



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV MECHANIKY TĚLES, MECHATRONIKY A BIOMECHANIKY

INSTITUTE OF SOLID MECHANICS, MECHATRONICS AND BIOMECHANICS

KOMPLEXNÍ MODEL ELEKTRO-MECHANICKÉ SOUSTAVY

COMPLEX MODEL OF ELECTRO-MECHANICAL SYSTEM

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Filip Marton

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Rostislav Huzlík, Ph.D.

BRNO 2021

Zadání bakalářské práce

Ústav: Ústav mechaniky těles, mechatroniky a biomechaniky
Student: **Filip Marton**
Studijní program: Aplikované vědy v inženýrství
Studijní obor: Mechatronika
Vedoucí práce: **Ing. Rostislav Huzlík, Ph.D.**
Akademický rok: 2020/21

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma bakalářské práce:

Komplexní model elektro–mechanické soustavy

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Předmětem práce je vytvořit v programu Matlab/Simulink komplexní model elektromechanické soustavy. Tento model bude obsahovat nejen části elektrické a mechanické, ale například také tepelnou část.

Cíle bakalářské práce:

1. Literární rešerše na téma diagnostika založená na modelech.
2. Systémový rozbor.
3. Tvorba modelu.
4. Zhodnocení možností využití pro praxi.

Seznam doporučené literatury:

HRABOVCOVÁ, Valéria, Pavol RAFAJDUS, Marek FRANKO a Peter HUDÁK, 2014. Meranie a modelovanie elektrických strojov. 3. vydání. Žilina: EDIS. ISBN 978-80-554-0852-1.

GREPL, Robert. Modelování mechatronických systémů v Matlab SimMechanics. Praha: BEN - technická literatura, 2007, 151 s. : il. ; 23 cm. ISBN 978-80-7300-226-8. (CS).

KARBAN, Pavel. Výpočty a simulace v programech Matlab a Simulink. Brno: Computer Press, 2006, 220 s. : il., tabulky, grafy ; 23 cm. ISBN 80-251-1301-9. (CS).

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2020/21

V Brně, dne

L. S.

prof. Ing. Jindřich Petruška, CSc.
ředitel ústavu

doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.
děkan fakulty

Abstrakt

Tato bakalářská práce se zabývá komplexními modely elektro-mechanických soustav. Tvoří ji literární rešerše na téma diagnostika založená na modelech a praktická část, zabývající se tvorbou daného modelu DC motoru s elektrickou, mechanickou a teplotní částí pomocí knihovny Simscape v programu Simulink. Celá práce končí zhodnocením výsledků a využití modelu v praxi.

Abstract

This bachelor's thesis deals with complex models of electro-mechanical systems. It consists of literary research about model-based diagnostics and of a practical part dealing with the creation of the given model of DC motor with electrical, mechanical and heat part by using Simscape libraries in a software Simulink. The whole thesis ends with the evaluation of results and the use of the model in practice.

Klíčová slova

Matlab, Simulink, diagnostika založená na modelu, Simscape, DC motor, kuličkový šroub, S – křivka

Keywords

Matlab, Simulink, model-based diagnostics, Simscape, DC motor, lead screw (ball screw), S – curve

Bibliografická citace

MARTON, F. *Komplexní model elektro-mechanické soustavy*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2021, 65 s. Vedoucí Ing. Rostislav Huzlík, Ph.D.

Poděkování

Děkuji tímto Ing. Rostislavovi Huzlíkovi, Ph.D. za cenné připomínky a rady při vypracování bakalářské práce.

Čestné prohlášení

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci na téma „Komplexní model elektro – mechanické soustavy“ vypracoval samostatně s použitím odborné literatury a pramenů uvedených v seznamu, který tvoří přílohu této práce.

V Brně dne 21. května 2021

.....

Filip Marton

Obsah

1. Úvod	13
2. Literární řešerše	14
2.1. Důvody používání diagnostiky	14
2.1.1. Obecné důvody	14
2.1.2. Nastavení nominálního (předpokládaného) chování	15
2.1.3. Důvody pro diagnostiku založenou na modelech	15
2.2. Tradiční diagnostika vs diagnostika založená na modelu	15
2.3. Poruchová diagnostika	15
2.3.1. Současná terminologie	16
2.3.2. Poruchové modelování	16
2.4. Diagnostika založená na konzistenci	18
2.5. Diagnostika s poruchovými režimy	20
2.5.1. Poruchové režimy	20
2.5.2. Poruchové režimy prvků	21
2.5.3. Vztah k poruchovým režimům systému	22
2.5.4. Jednotlivé a vícečetné poruchové režimy	23
2.6. Diagnostika reálných modelů	23
2.6.1. Kvalitativní modelování	23
2.7. Diagnostické systémy	24
3. Systémový rozbor	26
3.1. Motor	26
3.2. Model reálného napájecího zdroje	29
3.3. Měnič	29
3.4. Převodovka	30
3.5. Kuličkový šroub	30
3.6. Spojka	32
4. Tvorba modelu	33
4.1. Úvodní část	33
4.2. Elektrická část	33
4.3. Motor	34
4.4. Mechanická část	35
4.5. Teplotní část	37

4.6.	Generátor S – křivky.....	38
4.7.	Regulátory	40
5.	Výsledky modelu	42
5.1.	Výsledky ověřovacího modelu pro teploty.....	42
5.2.	Výsledky pro průběh dle S – křivky.....	43
5.3.	Výsledky pro průběh dle lineární přímky.....	44
5.4.	Výsledky pro průběh dle skokové změny.....	46
5.5.	Porovnání výsledků	48
6.	Zhodnocení možností využití pro praxi	49
7.	Závěr	50
8.	Bibliografie	52
9.	Seznam použitých zkratk a symbolů.....	55
10.	Seznam obrázků	58
11.	Seznam tabulek	60
12.	Seznam příloh.....	61
13.	Přílohy	62

1. Úvod

Elektro-mechanické soustavy přeměňují elektrickou energii na mechanickou a naopak. Většina elektromechanických prvků, jako jsou elektrické motory a solenoidy, jsou používány v kombinaci s mechanickými součástkami k zajištění ovládní nebo pohybu. Solenoidy jsou cívky, které jsou například používány v pohonech pro prodejní automaty, pokladny nebo fotokopírky. Elektrické motory nacházejí využití například jako pohony, které jsou schopné zajišťovat přímočarý pohyb, tj. v systémech elektrických okének, operačních stolech a robotických pažích.

K popisu a simulacím elektromechanických soustav se používá elektromechanické modelování. Tato praktika slouží k prozkoumání fyzikálních parametrů před vytvořením samotného systému. K těmto operacím patří i diagnostika založená na modelech, o které pojednává literární rešerše této závěrečné práce.

2. Literární rešerše

Tato kapitola závěrečné práce se zabývá diagnostikou založenou na modelech a jejím rozčleněním.

Diagnostika u modelů strojů se využívá k odhalení problémů a nedostatků před uvedením stroje do provozu. Tento typ diagnostiky byl navržen již v počátku 80. let minulého století k překonání limitací tehdy využívané metody tradičních expertních systémů. Diagnostika by měla být založena na reálném modelu zařízení, které je diagnostikováno. V praxi mohou být uvažovány různé typy modelů: strukturální (vztahující se k fyzikální nebo logické struktuře zařízení), funkční (popisující funkce zařízení), behaviorální (popisující, jak zařízení funguje, tj. jak je dosaženo funkcí zařízení), teleologické (popisující účel zařízení) anebo jejich kombinace. Modely by měly být znova použitelné dvěma způsoby. Na jedné straně by měl být použit stejný model zařízení pro různé úkoly řešení problémů (jako je diagnostika, simulace, rekonfigurace atd.). Na druhé straně by modely měly být kompoziční. Jinými slovy, model zařízení by měl být schopen fungování ve všech případech, kde je zařízení použito jako prvek většího systému. [1]

Metody založené na modelech se ukázaly být úspěšné, jak ve fázi návrhu, tak při implementaci inteligentních systémů, které zajišťují automatické diagnostické funkce. V těchto metodách je používáno velké množství modelů, které zastupují konkrétní oblast vědomostí. Například analytické stavové modely, modely přenosových funkcí, modely šíření poruchy a kvalitativní a kvantitativní modely. Diagnostické aplikace jsou postaveny na třech hlavních krocích: pozorování, porovnání a diagnóza. [5]

Těchto diagnostických metod se hojně používá při tvorbě návrhů a konstruování strojů, které jsou i běžně používané v domácnostech, jako automobily, pračky, myčky atd. [5]

Diagnostika založená na modelech působí i v oblasti umělé inteligence, která se zde zabývá diagnostikou systémů neboli hledáním příčin zodpovědných za selhání systémů. Vstupem diagnostického algoritmu obvykle bývá řada symptomů, tj. nesrovnalostí mezi pozorovaným a očekávaným chováním. A výstupem je řada možných chyb, které mohly být způsobeny těmito symptomy. Mimo jiné provádí diagnostiku z modelu systému, tzn. z popisu, jak má daný systém fungovat, nebo ze vztahů mezi chybami a symptomy. [10]

2.1. Důvody používání diagnostiky

2.1.1. Obecné důvody

Diagnostika nám pomáhá s rozhodováním, jaké komponenty nahradit nebo opravit. Informuje nás o míře chybovosti, o zotavování systému po poruše a o řešitelnosti systému. [6]

Diagnostika je základem pro prognostiku. Prognostika především pracuje s informacemi o dominantních stárnoucích nebo degradujících stavech systému. Říká nám, jaké operace ještě můžeme dokončit za přítomnosti poruchy. [6]

2.1.2. Nastavení nominálního (předpokládaného) chování

Nominální chování je definováno jako referenční chování na základě dostupných znalostí o systému. Sestává z odborných znalostí, známých operačních limitů, fyzikálních modelů, metod strojového učení atd. V diagnostice založené na modelech jsou tyto referenční hodnoty získávány z modelu, který explicitně popisuje nominální chování. Tyto modely mohou být statické nebo dynamické a lze je využít pro simulace. [6]

2.1.3. Důvody pro diagnostiku založenou na modelech

Modely jsou užitečné nástroje pro získání popisu systémů a pro jejich zkoumání. Dovolují příčinné uvažování a explicitní reprezentaci poruch. Zároveň nám dovolují vyvinet obecné modelově založené algoritmy. Modely používané pro diagnostiku se v těchto algoritmech používají jako vstupy. Algoritmy se pro nový systém nemění, pouze se mění dané modely. [6]

2.2. Tradiční diagnostika vs diagnostika založená na modelu

Tradičně byla diagnostika využívána hlavně pro zjišťování limitů systémů. Například když hodnota signálu senzoru překročí své normální rozsahy, tak senzor oznámí chybu. Normální rozsahy jsou předdefinované pomocí prahových hodnot. Tento normální rozsah může být závislý na operačních podmínkách součástek. Kupříkladu v letadle mohou být prahové hodnoty, které jsou uloženy v senzoru, pro různé operační podmínky definované výškou a rychlostí. Tento způsob využití prahových hodnot jako funkcí proměnných se dá považovat za diagnostiku založenou na modelech. [7]

Další tradiční přístup je dvojnásobení (nebo trojnásobení atd.) hardwaru, tzn. že je hardwaru v systému nadbytek. To je obvykle nazýváno jako redundance hardwaru a typickým příkladem jsou redundantní senzory. Obvykle se tato metoda používá jako záloha nebo jako ochranná pojistka. Cílem je omezit čas, kdy zařízení není v provozu, na minimum. V souvislosti s redundancí hardwaru jsou známy tyto tři hlavní problémy: hardware je drahý, potřebuje značný prostor a zvyšuje váhu systému. Navíc větší počet prvků v systému zvyšuje jeho složitost, což by mohlo vyžadovat více diagnostických nástrojů a mohlo by také zvyšovat riziko nahodilé chyby. [7]

2.3. Poruchová diagnostika

Používání explicitních modelů v poruchové diagnostice má velký potenciál a přináší následující výhody:

- Lze dosáhnout většího diagnostického výkonu, tj. méně závažné poruchy, lepší schopnost detekování většího množství typů poruch a čas potřebný na detekci poruchy je kratší.
- Diagnostika může být prováděna ve větším operačním rozsahu.
- Diagnostika může být prováděna pasivně bez narušení operačních procesů systému.
- Širší výběr možností pro provedení izolací chyb.
- Rušení mohou být vykompenzována, což nám ukazuje, že vysoký výkon diagnostiky může být získán navzdory přítomnosti rušení.
- Závislost na hardwarové redundanci může být omezena, což znamená, že cena a váha mohou být také sníženy. [7]

Model může být jakéhokoliv typu od logicky založených modelů až po diferenciální rovnice. V závislosti na typu modelu se mohou použít různé metody diagnostiky založené na modelech, například statistické metody, metody založené na umělé inteligenci anebo metody v rámci teorie řízení. Často se předpokládá, že diagnostika založená na modelech je velice náročná. Avšak to není pravda, protože kupříkladu tradiční zjišťování limitů je též diagnostika založená na modelech. [7]

Nevýhodou diagnostiky založené na modelech je zcela pochopitelně potřeba spolehlivého modelu a také může být náročnější proces návrhu. V reálném návrhu systému je velice pravděpodobné, že je velká část práce strávena nad stavbou modelu. Avšak tento model lze znovu použít, např. v návrhu řízení. [7]

Přesnost modelu je obvykle hlavní omezující faktor výkonu systému diagnostiky založené na modelech. Kvalita modelů je daleko více důležitá než samotná diagnostika v porovnání s celým obsahem řízení založeném na modelech. Důvodem je to, že zpětná vazba v řízení s uzavřenou smyčkou má tendenci být shovívavou vůči chybám modelu. Diagnostika by měla být porovnáována s řízením s otevřenou smyčkou, protože se zde nevyskytuje žádná zpětná vazba. Všechny chyby modelu se šíří přes diagnostiku systému a degradují diagnostický výkon. [7]

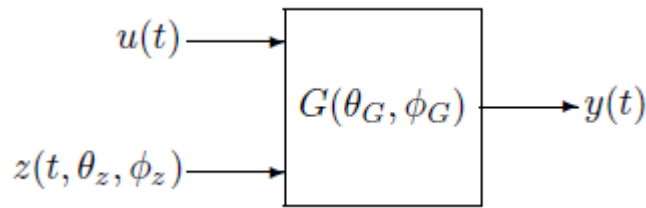
2.3.1. Současná terminologie

Tyto definice jsou zjednotné terminologie, která byla vytvořena pro obor poruchové diagnostiky. Definice následujících termínů jsou:

- **Diagnóza**
Rozhodnutí o povaze a příčiny něčeho.
- **Porucha**
Nedovolená odchylka alespoň jedné z charakteristických vlastností nebo proměnné systému od přijatelného nebo standardního chování. Nebo také neočekávaná chyba v dynamice systému.
- **Selhání**
Trvalé přerušení schopnosti systému provádět potřebnou funkci pod specifikovanými operačními podmínkami.
- **Detekce poruchy**
Rozhodnutí o poruše, která se nachází v systému v čase detekce.
- **Izolace poruchy**
Rozhodnutí o druhu, místě a čase detekce poruchy. Monitoruje detekci poruchy.
- **Identifikace poruchy**
Rozhodnutí o velikosti a časově proměnném chování poruchy. Monitoruje izolaci poruchy.
- **Diagnostika poruchy**
Rozhodnutí o typu, velikosti, místě a čase detekce poruchy. Monitoruje detekci poruchy a obsahuje, jak izolaci poruchy, tak identifikaci. [7]

2.3.2. Poruchové modelování

Pro vytvoření systému diagnostiky založené na modelu je potřeba model systému. Tenhle model je formálním zastoupením vědomostí o možných poruchách a jejich vlivu na procesy. Obecně lze říct, že lepší modely znamenají lepší diagnostický výkon. [7]



Obr. 2.1: Obecný model systému [7]

