



Pracoviště: Regionální inovační centrum elektrotechniky

Výzkumná zpráva č.: 22190-047-2013

Pohon se synchronním motorem s elektrickým buzením: Injektážní metoda určení polohy s fázovým závěsem – simulační studie

Druh úkolu: Vědecko-výzkumný

Řešitelé: Ing. D. Uzel, prof. Ing. Z. Peroutka, Ph.D.

Vedoucí úkolu: prof. Ing. Z. Peroutka, Ph.D.

Počet stran: 28

Datum vydání: červenec 2013

Revize: 1

Tato práce vznikla s finanční podporou CZ.1.05/2.1.00/03.0094 a TAČR v rámci projektu č. TA01010863.

Anotace

Tato výzkumná zpráva poukazuje na vlastnosti estimace polohy rotoru synchronního stroje s elektrickým buzením, jejímž základem je analogie konstrukce motoru s konstrukcí analogového absolutního čidla polohy tzv. Resolveru, kde pro vlastní vyhodnocení polohy je využit fázový závěs. Metoda je svým charakterem speciálním případem tzv. injecktážích bezsenzorových metod, ovšem nevykazuje problém s neznalostí polaritý budicího pole.

Obsah

1	ÚVOD.....	5
2	PRINCIP A TEORETICKÝ ROZBOR.....	5
2.1	Princip	5
3	BLOKOVÉ SCHÉMA	6
4	SIMULACE ALGORITMŮ	8
5	PARAMETRY SYNCHRONNÍHO MOTORU A REGULACE	24
5.1	Synchronní motor – 10kW	24
5.2	Parametry regulace	24
5.3	Design filtru.....	25
6	ZÁVĚR.....	26

Použité symboly a zkratky

α, β	Stojící souřadný systém.
d, q	Rotující souřadný systém svázaný s polohou rotoru (motor) nebo vektoru napětí zdroje (usměrňovač)
ψ	Magnetický tok [Wb]
n	Mechanické otáčky motoru [ot./min]
ϑ	Poloha osy d ve stojícím souřadném systému (α, β) [°]
ε	Poloha požadovaného vektoru napětí ve stojícím souřadném systému (α, β) [°]
α	Poloha požadovaného vektoru napětí v rotujícím souřadném systému (d, q) [°], řídicí úhel [°]
p_p	Počet pólových dvojic [-]
P	Výkon [W]
J	Moment setrvačnosti [kgm ²]
O	Omezovač
f	Frekvence [Hz]
I, i	Elektrický proud [A]
L	Indukčnost [H]
ω	Úhlová frekvence [rad.s ⁻¹]
R	Elektrický odpor [Ω], regulátor
T	Perioda [s], časová konstanta regulátoru [s]
t	Čas [s]
A	Amplituda střídavé veličiny
U, u	Elektrické napětí [V]
$\arctg$	Arkus tangens
PWM	Pulsně šířková modulace
SM	Synchronní motor
PP	Filtr - pásmová propust

PLL	Fázový závěs
IIR	Filtr s nekonečnou impulzní odezvou
Kp	Proporční zesílení regulátoru [-]
Δ	Rozdíl (diference) dvou signálů
d/dt	Časová derivace
e	Regulační odchylka

Indexy

a, b, c	Označení fáze
α, β	Stojící souřadný systém
d, q	Rotující souřadný systém svázaný s polohou rotoru
s	Veličina statoru, veličina odpovídající funkci sinus
PWM	Pulsně šířková modulace
USM	Veličina spjata s obvodem usměrňovače v rotorovém obvodu stroje
w	Požadovaná hodnota veličiny
I	Elektrický proud
N	Jmenovitá hodnota
vz	Veličina vzorkování signálu
c	Veličina spjata s kapacitou stejnosměrného meziobvodu, veličina odpovídající funkci cosinus
0	Veličina popisující ustálený stav
r	Řídicí signál, veličina rotoru, veličina regulátoru
m	Veličina mechanická
f	Veličina buzení (rotorová hodnota přepočtená na stator)
e	Estimovaná veličina
nef	Nefiltrovaná veličina
arc	Veličina vyhodnocena funkcí arkustangens
i	Vysokofrekvenční složka na injektované frekvenci

1 Úvod

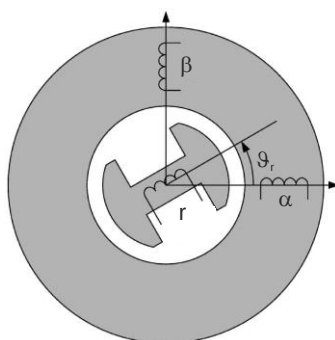
V předkládané zprávě je uveden simulační rozbor vlastností injektážní bezsenzorové metody pro vyhodnocení polohy rotoru synchronního motoru s elektrickým buzením, kde pro generování polohy rotoru je použit fázový závěs. Zpráva poukazuje na principiální vlastnosti dané metody.

K simulační prezentaci funkčnosti byly využity parametry synchronního motoru o výkonu 10 kW se štítkovými hodnotami dle kap. 5.

2 Princip a teoretický rozbor

2.1 Princip

Princip vlastní metody uvádí lit. [1]. Základní myšlenkou je použití vlastního motoru, který svou konstrukcí je totožný s analogovým absolutním čidlem polohy zvaným resolver, pro vyhodnocení absolutní polohy motoru. Princip funkce resolveru a potažmo i předkládané metody je následující. Máme-li el. stroj s konstrukcí dle Obr.2.1. Při napájení rotoru „vysokofrekvenčním“ signálem, kterým je v tomto případě 300Hz složka 3f usměrňovače, se do statorového vinutí ve stojícím souřadném systému α , β indukují 300Hz složky, které po demodulování (pronásobení) rotorovým signálem udávají sinusový a kosinusový signál, z něhož lze jednoznačně demodulovat absolutní poloha rotoru motoru.

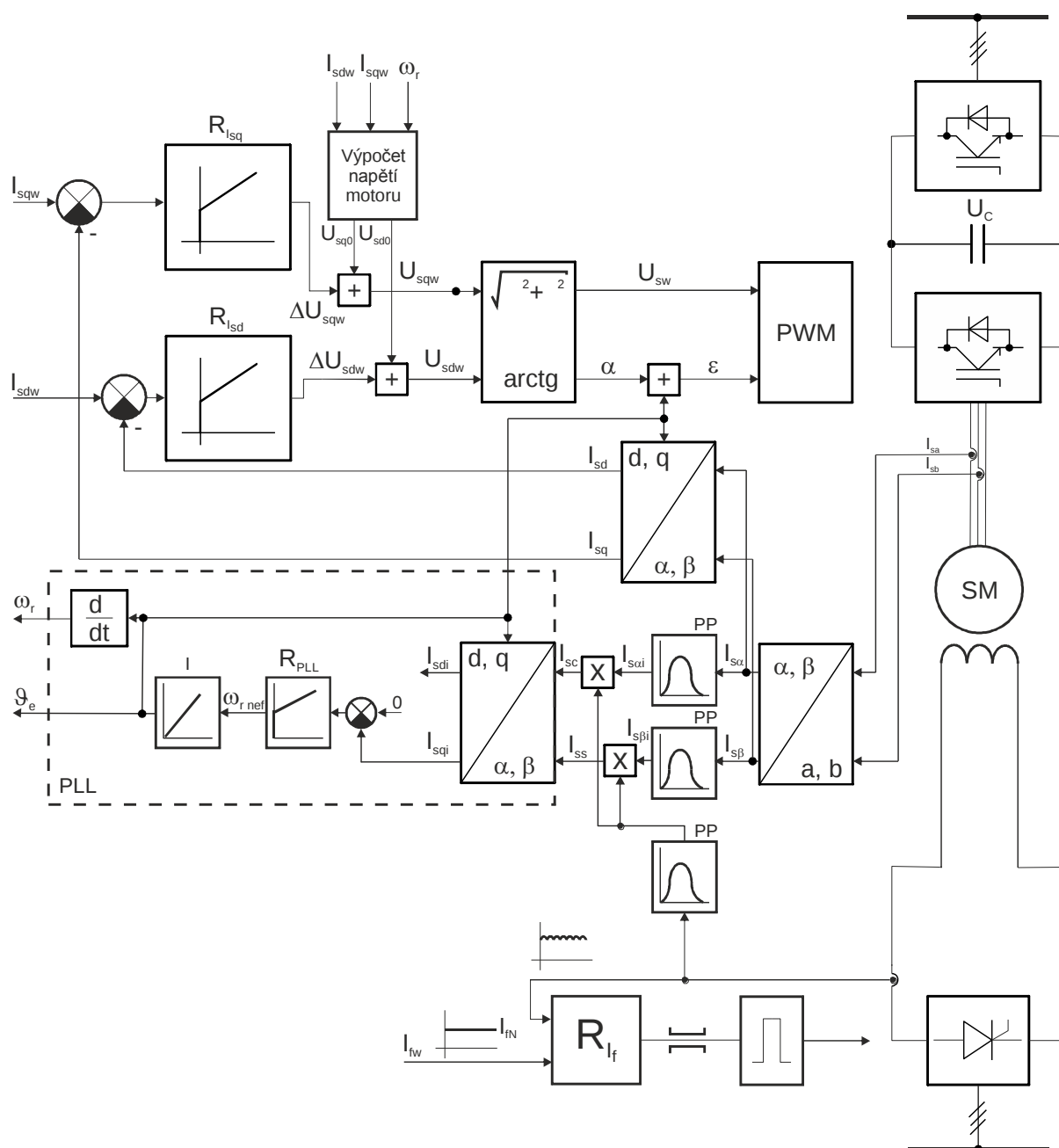


Obr.2.1 Konstrukce resolveru

Pro koncovou demodulaci je v této zprávě využit fázový závěs. Tento princip je často využíván u klasických injektážních metod pro generování estimované polohy.

3 Blokové schéma

Blokové schéma předkládané metody viz Obr.3.2. Jedná se klasické vektorové řízení v kartézských souřadnicích s regulátory podélné a příčné složky vektoru proudu. Ty udávají vektor statorového napětí, které je nuceno do motoru pomocí napěťového střídače. Rotorové vinutí napájí 3f tyristorový usměrňovač v proudové regulační smyčce. Právě charakteristického zvlnění proudu od usměrňovače na frekvenci 300Hz (3f můstkové spojení) je využíváno jako budící (injektovaná) frekvence. Protože na rozdíl od resolveru, u klasického motoru je zde základní složka proudu motoru, je nutné 300Hz složku vyfiltrovat. V našem případě je použit filtr IIR jako pásmová propust (totožný filtr byl použit na statorové i rotorové veličiny). Proudů statoru v α , β souřadnicích (o frekvenci 300Hz) jsou demodulovány rotorovým vyfiltrovaným signálem o stejné frekvenci a dostáváme tak cos a sin signál, které jsou vyhodnoceni fázovým závěsem PLL (Phase locked loop), jehož výstupem je estimovaná poloha rotoru.

