

**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI  
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ**

**KATEDRA ELEKTROMECHANIKY A VÝKONOVÉ ELEKTRONIKY**

# **BAKALÁŘSKÁ PRÁCE**

**Numerické filtry a bezsenzorové měření teploty**

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI  
Fakulta elektrotechnická  
Akademický rok: 2013/2014

## ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Josef FLAKS**  
Osobní číslo: **E11B0018K**  
Studijní program: **B2644 Aplikovaná elektrotechnika**  
Studijní obor: **Aplikovaná elektrotechnika**  
Název tématu: **Numerické filtry a bezsenzorové měření teploty**  
Zadávací katedra: **Katedra elektromechaniky a výkonové elektroniky**

### Z á s a d y p r o v y p r a c o v á n í :

1. Uveďte principy bezsenzorového měření teploty.
2. Proveďte rozbor používaných numerických filtrů.
3. Zhodnoťte vámi získané poznatky.

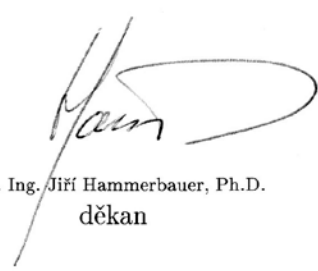


Rozsah grafických prací: **podle doporučení vedoucího**  
Rozsah pracovní zprávy: **20 - 30 stran**  
Forma zpracování bakalářské práce: **tištěná/elektronická**  
Seznam odborné literatury:

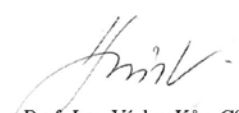
1. <http://ieeexplore.ieee.org/>
2. <http://knihovna.zcu.cz/katalogy/>

Vedoucí bakalářské práce: **Ing. Bohumír Hána**  
Katedra elektromechaniky a výkonové elektroniky

Datum zadání bakalářské práce: **14. října 2013**  
Termín odevzdání bakalářské práce: **9. června 2014**

  
Doc. Ing. Jiří Hammerbauer, Ph.D.  
děkan



  
Prof. Ing. Václav Kůs, CSc.  
vedoucí katedry

V Plzni dne 14. října 2013

## **Abstrakt**

Tato práce se zabývá měřením teploty elektrických točivých strojů. Hlavním tématem je přinést souhrn v nových přístupech získávání teploty uvnitř motoru, a to bezsensorovým způsobem odhadování parametrů. V práci jsou uvedeny tři hlavní metody odhadování teploty a jsou rozebrány metody zpracování signálu hlavními používanými numerickými filtry pro tyto účely.

## **Klíčová slova**

Teplota rotoru, termální model, bezsensorové odhadování teploty, odhadování změnou magnetického toku, aktivní odhadování parametrů, Kalmanův filtr, rozšířený Kalmanův filtr.

**Abstract**

This work is concerned with estimating the temperature of electrical rotating machines. The main theme is to provide a summary of the new approaches to obtaining the temperature inside the engine, and a sensorless method for estimating parameters. The paper presents three main methods of estimating temperature. In this, the numerical filters are discussed for using methods of temperature estimation.

**Key words**

Rotor temperature, thermal model, sensorless temperature estimation, flux observer method, active parameter estimation method, Kalman filter, extended Kalman filter.

## **Prohlášení**

Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou práci vypracoval samostatně, s použitím odborné literatury a pramenů uvedených v seznamu, který je součástí této bakalářské práce.

Dále prohlašuji, že veškerý software, použitý při řešení této bakalářské práce, je legální.

.....

podpis

V Plzni dne 8.6.2014

Josef Flaks

## **Poděkování**

Na tomto místě bych rád poděkoval panu Ing. Bohumíru Hánovi za metodické vedení práce a jeho připomínky během jejího vzniku.

## OBSAH

1 Úvod.....	8
2 Principy měření.....	11
2.1 Termální modely.....	11
2.1.1 Zjednodušený model se třemi tepelnými uzly.....	12
2.1.2 model se dvěma tepelnými uzly.....	14
2.1.3 Vytvoření parametrů tepelného modelu.....	15
2.2 Pozorování změn magnetického toku.....	19
2.3 Aktivní odhadování parametrů.....	22
2.3.1 Vliv rezistance na měnící se teplotu.....	22
2.3.2 Odhadování rotorové teploty použitím vysokofrekvenčního signálového pulzu.....	23
2.3.3 Implementace metody.....	24
3 Numerické Filtry.....	29
3.1 Kalmanův Filtr.....	29
3.1.1 Přehled výpočtu.....	29
3.1.2 Algoritmus vzniku filtru.....	31
3.2 Rozšířený Kalmanův filtr (EKF).....	33
3.2.1 Definice pro vznik EKF.....	33
3.2.2 algoritmus vzniku EKF.....	34
3.3 Znárodnění práce filtrů.....	35
4 Závěr.....	36
Seznam literatury a informačních zdrojů.....	38



## 1 Úvod

Znalost aktuální provozní teploty elektrického stroje je velmi výhodným aspektem, kterého se může využít v mnoha situacích a to ve prospěch pozorovaného zařízení. Tímto zařízením může být jakýkoliv elektrický stroj: asynchronní, synchronní, stejnosměrný a další. Znalost teploty je rovněž velmi důležitá kvůli materiálům použitých ve stroji. Pokud na tyto materiály má teplota neblahý vliv, je dobré znát aktuální průběh teploty a držet ji pod mezní hranicí, která by způsobila potíže v chování stroje. Zjišťování tepelného stavu je také zásadní otázkou v předpovídání spolehlivosti a životnosti motoru.

Význam tepelné identifikace elektrického motoru je zdůrazňován v mnoha pracích [1]. Změření teploty statoru je velmi snadné, proto se většina výzkumů zabývá správným určením teploty rotoru stroje. Tyto správné hodnoty teplot motoru je dobré znát k zajištění standardů výroby během technologických procesů v mnoha průmyslových odvětvích. Sledovací systém, pracující s teplotními daty stroje, může předcházet přetěžovanému chodu stroje, čímž zvýší spolehlivost motoru. Dále může detekovat možnost selhání v důsledku přetížení provozem a tím zvyšuje spolehlivost většího celku. Sledování teplotního stavu je velmi důležité u strojů s permanentními magnety (PM). Výkon PM strojů je silně ovlivněn teplotou magnetů kvůli jejich teplotně závislým vlastnostem, které určují použité látky při výrobě magnetů. Vlivem teploty dochází ke změně magnetických schopností použitých magnetů a v krajním případě může dojít k jejich nevratné demagnetizaci při dosažení Curierova teplotního bodu. Dalším citlivým místem elektrických strojů je druh použité izolace vinutí, jejíž maximální provozní teplota je určena její třídou. Teplota je pak hlavním činitelem pro degradaci izolace a snižuje její dobu životnosti.

Zjišťování teplotního stavu motoru by mohlo být realizováno několika rozličnými způsoby. První možnost, která napadne každého, je přímé měření teploty. Při tomto měření se používají kontaktní teplotní čidla. Tyto čidla jsou umístěna nejlépe na vhodných místech po celé délce rotoru. Data ze senzorů se shromažďují v datovém vysílači a jím jsou přenášena na stacionární přijímač. Přenos signálu lze realizovat různými způsoby, jako jsou kroužkové sestavy, radiová telemetrie či světelný přenos. Zpracovávaný signál ovšem může v sobě nést spoustu problémů v podobě elektrických šumů, vibrací a spousty dalších, které je potřeba vyřešit. Nicméně tato měření dosahují velké přesnosti. Díky využívání více zabudovaných senzorů v různých místech rotoru lze zohledňovat axiální a radiální rozložení teploty uvnitř motoru. Kvůli měření teploty a přenosu signálu se vyžadují některá speciální uzpůsobení v konstrukci stroje,

a proto jsou tyto metody vhodnější spíše pro laboratorní sestavení nežli pro průmyslové využití motorů.

Druhá možnost je v bezkontaktních metodách, které jsou snadněji implementovatelné, protože nemusejí mít přenos z rotující se části stroje. K tomu účelu se dají využít infračervené senzory nebo infračervené kamery, fosforová termometrie a jiné. Bezkontaktní metody jsou vhodné převážně pro velké stroje pracující při nižších otáčkách. Kromě toho většina metod ukazuje jen průměrnou teplotu, a tedy nemohou dostatečně dobře zohlednit teplotní rozložení stroje. Instalace těchto zařízení je problematická a navíc snižuje robustnost stroje a zvyšuje jejich cenu.

Při dalším zamyšlení se dostáváme k tématu této práce a to je bezsenzorové měření teploty. Myšlenka bezsenzorového měření vychází z úvahy využití měřitelných elektrických signálů vycházejících z motoru k odhadování jeho teploty. Při aplikování této myšlenky nedochází k vůbec žádnému teplotnímu měření. Veškeré teplotní výstupy jsou odhadovány na základě měření se parametrů stroje. Tudíž by přesnější název této problematiky mohl znít - zjišťování teploty na základě měřených údajů. Jedná se o neinvazivní metodu na konstrukci stroje, kde potřebujeme využít pouze měření parametrů elektrických veličin, která jsou na stroji změřena. Tyto nepřímé metody odhadování teploty lze rozdělit do tří skupin podle hlavních přístupů:

- Termální modely – vyžadují dobrou znalost geometrie stroje, chladicího systému a zejména materiálové specifické parametry. Jejich použití je spíše omezeno na průmyslové použití se znalostí prostředí a provozních podmínek.
- Metody pozorování změn magnetického toku – podle odhadu množství demagnetizace je získána teplota rotoru. To vyžaduje přesné modelování nelinearit na měniči. Nelineární vztah mezi proudem a tokem je definován náhledovou tabulkou (LUT – look up tables). Mimoto je vyžadováno přesné získávání parametrů stroje a měniče.
- Metoda aktivního odhadování parametrů – pomocí vysoko frekvenčního připojeného signálu. Tento přístup je založen na změnách ve vysoko frekvenčních statorových a rotorových odporech v důsledku kolísání teploty a vyhodnocuje nepřímo teplotní úroveň permanentních magnetů. Robustnost a přesnost této metody je silně ovlivněna neideálním chováním měniče (mrtvá doba, kolísání stejnosměrného napětí sběrnice atd.).

Veškeré výzkumy výše zmíněných metod pro určování teploty provozovaného stroje jsou vždy experimentálně ověřovány skutečnými přímými metodami měření. Tím se určuje spolehlivost a přesnost předkládaných odhadů teplotního stavu.

## 2 Principy měření

V této kapitole budou rozepsány principy jednotlivých výše zmíněných metod pro zjišťování aktuální teploty elektrického stroje. U všech zmiňovaných metod se jako příkladu používá synchronních strojů s permanentními magnety. Tyto stroje získávají na popularitě především kvůli jejich vysoké hustotě výkonu, vysoké účinnosti a dobré dynamice [4], a proto se těmto zařízením věnuje nejvíce vědeckého zájmu.