2.3.2.1. Poruchový stav

Uvažovaný model systému je vyobrazen na Obr. 2.1. Model je složen z plantu $G(\theta_G, \varphi_G)$ a vektorového signálu $z(t, \theta_z, \varphi_z)$. Parametry θ_G a θ_z popisují poruchy a parametry φ_G a φ_z popisují rušení. [7]

Plant je vymodelovaný jako libovolný systém $G(\theta_G, \varphi_G)$ popsáný diferenciálními rovnicemi. Má známé vstupy $u(t)$, např. ovládací signály, a měřitelné výstupy $y(t)$. Navíc může být plant ovlivněn jinými signály, které jsou shromážděny v $z(t, \theta_z, \varphi_z)$. Tyhle dodatečné signály jsou považovány za neznámé nebo alespoň částečně neznámé. Některé z těchto signálů mohou být vymodelovány jako stochastické (nahodilé) procesy. Plant $G(\theta_G, \varphi_G)$ je považován za úplně deterministický (určitý) a tedy všechny stochastické signály jsou shromážděny v signálu $z(t, \theta_z, \varphi_z)$. [7]

Konstantní parametrický vektor θ_G představuje skutečnou, ale neznámou poruchovou situaci plantu $G(\theta_G, \varphi_G)$. Konstantní parametrický vektor θ_z představuje skutečnou, ale neznámou poruchovou situaci signálu $z(t, \theta_z, \varphi_z)$. Parametrický vektor $\theta = [\theta_G \ \theta_z]$ je nazýván poruchovým stavem a představuje poruchovou situaci celého systému. Jeden nebo více možných poruchových stavů vždy korespondují s bezporuchovým případem. Prostor poruchových stavů, tj. parametrový prostor vektoru θ je vždy označen Θ . Byla zvolena konvence, že θ není závislý na čase, což je v souladu s předpokladem, že poruchový stav systému se nikdy nemění. I když se tohle může zdát jako omezení, v tomto případě to omezením není. [7]

V korespondenci s θ se zde nachází vektor konstantních parametrů $\varphi = [\varphi_G \ \varphi_z]$, který představuje rušení ovlivňující systém. [7]

Příklad 2.1 (Nyberg, 1999, s. 16):

Předpokládá se model zesilovače:

$$y(t) = gu(t) + v(t) \quad (2.1)$$

$$v(t) \sim N(0, \sigma), \quad (2.2)$$

kde $u(t)$ je vstup, $y(t)$ je výstup, g je zesilovací přírůstek a $v(t)$ je signál šumu s rozptylem σ^2 . To znamená, že signál $z(t, \theta_z)$ zde v obecném modelu odpovídá $v(t)$ a parametry θ_G a θ_z jsou:

$$\theta_G = g \quad (2.3)$$

$$\theta_z = \sigma, \quad (2.4)$$

Potom lze u bezporuchového případu například předpokládat, že odpovídá poruchovému stavu

$$\theta = [g \ \sigma] = [10 \ 0,01] \quad (2.5)$$

a jakákoliv odchylka θ od tohoto poruchového stavu může být považována za poruchu.

2.4. Diagnostika založená na konzistenci

Cílem této diagnostiky je najít část systému, která je zodpovědná za chybné chování a zároveň ověřit konzistenci daného modelu a pozorování. Takže je očekáván systémový model, který je rozložitelný na jednotlivé prvky způsobem, který dovoluje každému prvku přiřadit zodpovědnost za specifickou část chování. Popis systému se skládá ze tří částí:

- Chování typů prvků

Pro každý typ prvků je popsán očekávaný vztah mezi jeho vstupem a výstupem za předpokladu, že každý prvek pracuje správně. Popis těchto typů má velice podrobně popsanou strukturu. Všechny vzorce popisující dané chování dodržují následující vzor:

$$typ_i(x) \wedge ok(x) \rightarrow \Phi(x), \quad (2.6)$$

kde $\Phi(x)$ je obecný vzorec, typ_i je predikativní tvrzení, že prvek x patří typu i , a tvrzení $ok(x)$ je predikát, který říká, jestli se prvek x chová normálně. Jinými slovy: „Jestliže je prvek typu i a zároveň se chová normálně, pak se chová tak, jak bylo popsáno $\Phi(x)$ “. [10]

- Seznam prvků

Seznam prvků je sada tvrzení, která sestavuje prvky v systému a uvádí jejich typ. Každé tvrzení je základním vzorcem tohoto druhu:

$$typ_i(c), \quad (2.7)$$

kde c je konstanta, která reprezentuje jednotlivý prvek. Tento vzorec lze slovně popsat jako: „Prvek c je typu i “. [10]

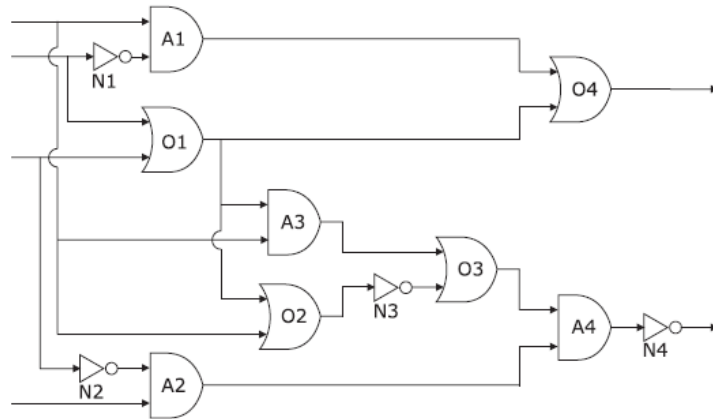
- Struktura systému

Sada tvrzení popisující souvislost mezi vstupem a výstupem různých prvků. Typicky se jedná o tvrzení rovnosti, které říká, že daný vstup jednoho prvku je rovný výstupu jiného prvku:

$$in_i(c) = out_j(d), \quad (2.8)$$

kde c a d jsou názvy jednotlivých prvků a in a out jsou názvy funkcí označujících jeden ze vstupů c a jeden z výstupů d . [10]

Příklad 2.2 (Picardi, 2005, s. 3):



Obr. 2.2: Struktura obvodu [10]

Předpokládá se obvod zobrazený na Obr. 2.2, na kterém lze rozlišit tři typy prvků (hradla (gate) and, or a not) a dvanáct prvků (čtyři od každého typu). Nejdříve se popíše chování každého typu prvků:

$$\begin{aligned}
 \text{TYP}_1 = \{ & (G_{not}(x) \wedge ok(x)) \rightarrow (in(x) = 0 \vee in(x) = 1) \wedge \\
 & (in(x) = 1 \rightarrow out(x) = 0) \wedge \\
 & (in(x) = 0 \rightarrow out(x) = 1), \\
 & (G_{and}(x) \wedge ok(x)) \rightarrow (in_1(x) = 0 \vee in_1(x) = 1) \wedge \\
 & (in_2(x) = 0 \vee in_2(x) = 1) \wedge \\
 & ((in_1(x) = 0 \vee in_2(x) = 0) \rightarrow out(x) = 0) \wedge \\
 & ((in_1(x) = 1 \vee in_2(x) = 0) \rightarrow out(x) = 0) \wedge \\
 & ((in_1(x) = 0 \vee in_2(x) = 1) \rightarrow out(x) = 0) \wedge \\
 & ((in_1(x) = 1 \vee in_2(x) = 1) \rightarrow out(x) = 1), \\
 & (G_{or}(x) \wedge ok(x)) \rightarrow (in_1(x) = 0 \vee in_1(x) = 1) \wedge \\
 & (in_2(x) = 0 \vee in_2(x) = 1) \wedge \\
 & ((in_1(x) = 0 \vee in_2(x) = 0) \rightarrow out(x) = 0) \wedge \\
 & ((in_1(x) = 1 \vee in_2(x) = 0) \rightarrow out(x) = 1) \wedge \\
 & ((in_1(x) = 0 \vee in_2(x) = 1) \rightarrow out(x) = 1) \wedge \\
 & ((in_1(x) = 1 \vee in_2(x) = 1) \rightarrow out(x) = 1) \} \quad (2.9)
 \end{aligned}$$

Poté se vypíší prvky systému společně s jejich typem:

$$\text{TYPY}_{\text{PRVKŮ}_1} = \{G_{not}(N1), G_{not}(N2), G_{not}(N3), G_{not}(N4), G_{and}(A1), G_{and}(A2), \\ G_{and}(A3), G_{and}(A4), G_{or}(O1), G_{or}(O2), G_{or}(O3), G_{or}(O4)\} \quad (2.10)$$

Nakonec se vyjádří spojení mezi prvky, které je možné vidět na Obr. 2.2:

$$\begin{aligned} \text{SPOJ}_1 = \{ & \text{in}(N1) = \text{in}_1(O1), \text{in}_2(O1) = \text{in}(N2), \text{out}(N1) = \text{in}_2(A1), \\ & \text{out}(N2) = \text{in}_1(A2), \text{in}_1(A1) = \text{in}_2(A3), \text{in}_1(A1) = \text{in}_2(O2), \\ & \text{out}(O1) = \text{in}_1(A3), \text{out}(O1) = \text{in}_1(O2), \text{out}(O1) = \text{in}_2(O4), \\ & \text{out}(A1) = \text{in}_1(O4), \text{out}(O2) = \text{in}(N3), \text{out}(A3) = \text{in}_1(O3), \\ & \text{out}(N3) = \text{in}_2(O3), \text{out}(O3) = \text{in}_1(A4), \text{out}(A2) = \text{in}_2(A4), \\ & \text{out}(A2) = \text{in}_2(A4)\} \end{aligned} \quad (2.11)$$

Takže celý model obvodu OBVOD_1 je:

$$\text{SD}_1 = \text{TYP}_1 \cup \text{TYPY}_{\text{PRVKŮ}_1} \cup \text{SPOJ}_1, \quad (2.12)$$

kde SD_1 je popis systému.

2.5. Diagnostika s poruchovými režimy

2.5.1. Poruchové režimy

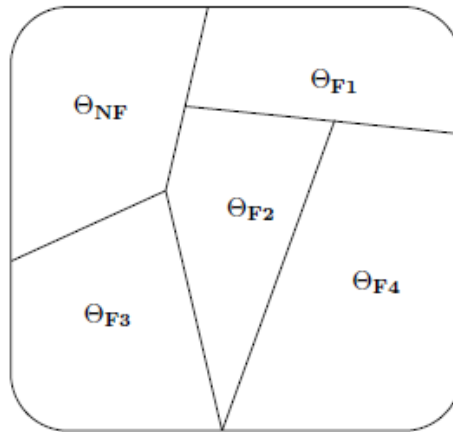
Různé poruchy mohou být klasifikovány do různých poruchových režimů. Například lze uvažovat systém, který obsahuje vodní nádrž a ze dna této nádrže uniká voda. Všechny úniky vody podobné tomuto spadají bez ohledu na to, ve které části dna se nacházejí, do poruchového režimu „únik vody ze dna nádrže“. [7]

Zařazení různých poruch do poruchových režimů odpovídá rozdělení prostoru poruchových režimů θ . To znamená, že každý poruchový režim γ je spojený s podmnožinou θ_γ z θ . Jeden z poruchových režimů odpovídá bezporuchovému případu a tento režim se bude označovat jako režim „žádná porucha“ nebo NF (z anglického no fault). Dále všechny množiny θ_γ jsou po párech disjunktí a platí, že:

$$\theta = \bigcup_{\gamma \in \Omega} \theta_\gamma, \quad (2.13)$$

kde Ω je použita k označení množiny, která obsahuje všechny režimy poruch. [7]

Jestliže je v systému přítomný poruchový režim γ , potom platí, že $\theta \in \theta_\gamma$. Skutečnost, že všechny množiny θ_γ jsou po párech disjunktí, znamená, že může být současně přítomen pouze jeden poruchový režim. Lze použít konvenci, že jeden z poruchových režimů vždy odpovídá režimu, který je bezporuchový. [7]



Obr. 2.3: Množina Θ [7]

Pro zjednodušení zápisu lze přiřadit ke každému poruchovému režimu zkratku. Toto je znázorněno na Obr. 2.3, který ukazuje, že celá množina Θ byla rozdělena do pěti podmnožin, které korespondují s poruchovými režimy NF, F1, F2, F3 a F4. Nyní je možné obecně popsat poruchu:

„Poruchový režim θ je porucha, jestliže $\theta \notin \Theta_{NF}$.“ [7]

2.5.2. Poruchové režimy prvků

Kromě definování poruchových režimů pro celý systém je přirozené také brát v úvahu poruchové režimy prvků. K zdůraznění rozdílu mezi poruchovými stavy prvků a poruchovými režimy celého systému je možné ty druhé někdy označovat jako poruchové režimy systému. [7]

Jak bylo řečeno v kapitole 2.4, tak systém může být rozdělen do řady prvků. Charakteristickou vlastností prvku je to, že se u něj může v danou chvíli vyskytovat pouze jeden druh poruchy. Rozdělení různých druhů poruch se provádí zavedením poruchových režimů prvků. Jako příklad lze uvést ventil s poruchovými stavy „žádná porucha“, „uvízl v operaci otevření“ a „uvízl v operaci zavření“. Očividně žádná z těchto poruch se nemůže na ventilu vyskytovat současně. Analogicky s poruchovými režimy systému lze použít konvenci, že jedním z poruchových stavů prvků je bezporuchový případ. [7]

Každý poruchový režim prvků ψ je spojen s podmnožinou D^i_ψ množiny D^i . To znamená, že pokud poruchový stav ψ je přítomen v prvku i , tak pak platí, že $\theta_i \in D^i_\psi$. Analogicky s poruchovými režimy systému vytvářejí množiny D^i_ψ rozdělení prostoru poruchového režimu prvku D^i . To znamená, že množiny D^i_ψ jsou po párech disjunktní a platí, že

$$D^i = \bigcup_{\psi \in \Omega_i} D^i_\psi, \quad (2.14)$$

kde Ω_i je množina všech poruchových režimů prvků pro prvek i . [7]

Příklad 2.3 (Nyberg, 1999, s. 17 a 22):

Zvažuje se systém popsany následujícími rovnicemi:

$$\dot{x} = f(x, u) \quad (2.15)$$

$$y_1 = h_1(x) + b_1 \quad (2.16)$$

$$y_1 = h_1(x) + b_1 \quad (2.17)$$

$$y_2 = h_2(x) + b_2 \quad (2.18)$$

$$b_1 \geq 0 \quad (2.19)$$

$$b_2 \geq 0 \quad (2.20)$$

Konstanty b_1 a b_2 reprezentují poruchy vychýlení senzoru a předpokládá se, že může nastat pouze pozitivní výchylka.

Systém lze považovat za dvouprvkový. Těmito prvky jsou senzor 1 a senzor 2. Potom $\theta_1 = b_1$ a $\theta_2 = b_2$. Odpovídající poruchové režimy prvků D^1 a D^2 jsou $D^1 = \langle 0; \infty \rangle$ a $D^2 = \langle 0; \infty \rangle$. To znamená, že $\theta = [\theta_1 \ \theta_2] = [b_1 \ b_2]$ a ze stavového prostoru poruchy Θ se stane

$$\theta = D^1 \times D^2 = \{[b_1 \ b_2], b_1 \geq 0, b_2 \geq 0\}. \quad (2.21)$$

Jsou uvažovány čtyři poruchové režimy:

NF no fault (žádná porucha)

B1 výchylka v senzoru 1

B2 výchylka v senzoru 2

B1&B2 výchylka obou senzorů

Množiny Θ , Θ_{NF} , Θ_{B1} , Θ_{B2} a $\Theta_{B1\&B2}$ se stanou

$$\Theta_{NF} = \{[0 \ 0]\} \quad (2.22)$$

$$\Theta_{B1} = \{[b_1 \ 0], b_1 > 0\} \quad (2.23)$$

$$\Theta_{B2} = \{[0 \ b_2], b_2 > 0\} \quad (2.24)$$

$$\Theta_{B1\&B2} = \{[b_1 \ b_2], b_1 > 0, b_2 > 0\} \quad (2.25)$$

Poruchový režim vyskytující se v systému bude častokrát označován jako \mathbf{F}_p . Takže když bude v systému přítomen poruchový režim \mathbf{F}_1 , popíše se jako $\mathbf{F}_p = \mathbf{F}_1$. Tohle dále pro přítomný chybový stav θ znamená, $\theta \in \Theta_{F1}$.

