umístěné v drážce vzniká tak rozdílná šířka vzduchové mezery po obvodu stroje. V místě, kde je permanentní magnet se jeví vzduchová mezera jako větší, což se projevuje větší magnetickou rezistivitou a zejména větší rozptylovou indukčností. Použitím rotujícího souřadného systému tak dostáváme rozdílnou indukčnost v podélném a příčném směru (1). Rozdílnost indukčností po obvodu stroje má vliv na průběhy proudů. Lze předpokládat indukčnost definovanou jako (1).

$$\mathbf{I}_s^{(R)} = \begin{bmatrix} L_{sd} & 0 \\ 0 & L_{sq} \end{bmatrix} \quad (1)$$



Obr. 1: Schématický diagram rotoru PMSM

Pro odvození proudové odezvy na testovací signál u_c definovaný v rotujícím souřadném systému R se vyjde ze základní rovnice pro napětí na indukčnosti:

$$\mathbf{u}_c^{(R)} = \mathbf{l}_s^{(R)} * \frac{d\mathbf{i}_c^{(R)}}{dt}. \quad (2)$$

Pro detekci rozdílných indukčností lze použít testovací signál:

$$\mathbf{u}_c^{(\hat{R})} = u_c \cos \omega_c t. \quad (3)$$

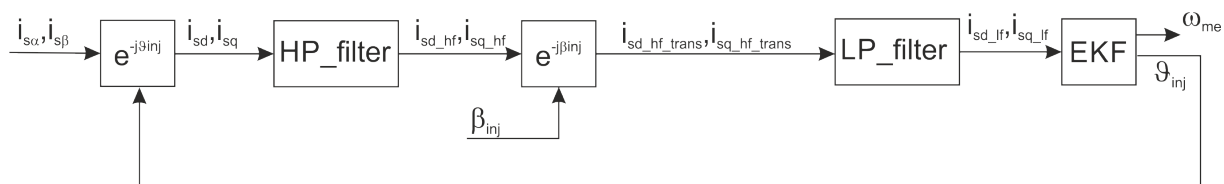
Odvozením lze získat rovnice 4 a 5, které popisují proudovou odezvu na injektovaný signál 3:

$$\mathbf{i}_c^{(R)} = \frac{u_c}{\omega_c} \sin \omega_c t \left[\frac{1}{L_{sd}} \cos (\vartheta_{inj} - \vartheta_e) + \frac{j}{L_{sq}} \sin (\vartheta_{inj} - \vartheta_e) \right], \quad (4)$$

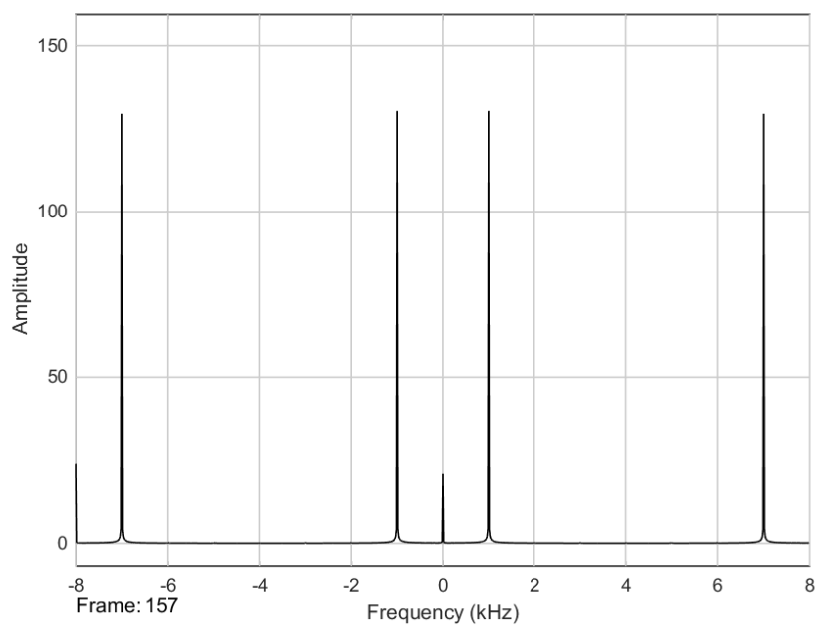
$$\mathbf{i}_c^{(R)} = i_{cd}^{(R)} + j i_{cq}^{(R)}. \quad (5)$$