Na principech funkce následujících metod jsou vytvářeny pozorovatelé. Pozorovatelé mají za úkol vyhodnocování těchto metod a poskytovat údaje dalším řídicím prvkům, které mohou v případě potřeby omezit provoz stroje, aby nedošlo k jeho poškození.

### 2.1 TERMÁLNÍ MODELY

Termální nebo také tepelné modely byly jedny z prvních metod pro zjišťování aktuálního stavu teploty uvnitř stroje. Tepelný model se vytvoří pro jednotlivý typ stroje a je zaznamenáván v časové posloupnosti jeho provozu v závislosti na různých podmínkách chodu stroje tak, aby co nejlépe zohledňoval skutečný průběh teploty. Tento způsob zjišťování aktuální teploty je nejuniverzálnějším a dá se použít pro téměř většinu nejen elektrických zařízení, které se zahřívají vlivem provozu.

Tepelné modely elektrických strojů se skládají z tepelných uzlů, které reprezentují oblasti rovnoměrné teploty. Uzly jsou spojeny pomocí tepelných vodičů, které představují vodivý a konvektivní (proudivý) přenos tepla, s tepelnými kondenzátory (zásobníky), které jsou spojeny s každým uzlem, kde se uvažují akumulací účinky. Teplota každého uzlu je stanovena na základě tepelných ztrát motoru injektovaných do tepelné sítě, tepelných vodivostí a kondenzátorů, a s okrajovými podmínkami chlazení. Díky akumulacím účinkům, reprezentovaných tepelnými kondenzátory může být dosaženo určitého přetížení. Odhad teploty PM odvozený od tepelného modelu je nezávislý na magnetizaci PM, představuje skutečnou teplotu PM a může být použit pro rozlišení vratné a nevratné demagnetizace.

Optimální tepelný model by měl zahrnovat veškeré informace z běžného provozního chodu motoru. Měly by v něm být také zaneseny tepelné výkyvy způsobené poškozením některé z části motoru, jako třeba lopatky ventilátoru, zvětšení tření ložisek atd. Pokud bychom do modelu zahrnuli veškeré možné i méně pravděpodobné okolnosti při provozování zkoumaného stroje, získali bychom velice přesný avšak velice složitý model, který by bylo velmi obtížné uvést v použitelný systém kontroly teploty pro daný typ stroje. Proto vznikají

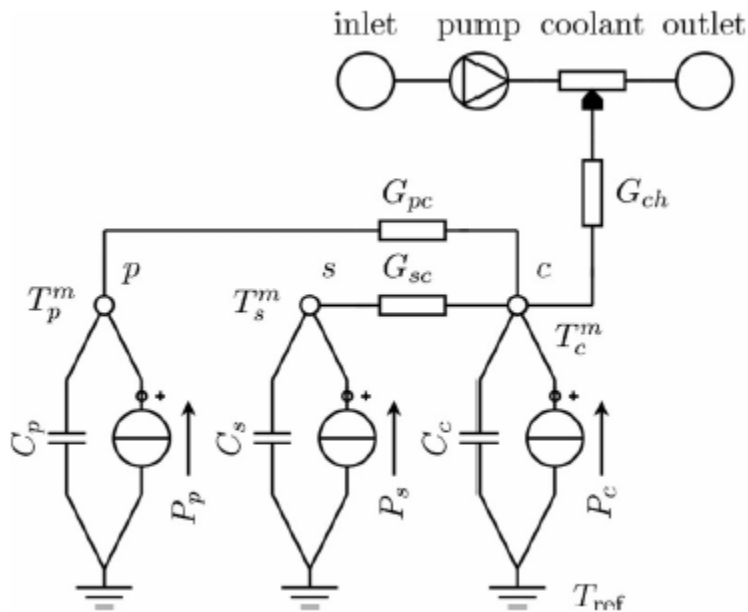
různé zjednodušené modely, u kterých se dbá na co největší přesnost pro provozní aplikovatelnost.

Nejaktuálnější práce týkající se tepelných modelů elektrických strojů jsou založeny **(a)** na jednom nebo více teplotních čidlech ve vinutí statoru nebo **(b)** na snímání chladicí tekutiny a okolních podmínek. Tepelnými modely založenými na (a) nejde přesně určit teplota rotoru, protože část tepelného toku rotoru je vedena přes zuby statoru, nestatorového vinutí. Tudíž zvýšení teploty statorové vinutí kvůli ztrátám v rotoru není tolik znatelné a tudíž je jen obtížně rozlišitelné z nárůstu teploty přes ztráty ve statoru. V případě (b) musí být stanoveny okolní podmínky. Průtok objemu chladicí kapaliny musí být odhadnutý a teplota chladicí kapaliny musí být měřena přímo nebo nepřímo. Podobné snímání může často spoléhat na určité předpoklady, které nemusí být splněny, jestliže tepelné vlastnosti se změní v závislosti na průchodnosti průtoku chladicí kapaliny. Příkladem chybových podmínek vedoucím k těmto nesrovnalostem jsou přetížené nebo zanesené chladicí kanály, rozbitý ventilátor, kde měření nebo odhad celkového proudu vzduchu je používán s pevným tepelným modelem.

Následně uvedený zjednodušený tepelný model je reprezentován třemi teplotními uzly. Tyto tři uzly představují v modelu stroje permanentní magnety (PM), vinutí statoru a magnetický obvod statoru. Takový model může být používán pro předpovídání teploty těchto uzlů v simulacích, protože online aplikace vyžadují velké složitosti modelu, kde se bere v úvahu celý chladicí okruh. Některá nová pojetí nahrazují uzel magnetického obvodu statoru vstupem čidla teploty, kdy pak odpadá explicitní uvažování chladicího okruhu. Tepelné modely zohledňují skutečné teploty stroje ve všech uvažovaných pracovních podmínkách s vysokou přesností pouze tehdy, pokud jsou strukturně úplné a správné. Jakýkoli další tepelný tok, např. způsobený mechanickým spojením zařízení nebo zátěže nemůže být zohledněn žádným tepelným modelem, pokud takový tepelný zdroj nebo jeho zánik není součástí modelu. Žádný tepelný model, byť je velmi propracovaný, nemůže zohledňovat všechny možné vnější tepelné toky, které jsou spojené se zatěžovacími a rychlostními závislostmi.

### **2.1.1 ZJEDNODUŠENÝ MODEL SE TŘEMI TEPELNÝMI UZLY**

Model uvedený na obr. 2.1-1 má tři vnitřní tepelné uzly reprezentující permanentní magnety  $p$ , vinutí statoru  $s$  a jádro (magnetický obvod) statoru  $c$ . Celkové tepelné ztráty jsou rozptýleny v chladicí tekutině, kterou může být vzduch nebo voda.



Obr. 2.1- 1 Zjednodušený tepelný model se třemi teplenými uzly. Obrázek převzatý z [6]. Inlet značí přívod, pump představuje čerpadlo, coolant je chladicí tekutina a outlet označuje výstup. Dále jsou zobrazeny jednotlivé tepelné odpory, uzly a jejich propojení a  $T_{ref}$  jako referenční teplota okolí.

Uzel magnetického obvodu statoru je spojen s permanentními magnety prostřednictvím tepelného odporu  $G_{PC}$ . Tento koncentrovaný prvek přebírá do úvahy tepelnou vodivost přes pevné oblasti a konvekcí přes vzduchovou mezeru. Tepelný odpor  $G_{SC}$  spojuje vinutí statoru a jádro statoru, což představuje vedení tepla z mědi, izolace a železného jádra. V tomto tepelném modelu se předpokládá, že je veškerý tepelný tok převáděný z vnitřní strany na vnější stranu, a prochází jádrem statoru.

Tepelná vodivost z jádra statoru k pouzdro (plášti)  $G_{CH}$  představuje vodivý přenos tepla z jádra statoru přes pouzdro (plášť) až po rozhraní s chladicí kapalinou. V obr. 2.1-1, model tekoucího média, který je používán, bere v úvahu tepelný přenos z chladicích žebírek nebo potrubí na chladicí tekutinu.

Modelované teploty  $T_P^m$ ,  $T_S^m$  a  $T_C^m$  spojené s uzly v Obr. 2.1-1 jsou označeny horním indexem  $m$ . Každý vnitřní uzel je také spojený s tepelným zásobníkem (kondenzátorem) a tepelným zdrojem. Zdroje tepla jsou ztráty v dané oblasti. Aby bylo možné předvídat modelované teploty, musí být známy následující:

- 1) Vstupní teplota chladicí kapaliny (teplota na vstupu)
- 2) Objemový průtok chladicí kapaliny;
- 3) Tepelná kapacita chladicí kapaliny;
- 4) Tepelné vodivosti  $G_{PC}$ ,  $G_{SC}$ , a  $G_{CH}$ ;
- 5) Oteplení  $C_P$ ,  $C_S$  a  $C_C$ ;
- 6) Ztráty  $P_P$ ,  $P_S$  a  $P_C$ .

V tomto tepelně ekvivalentním obvodu, tření a toulavé ztráty zatížení nejsou brány v úvahu, protože se předpokládá, že významně nepřispívají ke kvalitě modelu.

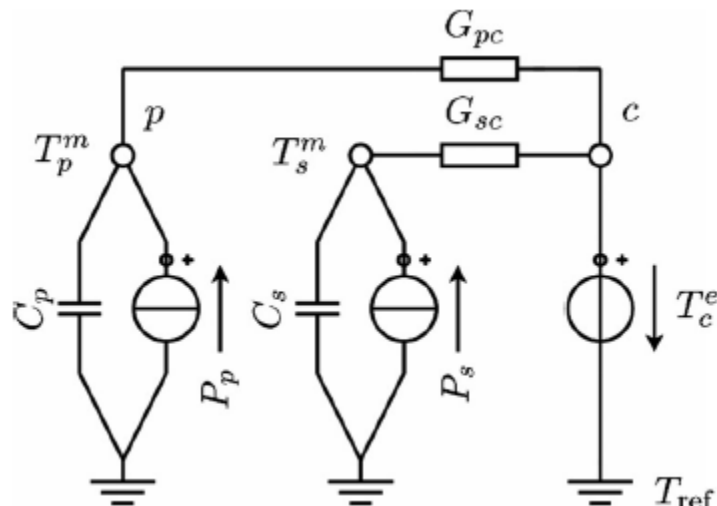
Pro tepelný ekvivalent obvodu, který bude provozován v reálné aplikaci, jsou hlavní nedostatky v tom, že vstupní teplota chladicí tekutiny a její objemový průtok musí být známy. V praxi se objemový průtok může dokonce určit nepřímo z rychlosti ventilátoru chladicí tekutiny nebo čerpadla. Následující podmínky musí být poté splněny tak, aby tepelný model počítal vnitřní teploty správně:

- 1) Tepelná kapacita chladicí tekutiny se nemění.
- 2) Chladicí žebra nebo kanály nejsou přeplněné, aby se objemový průtok odhadoval správně.
- 3) Čidlo pro určování vstupní teploty chladicí tekutiny se ve skutečnosti nachází na vstupu chladicí tekutiny. V opačném případě neočekávaný další zdroj tepla v chladícím okruhu by mohl vést k nesprávně určené hodnotě vstupní teploty chladicí tekutiny.

