

**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: **2. července 2014**

Termín odevzdání bakalářské práce: **25. srpna 2014**

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



Prof. Ing. Václav Kůs, CSc.
vedoucí katedry

V Plzni dne 2. července 2014

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 25.8.2014

Josef Flaks

Poděkování

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

OBSAH

<i>Seznam symbolů a zkratk</i>	7
1 Úvod.....	9
2 Principy měření.....	12
2.1 Termální modely	12
2.1.1 Náhradní tepelné obvody.....	12
2.1.2 Vytvoření modelu tepelné sítě.....	16
2.1.3 Aplikovatelnost metody.....	17
2.1.4 Výhody a nevýhody metody.....	19
2.2 Pozorování změn magnetického toku.....	21
2.2.1 Permanentní magnety	21
2.2.2 Vytvoření modelu	22
2.2.3 Aplikovatelnost metody.....	23
2.2.4 Výhody a nevýhody	24
2.3 Aktivní odhadování parametrů	25
2.3.1 Teplotní závislosti	25
2.3.2 Provedení metody	26
2.3.3 Aplikovatelnost metody.....	27
2.3.4 Výhody a nevýhody	30
3 Numerické Filtry.....	31
3.1 Kalmanův Filtr.....	31
3.1.1 Přehled výpočtu	31
3.1.2 Algoritmus vzniku filtru	33
3.2 Rozšířený Kalmanův filtr (EKF).....	36
3.2.1 Definice pro vznik EKF.....	36
3.2.2 algoritmus vzniku EKF	37
3.3 Znázornění práce filtrů	38
4 Závěr	39
<i>Seznam literatury a informačních zdrojů</i>	41

Seznam symbolů a zkratk

R_t	tepelný odpor [$^{\circ}C/W$]
G_t	tepelná vodivost [$W/^{\circ}C$]
C_t	tepelná kapacita [$Ws/^{\circ}C$]
ΔP	tepelné ztráty [W]
$\Delta\vartheta$	teplotní spád [$^{\circ}C$]
ϑ_1, ϑ_2	teploty [$^{\circ}C$]
l	délka úseku [m]
S	průřez úseku [m^2]
λ	měrná tepelná vodivost [$W/^{\circ}C$]
m	hmotnost [kg]
c	měrné teplo materiálu [$Ws/^{\circ}C kg$]
B	magnetická indukce [T]
B_r	remanentní indukce [T]
H	magnetická intenzita [A/m]
H_c	koercitivní intenzita [A/m]
$B \cdot H$	magnetický energetický součin [$T A/m$]
u_{dq}	statorové napětí [V]
i_{dq}	statorový proud [A]
R_s	statorový odpor [Ω]
R_r	rotorový odpor [Ω]
T_s	statorová teplota [$^{\circ}C$]
T_r	rotorová teplota [$^{\circ}C$]
J	spojovací matice
ψ_{dq}	spřažený magnetický tok [Wb]
$\Delta\psi_d$	rozdíl mezi vypočteným a referenčním magnetickým tokem [Wb]
ψ_{P20}	magnetický tok PM při $20^{\circ}C$ [Wb]
ω	úhlová rychlost [rad]
L_d, L_q	hlavní indukčnosti v osách d, q [H]
k_{B_r}	teplotní koeficient [–]
$R(T)$	výsledný odpor [Ω]

R_0 odpor při referenční teplotě [$^{\circ}C$]
 α teplotní součinitel odporu kovu [K^{-1}]
 ΔT rozdíl teplot [$^{\circ}C$]
 $B(T)$ výsledná indukce [T]
 B_{r0} indukce při referenční teplotě [T]
 α_B teplotní koeficient magnetického pole [K^{-1}]
 U^S injektované napětí [V]
 Z^S impedance [Ω]
 I^S proud odpovídající U^S [A]
 ΣR odporová složka impedance [Ω]
 ΣX_L reaktanční složka impedance [Ω]
 R_{s0} statorový odpor za studena [Ω]
 R_{r0} rotorový odpor za studena [Ω]
 T_s teplota za studena, při níž dochází k měření R_{s0} a R_{r0}
 α_{mag} teplotní koeficient magnetického odporu
 PM permanentní magnet
 LUT náhledová tabulka – look up table
 Nd neodym
 Fe železo
 B bor
 Sm samarium
 Co kobalt
 A/D analogově/digitální

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 sensorů 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 sensorů 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 použitých pro odhadnutí teploty stroje. Tepelné modely nebo také modely tepelných sítí vycházejí z náhradních tepelných obvodů, které se vytvoří na základě znalostí konstrukce stroje, použitých materiálů a způsobů šíření a odvodu tepla. Pro následný vznik tepelného modelu je nutné stroj osadit teplotními senzory a proměřit provozní chod stroje tak, aby co nejlépe zohledňoval budoucí reálné využívání stroje, jako například změny zatížení, změny rychlosti otáčení, rozběhy a zastavení stroje. Tímto způsobem stačí proměřit jeden stroj daného druhu a typu a následné výsledky se mohou uplatnit u všech ostatních strojů, vyrobených stejným způsobem, protože obsahují tutéž konstrukci, stejný materiál a tudíž jejich tepelný obvod je shodný.

Metody termálních modelů jsou velice univerzální. Mohou se používat pro jakýkoliv druh stroje (nejen elektrického), ve kterém dochází vlivem provozu k zahřívání. Nevýhodami tepelných modelů lze označit nutnost dobrých znalostí konstrukčních uspořádání pro vytvoření odpovídajícího tepelného modelu a také to, že pro dosažení vysoké přesnosti odhadování vyžadují stabilní prostředí.

2.1.1 NÁHRADNÍ TEPELNÉ OBVODY

Tepelné obvody jsou obdobné s obvody elektrickými, to znamená, že při jejich řešení se mohou uplatňovat podobné vztahy a zákony. Této ekvivalence se využívá i při vytváření grafické podoby obvodu. Tak jako se elektrické obvody skládají z jednotlivých prvků, kterými mohou být zdroje, rezistory (odpory), kondenzátory, indukory a další elektronické součástky, tak i tepelné odpory se skládají z prvků podobným elektrickým. Výčet prvků v

tepelných obvodech nedosahuje takové rozmanitosti jako v případě elektrických obvodů, nicméně výstižně nahrazují či vysvětlují tepelné chování v daném místě obvodu. Používanými prvky v tepelných obvodech jsou:

- Tepelný zdroj – je to uvažované místo, kde vznikají ztráty. Těchto míst se ve stroji většinou nachází více, proto všechny tyto významné zdroje tepla musíme zahrnout v uvažovaném tepelném obvodu. Každý tepelný zdroj má jinou velikost podle toho, jak velký přínos má k celkovému oteplení stroje. Základní vztah pro vedení tepla je následující:

$$\Delta P = \frac{\Delta \vartheta}{R_t} = G_t \cdot \Delta \vartheta \quad (2.1 - 1)$$

kde ΔP [W] jsou ztráty, vstupující nebo vznikající v uvažovaném úseku, představují tepelný tok, $\Delta \vartheta$ [°C], ($\Delta \vartheta = \vartheta_1 - \vartheta_2$) je teplotní spád na tepelném odporu, R_t [°C/W] je tepelný odpor a G_t [W/°C] je tepelná vodivost.