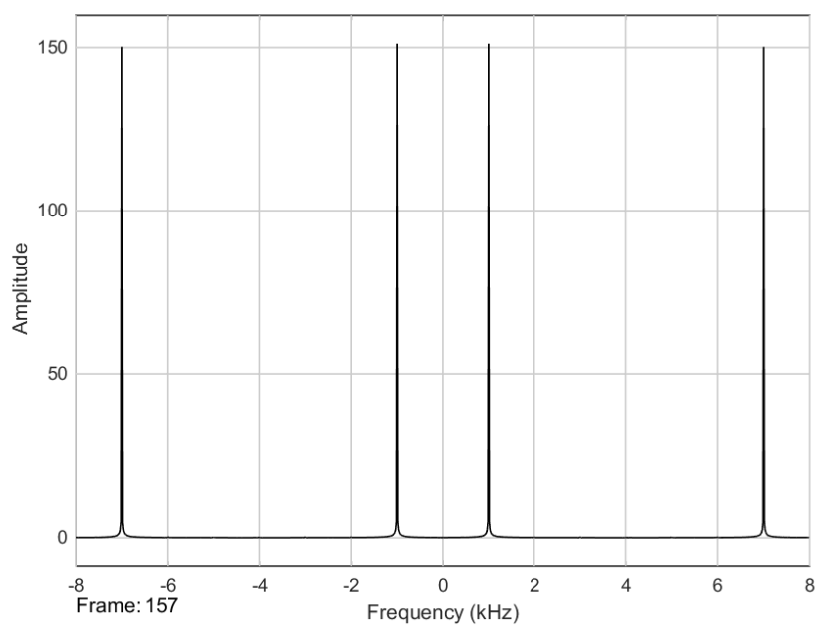
3 Estimace polohy vektoru toku permanentních magnetů

Blokové schéma pohonu s estimací polohy a rychlosti pomocí injektážní metody je znázorněno na Obr. 2. K požadovaným složkám vektoru statorového proudu (daným vektorovým řízením v kartézských souřadnicích) je přidán testovací signál, který se injektuje do systému daného odhadnutou polohou. Změřené proudy jsou zpracovávány v synchronním filtru, pomocí kterého se ze změřeného signálu oddělí signál vhodný k detekci polohy a elektrické rotorové rychlosti. Způsob oddělení užitečného signálu má zásadní vliv na kvalitu a vlastnosti celého estimátoru. V této oblasti je nutné řešit celou řadu problémů, které jsou diskutovány v dalším textu. Časté řešení je použití filtru typu pásmová propust s tím, že se naladí na injektovanou frekvenci [1].

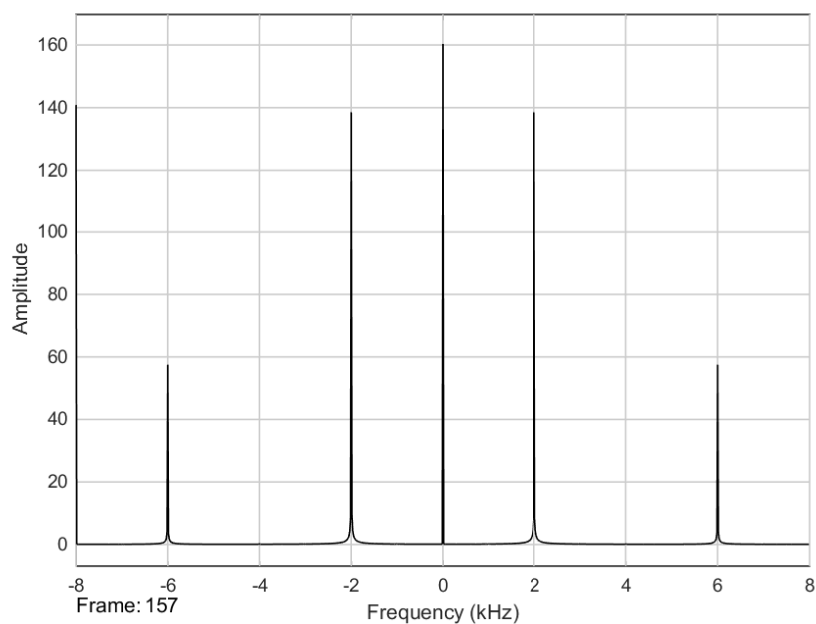


Obr. 3: Synchronní filtr

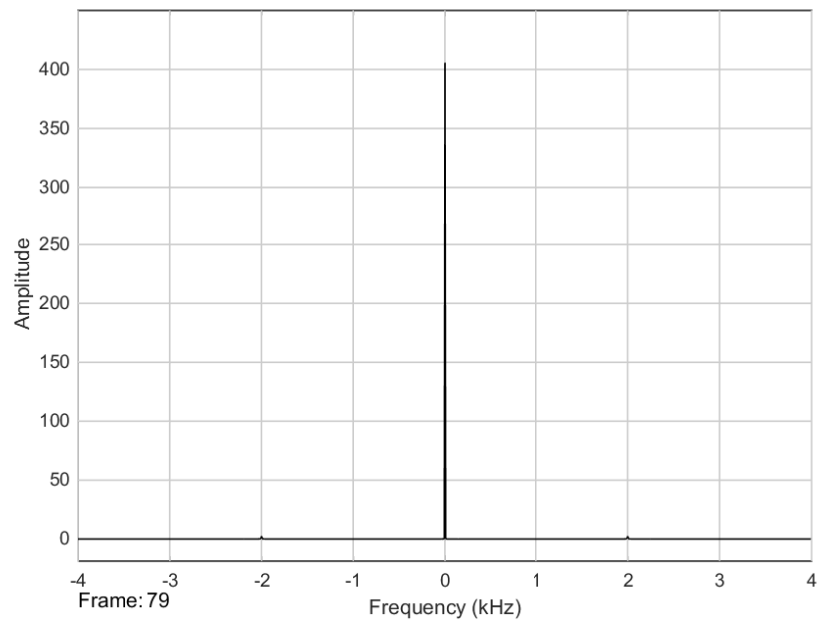
Obr. 4: Synchronní filtr - frekvenční spektrum vstupního signálu i_{sd}