## 2.1.2 MODEL SE DVĚMA TEPELNÝMI UZLY

Model navržený na obr. 2.1-2 překonává hlavní nevýhody modelování chladicího okruhu. Tento model využívá teplotu jádra statoru  $T_C^e$  jako vstupní veličiny. Aby zjištění teploty permanentního magnetu a statorového vinutí  $T_P^m$  a  $T_S^m$ , teplota statorového jádra musí být

měřena prostřednictvím teplotního senzoru. Tepelný tok mezi tepelnými uzly je určen teplotními rozdíly v příslušných uzlech. Poněvadž teplota jádra statoru je vstupní veličina, chladicí podmínky jsou v podstatě uvažovány v modelu stroje. Tím se podstatně zvyšuje robustnost modelu oproti běžnému modelu předloženému na obr. 2.1-1.



Obr. 2.1- 2 Tepelný model se dvěma teplotními uzly. Obrázek převzatý z [6]. Zde je vidět patrné zjednodušení,

Okolní teploty nejsou vstupem do uvedeného modelu. Od tepelného toku přes tepelné zdroje a tepelné zásobníky se nespolehají na absolutní hodnotu referenční teploty  $T_{ref}$  okolí znázorněné na obr. 2.1-2. Z tohoto důvodu inovativní model vyžaduje pouze jednu měřenou teplotu, tj. teplotu jádra statoru.

### 2.1.3 VYTVOŘENÍ PARAMETRŮ TEPELNÉHO MODELU

Před použitím tepelného modelu pro daný typ stroje se musejí získat požadované parametry:

- 1) tepelné odpory  $G_{PC}$  a  $G_{SC}$  jsou určeny pomocí referenčního nastavení teplot
- 2) oteplení  $C_p$  a  $C_s$  jsou určeny stejným referenčním souborem teplot
- 3) dalšími parametry jsou ztráty  $P_p$  a  $P_s$  jako funkce statorového proudu a frekvence.

Nicméně skutečné ztráty musí být modelovány s cílem umožnit stanovení parametrů  $G_{PC}$ ,  $G_{SC}$ ,  $C_p$  a  $C_s$  a později pracovat s modelem online.

Pro jeden konkrétní druh elektrického točivého stroje se parametrizace provádí pouze jednou. Případný další vyráběný stroj téže konstrukce má obdobné tepelné vlastnosti a tudíž lze předchozí získané parametry použít beze změny, poněvadž se teplota odhaduje hlavně z důvodů tepelně ochranných.



Parametry oteplení a tepelných odporů se určují z téhož referenčního souboru teplot, které se stanoví při laboratorním sestavení. Parametrizace tepelného modelu se provádí s konstantní zátěží pro ohřívací a ochlazovací fázi stroje. Poté se provedou experimentální měření s proměnlivou rychlostí a zátěží, aby se ověřilo úplné přechodové chování tepelného modelu. Pro srovnání odchylek mezi tepelným modelem a skutečné teploty se během experimentálních laboratorních měření umísťují teplotní senzory uvnitř stroje. Referenční teplotu permanentních magnetů  $T_p^e$  získáme zprůměrováním hodnot a počtu čidel. Pro výpočet referenční teploty vinutí statoru  $T_S^e$  dostaneme vztah

$$T_S^e = c_l \cdot T_l^e + \frac{1 - c_l}{2} \cdot (T_a^e + T_b^e) \quad (2.1 - 1)$$

Protože je teplota ve vinutí statoru nerovnoměrně rozdělena, především čela vinutí mohou mít vyšší teplotu než vinutí uvnitř drážek, určuje se teplota právě z těchto hodnot, kdy  $T_a^e$ ,  $T_b^e$  představují teplotu na obou koncích a  $T_l^e$  teplotu uvnitř drážek. Prvek  $c_l$  je poměr délky jádra k polovině délky vinutí vodičů. Hodnoty teplot se získávají alespoň při dvou rychlostech stroje. Ještě se určí referenční teplota jádra statoru  $T_C^e$  taky zprůměrováním hodnot z čidel umístěných radiálně a axiálně na jhu statoru. Pro vysvětlení horní index  $e$  značí data získaná experimentálním měřením a horní index  $m$  označuje, že se jedná o modelovaná data, jak budou uvedena později.

Modely skutečných ztrát jsou v tepelném modelu zahrnuty na základě efektivní hodnotě proudu statoru  $I$ , statorové frekvenci  $f$  a několika dalších parametrů. Teplotní závislost odporu (rezistance) statoru

$$R_S(T) = R_{S,20} \cdot (1 + \alpha_{20} \cdot (T_S^m - 20 \text{ } ^\circ\text{C})) \quad (2.1 - 2)$$

se získává z parametrů stroje, kde  $R_{S,20}$  označuje rezistenci statorového vinutí,  $\alpha_{20}$  je teplotní součinitel odporu, obojí vztažené k teplotě  $20^\circ\text{C}$  a z modelované teploty vinutí statoru  $T_S^m$ . Celkové ztráty statorového vinutí jsou tedy

$$P_S = 3 \cdot R_S \cdot I^2 \quad (2.1 - 3)$$

Uzel teploty  $T_p^e$  představuje teplotu PM. Tepelný tok z uzlu p do uzlu jádra statoru c se však skládá z celkových společných ztrát PM a jádra rotoru. Proto tyto celkové ztráty jsou modelovány ve zdroji tepelného toku  $P_p$  prostřednictvím

$$\frac{P_p}{P_{p,ref}} = \left(\frac{f}{f_{rated}}\right)^a \cdot \left(\frac{I}{I_{rated}}\right)^b \quad (2.1 - 4)$$

s ohledem na parametry stroje. Parametry a, b se volí co nejvhodněji podle analyzování kombinace ztrát PM a jádra rotoru s ohledem na rychlost (frekvenci) a proud.

Tepelné ekvivalentní obvodové parametry  $G_{PC}$ ,  $G_{SC}$ ,  $C_p$  a  $C_s$  jsou výsledkem celkové minimalizace čtverců odchylek teplot

$$\Delta T^2 = \frac{1}{t_{max}} \int_0^{t_{max}} ((T_p^e - T_p^m)^2 + (T_s^e - T_s^m)^2) dt \quad (2.1 - 5)$$

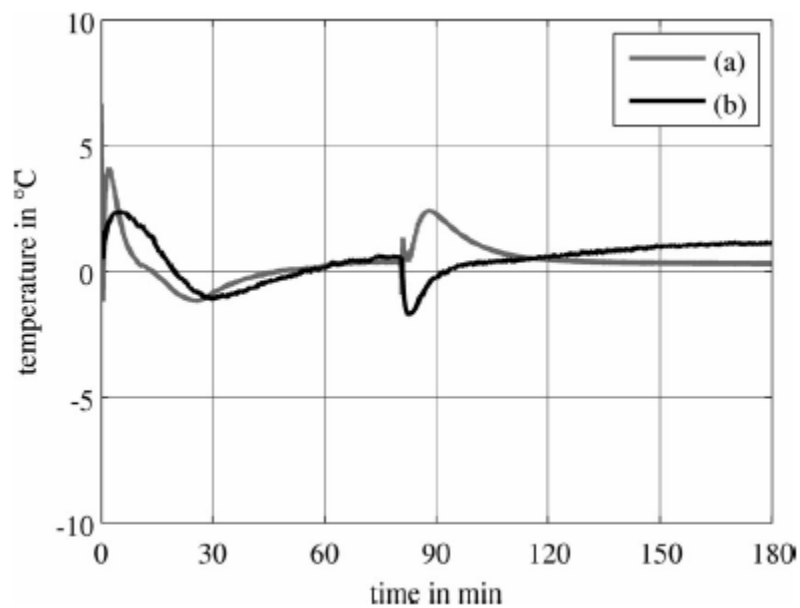
kde  $t_{max}$  je celková doba chodu. Ekvivalentní parametry obvodu jsou získané při jmenovitých otáčkách  $n_{rated}$ . Pro tyto parametry jsou odchylky mezi odhadovanými a naměřenými teplotami

$$\Delta T_s = T_s^e - T_s^m \quad (2.1 - 6)$$

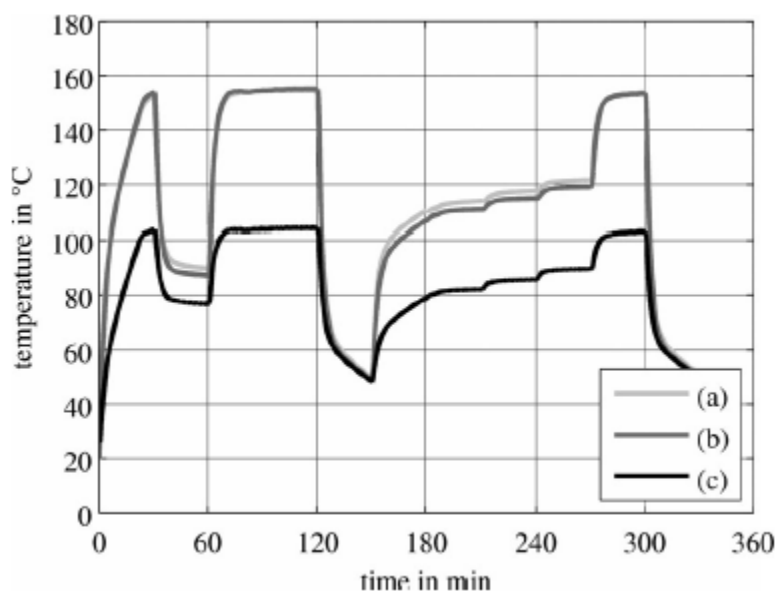
$$\Delta T_p = T_p^e - T_p^m \quad (2.1 - 7)$$

znázorněny na obr. 2.1-3 Pro celý rozsah, teplotní odchylky jsou v rozmezí jen několika málo stupňů. Vzhledem k tomu, že tepelná vodivost mezi permanentním magnetem a statorovým jádrem také zahrnuje účinky proudění přes vzduchovou mezeru, toto množství je modelováno lineární rychlostní závislostí prostřednictvím

$$G_{PC} = G_{PC0} + \Delta G_{PC} \frac{f}{f_{rated}} \quad (2.1 - 8)$$



Obr. 2.1- 3 Teplotní odchylky (a) vinutí statoru  $\Delta T_S$ , (b) permanentního magnetu  $\Delta T_p$ . Obrázek převzatý ze [6].



Obr. 2.1- 4 Průběh teploty. Teplota statorového vinutí: (a) získaná experimentem (b) modelovaná (c) teplota jádra statoru získaná experimentem. Obrázek převzatý ze [6].