- Tepelný odpor R_t – je to část obvodu, kterým protéká tepelný tok. Velikost tepelného odporu vyjadřuje, jaký odpor klade uvažovaná část zařízení při průchodu tepelného toku z jednoho místa k jinému (většinou mezi dvěma tepelnými uzly). Tepelný odpor závisí na druhu a rozměru materiálu, ze kterého je uvažovaná část vyrobena. Odpor je dán vztahem:

$$R_t = \frac{l}{\lambda \cdot S} \quad (2.1 - 2)$$

kde l [m] je délka úseku šíření tepelného toku, S [m²] je průřez úseku vedení tepla, λ [W/°Cm] je měrná tepelná vodivost materiálu. Dále se můžeme setkat s výrazem tepelná vodivost G_t [W/°C], která je definovaná jako převrácená hodnota tepelného odporu podle vztahu:

$$G_t = \frac{1}{R_t} \quad (2.1 - 3)$$

- Tepelná kapacita C_t [Ws/°C] - uplatňuje se při změnách tepelných stavů. Tepelnou kapacitu můžeme přirovnat ke kondenzátoru v elektrických obvodech, který je paralelně připojený ke zdroji napětí, v našem případě k tepelným ztrátám. Tak jako se kondenzátor nabíjí a vybíjí v závislosti na velikosti přiloženého napětí, tak i zde

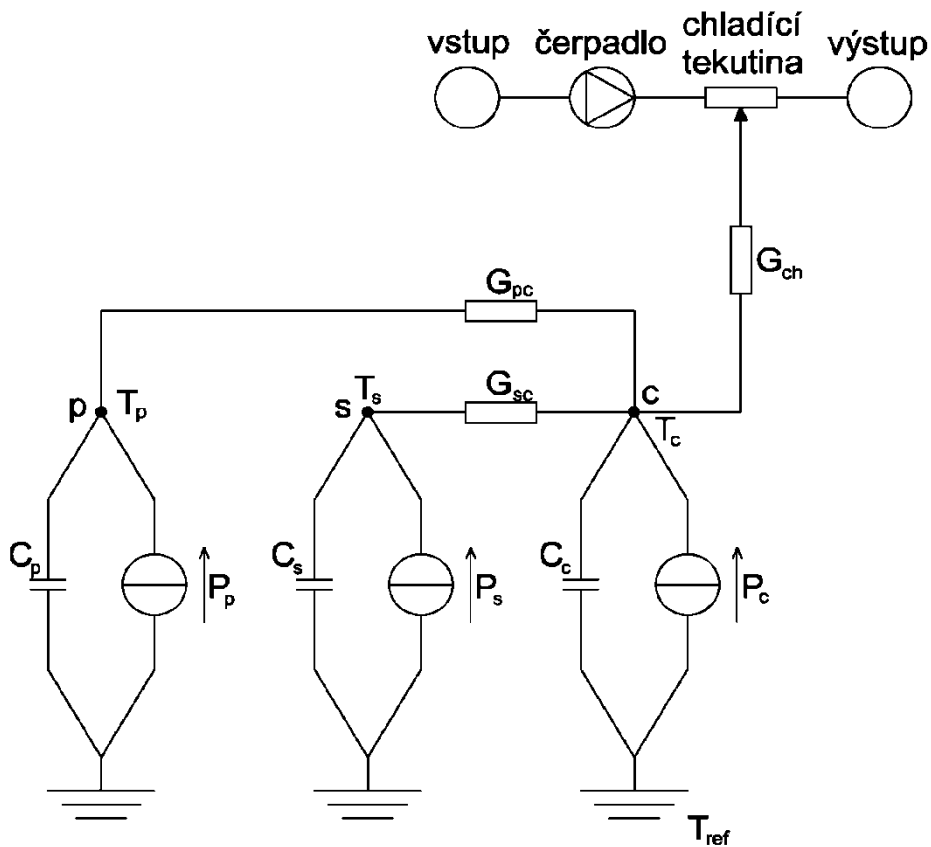
uvedená tepelná kapacita působí při změnách zatížení motoru jako akumulční prvek. Při vzrůstajícím zatížení se zvětšuje velikost uchovávaného tepla, až docílíme ustáleného stavu, kdy už se teplota v čase nemění. Když následně dojde k poklesu zatížení motoru, tudíž ke zmenšení ztrát, pak toto uchované teplo začne v čase klesat až do nového ustáleného stavu. Uvažované těleso představuje tepelnou kapacitu podle vztahu:

$$C_t = m \cdot c \quad (2.1 - 4)$$

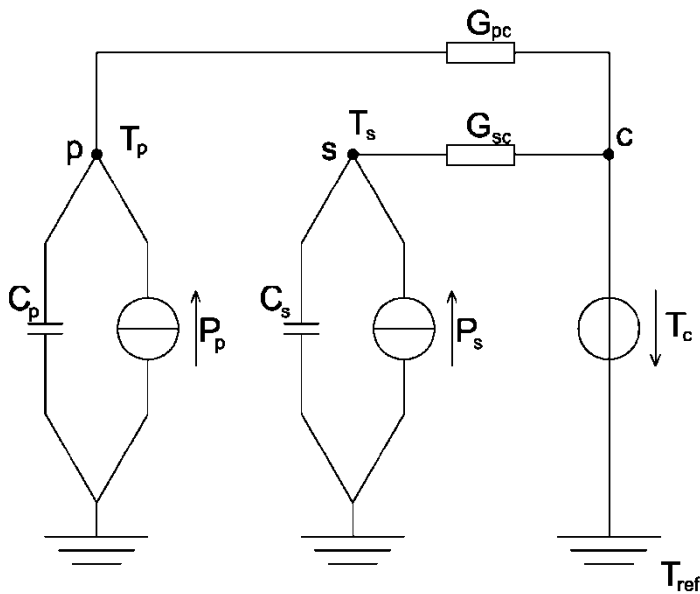
kde m [kg] je hmotnost tělesa, c [Ws/°C kg] je měrné teplo materiálu tělesa.

- Tepelný uzel – představuje styčné místo několika větví. Je to jakási křižovatka, která rozvádí teplo určitými směry. Do těchto uzlů se také při ověřování následného tepelného modelu vkládají teplotní čidla, podle kterých se určí průběh teploty v čase.

Příklady vytvořených zjednodušených náhradních modelů jsou uvedeny na obrázcích (2.1 – 1) a (2.1 – 2). Takto složený tepelný obvod slouží jako podklad pro vytváření či ověřování tepelného modelu pro účely odhadování teploty. Na obrázcích jsou vidět jednotlivé výše uvedené součásti tepelného obvodu a jejich vzájemné propojení respektující vedení tepelného toku.



Obr 2.1- 1 Zjednodušený náhradní tepelný obvod se třemi tepelnými uzly. Z obrázku jsou patrné ztráty, vzniklé v uvažovaných místech stroje, tepelné kapacity akumulující teplo a spojení jednotlivých uzlů pomocí tepelných vodivostí. Písmena T značí umístění teplotních čidel pro vytváření tepelného modelu stroje. Tento model zahrnuje chladicí okruh. Schéma obrázku je převzato z [6].



Obr 2.1- 2 Jiný náhradní obvod téhož stroje, tvořený jen dvěma uzly. Obrázek opět znázorňuje jednotlivé výše popsané části a jejich vodivé spojení. Schéma obrázku je převzato z [6].

2.1.2 VYTVOŘENÍ MODELU TEPELNÉ SÍTĚ

Vytvořením tepelného modelu pro potřeby odhadování teploty stroje se rozumí proměření skutečných průběhů teplot, ke kterým dochází během měnicího se zatěžování stroje. Tímto měřením získáme výchozí parametry, které se uplatní při vzniku modelu, proto se taky můžeme setkat s označením parametrizace tepelného modelu. Stroj můžeme zatěžovat buď nahodile, anebo cíleně, pokud známe budoucí uplatnění stroje.

Nahodilé zatěžování stroje se použije v případě obecného proměření stroje, kdy není známo budoucí použití stroje. Takto měřený stroj se zkouší pro měnicí se rychlosti otáčení během chodu, při různých stavech zatížení a při rozdílných dobách sepnutí motoru. Těmito měnicími se podmínkami se simulují možné stavy provozu stroje, kterými by se velmi dobře mohly zohledňovat průběhy teplot. Většinou se uvažují nejnepříznivější provozní stavy stroje. Na druhé straně cílené zatěžování stroje se uplatňuje u strojů, u nichž známe přesný nebo přibližný náplň budoucí činnosti. Potom během vytváření tepelného modelu se snažíme tyto průběhy respektovat a simulujeme rychlost, velikost zátěže i časy spínání stroje podle budoucích potřeb.