2.5.3. Vztah k poruchovým režimům systému

Poruchový stav systému může být sestaven z vektoru poruchových režimů prvků. Aby bylo možné odlišit poruchové režimy systému od poruchových režimů jednotlivých prvků, využívá se pro ně tučné písmo. Někdy je však již z kontextu patrné, o jaký poruchový režim se jedná a odlišné značení není nutné. Příkladem jsou

$$\mathbf{NF} = [NF^1, NF^2, \dots, NF^p] \quad (2.26)$$

$$\mathbf{F}_1^1 = [F_1^1, NF^2, \dots, NF^p] \quad (2.27)$$

$$\mathbf{F}_1^2 = [NF^1, F_1^2, NF^3, \dots, NF^p] \quad (2.28)$$

$$\mathbf{F}_2^1 \& \mathbf{F}_1^2 = [F_2^1, F_1^2, NF^3, \dots, NF^p] \quad (2.29)$$

První z těchto příkladů je bezporuchový případ pro celý systém. Pro ostatní příklady se použila konvence, že prvky, které nemají žádné své poruchové režimy obsaženy v zápisu pro poruchový režim systému, mají poruchový stav prvků NF^i . [7]

2.5.4. Jednotlivé a vícečetné poruchové režimy

Poruchové režimy systému, ve kterých pouze jeden poruchový režim prvku není NF^i se nazývají jednotlivé poruchové režimy. Obvykle také bezporuchový systémový poruchový režim, tj. \mathbf{NF} je nazýván jednotlivým. Protikladem jsou vícečetné poruchové režimy, kde více než jeden poruchový režim prvku není NF^i . [7]

Problém se zohledněním vícečetných poruchových režimů je, stoupající náročnost diagnostického problému. Když množství prvků narůstá, tak množství různých poruchových režimů systému roste exponenciálně. Z toho vyplývá, že je potřeba komplexnější a dražší diagnostický systém. Jedním řešením je uvažovat pouze jednotlivé poruchové režimy. To odpovídá domněnce, že v dané chvíli může být přítomna pouze jedna porucha. V tomhle případě množství poruchových režimů systému roste lineárně s množstvím prvků. [7]

Brát v úvahu pouze jednotlivé poruchové režimy se může zdát nerealistická, ale alespoň tři praktické úvahy ji podporují tuto domněnku:

- Když je vybrán dostatečně malý časový úsek, je pravděpodobné, že jedna z poruch se objeví jako první, přestože je přítomno několik dalších.
- V systému, ve kterém je jedna porucha velmi nepravděpodobná, je ještě více nepravděpodobné, že dojde ke dvěma a více poruchám.
- Specifikace diagnostického systému vyžaduje pouze diagnostiku jednotlivých poruch. Toto podporuje i fakt, že diagnostické systémy schopné zpracovávat vícečetné poruchové režimy by se prodražily, kvůli zvýšené potřebě senzorů a hardwaru. [7]

Jakousi střední cestou mezi jednotlivými poruchovými režimy a vícečetnými poruchovými režimy je podmnožina vícečetných poruchových režimů. Například je možné uvažovat všechny poruchové režimy systému, kde jsou přítomny maximálně dvě poruchy prvků. [7]

2.6. Diagnostika reálných modelů

2.6.1. Kvalitativní modelování

Jednou z hlavních aplikací diagnostiky založené na modelech jsou reálné systémy (např.: motor automobilu, elektrická zařízení letadla, pneumatické stroje průmyslových továren atd.). Avšak reálné systémy jsou spojité, používané metody modelování a modely systémů jsou diskrétní. V literatuře zabývající se diagnostikou založenou na modelech existují dva hlavní přístupy pro získání diskrétního modelu reálného systému:

- **Modely diskrétních událostí**
V tomto případě je systém viděn jako vyvíjející se proces, a proto se nemodelují fyzikální veličiny, ale události, které se dějí v systému (např.:

poškození potrubí, uzavření ventilu nebo dosažení pevné prahové hodnoty teploty). Model systému je v tomto případě automat o konečném počtu stavů.

- **Kvalitativní uvažování**

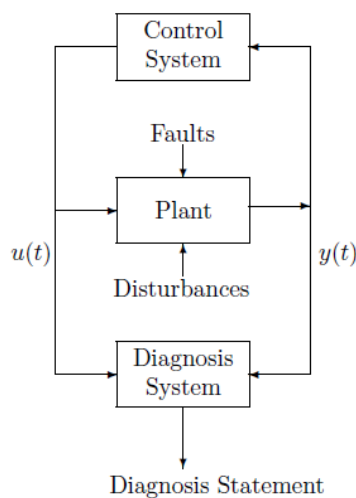
Tento postup se zrodil v oblasti umělé inteligence a hlavní myšlenkou je, že lidské uvažování fyzikálních systémů (a hlavně diagnostické uvažování) obvykle nepotřebuje přesná měření systému, ale spíše funguje na výběru příliš hodně/ příliš málo, přítomný/ nepřítomný nebo na obecně širokých rozsazích hodnot. Takže systém je popsán z hlediska fyzikálních veličin, ale proměnné se pohybují přes konečnou sadu hodnot, každá reprezentující rozsah skutečných hodnot. Zbytek této sekce se bude držet tohoto přístupu.

Nacházejí se zde typy prvků, prvkové instance a systémové struktury. Avšak každý model prvkového typu je kvalitativním popisem svého reálného protějšku. [7]

2.7. Diagnostické systémy

K provedení poruchové diagnostiky je potřeba diagnostický systém. Obecná struktura aplikace obsahující diagnostický systém je ukázána na Obr. 2.4. Vstupy diagnostického systému jsou signály $u(t)$ a $y(t)$, které jsou rovny řídicím signálům systému nebo jsou jejich nadmnožinami. Kromě řídicích signálů je plant také ovlivněn poruchami a rušeními, které nejsou známy pro diagnostický systém. Úkolem diagnostického systému je vygenerovat diagnostický výrok S (z anglického „Diagnosis Statement“), který obsahuje informace o poruchových režimech, které mohou vysvětlit chování procesu. Diagnostický systém je považovaný za pasivní, tj. není schopen ovlivnit plant. [7]

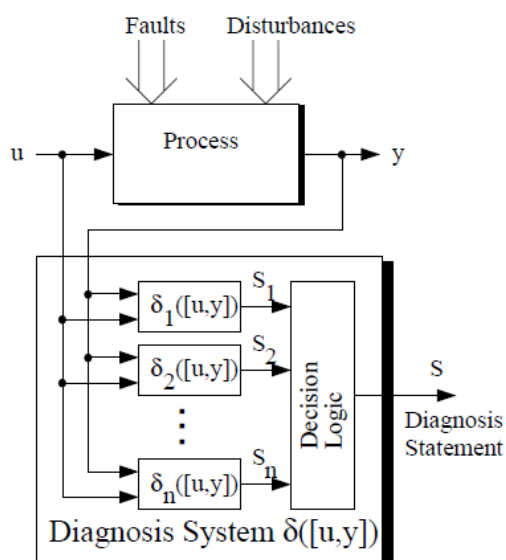
V souladu s teorií rozhodování (z anglického decision theory; je studium možností činitelů; je příbuzná k oblasti teorii her [11], [12]) je diagnostický systém rozhodovacím pravidlem (funkce, která mapuje pozorování k odpovídajícímu ději) $\delta(x)$, kde $x = [u \ y]$ a S je děj. To znamená, že diagnostický systém je funkcí u a y a $S = \delta(x) = \delta([u \ y])$. Veličina x může obsahovat několik vzorků u a y z různých časů. [7]



Obr. 2.4: Obecná struktura diagnostické aplikace [7]

Jeden způsob strukturování diagnostického systému je ukázán na Obr. 2.5. Celý diagnostický systém $\delta(x)$ lze rozdělit na menší díly $\delta_i(x)$, kterým se říkají zkoušky. Tyto zkoušky jsou také rozhodovacím pravidlem. Předpokládá se, že každá zkouška $\delta_i(x)$ generuje diagnostický výrok S_i , tj. $S_i = \delta_i(x)$. Účel rozhodovací logiky je potom zkombinování této informace k vytvoření diagnostického výroku S . [7]

Diagnostický výrok S a individuální diagnostické výroky S_i obsahují informaci o poruchových režimech, které vysvětlují chování systému. O této informaci lze uvažovat alespoň dvěma způsoby. První je užití znázornění, ve kterém diagnostické výroky S a S_i jsou množinami systémových poruchových režimů. Druhý je vyjádření diagnostického výroku jako propoziční logické vzorce, ve kterých jsou propozičními symboly poruchové režimy prvků. [7]



Obr. 2.5: Obecný diagnostický systém [7]

3. Systémový rozbor

Součástí této kapitoly je systémový rozbor komplexního modelu stejnosměrného motoru. Tento model se skládá z elektrické, mechanické a tepelné části. V následujících podkapitolách budou podrobně rozebrány jednotlivé prvky modelu a jejich matematicko-fyzikální popis.

3.1. Motor

Jako referenční motor byl vybrán stejnosměrný motor s permanentními magnety od firmy MAXON s číselným označením 353300. Tento motor má vnější průměr 65 mm, výkon 250 W a kartáče z grafitu. V Tab. 3.1 jsou vypsány důležité specifikace motoru.

Tab. 3.1: Specifikace stejnosměrného motoru MAXON 353300 [14]

Hodnoty při jmenovitém napětí		
Jmenovité napětí	70	V
Otáčky naprázdno	3180	rpm (ot/min)
Proud naprázdno	160	mA
Jmenovité otáčky	2960	rpm (ot/min)
Jmenovitý moment (maximální kontinuální moment)	839	nNm
Jmenovitý proud (maximální kontinuální proud)	4,21	A
Moment při zabrzdění	13700	mNm
Proud při zabrzdění	66,1	A
Maximální účinnost	89	%
Vlastnosti		
Odpor kotvy	1,06	Ω
Indukčnost kotvy	458	mH
Momentová konstanta	224	mNm/A
Otáčková konstanta	46,1	rpm/V
Gradient otáčky/moment	0,236	rpm/mNm
Mechanická časová konstanta	3,16	ms
Setrvačnost rotoru	1280	gcm ²
Tepelné údaje		
Tepelný odpor pláště – okolní prostředí	1,3	K/W
Tepelný odpor vinutí – pláště	1,85	K/W
Tepelná časová konstanta vinutí	117	s
Tepelná časová konstanta motoru	1060	s
Teplota okolního prostředí	100...+100	°C
Maximální teplota vinutí	+125	°C

Vzhledem k tomu, že se jedná o stejnosměrný motor, platí pro motor v přechodném stavu následující rovnice:

$$u_a = R_a \cdot i_a + L_a \cdot \frac{di_a}{dt} + u_i, \quad (3.1)$$

kde u_a je napětí na kotvě, R_a je odpor kotvy, i_a je proud na kotvě, L_a je indukčnost kotvy a u_i je indukované napětí na motoru, pro které platí vztah:

$$u_i = c \cdot \Phi \cdot \omega, \quad (3.2)$$

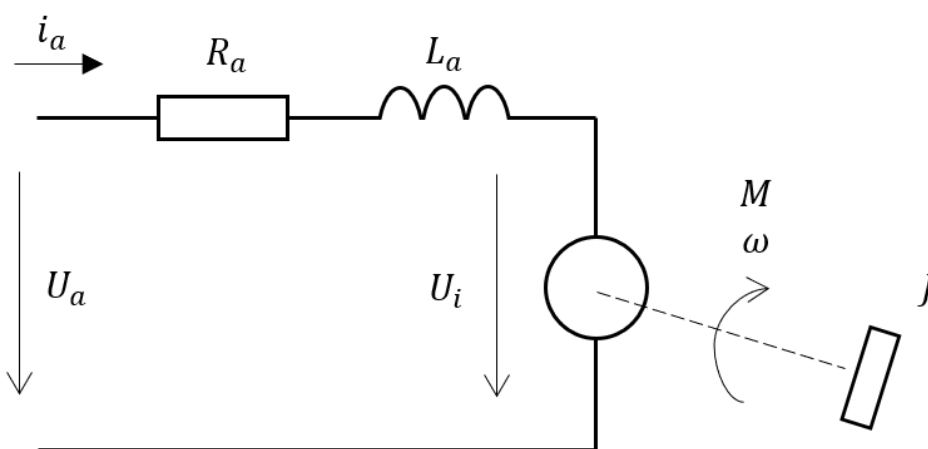
kde $c \cdot \Phi$ je konstanta motoru, která shlukuje více konstant dohromady, a ω je úhlová rychlost. Další rovnice, která platí pro stejnosměrný motor v přechodném stavu je momentová rovnice:

$$M_i = J \cdot \frac{d\omega}{dt} + B \cdot \omega + M_0, \quad (3.3)$$

kde M_i je moment motoru, J je celkový moment setrvačnosti na hřídeli motoru, B je koeficient viskózního tření a M_0 je moment tření. [15] Moment motoru M_i je ještě vyjádřen podle vztahu:

$$M_i = c \cdot \Phi \cdot i_a \quad (3.3)$$

Jak je možné si povšimnout konstanta motoru $c \cdot \Phi$ se vyskytuje i ve vztahu pro moment motoru. Tudíž jsou nejen pomocí této konstanty, ale i pomocí proudu na kotvě rovnice (3.1) a (3.3) spřažené. Tyto rovnice lze odvodit i z náhradního schématu, který je na Obr. 3.1.