## 2.2 Pozorování změn magnetického toku

PM jsou vyráběny z různých materiálů (nejčastěji jsou to vzácné zeminy jako Samarium a Neodym a jejich kombinace s kovy) a mají také rozlišné teplotní chování. Tento způsob odhadování teploty využívá právě těchto teplotně závislých změn vratné demagnetizace permanentních magnetů. Měřením motorů bylo dokázáno, že teplotní citlivost ve vztahu mezi magnetickým tokem a statorovým proudem je způsobena pouze chováním materiálu permanentního magnetu [3].

Model stroje je formulovaný v rotorových referenčních souřadnicích skládající se z d – osy (podélné osy) srovnané s magnetickým tokem PM a q – osy (příčné osy), která je kolmá na magnetický tok permanentního magnetu. Takže teplotní závislost jde definovat takto:

$$\bar{u}_{dq} = R_s(T_s)\bar{i}_{dq} + \bar{\psi}_{dq} + \bar{J}\omega\bar{\psi}_{dq}(T_r) \quad (2.2 - 1)$$

s tím že

$$\bar{\psi}_{dq} = \begin{bmatrix} \psi_p(T_r) + L_d i_d \\ L_q i_q \end{bmatrix} \dots \text{spřažený magnetický tok}$$

$$\bar{J} = \begin{bmatrix} 0 & -1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix} \dots \text{spojovací matice}$$

$T_r, T_s$  ... rotorová a statorová teplota

$$\bar{i}_{dq} = \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} \dots \text{statorový proud}$$

$$\bar{u}_{dq} = \begin{bmatrix} u_d \\ u_q \end{bmatrix} \dots \text{statorové napětí}$$

$\omega$  ... úhlová rychlost

$\psi_p$  ... magnetický tok permanentního magnetu

$R_s$  ... statorový odpor

Speciální vlastnost synchronních motorů s PM je vlastní existence nasycení hlavních indukčností  $L_d$  a  $L_q$  vzhledem k vysokému toku energie. Zejména indukčnost q – osy se může snížit na méně než 20% její jmenovité hodnoty vzhledem k nasycení. Tím vzniká nelineární závislost  $f$  mezi proudem a spřaženým magnetickým tokem, která není

formulována použitím lineární indukčnosti, ale používá se náhledová tabulka (LUT – look up tables). Tyto LUT tabulky se odvozují z měření provedených při definované teplotě rotoru, která slouží jako podklad pro pozorovatele k určení odchylky způsobenou magnetickým tokem. Použití  $f$  naznačuje následující:

$$\hat{i}_{dq} = f \left( \int_{(t)} \bar{u}_{dq} - R_s(T_s) \hat{i}_{dq} - \bar{J} \omega (\bar{\psi}_{dq}(T_r) + \Delta \bar{\psi}_{dq}) dt \right) \quad (2.2 - 2)$$

kde  $f$  je nelineární vztah mezi  $\bar{\psi}_{dq}$  a  $\bar{i}_{dq}$ . Chyba odhadu  $\Delta \bar{i}_{dq} = \bar{i}_{dq} - \hat{i}_{dq}$  se použije k vyladění pozorovatele.

$$\Delta \bar{\psi}_{dq} = k_v \int_{(t)} \Delta \bar{i}_{dq} dt \quad (2.2 - 3)$$

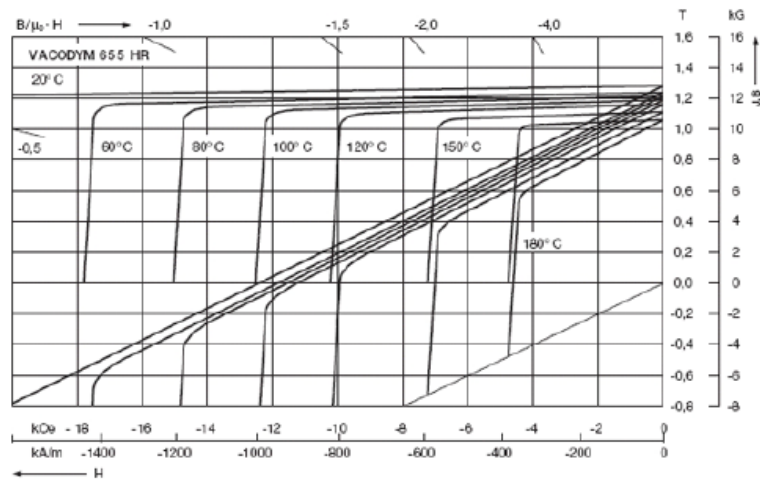
Užitím nelineárního vztahu  $f$  odpovídajícího teplotě 20°C, vypočtený tok může být porovnán s referenčním tokem při dobře definované rotorové teplotě prostřednictvím výsledných proudů. Rozdíl mezi vypočteným a referenčním tokem v d – ose  $\Delta \bar{\psi}_d$  je způsobený teplotou, proto může být zpětně spočten pomocí

$$T_r = 20^\circ C + \frac{\Delta \bar{\psi}_d}{\bar{\psi}_{p,20} \cdot k_{Br}} \quad (2.2 - 4)$$

kde  $\bar{\psi}_{p,20}$  je magnetický tok permanentního magnetu měřený při referenční teplotě 20°C.

Teplotní koeficient  $k_{Br}$  je docela malý, proto pozorovatel musí pracovat s vysokou přesností. Z výsledků prováděných experimentů v [3] bylo ukázáno, že tato metoda dosahuje poměrně vysoké přesnosti v celém rozsahu otáček. Další simulace napověděly, že tato metoda nasycení má dobrý potenciál.

Obrázek 2.2-1 ukazuje demagnetizační křivky na příkladu PM vyrobeného z materiálu ze vzácných zemin, jehož základem je Neodym.



Obr. 2.2- 1 Demagnetizační křivky permanentního magnetu – zde konkrétně zhotoveného z Nd-Fe-B. Obrázek ilustruje teplotní závislost indukce při různých pracovních podmínkách. Pracovní bod magnetu je dán zatěžovací přímkou. Na přímkce je vidět jak silná je magnetizace vlivem teploty. Obrázek převzatý z [10].

V oblasti odhadování teploty založené na této metodě se vypracovávají různé modifikace, které využívají některých poznatků, které vyplynuly z provedených měření. Zejména bylo zjištěno, že vliv indukce PM na účinky nasycení jsou největší v d – ose motoru [10]. Propracovanější úvahy pak směřují k přivedení napěťového pulzu na vinutí v d – ose motoru. Následně je výsledná proudová reakce vyhodnocena a použita nepřímo jako ukazatel magnetizace a posléze jako indikátor teploty v PM. Další možnosti vylepšení této metody se analyzují.

## 2.3 Aktivní odhadování parametrů

V uvedené metodě se používá přiloženého (injektovaného) vysokofrekvenčního nosného signálu. Injektovaný vysokofrekvenční signál, jenž se přivede k základnímu buzení, umožňuje odhadování z přechodové satorové impedance, která je funkcí jak impedance satoru, tak i rotoru. Teplota magnetů má významný vliv na celkovou přechodnou impedanci satoru, ze které se teplota odhaduje. Vysokofrekvenční nosný signál by měl být připojovaný přerušovaně, aby se minimalizovaly nežádoucí účinky na normální chod stroje. Nosný signál by zároveň neměl být nesen příliš vysokou frekvencí, aby se nepřikládala váha nežádoucí složce (induktivní). Injektovaný signál by ovšem měl být s vyšší frekvencí než základní budící frekvence stroje a proto se využívá názvu injektovaný vysokofrekvenční signál.

Tato metoda nevyžaduje žádnou přídavnou kabeláž a z měření byla vyvozena vyšší robustnost a přesnost oproti tepelnému modelu.

### 2.3.1 VLIV REZISTANCE NA MĚNÍCÍ SE TEPLITU

Tato metoda je platná jak pro motory s povrchově umístěnými PM tak i se zabudovanými magnety. Při využívání pouze symetrických částí stroje dostaneme

$$U_{dqS}^S = Z_{dqS}^S(T_s, T_r) \cdot I_{dqS}^S \quad (2.3 - 1)$$

s tím že  $Z_{dqS}^S(T_s, T_r) = \sum R_{(T_s, T_r)} + j \sum X_{L(T_r)}$  a  $\sum R = R_{s(T_s)} + R_{r(T_r)}$

kde  $U_{dqS}^S$  je přiložené vysokofrekvenční napětí,  $I_{dqS}^S$  je indukovaný vysokofrekvenční satorový proud,  $Z_{dqS}^S(T_s, T_r)$  je vysokofrekvenční impedance stroje (s indexy  $T_s, T_r$  naznačující funkci teploty satoru a rotoru),  $\sum R$  a  $\sum X_L$  jsou hlavní vysokofrekvenční rezistance a reaktance stroje,  $R_s$  a  $R_r$  jsou satorové a rotorové rezistance.

Teplotní změny způsobí, že satorové a rotorové rezistance budou kolísat (2.3-2) a magnetické pole vytvořené permanentními magnety se mění, (2.3-3) což vyvolá změnu v d – ose a q – ose indukčnosti stroje.

$$R(T) = R_0(1 + \alpha \cdot \Delta T) \quad (2.3 - 2)$$

$$B(T) = B_{r0}(1 + \Delta T \cdot \alpha_B(T)) \quad (2.3 - 3)$$

kde  $\alpha$  je teplotní součinitel odporu mědi nebo teplotní součinitel magnetického odporu,  $\alpha_B$  je teplotní koeficient magnetického pole PM a T je satorová ( $T_s$ ) nebo ( $T_r$ ) teplota.

Když rotující nosný signál napětí (2.3-4) je aplikován na statorové vinutí stroje, indukovaný nosný signál proudu (2.3-5) bude funkcí statorové a rotorové teploty  $T_s$  a  $T_r$ .

$$u_{dqsc}^S = u_{dqsc}^S = U_c \cdot e^{j(\omega_c t)} \quad (2.3 - 4)$$

$$i_{dqsc}^S(T_s, T_r) = \frac{U_c}{\sqrt{\sum R_{(T_s, T_r)}^2 + \omega_c^2 \sum X_{L(T_s, T_r)}^2}} e^{j(\omega_c t - \varphi_{\sum Z(T_s, T_r)})} \quad (2.3 - 5)$$

$$\varphi_{\sum Z(T_s, T_r)} = \arctan\left(\frac{\omega_c \sum L_{(T_s, T_r)}}{\sum R_{(T_s, T_r)}}\right) \quad (2.3 - 6)$$

kde  $\omega_c$  je nosná frekvence a  $\sum L$  je hlavní indukčnost stroje ( $\sum L = \sum X_L / \omega_c$ ). Je třeba poznamenat, že (2.3-5) se skládá pouze z kladné složky, která vyplývá z (2.3-1) a uvažuje pouze symetrické části stroje.

Všechny tyto analýzy studované na synchronních strojích s povrchově umístěnými PM (SPMSM) platí též pro synchronní stroje se zabudovanými PM (IPMSM). Rozdíly však existují v konstrukci těchto strojů. IPMSM jsou podstatně složitější, vzhledem k velkému počtu konstrukčních proměnných, které musí být uvažovány, např. počet magnetů, jejich tloušťka, délka, hloubka, směr magnetizace, design toku zábran, lávek, jejich poloha, atd. Tyto detaily jsou důkladně studovány a probíhají intenzivní výzkumy.