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.

Pro vytvoření tepelného modelu se tedy musí jeden zkušební stroj osadit teplotními čidly v místech podle vytvořeného tepelného obvodu. Pro jeden konkrétní druh elektrického točivého stroje se tato teplotní 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. Nejaktuálnější práce týkající se tepelných modelů elektrických strojů jsou založeny **(a)** na jednom nebo více teplotních čidlech ve vinutí statoru nebo **(b)** na snímání teploty chladicí tekutiny a okolních podmínek.

Teplotní čidla ve variantě (a) se většinou umísťují do blízkosti citlivých částí stroje (izolace, permanentní magnety) nebo v blízkosti zdrojů tepla, jako jsou vinutí a případně i ložiska u větších a velkých strojů. Není totiž vždy možné tyto snímače umístit přímo do těchto míst, kvůli konstrukčnímu uspořádání stroje. Ve variantě (b) se čidla umísťují do proudu chladící tekutiny nebo okolí stroje. Tato čidla musí být umístěna tak, aby správně měřila množství odvedeného tepla.

Výše popsaným postupem dostaneme jakousi posloupnost teplot, které reagují na nastalé provozní situace. Takto vzniklou posloupnost lze vyjádřit grafickým nebo číslicovým výstupem. Zatímco grafické vyjádření je lidskému porozumění přívětivější, oproti tomu počítačový vyhodnocovací systém by s takovým způsobem zaznamenanými hodnotami mnoho nesvedl. Proto se raději volí číslicový výstup, který lze na ten grafický v případě potřeby velmi snadno převést. Číselné hodnoty teplot tedy znamenají závislost na aktuálních provozních podmínkách stroje (rychlost otáčení, převáděný výkon, čas chodu stroje).

Zjednodušeně lze potom napsat, že elektronický vyhodnocovací systém sleduje jednotlivé stavy stroje a následně je schopen odhadnout aktuální teplotu stroje podle dříve proměřených průběhů.

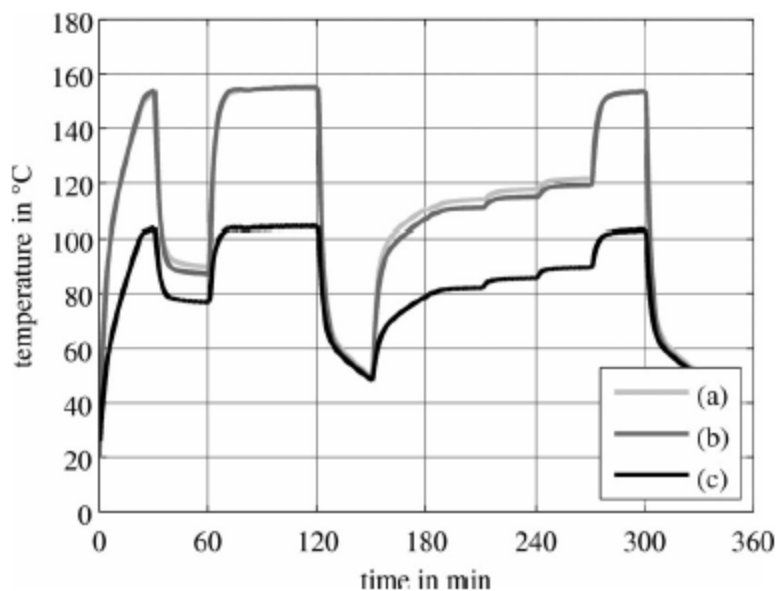
2.1.3 APLIKOVATELNOST METODY

Metoda pracuje způsobem, který byl naznačen výše. Pozorovatelem se nazývá systém, který bdí nad provozem stroje, sleduje nutné proměnné, které potřebuje k rozhodování. Proměnnými pro rozhodovací funkce mohou být otáčky (měřené přímo nebo nepřímo), aktuální příkon stroje a čas měřený od začátku spuštění stroje včetně mezer mezi jednotlivými přerušení. Pozorovatel na základě těchto měřených údajů a příslušného tepelného modelu je schopen odhadnout teplotu stroje.

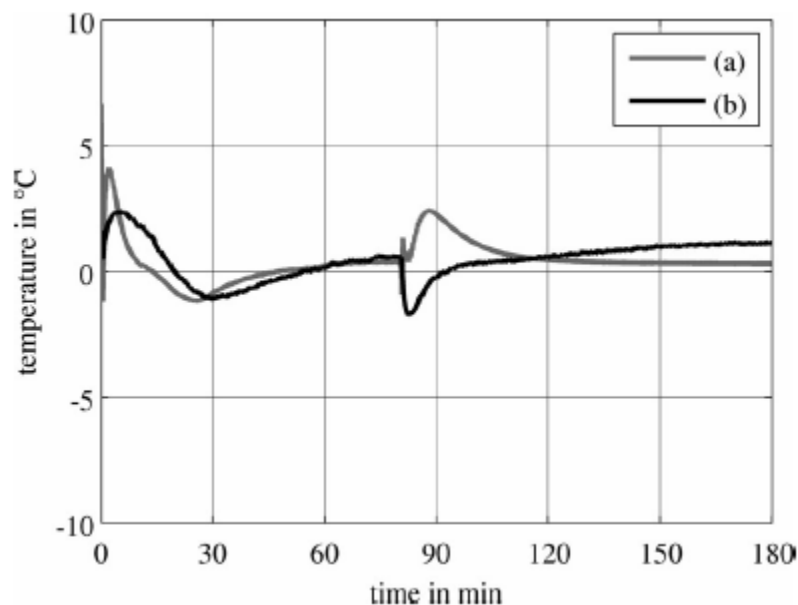
Pozorovatel z tepelného modelu určí pro aktuální otáčky stroje teplotní křivku. Pokud dále zná čas běhu stroje, určí příslušný bod na této křivce. Poté již přiřadí teplotu, která odpovídala tomuto stavu během vytváření či parametrizaci modelu v předešlé kapitole 2.1.2. Kdykoliv pak dojde ke změně stavu rychlosti, pozorovatel podle tepelného modelu zjistí, jak vývoj teplot postupoval během parametrizace modelu a podle toho změní odhad aktuální teploty stroje. Tato teplota se může i nemusí lišit od předcházejícího teplotního stavu. Při těchto změnách se prověří, jak důkladně a předvídavě byl tepelný model vytvořen.

Jestliže je tepelný model dobře vytvořen, odhadovaná teplota velmi dobře kopíruje aktuální teplotu stroje. Pokud tepelný model obsahuje nějaké nedostatky, brzy se to projeví v rozdílnosti hodnot mezi odhadovanou a aktuální provozní teplotou stroje. Tento zprvu i nepatrný rozdíl teplot může na konci pracovního dne nabrat značných rozměrů. Tyto rozdílnosti už mohou vést k chybnému vyhodnocení systému, které může způsobit nouzové vypnutí stroje, aby nedošlo k poškození například izolace vinutí, i když by stroj mohl stále bezpečně pokračovat v činnosti. Toto, i když chybné vyhodnocení je lepší variantou možných následků nepřesně vytvořeného tepelného modelu.

Na obrázku 2.1-3 jsou znázorněné časové průběhy teplot v motoru. Z obrázku jsou patrné jednotlivé teplotní změny reagující na provozní stavy motoru. V některých místech je patrná diference mezi odhadovanými a skutečnými teplotami. Rozdíl má stejný charakter průběhu, proto lze usuzovat na chybu ve špatném určení rychlosti otáčení.



Obr 2.1- 3 Ukázkový průběh teploty modelovaného stroje s PM. Teplota statorového vinutí: (a) získaná experimentem, (b) modelovaná, (c) teplota jádra statoru získaná experimentem. Svislá osa znázorňuje teplotu ve stupních Celsia a vodorovná osa znázorňuje časový průběh v minutách. Obrázek je beze změny převzatý ze [6].



