

Vedecká rada Fakulty elektrotechniky a informatiky  
Slovenskej technickej univerzity v Bratislave

Ing. Jakub Vonkomer

# **SAMONASTAVUJÚCI SA RÝCHLOSTNÝ SERVOPOHON S ASYNCHRÓNNYM MOTOROM**

**Autoreferát dizertačnej práce**

Na získanie vedecko-akademickej hodnosti  
**philosophiae doctor**

V doktorandskom študijnom programe  
5.2.14. **Automatizácia a riadenie**

Bratislava 2012

Dizertačná práca bola vypracovaná v dennej forme doktorandského štúdia na Ústave riadenia a priemyselnej informatiky Fakulty elektrotechniky a informatiky Slovenskej technickej univerzity v Bratislave.

**Predkladateľ: Ing. Jakub Vonkomer**

Ústav riadenia a priemyselnej informatiky  
Fakulta elektrotechniky a informatiky  
Slovenská Technická Univerzita Bratislava  
Ilkovičova 3  
812 19 Bratislava

**Školiteľ: Prof. Ing. Milan Žalman, PhD.**

Ústav riadenia a priemyselnej informatiky  
Fakulta elektrotechniky a informatiky  
Slovenská Technická Univerzita Bratislava  
Ilkovičova 3  
812 19 Bratislava

**Oponenti: Prof. Ing. Ján Vittek, PhD.  
Prof. Ing. Daniela Perduková, PhD.**

Autoreferát bol rozoslaný dňa: .....

Obhajoba dizertačnej práce sa koná: .....  
pred komisiou pre obhajobu dizertačnej práce v odbore doktorandského štúdia,  
vymenovanou predsedom spoločnej odborovej komisie dňa .....

číslo odboru : 5.2.14, odbor doktorandského štúdia: Automatizácia a riadenie

na Ústave riadenia a priemyselnej informatiky, Fakulty elektrotechniky  
a informatiky, Slovenskej technickej univerzity, Ilkovičova 3, 812 19 Bratislava

Predseda spoločnej odborovej komisie Automatizácia na STU v Bratislave :  
Prof. Ing. Miroslav Fikar, DrSc.

Garant študijného programu Automatizácia a riadenie na FEI STU  
Prof. Ing. Peter Hubinský, PhD.  
Ústav riadenia a priemyselnej informatiky,  
STU v Bratislave  
Ilkovičova 3, 812 19 Bratislava

**Názov:**

Samonastavujúci sa rýchlostný servopohon s asynchrónnym motorom

**Anotácia**

Dizertačná práca je zameraná na návrh a overenie pokročilých metód riadenia asynchrónnych motorov, využívajúcich princípy adaptácie a samonastavovania na základe priebežnej identifikácie parametrov. Hlavný cieľ dizertačnej práce bol zameraný na návrh nových postupov pre samonastavenie parametrov meniča pre bezsnímačové vektorové riadenie. Uvedený cieľ pozostával zo spracovania teoretickej časti dizertačnej práce, ktorá tkvie tak v návrhu moderných metód identifikácie ako aj v návrhu samonastavujúceho sa riadenia využívajúceho výsledky priebežnej identifikácie. Teoretické poznatky návrhu algoritmov samonastavovateľných regulátorov boli efektívne pretransformované do praktických algoritmov v programovacom jazyku C a sú dnes prakticky využiteľné v širokom regulačnom rozsahu rýchlosti a úspešne sa používajú v praxi vo frekvenčnom meniči VONSCH® UNIFREM 400 ako súčasť základného firmvéru od verzie 2.020. Na základe navrhovaných metód vektorového riadenia, vykonanej analýzy a získaných experimentálnych výsledkov je možné konštatovať vysokú kvalitu a efektívnosť navrhovaných metód a algoritmov pre riadenie asynchrónnych motorov.

**Title:**

Self-commissioning speed servo drive with induction motor

**Annotation**

Thesis focuses on the design and verification of advanced control methods of induction motors, using the principles of adaptation and self-commissioning on the basis of continuous parameter identification. The main objective of the thesis was focused on the design of new techniques for self-commissioning of the converter parameters for sensorless vector control. This objective consisted of a theoretical analysis of the problem, which lied both in the design of modern methods of identification as well as the design of self-tuning control algorithms, using the results of the on-line identification. Theoretical knowledge of self-tuning controller algorithm design was effectively transferred into practical algorithms written in C programming language; it is now practically usable for a very wide range of speed and is successfully used in the frequency converter VONSCH® UNIFREM 400 as part of the basic firmware since the version 2.020. Based on the proposed methods of vector control, performance analysis and experimental results; high quality and effectiveness of the proposed methods and algorithms for induction motor control can be reported.

## Obsah

Úvod.....	5
Ciele dizertačnej práce .....	5
Tézy dizertačnej práce.....	5
1    Prehľad súčasného stavu riadenia AM s kotvou nakrátko.....	6
2    Prehľad súčasného stavu.....	6
2.1    Asynchrónny motor .....	6
2.1.1    Dynamický model AM s kotvou nakrátko <sup>[1]</sup> .....	7
2.2    Úvod do vektorového riadenia .....	7
2.3    Zákon riadenia magnetického toku rotora <sup>[16]</sup> .....	8
3    Bezsnímačové vektorové riadenie .....	8
3.2    Pozorovateľ uhlovej rýchlosti s Luenbergerovým pozorovateľom .....	9
3.2.1    Stabilita adaptačného algoritmu pre Luenbergerov pozorovateľ.....	10
3.2.2    Vyšetrenie stability Luenbergerovho pozorovateľa – nová metóda.....	10
3.2.3    Praktická realizácia – namerané priebehy s LP .....	13
3.3    MRAS s modelom prúdu statora (MRAS CC) .....	14
3.3.1    Navrhovaný linearizovaný model odchýlky pre MRAS CC.....	15
3.3.2    Vlastné riešenie návrhu PID korekčného člena .....	16
3.3.3    Stabilita MRAS CC pozorovateľa .....	17
3.3.4    Vlastný návrh vyšetrenia stability MRAS CC .....	17
3.3.5    Praktická realizácia - namerané priebehy s MRAS CC.....	20
3.4    Optimálna hodnota magnetického toku rotora .....	21
3.4.1    Režim odbudzovania (field-weakening) .....	22
4    Identifikácia parametrov motora a samonastaviteľnosť.....	22
4.1    Samonastavovanie parametrov regulátorov.....	24
4.2    Off-line identifikácia.....	24
4.3    On-line identifikácia odporu statora $R_s$ .....	24
4.3.1    Identifikácia odporu statora pre estimátor statorového prúdu .....	25
4.3.2    Praktická realizácia on-line identifikácie $R_s$ .....	25
4.4    On-line identifikácia odporu rotora $R_r$ .....	25
4.4.1    Praktická realizácia identifikácie odporu $R_r$ .....	26
4.5    On-line identifikácia vzájomnej indukčnosti $L_m$ .....	26
4.5.1    Vlastné riešenia on-line identifikácie $L_m$ .....	26
4.5.2    Praktická realizácia – namerané priebehy on-line identifikácie $L_m$ .....	28
4.6    On-line identifikácia rozptylovej indukčnosti $\sigma L_s$ .....	28
4.6.1    Identifikácia rozptylovej indukčnosti z injektovaných signálov .....	28
4.6.2    Vlastné riešenie on-line identifikácie $\sigma L_s$ .....	29
5    Experimentálne výsledky bezsnímačového rýchlostného servopohonu s AM31	
5.1    Pohon pri vysokých rýchlostiach (100 Hz) .....	31
5.2    Pohon pri nízkych rýchlostiach a motorickej záťaži.....	32
5.3    Pohon pri nízkych rýchlostiach a generátorickej záťaži.....	33
6    Záver.....	34
Splnenie cieľov dizertačnej práce.....	35
Literatúra .....	36
Zoznam publikácií autora .....	47

## Úvod

Dizertačná práca sa zaoberá návrhom a realizáciou samonastavujúceho sa rýchlostného servopohonu s asynchrónnym motorom. Rýchlostné servopohony s bezsnímačovým vektorovým riadením majú v praxi bohaté uplatnenie najmä pre trakčné aplikácie, náročnejšie aplikácie čerpadiel, ventilátorov, dopravníkových liniek, pojazdov a iných aplikácií kde skalárne riadenie často nepostačuje, no vysoká kvalita regulácie s často drahým snímačom rýchlosti nie je potrebná. V predloženej DP sa komplexnejšie zameriavame na niektoré vybrané problémy vektorového riadenia, hlavne identifikáciu parametrov motora pre snímačové aj bezsnímačové vektorové riadenie od plazivých rýchlostí, po oblasť vysokých rýchlostí (odbudzovanie). Výsledky by mali byť ľahko aplikovateľné v praxi.

## Ciele dizertačnej práce

Cieľom dizertačnej práce je výskum a vývoj samonastavujúcich metód a algoritmov pre bezsnímačový rýchlostný servopohon. Dizertačná práca rieši komplexnú problematiku riadenia asynchrónnych motorov. Má dva hlavné, prakticky navzájom úzko prepojené ciele:

1. Návrh a realizácia identifikačných algoritmov parametrov motora pre realizáciu samonastavovacích algoritmov riadenia pre bezsnímačové vektorové riadenie. Jediné možné počiatkové informácie sú štítkové údaje motora.
2. Návrh a realizácia bezsnímačového vektorového riadenia vhodného pre veľmi široký rozsah rýchlostí, od rýchlosti takmer nulovej po rýchlosť hlboko v oblasti odbudzovania.

## Tézy dizertačnej práce

1. Analýza súčasného stavu bezsnímačového vektorového riadenia,
2. Návrh efektívnych štruktúr riadenia pre bezsnímačové riadenie použiteľné v širokom rozsahu rýchlostí, od statorovej frekvencie pod 1Hz po rýchlosť hlboko v oblasti odbudzovania,
3. Návrh metód a algoritmov samonastavujúceho sa pohonu.

# 1 Prehľad súčasného stavu riadenia AM s kotvou nakrátko

Ako každý stroj, aj asynchrónny motor treba riadiť, či už je predmetom riadenia poloha natočenia rotora, mechanická rýchlosť, moment alebo ich kombinácia. Napriek mnohým prednostiam tohto typu motora, problematika jeho riadenia môže byť veľmi náročná a aj v súčasnej dobe po viac ako 100 rokoch používania AM sa tým stále zaoberá veľa výskumníkov a inžinierov.

Odhaduje sa že v rozvinutých krajinách až do 90% spotreby elektrickej energie predstavujú práve elektrické motory. Preto akékoľvek zlepšenie v riadení či zlepšenie energetickej náročnosti môže v konečnom dôsledku spôsobiť výrazné úspory.

Vo výskume a vývoji v oblasti inteligentných servopohonov s AM existuje niekoľko trendov:

- aplikácia algoritmov riadenia s využitím metód umelej inteligencie (neurónové siete, fuzzy, genetické algoritmy),
- samonastavenie parametrov pohonu s jednorazovou (počiatočnou) i priebežnou identifikáciou potrebných parametrov,
- adaptácia parametrov modelu a zákona riadenia reagujúcich na zmeny parametrov pohonu od pracovného bodu, zmeny záťaže a pod.,
- robustné algoritmy riadenia znižujúce citlivosť systému na vonkajšie poruchy a zmenu parametrov modelu,
- spoľahlivosť a bezpečnosť riadenia, prevádzková odolnosť voči poruchám, resp. prevádzka napriek niektorým poruchám,
- prediktívna diagnostika, kedy je možné na základe súčasných meraní usudzovať o potenciálnych poruchách v budúcnosti

Riadiace algoritmy vychádzajú predovšetkým z nelineárnej teórie riadenia, keďže AM môžeme charakterizovať ako výrazne nelineárny systém. Mnohé stavové veličiny AM nie sú priamo merateľné (tok, prúd rotora ...) a parametre systému sa časom môžu meniť (zmena odporov vplyvom teploty, nasýtenie indukčností ...).

## 2 Prehľad súčasného stavu

### 2.1 Asynchrónny motor

Už v roku 1882 objavil Nikola Tesla točivé magnetické pole<sup>[4]</sup> a skúmal jeho využitie na pohon strojov. V roku 1889 si svoj vynález elektrického motora dal patentovať - U.S. patent č. 00416194<sup>[5]</sup>. Odvtedy sa stáva asynchrónny motor čím ďalej používanejším, čo sa výrazne nemení ani v poslednej dobe, napriek rastu podielov ostatných striedavých motorov ako napr. synchronný motor s permanentnými magnetmi (SMPM), alebo BLDC.

Asynchrónny motor je z elektrického hľadiska transformátor, zložený zo statorového (primárneho) a rotorového (sekundárneho) vinutia. Vinutia motora sú uložené v dvoch oddelených železných jadrách, medzi ktorými je vzduchová medzera. Rotor je uložený v ložiskách a otáča sa vzhľadom na stator. Rotor býva realizovaný dvomi spôsobmi: AM s fázovým rotorom má rotor realizovaný podobne ako stator a to viacfázovými vinutiami, ktorých vývody sú na konektore. Častejšie býva ale zhotovený vo forme „kotvy nakrátko“ (Squirell Cage), ktorý sa skladá z medených alebo hliníkových tyčí spojených čelnými kruhmi. AM s kotvou nakrátko patrí medzi najpoužívanejšie a najspoľahlivejšie elektrické stroje.

### 2.1.1 Dynamický model AM s kotvou nakrátko<sup>[1]</sup>

Pre zostavenie dynamického modelu AM sú prijaté nasledovné zjednodušujúce predpoklady, ktoré vychádzajú z teórie elektrického stroja:

- trojfázové vinutia statora a, b, c
- trojfázové vinutia rotora A, B, C
- statorové a rotorové vinutia sú zapojené do hviezdy
- trojfázové vinutia statora a rotora sú súmerné
- vzduchová medzera medzi statorom a rotorom je rovnomerná (konštantná)
- magnetizačná charakteristika je lineárna
- straty v železe sa zanedbávajú

Uvažujeme všeobecný model v súradnicovom systéme („w“):

$$\hat{u}_s = R_s \hat{i}_s + \frac{d\hat{\psi}_s}{dt} + j\omega_k \hat{\psi}_s \quad (2.1)$$

$$0 = R_r \hat{i}_r + \frac{d\hat{\psi}_r}{dt} + j(\omega_k - \omega) \hat{\psi}_r \quad (2.2)$$

$$\hat{\psi}_r = L_m \hat{i}_s + L_r \hat{i}_r \quad \hat{\psi}_s = L_s \hat{i}_s + L_m \hat{i}_r \quad (2.3)$$

$$M_m = k_m \Im\{\hat{i}_s \cdot \hat{\psi}_r^*\}, \text{ kde } k_m = \frac{3}{2} p' \frac{L_m}{L_r} \quad (2.4)$$

$$M_m - M_z = J \frac{d\omega_m}{dt} \quad (2.5)$$

$$\omega = p' \omega_m \quad \nu = p' \nu_m \quad (2.6)$$

Model AM v statorovom súradnicovom systéme („s“), pre  $\omega_k=0$  v normálnom tvare je potom:

$$\frac{d\hat{i}_s}{dt} = \frac{1}{\sigma L_s} \left( \hat{u}_s - R_1 \hat{i}_s + \frac{L_m}{L_r} \frac{R_r}{L_r} \hat{\psi}_r - j\omega \frac{L_m}{L_r} \hat{\psi}_r \right) \quad (2.7)$$

$$\frac{d\hat{\psi}_r}{dt} = -\frac{R_r}{L_r} \hat{\psi}_r + R_r \frac{L_m}{L_r} \hat{i}_s + j\omega \hat{\psi}_r \quad (2.8)$$

$$\text{Kde } \sigma = 1 - \frac{L_m^2}{L_s L_r}, \quad T_1 = \frac{\sigma L_s}{R_1}, \quad k_r = \frac{L_m}{L_r}, \quad R_1 = R_s + R_r \frac{L_m^2}{L_r^2}, \quad T_r = \frac{R_r}{L_r} \quad (2.9)$$

Výsledný model AM je nelineárny dynamický systém 5. rádu. Tento model je zároveň je základom pre všetky neskôr popísané metódy riadenia.

## 2.2 Úvod do vektorového riadenia

Vektorové riadenie patrí do podskupiny dynamického, frekvenčne amplitúdového riadenia AM, vychádza zo všeobecnej analógie medzi jednosmernými a striedavými motormi. Jeho počiatky siahajú do Nemecka okolo roku 1972<sup>[22][23]</sup>. Nad úroveň generátora momentu je riadenie podobné riadeniu jednosmerného motora s cudzím budením.

Metódy vektorového riadenia využívajú orientáciu súradnicového systému najčastejšie na vektor magnetického toku rotora, statora alebo toku vo vzduchovej

medzere. Všetky modifikácie majú svoje výhody aj nevýhody<sup>[136]</sup>, v tejto práci sa budem bližšie venovať výhradne orientácii na magnetický tok rotora.

Princíp vektorového riadenia je možné zjednodušené interpretovať zo vzťahu pre elektromagnetický moment asynchrónneho motora, ktorý je určený vektorovým súčinom vektora magnetického toku rotora a vektora statorového prúdu:

$$M_m = k_m |\hat{\psi}_r \times \hat{i}_s| = \Im(\hat{\psi}_r^* \hat{i}_s) \quad (2.10)$$

## 2.3 Zákon riadenia magnetického toku rotora<sup>[16]</sup>

Riadenie AM orientované na magnetický tok rotora predstavuje asi najbežnejšiu metódu vektorového riadenia. Je to predovšetkým vďaka lineárnej závislosti medzi zložkami prúdu a tokom, resp. momentom, bez vzájomných krížových väzieb.

## 3 Bezsnímačové vektorové riadenie

Striedavé pohony založené na plne digitálnom riadení už dávno dosiahli status bežnej technológie v priemyselných aplikáciách od lacných riešení po najdrahšie systémy. V súčasnosti sa už bezsnímačové pohony s výhodou používajú aj v najnáročnejších aplikáciách ako sú napr. zdvihové alebo trakčné pohony. Pri týchto typoch pohonov motor pracuje často v nasýtení napätia či prúdu, vo všetkých štyroch kvadrantoch. Zároveň napriek problémom pri nulovej rýchlosti je pri týchto aplikáciách potrebné aby motor vedel aj pri veľkom momente na nulovú rýchlosť spomaliť, alebo sa z nej rozbehnúť. Nulovú rýchlosť tu nie je potrebné dlhodobo udržať, pretože udržanie v nulovej rýchlosti majú na starosti brzdy.

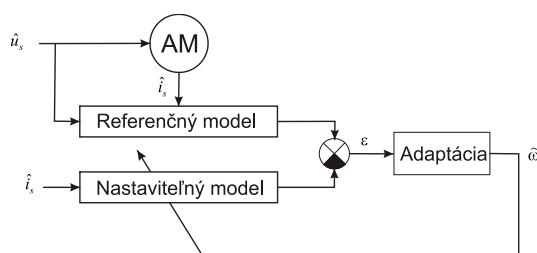
Pozorovatele sú implementované buď v otvorenej (priamej) alebo uzatvorenej (spätnoväzobnej) forme. Otvorené štruktúry predstavujú najmä rôzne estimačné metódy sklzovej rýchlosti<sup>[9][18]</sup>. Uzatvorené štruktúry predstavujú pozorovatele typu MRAS, Kalmanov filter, Luenbergerov pozorovateľ.

Hlavné výhody otvoreného riadenia<sup>[7]</sup>:

- výsledný pohon je menších rozmerov,
- nižšia cena,
- žiadna dodatočná kabeláž pre už v priemysle inštalované motory,
- vyššia odolnosť voči okolitému šumu (EMC)

### 3.1.1.1 Adaptívne štruktúry pozorovateľov - MRAS

MRAS (Model Reference Adaptive System) modely pozorujú rýchlosť pomocou dvoch rôznych modelov motora, z toho jeden je referenčný model a druhý nastaviteľný, závislý od rýchlosti. Rozdiel medzi výstupmi modelov je adaptačná odchýlka  $\varepsilon$ , spracovaná v bloku adaptácie, najčastejšie pomocou PID regulátora. Výstupom je pozorovaná uhlová rýchlosť.



Obr. 3.1 Základná principiálna schéma MRAS pozorovateľa uhlovej rýchlosti



### 3.2 Pozorovateľ uhlovej rýchlosti s Luenbergerovým pozorovateľom

Jedným z najznámejších pozorovateľ s Luenbergerovým pozorovateľom je Kubotom popísaný model v prácach<sup>[27][59][60][61][62]</sup>. Je to opis adaptívneho pozorovateľa toku s identifikáciou odporu statora  $R_s$  aj odporu rotora  $R_r$ . Napriek tomu že tieto práce<sup>[59][69]</sup> sú primárne zamerané na snímačový systém, opisujú a odvodzujú aj použitie tohto pozorovateľa pre bezsnímačové riadenie.