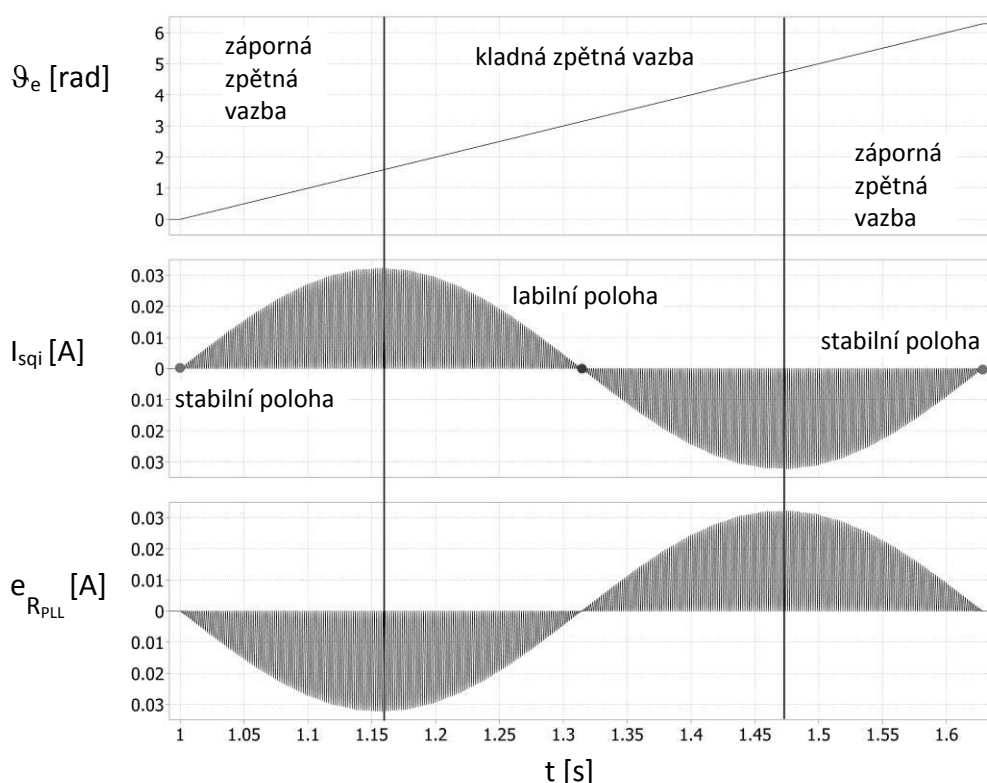


Obr.3.2 Blokové schéma estimace polohy s usměrňovačem v rotorovém obvodu

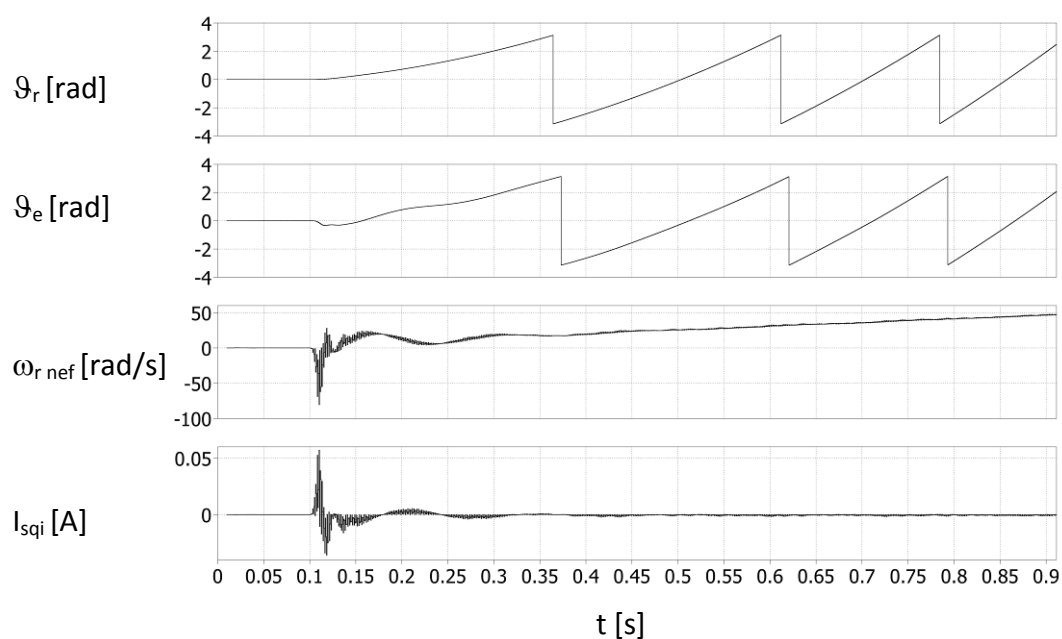
4 Simulace algoritmů

Simulace byly provedeny pro pohon dle blokového schématu Obr.3.2 a, pokud není uvedeno jinak, pro parametry dle kap. 5.

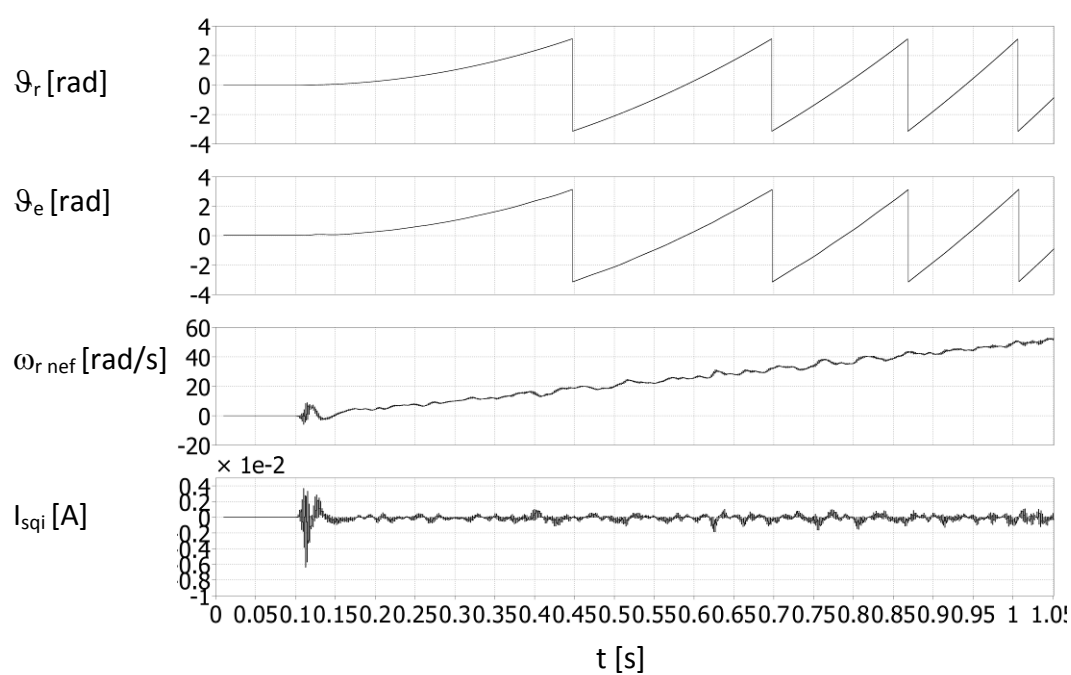
Základní otázka při využití fázového závěsu pro generování estimované polohy dle Obr.3.2 je existence dvou poloh, kde je splněno $I_{sqi} = 0$ (odpovídá stavu $\vartheta_e = \vartheta_r$). Vysvětlení uvádí Obr.4.3. Při zablokovaném rotoru ($\vartheta_r = 0$ rad) je estimovaná poloha měněna po rampě postupně o 2π . To způsobí sinusovou odezvu proudu I_{sqi} , což je až na znaménko regulační odchylka fázového závěsu $e_{R_{PLL}}$. Je zjevné, že v např. levém okolí labilní polohy ($\vartheta_e = \vartheta_r + \pi$), regulátor na zvýšení proudu I_{sqi} reaguje poklesem hodnoty polohy, což vede na vyšší proud I_{sqi} . V této oblasti jsou tedy splněny vlastnosti kladné zpětné vazby. Opakem je oblast záporné zpětné vazby, v jejímž středu je stabilní poloha.



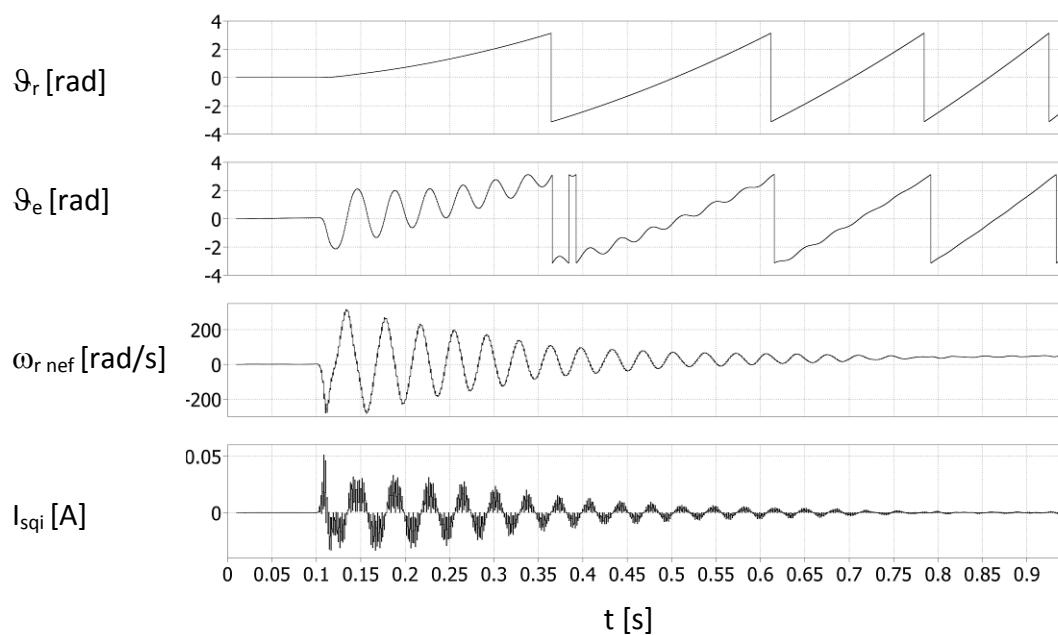
Obr.4.3 Jednoznačnost estimované polohy rotoru PLL