Obr 2.1- 4 Teplotní odchylky zkoumaného stroje s PM: (a) vinutí statoru ΔT_s , (b) permanentního magnetu ΔT_p . Obrázek demonstruje teplotní rozdíl mezi odhadovanou a skutečnou teplotou stroje. Svislá osa jako v předchozím obrázku odpovídá teplotě ve stupních Celsia a vodorovná osa znázorňuje časový průběh v minutách. Obrázek je beze změny převzatý ze [6].

2.1.4 VÝHODY A NEVÝHODY METODY

Vyráběná a provozovaná zařízení mají jisté přínosy i nedostatky, podle nichž se odvíjí jejich vhodnost pro použití k jisté činnosti. Stejně jsou na tom i vyvíjené metody pro odhadování teploty. Pro shrnutí výhod a nevýhod používání tepelných modelů bude věnováno několik příštích řádků.

Výhoda použití metody tepelných modelů pro odhadování teploty stroje je její univerzálnost. Tato metoda se dá uplatnit u široké škály vyráběných motorů a to nejen elektrických, ale i jiných mechanických strojů, u nichž vzniká teplo vlivem provozu. Dále se dá vyzdvihnout to, že k vytvoření modelu stačí proměřit jeden stroj a tyto data se dají aplikovat na celou řadu konstrukčně shodných strojů. Dále je zjištěna vysoká přesnost odhadování teploty u strojů umístěných v prostorách se stabilním prostředím. Za takovéto prostředí lze považovat laboratoře, uzavřené haly a provozy se stálým klimatem. Zjištěný teplotní rozdíl byl u takto provozovaného stroje maximálně 4°C.

Pro začátek výčtu nevýhod používání tepelných modelů lze navázat z předchozího odstavce. Pokud by stroj byl provozován v proměnných okolních podmínkách (např. venkovní prostředí, automobilový průmysl, neklimatizovaná hala atd.), mohlo by a nejspíš by i

docházelo k nepřesnostem v odhadované teplotě, protože i odvod tepla od stroje by v každém okamžiku byl jiný a těžko předvídatelný. Další nevýhodou lze nazvat složitost vytvoření modelu. Vytvoření je velmi pracné a náročné na zanesení možných i méně pravděpodobných podmínek provozu stroje. Asi nejdůležitějším nedostatkem je, že během provozu nedochází k žádnému kontrolnímu měření teploty a pozorovatel se plně spoléhá na vytvořený tepelný model. Může pak nastat situace, kdy dojde k nějakému poškození stroje, které pozorovatel nebude schopen rozpoznat. Pozorovatel i po poškození bude stále sledovat stejnou teplotní křivku odpovídající aktuálnímu provoznímu stavu, avšak skutečný teplotní vývoj bude úplně jiný.

2.2 POZOROVÁNÍ ZMĚN MAGNETICKÉHO TOKU

Tato metoda využívá teplotní závislosti magnetického toku použitých permanentních magnetů. Metoda tedy předem zužuje svou použitelnost na stroje využívající ke své činnosti permanentních magnetů, které se využívají především k buzení rotoru u synchronních strojů.

Obdobně jako u metody tepelných sítí se při používání této metody využívá modelu vzešlého z předem zjištěných teplotních závislostí magnetického toku permanentního magnetu. Tyto modely vždy závisí na materiálu použitého při výrobě permanentních magnetů. Modely potom znázorňují průběhy teplotních závislostí pro jednotlivé druhy magnetů. Vyhodnocovací systém potom pracuje s příslušnými modely a vytváří odhady teplot, podle zjištěného stavu magnetického toku.

2.2.1 PERMANENTNÍ MAGNETY

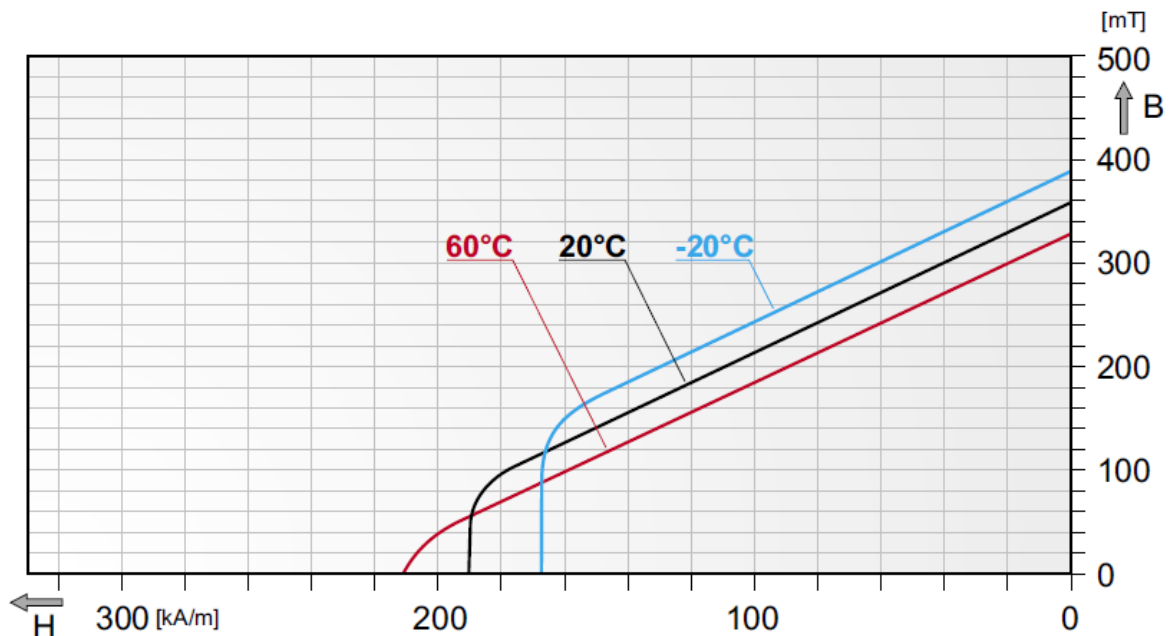
Pro výrobu permanentních magnetů se používá celá řada materiálů a sloučenin, dále v textu budou vyzdviženy ty nejpoužívanější. Materiály pro výrobu se používají podle požadovaných kvalitativních vlastností budoucího magnetu, které požaduje objednatel. U permanentního magnetu vyžadujeme vysokou hodnotu magnetické remanentní indukce B_r , a velkou odolnost proti přemagnetování. Toho je dosahováno vysokou hodnotou koercitivní magnetické intenzity H_C , což představuje velmi širokou hysterezní křivku. Dále požadujeme vysokou hodnotu energetického součinu $B \cdot H$, který je měřítkem energie akumulované v magnetu.

Celosvětově zatím nejužívanějšími materiály pro výrobu permanentních magnetů jsou magneticky tvrdé ferity. Tvrdé ferity jsou cenově nejpříznivější a dosahují i slušných magnetických vlastností. Rozšířenými jsou barnaté ferity a stále více se používají vysoce koercitivní strontnaté ferity.

Mnohem hodnotnější jsou permanentní magnety vyrobené ze vzácných zemin. Základními prvky jsou zejména neodym s chemickou značkou Nd . Tyto magnety se potom nazývají neodymové a jsou vytvořené na bázi prvků $NdFeB$. Dalším užívaným prvkem je samarium s chemickou značkou Sm . Tyto samariumové magnety mají bázi vytvořenou spojením prvků $SmCo$. Magnety vzniklé ze vzácných zemin jsou vysoce výkonné s výbornými parametry, proto nacházejí své uplatnění v pohonech, protože stroje s PM mají velkou hustotu výkonu. Na druhé straně však stojí poněkud vysoká výrobní cena. I z tohoto důvodu je vhodné nějakým způsobem sledovat provozní teplotu a v případě nutnosti zasáhnout, aby nedošlo ke

znehodnocení používaných permanentních magnetů. Při konstrukci stroje s permanentními magnety se proto sama nabízí myšlenka zjišťování aktuální provozní teploty pomocí teplotní závislosti použitých magnetů.