Luenbergerov pozorovateľ je spätnoväzobný pozorovateľ stavových veličín. Základný Luenbergerov pozorovateľ je definovaný len pre lineárne časovo invariantné systémy. Ak je model AM vyjadrený v statorovom súradnicovom systéme a zložky statorového prúdu a magnetického toku rotora sú zvolené za stavové veličiny potom môžeme hovoriť o časovo variantnom modeli, pretože jeho parametre sa v čase menia. Preto je potrebné použiť Rozšírený Luenbergerov pozorovateľ (ELO - Extended Luenberger Observer).

Pre stavový systém modelu motora:

$$\frac{d\mathbf{x}}{dt} = \mathbf{A}\mathbf{x} + \mathbf{B}\mathbf{u} \quad \mathbf{y} = \mathbf{C}\mathbf{x} \quad (3.1)$$

A pre rozšírený pozorovateľ platí:

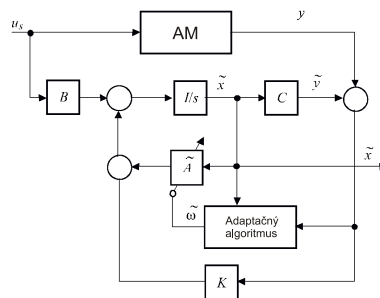
$$\frac{d\tilde{\mathbf{x}}}{dt} = \mathbf{A}\tilde{\mathbf{x}} + \mathbf{B}\mathbf{u} + \mathbf{K}(\tilde{i}_s - \hat{i}_s) \quad (3.2)$$

Kde  $\mathbf{K} = \begin{bmatrix} g_1 + g_2 j \\ g_3 + g_4 j \end{bmatrix}$  je matica zosilnení a  $\tilde{\mathbf{x}}$  je vektor pozorovaných stavových veličín.

Jednotlivé matice môžu byť vyjadrené ako:

$$\tilde{\mathbf{x}} = \begin{bmatrix} \tilde{i}_s \\ \tilde{\psi}_r \end{bmatrix} \quad \mathbf{A} = \begin{bmatrix} -\frac{1}{T_1} & \left( \frac{k_r}{T_r \sigma L_s} - j \frac{k_r \omega}{\sigma L_s} \right) \\ \frac{L_m}{T_r} & \left( -\frac{1}{T_r} + j\omega \right) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_{11} & \hat{A}_{12} \\ A_{21} & \hat{A}_{22} \end{bmatrix} \quad (3.3)$$

$$\mathbf{B} = \begin{bmatrix} \frac{1}{\sigma L_s} \\ 0 \end{bmatrix} \quad \mathbf{C} = [1 \quad 0]$$



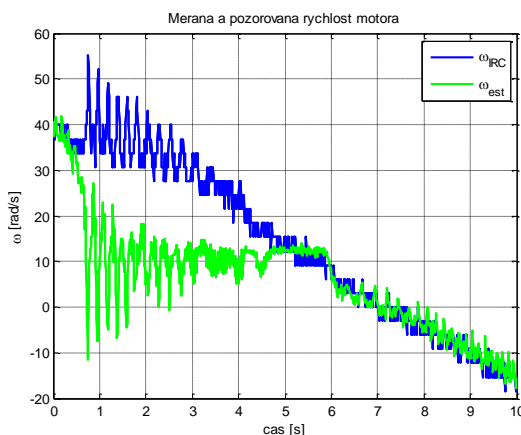
Obr. 3.2 Bloková schéma pozorovateľa – stavový priestor

Návrh ELO potom pozostáva z 2 krokov: vhodný výber pólov pozorovateľa a počítanie matice zosilnení  $\mathbf{K}$ .

### 3.2.1 Stabilita adaptačného algoritmu pre Luenbergerov pozorovateľ

Stabilite tohto pozorovateľa sa venuje veľký počet literatúry už prakticky dve desaťročia. Spomenúť by bolo treba minimálne Kubotu<sup>[61][62]</sup> ako jedného z autorov tejto štruktúry, či Yanga<sup>[72]</sup>. Tím autorov z Francúzska uverejnil niekoľko prác<sup>[78][79][80][81]</sup> venujúcich sa čisto stabilizácii tohto pozorovateľa v generátorickom chode na nízkych rýchlostiach.

Na Obr. 3.3 je možné vidieť ukážku nestability v generátorickom chode na nízkych rýchlostiach. Generátorický režim bol vytvorený reverzovaním záťaže typu „umelý zotrvačník“.



Obr. 3.3 Časový priebeh - ukážka nestability modelu, nízke rýchlosti generátorický režim v čase 0 - 5s, záťaž typu „umelý zotrvačník“

### 3.2.2 Vyšetrenie stability Luenbergerovho pozorovateľa – nová metóda

Pri vyšetovaní stability vychádzame z linearizovaného modelu motora v synchronnom súradnicovom systéme. Už priamo v rovniciach máme pri odvodzovaní linearizovaného modelu zakomponované 2 rôzne stabilizačné metódy:

1. Zosilnením spätnej väzby Luenbergerovho pozorovateľa
2. Úpravou zákona adaptácie – rotácia odchýlkového vektora o uhol  $\gamma$

Linearizujeme model pozorovateľa:

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt} \Delta \tilde{i}_s &= \left( -\frac{1}{T_1} - j\omega_{s0} + g_1 + g_2 j \right) \Delta \tilde{i}_s + \left( \frac{k_r}{\sigma L_s} \frac{1}{T_r} - j\tilde{\omega}_0 \frac{k_r}{\sigma L_s} \right) \Delta \tilde{\psi}_r + \\ &+ \frac{1}{\sigma L_s} \Delta \hat{u}_s - (g_1 + g_2 j) (\Delta \hat{i}_s) - j\Delta \omega_s \tilde{i}_{s0} - j\Delta \tilde{\omega} \frac{k_r}{\sigma L_s} \tilde{\psi}_{r0} \\ \frac{d}{dt} \Delta \tilde{\psi}_r &= \frac{L_m}{T_r} \Delta \tilde{i}_s + \left( -\frac{1}{T_r} - j(\omega_{s0} - \tilde{\omega}_0) \right) \Delta \tilde{\psi}_r - j(\Delta \omega_s - \Delta \tilde{\omega}) \tilde{\psi}_{r0} - (g_3 + g_4 j) (\hat{i}_s - \tilde{i}_s) \\ \frac{d}{dt} \Delta \tilde{\omega} &= K_x \mathfrak{F} \left\{ \left( \Delta \tilde{i}_s \right) (\cos(\gamma) - j \sin(\gamma)) \hat{\psi}_{r0}^* \right\} \end{aligned} \quad (3.4)$$

Kde  $K_x$  predstavuje použitý PID regulátor.

Model pozorovateľa môžeme prepísať do maticového tvaru 5x5:

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \Delta \tilde{i}_{s1} \\ \Delta \tilde{i}_{s2} \\ \Delta \tilde{\psi}_{r1} \\ \Delta \tilde{\psi}_{r2} \\ \Delta \tilde{\omega} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{1}{T_l} + g_1 & \omega_{s0} - g_2 & \frac{k_r}{\sigma L_s} \frac{1}{T_r} & \tilde{\omega}_0 \frac{k_r}{\sigma L_s} & 0 \\ -\omega_{s0} + g_2 & -\frac{1}{T_l} + g_1 & -\tilde{\omega}_0 \frac{k_r}{\sigma L_s} & \frac{k_r}{\sigma L_s} \frac{1}{T_r} & -\frac{K_r}{\sigma L_s} \psi_{r0} \\ \frac{L_m}{T_r} + g_3 & -g_4 & -\frac{1}{T_r} & (\omega_{s0} - \tilde{\omega}_0) & 0 \\ g_4 & \frac{L_m}{T_r} + g_3 & -(\omega_{s0} - \tilde{\omega}_0) & -\frac{1}{T_r} & \psi_{r0} \\ -K_x \sin(\gamma) \tilde{\psi}_{r10} & K_x \cos(\gamma) \tilde{\psi}_{r10} & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \tilde{i}_{s1} \\ \Delta \tilde{i}_{s2} \\ \Delta \tilde{\psi}_{r1} \\ \Delta \tilde{\psi}_{r2} \\ \Delta \tilde{\omega} \end{bmatrix} \quad (3.5)$$

Ako kritérium stability bolo použité Routh-Hurwitzovo kritérium,

$$\text{kde } \det(sI - A_{5 \times 5}) > 0 \quad (3.6)$$

Charakteristickú rovnicu sústavy vieme zapísať nasledovne:

$$\det(sI - A_{5 \times 5}) = a_5 s^5 + a_4 s^4 + a_3 s^3 + a_2 s^2 + a_1 s + a_0 \quad (3.7)$$

Napriek tomu že charakteristická rovnica má 6 koeficientov, bolo zistené že zápornú hodnotu môže získať iba nulý člen ( $a_0$ ).

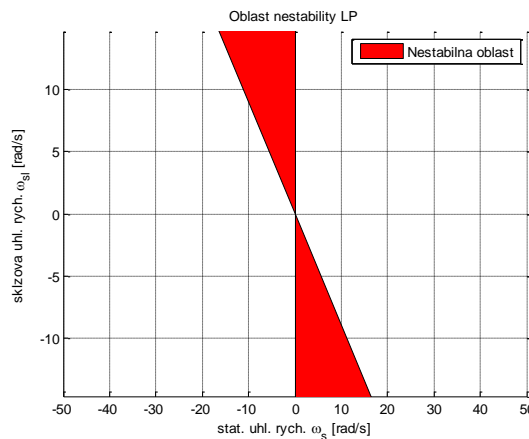
Koeficient  $a_0$  môže byť analyticky vyjadrený v tvare:

$$a_0 = \frac{1}{T_r} K_x \frac{k_r}{\sigma L_s} \psi_{r0}^2 \omega_{s0} \left( (\omega_{s0} - g_2) + \frac{T_r}{T_l} \omega_{s10} - T_r g_1 \omega_{s10} + \frac{k_r}{\sigma L_s} \left( \frac{L_m}{T_r} \right) T_r \omega_0 - \frac{k_r}{\sigma L_s} g_4 + \frac{k_r}{\sigma L_s} T_r g_3 \omega_0 \right) \cos(\gamma) + \left( \left( -\frac{1}{T_l} + g_1 \right) + T_r (\omega_{s0} - g_2) \omega_{s10} + \frac{k_r}{\sigma L_s} \left( \frac{L_m}{T_r} \right) + \frac{k_r}{\sigma L_s} g_3 + \frac{k_r}{\sigma L_s} T_r g_4 \omega_0 \right) \sin(\gamma) \quad (3.8)$$

Systém je teda nestabilný ak je splnená nasledujúca podmienka:

$$\omega_{s0} \left[ (\omega_{s0} - g_2) + \frac{T_r}{T_l} \omega_{s10} - T_r g_1 \omega_{s10} + \frac{k_r}{\sigma L_s} L_m \omega_0 \right] < 0 \quad (3.9)$$

Na Obr. 3.4 jednoznačne vidíme že nestabilná oblasť je redukovaná na nízke rýchlosti v generátorickom chode motora.



Obr. 3.4 Oblasť nestability Luenbergerovho pozorovateľa

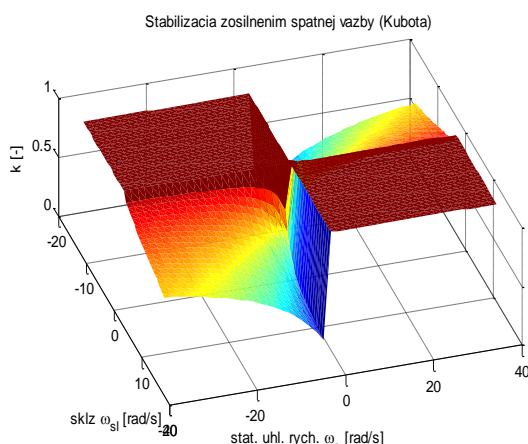
### 3.2.2.1 Stabilizácia zosilnením spätnej väzby Luenbergerovho pozorovateľa

Existujú dve možnosti stabilizácie zosilnením spätnej väzby LP. Prvá možnosť je definovať zosilnenie spätnej väzby Luenbergerovho pozorovateľa ako to definoval Kubota<sup>[61]</sup>.

Zosilnenie definuje nasledovne:

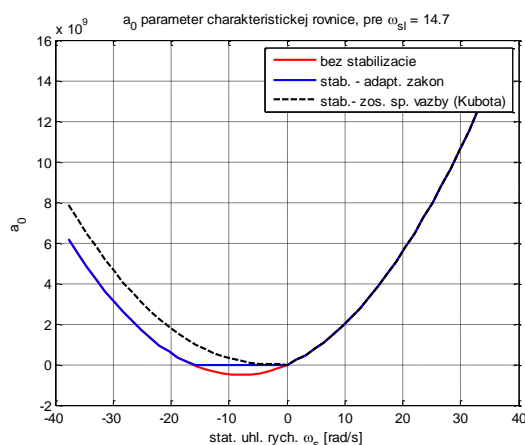
$$k = \frac{L_s R_r + L_r R_s}{2L_r R_s} \frac{\omega_s}{\tilde{\omega}} = \left( \frac{L_s R_r}{2L_r R_s} + \frac{1}{2} \right) \frac{\omega_s}{\tilde{\omega}} = \left( \frac{T_s}{T_r} + 1 \right) \frac{\omega_s}{2\tilde{\omega}} \quad (3.10)$$

Pre celú oblasť  $\omega_s \omega_{sl} < 0$ . Autori uvádzajú že  $a_0$  má pre dané  $k$  najvyššiu možnú hodnotu zo všetkých možných zosilnení  $k$ .



Obr. 3.5 Hodnota zosilnenia  $k$  podľa Kubotu v súradniciach  $(\omega_{s0}, \omega_{sl0})$

Na nasledujúcom grafe (Obr. 3.6) môžeme jednoduchšie porovnať uvedené stabilizačné metódy. Kubota definoval stabilizáciu tak, aby aj v generátorickom režime mal parameter  $a_0$  čo najvyššiu hodnotu (čierna prerušovaná čiara). Ostatné, mnou navrhnuté metódy stabilizácie sa snažia o udržanie parametra  $a_0$  na hranici stability (modrá čiara). Vypočítané hodnoty boli hodnoty hraničné, je ich možné zvýšiť tak aby  $a_0$  bolo nenulové v celom rozsahu (s výnimkou keď  $\omega_s=0$ ).



Obr. 3.6 Závislosť  $a_0$  pri konštantnom sklze pri rôznych metódach kompenzácie od statorovej frekvencie

### 3.2.2.2 Stabilizácia pozorovateľa úpravou zákona adaptácie, rotácia odchýlkového vektora o uhol $\gamma$

Úprava zákona adaptácie patrí taktiež medzi veľmi populárne metódy stabilizácie pozorovateľa. Venujú sa jej mnohí autori<sup>[77][79][80][81]</sup>. V tomto prípade neuvažujeme o stabilizácii pomocou posunu pólov pozorovateľa.

Uvažujeme že  $g_1 = 0, g_2 = 0, g_3 = 0, g_4 = 0$ . (3.11)

Nultý člen charakteristickej rovnice má potom tvar:

$$a_0 = \frac{I}{T_r} K_x \frac{k_r}{\sigma L_s} \psi_{r0}^2 \omega_{s0} \left[ \left( \omega_{s0} + \frac{T_r}{T_l} \omega_{s10} + \frac{k_r}{\sigma L_s} L_m \omega_0 \right) \cos(\gamma) + \left( -\frac{I}{T_l} + T_r \omega_{s0} \omega_{s10} + \frac{k_r}{\sigma L_s} \frac{L_m}{T_r} \right) \sin(\gamma) \right] \quad (3.12)$$

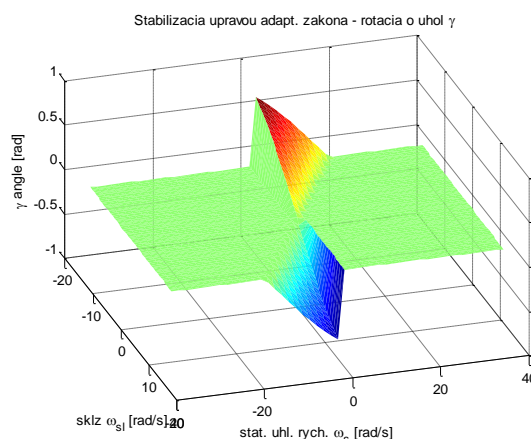
Chceme dosiahnuť aby:

$$\omega_{s0} \left[ \left( \omega_{s0} + \frac{T_r}{T_l} \omega_{s10} + \frac{k_r}{\sigma L_s} L_m \omega_0 \right) \cos(\gamma) + \left( -\frac{I}{T_l} + T_r \omega_{s0} \omega_{s10} + \frac{k_r}{\sigma L_s} \frac{L_m}{T_r} \right) \sin(\gamma) \right] \geq 0 \quad (3.13)$$

To znamená že minimálny uhol posuvu je:

$$|\gamma| \geq \tan^{-1} \left( \frac{\omega_{s0} + \frac{T_r}{T_l} \omega_{s10} + \frac{k_r}{\sigma L_s} L_m \omega_0}{-\frac{I}{T_l} + T_r \omega_{s0} \omega_{s10} + \frac{k_r}{\sigma L_s} \frac{L_m}{T_r}} \right) \quad (3.14)$$

Na obrázku Obr. 3.7 je možné vidieť uhol  $\gamma$  v závislosti od statorovej frekvencie a sklzu.

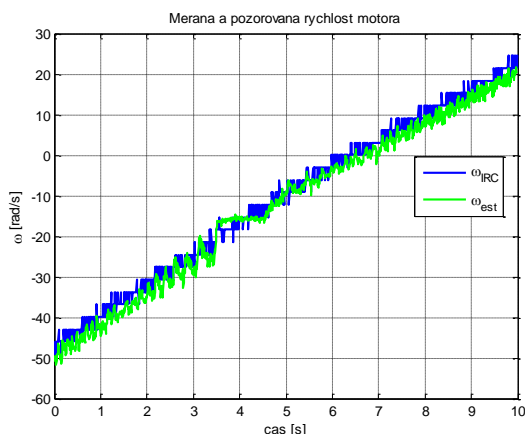


Obr. 3.7 Závislosť stabilizačného uhla  $\gamma$  v závislosti od statorovej frekvencie a sklzu

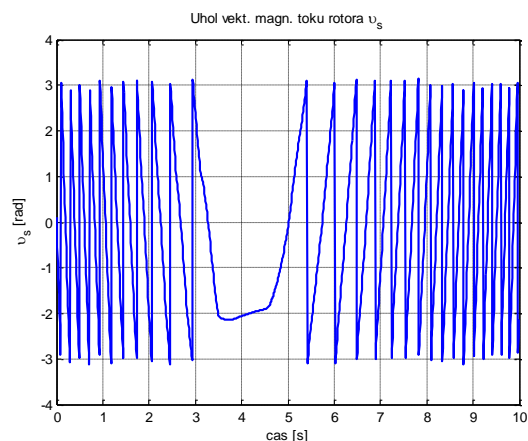
### 3.2.3 Praktická realizácia – namerané priebehy s LP

V tejto časti práce sú uvedené namerané priebehy vybraných veličín (najmä meraná a pozorovaná rýchlosť) pri reverzovaní záťaže typu „umelý zotrvačník“. Pozorovateľ bol stabilizovaný úpravou adaptačného zákona, rotácia o uhol  $\gamma$ . Pohon je celý čas na obmedzení momentu – z generátorickej záťaže prekročením

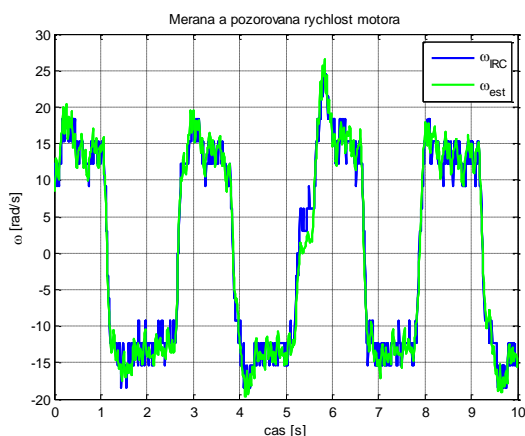
nulovej rýchlosti sa stane záťaž motorická. Ďalší experiment je reverzácia naprázdno.