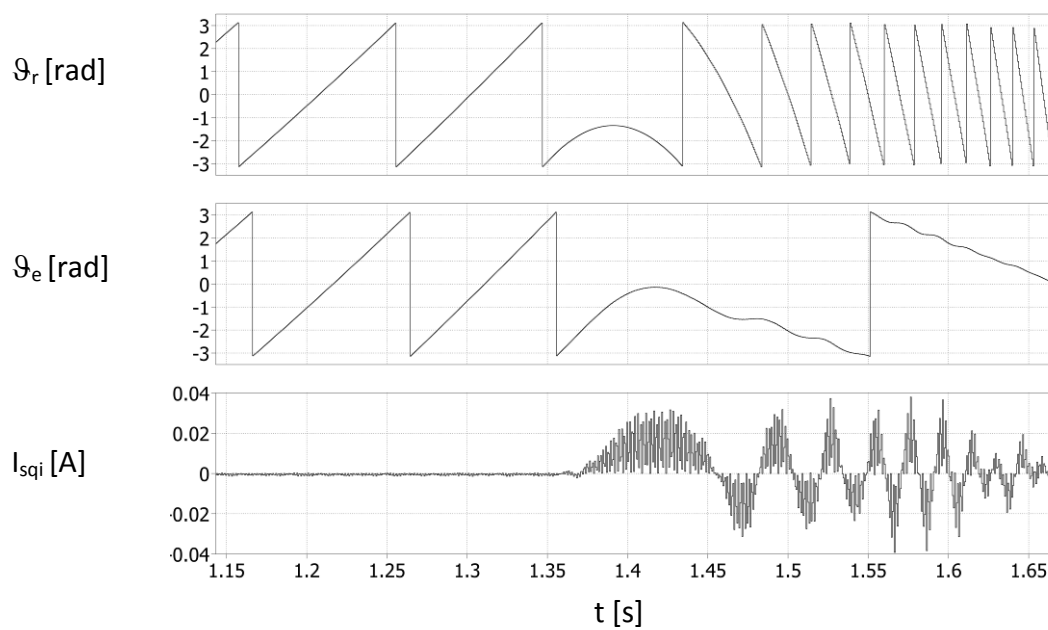
Obr.4.4 Zavěšení PLL – $K_{p_{PLL}}=1200$, $Tr_{PLL}=0,01s$



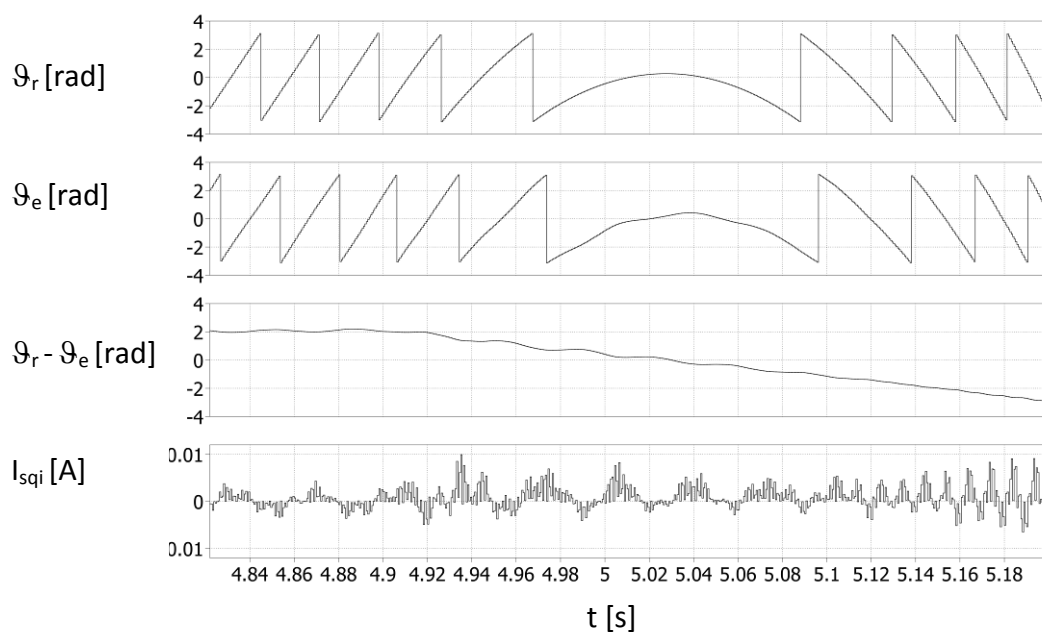
Obr.4.5 Zavěšení PLL – $K_{p_{PLL}}=1500$, $Tr_{PLL}=0,0025s$



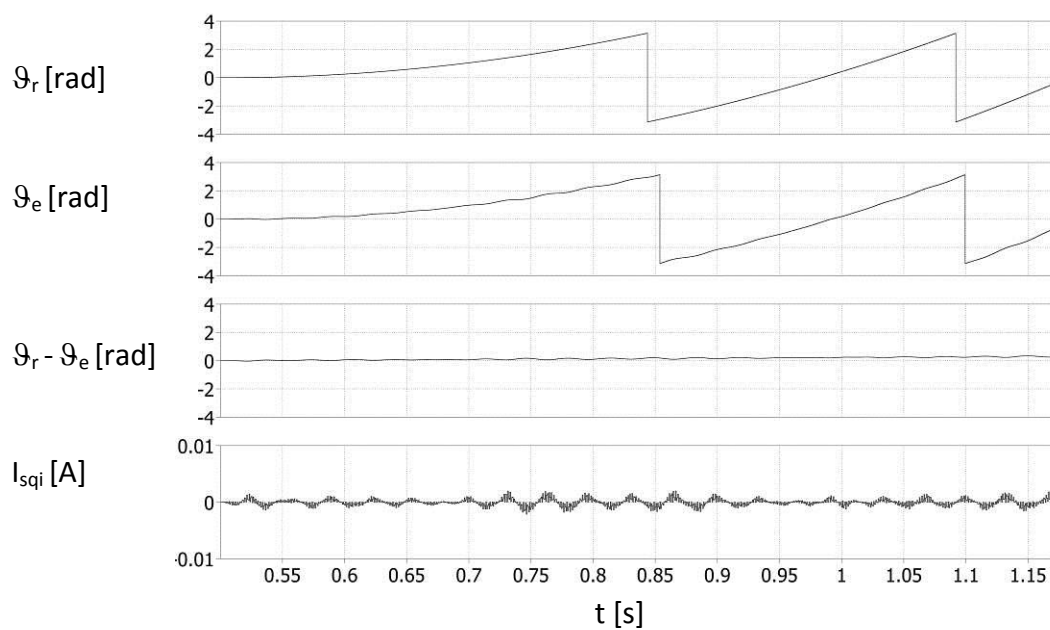
Obr.4.6 Zavěšení PLL – $K_{p_{PLL}}=2000$, $Tr_{PLL}=0,001s$



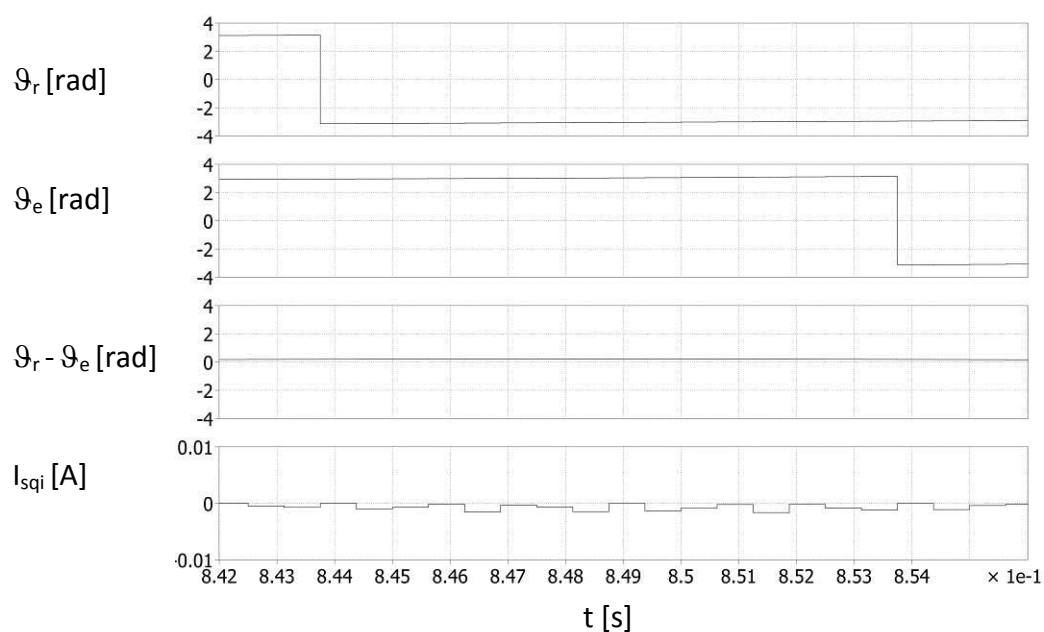
Obr.4.7 Reverzace otáček - skok zátěžného momentu $M_z = 0 \rightarrow 80Nm$,
 $K_{p_{PLL}}=1200$, $Tr_{PLL}=0,01$



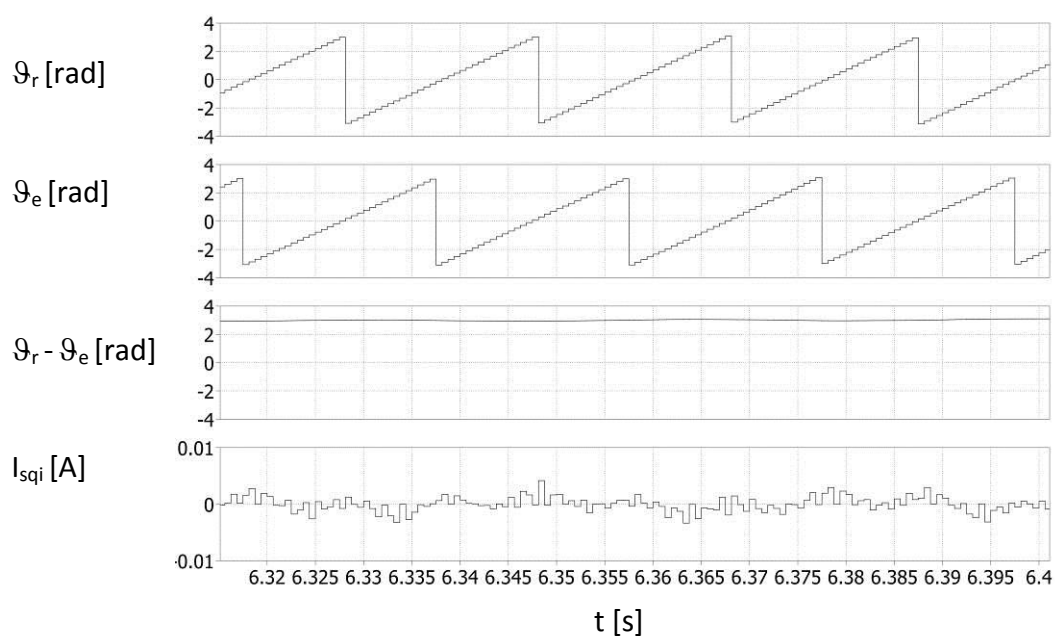
Obr.4.8 Reverzace otáček - skok zátěžného momentu $M_z = 0 \rightarrow 80\text{Nm}$,
 $K_{p_{PLL}}=2000$, $Tr_{PLL}=0,001$