Obr. 3.1: Náhradní schéma stejnosměrného motoru [15]

Po odeznění přechodového jevu se motor dostane do ustáleného stavu, ve kterém již nedochází ke změně proudu a úhlové rychlosti za čas, tudíž $\frac{di_a}{dt} = 0$ a $\frac{d\omega}{dt} = 0$. Rovněž se zanedbá viskózní tření a moment tření, protože v našem modelu se nevyužívají. Takže stejnosměrný motor, který je v ustáleném stavu, charakterizují následující vztahy:

$$U_a = R_a \cdot I_a + c \cdot \Phi \cdot \omega \quad (3.4)$$

$$M_i = c \cdot \Phi \cdot I_a \quad (3.5)$$

V modelu motoru vystupují i příkon, výkon a ztráty. Mezi ztráty se započítávají ztráty v železe ΔP_{Fe} , ztráty ve vinutí ΔP_j a mechanické ztráty ΔP_m . Příkon motoru P_1 se může spočítat z výkonu a účinnosti:

$$P_1 = \frac{P_2}{\eta}, \quad (3.6)$$

kde η je účinnost motoru a výkon motoru P_2 . Dále pro příkon platí, že se rovná součtu výkonu a všech ztrát v motoru:

$$P_1 = \Delta P_{Fe} + \Delta P_j + \Delta P_m + P_2 \quad (3.7)$$

Výkon lze spočítat jako součet mechanického výkonu P_{mech} a mechanických ztrát:

$$P_2 = P_{mech} + \Delta P_m \quad (3.8)$$

Výkon motoru lze také spočítat jako součin jmenovitého momentu M_n a jmenovitých otáček n_n přepočtených na úhlovou rychlost:

$$P_2 = M_n \cdot \frac{2\pi \cdot n_n}{60} \quad (3.9)$$

Ztráty ve vinutí motoru lze spočítat jako součin odporu vinutí R_a a druhé mocniny jmenovitého proudu I_n :

$$\Delta P_j = R_a \cdot I_n^2 \quad (3.10)$$

K počítání tohoto modelu byla zvolena (po konzultaci s vedoucím) hodnota mechanických ztrát, která se rovná přibližně 15 % všech ztrát v motoru. Do mechanických ztrát se zahrnují i ztráty v ložiskách na komutátoru motoru, které byly zvoleny přibližně 1 W. Mechanické ztráty se tudíž spočítají pomocí následujícího vztahu:

$$\Delta P_m = 0,15 \cdot (P_1 - P_2) \quad (3.11)$$

Ztráty je potřeba spočítat pro jmenovité hodnoty kvůli pozdějšímu využití při tvorbě teplotního modelu motoru. Po dosazení hodnot motoru z Tab. 3.1 a jeho označení vychází:

$$P_2 = 260,065 \text{ W} \quad (3.12)$$

$$P_1 = 292,208 \text{ W} \quad (3.13)$$

$$\Delta P_j = 18,788 \text{ W} \quad (3.14)$$

$$\Delta P_m = 4,821 \text{ W} \quad (3.15)$$

Po úpravě rovnice (3.7) se dostane vztah pro výpočet ztrát v železe:

$$\Delta P_{Fe} = P_1 - \Delta P_j - \Delta P_m - P_2 \quad (3.16)$$

$$\Delta P_{Fe} = 8,535 \text{ W} \quad (3.17)$$

Ztráty v železe se dělí na hysterezní ΔP_h a ztráty od vířivých proudů ΔP_v :

$$\Delta P_h = k_h \cdot f \cdot B_m^n \cdot m, \quad (3.18)$$

$$\Delta P_v = k_v \cdot f^2 \cdot B_m^2 \cdot m, \quad (3.19)$$

kde k_h a k_v jsou koeficienty závislé na materiálu a tloušťce plechů, B_m je maximální hodnota magnetické indukce, m je hmotnost magnetického materiálu a f je frekvence. [16] Pro výpočet ztrát železa do modelu se provede zjednodušení a to takové, že se budou uvažovat pouze vířivé ztráty, které jsou vyšší než ztráty hysterezní. Takže pomocí jmenovité hodnoty ztrát v železe a lze získat konstantu k_{Fe} , která reprezentuje koeficienty, magnetickou indukci a hmotnost a která se později použije při tvorbě teplotního části modelu motoru. Vztah vypadá následovně:

$$\Delta P_{Fe} = k_{Fe} \cdot f^2 \quad (3.20)$$

$$\Delta P_{Fe} = k_{Fe} \cdot \left(\frac{n}{60}\right)^2 \quad (3.21)$$

$$k_{Fe} = \frac{\Delta P_{Fe} \cdot 60^2}{n^2} \quad (3.22)$$

$$k_{Fe} = 3,507 \cdot 10^{-3} \text{ W} \cdot \text{s}^2 \quad (3.23)$$

Mechanické ztráty jsou také lineárně závislé na absolutní hodnotě otáček. Takže podobně jako u ztrát v železe lze získat konstantu k_m , která reprezentuje sklon lineární závislosti. Vztah pro výpočet této konstanty pak vypadá následovně:

$$\Delta P_m = k_m \cdot |n| \quad (3.24)$$

$$k_m = \frac{\Delta P_m}{n_n} \quad (3.25)$$

$$k_m = 1,629 \cdot 10^{-3} \text{ W} \cdot \text{min} \quad (3.26)$$

Pomocí rovnic, které byly ukázány v této podkapitole, lze namodelovat stejnosměrný motor s jeho teplotní simulací.

3.2. Model reálného napájecího zdroje

Jako model reálného napájecího zdroje byl využit napájecí zdroj s úbytkem napětí. To znamená, že zdroj má vnitřní odpor. Rovnice pro napětí na modelu reálného napájecího zdroje vychází z Ohmova zákona:

$$U_z = U_e - I \cdot R_i, \quad (3.27)$$

kde U_z je svorkové napětí napájecího zdroje, U_e je elektromotorické napětí, I je proud, který prochází obvodem a R_i je vnitřní odpor napájecího zdroje.

3.3. Měnič

V modelu byl použit snižující stejnosměrný měnič, který pomocí střídavy mění vstupní napětí z napájecího zdroje na výstupní napětí pro motor. Takže se tohoto prvku využilo k řízení motoru. Samotná střída je omezena na hodnoty $\langle 0;1 \rangle$. Vztah pro výstupní napětí je následující:

$$U_m = s \cdot U_z, \quad (3.28)$$

kde U_m je výstupní napětí měniče, s je střída a U_z napětí na zdroji snížené o úbytek na vnitřním odporu.

3.4. Převodovka

Převod převodovky se vypočte jako poměr vstupních n_1 a výstupních n_2 otáček na hřídeli:

$$i = \frac{n_1}{n_2} \quad (3.29)$$

3.5. Kuličkový šroub

Jako kuličkový šroub byl vybrán typu FSI DIN HIWIN s označením R1204 – B1 – RSIT od výrobce HIWIN TECHNOLOGIES CORP. Informace o tomto šroubu byly získány z katalogu firmy HIWIN [19]. Tento šroub byl vybrán hlavně proto, že hřídel motoru má průměr 12 mm. Z označení šroubu je také možné si povšimnout, že má stoupání 4 mm. Také požadujeme délku 1 m. Další specifikace od obchodníka jsou: hmotnost matice $m_m = 0,10$ kg, vnější průměr matice $d_2 = 25,5$ mm a hmotnost samotného šroubu $m_s = 1,07$ kg. Pomocí těchto specifikací lze dopočítat moment setrvačnosti šroubu J_s , moment setrvačnosti matice J_m a kritické otáčky šroubu n_k . Vztah pro moment setrvačnosti šroubu vypadá následovně:

$$J_s = \frac{1}{2} m_s \cdot r_1^2 = m_s \cdot \frac{d_1^2}{8}, \quad (3.30)$$

kde r_1 je poloměr šroubu a d_1 je průměr šroubu. K tomuto vzorci se došlo při aproximaci tvaru šroubu na válec rotující kolem osy souměrnosti. Po dosazení vychází:

$$J_s = 1,926 \cdot 10^{-5} \text{ kg} \cdot \text{m}^2 \quad (3.31)$$

K výpočtu momentu setrvačnosti matice se matice bude aproximovat na dutý válec, vztah pak vypadá takto:

$$J_m = \frac{1}{2} m_m \cdot (r_1^2 + r_2^2) = \frac{1}{8} m_m \cdot (d_1^2 + d_2^2), \quad (3.32)$$

kde r_2 je vnější poloměr matice. Po dosazení vychází:

$$J_m = 9,928 \cdot 10^{-6} \text{ kg} \cdot \text{m}^2 \quad (3.33)$$

Pro kritické otáčky platí:

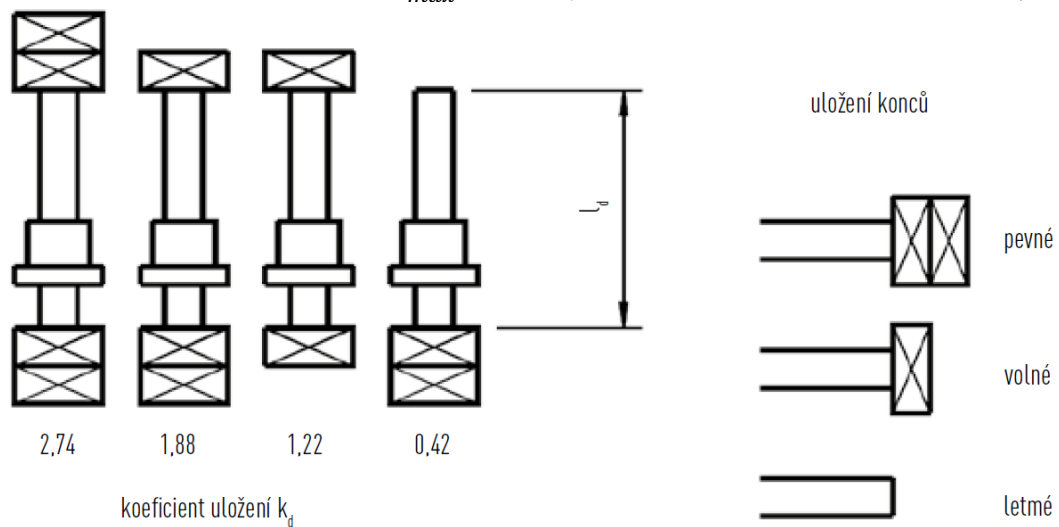
$$n_k = k_d \cdot \frac{d_1}{L^2} \cdot 10^8 \quad (3.34)$$

$$n_{max} = 0,8 \cdot n_k, \quad (3.35)$$

kde k_d je koeficient uložení ložiska (pro uložení v modelu, které se vybralo podle Obr. 3.2 z katalogu výrobce jako pevné s volným koncem, se rovná 1,88), L je délka šroubu, která se dosazuje v mm (taktéž d_1 se dosazuje v mm) a n_{max} jsou maximálně možné otáčky na kuličkovém šroubu. Po dosazení vychází:

$$n_k = 2256 \text{ min}^{-1} \quad (3.36)$$

$$n_{max} = 1804,8 \text{ min}^{-1} \quad (3.37)$$



Obr. 3.2: Uložení kuličkového šroubu [19]

Dále lze pro kuličkový šroub spočítat jeho tuhost, která se spočítá podle následujícího vztahu:

$$k_t = \frac{G \cdot J_s}{L}, \quad (3.38)$$

kde G je modul pružnosti ve smyku pro železo, který se rovná 82 GPa. Po dosazení vychází:

$$k_t = 1,57932 \cdot 10^6 \text{ Nm} \cdot \text{rad}^{-1} \quad (3.39)$$

Pro použití kuličkového šroubu v modelu je potřeba vypočítat úhel stoupání:

$$\alpha = \arctan\left(\frac{p}{\pi d}\right), \quad (3.40)$$

kde p je stoupání. Po dosazení vychází:

$$\alpha = 6,057^\circ \quad (3.41)$$

Dalším důležitým parametrem šroubu, který je závislý na tvaru závitu, je poloviční úhel vrcholu závitu („Acme thread half angle“), který se rovná $14,5^\circ$. [23]

3.6. Spojka

Jako spojka byla vybrána ROTEX GS standard s průměry 12/12 mm. Parametry spojky jsou v následující tabulce.

Tab. 3.2: Parametry spojky ROTEX GS standard [24]

Maximální rychlost	15200	rpm (ot/min)
Moment M_{KN}	3,0	Nm
Moment $M_{K,max}$	6,0	Nm
Statická tuhost torzní pružiny	84,3	Nm/rad
Dynamická tuhost torzní pružiny	252	Nm/rad
Hmotnost hub m_H	0,02	kg
Hmotnost spider m_s	2,3	kg
Moment setrvačnosti hub J_H	$1,5 \cdot 10^{-6}$	kgm^2
Moment setrvačnosti spider J_s	$0,139 \cdot 10^{-6}$	kgm^2

Tato spojka byla vybrána podle následujícího vztahu:

$$M_{KN} \geq 9,55 \cdot \frac{P_2}{n_n} \quad (3.42)$$

$$M_{KN} \geq 0,839 \text{ Nm}, \quad (3.43)$$

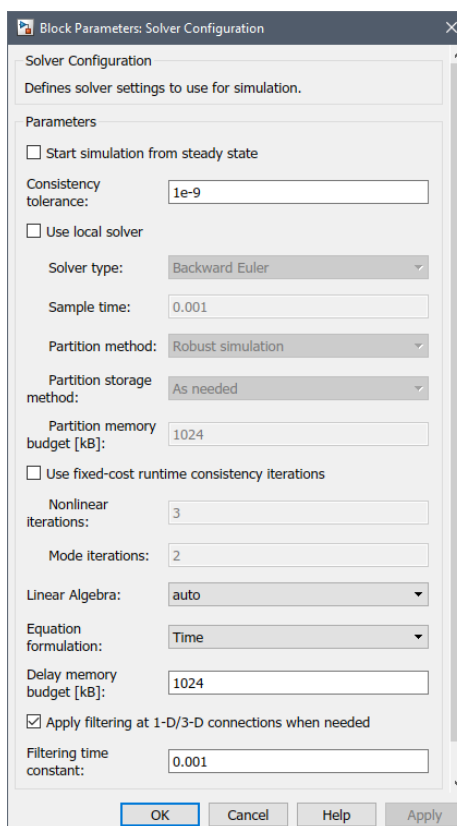
kde M_{KN} je jmenovitý moment spojky.

4. Tvorba modelu

V této kapitole bude popsána postupná tvorba modelu. Model byl převážně tvořen rozšířením knihoven Matlabu a Simulinku, které se nazývá Simscape. Dále byly využity prvky ze základních knihoven Simscapu (Foundation Library) jako je Simscape Mechanical, Electrical a Thermal a také nástavba Simscapu jako Driveline a Electrical.

4.1. Úvodní část

Celý model začíná blokem „Solver Configuration“, který je nutný u každého Simscape modelu. Je to počáteční blok, ve kterém se nastavují počáteční podmínky, možnosti modelu a jeho inicializace.

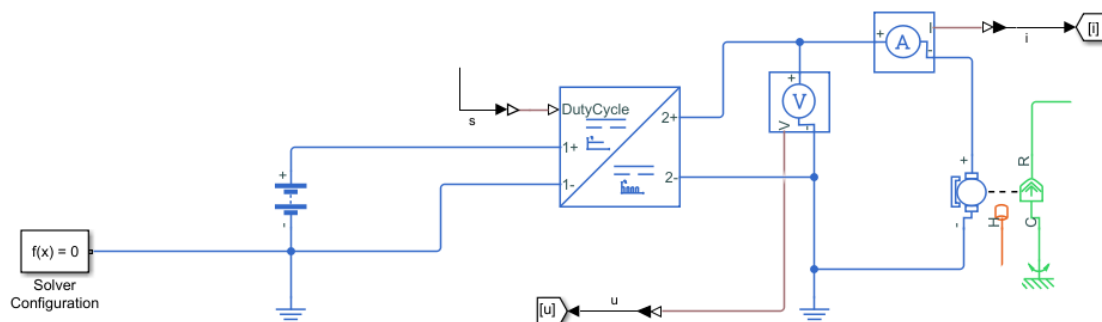


Obr. 4.1: Nastavení bloku „Solver Configuration“

4.2. Elektrická část

Následovala elektrická část modelu (Obr. 4.2), u které se začalo s modelem reálného napájecího zdroje s úbytkem napětí. K vymodelování zdroje byl zvolen blok baterie („Battery“), která byla nastavena na jmenovité napětí 70 V, vnitřní odpor 1 m Ω a kapacita se nastavila na nekonečnou. U anody byl zdroj napojen na blok „Solver Configuration“ a na uzemnění neboli v Simscape modelu – elektrickou referenci. Dále se výstupy anody a katody napojily na vstup snižujícího stejnosměrného měniče („Average – Value Chopper“). V nastavení měniče se zvolil čtyř-kvadrantový režim a 100 % účinnost. Dalším vstupem měniče je střída („duty cycle“), pomocí které je model řízen. Paralelně k výstupu měniče byl zapojen voltmetr. Informace o napětí se

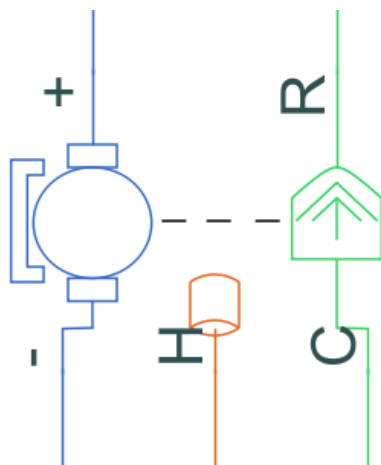
zpracovává na signál Simulinku a putuje do bloku „GoTo“ označený jako „u“. Anoda voltmetru byla zase „uzemněna“ elektrickou referencí. Na katodu byl sériově zapojen ampérmetr. Informace o proudu se zpracovává na signál Simulinku a putuje do bloku „GoTo“ označený jako „i“. Anoda ampérmetru a voltmetru byla napojena na elektrickou část stejnosměrného motoru.