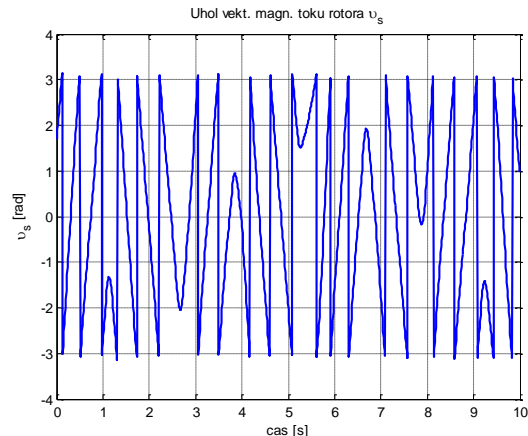
Obr. 3.8 Časový priebeh - pozorovaná a meraná rýchlosť pri pomalom reverzovaní plným momentom, záťaž typu „umelý zotrvačník“



Obr. 3.9 Časový priebeh uhla vektora magnetického toku rotora pri rýchlym reverzovaní na malých rýchlostiach, stav bez externej záťaže



Obr. 3.10 Časový priebeh - pozorovaná a meraná rýchlosť pri rýchlym reverzovaní na malých rýchlostiach, stav bez externej záťaže

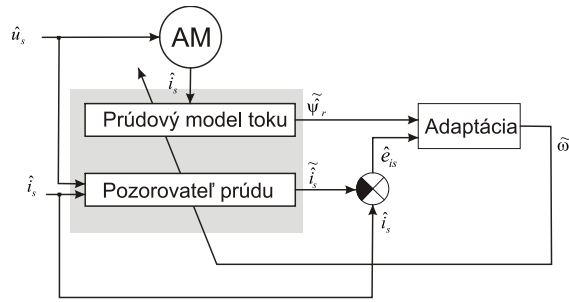


Obr. 3.11 Časový priebeh uhla vektora magnetického toku rotora pri rýchlym reverzovaní na malých rýchlostiach, stav bez externej záťaže

Na uvedených časových priebehoch vidíme že Luenbergerov pozorovateľ má výborné vlastnosti pri nízkych rýchlostiach, pomalé reverzovanie pod záťažou zvláda bez väčších problémov. Kvalita regulácie na malých rýchlostiach bez záťaže sa dá porovnať s kvalitou regulácie snímačového systému.

### 3.3 MRAS s modelom prúdu statora (MRAS CC)

Predlohou pre tento algoritmus bola práca T.Orlowskej-Kowalskej<sup>[16]</sup>. Cieľom bolo vyhnúť sa napäťovému modelu toku, o ktorom je známe že pri malých rýchlostiach zlyháva. Pozorovanou veličinou je prúd a adaptácia prebieha na základe rozdielu pozorovaného a nameraného prúdu statora. Oproti tokovému MRASu by tento algoritmus mal byť stabilnejší a presnejší, aj pri rýchlostiach blízkyh nul, čo dokazujú aj experimenty. Človek s prehľadom v obore rýchlo odhalí, že ide vlastne o modifikáciu Kubotovho pozorovateľa plného rádu. Čím sa ale pôvodní autori nechvália je štruktúrna nestabilita v generátorickom chode.



Obr. 3.12 Zjednodušená schéma princípu štruktúry MRAS CC.

Prvý nastaviteľný model je model statorového prúdu (v súr. systéme „s“):

$$\tilde{i}_s = \frac{1}{R_1(T_1s+1)} \left( \hat{u}_s + \frac{k_r}{T_r} \tilde{\psi}_r - j\omega k_r \tilde{\psi}_r \right) \quad (3.15)$$

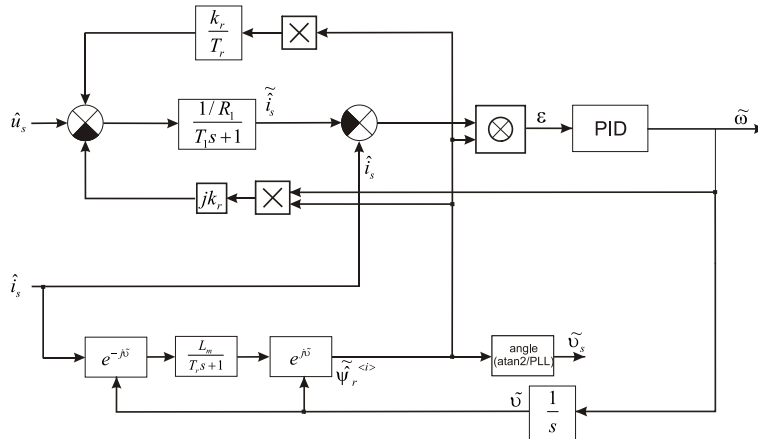
Druhý nastaviteľný model je prúdový model toku v súradnicovom systéme (d,q). Vstupom do modelu statorového prúdu je okrem napätia statora pozorovaná rýchlosť a pozorovaný magnetický tok rotora. Ten získame z prúdového modelu toku, ktorého vstupom je meraný prúd statora a pozorovaná rýchlosť.

Chyba medzi skutočným a pozorovaným prúdom je definovaná ako:

$$\hat{e}_{is} = \hat{i}_s - \tilde{i}_s \quad (3.16)$$

Adaptačná odchýlka je rovnako ako v prípade Luenbergerovho pozorovateľa daná vzťahom:

$$\varepsilon = \Im(\tilde{\psi}_r \cdot \hat{e}_{is}) = e_{is\alpha} \tilde{\psi}_{r\beta} - e_{is\beta} \tilde{\psi}_{r\alpha} \quad (3.17)$$



Obr. 3.13 Schéma štruktúry MRAS CC vo vektorovom komplexnom tvare

Výhoda oproti Kubotovmu systému je v presnejšej estimácii toku, pri všetkých rýchlostiach. V prípade že Luenbergerov pozorovateľ má odchýlky v parametroch ako  $L_m$ ,  $R_r$ ,  $\sigma L_s$ , estimované prúdy sa výrazne líšia od meraných a tým pádom spôsobujú aj výraznú odchýlku v estimovanom toku. Nevýhoda je už spomínaná nestabilita v generátorickom režime, ktorá sa dá ale vhodnými prostriedkami eliminovať.

### 3.3.1 Navrhovaný linearizovaný model odchýlky pre MRAS CC

Celý návrh je v statorovom súradnicovom systéme, bol publikovaných v mojej spolupráci s prof. Žalmanom<sup>[43][44]</sup>. Tam sme uvádzali výpočet z linearizovaných rovníc. Vhodnejšie a matematicky čitateľnejšie je zápis prepísať do stavového priestoru.

Vychádzame z linearizovaných veličín:

$$\tilde{\mathbf{x}} = \tilde{\mathbf{x}}_0 + \Delta\tilde{\mathbf{x}} \quad \mathbf{A} = \mathbf{A}_0 + \Delta\mathbf{A} \quad \tilde{\omega} = \tilde{\omega}_0 + \Delta\tilde{\omega} \quad (3.18)$$

Z modelu pozorovateľa prúdu vyplýva:

$$\begin{aligned} \frac{d\Delta\tilde{\mathbf{x}}}{dt} &= \mathbf{A}_0\Delta\tilde{\mathbf{x}} + \Delta\mathbf{A}\tilde{\mathbf{x}}_0 & \Delta\tilde{\mathbf{x}} &= (s\mathbf{I} - \mathbf{A}_0)^{-1} \Delta\mathbf{A}\tilde{\mathbf{x}}_0 \\ \Delta\tilde{j}_s &= \mathbf{C}\Delta\tilde{\mathbf{x}} & \Delta\tilde{j}_s &= \mathbf{C}\Delta\tilde{\mathbf{x}} \\ \Delta\tilde{i}_s &= \mathbf{C}\Delta\tilde{\mathbf{x}} & \Delta\tilde{i} &= \mathbf{C}(s\mathbf{I} - \mathbf{A}_0)^{-1} \Delta\mathbf{A}\tilde{\mathbf{x}}_0 \end{aligned} \quad (3.19)$$

Odchýlku po mnohých matematických úpravách dostaneme v tvare:

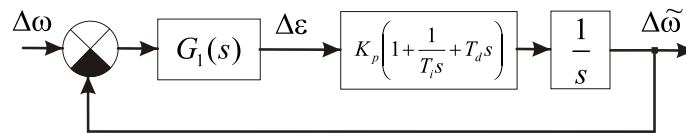
$$\Delta\varepsilon = \left( \frac{\frac{k_r T_r}{R_l} s (T_r s + 1)}{(T_1 s + 1) \left( (T_r s + 1)^2 + T_r^2 \omega_0^2 \right)} \right) \hat{\psi}_{r0}^2 \Delta\tilde{\omega} \quad (3.20)$$

Budeme uvažovať že  $\omega_0 = 0$  a zavedieme:

$$K_0 = \frac{T_r}{R_l} k_r \psi_{r0}^2 \quad (3.21)$$

Potom dostávame výsledný tvar prenosovej funkcie:

$$G_I(s) = \frac{\Delta\varepsilon(s)}{\Delta\tilde{\omega}(s)} = \frac{sK_0}{(1 + T_r s)(T_r s + 1)} \quad (3.22)$$



Obr. 3.14 Linearizovaný model MRAS CC

### 3.3.2 Vlastné riešenie návrhu PID korekčného člena

Z daného výsledného prenosu (3.22) navrhne PID korekčný člen.

Výsledná prenosová funkcia uzatvoreného obvodu po korekcii „derivácie“ v čitateli integrátorom:

$$G(s) = \frac{M(s)}{N(s)} = \frac{K_p K_0 (T_i s + 1 + T_d T_i s^2)}{T_i T_1 T_r \left( s^3 + \frac{((T_1 + T_r) + K_p K_0 T_d)}{T_1 T_r} s^2 + \frac{(1 + K_p K_0)}{T_1 T_r} s + \frac{K_p K_0}{T_i T_1 T_r} \right)} \quad (3.23)$$

Výsledné vzorce pre výpočet parametrov adaptačného PID metódou pole placement:

$$K_p = \frac{\omega_0^2 (2\zeta k + 1) T_1 T_r - 1}{K_0} \quad T_i = \frac{K_p K_0}{k \omega_0^3 T_1 T_r} \quad T_d = \frac{\omega_0 (2\zeta + k) T_1 T_r - (T_1 + T_r)}{K_p K_0} \quad (3.24)$$



### 3.3.3 Stabilita MRAS CC pozorovateľa

Stabilita pozorovateľov plného rádu je už dlhodobo známy problém a riešeniami stabilizácie pre Luenbergerov pozorovateľ sa zaoberá mnoho autorov. Nie je mi ale známe žiadne publikované vyšetovanie stability pre systém MRAS CC.

Riešenia pre Luenbergerov pozorovateľ používajú stabilizáciu pomocou zosilnenia  $k$  spätnej väzby<sup>[61][72][78]</sup> resp. úpravou adaptačného zákona<sup>[77][79][80][81][82]</sup>.

### 3.3.4 Vlastný návrh vyšetrenia stability MRAS CC

Vychádzame z linearizovaného modelu v synchronnom súradnicovom systéme. Už priamo v rovniciach máme pri odvodzovaní stability zakomponované 2 možné rôzne stabilizačné metódy, podobne ako pri Luenbergerovom pozorovateli:

1. Zosilnením spätnej väzby pozorovateľa prúdu
2. Úpravou zákona adaptácie

Linearizujeme model pozorovateľa:

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt} \Delta \tilde{i}_s = & \left( -\frac{1}{T_l} \tilde{i}_s - j\omega_{s0} \right) \Delta \tilde{i}_s + \left( \frac{k_r}{\sigma L_s} \frac{1}{T_r} - j\tilde{\omega}_0 \frac{k_r}{\sigma L_s} \right) \Delta \tilde{\psi}_r + \frac{1}{\sigma L_s} \Delta \hat{u}_s + \\ & + (g_1 + g_2 j) (\Delta \hat{i}_s - \Delta \tilde{i}_s) - j\Delta \omega_s \tilde{i}_{s0} - j\Delta \tilde{\omega} \frac{k_r}{\sigma L_s} \tilde{\psi}_{r0} \end{aligned} \quad (3.25)$$

$$\frac{d}{dt} \Delta \tilde{\psi}_r = \frac{L_m}{T_r} \Delta \hat{i}_s + \left( -\frac{1}{T_r} - j(\omega_{s0} - \tilde{\omega}_0) \right) \Delta \tilde{\psi}_r - j(\Delta \omega_s - \Delta \tilde{\omega}) \tilde{\psi}_{r0}$$

$$\frac{d}{dt} \Delta \tilde{\omega} = K_x \Delta e_m$$

Kde  $K_x$  opisuje adaptačný PID regulátor.

Definujeme si linearizovanú odchýlku:

$$\frac{d}{dt} \Delta \tilde{\omega} = -K_x \Im \left\{ \left( \Delta \hat{i}_s - \Delta \tilde{i}_s \right) e^{-j\gamma} \hat{\psi}_{r0}^* \right\} \quad (3.26)$$

A stabilizáciu úpravou adaptačného zákona (posun o uhol  $\gamma$ ):

$$e^{-j\gamma} = \cos(\gamma) - j \sin(\gamma) \quad (3.27)$$

Uvedené rovnice vieme zapísať do komplexnej matice 3x3:

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \Delta \tilde{i}_s \\ \Delta \tilde{\psi}_r \\ \Delta \tilde{\omega} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{1}{T_l} \tilde{i}_s - j\omega_{s0} + g_1 + g_2 j & \frac{k_r}{\sigma L_s} \frac{1}{T_r} - j\tilde{\omega}_0 \frac{k_r}{\sigma L_s} & -j \frac{K_r}{\sigma L_s} \psi_{r0} \\ 0 & -\frac{1}{T_r} - j(\omega_{s0} - \tilde{\omega}_0) & j\psi_{r0} \\ K_x \Im \{ (\cos(\gamma) - j \sin(\gamma)) \hat{\psi}_{r0}^* \} & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \tilde{i}_s \\ \Delta \tilde{\psi}_r \\ \Delta \tilde{\omega} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{1}{\sigma L_s} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \hat{u}_s \quad (3.28)$$

Veľmi podobne ako u pozorovateľa s Luenbergerovým pozorovateľom bolo ako kritérium stability použité Routh-Hurwitzovo kritérium, kde  $\det(sI - A_{5 \times 5}) > 0$ .

Charakteristickú rovnicu sústavy vieme zapísať ako:

$$\det(sI - A_{5 \times 5}) = a_5 s^5 + a_4 s^4 + a_3 s^3 + a_2 s^2 + a_1 s + a_0 \quad (3.29)$$

Napriek tomu, že charakteristická rovnica má 6 koeficientov, bolo zistené že záporných hodnôt môže naberať iba nultý člen ( $a_0$ ).

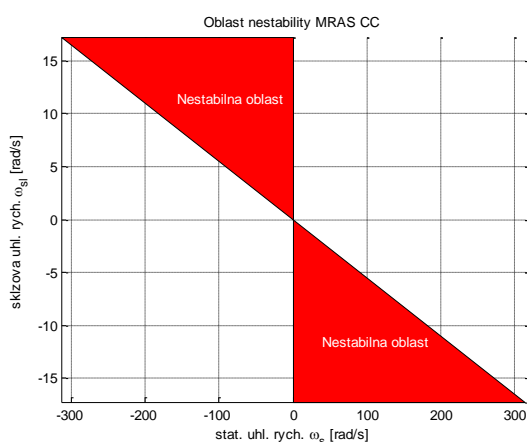
Koeficient  $a_0$  môže byť analyticky vyjadrený ako:

$$a_0 = \frac{I}{T_r} K_x \frac{k_r}{\sigma L_s} \psi_{r0}^2 \omega_{s0} \left( \left( (\omega_{s0} - g_2) - T_r \left( -\frac{I}{T_l} + g_1 \right) \omega_{sl0} \right) \cos(\gamma) + \left( \left( -\frac{I}{T_l} + g_1 \right) + T_r (\omega_{s0} - g_2) \omega_{sl0} \right) \sin(\gamma) \right) \quad (3.30)$$

$$\text{Kde } \omega_{s0} = (\omega_0 + \omega_{sl0}) \quad (3.31)$$

Vo všeobecnosti môžeme tvrdiť že systém je nestabilný ak:

$$\omega_{s0} \left( (\omega_{s0} - g_2) - T_r \left( -\frac{I}{T_l} + g_1 \right) \omega_{sl0} \right) < 0 \quad (3.32)$$



Obr. 3.15 Oblasť nestability MRAS CC

### 3.3.4.1 Stabilizácia zosilnením spätnej väzby pozorovateľa prúdu

Keďže pri MRAS CC na rozdiel od Kubotovho pozorovateľa používame tok počítaný z meraných prúdov, do modelu toku nezasahujeme.

Zaky<sup>[83]</sup> vo svojej práci predstavuje zjednodušený posun pólu, aplikovateľný iba do modelu prúdu. Používa síce systém Kubotovho typu v synchronnom súradnicovom systéme, pre stacionárny súradnicový systém je riešenie ešte jednoduchšie.

Prenos prúdového modelu môžeme zapísať ako:

$$G(s) = s - \left( -\frac{I}{T_l} - j\omega_s + (g_1 + g_2 j) \right) = s + \left( \left( \frac{I}{T_l} - g_1 \right) + j(\omega_s - g_2) \right) \quad (3.33)$$

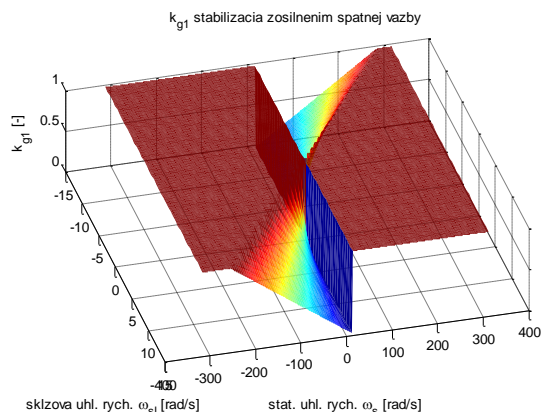
Požadujeme stabilizáciu iba jedným prvkom ( $g_1$ )  $g_2 = 0$ ,  $\gamma = 0$ .

$$\omega_{s0} \left( \omega_{s0} + T_r \left( \frac{I}{T_l} - g_1 \right) \omega_{sl0} \right) \geq 0, \text{ potom } g_1 \leq \frac{\omega_{s0} + \frac{T_r}{T_l} \omega_{sl0}}{T_r \omega_{sl0}} \quad (3.34)$$

Keďže sa ale jedná o posun pólu v modeli satorového prúdu, môžeme si to podobne ako v Kubotovej verzii vziať na zosilnenie  $k_{g1}$ , kde  $k_{g1}$  je posun pólu estimátora prúdu.

$$g_I = (k_{g1} - 1) \frac{I}{T_I} \quad (3.35)$$

$$k_{g1} = g_I T_I + 1$$



Obr. 3.16 Hodnota zosilnenia  $k_{g1}$  v závislosti od satorovej frekvencie a sklzu

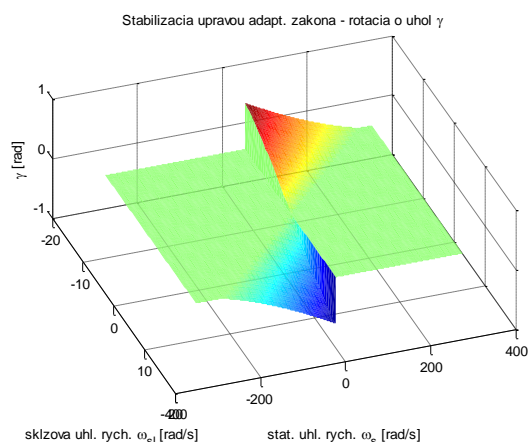
### 3.3.4.2 Stabilizácia úpravou zákona adaptácie, rotácia odchýlkového vektora o uhol $\gamma$

Touto metódou chceme dosiahnuť rovnaký cieľ, aby bola splnená podmienka:

$$\omega_{s0} \left[ \left( \omega_{s0} + \frac{T_r}{T_I} \omega_{s10} \right) \cos(\gamma) + \left( T_r \omega_{s0} \omega_{s10} - \frac{I}{T_I} \right) \sin(\gamma) \right] \geq 0 \quad (3.36)$$

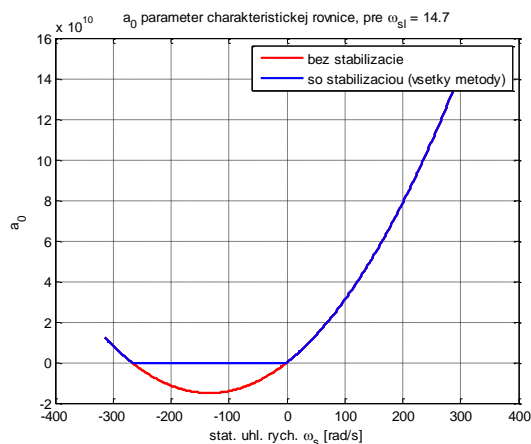
Minimálny uhol posuvu je potom:

$$|\gamma| \geq \tan^{-1} \left( \frac{\left( \left( \omega_{s0} \right) + \left( \frac{T_r}{T_I} \right) \omega_{s10} \right)}{T_r \left( \omega_{s0} \right) \omega_{s10} - \frac{I}{T_I}} \right) \quad (3.37)$$



Obr. 3.17 Závislosť stabilizačného uhla  $\gamma$  v závislosti od satorovej frekvencie a sklzu

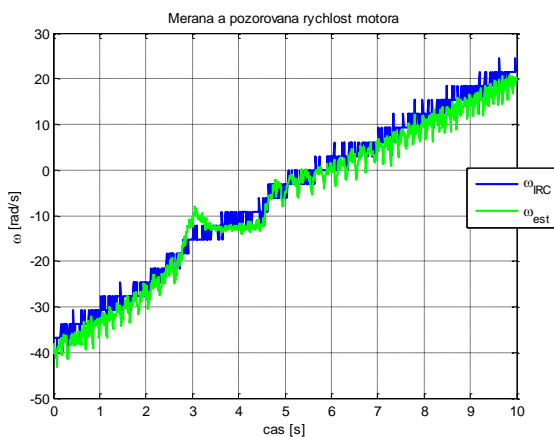
Na nasledujúcom grafe môžeme jednoducho znázorniť cieľ uvedených stabilizačných metód. Spomenuté metódy stabilizácie sa snažia o udržanie parametra  $a_0$  na hranici stability (modrá čiara). Samozrejme uvedené vypočítané hodnoty boli hodnoty hraničné, je ich možné upraviť tak, aby  $a_0$  bolo nenulové v celom rozsahu (s výnimkou keď  $\omega_s=0$ ).