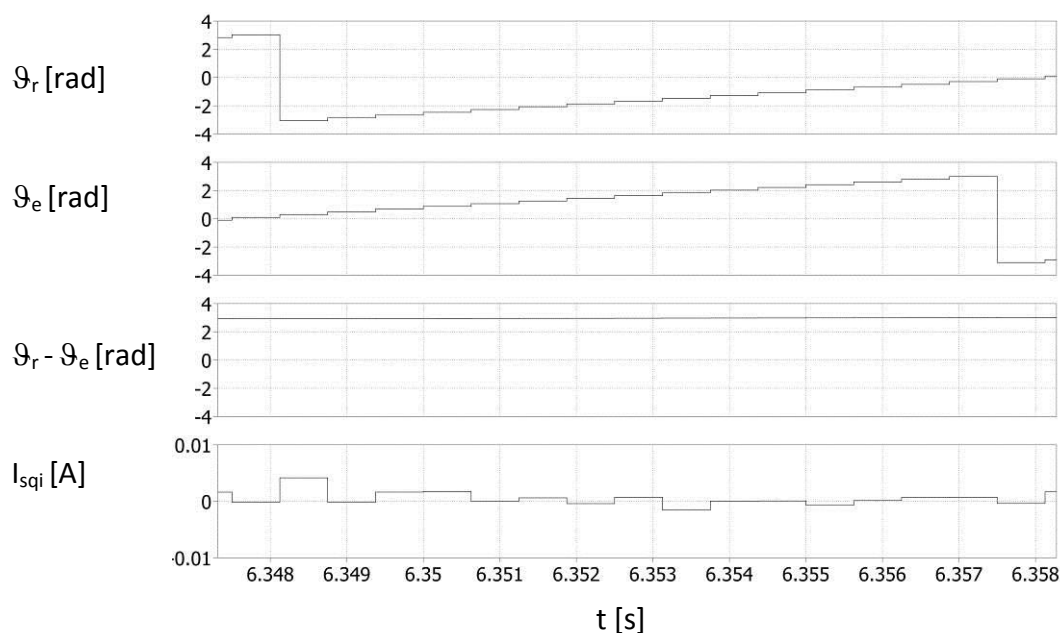
Obr.4.9 Dopravní zpoždění – vliv filtru – nízké otáčky



Obr.4.10 Dopravní zpoždění – vliv filtru – nízké otáčky zoom



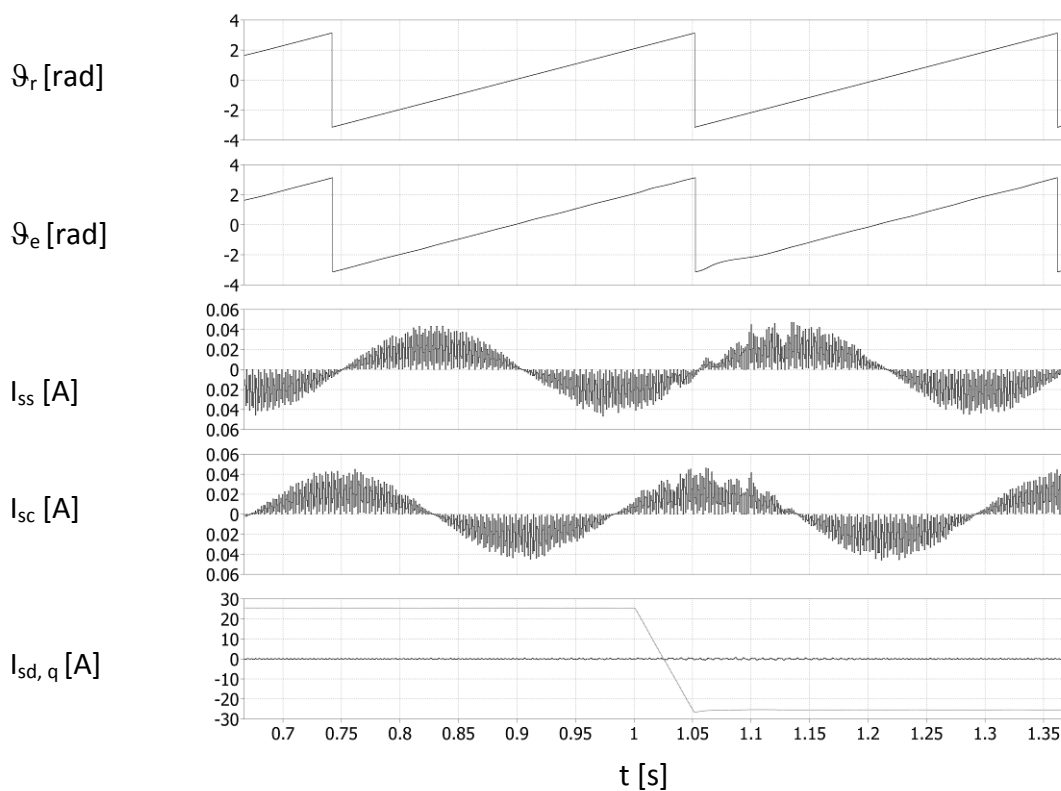
Obr.4.11 Dopravní zpoždění – vliv filtru – vysoké otáčky



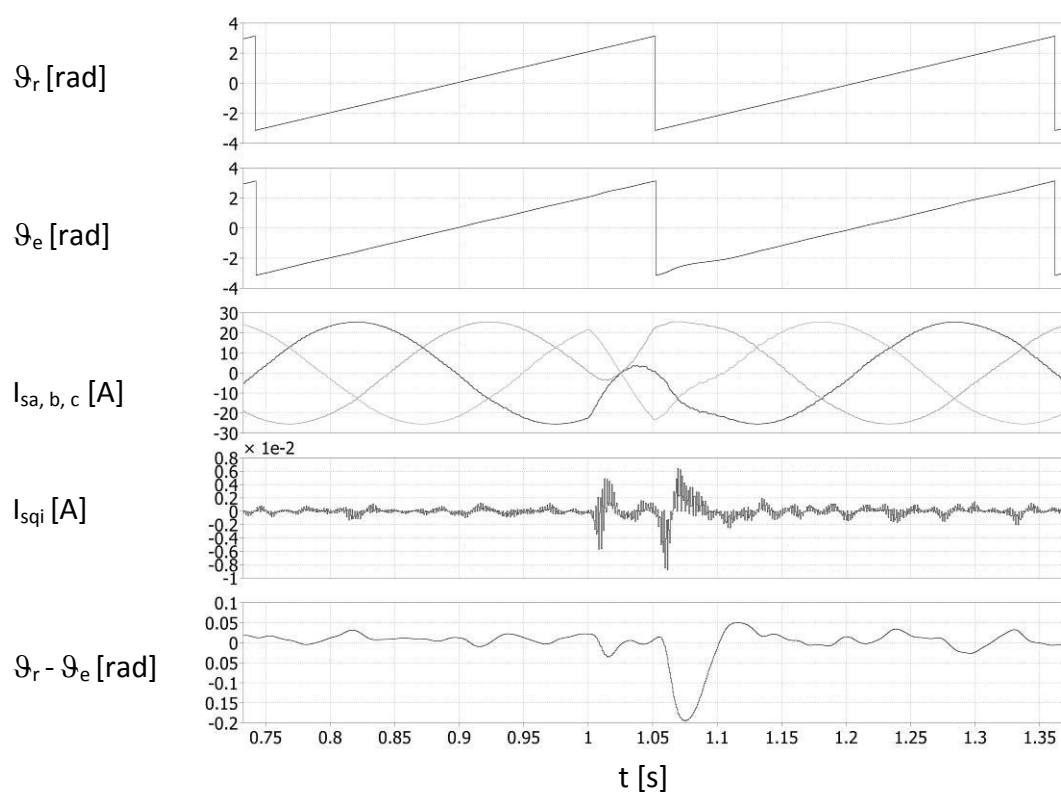
Obr.4.12 Dopravní zpoždění – vliv filtru – vysoké otáčky zoom

Pro další simulace byl regulátor fázového závěsu R_{PLL} nastaven dle tabulky v kap. 5.2. Při případných problémech kmitání v nízkých otáčkách a vypadnutí ze synchronizmu ve vysokých otáčkách, je možné použít adaptivní regulátor v závislosti na rychlosti. Pro odstranění chyby polohy v ustáleném stavu vlivem zpoždění filtru je použita kompenzace v podobě přičítání úhlu v závislosti na aktuální rychlosti (zde zvoleny mechanické otáčky rotoru n). Pro daný pohon a filtr dle kapitoly 5 je kompenzační funkce dána:

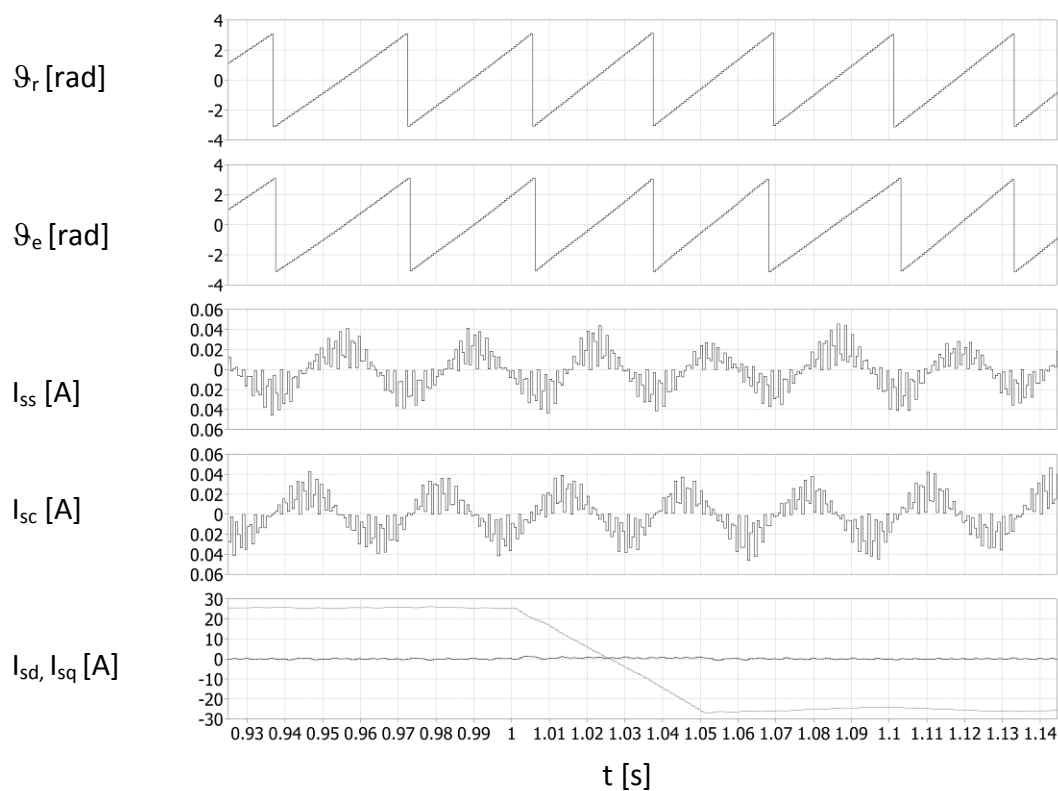
$$\begin{aligned}
 n > 0 \dots \Delta\vartheta &= 0,0015n + 3 \cdot 10^{-7} n^2 + 0,0209 \\
 n < 0 \dots \Delta\vartheta &= 0,0018n + 0,0272
 \end{aligned}
 \tag{2.1}$$