Obr. 4.2: Zapojení elektrické části modelu

4.3. Motor

Blok motoru (Obr. 4.3) přeměňuje elektrickou energii na mechanickou. V základním nastavení má čtyři vstupy/výstupy. Pro elektrickou část má katodu a anodu a pro mechanickou část má vstup „C“ pro mechanickou referenci a vstup/výstup „R“ pro zatížení hřídele a jejího napojení na další mechanické komponenty. V nastavení bloku motoru se povolil teplotní vstup „H“, který je pro tok tepla vytopeného na odporu vinutí motoru.



Obr. 4.3: Blok „DC Motor“

Pro motor platí odvozené rovnice z předchozí kapitoly (rovnice (3.1) – (3.5)) a byly nastaveny specifikace z Tab. 3.1. Samotné nastavení motoru je rozděleno v základním nastavení do dvou záložek, ale pokud se povolí teplotní vstup, objeví se v nastavení další dvě záložky pro teplotní model. Tyto záložky jsou: „Electrical Torque“

(Obr. 4.4), „Mechanical“ (Obr. 4.5), „Temperature Dependence“ (Obr. 4.6) a „Thermal Port“ (Obr. 4.7.), kde byla nastavena hodnota tepelné kapacity vinutí na 0,001 J/K, kvůli pozdějšímu započítání tepelné kapacity motoru (vinutí + stator) v tepelné části modelu (viz kapitola 4.5.).

Settings			
Electrical Torque	Mechanical	Temperature Dependence	Thermal Port
Field type:	Permanent magnet		
Model parameterization:	By equivalent circuit parameters		
Armature resistance:	1.06	Ohm	
Armature inductance:	0.458	mH	
Define back-emf or torque constant:	Specify torque constant		
Torque constant:	224	mN*m/A	
Rotor damping parameterization:	By damping value		

Obr. 4.4: Záložka „Electrical Torque“

Settings			
Electrical Torque	Mechanical	Temperature Dependence	Thermal Port
Rotor inertia:	1280	g*cm^2	
Rotor damping:	0	N*m/(rad/s)	
Initial rotor speed:	0	rpm	

Obr. 4.5: Záložka „Mechanical“

Settings			
Electrical Torque	Mechanical	Temperature Dependence	Thermal Port
Resistance temperature coefficient:	3.93e-3	1/K	
Measurement temperature:	25	degC	

Obr. 4.6: Záložka „Temperature Dependence“

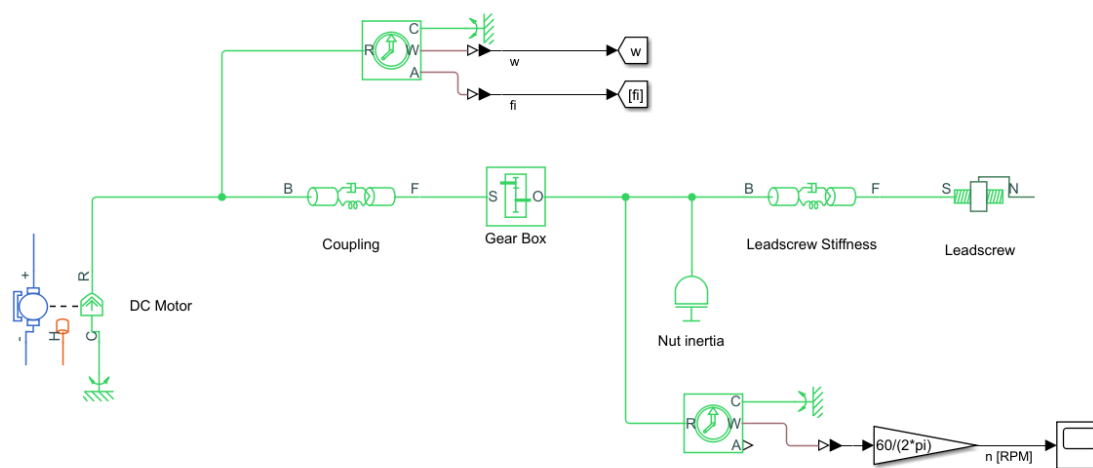
Settings			
Electrical Torque	Mechanical	Temperature Dependence	Thermal Port
Thermal mass:	0.001	J/K	
Initial temperature:	25	degC	

Obr. 4.7: Záložka „Thermal Port“

4.4. Mechanická část

Mechanická část modelu je ještě rozdělena na dvě podčásti, na rotační (Obr. 4.8) a translační (Obr. 4.9). Začalo se napojením ideálního senzoru rotačního pohybu („Ideal Rotational Motion Sensor“) na hřídel motoru pomocí jeho vstup „R“. Vstup „C“ pro každý prvek rotační mechanické části značí vstup pro mechanickou referenci. Výstup „W“ značí úhlovou rychlost a informace o rychlosti se následně zpracovává na signál

Simulinku a posílá se do bloku „GoTo“ označeném jako „w“. Výstup „A“ značí úhel natočení a informace o poloze se následně zpracovává na signál Simulinku a posílá se do bloku „GoTo“ označeném jako „fi“. Dále byla na hřídel napojena spojka („Coupling“), které se zadaly hodnoty torzní tuhosti a momentu setrvačnosti podle Tab. 3.2, se vstupem „B“ a výstupem „F“. Následně putuje hřídel do převodovky („Gear Box“) s převodem 1/2. Na výstup převodovky byl zapojen další ideální senzor rotačního pohybu, tentokrát na kontrolu maximálních otáček na kuličkovém šroubu. Podle hodnoty z rovnice (3.37) nebyly maximální otáčky překročeny. Dále navazuje blok momentu setrvačnosti matice kuličkového šroubu („Nut inertia“), který byl spočítán podle rovnice (3.32). Pak navazuje blok, který byl použit pro model spojky, ale tentokrát charakterizuje torzní tuhost a moment setrvačnosti kuličkového šroubu („Leadscrew stiffness“). Hodnoty byly spočteny podle rovnic (3.30) a (3.38). Rotační část mechanického modelu byla zakončena kuličkovým šroubem („Leadscrew“) s posunutím za otáčku 4 mm a délka šroubu je 1 metr. Do záložky šroubu „Meshing losses“ byla nastavena hodnota úhlu stoupání („Lead angle“) z rovnice (3.40), pro poloviční úhel vrcholu závitu bylo nastaveno $14,5^\circ$, jako součinitel tření („Friction coefficient“) byla nastavena hodnota 0,08 (zvoleno pro tento typ šroubu) a mezní hodnota výkonu („Power threshold“) byla

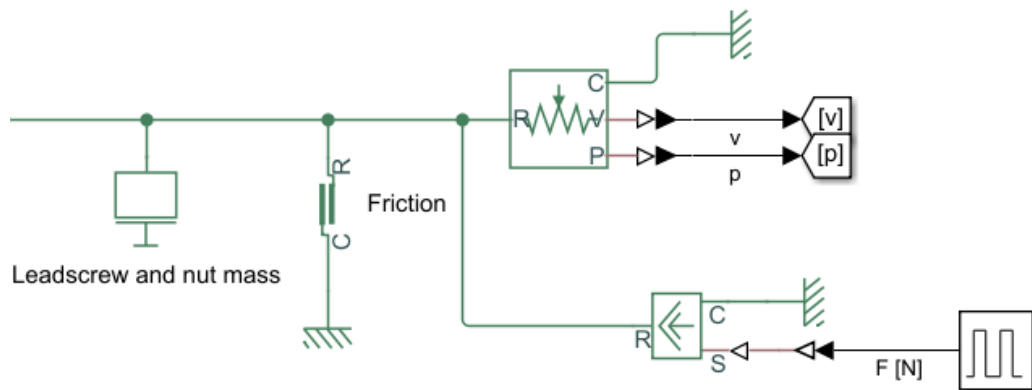


nastavena 0,001 W. Kuličkový šroub přeměňuje rotační pohyb na translační.

Obr. 4.8: Rotační část modelu

Translační část začíná výstupem z kuličkového šroubu. Na tento výstup byl napojen blok hmotnosti, kam byla započtena hmotnost kuličkového šroubu ($m_s = 1,07$ kg) a hmotnost matice kuličkového šroubu ($m_m = 0,10$ kg). Přímou na blok hmotnosti navazuje blok tření, který byl napojen na výstup šroubu vstupem „R“ a výstupem „C“ byl napojen na translační referenci. V nastavení bloku bylo zvoleno pro odtrhovací třecí sílu („Breakaway friction force“) 25 N, pro odtrhovací třecí rychlost („Breakaway friction velocity“) 0,1 m/s, pro Coulombovu třecí sílu („Coulomb friction force“) 20 N a pro viskózní koeficient tření („Viscous friction coefficient“) 100 Ns/m. Následuje ideální zdroj síly („Ideal Force Source“), jehož vstup „C“ byl napojen na translační referenci a do vstupu „S“ putuje Simulink signál o velikosti síly 2000 N, který vytváří blok obdélníkového signálu („Pulse Generator“). Síla byla nastavena na tuto hodnotu, aby proud v motoru dosahoval přibližně své jmenovité hodnoty, když bude kuličkový šroub stát ve své počáteční nebo koncové poloze. Rychlost matice „v“ je

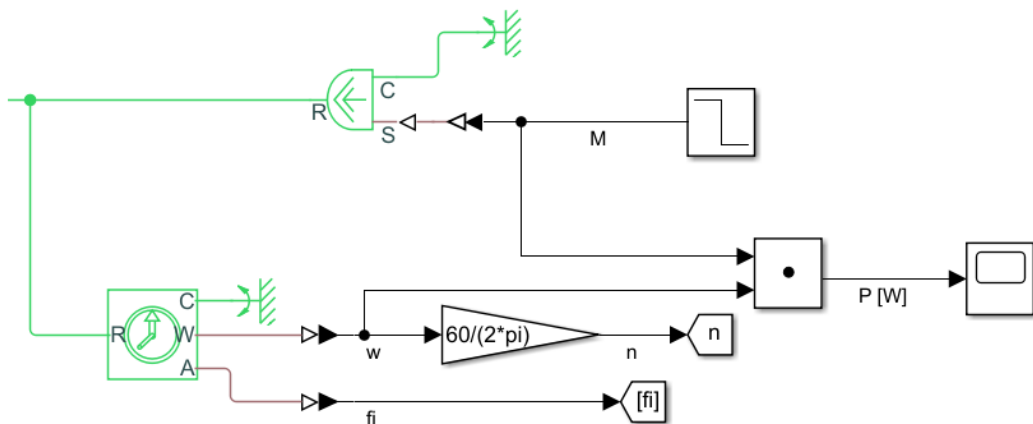
společně s polohou „p“ měřena ideálním senzorem translačního pohybu („Ideal Translational Motion Sensor“).



Obr. 4.9: Translační část modelu

4.5. Teplotní část

K otestování teplotní části modelu byla vytvořena jeho kopie, ve které se odstranila mechanická část. Jediné, co zůstalo z mechanické části (Obr. 4.10) byl senzor otáček a úhlového natočení a ideální zdroj momentu. Moment a otáčky se násobí pro výpočet výkonu na hřídeli, který musí být 250 W. Jediná z těchto veličin, která lze upravit je moment, tudíž se experimentálně upravoval na -0,867 Nm, aby výkon byl již zmíněných 250 W. Dále byly odstraněny regulátory a střída měniče byla nastavena na 1.



Obr. 4.10: Mechanická část pro test teplotní simulace

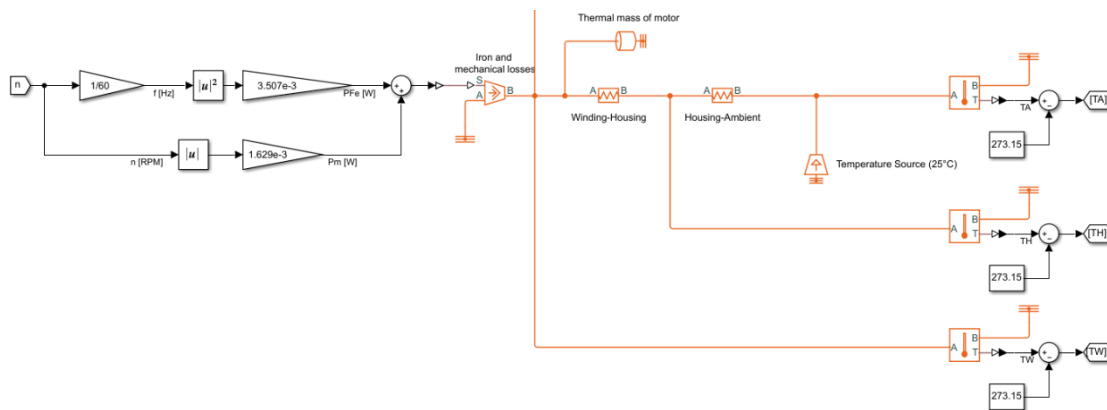
Na vstup/výstup „H“ motoru se napojuje teplotní část. Motor z portu „H“ posílá informaci o ztrátách na vinutí, které počítá z hodnot uvedených na Obr. 4.6 a 4.7 a podle rovnice (3.10). Dalším zdrojem tepla jsou ztráty v železe, které se počítají pomocí rovnice (3.20) a mechanické ztráty třením, které vznikají na ložiskách komutátoru a třením vzduchu. Ztráty v železe a mechanické ztráty vstupují do modelu pomocí bloku říditelného zdroje tepelného toku („Controlled Heat Flow Rate Source“), který musí být druhým vstupem napojen na tepelnou referenci. Tyto ztráty se počítají pomocí rovnic (3.20) a (3.24), pak se sčítají a vstupují do prvního vstupu zdroje tepelného toku. Všechny tyto zdroje tepla se napojují na tepelnou kapacitu motoru, jejíž hodnota se spočítala

z časové konstanty motoru a tepelného odporu vinutí – plášť (hodnoty lze získat z Tab. 3.1) podle vztahu:

$$\tau_m = C \cdot R_{wh} \quad (4.1)$$

$$C = \frac{\tau_m}{R_{wh}}, \quad (4.2)$$

kde τ_m je časová konstanta motoru, C je tepelná kapacita motoru a R_{wh} je tepelný odpor vinutí – plášť. Na blok tepelné kapacity navazuje tepelný odpor vinutí – plášť a tepelný odpor plášť – okolní prostředí, který byl snížen na 70 % své původní hodnoty kvůli zajištění lepšího chlazení motoru (podle výrobce lze při zajištění správného vedení tepla dosáhnout až 20 % hodnoty). Za tento blok odporu se zapojil blok zdroje teploty, který se nastavil na 25 °C a charakterizuje teplotu okolí. Do modelu se také zapojily tři teploměry (teploměr vinutí – výstup „TW“, teploměr pláště – výstup „TH“ a teploměr okolního prostředí – výstup „TA“), jejichž výstup je v Kelvinech, ale pro lepší orientaci v teplotách byly výstupy přepočteny na °C. Takhle vytvořený teplotní model (Obr. 4.11) se zkopíroval do původního modelu pouze s tou změnou, že se místo vstupu „n“ v základním modelu vyskytuje vstup „w“.