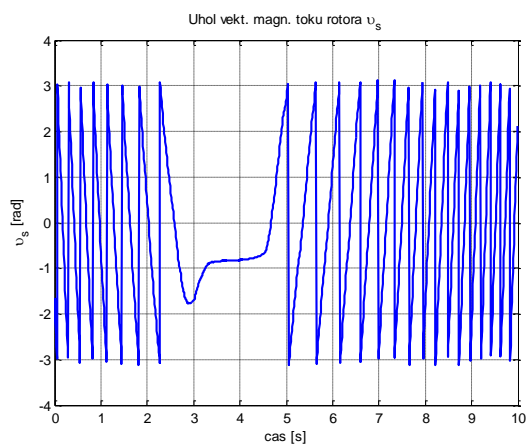
Obr. 3.18 Závislosť  $a_0$  pri konšt. sklze od statorovej frekvencie – rôzne metódy

### 3.3.5 Praktická realizácia - namerané priebehy s MRAS CC

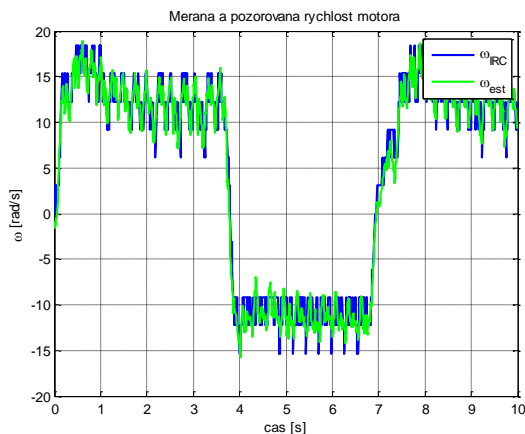
V tejto časti práce sú uvedené namerané časové priebehy vybraných veličín (najmä meraná a pozorovaná rýchlosť) pri reverzovaní záťaže typu „umelý zotrvačník“. Pohon je teda celý čas na obmedzení momentu – z generátorickej záťaže prekročením nulovej rýchlosti sa stane záťaž motorická. Ďalší experiment je reverzácia naprázdno.



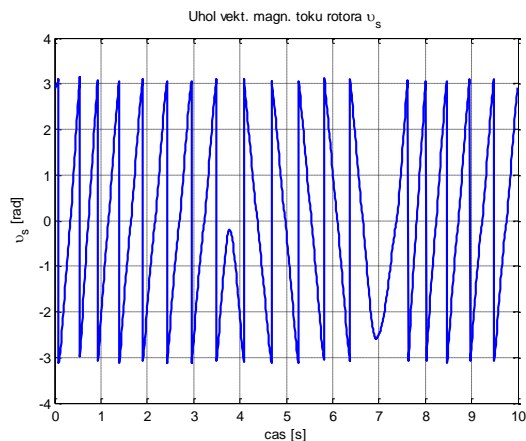
Obr. 3.19 Časový priebeh - pozorovaná a meraná rýchlosť pri pomalom reverzovaní plným momentom, záťaž typu „umelý zotrvačník“



Obr. 3.20 Časový priebeh uhla vektora magnetického toku rotora pri pomalom reverzovaní, záťaž typu „umelý zotrvačník“



Obr. 3.21 Časový priebeh - pozorovaná a meraná rýchlosť pri rýchlom reverzovaní na malých rýchlostiach, stav bez externej záťaže



Obr. 3.22 Časový priebeh uhla vektora magnetického toku rotora pri rýchlom reverzovaní na malých rýchlostiach, stav bez externej záťaže

MRAS CC patrí napriek zjavnej inšpirácii Luenbergerovým pozorovateľom medzi inovatívne prístupy k bezsnímačovému riadeniu. Jeho hlavná výhoda je vo veľkej robustnosti, relatívne nízkej citlivosti na zmenu parametrov, v jednoduchosti realizácie a nízkemu potrebnému výpočtovému výkonu. Hlavnou nevýhodou je ale veľká oblasť nestability v generátorickom chode, ktorá sa ale dá navrhnutými metódami potlačiť. Pre tento experiment bola použitá stabilizácia metódou rotácie odchýlkového vektora.

### 3.4 Optimálna hodnota magnetického toku rotora

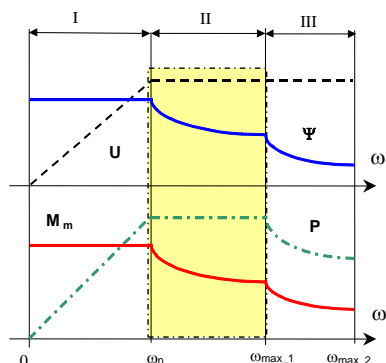
Možný rozsah rýchlostí servopohonu je možné rozdeliť na 3 oblasti. Prvá oblasť je od nulovej rýchlosti po nominálnu rýchlosť. V tejto oblasti výkon lineárne rastie a moment zostáva konštantný. Druhá oblasť začína nasýtením napätia, čím je pre zvyšovanie rýchlosti nutné znižovať magnetický tok, čo sa prejavuje konštantným výkonom. Tretia oblasť je oblasť znižovania výkonu. Hranica nasýtenia prúdu je tu navyše znižovaná.

Rozdelenie oblasti rýchlostného servopohonu<sup>[2]</sup>:

I.  $\psi = \text{konšt}$ , ( $M_m = \text{konšt}$ )

II.  $P = \text{konšt}$ , ( $U = \text{konšt}$ )

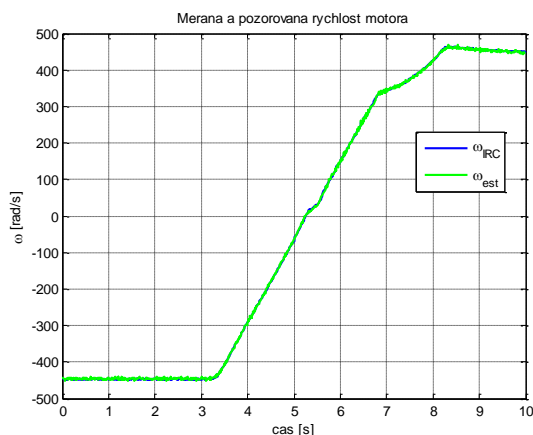
III.  $P < P_n$ , ( $U = \text{konšt}$ ,  $\psi < \psi_n$ )



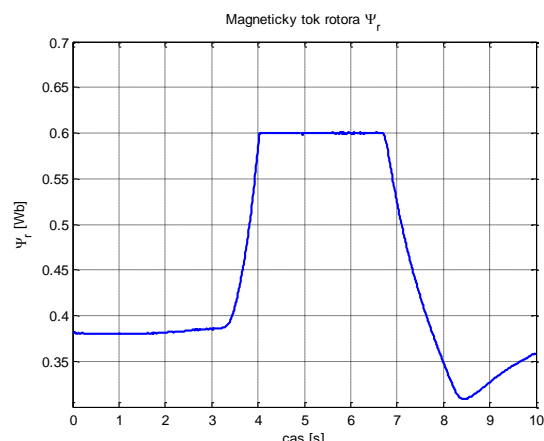
Obr. 3.23 Regulačný rozsah rýchlostného servopohonu

### 3.4.1 Režim odbudzovania (field-weakening)

V mnohých aplikáciách ako napríklad servopohony, trakčné pohony, pohony vretien a iné je často požiadavka na vysoké rýchlosti, často až niekoľkonásobne nad nominálne otáčky. V prípade servopohonu s vektorovým riadením asynchrónneho motoru je to dosiahnuté znižovaním toku (field-weakening). Keďže dostupné napätie pre motor je obmedzené DC napätím na medziobvode, moment je tu obmedzený. Preto je potrebné optimálne využitie dostupného napätia na dosiahnutie maximálneho možného momentu pod obmedzením napätia.



Obr. 3.24 Časový priebeh rýchlosti počas rýchlej reverzácie z -70Hz na +70Hz, pre bezsnímačový systém v stave bez záťaže

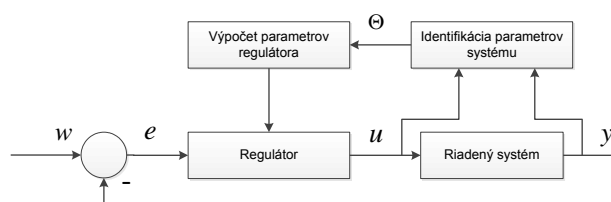


Obr. 3.25 Časový priebeh magn. toku rotora počas rýchlej reverzácie z -70Hz na +70Hz, pre bezsnímačový systém v stave bez záťaže

Uvedené časové priebehy demonštrujú kvalitu regulácie pri rýchlom reverzovaní z -70Hz na +70Hz. Tok je znižovaný približne proporcionálne k zvyšujúcej sa rýchlosti. Mierne odklonenie sa od rampy rýchlosti v časoch 6.8 až 8.3 s je spôsobené nasýtením napätia. Pre uvedený experiment by dynamika regulátora maximálneho napätia mohla byť vyššia.

## 4 Identifikácia parametrov motora a samonastaviteľnosť

Takmer všetky opisované metódy pracujú so známymi parametrami motora. V praxi takmer vždy ale parametre nepoznáme a preto je ich potrebné identifikovať. Známe sú štítkové údaje motora: jeho výkon, nominálne napätie, prúd, otáčky a účinnosť v danom zapojení (trojuholník, hviezda). Tieto údaje sa dajú použiť na počiatočný odhad parametrov. Tento odhad, vychádzajúci z matematického modelu motora pre ustálené stavy, slúži len na prednastavenie ochrán, resp. na parametrizáciu ďalšej identifikácie, najčastejšie tzv. off-line identifikáciu. Off-line identifikácia je identifikácia parametrov mimo normálnej prevádzky, je vhodná najmä na počiatočnú identifikáciu parametrov. On-line identifikácia je identifikácia parametrov (resp. ich priebežné doladovanie) počas normálnej prevádzky zariadenia.



Obr. 4.1 Zjednodušená schéma on-line identifikácie<sup>[2]</sup>

Okrem identifikácie parametrov by mal byť inteligentný menič aj samonastavujúci. To znamená že hneď po prvotnej identifikácii by mal nastaviť prednastavené hodnoty regulátorov, pozorovateľov a podobne, aby bolo zariadenie ihneď vhodné pre prevádzku. Samozrejmom je možnosť ešte manuálne doladiť niektoré parametre.

Ak berieme do úvahy 5 základných parametrov:  $R_s, R_r, L_r, L_s, L_m$

Poznáme že:

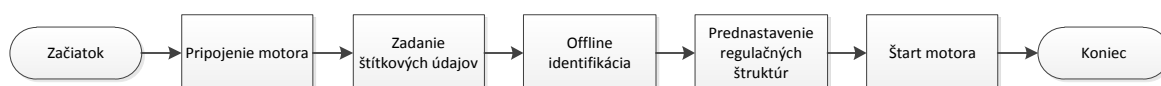
$$L_m = L_{s\sigma} + L_m, \quad L_r = L_{r\sigma} + L_m \quad (4.1)$$

Pre zjednodušenie budeme uvažovať že statorová a rotorová indukčnosť sú zhodné:

$$L_r = L_s \quad (4.2)$$

Potom sa nám model zjednoduší na 4 parametre. Toto zjednodušenie je výhodné z dôvodu že je možné dokázať, že rovnaké správanie statorového obvodu vieme docieľiť rôznymi nastaveniami 5-tich uvedených parametrov<sup>[54]</sup>. Pri 4-och parametroch je model AM jednoznačne určený.

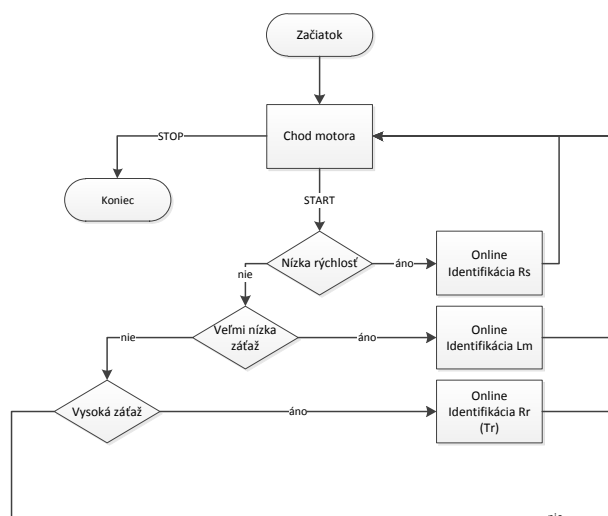
Na Obr. 4.2 vidíme postup pri samonastavení meniča. Po pripojení a zadaní štítkových údajov prebehne off-line identifikácia, podľa identifikovaných hodnôt sa prednastavia regulačné štruktúry. Po tomto nastavení je možné uviesť pohon do prevádzky (povel Štart).



Obr. 4.2 Základný postup pri samonastavení meniča

Off-line identifikácia poskytuje celkom dobré počiatkové nastavenie, za behu je ale často vhodné pohon doladiť. Dynamiky a podporné funkcie je vhodné nastaviť manuálne, parametre motora (závislé od teploty, či magn. toku) by sa mali doladovať automaticky pomocou on-line identifikácie.

On-line identifikácia predstavuje matematické alebo stochastické metódy na výpočet parametrov sústavy. Väčšinou sa jedná buď o matematické metódy, napr. rekurzívna metóda najmenších štvorcov a jej rôzne modifikácie, neurónové siete, uzavreté pozorovatele, napr. Luenbergerov pozorovateľ, Kalmanov filter a iné.



Obr. 4.3 Zjednodušený diagram on-line identifikácie pohonu

Na Obr. 4.3 preto môžeme vidieť algoritmus on-line identifikácie. Každý test prebieha za iných podmienok, aby sa súčasne bežiacie identifikácie navzájom ovplyvňovali len minimálne alebo vôbec. Identifikáciu rozptylovej indukčnosti je teoreticky možné vykonať kedykoľvek, pre potlačenie poruchových vplyvov je ju najlepšie vykonávať pri nízkej (až nulovej) frekvencii a malej záťaži. Odpor statora sa najviac prejavuje pri nízkych rýchlostiach (0 až jednotky Hz), preto ho v tejto oblasti doladujeme. Vzájomnú indukčnosť získavame z napäťového modelu toku, preto je vhodné ju doladovať pre rýchlosti od niekoľkých Hz vyššie, najlepšie pre stavy bez záťaže. Odpor rotora resp. prevrátená hodnota časovej konštanty rotora sa pre zmenu prejavuje pri výpočte sklzu, preto ho identifikujeme pri veľkej záťaži.

## 4.1 Samonastavovanie parametrov regulátorov

Aby sme pohon mohli nazvať „samonastavovacím“, musí vedieť nielen identifikovať parametre, ale musí vedieť aj správne nastaviť regulátory. Napriek súčasnej veľkej popularite samonastavovacích (self-tuning) regulátorov, kde sa regulátor adaptuje na neznámy proces často dynamiky neznámeho rádu s neznámym časovým oneskorením, prenosové funkcie jednotlivých linearizovaných častí motora poznáme. S týmito znalosťami môžeme štruktúru regulátorov určiť dopredu a vypočítať zložky regulátora napr. metódou pole-placement. Jedná sa predovšetkým o dynamiku regulátora prúdu, magn. toku, rýchlosti a veľmi dôležitú dynamiku adaptácie modelu rýchlosti. Ak navrhujeme regulátory už spomenutou metódou pole-placement a parametre motora(sústavy) už poznáme, jedinými voliteľnými parametrami sú tlmenie  $\xi$  a pásmo priepustnosti uzavretého obvodu  $\omega_0$ . Tieto je ale možné voliť empiricky, resp. predprogramovať želané dynamiky v závislosti od veľkosti (výkonu motora), požadovanej dynamiky či periódy vzorkovania.

## 4.2 Off-line identifikácia

Prvotná identifikácia parametrov je veľmi dôležitá. Napriek tomu že existujú rôzne overené identifikačné metódy, napr. test nakrátko a naprázdno, nie vždy sa dajú realizovať.

Standstill metóda vychádza z matematického modelu motora pre nulovú rýchlosť.

Pri tejto metóde je ale potrebné dávať pozor na nasledujúce aspekty:

- nasýtenie indukčností:  $L_m = f(\psi_m)$
- uvažovanie či neuvažovanie strát v železe
- nemodelované dynamiky - menič
- presnosť vyhodnotenia napätia: napätie  $U_{DC}$ , mŕtve doby, úbytok na spínacích prvkoch

## 4.3 On-line identifikácia odporu statora $R_s$

Odpor statora  $R_s$  je nepochybne kľúčový parameter pre bezsnímačové riadenie v oblasti nízkych rýchlostí, a tým pádom nevyhnutný parameter pre bezproblémový štart motora. Problematika jeho estimácie je spomínaná v každej kvalitnej práci zaoberajúcou sa problematikou bezsnímačového riadenia.



### 4.3.1 Identifikácia odporu statora pre estimátor statorového prúdu

Tento estimátor sa využíva v pozorovateli stavov už spomínaných typov: Luenbergerov pozorovateľ, Gopinathov pozorovateľ, MRAS s modelom statorového prúdu (MRAS CC).

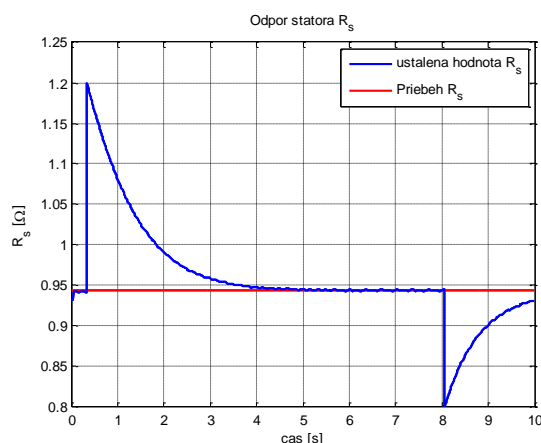
Kubota definuje pomocou Ljapunovho kritéria dve adaptačné schémy pre identifikáciu<sup>[59][60]</sup>  $R_s$  a  $T_r$  ( $R_r$ ). Identifikácii  $T_r$  sa budeme venovať v nasledujúcej kapitole.  $R_s$  identifikácia je tu definovaná ako:

$$\frac{d\tilde{R}_s}{dt} = -\lambda_1 (e_{is\alpha} \tilde{i}_{s\alpha} + e_{is\beta} \tilde{i}_{s\beta}) \quad (4.3)$$

Parametre  $R_s$  a  $R_r$  sú podľa Kubotu menené iba v motorickom režime, nie v režime generátorickom.

### 4.3.2 Praktická realizácia on-line identifikácie $R_s$

Nižšie uvádzané časové priebehy sú priebehy on-line identifikácie odporu statora počas skokového „rozladenia“ známej hodnoty. Použitý algoritmus je algoritmus publikovaný Kubotom pre Luenbergerov pozorovateľ, spolu s vyššie popísaným vlastným riešením stabilizácie identifikácie  $R_s$  v generátorickom režime chodu.



Obr. 4.4 Časový priebeh - Konvergencia identifikácie  $R_s$  pri ručnom „rozladení“ parametra v časoch 0.3s a 8.0s.

## 4.4 On-line identifikácia odporu rotora $R_r$

Odpor rotora vystupuje v modeli ako súčasť časovej konštanty rotora, ktorá je nevyhnutná pre správne počítanie magnetického toku rotora, ale hlavne slúži na výpočet sklzu. Jej správna hodnota je nevyhnutná pre fungovanie snímačových aj bezsnímačových systémov. V rôznych prácach sa väčšinou nevyskytuje samostatne, ale identifikuje sa priamo časová konštanta rotora  $T_r$ . Jej vplyv na kvalitu riadenia je významný a známy.

Väčšina riešení je navrhnutá len pre snímačové systémy. Pri bezsnímačových systémoch je to problém, pretože v ustálenom stave v synchronnom súradnicovom systéme sú prúdy rotora dané nasledovne:

$$i_{r1} = 0 \quad i_{r2} = -\frac{\omega_{sl}}{R_r} \psi_{r1} \quad (4.4)$$

Preto môžeme v ustálenom stave získať iba pomer medzi sklzovou rýchlosťou a odporom rotora.