### 2.3.2 ODHADOVÁNÍ ROTOROVÉ TEPLoty POUŽITÍM VYSOKOFREKVENČNÍHO SIGNÁLOVÉHO PULZU

Jak bylo v předchozí části napsáno, indukčnost  $\sum L$  a rezistance  $\sum R$  jsou obě funkcí teploty magnetů a potenciálně můžou být použity k odhadování teploty magnetů. K tomuto účelů je použití rezistance zprvu výhodné. Odhad lze modelovat s dobrou přesností a má lineární průběh teploty. Zatímco změna indukčnosti na teplotě má velmi nelineární vztah mezi celkovou úrovní nasycení stroje a změnou magnetické intenzity a proto je pro účely odhadování teploty považováno za problematické.

Je-li výsledná vysokofrekvenční impedance  $\sum Z$  dána (2.3-7) a vysokofrekvenční rezistance  $\sum R$  (2.3-8), teplota magnetu může být získána za použití (2.3-9). Statorová vysokofrekvenční rezistance ( $R_{dqsc}$ ) může být měřena jednou, když je stroj za studena a může být uložen do paměti pro další použití. Jestliže je statorová teplota změřena, rezistance může být dynamicky přizpůsobena použitím (2.3-2).



$$\Sigma Z = \Sigma R + j\omega_c \Sigma L = \frac{u_{dqsc}^S}{i_{dqsc}^S} \quad (2.3 - 7)$$

$\Sigma R_{(T_s, T_r)} = |\Sigma Z_{(T_s, T_r)}| \cos(\varphi_{\Sigma Z})$  a po dosazení dostaneme

$$\Sigma R_{(T_s, T_r)} = R_{s(T_0)}[1 + \alpha_{Cu}(T_0 - T_s)] + R_{r(T_0)}[1 + \alpha_{mag}(T_0 - T_s)] \quad (2.3 - 8)$$

$$T_r = T_0 + \frac{\Sigma R_{(T_s, T_r)} - R_{s(T_0)} - R_{r(T_0)} - \alpha_{Cu}(T_0 - T_s)}{\alpha_{mag}} \quad (2.3 - 9)$$

s tím že  $\alpha_{Cu}$  teplotní koeficient odporu mědi a  $\alpha_{mag}$  teplotní koeficient magnetického odporu.

Předchozí vztahy předpokládají, že teplota magnetů je jednotná během normálního provozu. Tento předpoklad byl ověřován v [4]. Došlo se k několika závěrům ohledně teploty magnetů:

- Teplota magnetů je vyšší než teplota zubů statoru a statorového vinutí a to proto, že tepelný odpor rotoru je vyšší než statoru. Tento výsledek je funkcí z různých úrovní ztrát mezi magnety a statorovým vinutím, které jsou závislé na konstrukci stroje a pracovním bodu. Výsledky nevypovídají o všech návrzích PMSM.
- Povrchová teplota magnetů je poměrně jednotná v provozním stavu. Nicméně se očekává, že teplota uvnitř magnetů bude vyšší než na jejich povrchu. Tento předpoklad se ještě důkladně ověřuje.
- Teplota plechů rotoru se přibližuje, ale je trochu nižší než teplota magnetů. To se dalo očekávat, protože ztráty vířivými proudy v plechu jsou obvykle nižší než ztráty vířivými proudy indukovaných v magnetu.

### 2.3.3 IMPLEMENTACE METODY

#### A) Volba nosného napětí

Výběr amplitudy a frekvence nosného signálu napětí musí být kompromisem mezi přesností a potenciálním zásahem do normálního chodu stroje. Vysokofrekvenční model stroje koresponduje se zatížením RL ve vztahu (2.3-1) s odporovou složkou obsahující požadovanou informaci. Obecné požadavky jsou následující:

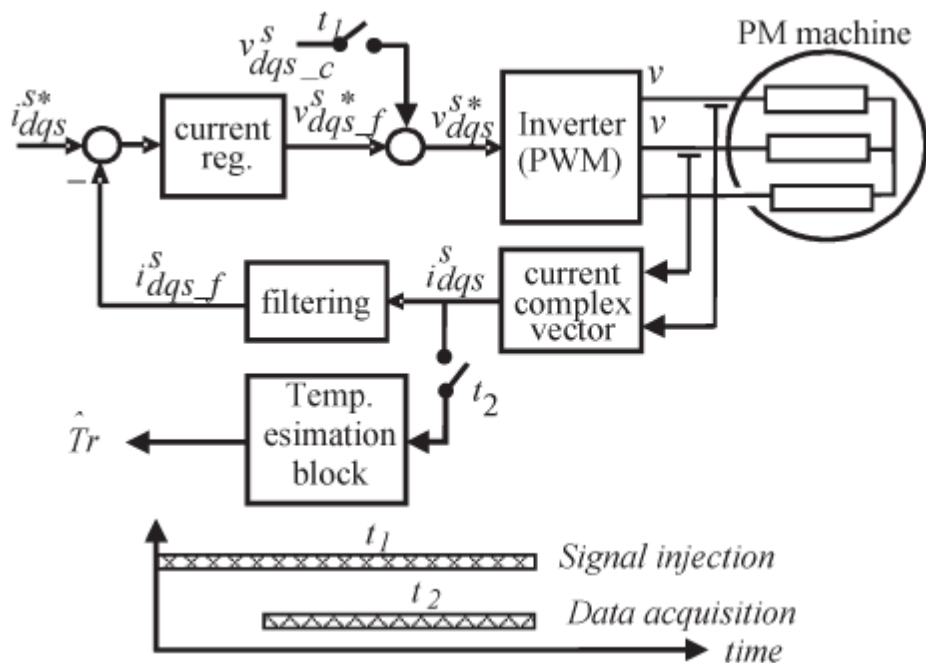
- Zvyšující se nosné napětí bude zvyšovat úměrně velikost výsledného nosného proudu. Tím se zvýší odstup signálu od šumu proudových senzorů a sníží se kvantizační chyby

v A / D převodníku, dojde ke zlepšení celkové přesnosti metody. Avšak velké nosné proudy způsobují přídavné ztráty v rotoru a statoru, vytvářejí akustický hluk a vibrace, atd. Velikost nosného napětí musí být kompromisem mezi jmenovanými.

- Vyšší nosná frekvence bude přikládat větší váhu induktivní složce, která je nežádoucí, oproti rezistanční složce, která je požadovaná. Proto by měla být preferovaná nízká nosná frekvence.
- Vyšší nosná frekvence zvýší spektrální oddělení signálů od základní budící frekvence stroje, tím vznikne jednodušší rozpoznání signálů.

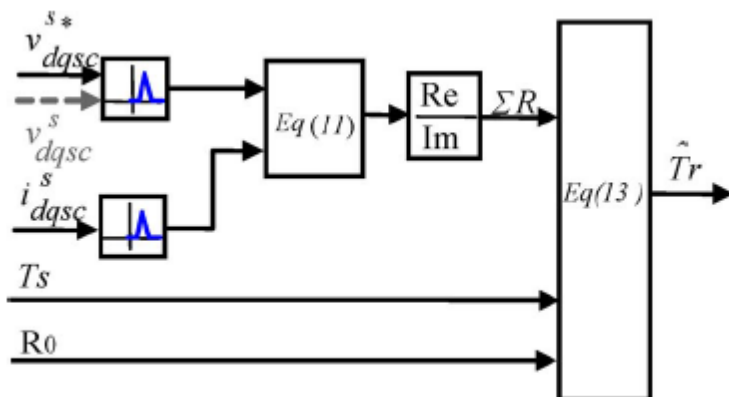
## **B) Aplikování nosného napětí**

Provedení této metody lze učinit pomocí kontinuálního nebo přerušovaného injektovaného nosného signálu napětí. Trvale připojený nosný signál může mít nežádoucí účinky, jako jsou vibrace a další statorové a rotorové ztráty. Zvláště důležité jsou vířivé proudy indukované v magnetech od nosného signálu, protože tyto další ztráty by způsobily vzrůst teploty magnetů a zvýšilo by se riziko jejich demagnetizace. Během normálního provozu se očekává, že se teplota magnetů bude měnit relativně pomalu a tudíž může stačit občasné přiložení nosného signálu. Provádění odhadu teploty je znázorněno na obr. 2.3-1. Injektovaný napěťový signál je přikládán v čase  $t_1$  zatímco proudy jsou měřeny v čase  $t_2$ . Zpoždění je z důvodu uplynutí možných přechodných jevů.



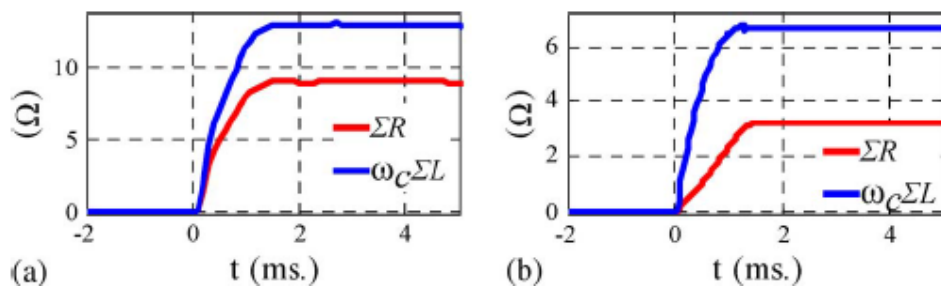
Obr. 2.3- 1 Adaptivní schéma oddělení odporových efektů. Obrázek převzatý ze [4]. Obrázek vystihuje dobu zpoždění v přijímání injektovaného signálu napětí (v obrázku popsáno jako voltage). Signál prochází měničem (inverter) do stroje a následná odezva signálu je zaznamenána snímaním proudu. Do bloku odhadování teploty (Temp. estimation block) je signál vpuštěn až po odeznění možných přechodných jevů v okamžiku  $t_2$ .

Odhadování teploty magnetů znázorňuje blokové schéma na obr. 2.3-2. Doba měření je určena konvergencí času odhadovacího procesu pro vysokofrekvenční impedanci statoru. Toto se provádí pomocí stavových filtrů.



Obr. 2.3- 2 Blokové schéma pro kompenzaci přechodného odporu statoru. Obrázek převzatý z [4]. V bloku Eq(11) se určuje hodnota impedance  $\Sigma Z$  pomocí (2.3-7). Blok Eq(13) provádí samotnou kompenzaci teploty pomocí (2.3-9). Na schématu v představuje napětí (voltage).

Na obr. 2.3-3 je ukázka odhadované statorové impedance. Čas  $t = 0$  odpovídá zahájení  $t_2$  na obr. 2.3-1. Doba ustálení filtrů je 2 milisekundy a po této době jsou údaje impedance dostupné.