Obr. 5: Synchronní filtr - frekvenční spektrum i_{sdhf}



Obr. 6: Synchronní filtr - frekvenční spektrum $i_{sdhftransf}$



Obr. 7: Synchronní filtr - frekvenční spektrum i_{sdlf}

$$i_{c,d} = \frac{u_c}{\omega_c} \frac{1}{L_{sd}} \cos(\vartheta_{inj} - \vartheta_e), \quad (6)$$

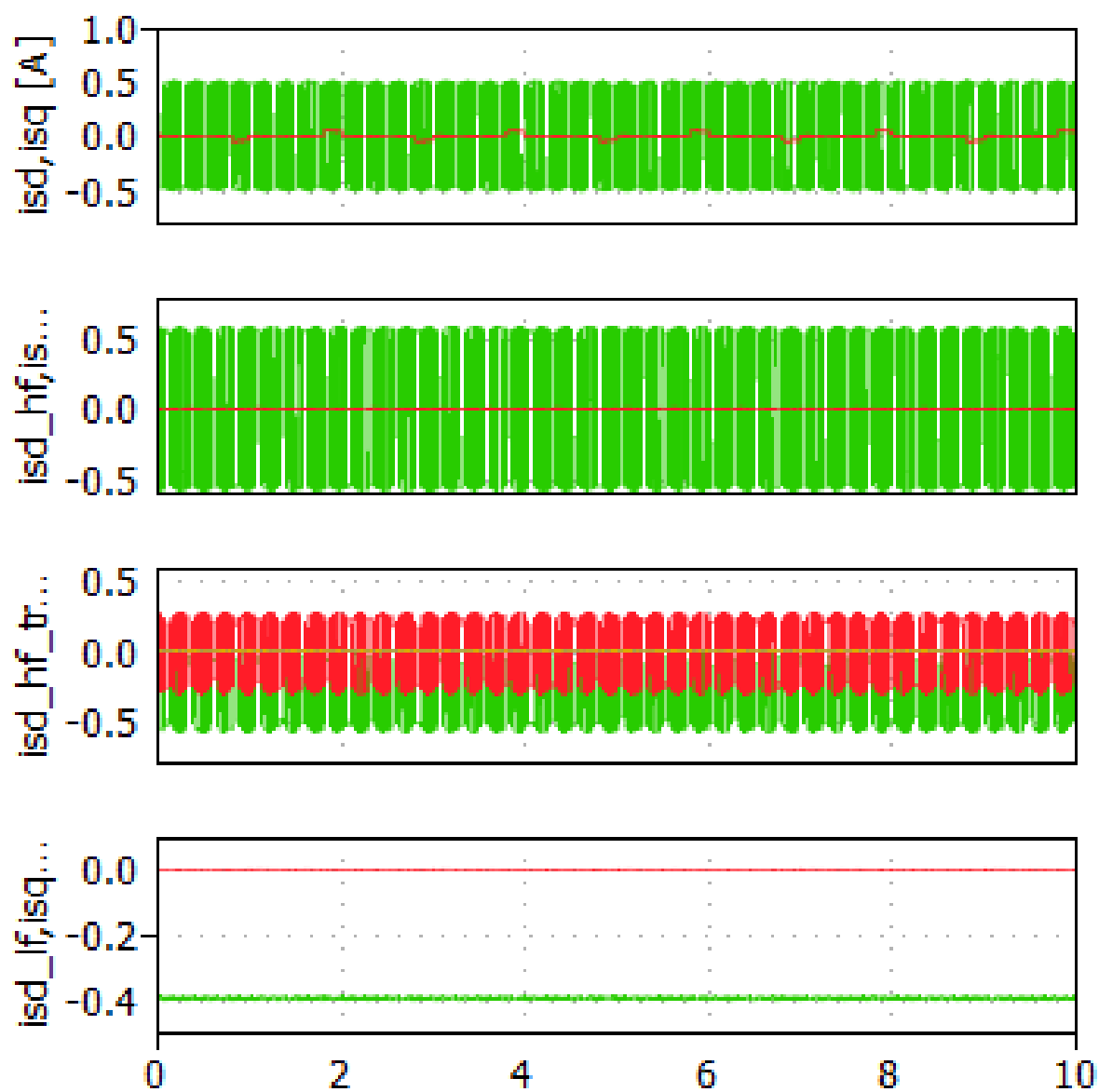
$$i_{c,q} = \frac{u_c}{\omega_c} \frac{1}{L_{sq}} \sin(\vartheta_{inj} - \vartheta_e). \quad (7)$$