Na obrázku (2.2 – 1) jsou vidět měnící se demagnetizační křivky měnící se vlivem teplot.



Obr. 2.2- 1 Ukázka demagnetizační křivky PM vyrobeného z magneticky tvrdého feritu. Z obrázku je patrné měnící se charakter křivky pro různé teploty. S rostoucí teplotou klesá hodnota magnetické indukce, naopak se zvyšující hodnota magnetické intenzity. Obrázek je beze změny převzatý z [15].

2.2.2 VYTVOŘENÍ MODELU

Stejně jako u tepelného modelu je nutné při vytváření modelu teplotních změn magnetického toku proměřeni stroje s daným typem a stejnými parametry permanentního magnetu. Měří se velikost magnetického toku, která odpovídá jednotlivým teplotním hodnotám. Takto vznikne LUT tabulka (Look Up Tables – náhledové tabulky), která slouží jako podklad pro pozorovatele při určování teploty.

Model stroje je definovaný 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 PM. Potom lze teplotní závislost definovat takto:

$$u_{dq} = R_S(T_S)i_{dq} + \psi_{dq} + J\omega\psi_{dq}(T_r) \quad (2.2 - 1)$$

kde u_{dq} [V] je satorové napětí, R_S [Ω] je satorový odpor, T_S [$^{\circ}C$] je satorová teplota,

i_{dq} [A] je statorový proud, ψ_{dq} [Wb] je spřažený magnetický tok, J je spojovací matice s hodnotou $\begin{bmatrix} 0 & -1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix}$, ω [rad/s] je úhlová rychlost a T_r [°C] je rotorová teplota.

U strojů s permanentními magnety se využívá vlastnosti existence vlastního nasycení hlavních indukčností L_d [H] a L_q [H] vzhledem k vysokému toku energie. Zejména indukčnost q – osy se může snížit na méně než 20% její jmenovité hodnoty. Tím vzniká nelineární závislost mezi proudem i_{dq} a spřaženým magnetickým tokem ψ_{dq} . Pro určení této závislosti se uplatňují již zmíněné LUT tabulky, které jsou odvozené z měření provedených při definované teplotě rotoru. Užitím tohoto nelineárního vztahu odpovídajícího teplotě 20°C, může být vypočtený tok porovnán s referenčním tokem prostřednictvím výsledných statorových proudů. Rozdíl mezi vypočteným a referenčním tokem v d – ose $\Delta\psi_d$ je způsobený teplotou, proto může být spočtena pomocí:

$$T_r = 20^\circ\text{C} + \frac{\Delta\psi_d}{\psi_{P20} \cdot k_{Br}} \quad (2.2 - 2)$$

kde T_r [°C] je rotorová teplota, $\Delta\psi_d$ [Wb] je rozdíl mezi vypočteným a referenčním magnetickým tokem v d – ose, ψ_{P20} [Wb] magnetický tok PM měřený při 20°C a k_{Br} [–] je teplotní koeficient.

2.2.3 APLIKOVATELNOST METODY

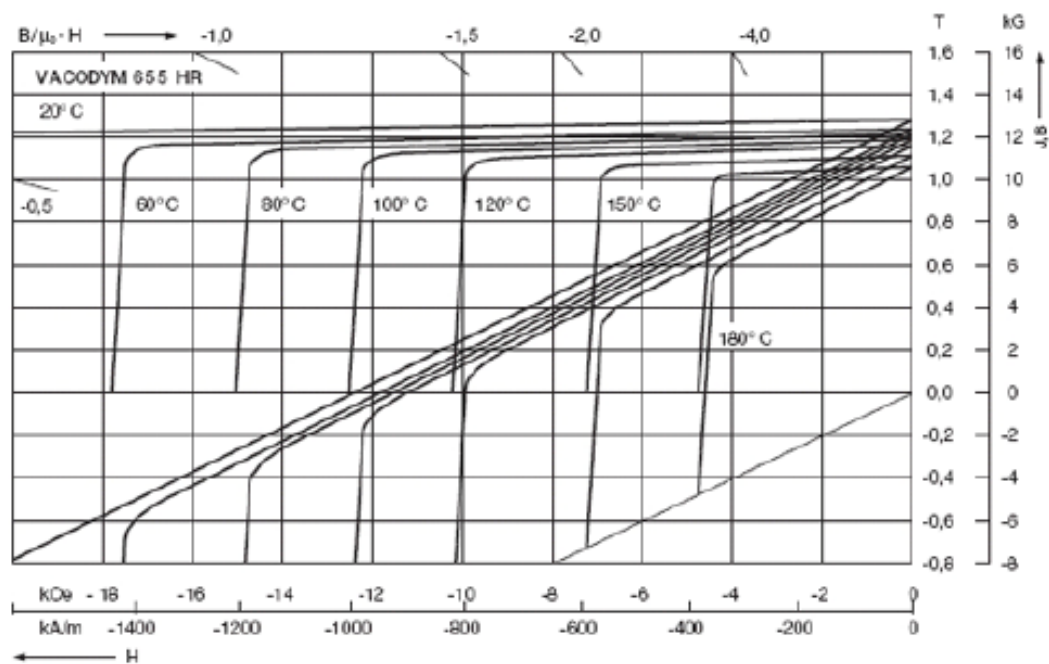
Použitelnost metody se omezuje na stroje s měřitelnou magnetickou indukcí. Jsou to převážně stroje, které obsahují ve své konstrukci permanentní magnet. Nejdůležitější využití se naskytá u synchronních strojů s permanentními magnety umístěnými na rotoru, které nahrazují budící vinutí. Takto konstruované stroje dosahují menších rozměrů při stejném využitelném výkonu.

Zjednodušeně lze napsat, že uplatnění metody tedy spočívá v měření statorového proudu, který se prostřednictvím LUT tabulky převede na hodnotu magnetického toku. Pomocí tohoto magnetického toku se následně může spočítat teplota rotoru respektive teplota permanentních magnetů na něm umístěných. Jelikož teplotní koeficient k_{Br} je velice malý, vytvořený pozorovatel musí pracovat s vysokou přesností, aby nedocházelo k omylům v určování teploty.

Z výsledků experimentů prováděných 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. 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 permanentních magnetech. Další možnosti vylepšení této metody se analyzují [10].

Obrázek (2.2 – 2) ukazuje demagnetizační křivku neodýmového magnetu.



Obr. 2.2- 2 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 přímkě je vidět jak silná je magnetizace vlivem teploty. Obrázek převzatý z [10].

2.2.4 VÝHODY A NEVÝHODY

Mezi výhody použití metody lze zařadit vysokou přesnost zjištěnou v širokém rozsahu otáček. Dále pak lze poznamenat, že metoda je hodně zkoumaná a lze předpokládat její větší rozvoj a aplikovatelnost.

Velkou nevýhodou metody je její specializace na stroje s permanentními magnety a tudíž její užší uplatnění oproti metodě tepelných sítí – tepelných modelů. Mezi nevýhody lze také zařadit skutečnost, že tato metoda patří k méně vyvinutým, protože k vyššímu používání strojů s PM došlo až s výrobou PM ze vzácných zemin.

2.3 Aktivní odhadování parametrů

V této metodě se pro odhadování teploty stroje využívá injektovaného vysokofrekvenčního nosného signálu. Injektovaný signál se přivádí k základnímu buzení stroje a umožňuje odhadování teploty z přechodové statorové impedance. Důležitým předpokladem pro správné odhadování teploty je vhodná volba parametrů injektovaného signálu, zejména to jsou amplituda a frekvence. Tyto parametry by měly být nastaveny tak, aby upřednostňovaly žádoucí odporový charakter teplotní závislosti kovů. Dále tak, aby nezpůsobovaly dodatečné zahřívání stroje, hluk či vibrace.