Obr. 4.11: Teplotní část modelu

4.6. Generátor S – křivky

S – křivka se často používá ke snížení času potřebného k rychlým změnám rychlosti. V modelu se použila tzv. „ideální“ S – křivka, která obsahuje pouze konkávní a konvexní část bez prostřední (lineární) části. [28] Křivka byla vytvořena jako vstup pro regulátor úhlu natočení a nastavena tak, aby se matice na kuličkovém šroubu pohybovala cyklicky od začátku šroubu k jeho konci neboli od nuly do jednoho metru a následně zase do počáteční polohy. Křivka se v této cyklické podobě skládá ze šesti částí, které budou dále popsány na jedné periodě. Pro rostoucí konkávní část křivky (pro $0 \leq t \leq \frac{T}{2}$) platí:

$$s(t) = s_0 + j_m \cdot \frac{t^2}{2}, \quad (4.3)$$

kde s_0 je počáteční poloha a j_m je tzv. jerk, který se rovná:

$$j_m = 2 \cdot \frac{v_s}{T}, \quad (4.4)$$

kde v_s je střední rychlost na konci konkávní části a T je čas pohybu k dosažení žádané polohy. Pro rostoucí konvexní část křivky (pro $\frac{T}{2} < t \leq T$) platí:

$$s(t) = s_0 + \frac{L}{2} + v_s \cdot \left(t - \frac{T}{2}\right) - j_m \cdot \frac{\left(t - \frac{T}{2}\right)^2}{2}, \quad (4.5)$$

kde L je konečná poloha. Pro horní konstantní část křivky (pro $T < t \leq \frac{3T}{2}$) platí:

$$s(t) = s_0 + L \quad (4.6)$$

Pro klesající konvexní část křivky (pro $\frac{3T}{2} < t \leq 2T$) platí:

$$s(t) = s_0 + \frac{L}{2} + v_s \cdot (t - T) - j_m \cdot \frac{(t - T)^2}{2} \quad (4.7)$$

Pro klesající konkávní část křivky (pro $2T < t \leq \frac{5T}{2}$) platí:

$$s(t) = s_0 + j_m \cdot \frac{\left(t - \frac{5T}{2}\right)^2}{2} \quad (4.8)$$

Pro dolní konstantní část křivky (pro $\frac{5T}{2} < t \leq 3T$) platí:

$$s(t) = s_0 \quad (4.9)$$

Pro přepočítání polohy s na úhel natočení φ platí vztah:

$$\varphi(t) = \frac{2\pi \cdot s(t) \cdot i}{p}, \quad (4.10)$$

kde i je převod převodovky a p je stoupání kuličkového šroubu.

Perioda pohybu od a do počáteční polohy je 60 s a čas T je 20 s. Algoritmus pro křivku byl vytvořen v bloku „MATLAB Function“. Jako vstup pro „t“ byl použit blok „ramp“, který simuluje lineární průběh času a pro „c“ byl použit znovu blok „ramp“, který byl zaokrouhlen na celá čísla. Signál „c“ funguje jako čítač periody. Algoritmus vypadá následovně:

```
function fi = s_fcn(t,c)

s0 = 0.01; % initial position
s = s0; % position initialization

L = 0.95; % final position
```

```

T = 20;      % time to get to final position

vs = 2*L/T;  % mean velocity
jm = 2*vs/T; % jerk

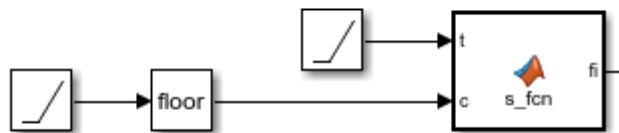
% periodic calculations for positions from s0 to L
if (t >= (0 + c*3*T)) && (t <= (T/2 + c*3*T))
    s = s0 + jm*((t - c*3*T)^2)/2;
elseif (t > (T/2 + c*3*T)) && (t <= (T + c*3*T))
    s = s0 + L/2 + vs*(t - (T/2 + c*3*T)) - jm*((t - (T/2 + c*3*T))^2)/2;
elseif (t > (T + c*3*T)) && (t <= ((3/2)*T + c*3*T))
    s = s0 + L;
end

% periodic calculations for positions from L to s0
if (t > ((3/2)*T + c*3*T)) && (t <= (2*T + c*3*T))
    s = s0 + L/2 + vs*(t - (T + c*3*T)) - jm*((t - (T + c*3*T))^2)/2;
elseif (t > 2*T + c*3*T) && (t <= ((5/2)*T + c*3*T))
    s = s0 + jm*((t - ((5/2)*T + c*3*T))^2)/2;
elseif (t > ((5/2)*T + c*3*T)) && (t <= (3*T + c*3*T))
    s = s0;
end

% angular rotation
fi = 2*pi*s/(2*0.004);

```

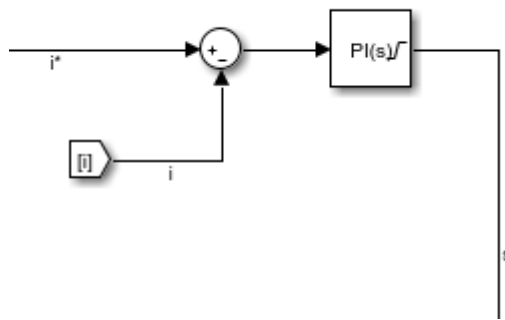
Hodnoty s_0 a L byly zvoleny kvůli nepřesnostem regulátorů. Zapojení generátoru s – křivky je možné vidět na Obr. 4.12.



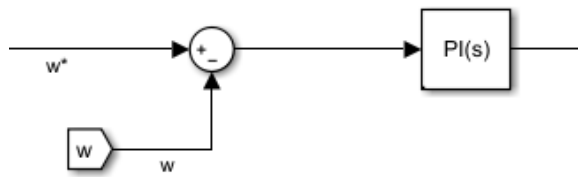
Obr. 4.12: Generátor s – křivky

4.7. Regulátory

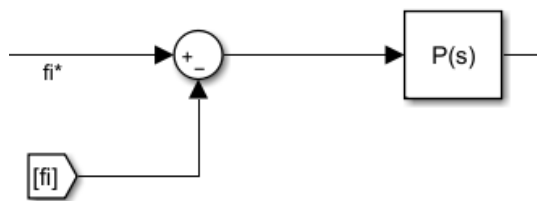
V celém modelu byly použity tři regulátory (regulátor proudu, regulátor úhlové rychlosti a regulátor úhlového natočení), které fungují na principu kaskádní regulace. Všechny regulátory se vytvořily pomocí bloku „PID Controller“ a nastavily a doladily pomocí aplikace Simulinku – PID Tuner App. Jako první vytvořen byl PI regulátor proudu ($P = 7,6026 \cdot 10^{-7}$, $I = 173116,0078$), který vytváří střidu vstupující do měniče motoru, proto je jeho výstup satureovaný na hodnotu od -1 do 1 (Obr. 4.13). Jako další se udělal PI regulátor úhlové rychlosti ($P = 2,0723$, $I = 0,1590$), jehož výstupem je žádaný proud (Obr. 4.14). Jako poslední byl vytvořen P regulátor úhlového natočení ($P = 0,7576$), jehož výstupem je žádaná hodnota úhlové rychlosti (Obr. 4.15). Jako žádané úhlové natočení je výstup generátoru S – křivky.



Obr. 4.13: PI regulátor proudu



Obr. 4.14: PI regulátor úhlové rychlosti



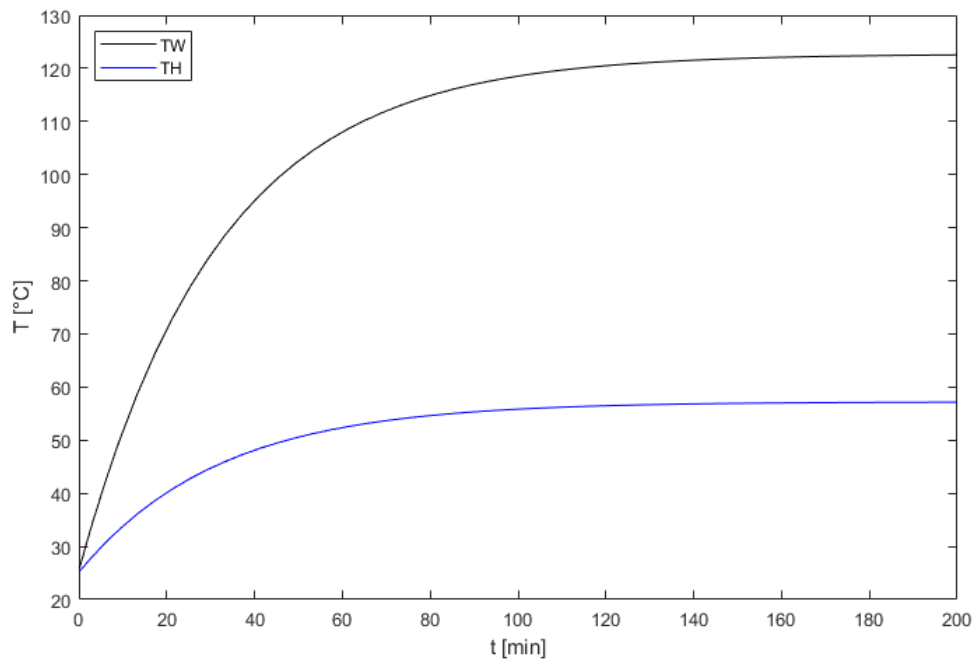
Obr. 4.15: P regulátor úhlového natočení

5. Výsledky modelu

Obsahem této kapitoly závěrečné práce je ukázka výsledků modelu stejnosměrného motoru, jehož zhotovení bylo možné vidět v kapitolách 3. a 4.

5.1. Výsledky ověřovacího modelu pro teploty

Tato kapitola se bude nejdříve zabývat výsledky náhradního modelu, který byl vytvořen na otestování teplotní části modelu. Čas simulace se nastavil na 12000 sekund kvůli ustálení tepelného přechodového děje. V následujícím grafu budou ukázány průběhy teplot „TW“ a „TH“ (Obr. 5.1).



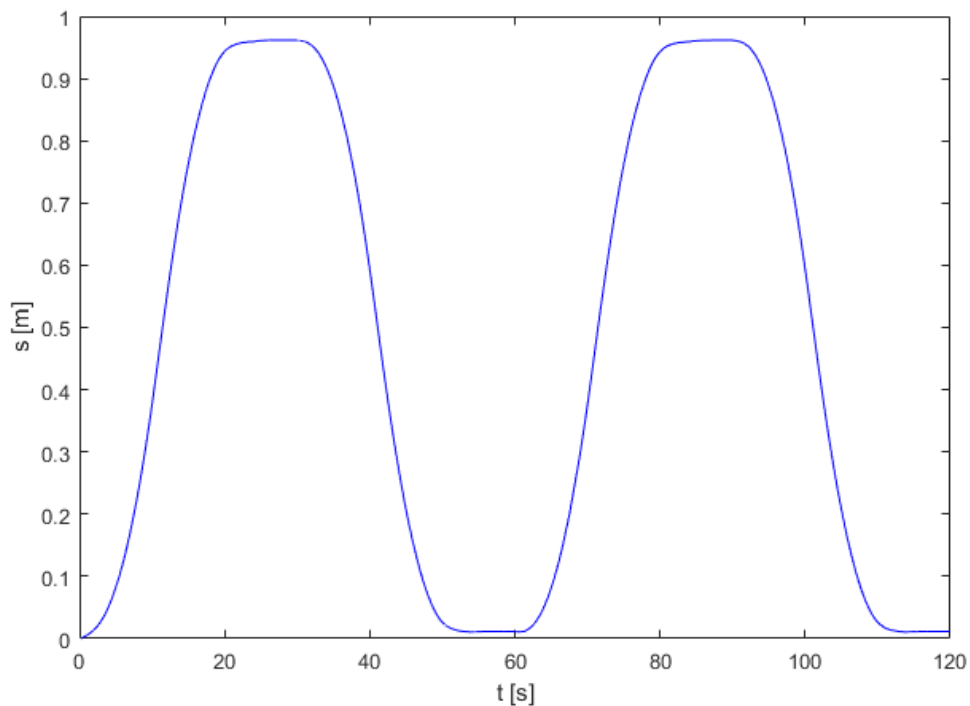
Obr. 5.1: Závislost teploty vinutí a pláště na čase (zjednodušený model)

Jak je možné si povšimnout, tak teplota vinutí se ustálila na přibližně 122,5 °C a teplota pláště na 57,2 °C. Obě teploty jsou ve fyzikálních mezích motoru. Elektrický výkon motoru v tomto nastavení byl přibližně 281,2 W.

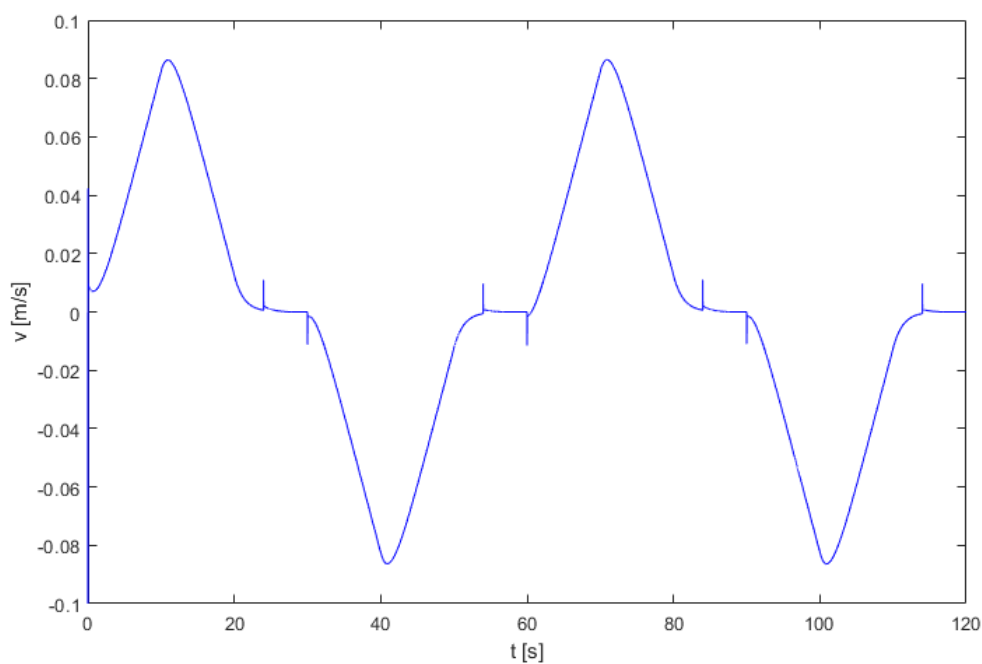
Následující výsledky modelu motoru již zahrnují všechny části. Čas se pro ukázkou výsledků teplotní části nastavil opět na 12000 sekund. Pro ostatní části se liší kvůli přehlednosti v grafech a je nastaven na 120 sekund. Budou porovnány výstupy pro tři typy vstupů: S – křivka, lineární přímka a skoková změna na chtěnou hodnotu.

5.2. Výsledky pro průběh dle S – křivky

Požadovaný průběh polohy, tzv. S – křivka (kapitola 4.6), byl po přepočtení na úhlové natočení nastaven jako vstup pro regulátor úhlového natočení, následně v modelu byl přetvořen zase na translační pohyb matice.

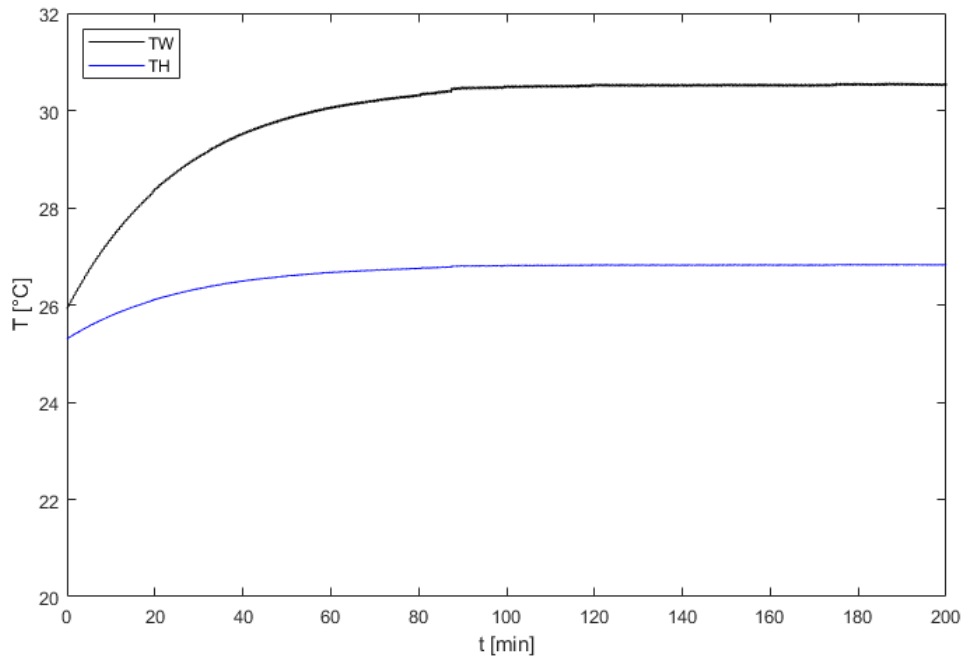


Obr. 5.2: Závislost polohy matice na čase (S – křivka)



Obr. 5.3: Závislost rychlosti matice na čase (S – křivka)

Na Obr. 5.2 je vidět průběh pohybu matice na kuličkovém šroubu. Na Obr. 5.3 je průběh rychlosti této matice. Špičky v průběhu rychlosti jsou dány skokovou změnou zátěžné síly. Střední hodnota zrychlení matice při tomto pohybu je $0,01095 \text{ m/s}^2$.