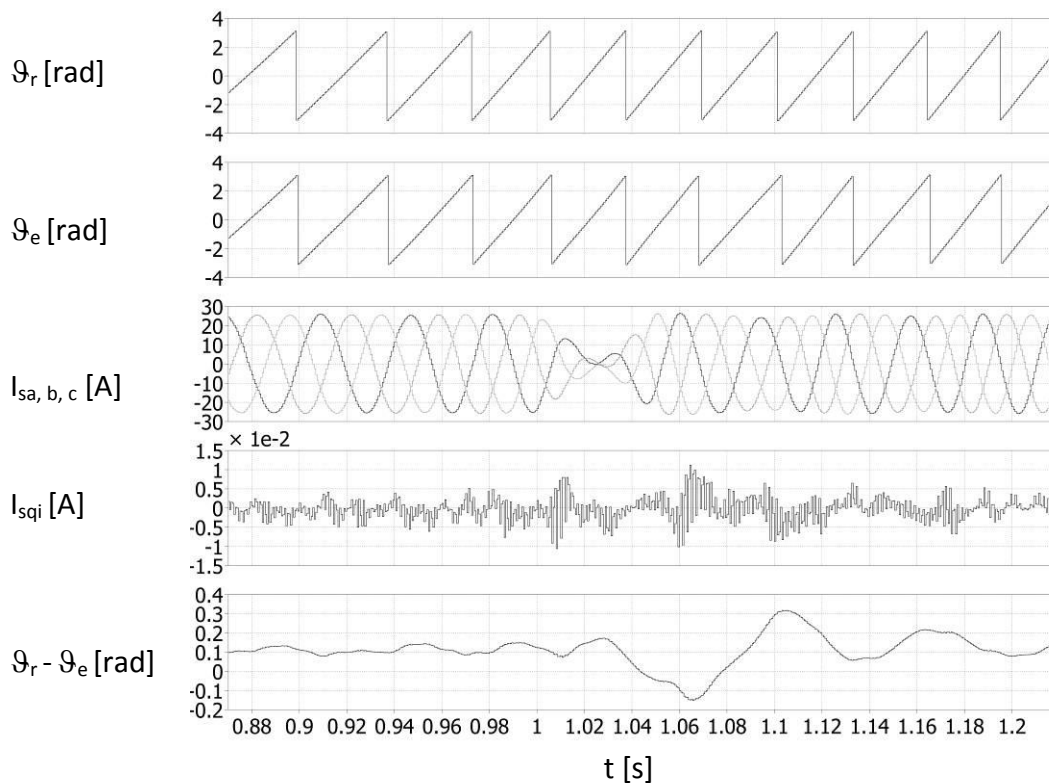
Obr.4.13 Reverzace proudu $I_{sq} = \pm 25,46A$, $J \rightarrow \infty$, nízké otáčky - proudy



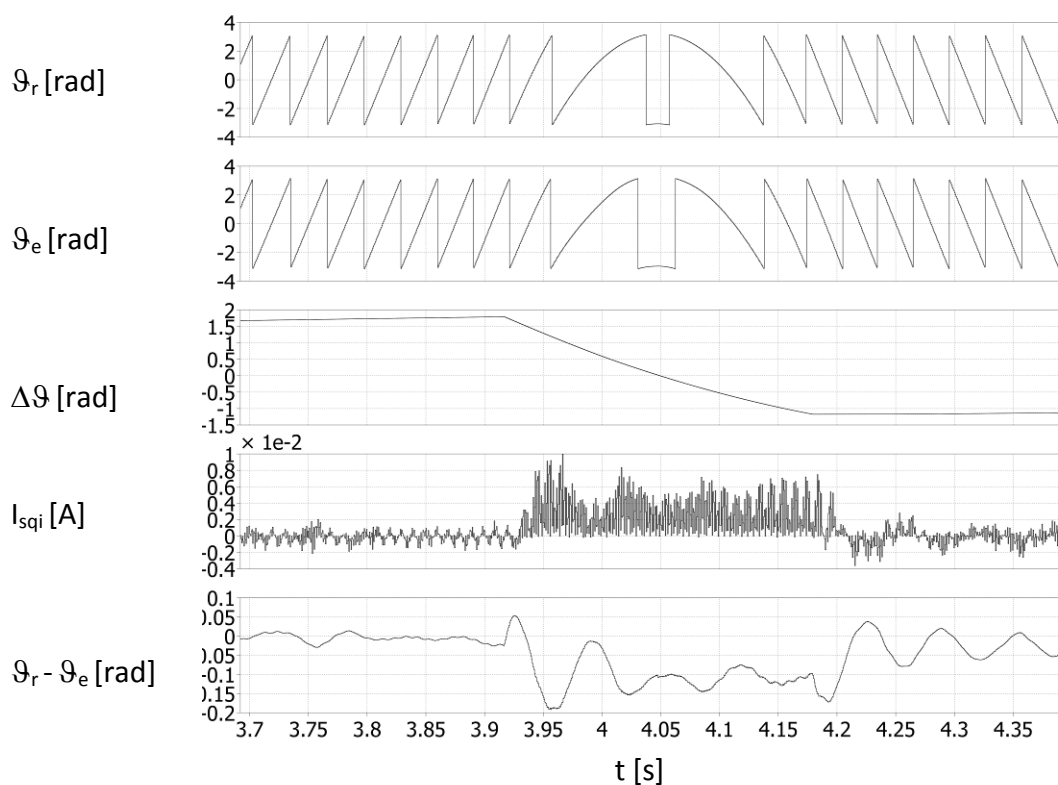
Obr.4.14 Reverzace proudu $I_{sq} = \pm 25,46A$, $J \rightarrow \infty$, nízké otáčky - chyba polohy



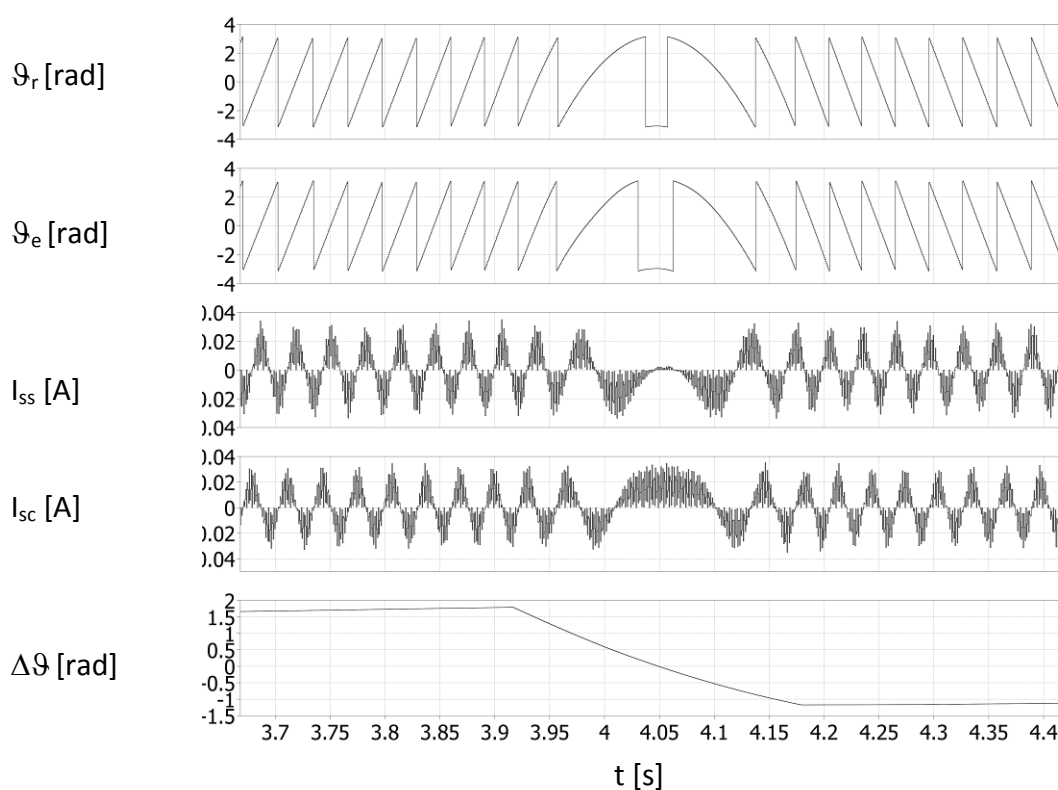
Obr.4.15 Reverzace proudu $I_{sq} = \pm 25,46A$, $J \rightarrow \infty$, vysoké otáčky - proudy



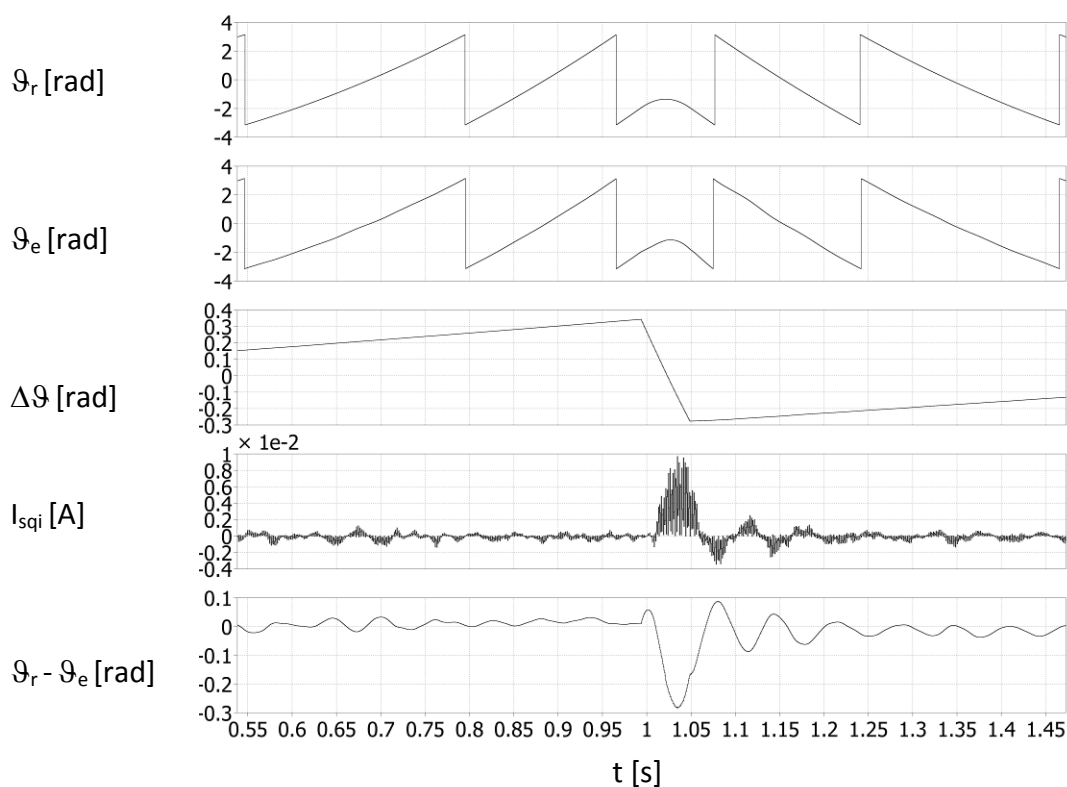
Obr.4.16 Reverzace proudu $I_{sq} = \pm 25,46A$, $J \rightarrow \infty$, vysoké otáčky - chyba polohy