Matice A a C jsou pak dány jako:

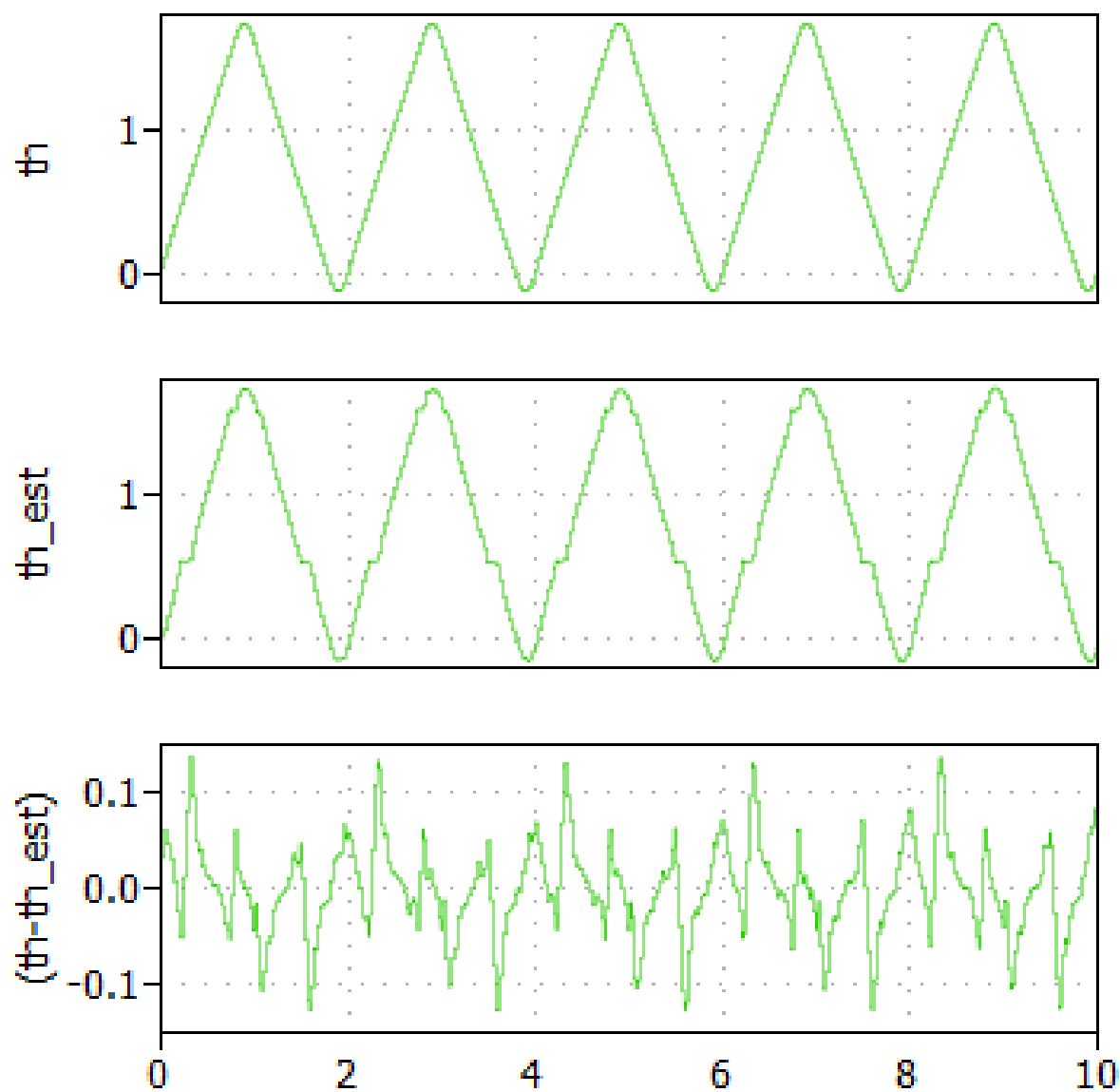
$$A = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ \Delta t & 1 \end{bmatrix} \quad (8)$$

$$C = \begin{bmatrix} 0 & \frac{u_c}{\omega_c} \frac{1}{L_{sd}} \sin(\vartheta_{inj} - \vartheta_e) \\ 0 & -\frac{u_c}{\omega_c} \frac{1}{L_{sq}} \cos(\vartheta_{inj} - \vartheta_e) \end{bmatrix} \quad (9)$$