Na elektrickém stroji, kterým může být uvažovaný synchronní nebo i asynchronní, se následně měří proud, přesněji změna proudu vyvolaná změnou odporu reagující na injektovaný signál. Tato změna se vyhodnocuje a usuzuje se z ní aktuální teplota stroje. Vyvolaná změna odporu je velice malá, proto pozorovací systém musí pracovat s velkou přesností a vybírat měření, která nejlépe zohledňují měnící se teplotní křivku.

2.3.1 TEPLOTNÍ ZÁVISLOSTI

Vodiče vinutí cívek statoru či rotoru elektrického stroje se zhotovují z kovových vodivých materiálů, kterým je například nejpoužívanější měď. Materiály mají tepelnou závislost, která způsobí změnu celkového odporu použitého vodiče. Tepelná závislost kovů má lineárně rostoucí závislost se vzrůstající provozní teplotou stroje. Jelikož vodiče jsou navinuté v cívkách, které vytvářejí indukčnost, jenž má složitý a silně nelineární průběh teplotní závislosti. Této reaktanční složce impedance se snažíme vyhnout vhodnou volbou parametrů injektovaného signálu.

Potom tedy získáme teplotně závislé veličiny elektrického stroje, které již můžeme vyjádřit matematickým popisem. Teplotní závislost odporu je tedy:

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

Pokud navíc stroj obsahuje permanentní magnety, bude se měnit i magnetické pole jimi vytvořené:

$$B(T) = B_{r0}(1 + \Delta T \cdot \alpha_B(T)) \quad (2.3 - 2)$$

kde $R(T)$ [Ω] je výsledný odpor pro danou teplotu, R_0 [Ω] je odpor při referenční teplotě (většinou 20°C), α [K^{-1}] je teplotní součinitel použitého kovu (nejčastěji měď), ΔT [°C] je

rozdíl teplot, $B(T)$ [T] je výsledná magnetická indukce, B_{r0} [T] je magnetická indukce při referenční teplotě, $\alpha_B(T)$ je teplotní koeficient magnetického pole.

2.3.2 PROVEDENÍ METODY

Tato metoda oproti dvěma výše popsaným metodám v kapitolách 2.1 a 2.2 nevyžaduje žádné předchozí měření a vytvoření modelu, podle kterého následně probíhají odhady teplot. Hlavní myšlenka je v aktivním přivedení injektovaného vysokofrekvenčního napětového signálu, který vyvolá změnu stavu v hodnotě proudu. Následně se z této změny provádí odhadování teploty.

Při využívání metody se používá vztahu:

$$U^S = Z^S \cdot I^S \quad (2.3 - 3)$$

s tím že

$$Z^S = \Sigma R + j\Sigma X_L \quad (2.3 - 4)$$

$$\Sigma R = R_s + R_r \quad (2.3 - 5)$$

kde U^S je injektované vysokofrekvenční napětí, Z^S je impedance odpovídající injektovanému napětí, I^S je proud vzniklý reakcí na injektované napětí. Dále pak ΣR je odporová složka impedance, která je dána součtem statorové R_s a rotorové R_r části odporu a ΣX_L je reaktanční složka impedance.

V předchozí části bylo uvedeno, že vyžadujeme ryze odporovou část impedance, která má lineární průběh teplotní závislosti. Tohoto dosáhneme vhodným nastavením parametrů injektovaného napětí.

Je-li výsledná impedance ΣZ dána (2.3 - 6) a rezistance ΣR dána (2.3 - 7), potom teplota magnetu či rotoru může být získána za pomoci (2.3 - 8). Statorová rezistance R_{s0} může být změřena jen jednou, když je stroj za studena, a může být uložena do paměti pro další použití. Jestliže je statorová teplota změřena, elektrický odpor může být přizpůsoben použitím vztahu (2.3 - 1), aby se zohlednilo zvýšení odporu vlivem teploty.

$$\Sigma Z = \Sigma R + j\omega_c \Sigma L = \frac{u^S}{i^S} \quad (2.3 - 6)$$

$$\Sigma R = R_{s0}[1 + \alpha \cdot (T_0 - T_s)] + R_{r0}[1 + \alpha_{mag} \cdot (T_0 - T_r)] \quad (2.3 - 7)$$

$$T_r = T_0 + \frac{\Sigma R - R_{s0} - R_{r0} - \alpha \cdot (T_0 - T_s)}{\alpha_{mag}} \quad (2.3 - 8)$$

kde ω_c [rad/s] je úhlová rychlost, ΣL [H] je velikost indukčnosti, u^s [V] okamžitá hodnota injektovaného napětí, i^s [A] okamžitá hodnota změřeného proudu, R_{s0} [Ω] je velikost statorové rezistance za studena, R_{r0} [Ω] je velikost rotorové rezistance za studena, α_{mag} je teplotní koeficient magnetického odporu, T_0 [°C] je teplota za studena, při které se změřily R_{s0} a R_{r0} , T_r [°C] je teplota rotoru a T_s [°C] je teplota statoru. Uvedené vztahy předpokládají, že teplota magnetů je jednotná během normálního provozu stroje. Tento předpoklad byl ověřován v [4].

Důležitým aspektem je tedy již zmiňovaný výběr parametrů injektovaného signálu. Výběr amplitudy a frekvence injektovaného napěťového signálu bude tedy kompromisem mezi přesností a potenciálním zásahem do normálního chodu stroje. Obecné požadavky na injektovaný vysokofrekvenční signál jsou následující:

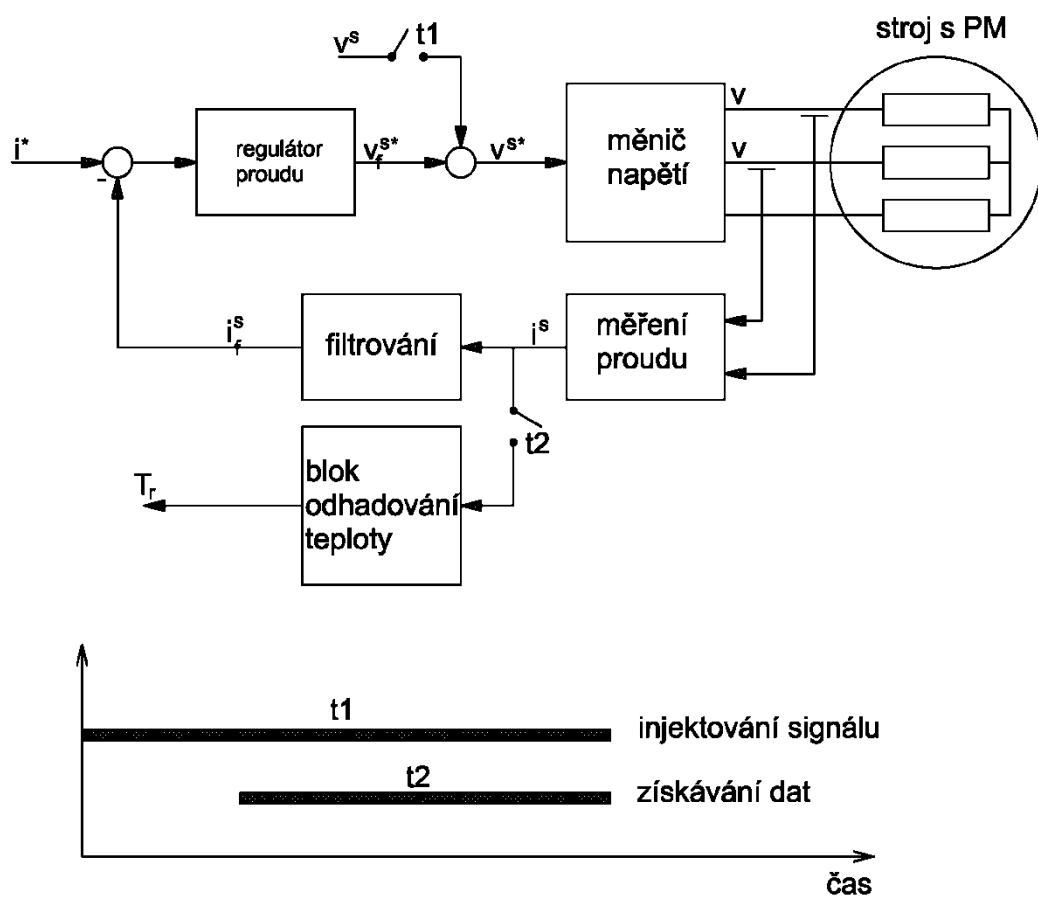
- Zvyšující se amplituda injektovaného napětí bude zvyšovat úměrně velikost výsledného nosného proudu. Tím se zvýší odstup signálu od šumu proudových senzorů a sníží se kvantizační chyby v A/D převodníku, dojde ke zlepšení celkové přesnosti metody. Avšak velké nosné proudy způsobují přídavné ztráty v rotoru a statoru, vytvářejí akustický hluk a vibrace, atd. Velikost injektovaného napětí musí být kompromisem mezi jmenovanými.
- Příliš vysoká nosná frekvence injektovaného signálu bude přikládat větší váhu induktivní složce, která je nežádoucí, oproti rezistenční složce, která je požadovaná. Proto by měla být preferovaná nižší nosná frekvence injektovaného signálu.
- Vyšší nosná frekvence injektovaného signálu zvýší spektrální oddělení signálů od základní budící frekvence stroje, tím vznikne jednodušší rozpoznání signálů.