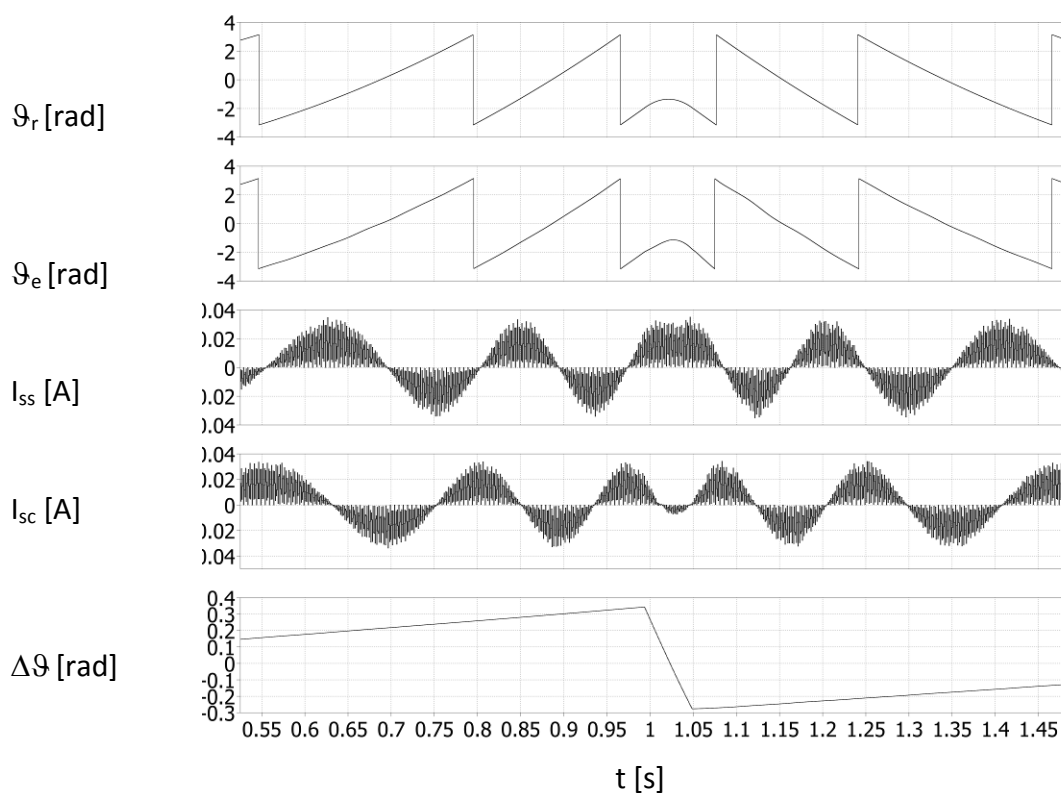
Obr.4.17 Reverzace otáček $n = \pm 1200$ ot./min, skok zátěžného momentu $M_z = 0 \rightarrow 80$ Nm



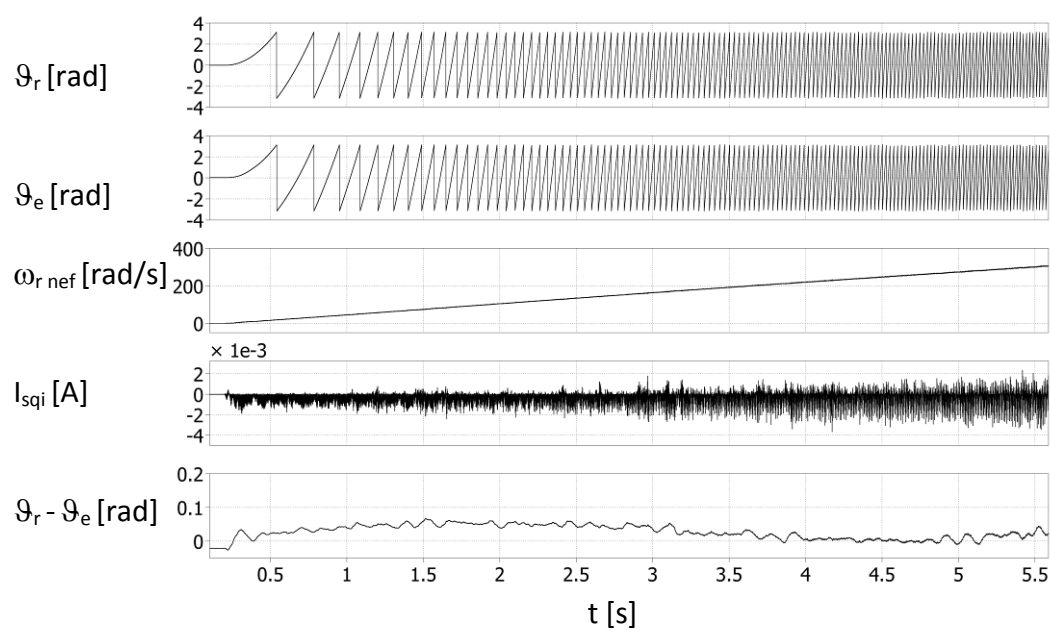
Obr.4.18 Reverzace otáček $n = \pm 1200$ ot./min, skok zátěžného momentu $M_z = 0 \rightarrow 80$ Nm



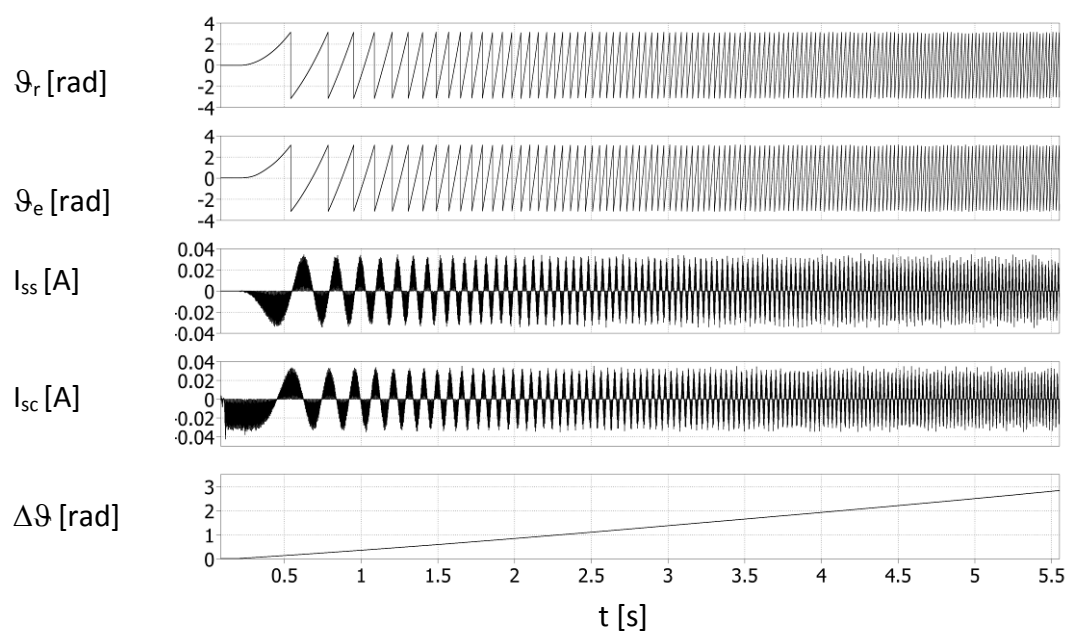
Obr.4.19 Reverzace otáček $n = \pm 1200$ ot./min, skok zátěžného momentu $M_z = 0 \rightarrow 80$ Nm



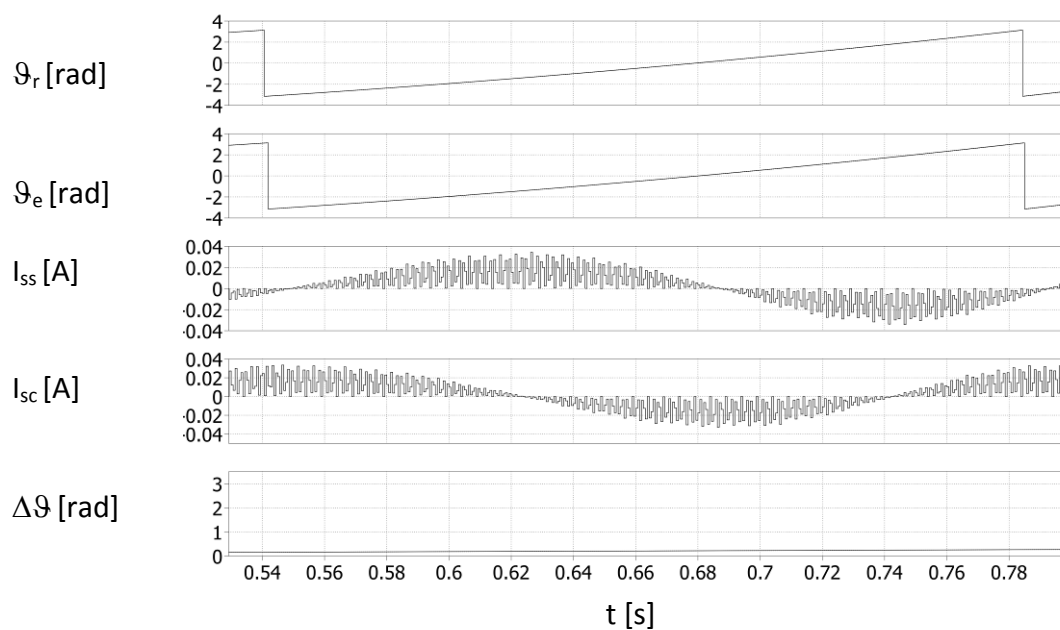
Obr.4.20 Reverzace otáček $n = \pm 120$ ot./min, skok zátěžného momentu $M_z = 0 \rightarrow 80$ Nm