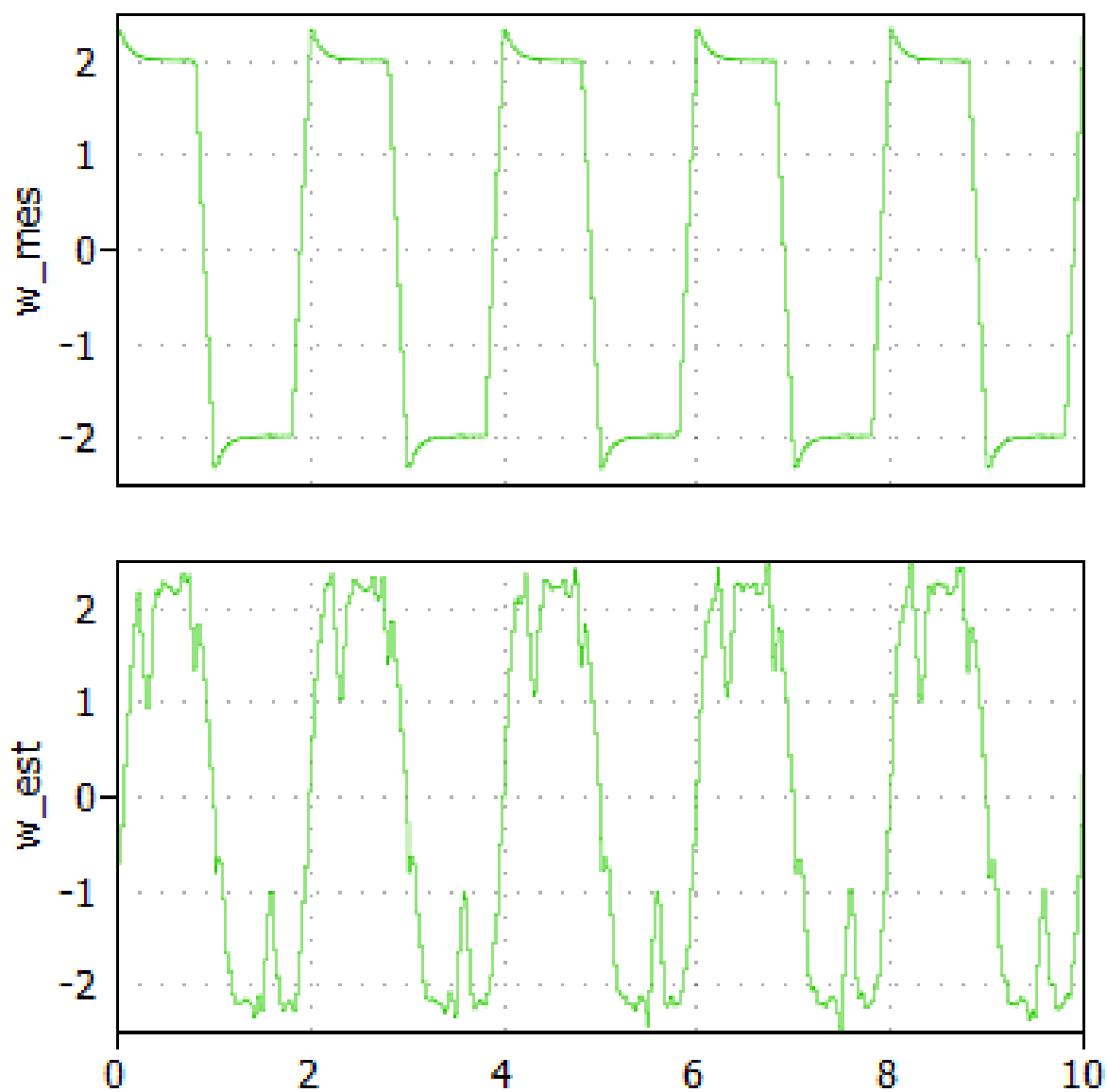
Výsledky simulačního ověření jsou na Obr. 9 -12. Z uvedených průběhů je vidět, že estimátor estimuje polohu s max. chybou cca. 0,15 rad.