2.3.3 APLIKOVATELNOST METODY

Pokud jsou vhodně nastaveny parametry injektovaného signálu, tak aby dodatečně neovlivňovaly teplotu stroje a podpořily přesnost metody, tak se může přistoupit k její aplikaci. Provedení této metody potom lze učinit pomocí kontinuálního nebo přerušovaného

injektovaného nosného signálu. Trvale připojený nosný signál může mít nežádoucí účinky, jako jsou vibrace a přídavné rotorové a statorové ztráty. Zvláště důležité jsou vířivé proudy vzniklé v magnetech, protože by tyto další ztráty způsobily vzrůst teploty magnetů a zvýšilo by se riziko jejich demagnetizace. Během normálního provozu stroje se očekává, že se teplota magnetů bude měnit relativně pomalu a tudíž může stačit občasné přiložení injektovaného nosného signálu.

Provádění metody je znázorněno na obrázku 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.

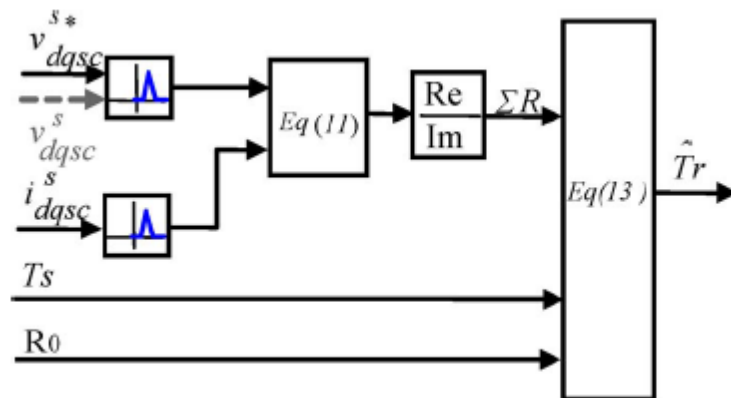


Obr. 2.3- 1 Adaptivní schéma oddělení odporových efektů. Schéma obrázku je převzato ze [4]. Obrázek vystihuje dobu zpoždění v přijímání injektovaného signálu napětí. Signál prochází měničem do stroje a následná odezva signálu je zaznamenána snímáním proudu. Do bloku odhadování teploty je signál vpuštěn až po odeznění možných přechodných jevů v okamžiku t_2 .

Metoda z velikosti injektovaného napětí a změřeného proudu je schopna odvodit změnu impedance. Z velikosti změny potom blok odhadování teploty na obrázku 2.3-1 provádí

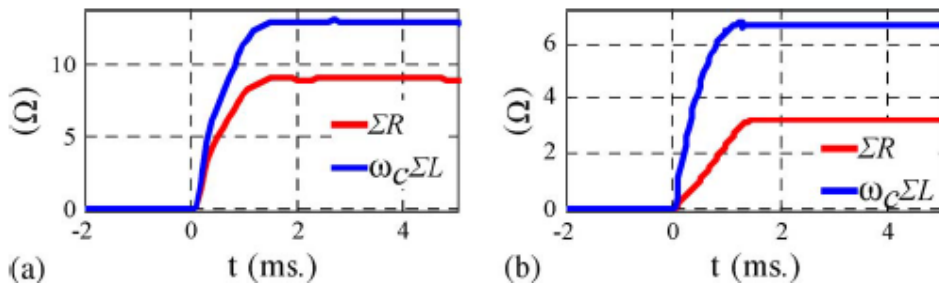
odhadnutí teploty. Velikost změn hodnoty impedance dosahuje malých hodnot, řádově desetiny maximálně několik jednotek ohmu. Velmi proto záleží na citlivosti proudového senzoru s jakou přesností je schopen změřit protékající proud. Dalším potenciálním zdrojem chyb je nelineární chování zdroje (měniče), a to zejména kvůli kolísání napětí stejnosměrného mezi-obvodu a úbytku napětí na výkonových zařízeních.

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 filtrů.



Obr. 2.3- 2 Blokové schéma pro kompenzaci přechodného odporu statoru. Schéma obrázku je beze změny převzato z [4]. V bloku Eq(11) se určuje hodnota impedance ΣZ pomocí (2.3-6). Blok Eq(13) provádí samotnou kompenzaci teploty pomocí (2.3-8). Napětí na obrázku je znázorněno písmenem *v* (voltage)

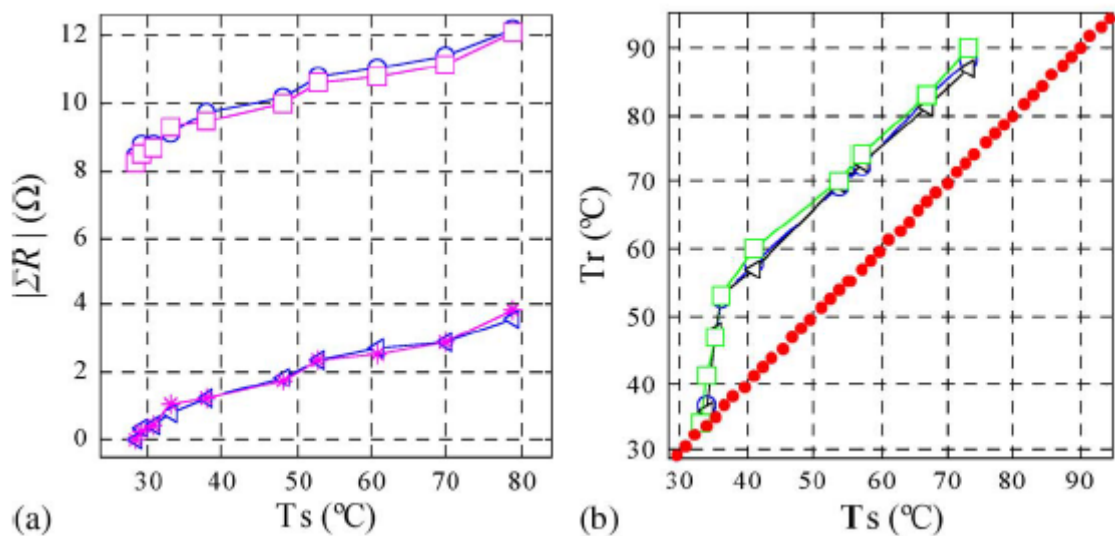
Na obr. 2.3-3 je ukázka odhadované statorové impedance. Čas $t = 0$ odpovídá zahájení t_2 na obr. 2.3-1. Doba ustálení filtrů je 2 milisekundy a po této době jsou údaje impedance dostupné.