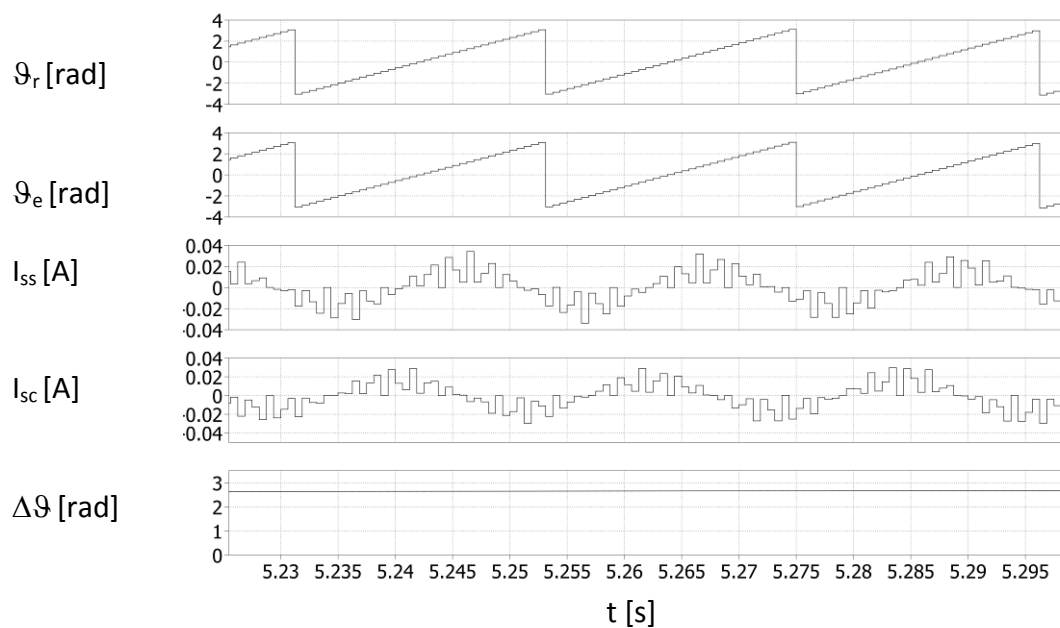
Obr.4.21 Rozjezd pohonu 0 – 1200ot./min – rychlost, poloha



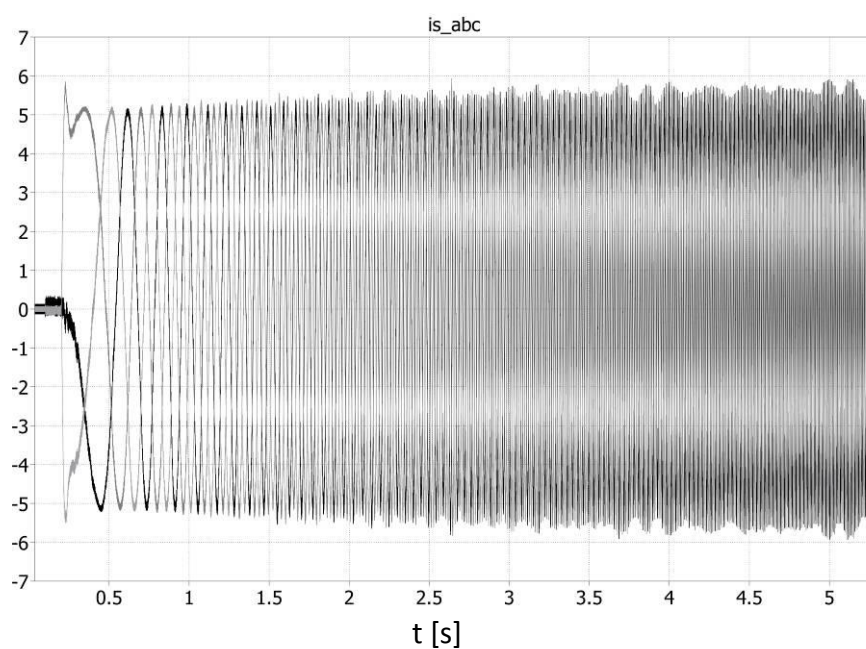
Obr.4.22 Rozjezd pohonu 0 – 1200ot./min – proudy



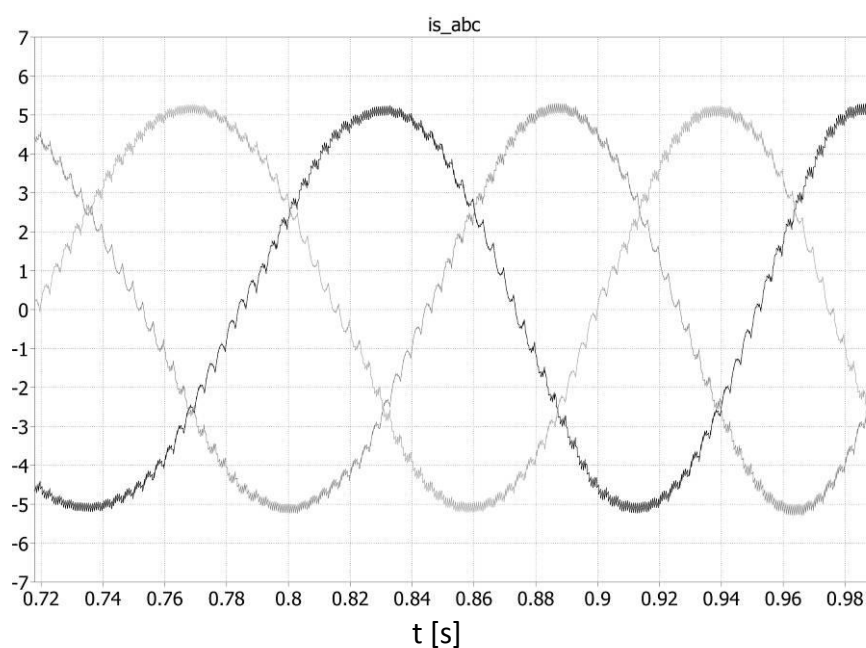
Obr.4.23 Rozjezd pohonu 0 – 1200ot./min – nízké otáčky zoom



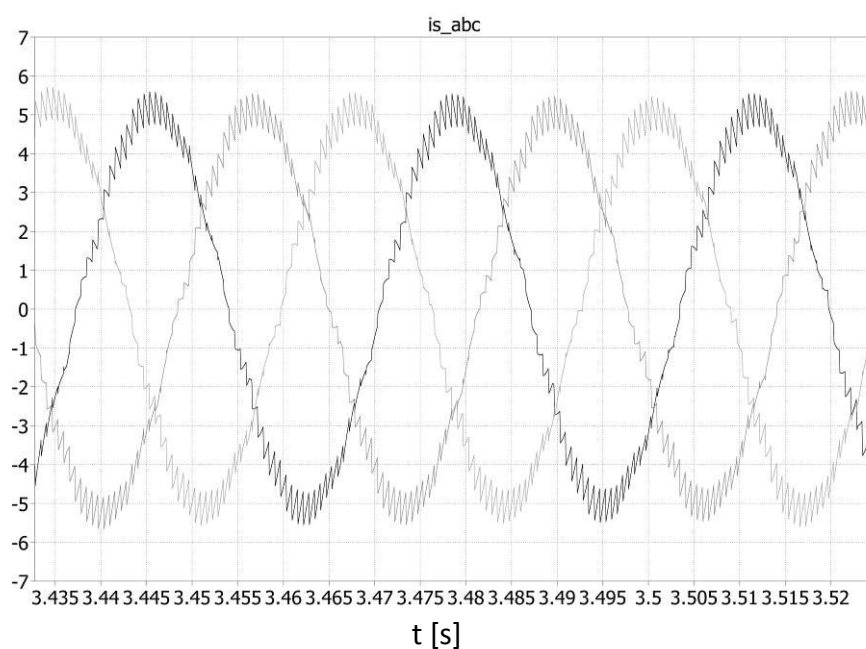
Obr.4.24 Rozjezd pohonu 0 – 1200ot./min – vysoké otáčky zoom



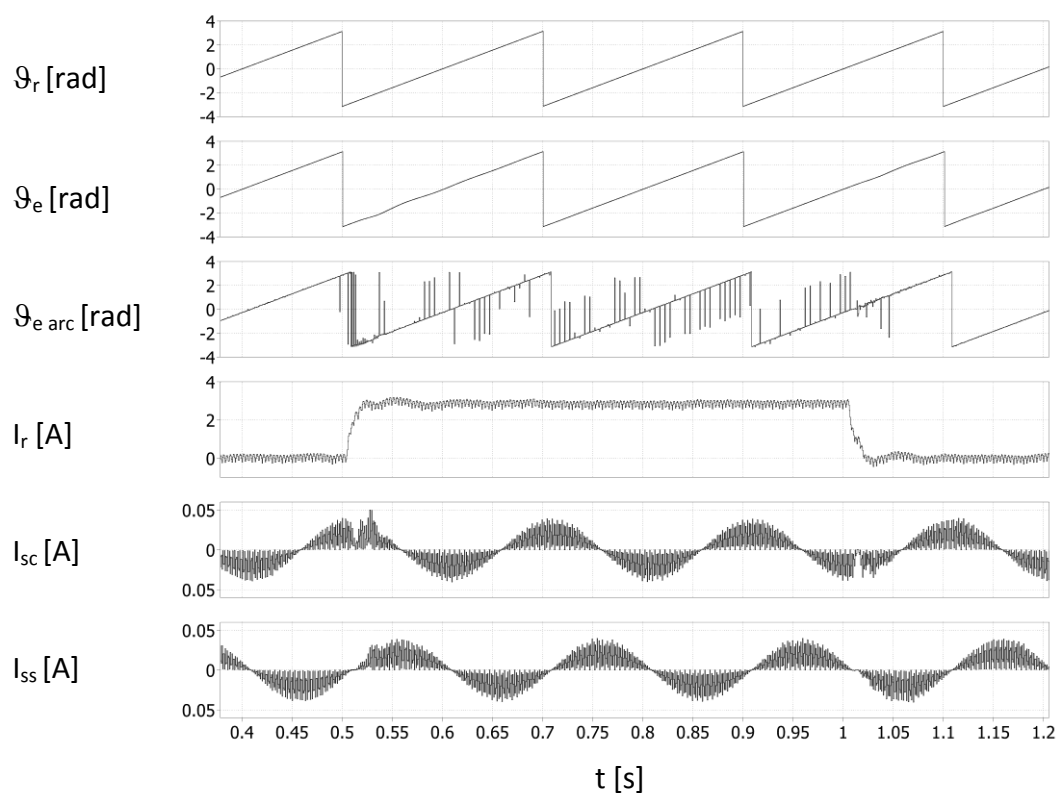
Obr.4.25 Rozjezd pohonu 0 – 1200ot./min – fázové proudy



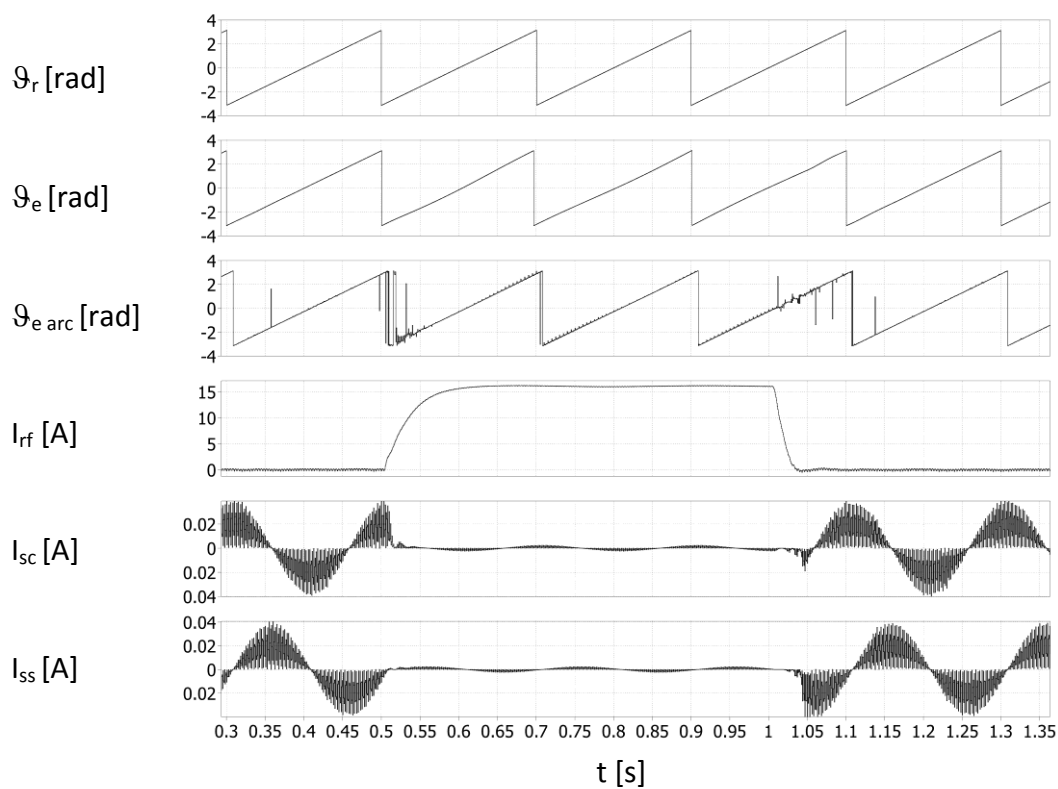
Obr.4.26 Rozjezd pohonu 0 – 1200ot./min – fázové proudy – nízké otáčky zoom