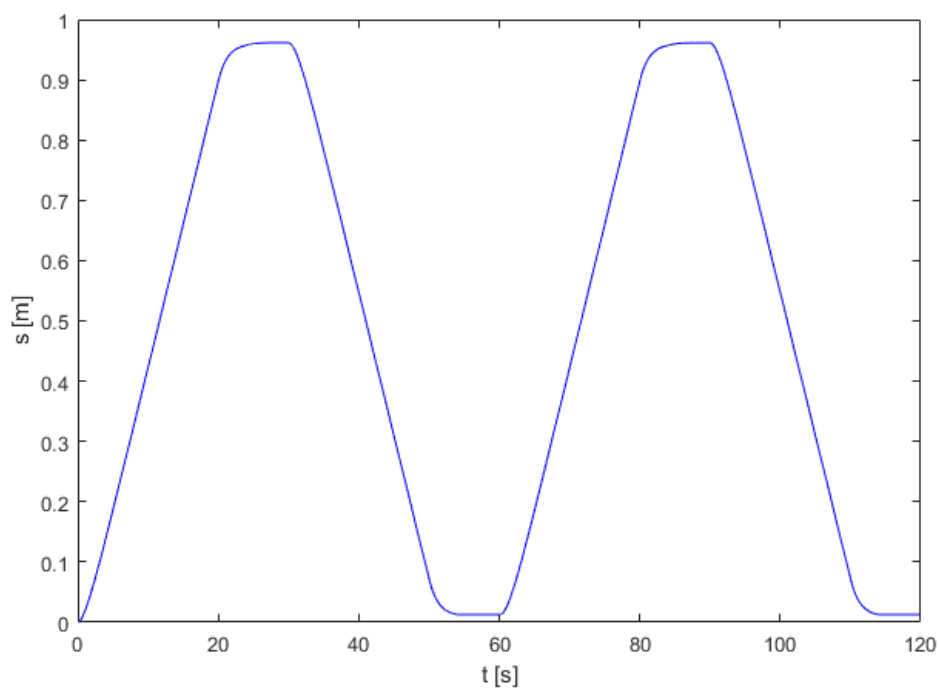


Obr. 5.4: Závislost teploty vinutí a pláště na čase (*S – křivka*)

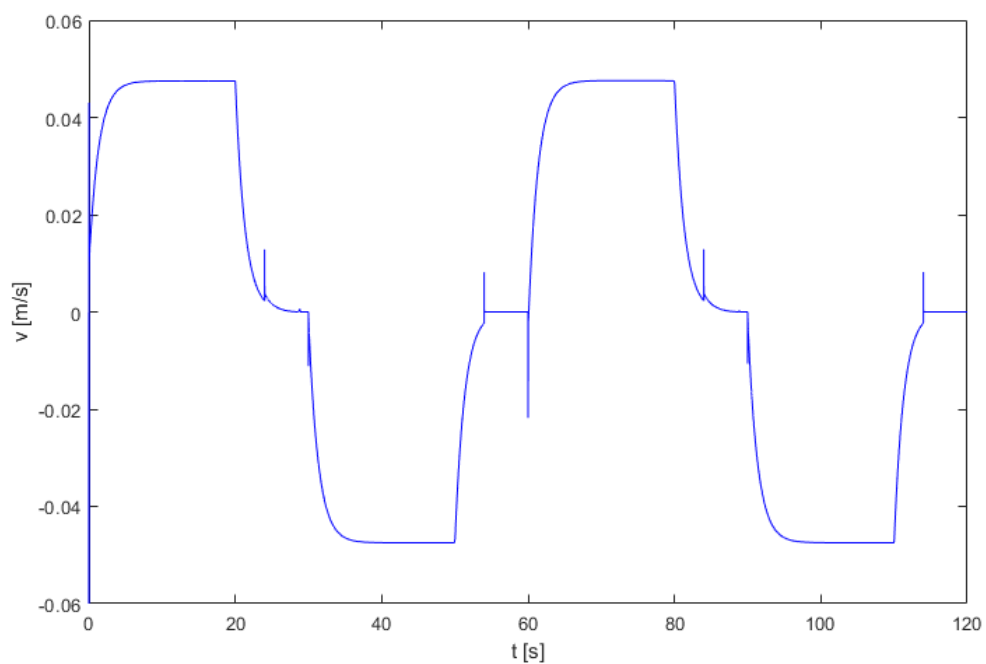
Při použití *S – křivky* se teplota vinutí ustálila na přibližně $30,5 \text{ °C}$ a teplota pláště na $26,8 \text{ °C}$ (Obr. 5.4). Střední hodnota elektrického výkonu motoru při tomto průběhu je $3,25 \text{ W}$.

5.3. Výsledky pro průběh dle lineární přímky

Požadovaným průběhem polohy byl cyklicky se opakující lineární pohyb do koncové polohy matice kuličkového šroubu a zase zpátky do počáteční polohy. Tento průběh byl přepočten na úhlové natočení a nastaven jako vstup pro regulátor úhlového natočení, následně v modelu byl přetvořen zase na translační pohyb matice.

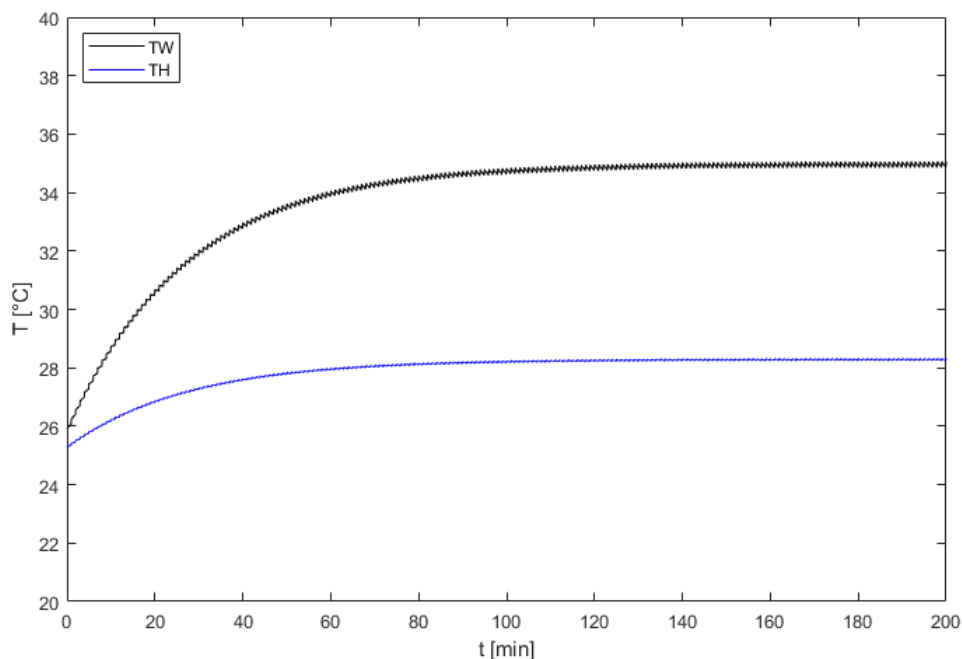


Obr. 5.5: Závislost polohy matice na čase (lineární přímka)



Obr. 5.6: Závislost rychlosti matice na čase (lineární přímka)

Na Obr. 5.5 je vidět průběh pohybu matice na kuličkovém šroubu. Na Obr. 5.6 je průběh rychlosti této matice. Špičky v průběhu rychlosti jsou dány skokovou změnou zátěžné síly. Střední hodnota zrychlení matice při tomto pohybu je $0,0049 \text{ m/s}^2$.

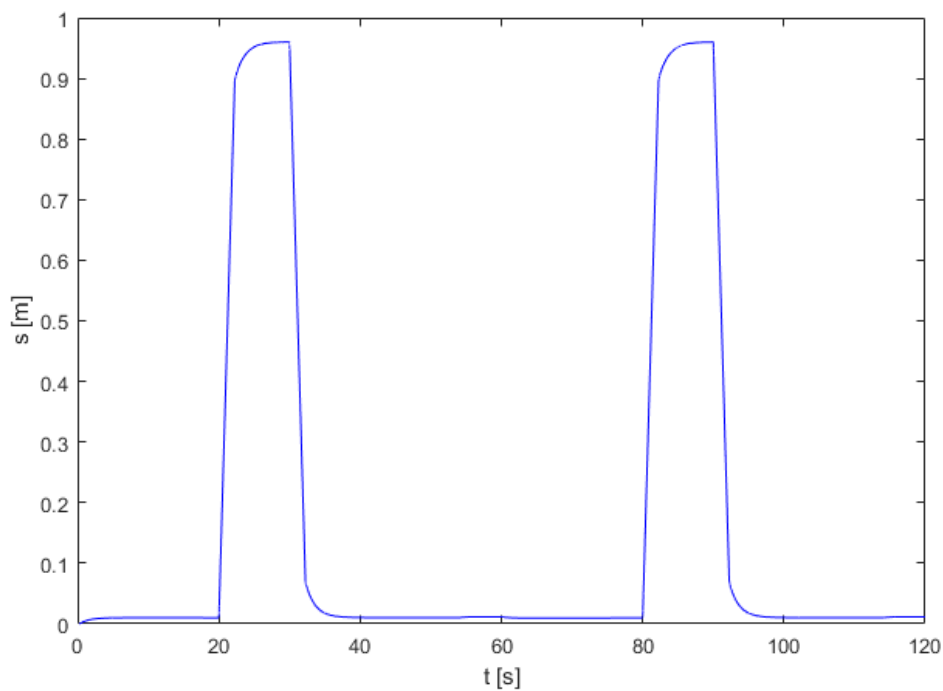


Obr. 5.7: Závislost teploty vinutí a pláště na čase (lineární přímka)

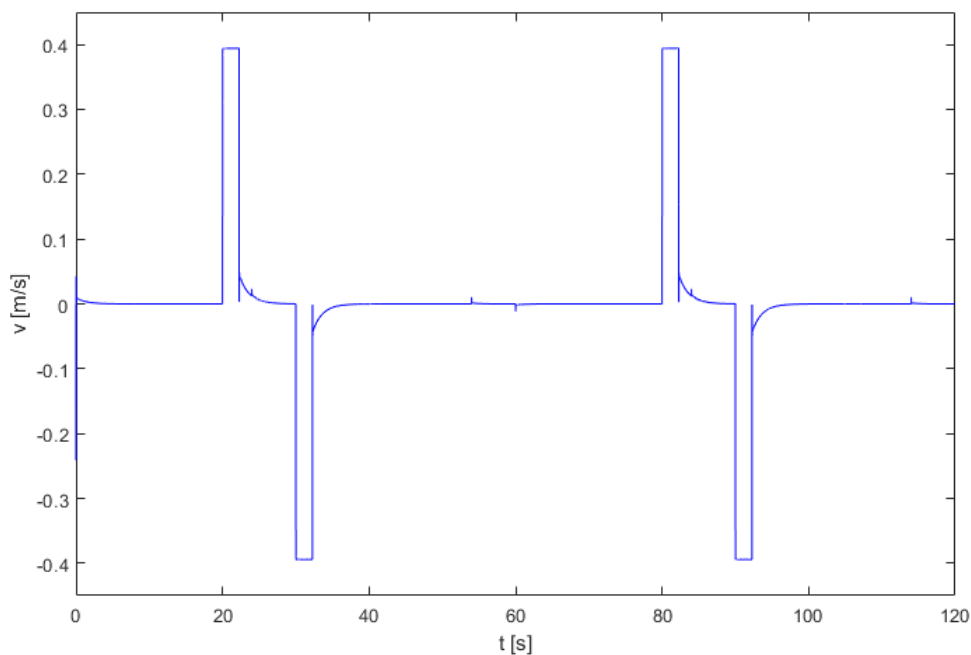
Při použití lineární přímky se teplota vinutí ustálila na přibližně 34,9 °C a teplota pláště na 28,3 °C (Obr. 5.7). Střední hodnota elektrického výkonu motoru při tomto průběhu je 4,7 W.

5.4. Výsledky pro průběh dle skokové změny

Požadovaným průběhem polohy byl cyklicky se opakující skok do koncové polohy matice kuličkového šroubu a zase zpátky do počáteční polohy. Tento průběh byl přepočten na úhlové natočení a nastaven jako vstup pro regulátor úhlového natočení, následně v modelu byl přetvořen zase na translační pohyb matice.

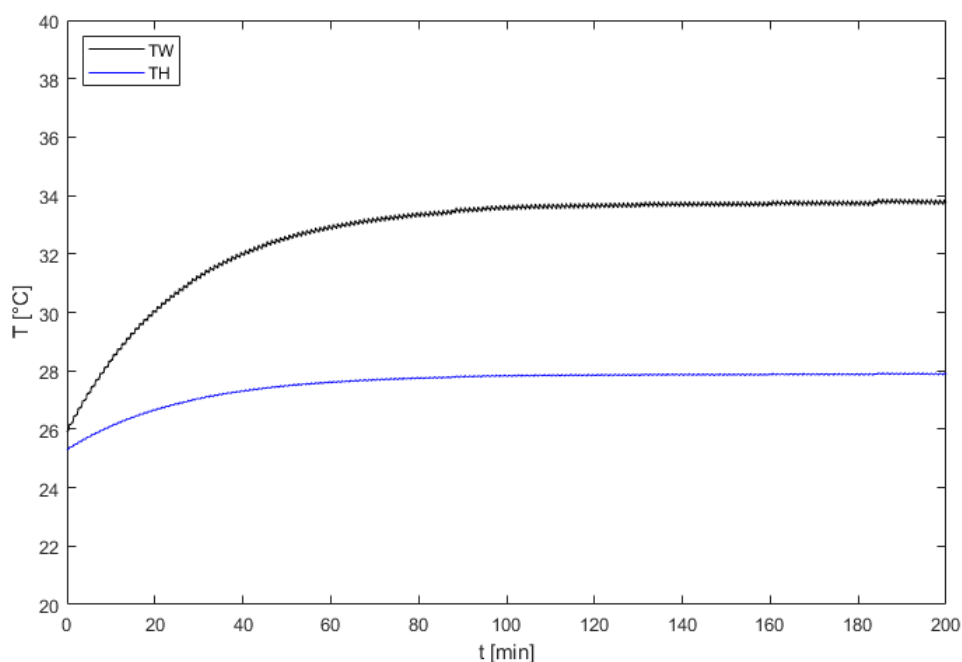


Obr. 5.8: Závislost polohy matice na čase (skoková změna)



Obr. 5.9: Závislost rychlosti matice na čase (skoková změna)

Na Obr. 5.8 je vidět průběh pohybu matice na kuličkovém šroubu, který byl vyregulován na průběh skokové změny. Na Obr. 5.9 je průběh rychlosti této matice. Špičky v průběhu rychlosti jsou dány skokovou změnou zátěžné síly. Střední hodnota zrychlení matice při tomto pohybu je $0,00257 \text{ m/s}^2$.