Obr. 2.3- 3 Přechodná impedance statoru při injektovaném napětí ( $U_c=10$  V,  $f_c=250$  Hz) – 2 motory (a) a (b).

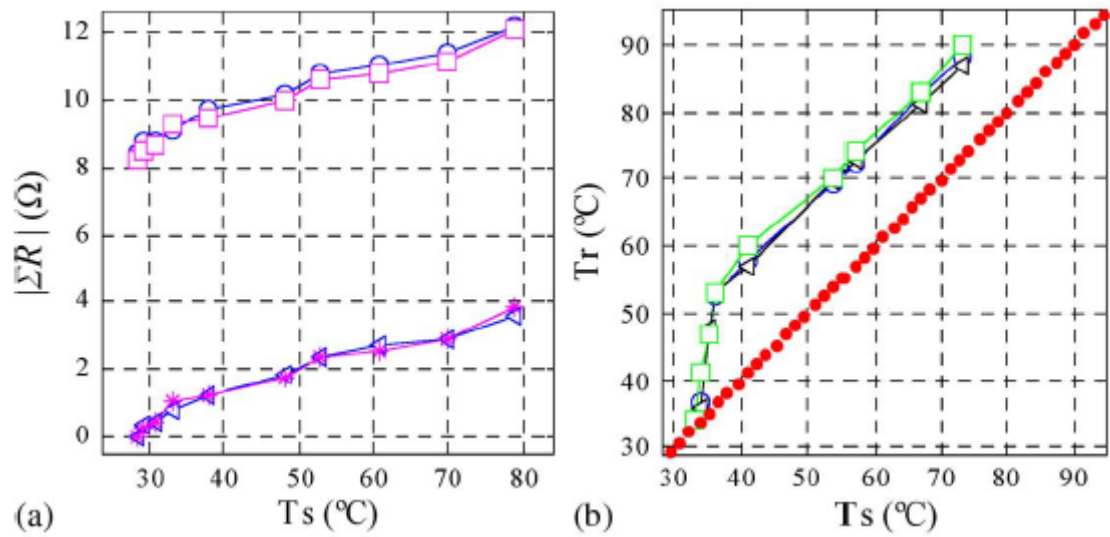
### C) Citlivost na chyby měřeného napětí

V této práci je uveden jen přehled metody, a proto citlivost na chyby napětí je jen zmíněna. Podrobněji jsou chyby napětí popsány a vysvětleny v [4]. Odhadování rezistance vyžaduje měření vysokofrekvenčního proudu a napětí. Většina vysoko výkonových elektrických strojů v sobě obsahuje pouze proudové senzory, zatímco napěťové senzory běžně nemají. Chyby v měřené velikosti a úhlu (2.3 – 10) mezi aktuálním a požadovaným napětím může snižovat přesnost metody. Citlivost odhadu rezistance na chyby ve velikosti měřícího napětí je  $\varepsilon_{U_c}$ . Citlivost je závislá na velikosti a úhlu kladné části nosiče proudu, které odpovídají velikosti a fázi vysokofrekvenční impedance.

$$u_{dqs\ c}^S = (U_c + \varepsilon_{U_c}) e^{j(\omega_c t + \varepsilon\varphi)} \quad (2.3 - 10)$$

Potenciální zdroje vzniku takových chyb jsou nelineární chování zdroje, a to zejména kvůli mrtvým dobám, kolísání napětí stejnosměrného mezi-obvodu a úbytek napětí na výkonových zařízeních.

Na následujících obrázcích jsou znázorněny rozdíly mezi odhadovanými a měřenými hodnotami, které byly zjištěny při experimentálním ověřování spolehlivosti této metody v [4]. Obr.2.3-4 (a) ukazuje odhadovanou střední rezistanci  $\Sigma R$  a odhadovanou rotorovou rezistanci  $R_r$  použitím (2.3-8) a pro obojí odhadování i průběhy s kompenzováním mrtvé doby měniče. Obr. 2.3-4 (b) ukazuje průběh měřené a odhadované teploty rotoru.



Obr. 2.3- 4 Znáznornění průběhů (a)  $R_s$ , střední měřená rezistance statoru (○) a (■) s kompenzací vlivů měniče.  $R_r$ , střední odhadovaná rezistance rotoru (◁) a (x) s kompenzací mrtvé doby-měniče. (b) měřená teplota magnetu (○), odhadovaná teplota magnetu (■), odhadovaná teplota s kompenzací mrtvé doby měniče (Δ). Obrázek převzatý z [4].

## 3 Numerické Filtry

Numerické filtry se používají pro interpretaci výstupů zjištěných dle výše uvedených principů. Filtry mají za úkol z velkého množství měřených dat vybrat kvalitní pozorování, protože při měření může docházet k nepřesnostem, jež by mohly vést k až k nepoužitelnosti dříve zmíněných metod, pokud by se používaly samostatně. Dále se filtry využívají k sestavení vhodné předpovědi budoucího vývoje teploty tak, aby odpadla nadbytečná měření, která by mohla též neblaze ovlivňovat teplotu měřeného zařízení. Pro odhadování teploty stroje se používají zejména lineární Kalmanův filtr a jeho upravená varianta rozšířený Kalmanův filtr.

### 3.1 KALMANŮV FILTR

Kalmanův filtr je algoritmus, který využívá soubor matematických rovnic, které poskytují efektivní výpočetní řešení metodou nejmenších čtverců. Algoritmus pracuje se sérií měření zjišťovanou v průběhu času, která obsahuje náhodné změny a jiné nepřesnosti, a vytváří odhady neznámých proměnných, které mají tendenci být přesnějšími, než kdyby byly založené jen na jednom samotném měření. Filtr je velmi silný v několika aspektech: podporuje odhady minulosti, přítomnosti a dokonce i budoucnost stavů, a může tak učinit, i když přesná povaha modelovaného systému je neznámá.

Kalmanův filtr pracuje rekurzivně na tocích rušivých vstupních dat, která obsahují šum, pro vytvoření statisticky optimálního odhadu základního stavu systému. Algoritmus pracuje ve dvou-krokovém procesu. První krok se nazývá predikce, což je předpovědní krok. V tomto procesu Kalmanův filtr vytváří odhady aktuálních stavových proměnných spolu s jejich nejistotami. Jakmile je znám výsledek dalšího měření (nutně poškozený s nějakým množstvím chyb, včetně šumu), jsou tyto odhady aktualizovány s použitím váženého průměru, který přikládá větší váhu odhadům s vyšší jistotou. Tento krok se nazývá updatem. Protože algoritmus je rekurzivní povahy, může běžet v reálném čase pomocí pouze stávajícího vstupního měření a dříve vypočítaného stavu s jeho maticí nejistoty. Žádné dodatečné dřívější informace nejsou vyžadovány.

#### 3.1.1 PŘEHLED VÝPOČTU

Kalmanův filtr je účinný rekurzivní filtr, který odhaduje vnitřní stav lineárního dynamického systému z řady rušivých měření. Všechna měření a výpočty založené na modelech jsou do určité míry odhady. Rušená data senzorů aproximovaná v rovnicích, které popisují, jak se

system mění, a vnější faktory, které nejsou zachyceny pro zavedení určitých nejistot odvozených hodnot pro stav daného systému. Kalmanův filtr průměruje předpověď systémového stavu s novým měřením pomocí váženého průměru. Smyslem vah je, že hodnoty s lepším (tj. menším) odhadem nejistoty jsou více důvěryhodné. Váhy jsou vypočteny z kovariance, míry odhadované nejistoty předpovědi systémového stavu. Výsledkem váženého průměru je nový stav odhadu, který leží mezi předpokládaným a měřeným stavem, a má lepší odhadované nejistoty, nežli každý samostatně. Tento proces se opakuje každý časový krok, s novým odhadem a jeho kovariancí informuje předpověď použité v následující spolupráci. Filtr vyžaduje pouze poslední nejlepší odhad, než celou historii systémového stavu k výpočtu nového stavu.

Protože jistotu měření je často obtížné změřit přesně, je běžné diskutovat chování filtru a jeho ziskem. Zisk je funkcí relativní jistoty měření a odhadem současného stavu, a může být nastaven na dosažení určitého výkonu. S vysokým ziskem filtr klade větší váhu na měření. S nízkým ziskem, filtr sleduje modelové předpovědi těsněji, vyhlazuje šумы, ale snižuje citlivost. V krajních případech nastavení zisku na hodnotu jedna způsobí, že filtr ignoruje výhradně stav odhadnutý (tj. výsledkem bude hodnota měření), zatímco zisk na nulu způsobí ignorování měření. Když se provádějí skutečné výpočty pro filtr (jak je uvedeno níže), stavy odhadu a kovariance jsou kódovány do matic, které zjednodušují práci a přehlednost při výpočtu. To umožňuje reprezentaci lineárních vztahů mezi různými stavy proměnných (jako je poloha, rychlost a zrychlení) v některých z přechodných modelů nebo kovariance.

Aby bylo možné použít Kalmanův filtru pro odhad vnitřního stavu procesu daného pouze sekvencí (řadou) rušených měření, je třeba modelovat proces v souladu s rámcem Kalmanova filtru. To znamená upřesnění následující matice:  $A_k$ , stav přechodu modelu;  $H_k$ , model pozorování;  $Q_k$ , kovariance šumu procesu;  $R_k$ , kovariance šumu pozorování; a někdy  $B_k$ , ovládání vstupního modelu (režim řízení vstupů), pro každý časový krok  $k$ , jak je popsáno níže.

Kalmanův filtr adresuje obecný problém zkoušení odhadu stavu  $x \in R^n$  procesu, který je řízený lineární stochastickou diferenční rovnicí

$$x_{k+1} = A_k x_k + B_k u_k + w_k \quad (3.1 - 1)$$

s měřením  $z \in R^n$ , které je

$$z_k = H_k x_k + v_k \quad (3.1 - 2)$$

Náhodné proměnné  $w_k$  a  $v_k$  představují proces a šum měření. Ty jsou považovány za nezávislé s normálním rozdělením pravděpodobnosti

$$p(w) \sim N(0, Q_k) \quad (3.1 - 3)$$

$$p(v) \sim N(0, Q_k) \quad (3.1 - 4)$$

Matice  $n \times n$   $F$  v diferenční rovnici (3.1 – 1) se vztahuje na stav v čase kroku  $k$  do stavu v kroku  $k + 1$ , v nepřítomnosti řídicí funkce nebo šumu procesu. Matice  $n \times 1$   $B$  se vztahuje k řídicímu vstupu  $u \in R$  do stavu  $x$ . Matice  $m \times n$   $H$  v rovnici měření (3.1 – 2) se týká stavu do měření  $z_k$ .

Definované  $\hat{x}_k^a \in R^n$  značí *a priori* stav odhadovaný v kroku  $k$  daný znalostí dřívějšího procesu v kroku  $k$ ,  $\hat{x}_k \in R^n$  je *a posteriori* stav odhadu v kroku  $k$  daný měřením  $z_k$ . Dále jsou definované *a priori*  $e_k^a = x_k - \hat{x}_k^a$  a *a posteriori*  $e_k = x_k - \hat{x}_k$  odhadované chyby.