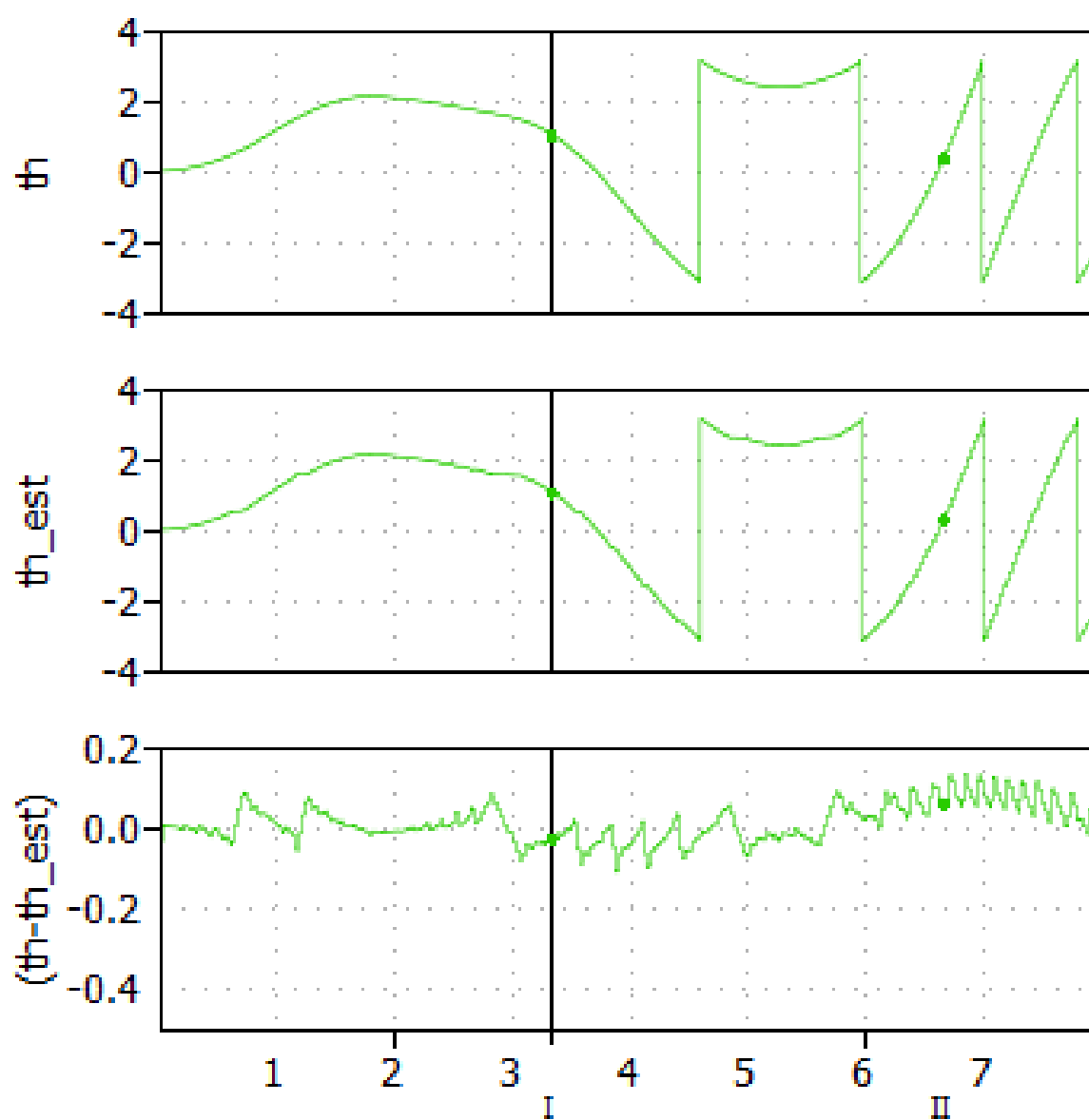
Obr. 8: Synchronní filtr - časová oblast