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

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 ΣR a odhadovanou rotorovou rezistanci R_r použitím (2.3-8) a pro obojí odhadování i průběhy s kompenzováním vlivů 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 (o) a (■) s kompenzací vlivů měniče. R_r , střední odhadovaná rezistance rotoru (<-) a (x) s kompenzací vlivu měniče. (b) měřená teplota magnetu (o), odhadovaná teplota magnetu (■), odhadovaná teplota s kompenzací vlivu měniče (Δ). Obrázek převzatý z [4].

2.3.4 VÝHODY A NEVÝHODY

Výhodou této metody je skutečnost, že nepotřebujeme předem vytvářet žádné složité modely, se kterými následně pracují bloky pro odhadování teploty. Metoda odhaduje provozní teplotu z aktuálních hodnot měřeného proudu a proto je mnohem robustnější a přesnější oproti tepelnému modelu, který jen sleduje možné teplotní křivky.

Nevýhodou metody je fakt, že samotné injektování napětí může zvyšovat teplotu stroje, pokud jsou nevhodně nastaveny jeho parametry a způsob jeho připojování. Dále v úvahu přicházejí možné vlivy měniče, které mohou snižovat přesnost metody.

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 přiřazuje větší váhu odhadům s vyšší jistotou. Tento krok se nazývá update. 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 systém 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:

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

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

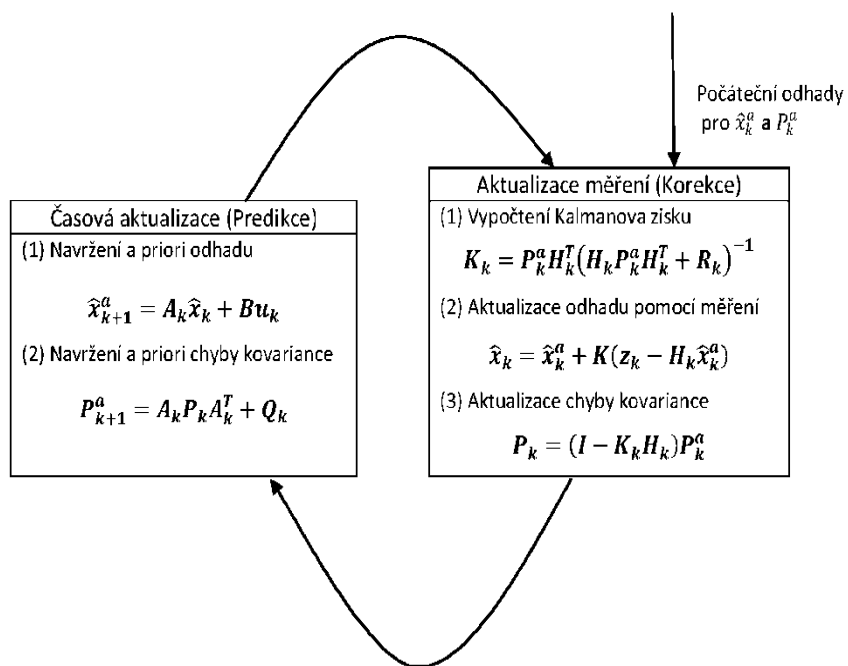
$$P_k = (I - K_k H_k) P_k^a \quad (3.1 - 11)$$

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.

Na následujícím obrázku 3.1 – 1 jsou shrnuté jednotlivé kroky s výpočetními rovnicemi pro určení nejvhodnějšího následníka ve vývoji.



Obr. 3.1- 1 Znárodnění funkce algoritmu se shrnutými rovnicemi výpočtu jednotlivých kroků. Předloha obrázku převzata z [9]

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

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

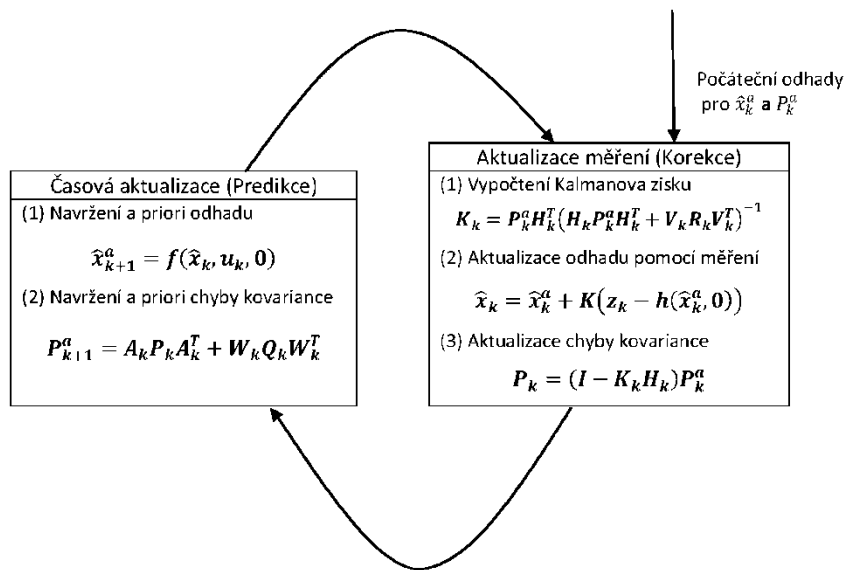
a zbytkové měření

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

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.

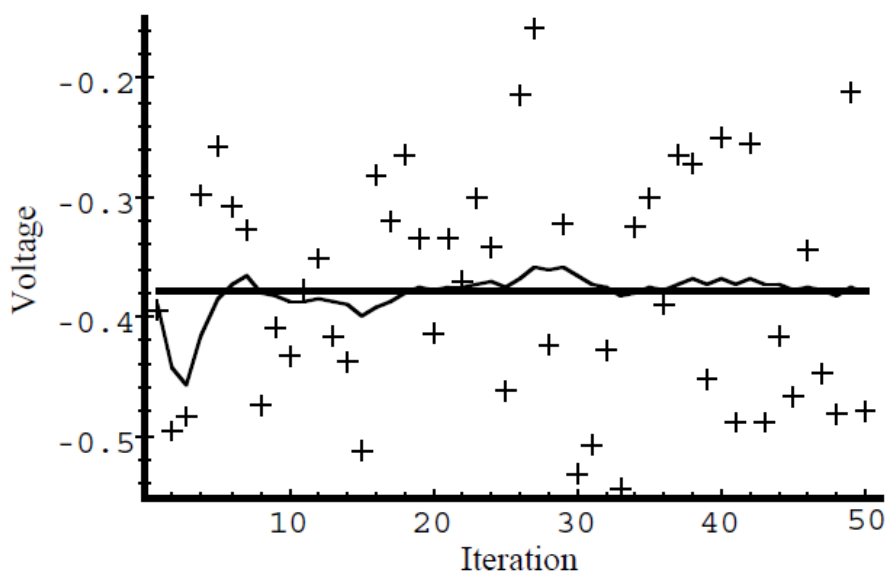
Významy rovnic jsou obdobné, a proto se zde nebudou rozepisovat, vše je důkladně rozebráno a vysvětleno v [9].



Obr. 3.2- 1 Znárodnění funkce algoritmu EKF se shrnutými rovnicemi výpočtu jednotlivých kroků. Předloha obrázku převzata z [9]

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
- [15] SUPERMAGNETY.CZ, *Magneticky tvrdé ferity [online]*. [cit 2014-08-01]. Dostupné z www: <http://www.supermagnety.cz/cz/64/magneticky-tvrde-ferity/>