Potom tedy je *a priori* odhad chyby kovariance

$$P_k^a = E[e_k^a e_k^{aT}] \quad (3.1 - 5)$$

a *a posteriori* odhad chyby kovariance

$$P_k = E[e_k e_k^T] \quad (3.1 - 6)$$

### 3.1.2 ALGORITMUS VZNIKU FILTRU

Kalmanův filtr odhaduje proces pomocí formy zpětnovazební kontroly: filtr odhaduje proces stavu v nějakém čase a poté získá zpětnou vazbu ve formě šumu měření. Rovnice Kalmanova filtru se rozdělují do dvou skupin: **(a)** rovnice časové aktualizace a **(b)** rovnice aktualizace měření.

**(a)** Rovnice časové aktualizace jsou odpovědné za projektování příštího aktuálního stavu a kovarianční chyba odhadnutá k získání *a priori* odhadu pro následující časový krok. Tyto rovnice se také kvůli své funkci mohou nazývat prognostickými rovnicemi (predikce) a jsou následující:

$$\hat{x}_{k+1}^a = A_k \hat{x}_k + B u_k \quad (3.1 - 7)$$

$$P_{k+1}^a = A_k P_k A_k^T + Q_k \quad (3.1 - 8)$$

Jsou vidět postupující odhady z kroku  $k$  do kroku  $k + 1$ .  $A_k$  a  $B$  jsou ze vztahu (3.1 – 1)



zatímco  $Q_k$  vychází ze vztahu (3.1 – 3).

(b) Rovnice aktualizace měření vytvářejí zpětnou vazbu – začlenění nového měření do *a priori* odhadu pro získání vylepšeného *a posteriori* odhadu. Jako předchozí rovnice mají i tyto další název vyplývající z funkce a to korekční rovnice (korekce) a jsou v tomto tvaru:

$$K_k = P_k^a H_k^T (H_k P_k^a H_k^T + R_k)^{-1} \quad (3.1 - 9)$$

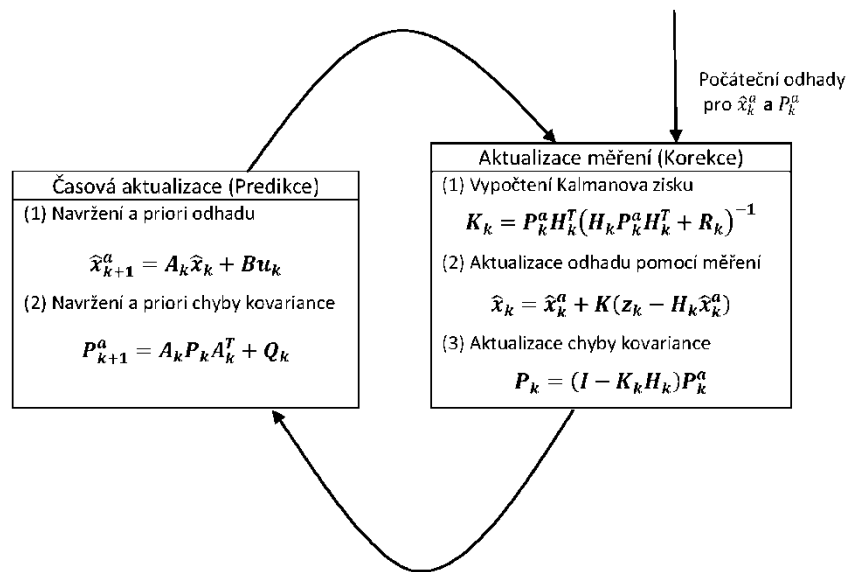
$$\hat{x}_k = \hat{x}_k^a + K(z_k - H_k \hat{x}_k^a) \quad (3.1 - 10)$$

$$P_k = (I - K_k H_k) P_k^a \quad (3.1 - 11)$$

Prvním úkolem je určení Kalmanova zisku  $K_k$ . Dalším krokem je skutečný proces měření pro získání  $z_k$  a následné začlenění měření při generování *a posteriori* stavu odhadu. Posledním krokem je získání *a posteriori* chyby odhadu kovariance.

Výsledný algoritmus prediktor – korektor je podobný algoritmům pro řešení numerických problémů. Po každé dvojici predikce – korekce se proces opakuje s předchozími a posteriori odhady k projekci nových *a priori* odhadů. Tato rekurzivní podoba je jednou z velmi atraktivních vlastností Kalmanova filtru.

Ve skutečném provedení filtru, každé z měření chyb kovariance matice  $R_k$  a šumu procesu  $Q_k$  může být změřeno před spuštěním filtru, to aby se určil rozptyl chyb měření.



Obr. 3.1- 1 Znárodnění funkce algoritmu se shrnutými rovnicemi výpočtu jednotlivých kroků.

## 3.2 ROZŠÍŘENÝ KALMANŮV FILTR (EKF)

Rozšířený Kalmanův filtr (Extended Kalman Filter) vychází z výše popsaného Kalmanova filtru, který pracuje s diskrétními hodnotami. EKF rozšiřuje možnost práce na nelineární vztahy v odhadech nebo měření tím, že linearizuje aktuální střední hodnotu a kovarianci.

Znovu se předpokládá stav vektoru  $x \in R^n$ , ale nyní se systém řídí nelineární stochastickou diferenční rovnicí

$$x_{k+1} = f(x_k, u_k, w_k) \quad (3.2 - 1)$$

s měřením  $z \in R^m$ , které je

$$z_k = h(x_k, v_k) \quad (3.2 - 2)$$

kde náhodná proměnná  $w_k$  a zisk  $v_k$  reprezentují proces a šum měření jako v (3.1 – 1) a (3.1 – 2). V tomto případě nelineární funkce  $f(-)$  v diferenční rovnici (3.2 – 1) se týká vztahu v časovém v kroku  $k$  do vztahu v kroku  $k + 1$ . To zahrnuje jak parametry nějaké řídicí funkce  $u_k$  a nulovou střední hodnotu šumu procesu  $w_k$ . Nelineární funkce  $h(-)$  v rovnici měření (3.2 – 2) se týká stavu  $x_k$  k měření  $z_k$ . V praxi se nemusí znát jednotlivé hodnoty šumu  $w_k$  a  $v_k$  v každém časovém kroku. Může se aproximovat stav a vektor měření bez nich jako

$$\tilde{x}_{k+1} = f(\hat{x}_k, u_k, 0) \quad (3.2 - 3)$$

a

$$\tilde{z}_k = h(\tilde{x}_k, 0) \quad (3.2 - 4)$$

kde  $\hat{x}_k$  je a posteriori odhad stavu z předchozího časového kroku  $k$ .

### 3.2.1 DEFINICE PRO VZNIK EKF

Začne se novým zápisem řídicích rovnic, které linearizují odhady (3.2 – 3) a (3.2 – 4)

$$x_{k+1} \approx \tilde{x}_{k+1} + A(x_k - \hat{x}_k) + Ww_k \quad (3.2 - 5)$$

$$z_k \approx \tilde{z}_k + H(x_k - \tilde{x}_k) + Vv_k \quad (3.2 - 5)$$

Kde

- $x_{k+1}$  a  $z_k$  jsou vektory aktuálního stavu a měření,

- $\tilde{x}_{k+1}$  a  $\tilde{z}_k$  jsou vektory aproximace stavu a měření z (3.2 – 3) a (3.2 – 4),
- $\hat{x}_k$  je a posteriori odhad stavu v kroku  $k$ ,
- náhodné proměnné  $w_k$  a  $v_k$  šumy procesu a měření jako v (3.1 – 3) a (3.1 – 4).
- $A$  je Jacobiova matice částečných derivací  $f(-)$  s respektováním  $x$ , která je
 
$$A_{[i,j]} = \frac{\partial f_{[i]}}{\partial x_{[j]}}(\hat{x}_k, u_k, 0),$$
- $W$  je Jacobiova matice částečných derivací  $f(-)$  s respektováním  $w$ , která je
 
$$W_{[i,j]} = \frac{\partial f_{[i]}}{\partial w_{[j]}}(\hat{x}_k, u_k, 0)$$
- $H$  je Jacobiova matice částečných derivací  $f(-)$  s respektováním  $x$ , která je
 
$$H_{[i,j]} = \frac{\partial h_{[i]}}{\partial x_{[j]}}(\tilde{x}_k, 0)$$
- $V$  je Jacobiova matice částečných derivací  $f(-)$  s respektováním  $v$ , která je
 
$$V_{[i,j]} = \frac{\partial h_{[i]}}{\partial v_{[j]}}(\tilde{x}_k, 0)$$

Nyní se definuje nový symbol chyby predikce

$$\tilde{e}_{x_k} \equiv x_k - \tilde{x}_k \quad (3.2 - 7)$$

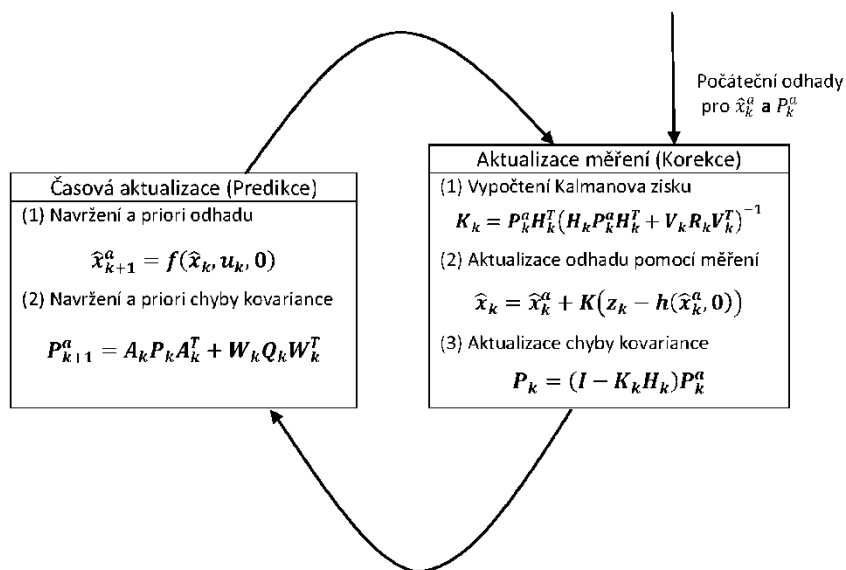
a zbytkové měření

$$\tilde{e}_{z_k} \equiv z_k - \tilde{z}_k \quad (3.2 - 8)$$

### 3.2.2 ALGORITMUS VZNIKU EKF

Jako v předchozí kapitole u jednoduchého Kalmanova filtru se výpočty dělí na dva druhy rovnic: predikci a korekci. Tyto rovnice jsou shrnuty obdobně jako v předchozím případě na obr. 3.2-1.