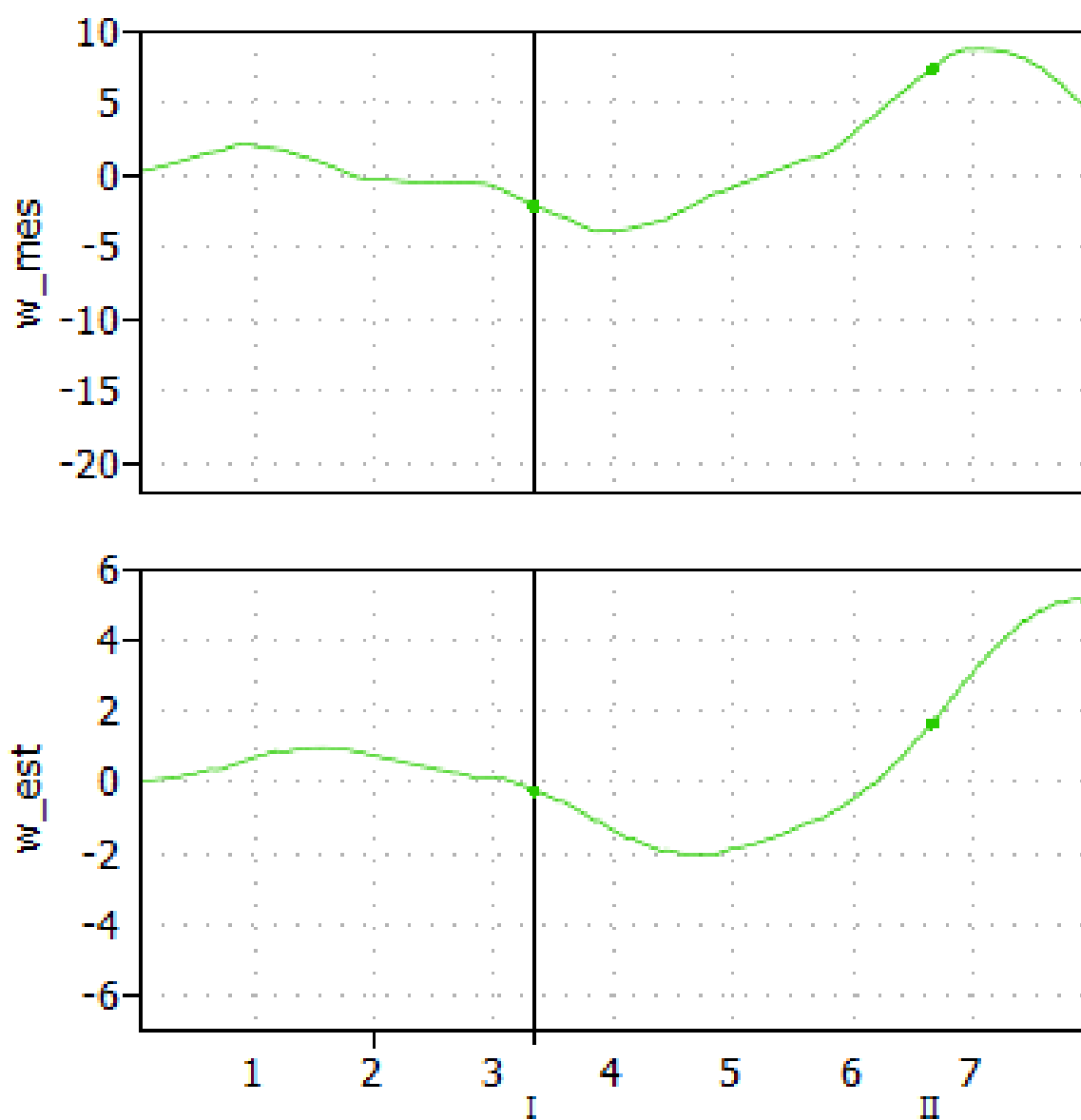
Obr. 9: Synchronní filtr - estimace polohy vektoru toku perm. magnetů u PMSM 10.7 kW - otevřená smyčka, lichoběžníkový řídicí profil



Obr. 10: Synchronní filtr - estimace elektrické rotorové rychlosti PMSM 10.7 kW - otevřená smyčka, lichoběžníkový řídicí profil

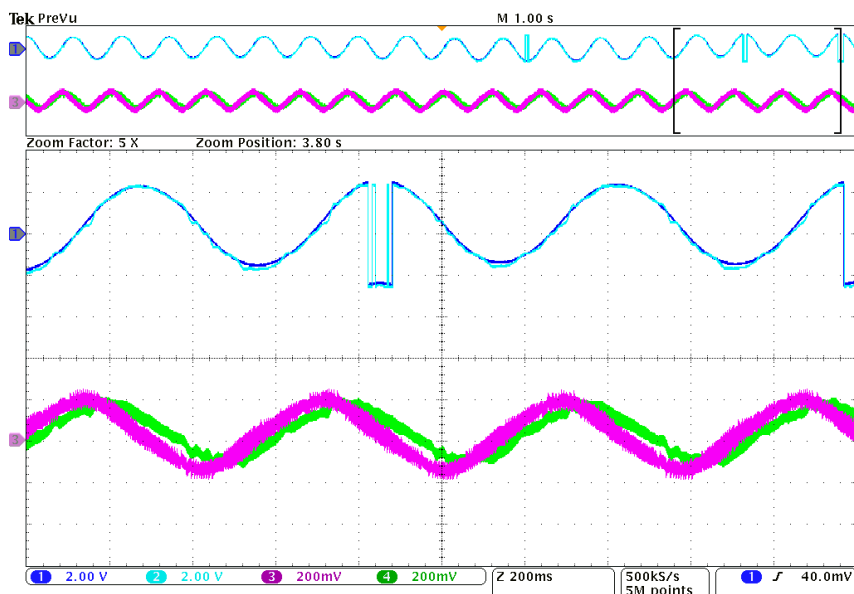


Obr. 11: Synchronní filtr - estimace polohy vektoru toku perm. magnetů u PMSM 10.7 kW - uzavřená smyčka, lichoběžníkový řídicí profil