Vo všeobecnosti identifikačné metódy  $R_r$ , resp.  $T_r$  môžeme rozdeliť do niekoľkých kategórií:

- Priamy výpočet  $T_r$
- MRAS metóda (MRAS s modelom reakčného výkonu)
- Úprava adaptačného kritéria existujúcich systémov
- Adaptácia  $T_r$  pozorovateľa stavov AM (Luenberger, Kalman, iné)

#### 4.4.1 Praktická realizácia identifikácie odporu $R_r$

Napriek existencii riešení pre bezsnímačové systémy sa dá adaptácia  $R_r$  pre bezsnímačový systém stále považovať za problematickú, injektovanie signálov<sup>[60]</sup> nezanedbateľnej amplitúdy môže spôsobiť kmitanie pohonu, vyššie straty, vyšší akustický hluk a podobne, preto sa v priemysle tieto metódy prakticky nepoužívajú. Z toho dôvodu je výhodné použiť vzťah pre zachovanie konštantného pomeru<sup>[59]</sup>  $R_r/R_s$ .

### 4.5 On-line identifikácia vzájomnej indukčnosti $L_m$

Identifikácia vzájomnej indukčnosti a tým aj magnetizačnej charakteristiky motora patrí medzi najdôležitejšie časti pohonu pracujúceho vo veľkom rozsahu otáčok, od rýchlosti takmer nulovej po rýchlosť vysoko v odbudzovaní. Táto práca uvažuje zmenu  $L_m$  od zmeny magnetizačného magnetického toku v oblasti odbudzovania. Tento model vychádza z napäťového modelu magnetizačného toku  $\hat{\psi}_m$ :

$$\hat{\psi}_m^{(u)} = \frac{1}{s}(\hat{u}_s - R_s \hat{i}_s) - L_{s\sigma} \hat{i}_s \quad (4.5)$$

Definujeme magnetizačný prúd ako:

$$i_{m\alpha} = i_{s\alpha} + i_{r\alpha} \quad i_{m\beta} = i_{s\beta} + i_{r\beta} \quad (4.6)$$

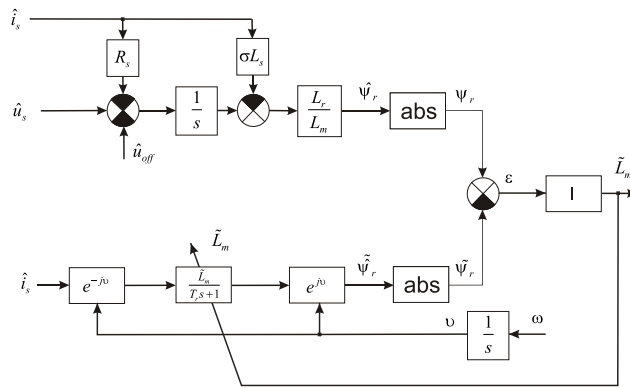
#### 4.5.1 Vlastné riešenia on-line identifikácie $L_m$

Najjednoduchšia metóda je adaptovať  $L_m$  z rozdielu amplitúdy medzi napäťovým a prúdovým modelom toku.

$$\hat{\psi}_r^{(u)} = \frac{L_r}{L_m} \left[ \frac{1}{s}(\hat{u}_s - R_s \hat{i}_s) - \sigma L_s \hat{i}_s \right] \quad (4.7)$$

$$\hat{\psi}_r^{(i)} = \frac{1}{s} \left[ \left( -\frac{1}{T_r} + j\omega \right) \hat{\psi}_r^{(i)} + \frac{\tilde{L}_m}{T_r} \hat{i}_s \right] \quad (4.8)$$

$$\frac{d}{dt} \tilde{L}_m = \varepsilon = \left| \hat{\psi}_r^{(u)} \right| - \left| \hat{\psi}_r^{(i)} \right| \quad (4.9)$$



Obr. 4.5 Schéma uvedeného MRAS algoritmu identifikácie  $L_m$

V modeli adaptujeme priebežne časovú konštantu rotora  $T_r$  ako:

$$T_r = \frac{L_r}{R_r} = \frac{\tilde{L}_m + L_{r\sigma}}{R_r} \quad (4.10)$$

Napriek tomu malé odchýlky v časovej konštante rotora  $T_r$  (napr. spôsobené tepelným driftom odporu rotora  $R_r$ ) nám pri vyššej záťaži spôsobia výraznejšiu chybu estimácie  $L_m$ , pri väčších odchýlkach môže táto estimácia dokonca divergovať, čím sa stane systém nestabilným. Identifikácia je teda vykonávaná len v stave bez záťaže.

Aj preto je omnoho vhodnejšie identifikovať  $L_m$  čisto z napäťového modelu toku:

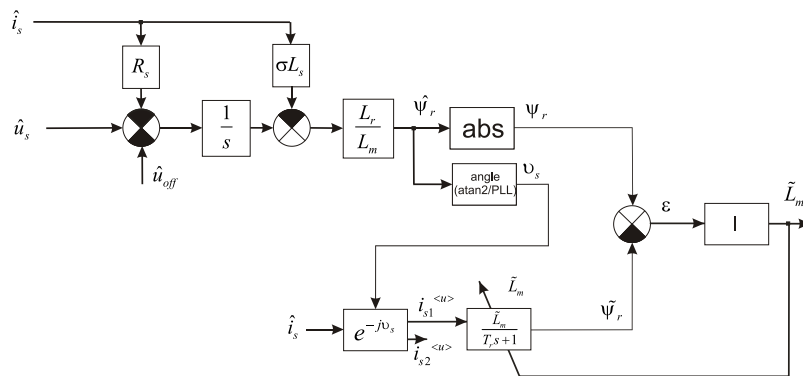
$$v_s^{(u)} = \angle \hat{\psi}_r^{(u)} \quad (4.11)$$

Estimovanú hodnotu z prúdu počítame ako:

$$\hat{\psi}_r^{(u)} = \frac{\tilde{L}_m}{T_r s + 1} i_{s1}^{(u)} \quad (4.12)$$

A následne kritérium pre doladenie  $L_m$ :

$$\frac{d}{dt} \tilde{L}_m = \left| \hat{\psi}_r^{(u)} \right| - \left| \hat{\psi}_r^{(i)} \right| \quad (4.13)$$



Obr. 4.6 Schéma vylepšeného MRAS algoritmu identifikácie  $L_m$

Tento systém by mal byť presnejší a tiež je teoreticky možné adaptovať  $L_m$  v každom pracovnom bode, nezávisle od toku a záťaže (s výnimkou nižších frekvencií, kde má napäťový model známe problémy). V jeho neprospech hovorí najmä zvýšená citlivosť na rozptylovú indukčnosť  $\sigma L_s$ , ktorá je hlavným zdrojom fázovej chyby, preto je použitie tohto modelu doporučované taktiež v stave bez záťaže.

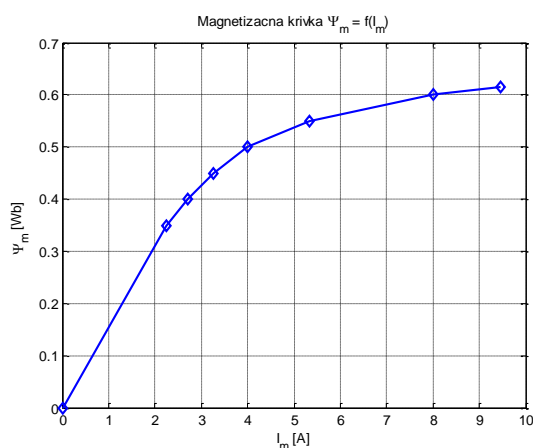
## 4.5.2 Praktická realizácia – namerané priebehy on-line identifikácie $L_m$

Je známe, že vzájomná indukčnosť  $L_m$  je predovšetkým závislá od magnetizačného toku  $\Psi_m$ . Dá sa ukázať, že identifikovaná hodnota je pri rôznych frekvenciách napriek rovnakému prúdu mierne rozdielna.

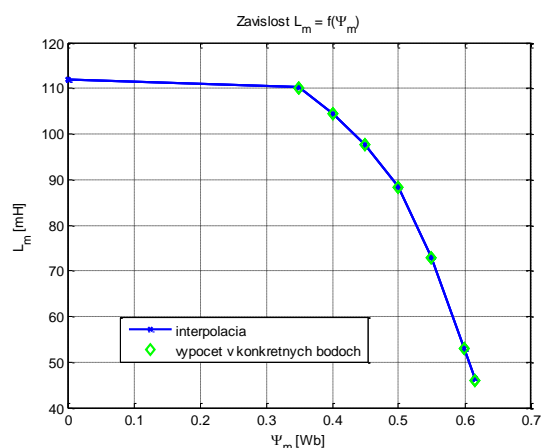
V praxi je pre vysokokvalitné riadenie výhodné riešiť hodnotu  $L_m$  definovaním tzv. magnetizačnej krivky motora. Je to najčastejšie definované ako závislosť:

$$\Psi_m = f(I_m) \quad (4.14)$$

Magnetizačný tok vyhodnocujeme naprázdno, zo vzťahu (4.5), závislosť meranú v pre rôzne hodnoty želaného toku vyvedieme do grafu a dostávame nižšie uvedenú magnetizačnú krivku (viď Obr. 4.7). Z tejto krivky vieme jednoducho vypočítať hodnotu vzájomnej indukčnosti. Vypočítané hodnoty vzájomnej indukčnosti v konkrétnych bodoch merania (zelená) a interpolované hodnoty (modrá) medzi nimi sú znázornené na obrázku Obr. 4.8.



Obr. 4.7 Závislosť magnetizačného toku od magnetizačného prúdu



Obr. 4.8 Výpočet vzájomnej indukčnosti z magnetizačnej charakteristiky pre rozdielne hodnoty magnetizačného toku

## 4.6 On-line identifikácia rozptylovej indukčnosti $\sigma L_s$

Rozptylová indukčnosť patrí medzi jeden zo základných parametrov modelu. Je potrebná pre správne naladenie rýchlych regulátorov prúdu – určuje základnú „rýchlu“ dynamiku prúdu ako funkciu napätia. Zároveň jej relatívna presná hodnota je vyžadovaná v modeloch toku a modeloch prúdu, čím sa stáva hlavne pre bezsnímačové vektorové riadenie nevyhnutnou.

### 4.6.1 Identifikácia rozptylovej indukčnosti z injektovaných signálov

Autori Sul-Seok<sup>[123]</sup> injektujú vysoké frekvencie sínusového priebehu do želaného tokotvorného prúdu:

$$i_{s1}^{**} = i_{s1}^* + i_{s1+}^* \text{ kde } i_{s1+}^* = I_h \sin(\omega_h t) \quad (4.15)$$

Táto metóda bola inšpiráciou pre moju realizáciu. Algoritmy založené na tejto metóde sú jednoducho implementovateľné a použiteľné aj v praxi, napr. aj pre „standstill“ identifikáciu počas samonastavenia pohonu.

#### 4.6.2 Vlastné riešenie on-line identifikácie $\sigma L_s$

Indukčnosti statora a rotora vieme zapísať ako:

$$L_s = L_m + L_{s\sigma} \quad L_r = L_m + L_{r\sigma} \quad (4.16)$$

A uvažujeme že:  $L_{s\sigma} = L_{r\sigma}$

Chybu statorovej indukčnosti vieme vyjadriť ako:

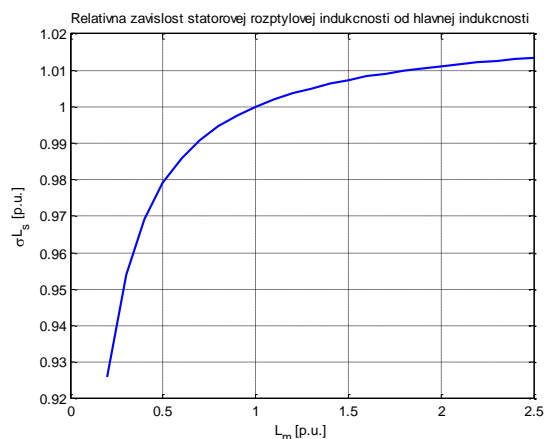
$$\Delta L_s = \Delta L_m + \Delta L_{s\sigma} \approx \Delta L_m \quad (4.17)$$

Chybu statorovej rozptylovej indukčnosti môžeme vyjadriť ako chybu vzájomnej indukčnosti  $L_m$ :

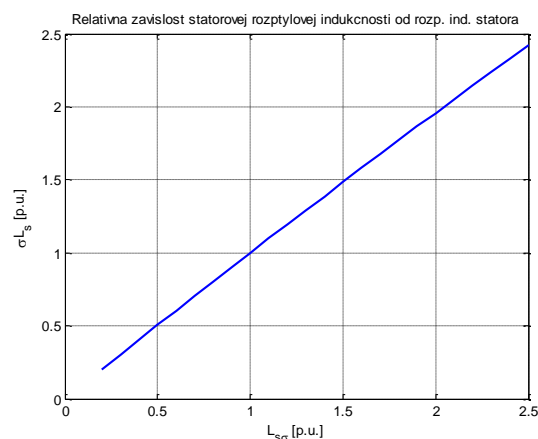
$$\Delta \sigma L_s = (\Delta L_m + L_{s\sigma}) - \frac{\Delta L_m^2}{(\Delta L_m + L_{s\sigma})} \quad (4.18)$$

alebo rozptylovej indukčnosti statora  $L_{s\sigma}$ :

$$\Delta \sigma L_s = (L_m + \Delta L_{s\sigma}) - \frac{L_m^2}{(L_m + \Delta L_{s\sigma})} \quad (4.19)$$



Obr. 4.9 Závislosť presnosti výpočtu  $\sigma L_s$  od presnosti vzájomnej indukčnosti  $L_m$



Obr. 4.10 Závislosť presnosti výpočtu  $\sigma L_s$  od presnosti rozptylovej indukčnosti statora  $L_{s\sigma}$

Z uvedených obrázkov je zrejmé, že zmena magnetizačnej indukčnosti  $L_m$  má len minimálny vplyv na statorovú rozptylovú indukčnosť. Hlavný vplyv má zmena rozptylovej indukčnosti statora, čím môžeme uvedenú závislosť zjednodušiť:

$$\sigma L_s = f(L_{s\sigma}) \quad (4.20)$$

Z toho dôvodu budeme aj identifikovaný parameter interpretovať ako zmenu  $L_{s\sigma}$ .

Metóda identifikácie využíva injektovanie vysokofrekvenčných signálov do prúdu. Jej podstata vychádza taktiež z modelu statorového prúdu. Uvažujeme zmenu tokotvorného prúdu vybraný pracovný bod môžeme zmenu prúdu linearizovať:

$$\Delta i_{s1} = \frac{I}{R_l (1 + T_l s)} (\Delta u_{s1} + \Delta u_{2err}) \quad (4.21)$$

Kde príspevok od momentotvorného prúdu a toku ( $\Delta u_{2err}$ ) uvažujeme ako nulový:

$$\Delta u_{2err} = \frac{k_r}{T_r} \Delta \psi_{r1} + \Delta \omega_s \sigma L_s i_{s2} = 0 \quad (4.22)$$

Tým dostaneme linearizovaný model motora prúdu od napätia, čo je systém prvého rádu:

$$\Delta i_{s1} = \frac{1}{R_l(1+T_l s)} \Delta u_{s1} \quad (4.23)$$

Uvažujme zmenu derivácie prúdu od zmeny napätia:

$$\frac{d}{dt} \Delta i_{s1} = \frac{s}{R_l(1+T_l s)} \Delta u_{s1} \quad (4.24)$$

Ak zanedbáme odpor  $R_l = 0$ , dostaneme nasledovný vzťah:

$$\frac{d}{dt} \Delta i_{s1} = \frac{1}{\sigma L_s} \Delta u_{s1} \quad (4.25)$$

Identifikujeme teda z náhradnej rovnice:

$$\Delta \tilde{i}_s = \frac{1}{\sigma L_s} \left( \frac{T_{vz}}{1-z^{-1}} \right) \Delta \hat{u}_s \quad (4.26)$$

$$\frac{\Delta i_s(k) - \Delta i_s(k-1)}{T_{vz} \Delta u_s(k)} = \frac{1}{\sigma L_s} \quad (4.27)$$

Pre výpočet môžeme s výhodou použiť rekurzívnu metódu najmenších štvorcov s exponenciálnym zabúdaním<sup>[122]</sup>.

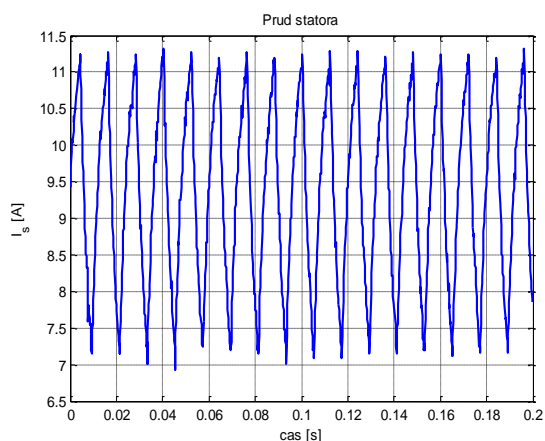
Funkciu teda môžeme zapísať ako:

$$\Theta(1) + (\Delta i_s(k) - \Delta i_s(k-1)) \Theta(2) = \Delta u_s(k) \quad (4.28)$$

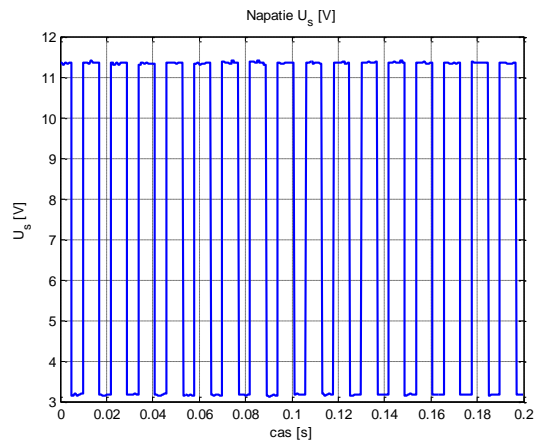
Kde:

$\Theta(1)$  je identifikovaný offset

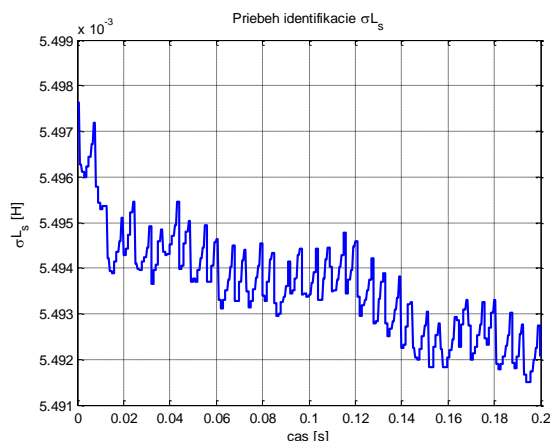
$$\Theta(2) = \frac{\sigma L_s}{T_{vz}} \quad (4.29)$$



Obr. 4.11 Časový priebeh satorového prúdu



Obr. 4.12 Časový priebeh satorového napätia

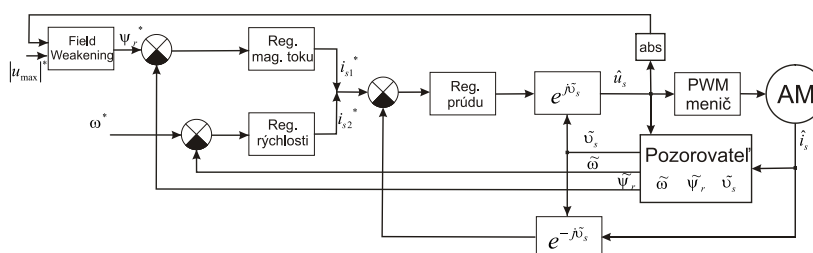


Obr. 4.13 Časový priebeh identifikovanej rozptylovej indukčnosti

Uvedené riešenie on-line identifikácie je veľmi jednoduché, a preto ľahko implementovateľné.

## 5 Experimentálne výsledky bezsnímačového rýchlostného servopohonu s AM

Nasledujúce experimenty potvrdzujú správnosť a praktickú použiteľnosť pohonu po samonastavení meniča. Základná použitá štruktúra je zobrazená na Obr. 5.1. Uvedené experimenty sú prezentované po vykonaní off-line identifikácii a prvotnom prednastavení regulačných štruktúr.