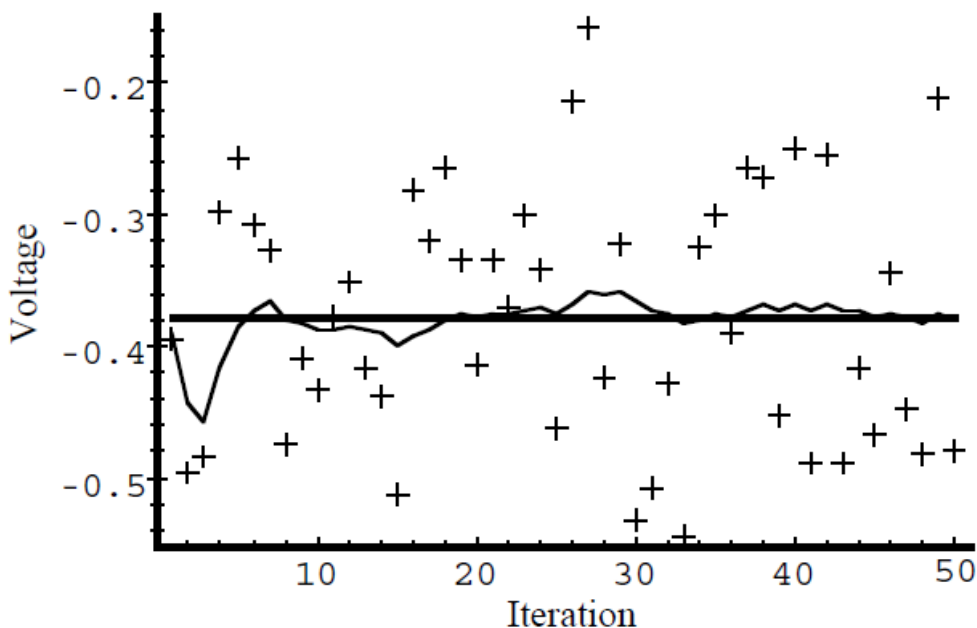
Významy rovnic jsou obdobné, a proto se zde nebudou rozepisovat, vše je důkladně rozebráno a vysvětleno v [9].



Obr. 3.2- 1 Znáornění funkce algoritmu EKF se shrnutými rovnicemi výpočtu jednotlivých kroků.

### 3.3 ZNÁZORNĚNÍ PRÁCE FILTRŮ

Obrázek ukazuje simulaci průběhu odhadu napětí při mnoha měřeních s jistým rozptylem hodnot. Průběh činnosti filtru se může ovlivnit nastavením parametrů pro různé způsoby odhadů dle našich požadavků na výkon či přesnost. Reakce filtru se můžou nastavit tak, aby byl rychlejší a tím i kmitavý průběh nebo plynulejší, ale pomalý průběh. Více je simulacím věnováno v [9].



Obr. 3.3- 1 Průběh činnosti filtru pro  $R=0.01$  a konstantní  $x$ , které představuje pevná čára. Obrázek převzatý z [9]

## **4 Závěr**

Záměrem této práce bylo zejména vytvoření přehledu metod, které se používají pro odhadování teploty uvnitř elektrického točivého stroje. U každé z metod bylo popsáno, na jakém principu spočívá způsob odhadování teploty. Byly uvedeny základní vztahy a veličiny, kterými se řídí následné modelování teplot. Uvedené principy metod se dále vyvíjejí a upřesňují pro dosažení optimálně přesného odhadu teploty, a proto zde byly uvedeny jen hlavní způsoby, od kterých se můžou odvíjet následné upřesňující výzkumy pro konkrétní druh používaného stroje.

Další částí této práce bylo ukázat rozbor numerických filtrů, které stojí po boku metod pro zjišťování teploty a které mají za úkol dosáhnout co největší přesnosti dosažených výsledků odhadování teplot. Na těchto výsledcích se pak zakládá chybovost systému pozorovatele a to může následně ovlivnit funkčnost nejen používaného stroje, ale i návazných procesů.

Následující řádky budou věnovány zhodnocení získaných poznatků, které by mohly být rozhodující pro výběr metody k použití odhadování teploty. Termální modely mohou být velice přesné, pokud se při vývoji těchto modelů podaří zohlednit co nejvíce parametrů, které mají vliv na zahřívání stroje. Potom v libovolném časovém okamžiku můžeme znát aktuální teplotu, která by měla být uvnitř stroje. Ovšem žádný takový termální model nezaručí, že nenastane neočekávaná situace, která povede k odlišnému vývoji teplot. Pokud je tedy model méně přesný nebo chceme docílit větší jistoty při sledování teploty, je dobré metodu termálních modelů zkombinovat metodou aktivního odhadování parametrů uvedenou v kapitole 2.3. Pokud by se v určitých časových intervalech zkontroloval stav teploty injektováním napětí, můžeme vytvořit velmi spolehlivý systém zajišťující bezproblémový chod stroje.

Nyní jsme u rozhodnutí proč kombinovat metodu aktivního odhadování parametrů s metodou termálních modelů, když by šlo použít jen tu prvně zmiňovanou. Metoda aktivního odhadování parametrů má ovšem tu nevýhodu, že injektované napětí může vést k následnému zvýšení teploty stroje. Pokud by se teplota odhadovala pouze touto metodou, muselo by se injektované napětí přikládat v častějších intervalech a riziko ovlivňování teploty stroje by stoupalo. Tam velkou úlohu hrají parametry nosného injektovaného napětí. Pokud by parametry byly vyladěny optimálně pro daný druh stroje, možnost tepelného ovlivnění samotného stroje by se minimalizovalo, ale ne zcela vyloučilo. Tyto dvě metody mají výhodu toho, že se mohou používat na vícero druhů strojů, nežli metoda pozorování změn

magnetického toku, která je použitelná jen u strojů s permanentními magnety.

Metoda pozorování magnetického toku je zatím metodou méně propracovanou, což může být nevýhodou při rozhodování v jejím použití. Na druhou stranu, prohlubování vývoje této metody může nakonec vést k lepšímu odhadnutí teploty v aplikaci pro stroje s PM oproti předešlým metodám.

Numerické filtry stanovují plynulý a stabilní chod pozorovacího systému tím, že vyberou vhodná měření a zkombinují je s odhady vytvořenými na základě měření. Aby výsledek výstupu numerického filtru byl optimální, měl by být vhodně nastaven kompromis mezi upřednostněním měření nebo odhadu. Pokud by tento kompromis nebyl vhodně zvolen, mohlo by dojít k nahodilému výkyvu, který by vznikl vlivem šumu, a mohlo by dojít ke zbytečnému nouzovému zastavení stroje.

Pokud by vše bylo vhodně nastaveno, tj. metody odhadování pracovaly dobře i filtry by omezily vlivy rušení, výsledný pozorovací systém by určoval přesný aktuální stav teploty stroje. Tím by pozorovací systém mohl reagovat na zvyšující se teplotu omezením zátěže tak, aby křivka teploty začala klesat až k optimálním hodnotám a poté zase mohl začít pracovat s plným výkonem stroje.

Na závěr této práce je třeba upozornit, že všechny uvedené metody jsou zkoušeny a vyvíjeny v laboratorních podmínkách. Během laboratorních experimentů byly zjištěny velice slibné výsledky týkající se přesnosti odhadované teploty. Pokud by tato přesnost byla přenositelná i na reálné aplikace, jistě by velmi rychle došlo k rozšíření některého pozorovacího systému založeného na některé z metod odhadování teploty. Zatím však nejsou známa žádná průmyslová vyhotovení, v nichž by se využívalo uvedených metod pro zjišťování teplot elektrických strojů.

## Seznam literatury a informačních zdrojů

- [1] Ganchev, M.; Kubicek, B.; Kappeler, H.: Rotor temperature monitoring systém. Electrical Machines (ICEM), 2010 XIX International Conference on Digital Object Identifier: 10.1109/ICELMACH.2010.5608051  
Publication Year: 2010 , Page(s): 1 - 5  
IEEE CONFERENCE PUBLICATIONS
- [2] Milanfar, P. ; Lang, Jeffrey H. Monitoring the thermal condition of permanent-magnet synchronous motors, Industry Applications Society Annual Meeting, 1991., Conference Record of the 1991 IEEE Digital Object Identifier: 10.1109/IAS.1991.178140 Publication Year: 1991 , Page(s): 108 - 114 vol.1  
IEEE CONFERENCE PUBLICATIONS
- [3] Specht, A., Bocker, J.: Observer for the rotor temperature of IPMSM. Power Electronic and Motion kontrol conference (EPE/PEMC), 2010 14th International digital object identifier: 10.1109/EPEPEMC.2010.5606818
- [4] Reigosa, D., Briz, F., Garcia, P., Guerrero, J.M., Degner, M.W.: Magnet temperature estimation in surface PM machina using high frequency signal injection. Energy conversion congress and exposition, 2009. ECCE 2009. Identifier: 10.1109/ECCE.2009.5316101
- [5] Ganchev, M., Kral, C., Oberguggenberger, H., Wolbank, T.: Sensorless rotor temperature estimation of permanent magnet synchronous motor. IEEE 2011, 978-1-61284-972-0/11
- [6] Kral C., Haumer, A., Lee, S.B.: A Practical Thermal model of permanent magnet and stator winding temperatures. IEEE transaction on power electronic,vol 29, no 1, January 2014. IEEE 2013, 0885-8993.
- [7] Kral, C., Haumer, A., Lee, S.B.: Innovative thermal model for the estimation of permanent magnet and stator winding temperatures. IEEE 2012, 978-1-4673-0803-8/12.
- [8] Reigosa, D., Briz, F., Degner, M.W., Garcia, P., Guerrero, J.M.: Magnet temperature estimation in surface PM machina during six-step operation. IEEE 2011, 978-1-4577-0541-0/11.
- [9] Welch, G., Bishop, G.: An introduction to the Kalman filter. University of North Carolina at Chapel Hill. 1997.
- [10] Ganchev, M., Kral, C., Oberguggenberger, H., Wolbank, T.: Sensorless rotor temperature estimation of permanent magnet synchronous motor. IEEE 2011, 978-1-61284-972-0/11.
- [11] Ganchev, M., Kral, C., Wolbank, T.: Sensorless rotor temperature estimation of permanent magnet synchronous motor under load conditions. IEEE 2012, 978-1-4673-2421-2/12.

- [12] Ma, X., Gui, Y.: Extended Kalman filter for speed sensor-less DTC based on DSP. IEEE 2001, 0-7803-7268-9/01.
- [13] Reigosa, D.D., Briz, F., Degner, M.W., Garcia, P., Guerrero, J.M.: Temperature issues in saliency-tracking-based sensorless methods PM synchronous machina. IEEE 2011, 0093-9994
- [14] WIKIPEDIA. The free encyclopedia: Kalman filter [online]. Květen 2014, 13.5.2014 [cit. 2014-05-20]. Dostupné z www: [http://en.wikipedia.org/wiki/Kalman\\_filter](http://en.wikipedia.org/wiki/Kalman_filter)