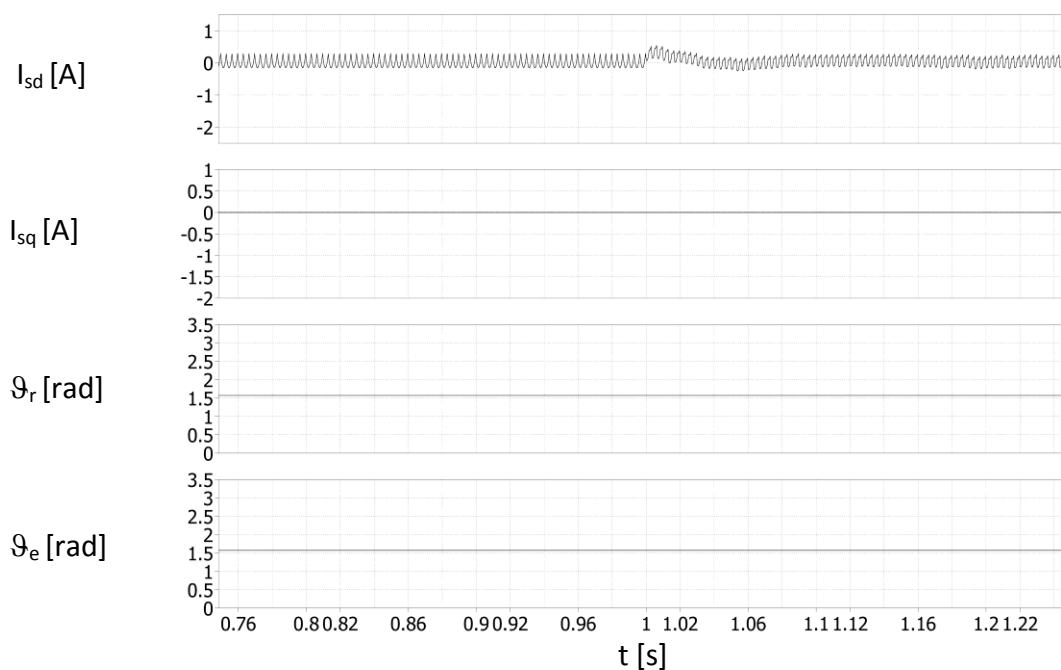
Obr.4.27 Rozjezd pohonu 0 – 1200ot./min – fázové proudy – vysoké otáčky zoom



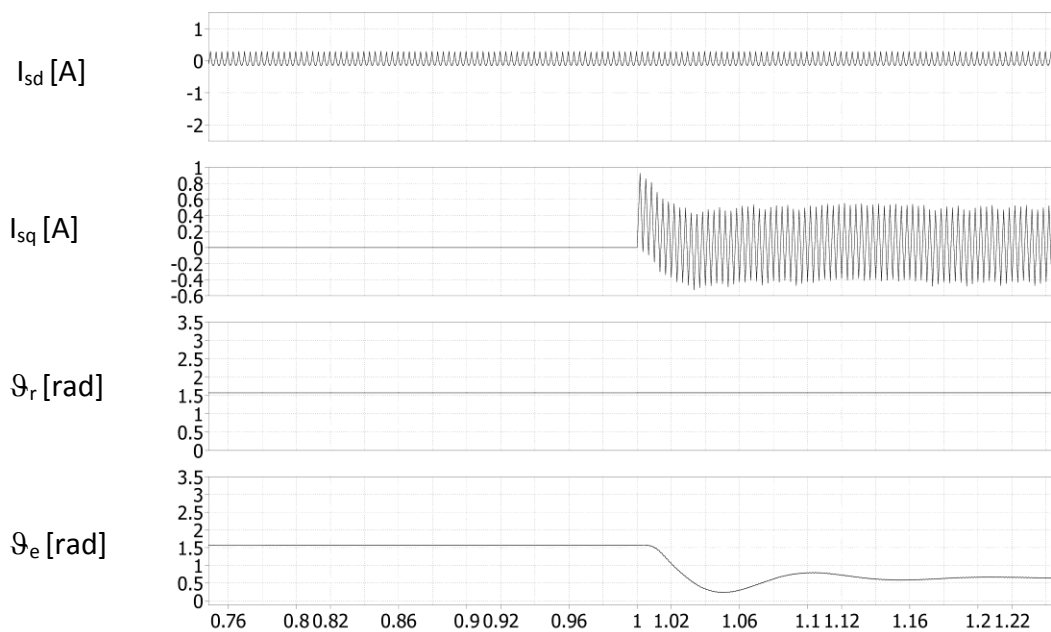
Obr.4.28 Vliv změny úhlu otevření usměrňovače $\alpha \rightarrow 90^\circ$



Obr.4.29 Vliv změny úhlu otevření usměrňovače $\alpha \rightarrow 180^\circ$



Obr.4.30 Vliv zarušení užitečného pásma v ose d – sinusový zdroj motoru



Obr.4.31 Vliv zarušení užitečného pásma v ose q – sinusový zdroj motoru

5 Parametry synchronního motoru a regulace

5.1 Synchronní motor – 10kW

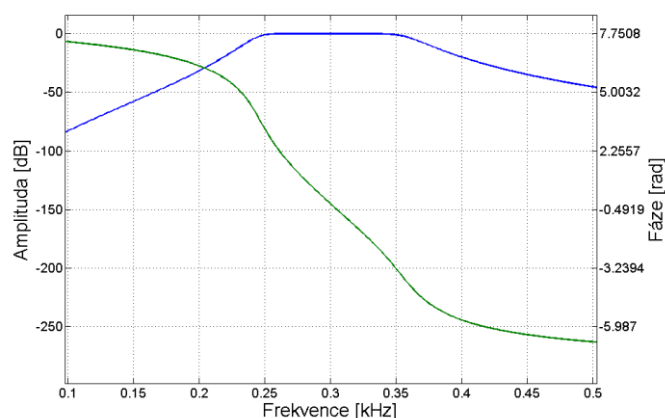
Jmenovitý výkon motoru P_m	10kW
Jmenovitá rychlost n_N	1500 ot./min
Počet pólů p_p	2
Jmenovitý proud motoru I_{sN}	18A _{rms}
Jmenovitý proud buzení I_{fN}	2A
Odpor statoru R_s	0,28Ω
Statorová indukčnost v ose d L_{sd}	90mH
Statorová indukčnost v ose q L_{sq}	25mH

5.2 Parametry regulace

Požadovaná hodnota proudu I_{sdw}	0A
Požadovaná hodnota proudu I_{sqw}	5A
Moment setrvačnosti J	0,1kgm ²
Perioda vzorkování regulátoru T_{vz}	1/1600s
Frekvence pulsně šířkové modulace f_{PWM}	800Hz
Napětí stejnosměrného meziobvodu U_c	700V
Vstupní napětí usměrňovače U_{usm}	60V _{rms}
Proporční zesílení PI regulátorů proudu K_{pIs}	20 [-]
Časová konstanta PI regulátorů proudu T_{rIs}	0,05s
Proporční zesílení PI regulátoru buzení K_{pIf}	0,2 [-]
Časová konstanta PI regulátoru buzení T_{rIf}	0,1s
Proporční zesílení PI regulátoru buzení K_{pPLL}	1500 [-]
Časová konstanta PI regulátoru buzení T_{rPLL}	0,0025s

5.3 Design filtru

IIR filter – metoda návrhu Butterworth, struktura Direct-form II SOS. Filtr musí být souměrný kolem injektované frekvence a propouštět pásmo rovno dvojnásobné maximální základní statorové frekvenci motoru (pro demodulaci jsou nutné obě složky modulované na injektované frekvenci).



Obr.5.32 Design filtru

6 Závěr

Pro estimaci polohy synchronního motoru s vinutým rotorem byla navržena jednoduchá metoda, která využívá analogie konstrukce motoru s konstrukcí analogového absolutního čidla polohy tzv. Resolver. Tato metoda nemá přídavné požadavky na hardware pohonu od nutných komponent pro vektorové řízení pohonu. Zpráva předkládá principiální vlastnosti dané metody s využitím fázového závěsu pro vyhodnocení polohy rotoru. Z principu metody je možné jednoznačně určovat polohu i polaritu natočení rotoru. Vyhodnocení estimované polohy rotoru pomocí fázového závěsu vykazuje bezproblémové vlastnosti v nízkých otáčkách (cca do 300ot./min) a uspokojivé ve vysokých otáčkách. Pro bezproblémovou funkčnost zejména ve vysokých otáčkách (cca 1000ot./min) je nutná kompenzace fázového zpoždění IIR filtrů. Obecně má změna úhlu otevření rotorového usměrňovače vliv na amplitudu injektované složky proudu (změna zvlnění proudu usměrňovače se změnou úhlu otevření), dále změny v buzení mohou při nevhodném návrhu rotorového obvodu (nízká indukčnost, vysoké vstupní napětí usměrňovače -> rychlé změny proudu) zasáhnout do spektra nosného signálu a ovlivnit tak estimaci polohy. Dále je testován vliv rychlých změn statorového proudu. Obecně rychlá změna zasahující do pásma užitečného signálu znehodnotí estimaci. Pokud se jedná jen o krátkodobý zásah, zavěšený estimátor je necitlivý na zarušení v ose d , naopak je destabilizován zarušením v ose q (vstupní signál fázového závěsu).

Literatura

- [1] Uzel, D.; Peroutka, Z.: Pohon se Synchronním motorem s elektrickým buzením: Injektážní metoda na principu resolveru – Teoretický rozbor. Oponovaná výzkumná zpráva č. 22190-022-2012, Plzeň 2012.

Historie revizí

Rev.	Kapitola	Popis změny	Datum Jméno / Odd.
1	Všechny	Publikování dokumentu	30.8.2013 DU / RICE