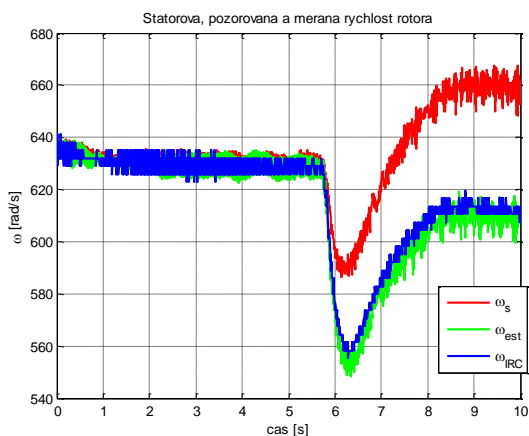


Obr. 5.1 Zjednodušená schéma použitého bezsnímačového vektorového riadenia

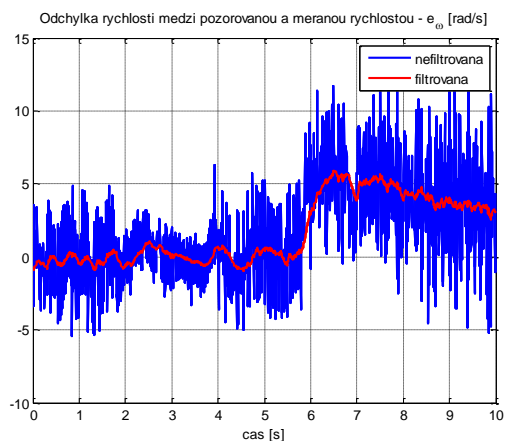
Nominálny výkon  $P_n = 3\text{kW}$   
 Nominálne napätie  $U_n = 230\text{V}$   
 Nominálny prúd  $I_n = 11,1\text{A}$   
 Nominálne otáčky  $n_n = 1420\text{ ot/min}$   
 Nominálny účinník  $\cos(\varphi) = 0,82$

### 5.1 Pohon pri vysokých rýchlostiach (100 Hz)

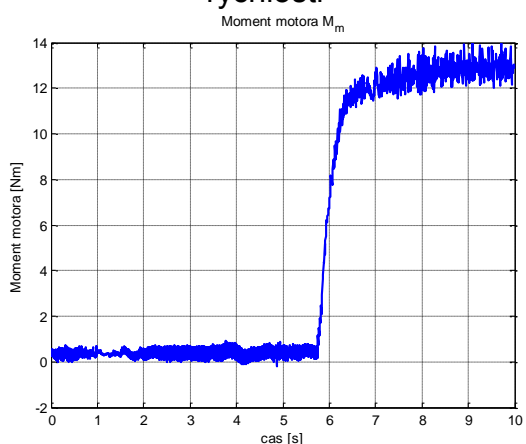
Pri tomto experimente bol motor roztočený na 100Hz rotorovej rýchlosti v elektrickej miere. V čase približne 5.7s bola spustená záťaž (viď Obr. 5.4), príliš vysoká pre danú rýchlosť. Z toho dôvodu motor pôvodnú rýchlosť už nedosiahol, ostal v prúdovom nasýtení. Odchýlka medzi pozorovanou a meranou rýchlosťou je vzhľadom na vysoký sklz minimálna, súvisí s nepresne odhadnutou hodnotou  $T_r$ , či už zapríčinenou odchýlkou  $L_m$  alebo  $R_r$ . Uvedená rýchlosť je v radiánoch za sekundu v elektrickej miere.



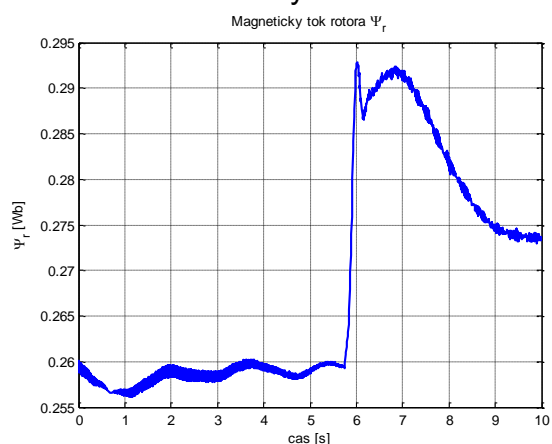
Obr. 5.2 Časový priebeh statorovej, pozorovanej a meranej rotorovej rýchlosti



Obr. 5.3 Časový priebeh odchýlky medzi pozorovanou a meranou rotorovou rýchlosťou



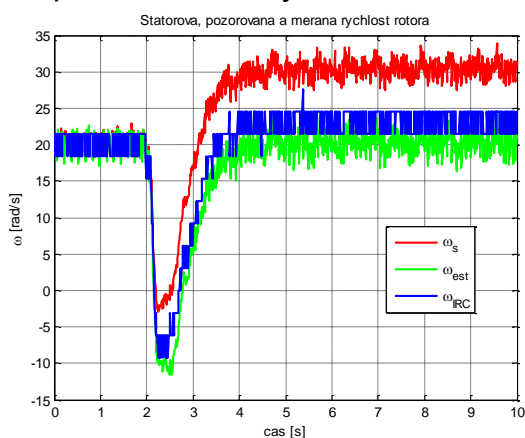
Obr. 5.4 Časový priebeh momentu motora



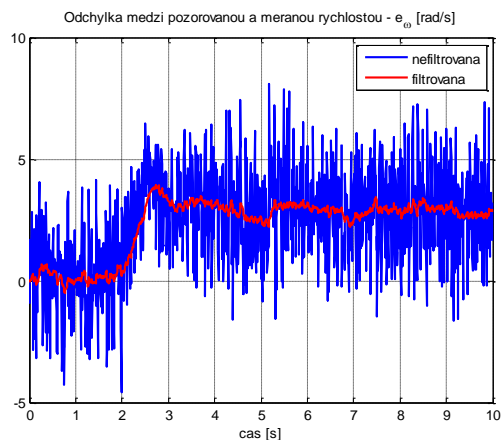
Obr. 5.5 Časový priebeh magnetického toku rotora

## 5.2 Pohon pri nízkych rýchlostiach a motorickej zát'azi

Pri tomto experimente je želaná rýchlosť cca 3.2Hz rotorovej rýchlosti v elektrickej miere. V čase približne 5.7s bola aplikovaná zát'až. Odchýlka medzi pozorovanou a meranou rýchlosťou je malá, súvisí opäť s nepresne odhadnutou hodnotou  $T_r$ , či už zapríčinenou odchýlkou  $L_m$  alebo  $R_r$ .

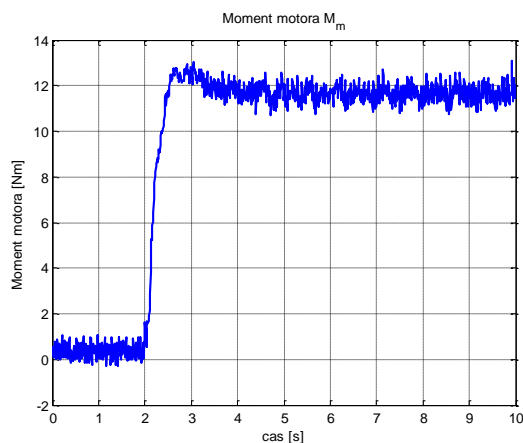


Obr. 5.6 Časový priebeh statorovej, pozorovanej a meranej rotorovej rýchlosti



Obr. 5.7 Časový priebeh odchýlky medzi pozorovanou a meranou rotorovou rýchlosťou

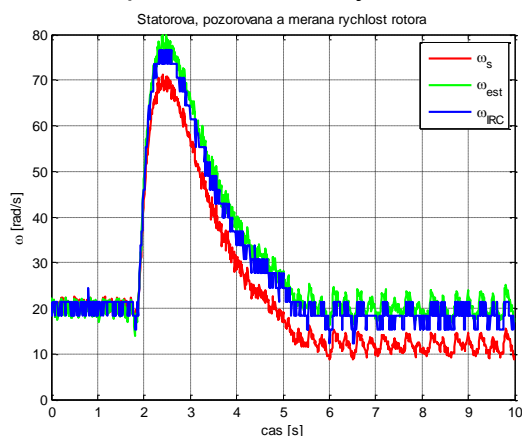




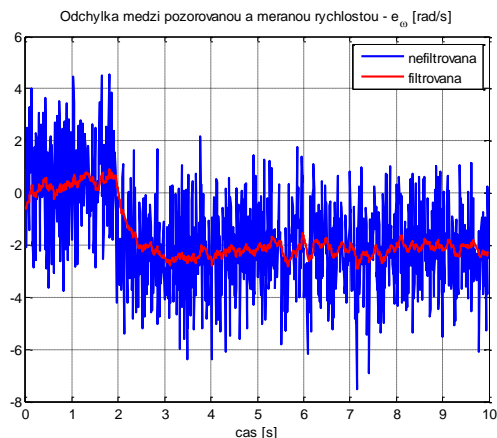
Obr. 5.8 Časový priebeh momentu motora

### 5.3 Pohon pri nízkych rýchlostiach a generátorickej záťaži

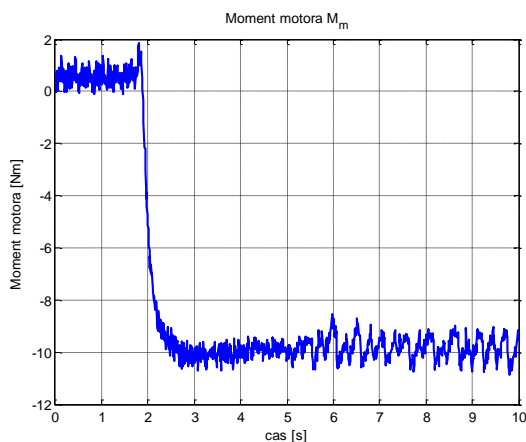
Pri tomto experimente je želaná rýchlosť cca 3.2Hz rotorovej rýchlosti v elektrickej miere. V čase približne 1.9s bola aplikovaná záťaž. Odchýlka medzi pozorovanou a meranou rýchlosťou je malá, súvisí opäť s nepresne identifikovanou hodnotou  $T_r$ , či už zapríčinenou odchýlkou  $L_m$  alebo  $R_r$ .



Obr. 5.9 Časový priebeh statorovej, pozorovanej a meranej rotorovej rýchlosti



Obr. 5.10 Časový priebeh odchylny medzi pozorovanou a meranou rotorovou rýchlosťou



Obr. 5.11 Časový priebeh momentu motora

Odchýlky medzi meranou a pozorovanou rýchlosťou sú malé (do 20% nominálnej sklzovej rýchlosti), to znamená že celková kvalita riadenia je porovnateľná so snímačovým systémom vektorového riadenia.

## 6 Záver

Dizertačná práca je zameraná na návrh a overenie pokročilých metód automatického riadenia využívajúcich princípy adaptácie a samonastavovania na základe priebežnej identifikácie parametrov riadených subsystémov.

Hlavný cieľ dizertačnej práce bol zameraný na návrh nových postupov pre samonastavenie parametrov frekvenčného meniča pre bezsnímačové vektorové riadenie a samodolaďovacie bezsnímačové vektorové riadenie. Uvedený cieľ pozostával zo spracovania teoretickej časti dizertačnej práce, ktorá tkvie tak v návrhu moderných metód identifikácie, ako aj v návrhu samonastavujúceho sa bezsnímačového vektorového riadenia využívajúceho výsledky priebežnej identifikácie. Teoretické poznatky návrhu algoritmov samonastavovateľných regulátorov boli efektívne pretransformované do praktických algoritmov v C-kóde a sú dnes prakticky využiteľné v širokom regulačnom rozsahu rýchlosti a úspešne sa používajú v praxi vo frekvenčnom meniči VONSCH® UNIFREM 400 ako súčasť základného firmvéru od verzie 2.020.

Metódy samonastavovania boli spracované na základe súčasnej modernej teórie riadenia a pre vybranú aplikáciu pre asynchrónne pohony boli pôvodné algoritmy rozšírené a implementované vo forme riadiacich algoritmov do meniča. Uvedenú implementáciu možno považovať spolu s aplikáciou do banských lokomotív za praktický prínos uvedených algoritmov a ich využitie v praxi. Na základe navrhovaných metód vektorového riadenia, vykonanej analýzy a získaných experimentálnych výsledkov je možné konštatovať vysokú kvalitu a efektívnosť navrhovaných metód a algoritmov pre riadenie asynchrónnych motorov.

Prínosy práce:

- Teoretická oblasť predstavuje rozšírenie a modifikáciu metód identifikácie samonastavujúcich sa regulátorov a Luenbergovho pozorovateľa pre štruktúry MRAS dokázaním asymptotickej stability a kvality riadenia na základe generovania Ljapunovej funkcie špeciálneho typu. Vedecký prínos je v práci dosiahnutý najmä v oblasti vylepšenia metód identifikácie statorovej rozptylovej indukčnosti  $\sigma L_s$  a vzájomnej indukčnosti  $L_m$ , vrátane tvorby a interpretácie magnetizačnej krivky motora. Z pohľadu riadenia ide tu predovšetkým o návrh novej metódy stabilizácie pomocou úpravy adaptačného zákona, tak pre Luenbergerov pozorovateľ, ako aj pre MRAS CC.
- Praktická oblasť predstavuje vytvorenie všeobecného algoritmu samonastavovania, zloženého zo samostatných modulov pre identifikáciu a riadenie. Vytvorený algoritmus v jazyku C je všeobecný a rozšíriteľný aj pre iné typy aplikácií. Implementácia a úspešne overenie algoritmov bolo realizované na frekvenčnom meniči VONSCH® UNIFREM 400.

## **Splnenie cieľov dizertačnej práce**

- 1. Návrh a realizácia bezsnímačového vektorového riadenia vhodného pre veľmi široký rozsah rýchlosti, od rýchlosti takmer nulovej po rýchlosť hlboko v oblasti odbudzovania**

V dizertačnej práci boli navrhnuté a realizované tri rôzne metódy bezsnímačového riadenia (Luenbergerov pozorovateľ, MRAS F a MRAS CC). Pre oblasť nízkych rýchlostí sú vhodné predovšetkým Luenbergerov pozorovateľ a MRAS CC. MRAS F obsahujúca napäťový model toku je na spoľahlivú prevádzku na nízkych rýchlostiach nepoužiteľná. Kvalita riadenia všetkých realizovaných metód na vysokých rýchlostiach je veľmi dobrá, kvalitatívne sú navzájom takmer totožné. Navrhnutý spôsob odbudzovania je použiteľný pre všetky realizované metódy.

- 2. Návrh a realizácia samonastavovacích a identifikačných metód parametrov motora pre bezsnímačové vektorové riadenie. Jediné možné počiatkové informácie budú štítkové údaje motora.**

Práca obsahuje návrh postupov a metód výpočtu odhadu parametrov motora podľa štítkových údajov, venuje sa aj problematike off-line identifikácie a samonastavenia regulačných štruktúr (napriek tomu že ich podrobne nepopisuje, keďže ide o obchodné tajomstvo firmy VONSCH s.r.o.). Tieto metódy ale poskytujú dostatočný základ pre počiatkové nastavenia a bezproblémové uvedenie bezsnímačového vektorového riadenia AM do prevádzky.

## Literatúra

- [1] Žalman M.: Akčné členy, STU Bratislava 2003
- [2] Milan Žalman – prednášky k predmetu Inteligentné Servosystémy, 2007/2008.  
[http://servo.urpi.fe.i.stuba.sk/index.php?option=com\\_content&task=view&id=15&Itemid=26](http://servo.urpi.fe.i.stuba.sk/index.php?option=com_content&task=view&id=15&Itemid=26)
- [3] Doki, S.; Kinpara, Y.; Okuma, S.; Sangwongwanich, S., "Unified interpretation of indirect and direct vector control [of electric machines]," Power Conversion Conference, 1993. Yokohama 1993., Conference Record of the , vol., no., pp.297-302, 19-21 Apr 1993  
URL: <http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?arnumber=264167&isnumber=6639>
- [4] Electric motor. (2009, May 11). In Wikipedia, The Free Encyclopedia. Retrieved 21:50, May 11, 2009, from [http://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Electric\\_motor&oldid=289221843](http://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Electric_motor&oldid=289221843)
- [5] N. Tesla, "Electric motor" U.S. Patent 00416194, Dec. 3, 1889.
- [6] Marwali, M.N.; Keyhani, A.; Tjanaka, W., "Implementation of indirect vector control on an integrated digital signal processor-based system," Energy conversion, iee transactions on , vol.14, no.2, pp.139-146, Jun 1999  
URL: <http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?arnumber=766961&isnumber=16622>
- [7] Finch, J.W.; Giaouris, D., "Controlled AC Electrical Drives," Industrial Electronics, IEEE Transactions on , vol.55, no.2, pp.481-491, Feb. 2008  
URL: <http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?arnumber=4401131&isnumber=4444586>
- [8] Schauder, C., "Adaptive speed identification for vector control of induction motors without rotational transducers," Industry Applications, IEEE Transactions on , vol.28, no.5, pp.1054-1061, Sep/Oct 1992  
URL: <http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?arnumber=158829&isnumber=4088>
- [9] Holtz, J.; Juntao Quan, "Drift- and parameter-compensated flux estimator for persistent zero-stator-frequency operation of sensorless-controlled induction motors," Industry Applications, IEEE Transactions on , vol.39, no.4, pp. 1052-1060, July-Aug. 2003  
URL: <http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?arnumber=1215437&isnumber=27337>
- [10] Jun Hu; Bin Wu, "New integration algorithms for estimating motor flux over a wide speed range," Power Electronics, IEEE Transactions on , vol.13, no.5, pp.969-977, Sep 1998  
URL: <http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?arnumber=712323&isnumber=15436>
- [11] Holtz, J., "Sensorless control of induction motor drives," Proceedings of the IEEE , vol.90, no.8, pp. 1359-1394, Aug 2002  
URL: <http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?arnumber=1037566&isnumber=22249>
- [12] Holtz, J.; Juntao Quan, "Sensorless vector control of induction motors at very low speed using a non-linear inverter model and parameter identification," Industry Applications, IEEE Transactions on , vol.38, no.4, pp. 1087-1095, Jul/Aug 2002  
URL: <http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?arnumber=1019966&isnumber=21939>
- [13] Holtz, J., "Sensorless position control of induction motors-an emerging technology," Industrial Electronics, IEEE Transactions on , vol.45, no.6, pp.840-851, Dec 1998  
URL: <http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?arnumber=735327&isnumber=15828>
- [14] Cirrincione, M.; Pucci, M.; Cirrincione, G.; Capolino, G.-A., "A new TLS-based MRAS speed estimation with adaptive integration for high-performance induction machine drives," Industry Applications, IEEE Transactions on , vol.40, no.4, pp. 1116-1137, July-Aug. 2004  
URL: <http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?arnumber=1315805&isnumber=29161>
- [15] Ohyama, K.; Asher, G.M.; Sumner, M., "Comparative analysis of experimental performance and stability of sensorless induction motor drives," Industrial Electronics, IEEE Transactions on , vol.53, no.1, pp. 178-186, Feb. 2006  
URL: <http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?arnumber=1589377&isnumber=33495>

- [16] Dybkowski, M.; Orłowska-Kowalska, T., "Application of the stator current-based MRAS speed estimator in the sensorless induction motor drive," Power Electronics and Motion Control Conference, 2008. EPE-PEMC 2008. 13th , vol., no., pp.2306-2311, 1-3 Sept. 2008  
URL: <http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?arnumber=4635607&isnumber=4635237>
- [17] G. J. Armstrong, D. J. Atkinson, and P. P. Acarnley, "A comparison of estimation techniques for sensorless vector controlled induction motor drives," in Proc. IEEE Int. Conf. Power Electron. Drive Syst., May 26–29, 1997, vol. 1, pp. 110–116.
- [18] Joetten, Robert; Maeder, Gerhard, "Control Methods for Good Dynamic Performance Induction Motor Drives Based on Current and Voltage as Measured Quantities," Industry Applications, IEEE Transactions on , vol.IA-19, no.3, pp.356-363, May 1983  
URL: <http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?arnumber=4504209&isnumber=4504196>
- [19] Xu, X.; Novotny, D.W., "Implementation of direct stator flux orientation control on a versatile DSP based system," Industry Applications, IEEE Transactions on , vol.27, no.4, pp.694-700, Jul/Aug 1991  
URL: <http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?arnumber=85484&isnumber=2795>
- [20] Ohtani, T.; Takada, N.; Tanaka, K., "Vector control of induction motor without shaft encoder," Industry Applications, IEEE Transactions on , vol.28, no.1, pp.157-164, Jan/Feb 1992  
URL: <http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?arnumber=120225&isnumber=3434>
- [21] Jansen, P.L.; Lorenz, R.D., "Accuracy limitations of velocity and flux estimation in direct field oriented induction machines," Power Electronics and Applications, 1993., Fifth European Conference on , vol., no., pp.312-318 vol.4, 13-16 Sep 1993  
URL: <http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?arnumber=264833&isnumber=6646>
- [22] F. Blaschke, "The principle of field orientation as applied to the new transvector closed loop control systems for rotating field machines," Siemens Rev., vol. 39, no. 5, pp. 217-220, 1972.
- [23] F. Blaschke and K. Bohm, "Verfahren der Felderfassung bei der Regelung stromrichter gespeister asynchronmaschinen," in Proc. 1st IFAC Symp. Control in Power Electronics and Electrical Drives, 1974, pp. 653-649.
- [24] Sathikumar, S.; Vithayathil, Joseph; , "Digital Simulation of Field-Oriented Control of Induction Motor," Industrial Electronics, IEEE Transactions on vol.IE-31, no.2, pp.141-148, May 1984  
doi: 10.1109/TIE.1984.350058  
URL:<http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=4158513&isnumber=4158506>
- [25] Nihat Inanc; "A new sliding mode flux and current observer for direct field oriented induction motor drives", Electric Power Systems Research, Volume 63, Issue 2, 28 September 2002, Pages 113-118, ISSN 0378-7796, DOI: 10.1016/S0378-7796(02)00084-6.  
(<http://www.sciencedirect.com/science/article/B6V30-460WHBM-2/2/70513c7be158bfcc103671df20e6ba43>)
- [26] Hurst, K.D.; Habetler, T.G.; Griva, G.; Profumo, F.; Jansen, P.L.; , "A self-tuning closed-loop flux observer for sensorless torque control of standard induction machines," Power Electronics, IEEE Transactions on , vol.12, no.5, pp.807-815, Sep 1997  
doi: 10.1109/63.622998  
URL: <http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=622998&isnumber=13547>
- [27] Gacho, Juraj; Žalman, Milan: "IM Based Speed Servodrive with Luenberger Observer". Journal of Electrical Engineering. - ISSN 1335-3632. - Vol. 61, No. 3 (2010), s. 149-156
- [28] Bose Bimal K.; "Modern Power Electronics and AC drives",USA, Prentice Hall, 2002
- [29] Bose Bimal K.; "Power Electronics and Motor Drives: Advances and Trends", UK, Elsevier 2006. ISBN: 978-0-12-088405-6