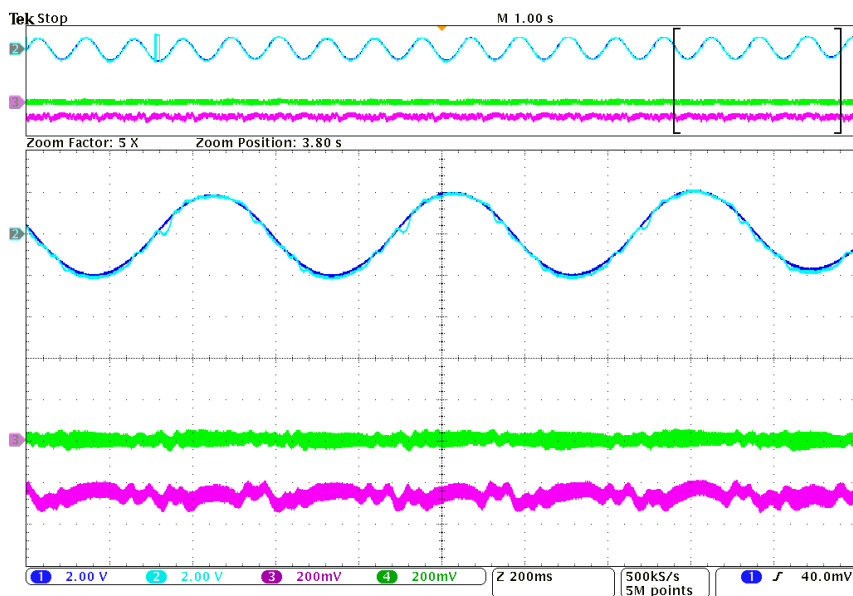


Obr. 12: Synchronní filtr - estimace elektrické rotorové rychlosti PMSM 10.7 kW - uzavřená smyčka, lichoběžníkový řídicí profil

Estimátor byl dále implementován do postaveného laboratorního prototypu do signálového procesoru TMS320f28335. Vlastnosti algoritmu jsou zobrazeny na Obr. 13 a Obr. 14. V poloze estimátor estimuje s minimální chybou v řádu jednotek stupňů, v estimaci el. rotorové rychlosti je viditelné fázové zpoždění.



Obr. 13: Přechodový děj - otevřená smyčka, trojúhelníkový řídicí profil, požadovaná el. rychlost rotoru ± 5 Hz, CH1-poloha rotoru ARC čidlo (72 deg/V), CH2-poloha rotoru estimace EKF (72 deg/V), CH3- el. rychlost rotoru ARC čidlo (25 Hz/V), CH4- el. rychlost rotoru injektážní metoda (25 Hz/V)



Obr. 14: Přechodový děj - otevřená smyčka, trojúhelníkový řídicí profil, požadovaná el. rychlost rotoru ± 5 Hz, CH1-poloha rotoru ARC čidlo (72 deg/V), CH2-poloha rotoru estimace EKF (72 deg/V), CH3- proud vyfiltrovaný synchronním filtrem i_{sdlf} (0,55 A/V)), CH4- proud vyfiltrovaný synchronním filtrem i_{sqlf} (0,55 A/V))

4 Závěr

Výzkumná zpráva se zabývala bezsenzorovým řízením PMSM na principu vyhodnocování magnetické anisotropie rotoru s využitím synchronního filtru pro separaci užitečného signálu. Vyfiltrovaný signál je poté využit v rozšíření Kalmanově filtru k odhadu polohy vektoru magnetického toku permanentních magnetů a odhadu elektrické rotorové rychlosti. Princip synchronního filtru představuje univerzální metodu, která umožňuje vybrat určitou frekvenční komponentu proudového signálu. Ve zprávě byla využita pouze základní harmonická anisotropie, která ovšem může být rozšířena např. o estimaci magnetické polarity či potlačení vlivu vyšších anisotropií, které mohou zhoršovat vlastnosti estimace. Uvedený estimátor byl ověřen v simulační studii a v rámci experimentů na postaveném laboratorním prototypu o výkonu 10.7 KW. V navazující práci bude určitě užitečné využít možnost estimace magnetické polarity a spojení estimátoru založeného na magnetické anisotropie se základním modelovým přístupem.

Příloha - parametry pohonu

$2p$	8
R_s	0,28 Ω
L_s	3,456 mH
ψ_{PM}	0,1989 Wb
P	10,7 kW
M_n	38 Nm
I_{max}	77 A

Literatura

- [1] D. Vošmik, V. Šmídl a Z. Peroutka. *Bezsenzorové řízení PMSM s vyhodnocováním magnetické anisotropie pomocí EKF*. Tech. zpr. 2014.
- [2] J. Holtz. "Initial Rotor Polarity Detection and Sensorless Control of PM Synchronous Machines". In: *Industry Applications Conference, 2006. 41st IAS Annual Meeting. Conference Record of the 2006 IEEE*. Sv. 4. Říj. 2006, s. 2040–2047. DOI: 10.1109/IAS.2006.256816.