- [30] Godoy, M., Felix A. "Alternative energy systems: design and analysis with induction generators". CRC, 2008. Print.
- [31] Chiasson, John, "Modeling and high performance control of electric machines". 1st ed., Wiley-IEEE Press, 2005. Print.
- [32] Vas P., "Vector Control of AC Machines", Oxford, U.K.: Clarendon, 1990, pp. 124–126.
- [33] Michal Rewienski, Jacob White, "Model order reduction for non-linear dynamical systems based on trajectory piecewise-linear approximations", Linear Algebra and its Applications, Volume 415, Issues 2-3, Special Issue on Order Reduction of Large-Scale Systems, 1 June 2006, Pages 426-454, ISSN 0024-3795, DOI: 10.1016/j.laa.2003.11.034.(  
<http://www.sciencedirect.com/science/article/B6V0R-4CMHYTN-7/2/ce9dbd568271edadb52b44f884f4d46b> )
- [34] Eid Rudy, "A Survey on Model Order Reduction of Linear Dynamical Systems", 2nd GACM Colloquium on Computational Mechanics-TU München, Oct. 2008
- [35] Casadei, D.; Mengoni, M.; Serra, G.; Tani, A.; Zarri, L.; , "Field-weakening control schemes for high-speed drives based on induction motors: a comparison," Power Electronics Specialists Conference, 2008. PESC 2008. IEEE , vol., no., pp.2159-2166, 15-19 June 2008 doi: 10.1109/PESC.2008.4592262  
URL: <http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=4592262&isnumber=4591876>
- [36] Sang-Hoon Kim; Seung-Ki Sul; , "Maximum torque control of an induction machine in the field weakening region," Industry Applications, IEEE Transactions on , vol.31, no.4, pp.787-794, Jul/Aug 1995 doi: 10.1109/28.395288  
URL: <http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=395288&isnumber=8965>
- [37] Sang-Hoon Kim; Seung-Ki Sul; , "Voltage control strategy for maximum torque operation of an induction machine in the field-weakening region," Industrial Electronics, IEEE Transactions on , vol.44, no.4, pp.512-518, Aug 1997 doi: 10.1109/41.605628  
URL: <http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=605628&isnumber=13284>
- [38] Grotstollen, H.; Bunte, A.; , "Control of induction motor with orientation on rotor flux or on stator flux in a very wide field weakening region-experimental results ," Industrial Electronics, 1996. ISIE '96., Proceedings of the IEEE International Symposium on , vol.2, no., pp.911-916 vol.2, 17-20 Jun 1996 doi: 10.1109/ISIE.1996.551065  
URL: <http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=551065&isnumber=11480>
- [39] Marcic, T.; Stumberger, G.; Hadziselimovic, M.; Zagradisnik, I.; , "Analysis of Induction Motor Drive Losses in the Field-Weakening Region," Power Electronics and Motion Control Conference, 2006. EPE-PEMC 2006. 12th International , vol., no., pp.1173-1178, Aug. 30 2006-Sept. 1 2006 doi: 10.1109/EPEPEMC.2006.4778561  
URL: <http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=4778561&isnumber=4778360>
- [40] Levi, E.; Sokola, M.; Vukosavic, S.N.; , "A method for magnetizing curve identification in rotor flux oriented induction machines," Energy Conversion, IEEE Transactions on , vol.15, no.2, pp.157-162, Jun 2000 doi: 10.1109/60.866993  
URL: <http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=866993&isnumber=18774>
- [41] Choi, D.H.; Shin, M.H.; Lee, T.K.; Cho, S.B.; Hyun, D.S.; , "Vector control of an induction motor for the field weakening region with tuning of the magnetizing inductance," Power Conversion Conference - Nagaoka 1997., Proceedings of the , vol.1, no., pp.107-112 vol.1, 3-6 Aug 1997 doi: 10.1109/PCCON.1997.645595  
URL: <http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=645595&isnumber=14041>
- [42] Wikipedia contributors. "Atan2." Wikipedia, The Free Encyclopedia. Wikipedia, The Free Encyclopedia, 28 Dec. 2010. Web. 11 Jan. 2011.

- [43] Vonkomer, Jakub; Žalman, Milan, "New Method for Smooth Transient between Sensor and Sensorless Direct Vector Control of Induction Machines". Elektro 2010. Proceedings of the 8th International Conference : Žilina, Slovak Republic. 24.-25.5.2010. Žilina: Žilinská univerzita, 2010
- [44] Vonkomer, Jakub; "New Method for Sensor and Sensorless Direct Vector Control of Induction Machines", ELITECH'10 : 12th Conference of Doctoral Students. Bratislava, Slovak Republic, 26.5.2010. Bratislava, ISBN 978-80-227-3303-8
- [45] Texas Instruments; TMS320x2833x, 2823x Enhanced Quadrature Encoder Pulse (eQEP) Module, Reference Guide, Literature Number: SPRUG05A, 2008
- [46] Seung-Ho Song; Jong-Woo Choi; Seung-Ki Sul; , "Transient torque maximizing strategy of induction machine in field weakening region," Power Electronics Specialists Conference, 1998. PESC 98 Record. 29th Annual IEEE , vol.2, no., pp.1569-1574 vol.2, 17-22 May 1998 doi: 10.1109/PESC.1998.703387  
URL:<http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=703387&isnumber=15180>
- [47] Jae Ho Chang; Byung Kook Kim; , "Minimum-time minimum-loss speed control of induction motors under field-oriented control," Industrial Electronics, IEEE Transactions on , vol.44, no.6, pp.809-815, Dec 1997 doi: 10.1109/41.649942  
URL:<http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=649942&isnumber=14174>
- [48] Vukosavic, S.N.; Levi, E.; , "A method for transient torque response improvement in optimum efficiency induction motor drives," Energy Conversion, IEEE Transactions on , vol.18, no.4, pp. 484- 493, Dec. 2003 doi: 10.1109/TEC.2003.816599  
URL:<http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=1247773&isnumber=27944>
- [49] Wikipedia contributors. "Direct torque control." Wikipedia, The Free Encyclopedia. Wikipedia, The Free Encyclopedia, 18 Nov. 2010. Web. 23 Jan. 2011.  
URL:[http://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Direct\\_torque\\_control&oldid=397501463](http://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Direct_torque_control&oldid=397501463)
- [50] Holtz, J.; , "Sensorless Control of Induction Machines—With or Without Signal Injection?," Industrial Electronics, IEEE Transactions on , vol.53, no.1, pp. 7- 30, Feb. 2006 doi: 10.1109/TIE.2005.862324  
URL: <http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=1589362&isnumber=33495>
- [51] Bocker, J.; Mathapati, S.; , "State of the Art of Induction Motor Control," Electric Machines & Drives Conference, 2007. IEMDC '07. IEEE International , vol.2, no., pp.1459-1464, 3-5 May 2007 doi: 10.1109/IEMDC.2007.383643  
URL: <http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=4270863&isnumber=4270762>
- [52] Casadei, D.; Profumo, F.; Serra, G.; Tani, A.; , "FOC and DTC: two viable schemes for induction motors torque control," Power Electronics, IEEE Transactions on , vol.17, no.5, pp. 779- 787, Sep 2002 doi: 10.1109/TPEL.2002.802183  
URL: <http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=1035154&isnumber=22214>
- [53] Lehtla, T.; Joller, J.; Lehtla, M.; Laugis, J.; , "Parameter identification and comparison of an induction motor models," Power Electronics and Variable Speed Drives, 2000. Eighth International Conference on (IEE Conf. Publ. No. 475) , vol., no., pp.201-205, 2000 doi: 10.1049/cp:20000245  
URL: <http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=888922&isnumber=19200>
- [54] Fornel, Bernard de, and Jean-Paul Louis. Electrical actuators: Identification and Observation. London: Wiley-ISTE, 2010,ISBN: ss
- [55] Bodson, M.; Chiasson, J.; , "A systematic approach to selecting optimal flux references in induction motors," Industry Applications Society Annual Meeting, 1992., Conference Record of the 1992 IEEE , vol., no., pp.531-537 vol.1, 4-9 Oct 1992 doi: 10.1109/IAS.1992.244350  
URL: <http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=244350&isnumber=6279>

- [56] Chunki Kwon; Sudhoff, S.D.; , "An Adaptive Maximum Torque Per Amp Control Strategy," Electric Machines and Drives, 2005 IEEE International Conference on , vol., no., pp.783-788, 15-15 May 2005 doi: 10.1109/IEMDC.2005.195811  
URL: <http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=1531429&isnumber=32672>
- [57] Soltani, J.; Hajian, M.; Arab, G.; , "Maximum torque per ampere control of induction motor drive without mechanical sensor," Control, Automation and Systems, 2008. ICCAS 2008. International Conference on , vol., no., pp.2685-2690, 14-17 Oct. 2008  
doi: 10.1109/ICCAS.2008.4694215  
URL: <http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=4694215&isnumber=4694179>
- [58] Markadeh G.A., Hajian M., Soltani J., Hosseinia S, "Maximum torque per ampere control of sensorless induction motor drives with dc offset and parameter compensation", Energy Conversion and Management, Volume 51, Issue 7, July 2010, Pages 1354-1362, ISSN 0196-8904, 10.1016/j.enconman.2009.11.036.  
URL: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0196890409004865>
- [59] Kubota, H.; Matsuse, K.; Nakano, T.; , "DSP-based speed adaptive flux observer of induction motor," Industry Applications, IEEE Transactions on , vol.29, no.2, pp.344-348, Mar/Apr 1993  
doi: 10.1109/28.216542 URL:  
<http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=216542&isnumber=5661>
- [60] Kubota, H.; Matsuse, K.; , "Speed sensorless field-oriented control of induction motor with rotor resistance adaptation," Industry Applications, IEEE Transactions on , vol.30, no.5, pp.1219-1224, Sep/Oct 1994 doi: 10.1109/28.315232  
URL: <http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=315232&isnumber=7605>
- [61] Kubota, H.; Sato, I.; Tamura, Y.; Matsuse, K.; Ohta, H.; Hori, Y.; , "Regenerating-mode low-speed operation of sensorless induction motor drive with adaptive observer," Industry Applications, IEEE Transactions on , vol.38, no.4, pp. 1081- 1086, Jul/Aug 2002  
doi: 10.1109/TIA.2002.800575  
URL: <http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=1019965&isnumber=21939>
- [62] Kubota, H.; , "Closure to discussion of "regenerating-mode low-speed operation of sensorless induction motor drive with adaptive observer"," Industry Applications, IEEE Transactions on , vol.39, no.1, pp. 20, Jan/Feb 2003 doi: 10.1109/TIA.2002.807248 URL:  
<http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=1167303&isnumber=26319>
- [63] Peroutka, Z.; Zeman, K.; , "Robust Field Weakening Algorithm for Vector-Controlled Induction Machine Traction Drives," IEEE Industrial Electronics, IECON 2006 - 32nd Annual Conference on , vol., no., pp.856-861, 6-10 Nov. 2006 doi: 10.1109/IECON.2006.347782  
URL:  
<http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=4153511&isnumber=4152825>
- [64] Blaschke, F.; van der Burgt, J.; Vandenput, A.; , "Sensorless direct field orientation at zero flux frequency," Industry Applications Conference, 1996. Thirty-First IAS Annual Meeting, IAS '96., Conference Record of the 1996 IEEE , vol.1, no., pp.189-196 vol.1, 6-10 Oct 1996  
doi: 10.1109/IAS.1996.557014  
URL: <http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=557014&isnumber=12151>
- [65] Holtz, J.; , "State of the art of controlled AC drives without speed sensor," Power Electronics and Drive Systems, 1995., Proceedings of 1995 International Conference on , vol., no., pp.1-6 vol.1, 21-24 Feb 1995  
doi: 10.1109/PEDS.1995.404956  
URL: <http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=404956&isnumber=9101>
- [66] Gallegos, M.A.; Alvarez, R.; Nunez, C.A.; , "A survey on speed estimation for sensorless control of induction motors," International Power Electronics Congress, 10th IEEE , vol., no., pp.1-6, 16-18 Oct. 2006 doi: 10.1109/CIEP.2006.312147  
URL: <http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=4106151&isnumber=4106148>
- [67] Tarchala, G.; Dybkowski, M.; Orłowska-Kowalska, T.; , "Analysis of the chosen speed and flux estimators for sensorless induction motor drive," Industrial Electronics (ISIE), 2011 IEEE International Symposium on , vol., no., pp.525-530, 27-30 June 2011 doi: 10.1109/ISIE.2011.5984213



[URL:http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=5984213&isnumber=5984066](http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=5984213&isnumber=5984066)

- [68] Pacas, M.; , "Sensorless Drives in Industrial Applications," Industrial Electronics Magazine, IEEE , vol.5, no.2, pp.16-23, June 2011 doi: 10.1109/MIE.2011.941125  
URL: <http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=5876639&isnumber=5876625>
- [69] Kubota, H.; Matsuse, K.; Nakano, T.; , "New adaptive flux observer of induction motor for wide speed range motor drives," Industrial Electronics Society, 1990. IECON '90., 16th Annual Conference of IEEE , vol., no., pp.921-926 vol.2, 27-30 Nov 1990  
doi: 10.1109/IECON.1990.149262  
URL: <http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=149262&isnumber=3941>
- [70] Garcia Soto, G.; Mendes, E.; Razek, A.; , "Adaptive variable structure rotor flux observer for an induction motor," Power Electronics and Variable Speed Drives, 1998. Seventh International Conference on (Conf. Publ. No. 456) , vol., no., pp.318-323, 21-23 Sep 1998  
doi: 10.1049/cp:19980544  
URL: <http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=732062&isnumber=15780>
- [71] Sang-Uk Kim; lee-Woo Yang; Eul-Jae Lee; Young-Bong Kim; Jong-Tai Lee; Young-Seok Kim; , "Robust speed estimation for speed sensorless vector control of induction motors," Industry Applications Conference, 1999. Thirty-Fourth IAS Annual Meeting. Conference Record of the 1999 IEEE , vol.2, no., pp.1267-1277 vol.2, 1999  
doi: 10.1109/IAS.1999.801665  
URL: <http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=801665&isnumber=17388>
- [72] Yang, G.; Chin, T.-H.; , "Adaptive-speed identification scheme for a vector-controlled speed sensorless inverter-induction motor drive," Industry Applications, IEEE Transactions on , vol.29, no.4, pp.820-825, Jul/Aug 1993 doi: 10.1109/28.232001  
[URL:http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=232001&isnumber=5996](http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=232001&isnumber=5996)
- [73] Pankratov V., Vdovin V., Sitnikov G., Domanov S., "Globally stable adaptive observer for systems of general-purpose industrial asynchronous electric drives ", Russian Electrical Engineering, Volume 82, Number 6, 319-323, DOI: 10.3103/S1068371211060101
- [74] Suwankawin, S.; Sangwongwanich, S.; , "Design strategy of an adaptive full-order observer for speed-sensorless induction-motor Drives-tracking performance and stabilization," Industrial Electronics, IEEE Transactions on , vol.53, no.1, pp. 96- 119, Feb. 2006  
doi: 10.1109/TIE.2005.862308 URL:  
<http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=1589370&isnumber=33495>
- [75] Kubota, H.; , "Closure to discussion of "regenerating-mode low-speed operation of sensorless induction motor drive with adaptive observer"," Industry Applications, IEEE Transactions on , vol.39, no.1, pp. 20, Jan/Feb 2003 doi: 10.1109/TIA.2002.807248 URL:  
<http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=1167303&isnumber=26319>
- [76] Depenbrock, M.; Steimel, A.; Kubota, H.; , "Discussion of "Regenerating-mode low-speed operation of sensorless induction motor drive with adaptive observer" [and closure]," Industry Applications, IEEE Transactions on , vol.39, no.1, pp.19-20, Jan.-Feb. 2003  
doi: 10.1109/TIA.2002.807246 URL:  
<http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=1167302&isnumber=26319>
- [77] Griva, G.; Profumo, F.; Bojoi, R.; Bostan, V.; Cuius, M.; Ilas, C.; , "General adaptation law for MRAS high performance sensorless induction motor drives," Power Electronics Specialists Conference, 2001. PESC. 2001 IEEE 32nd Annual , vol.2, no., pp.1197-1202 vol.2, 2001 doi: 10.1109/PESC.2001.954282 URL:  
<http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=954282&isnumber=20627>
- [78] Bouhenna A., Mansour A., Chenafa M., Belaidi A., „Feedback Gain Design Method for the Full-Order Flux Observer in Sensorless Control of Induction Motor“, International Journal of Computers Communications & Control, 3(2):135-148, 2008
- [79] Etien, E.; Chaigne, C.; Bensiali, N.; , "On the Stability of Full Adaptive Observer for Induction Motor in Regenerating Mode," Industrial Electronics, IEEE Transactions on , vol.57, no.5, pp.1599-1608, May 2010 doi: 10.1109/TIE.2009.2032200 URL:  
<http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=5256243&isnumber=5446457>

- [80] Bouhenna A., Chaigne C., Bensiali N., Etien E., Champenois G., „Design of speed adaptation law in sensorless control of induction motor in regenerating mode“, Simulation Modelling Practice and Theory, Volume 15, Issue 7, August 2007, Pages 847-863, ISSN 1569-190X, 10.1016/j.simpat.2007.04.005.  
URL: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1569190X0700055X>
- [81] Bensiali, N.; Chaigne, C.; Tnani, S.; Etien, E.; Champenois, G.; , "Optimal observer design for sensorless control of induction motor in regenerating-mode," Power Electronics, Electrical Drives, Automation and Motion, 2006. SPEEDAM 2006. International Symposium on , vol., no., pp.996-1001, 23-26 May 2006 doi: 10.1109/SPEEDAM.2006.1649913  
URL: <http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=1649913&isnumber=34594>
- [82] Rashed, M.; Stronach, F.; Vas, P.; , "A new stable MRAS-based speed and stator resistance estimators for sensorless vector control induction motor drive at low speeds," Industry Applications Conference, 2003. 38th IAS Annual Meeting. Conference Record of the , vol.2, no., pp. 1181- 1188 vol.2, 12-16 Oct. 2003 doi: 10.1109/IAS.2003.1257700  
URL: <http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=1257700&isnumber=28117>
- [83] Zaky M.s., "A stable adaptive flux observer for a very low speed-sensorless induction motor drives insensitive to stator resistance variations", Ain Shams Engineering Journal, Volume 2, Issue 1, March 2011, Pages 11-20, ISSN 2090-4479, 10.1016/j.asej.2011.04.003. URL: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2090447911000098>
- [84] Vicente, I.; Endemaño, A.; Garin, X.; Brown, M.; , "Comparative study of stabilising methods for adaptive speed sensorless full-order observers with stator resistance estimation," Control Theory & Applications, IET , vol.4, no.6, pp.993-1004, June 2010 doi: 10.1049/iet-cta.2008.0506 URL: <http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=5480245&isnumber=5480237>
- [85] Maes, J.; Melkebeek, J.A.; , "Speed-sensorless direct torque control of induction motors using an adaptive flux observer," Industry Applications, IEEE Transactions on , vol.36, no.3, pp.778-785, May/Jun 2000 doi: 10.1109/28.845053 URL: <http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=845053&isnumber=18320>
- [86] Hinkkanen, M.; , "Analysis and design of full-order flux observers for sensorless induction motors," Industrial Electronics, IEEE Transactions on , vol.51, no.5, pp. 1033- 1040, Oct. 2004 doi: 10.1109/TIE.2004.834964 URL: <http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=1339475&isnumber=29535>
- [87] Vicente, I.; Endemano, A.; Garin, X.; Brown, M.; , "Adaptive full order observer based stable speed sensorless scheme for vector controlled induction motor drives," Power Electronics and Applications, 2009. EPE '09. 13th European Conference on , vol., no., pp.1-10, 8-10 Sept. 2009 URL: <http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=5278821&isnumber=5278662>
- [88] Stoicuta, O.; Pana, T.C.; , "Design and stability study of an induction motor vector control system with extended rotor-flux and rotor-resistance Gopinath observer," Advanced Electromechanical Motion Systems & Electric Drives Joint Symposium, 2009. ELECTROMOTION 2009. 8th International Symposium on , vol., no., pp.1-8, 1-3 July 2009 doi: 10.1109/ELECTROMOTION.2009.5259079 URL: <http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=5259079&isnumber=5259072>
- [89] Ravi Teja, A. V.; Chakraborty, C.; Maiti, S.; Hori, Y.; , "A New Model Reference Adaptive Controller for Four Quadrant Vector Controlled Induction Motor Drives," Industrial Electronics, IEEE Transactions on , vol.59, no.10, pp.3757-3767, Oct. 2012 doi: 10.1109/TIE.2011.2164769  
URL: <http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=5983439&isnumber=6191366>
- [90] Yongchang Zhang; Zhengming Zhao; Ting Lu; Liqiang Yuan; Wei Xu; Jianguo Zhu; , "A comparative study of Luenberger observer, sliding mode observer and extended Kalman filter for sensorless vector control of induction motor drives," Energy Conversion Congress and Exposition, 2009. ECCE 2009. IEEE , vol., no., pp.2466-2473, 20-24 Sept. 2009 doi: 10.1109/ECCE.2009.5316508 URL: <http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=5316508&isnumber=5315930>
- [91] Orłowska-Kowalska, T.; Dybkowski, M.; , "Robust speed-sensorless induction motor drive for traction applications," IECON 2010 - 36th Annual Conference on IEEE Industrial Electronics

- Society , vol., no., pp.2358-2363, 7-10 Nov. 2010 doi: 10.1109/IECON.2010.5675338 URL: <http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=5675338&isnumber=5674827>
- [92] "IEEE Standard Test Procedure for Polyphase Induction Motors and Generators," IEEE Std 112-2004 (Revision of IEEE Std 112-1996) , vol., no., pp.0\_1-79, 2004  
doi: 10.1109/IEEESTD.2004.95394  
URL: <http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=1353938&isnumber=29748>
- [93] Toliyat, H.A.; Levi, E.; Raina, M.; , "A review of RFO induction motor parameter estimation techniques," Energy Conversion, IEEE Transactions on , vol.18, no.2, pp. 271- 283, June 2003 doi: 10.1109/TEC.2003.811719 URL: <http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=1201100&isnumber=27039>
- [94] Sumner, M.; Asher, G.M.; , "Autocommissioning for voltage-referenced voltage-fed vector-controlled induction motor drives," Electric Power Applications, IEE Proceedings B , vol.140, no.3, pp.187-200, May 1993  
URL: <http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=212394&isnumber=5546>
- [95] ÇAGLAR H. Ö., „Parameter and speed estimation of induction motors from manufacturers data and measurements“, Thesis, The Graduate School Of Natural And Applied Sciences, The Middle East Technical University
- [96] Castaldi, P.; Tilli, A.; , "Parameter estimation of induction motor at standstill with magnetic flux monitoring," Control Systems Technology, IEEE Transactions on , vol.13, no.3, pp. 386- 400, May 2005 doi: 10.1109/TCST.2004.841643  
URL: <http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=1424016&isnumber=30745>
- [97] Gastli, A.; , "Identification of induction motor equivalent circuit parameters using the single-phase test," Energy Conversion, IEEE Transactions on , vol.14, no.1, pp.51-56, Mar 1999  
doi: 10.1109/60.749147 URL: <http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=749147&isnumber=16193>
- [98] Bin Lu; Habetler, T.G.; Harley, R.G.; , "A survey of efficiency-estimation methods for in-service induction motors," Industry Applications, IEEE Transactions on , vol.42, no.4, pp.924-933, July-Aug. 2006 doi: 10.1109/TIA.2006.876065  
URL: <http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=1658321&isnumber=34719>
- [99] Sang-Bin Lee; Habetler, T.G.; Harley, R.G.; Gritter, D.J.; , "A stator and rotor resistance estimation technique for conductor temperature monitoring," Industry Applications Conference, 2000. Conference Record of the 2000 IEEE , vol.1, no., pp.381-387 vol.1, 2000  
doi: 10.1109/IAS.2000.881139  
URL: <http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=881139&isnumber=19069>
- [100] Chiasson J., Bodson M., “Estimation of the rotor time constant of an induction machine at constant speed”, in Proceedings of the European Control Conference ECC’07, July 2-5 2007, pp. 4673–4678, Kos Greece
- [101] Seok Ho Jeon; Kwang Kyo Oh; Jin Young Choi; , "Flux observer with on-line tuning of stator and rotor resistances for induction motors," Industrial Electronics, IEEE Transactions on , vol.49, no.3, pp.653-664, Jun 2002 doi: 10.1109/TIE.2002.1005393  
URL: <http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=1005393&isnumber=21696>
- [102] Grouni S, „Improvement approach on rotor time constant adaptation with optimum flux in IFOC for induction machines drives“, World Academy of Science, Engineering and Technology, 37, 2008
- [103] S. B. Lee, T. G. Habetler, R. G. Harley, and D. J. Gritter, “An evaluation of model-based stator resistance estimation for induction motor stator winding temperature monitoring,” IEEE Trans. Energy Convers., vol. 17, no. 1, pp. 7–15, Mar. 2002.
- [104] Mueller, K.; , "Efficient  $T_R$  estimation in field coordinates for induction motors," Industrial Electronics, 1999. ISIE '99. Proceedings of the IEEE International Symposium on , vol.2, no., pp.735-741 vol.2, 1999 doi: 10.1109/ISIE.1999.798704  
URL: <http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=798704&isnumber=17317>
- [105] Marino, R.; Peresada, S.; Tomei, P.; , "On-line stator and rotor resistance estimation for induction motors ," Control Systems Technology, IEEE Transactions on , vol.8, no.3, pp.570-

579, May 2000 doi: 10.1109/87.845888

URL: <http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=845888&isnumber=18334>

- [106] Brandstetter P., Cajka R., Skuta O., "Estimation method of rotor time constant for induction motor drive with vector control", 16th Int. Conference on Electrical Drives and Power Electronics, Slovakia, September 24 – 26, 2007
- [107] Jie Li; Haipeng Ren; Qifu Huang; Yanru Zhong; , "A novel on-line MRAS rotor resistance identification method insensitive to stator resistance for vector control systems of induction machines," Industrial Electronics (ISIE), 2010 IEEE International Symposium on , vol., no., pp.591-595, 4-7 July 2010 doi: 10.1109/ISIE.2010.5637258  
URL: <http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=5637258&isnumber=5635477>
- [108] Marcetic, D.P.; Vukosavic, S.N.; , "Speed-Sensorless AC Drives With the Rotor Time Constant Parameter Update," Industrial Electronics, IEEE Transactions on , vol.54, no.5, pp.2618-2625, Oct. 2007 doi: 10.1109/TIE.2007.899880  
URL: <http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=4285959&isnumber=4282101>
- [109] Chatterjee, D.; , "A Novel Magnetizing-Curve Identification and Computer Storage Technique for Induction Machines Suitable for On-line Application," Industrial Electronics, IEEE Transactions on , vol.58, no.12, pp.5336-5343, Dec. 2011 doi: 10.1109/TIE.2011.2126539  
URL: <http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=5729817&isnumber=6021400>
- [110] Dannerer, G.; Seebacher, R.R.; Krischan, K.; Ingruber, R.; , "Modeling the induction machine's main inductance as a function of the magnetizing and the torque building component of the stator current," Electrical Machines, 2008. ICEM 2008. 18th International Conference on , vol., no., pp.1-6, 6-9 Sept. 2008 doi: 10.1109/ICELMACH.2008.4800147  
URL:  
<http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=4800147&isnumber=4799813>
- [111] Seebacher, R.R.; Dannerer, G.; Krischan, K.; Ingruber, R.; , "Modeling the induction machine's main inductance as a function of the supply frequency and the magnetizing and the torque building component of the stator current," Power Electronics and Applications, 2009. EPE '09. 13th European Conference on , vol., no., pp.1-10, 8-10 Sept. 2009 URL:  
<http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=5278797&isnumber=5278662>
- [112] Stankovic, A.V.; Benedict, E.L.; John, V.; Lipo, T.A.; , "A novel method for measuring induction machine magnetizing inductance," Industry Applications, IEEE Transactions on , vol.39, no.5, pp. 1257- 1263, Sept.-Oct. 2003 doi: 10.1109/TIA.2003.816532 URL:  
<http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=1233583&isnumber=27640>
- [113] Dae Hee Choi; Soon Bong Cho; Dong Seok Hyun; , "Improved torque response by tuning of the magnetizing inductance under field weakening operation region [of induction motors]," Industry Applications Conference, 1997. Thirty-Second IAS Annual Meeting, IAS '97., Conference Record of the 1997 IEEE , vol.1, no., pp.418-425 vol.1, 5-9 Oct 1997 doi: 10.1109/IAS.1997.643057 URL:  
<http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=643057&isnumber=13803>
- [114] Levi, E.; Sokola, M.; Vukosavic, S.N.; , "A method for magnetizing curve identification in rotor flux oriented induction machines," Energy Conversion, IEEE Transactions on , vol.15, no.2, pp.157-162, Jun 2000 doi: 10.1109/60.866993  
URL: <http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=866993&isnumber=18774>
- [115] Levi, E.; Vukosavic, S.N.; , "Identification of the magnetising curve during commissioning of a rotor flux oriented induction machine," Electric Power Applications, IEE Proceedings - , vol.146, no.6, pp.685-693, Nov 1999 doi: 10.1049/ip-epa:19990591  
URL: <http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=820095&isnumber=17770>
- [116] Levi, E.; Wang, M.; , "Induction motor sensorless vector control in the field weakening region," Advances in Induction Motor Control (Ref. No. 2000/072), IEE Seminar , vol., no., pp.3/1-3/6, 2000 doi: 10.1049/ic:20000383  
URL: <http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=858554&isnumber=18629>
- [117] Levi, E.; Mingyu Wang; , "On-line identification of the mutual inductance for vector controlled induction motor drives," Energy Conversion, IEEE Transactions on , vol.18, no.2, pp. 299-

305, June 2003 doi: 10.1109/TEC.2003.811720

URL: <http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=1201103&isnumber=27039>

- [118] Bellini, A.; Bifaretti, S.; , "A method for magnetizing curve identification in vector controlled induction motor drives," Power Electronics, Electrical Drives, Automation and Motion, 2006. SPEEDAM 2006. International Symposium on , vol., no., pp.955-959, 23-26 May 2006 doi: 10.1109/SPEEDAM.2006.1649905 URL: <http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=1649905&isnumber=34594>
- [119] Dybkowski, M.; Orłowska-Kowalska, T.; , "Speed sensorless induction motor drive with magnetizing reactance estimation," Power Electronics and Motion Control Conference (EPE/PEMC), 2010 14th International , vol., no., pp.T5-120-T5-125, 6-8 Sept. 2010 doi: 10.1109/EPEPMC.2010.5606803 URL: <http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=5606803&isnumber=5606503>
- [120] Orłowska-Kowalska, T.; Dybkowski, M.; , "Robust speed-sensorless induction motor drive for traction applications," IECON 2010 - 36th Annual Conference on IEEE Industrial Electronics Society , vol., no., pp.2358-2363, 7-10 Nov. 2010 doi: 10.1109/IECON.2010.5675338 URL: <http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=5675338&isnumber=5674827>
- [121] Myoung-Ho Shin; Dong-Seok Hyun; , "On-line Identification of Stator Transient Inductance in Rotor-Flux-Oriented Induction Motor Drive," Industrial Electronics, IEEE Transactions on , vol.54, no.4, pp.2018-2023, Aug. 2007 doi: 10.1109/TIE.2007.895151 URL: <http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=4273671&isnumber=4265775>
- [122] Žalman M.: prednášky k predmetu Inteligentné Servopohony, prednáška č. 8, 2008/2009. <http://servo.urpi.fe.i.stuba.sk/> (stiahnuté 20.6.2009)
- [123] Jul-Ki Seok; Seung-Ki Sul; , "Optimal flux selection of an induction machine for maximum torque operation in flux-weakening region," Power Electronics, IEEE Transactions on , vol.14, no.4, pp.700-708, Jul 1999 doi: 10.1109/63.774208 URL: <http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=774208&isnumber=16805>
- [124] Namho Hur; Kichul Hong; Kwanghee Nam; , "Sensorless vector control in the presence of voltage and current measurement errors by dead-time [induction motors]," Industry Applications Conference, 1997. Thirty-Second IAS Annual Meeting, IAS '97., Conference Record of the 1997 IEEE , vol.1, no., pp.433-438 vol.1, 5-9 Oct 1997 doi: 10.1109/IAS.1997.643059 URL: <http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=643059&isnumber=13803>
- [125] Sukegawa, T.; Kamiyama, K.; Mizuno, K.; Matsui, T.; Okuyama, T.; , "Fully digital, vector-controlled PWM VSI-fed AC drives with an inverter dead-time compensation strategy," Industry Applications, IEEE Transactions on , vol.27, no.3, pp.552-559, May/Jun 1991 doi: 10.1109/28.81841 URL: <http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=81841&isnumber=2683>
- [126] Ahmed, S.; Shen, Z.; Mattavelli, P.; Boroyevich, D.; Jaksic, M.; Karimi, K.; Fu, J.; , "Small-signal model of a voltage source inverter (VSI) considering the dead-time effect and space vector modulation types," Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC), 2011 Twenty-Sixth Annual IEEE , vol., no., pp.685-690, 6-11 March 2011 doi: 10.1109/APEC.2011.5744670 URL: <http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=5744670&isnumber=5744557>
- [127] Song Xuelei; Wen Xuhui; Guo Xinhua; Zhao Feng; , "Dead-time compensation of SVPWM based on DSP TMS320F2812 for PMSM," Electrical Machines and Systems, 2009. ICEMS 2009. International Conference on , vol., no., pp.1-4, 15-18 Nov. 2009 doi: 10.1109/ICEMS.2009.5382971 URL: <http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=5382971&isnumber=5382637>
- [128] Yang Liyong; Chen Zhigang; Li Zhengxi; , "A novel method of dead-time compensation for SVPWM modulation," Information Science and Engineering (ICISE), 2010 2nd International Conference on , vol., no., pp.4862-4865, 4-6 Dec. 2010 doi: 10.1109/ICISE.2010.5691436 URL: <http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=5691436&isnumber=5688492>
- [129] Murai, Yoshihiro; Watanabe, Tomofumi; Iwasaki, Harumitsu; , "Waveform Distortion and Correction Circuit for PWM Inverters with Switching Lag-Times," Industry Applications, IEEE Transactions on , vol.IA-23, no.5, pp.881-886, Sept. 1987

doi: 10.1109/TIA.1987.4504998

URL: <http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=4504998&isnumber=4504980>

- [130] Jacobina, C.B.; Filho, J.E.C.; Lima, A.M.N.; , "Estimating the parameters of induction machines at standstill," Energy Conversion, IEEE Transactions on , vol.17, no.1, pp.85-89, Mar 2002 doi: 10.1109/60.986442 URL: <http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=986442&isnumber=21257>
- [131] CHRZAN, P. J., KLAASSEN, H., "Parameter identification of vector-controlled induction machines", Electrical Engineering, Vol. 79, pp. 39-46
- [132] Kaiyu Wang; John Chiasson; Marc Bodson; Leon M. Tolbert; , "An On-line Rotor Time Constant Estimator for the Induction Machine," Control Systems Technology, IEEE Transactions on , vol.15, no.2, pp.339-348, March 2007 doi: 10.1109/TCST.2006.886445 URL: <http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=4105951&isnumber=4105928>
- [133] Romenesko C.J., Maddali V.K. (Hamilton Sundstrand Corporation), "On-line measurement of an induction machine's rotor time constant by small signal d-axis current injection" U.S. Patent 8,115,441, Feb. 14, 2012
- [134] Semenov S.G., Zaramba A.T. (Ford Global Technologies, Inc.), " Speed and rotor time constant estimation for torque control of an induction motor" U.S. Patent 6,316,904, Nov. 13, 2001
- [135] Lethla T. "Parameter identification of an induction motor using fuzzy logic controller", Talinn Technical University, Estonia stiahnuté 29.8.2011 z <http://www.ene.ttu.ee/elektrijamid/teadus/artiklid/ungar965/>
- [136] Erdman, W.L.; Hoft, R.G.; , "Induction machine field orientation along airgap and stator flux ," Energy Conversion, IEEE Transactions on , vol.5, no.1, pp.115-121, Mar 1990 doi: 10.1109/60.50822 URL: <http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=50822&isnumber=1859>
- [137] Takahashi, Isao; Noguchi, Toshihiko; , "A New Quick-Response and High-Efficiency Control Strategy of an Induction Motor," Industry Applications, IEEE Transactions on , vol.IA-22, no.5, pp.820-827, Sept. 1986  
doi: 10.1109/TIA.1986.4504799  
URL: <http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=4504799&isnumber=4504790>

## Zoznam publikácií autora

Slovenská technická univerzita v Bratislave  
31000 FEI Ústav riadenia a priemyselnej informatiky  
autor: Vonkomer Jakub

Zoznam publikácií za roky 2008-2012

Počet záznamov spolu: 9

ADF Vedecké práce v domácich nekarentovaných časopisoch  
Počet záznamov: 2

ADF1 Vonkomer, Jakub - Žalman, Milan: New Robust MRAS-Based Method for Sensorless Vector Control of Induction Machines. In: AT&P Journal Plus. - ISSN 1336-5010. - Č. 1: Systémy automatického riadenia (2010), s. 71-75

ADF2 Vonkomer, Jakub – Žalman, Milan: Mras based sensorless and sensor vector control and smooth transient between them- In: Communications, Scientific Letters of University of Zilina, No 2a., 2011, pp.97-103

AFC Publikované príspevky na zahraničných vedeckých konferenciách  
Počet záznamov: 2

AFC1 Vonkomer, Jakub - Radičová, Tatiana - Žalman, Milan - Suchánek, Miroslav: Fast AC Electric Drive Development Process Using Simulink Code Generation Possibilities. In: Technical Computing Prague 2009 : 17th Annual Conference Proceedings. Prague, Czech Republic, 19.11.2009. - Prague : Humusoft, Ltd., 2009. - ISBN 978-80-7080-733-0. - CD-Rom

AFC2 Vonkomer, Jakub - Žalman, Milan: Induction Motor Sensorless Vector Control for Very Wide Speed Range of Operation. In: Proceedings of the 12th International Carpathian Control Conference : Velké Karlovice, Czech Republic, 25.-28.5.2011. - : IEEE, 2011. - ISBN 978-1-61284-359-9. - S. 441-446

AFD Publikované príspevky na domácich vedeckých konferenciách  
Počet záznamov: 5

AFD1 Radičová, Tatiana - Vonkomer, Jakub - Žalman, Milan - Sekaj, Ivan: LMPM Position Controller Parameter Optimization Using Genetic Algorithm. In: Technical Computing Bratislava 2010 : 18th Annual Conference Proceedings. Bratislava, Slovak Republic, 20.10.2010. - Bratislava : RT Systems, 2010. - ISBN 978-80-970519-0-7. - CD-Rom

AFD2 Vonkomer, Jakub - Žalman, Milan: Aktívne filtre vyšších harmonických. In: ŠVOČ 2008 : Zborník víťazných prác. Bratislava, Slovak Republic, 23.4.2008. - Bratislava : STU v Bratislave FEI, 2008. - ISBN 978-80-227-

2865-2. - CD-Rom

AFD3 Vonkomer, Jakub: New Method for Sensor and Sensorless Direct Vector Control of Induction Machines. In: ELITECH'10 : 12th Conference of Doctoral Students. Bratislava, Slovak Republic, 26.5.2010. - Bratislava : STU v Bratislave, 2010. - ISBN 978-80-227-3303-8. - CD-Rom

AFD4 Vonkomer, Jakub - Žalman, Milan: New Method for Smooth Transient between Sensor and Sensorless Direct Vector Control of Induction Machines. In: Elektro 2010. Proceedings of the 8th International Conference : Žilina, Slovak Republic. 24.-25.5.2010. - Žilina : Žilinská univerzita, 2010. - CD-Rom

AFD5 Žalman, Milan - Vonkomer, Jakub: Comparison of the Current Controllers in Alpha-Beta and D-Q Reference. In: Kybernetika a informatika 2012 : Zborník abstraktov. Medzinárodná konferencia SSKI a FEI STU. Skalka pri Kremnici, 31. január - 4. február 2012. - Bratislava : Vydavateľstvo STU, 2012. - ISBN 978-80-227-3642-8. - S. 53-54