Obr. 5.10: Závislost teploty vinutí a pláště na čase (skoková změna)

Při použití skokové změny se teplota vinutí ustálila na přibližně 33,7 °C a teplota pláště na 27,9 °C (Obr. 5.10). Střední hodnota elektrického výkonu motoru při tomto průběhu je 5,23 W.

5.5. Porovnání výsledků

Porovnáním výsledků z předchozích podkapitol je zřejmé, že motor má nejlepší výsledky, pokud má na vstupu regulátoru natočení generátor S – křivky. Takže bylo vhodné průběh S – křivky navrhnout a použít jej pro regulaci pohybu matice kuličkového šroubu. Následuje Tab. 5.1, která srovnává jednotlivé teplotní výstupy pro všechny pohybové vstupy.

Tab. 5.1: Porovnání teplotních výstupů

průběh vstupu	teplota vinutí [°C]	teplota pláště [°C]
S – křivka	30,5	26,8
lineární přímka	34,9	28,3
skoková změna	33,7	27,9

6. Zhodnocení možností využití pro praxi

Podle výsledků z předchozí kapitoly lze dojít k závěru, že tyto výsledky modelu jsou realistické a použitelné v praxi. V souladu s literární rešerší proběhla diagnostika tohoto modelu v softwaru Simulink a zjištěné problémy se vyřešily již v oblasti návrhu, tudíž při využití v praxi se dají tyto znalosti o možných chybách uplatnit k zajištění bezproblémového chodu stroje. Takovýto elektro – mechanický systém by šlo využít pro translační pohyb těles. Takže díky stejnosměrnému motoru, závislosti na stejnosměrném zdroji napájecího napětí a nízké teplotě, ho lze například použít pro pohyby strojů, které jsou bez přístupu k elektrické síti. I když je motor napojen na 70 V napájecí zdroj, tak v tomto modelu motor využívá maximálně 15,5 V (způsobené ovládním motoru střídou), proto by se mohla upravená verze (například snížením maximálního napětí) tohoto modelu uplatnit například v dopravních prostředcích jako jsou automobily, autobusy a v letadlech nebo by se mohl aplikovat v robotických strojích.

7. Závěr

V této závěrečné práci se začalo literární rešerší o diagnostice založené na modelech, ve které byly vysvětleny základy této problematiky, důvody uplatnění, ukázky některých způsobů řešení a její realizace.

Hlavním cílem této práce bylo zhotovení komplexního elektro – mechanického modelu i s teplotní částí. Jako takováto soustava se zvolil stejnosměrný motor, který byl napojen na napájecí zdroj se stejnosměrným snižujícím měničem, pomocí kterého byl motor řízen. Tento model dále tvořila mechanická část, ve které docházelo k přeměně rotačního pohybu na pohyb translační přes kuličkový šroub, a teplotní část, kde zdrojem tepla byly ztráty na vinutí, ztráty v železe a mechanické ztráty.

Praktický oddíl této práce začal teoretickým rozбором systému a výpočty potřebnými pro jeho zhotovení. Dále se řešila samotná tvorba modelu pomocí knihovny Simscape v programu Simulink a následné zapojení bloků této knihovny a dosazení hodnot nalezených v příslušných databázích a odborných literaturách nebo hodnot předtím vypočtených pomocí vztahů ze systémového rozboru. Při tvorbě se vyskytly i různé problémy, převážně s teplotní částí modelu. Tyto problémy se vyřešily návrhem vhodnějších regulátorů a zvýšením chlazení pomocí snížení tepelného odporu plášť – okolní prostředí.

Předposlední a poslední kapitoly se zabývaly nejdůležitějšími výsledky modelu a jeho zhodnocením pro praktické využití. Došlo se k závěru, že model funguje dobře a v určitých úpravách by reálný systém postavený podle tohoto modelu mohl mít reálné aplikace v praxi.

8. Bibliografie

- [1] CONSOLE, Luca a Oskar DRESSIER. Model-based Diagnosis in the Real World: Lessons Learned and Challenges Remaining. In: *Proceedings of the Sixteenth International Joint Conference on Artificial Intelligence* [online]. San Francisco: Morgan Kaufmann Publishers Inc., 1999, 1393-1400 [cit. 2020-10-30]. Dostupné z: <https://www.ijcai.org/Proceedings/99-2/Papers/102.pdf>
- [2] CAVE John. *Electromechanical Systems* [online]. London: The Engineering Council, 1995 [cit. 2020-10-31]. ISBN 1-898126-41-0. Dostupné z: http://cass.welbni.org/downloads/27/169_84_Electronics-%20Electro-Mechanical-%20pdf.pdf
- [3] KARNOPP, C. Dean, L. Donald MARGOLIS a C. Ronald ROSENBERG. *System dynamics: modeling and simulation of mechatronic systems*. New Jersey: John Wiley, 2006, 563 s. ISBN 0-471-70965-4.
- [4] LYSHEVSKI, Sergey Edward. *Electromechanical systems, electric machines, and applied mechatronics*. Boca Raton: CRC Press, 2000, 782 s.: il.+ disketa. ISBN 0-8493-2275-8.
- [5] POLL, Scott, Ann PETTERSON-HINE, Joe CAMISA, David NISHIKAWA, Lilly SPIRKOVSKA, David GARCIA, David HALL, Christian NEUKOM, Adam SWEET, Serge YENTUS, Charles LEE, John OSSENFORT, Ole J. MENGSHOEL, Indranil ROYCHOUDHURY, Matthew DAIGLE, Gautam BISWAS, Xenofon KOUTSOUKOS a Robyn LUTZ. *Evaluation, Selection, and Application of Model-Based Diagnosis Tools an Approaches* [online]. 2007 [cit. 2020-10-31]. Dostupné z: https://www.researchgate.net/publication/269393623_Evaluation_Selection_and_Application_of_Model-Based_Diagnosis_Tools_and_Approaches
- [6] DAIGLE, Matthew a Indranil ROYCHOUDHURY. Model-Based Diagnostics. In: *PHM Society* [online]. 2016 [cit. 2020-11-5]. Dostupné z: https://www.phmsociety.org/sites/phmsociety.org/files/Diagnostics_RoychoudhuryDaigle.pdf
- [7] NYBERG, Mattias. *Model Based Fault Diagnosis: Methods, Theory, and Automative Engine Applications* [online]. Linköping: Linus & Linnea AB, 1999 [cit. 2020-10-30]. ISBN 91-7219-521-5. Dostupné z: https://www.fs.isy.liu.se/Publications/PhD/99_PhD_591_MN.pdf
- [8] What is Redundancy? In: *Your IT Department* [online]. 2019 [cit. 2020-10-30]. Dostupné z: <https://www.your-itdepartment.co.uk/news/what-is-redundancy/>

- [9] Redundancy. In: *Dictionary.com* [online]. 2020 [cit. 2020-10-30]. Dostupné z: <https://www.dictionary.com/browse/redundance>
- [10] PICARDI, Claudia. *A short tutorial on model-based diagnosis* [online]. 2005 [cit. 2020-11-5]. Dostupné z: <http://www.di.unito.it/~botta/didattica/dispenseDiagnosi.pdf>
- [11] STEELE, Katie a H. Orri STEFÁNSSON. Decision Theory. In: *The Stanford Encyclopedia of Philosophy* (Winter 2015 Edition) [online]. 2015 [cit. 2020-12-6]. Dostupné z: <https://plato.stanford.edu/archives/win2015/entries/decision-theory/>
- [12] MYERSON, Roger B. *Game theory: analysis of conflict*. Cambridge; London: Harvard University Press, 1991, xiii, 568 s. ISBN 0-674-34116-3.
- [13] Decision rule: Simple definition. In: *Statistics How To* [online]. 2020 [cit. 2020-12-6]. Dostupné z: <https://www.statisticshowto.com/decision-rule/>
- [14] Specifications of motor 353300 In: *MAXON* [online]. 2021 [cit. 2021-04-15]. Dostupné z: <https://www.maxongroup.com/>
- [15] SKALICKÝ, Jiří. *Elektrické servopohony*. 2. vyd. Brno: Vysoké učení technické, 2001, 86 s. ISBN 80-214-1978-4.
- [16] ONDRŮŠEK, Čestmír. *Elektrické stroje* [online]. 2021 [cit. 2021-05-04]. Dostupné z: <https://moodle.vutbr.cz/>
- [17] Electromotive Force: Terminal Voltage. In: *Lumen Learning* [online]. 2021 [cit. 2021-04-16]. Dostupné z: <https://courses.lumenlearning.com/physics/chapter/21-2-electromotive-force-terminal-voltage/>
- [18] How to calculate a gear ratio? In: *X – engineer* [online]. 2021 [2021-04-16]. Dostupné z: <https://x-engineer.org/graduate-engineering/mechatronics/mechanisms/how-to-calculate-a-gear-ratio/>
- [19] *Katalog kuličkových šroubů* [online]. 2021 [cit. 2021-04-25]. Dostupné z: <https://www.hiwin.cz/cz/produkty/kulickove-srouby>
- [20] HALLIDAY, David, Robert RESNICK, Jearl WALKER a Petr DUB. *Fyzika. Svazek 1*. 2. přeprac. vyd. Brno: VUTIUM, 2013, 1 sv. (různé stránkování) : obr., barev. fot., grafy. ISBN 978-80-214-4123-1.
- [21] JANÍČEK, Přemysl, Emanuel ONDRÁČEK, Jan VRBKA a Jiří BURŠA. *Mechanika těles: pružnost a pevnost I*. Brno: CERM, 2004, 287 stran : obrázky (černobílé). ISBN 80-214-2592-X.
- [22] Calculation of Thread Lead Angle. In: *Mitsubishi materials* [online]. 2021 [cit. 2021-04-27]. Dostupné z: http://www.mitsubishicarbide.com/en/technical_information/tec_turning_tools/tec_threading/tec_threading_formula_top/tec_threading_formula

- [23] Acme thread form terms. In: *HELIXTM linear technologies* [online]. 2021 [cit. 2021-05-08]. Dostupné z: <https://www.helixlinear.com/blog/acme-screws/acme-thread-form-terms/>
- [24] *Katalog spojky ROTEX* [online]. 2021 [cit. 2021-04-27]. Dostupné z: <http://www.spojky-ktr.cz/rotex-gs-standard.html>
- [25] *Catalogue Drive technology* [online]. 2021 [cit. 2021-05-16]. Dostupné z: https://www.ktr.com/fileadmin/ktr/media/Tools_Downloads/kataloge/DriveTechnology.pdf
- [26] Kuličkové šrouby. In: *MITCalc* [online]. 2021 [cit. 2021-05-14]. Dostupné z: <https://www.mitcalc.com/doc/ballscrew/help/cz/BallScrew.htm>
- [27] JERAD, P. *Motor Thermal Limits on Torque Production (Frameless Motor Level)* [online]. 2015 [cit. 2021-05-07]. Dostupné z: <https://www.usmotion.com/wp-content/uploads/2015/11/WMotor-Thermal-Limits-on-Torque-Production-Website.pdf>
- [28] *Advanced Mechanisms/Robotics: S – Curve TG* [online]. [cit. 2021-05-01]. Dostupné z: <http://www.et.byu.edu/~ered/ME537/Notes/Ch5.pdf>

9. Seznam použitých zkratk a symbolů

D	prostor poruchových režimů prvků
F_i	poruchový režim číslo i
F_p	poruchový režim v systému
G	funkce plantu
NF	režim „žádná porucha“
S	diagnostický výrok
z	funkce dodatečných signálů
θ	parametrický vektor
Θ	parametrický prostor
Θ_γ	poruchová podmnožina
θ_G	poruchy plantu
θ_z	poruchy dodatečných signálů
φ	vektor konstantních parametrů
φ_G	rušení plantu
φ_z	rušení dodatečných signálů
γ	poruchový režim
ψ	poruchový režim prvků
Ω	množina všech poruch
Ω_i	množina všech poruchových režimů prvků
$\Phi(x)$	obecný vzorec
$typ_i(x)$	predikativní tvrzení
$ok(x)$	predikát o rozhodování o normálnosti
$in_i(c)$	funkce vstupu systému
$out_j(d)$	funkce výstupu systému
δ	rozhodovací pravidlo
δ_i	rozhodovací zkoušky
g	zesilovací přírůstek v příkladu 2.1
$u(t)$	vstup funkce v příkladu 2.1
$v(t)$	signál šumu v příkladu 2.1
$y(t)$	výstup funkce v příkladu 2.1
σ	rozptyl v příkladu 2.1
$G_{not}(x)$	hradlo „not“ v příkladu 2.2
$G_{and}(x)$	hradlo „and“ v příkladu 2.2
$G_{or}(x)$	hradlo „or“ v příkladu 2.2
$TYPY_{PRVKŮ_1}$	množina prvků systému s typem v příkladu 2.2
$SPOJ_1$	množina spojení mezi prvky v příkladu 2.2
$OBVOD_1$	model obvodu v příkladu 2.2

SD_1	popis systému v příkladu 2.2	
B_1	výchylka v senzoru 1 v příkladu 2.3	
B_2	výchylka v senzoru 2 v příkladu 2.3	
b_1	porucha vychýlení senzoru v příkladu 2.3	
b_2	porucha vychýlení senzoru v příkladu 2.3	
T	čas dosáhnutí žádané polohy u s – křivky	[s]
B	koeficient viskózního tření	[Nm · s · rad ⁻¹]
B_m	maximální hodnota magnetické indukce	[T]
$c \cdot \Phi$	konstanta motoru	[V · s]
d_1	průměr kuličkového šroubu	[m]
d_2	vnější průměr matice kuličkového šroubu	[m]
f	frekvence	[Hz]
G	modul pružnosti ve smyku	[GPa]
I	proud procházející zdrojem	[A]
I_a	proud na kotvě v ustáleném stavu	[A]
I_n	jmenovitý proud	[A]
i	převod	[-]
i_a	proud na kotvě v přechodném stavu	[A]
J	celkový moment setrvačnosti	[kg · m ²]
J_H	moment setrvačnosti „hubu“	[kg · m ²]
J_m	moment setrvačnosti matice kuličkového šroubu	[kg · m ²]
J_s	moment setrvačnosti „spideru“	[kg · m ²]
J_{ξ}	moment setrvačnosti kuličkového šroubu	[kg · m ²]
j_m	jerk	[m · s ⁻¹]
k_d	koeficient uložení ložiska	[-]
k_{Fe}	konstanta závislosti ztrát v železe	[W · s ²]
k_h	koeficient závislé na materiálu a na tloušťce plechů pro hysterezní ztráty	
k_m	konstanta závislosti mechanických ztrát	[W · min]
k_t	tuhost kuličkového šroubu	[Nm · rad ⁻¹]
k_v	koeficient závislé na materiálu a na tloušťce plechů pro vířivé ztráty	
L	délka kuličkového šroubu	[m]
L_a	indukce vinutí kotvy	[H]
M_i	moment motoru	[Nm]
M_0	moment tření	[Nm]
M_{KN}	jmenovitý moment spojky	[Nm]
$M_{K,max}$	maximální provozní moment spojky	[Nm]
M_n	jmenovitý moment	[Nm]

m	hmotnost magnetického materiálu	[kg]
m_H	hmotnost „hubu“	[kg]
m_m	hmotnost matice	[kg]
m_s	hmotnost „spideru“	[kg]
m_ξ	hmotnost kuličkového šroubu	[kg]
n	otáčky motoru	[min ⁻¹]
n_1	vstupní otáčky na hřídeli	[min ⁻¹]
n_2	výstupní otáčky na hřídeli	[min ⁻¹]
n_k	kritické otáčky kuličkového šroubu	[min ⁻¹]
n_{max}	maximální otáčky kuličkového šroubu	[min ⁻¹]
n_n	jmenovité otáčky motoru	[min ⁻¹]
P_1	příkon motoru	[W]
P_2	výkon motoru	[W]
P_{mech}	mechanický výkon motoru	[W]
ΔP_{Fe}	ztráty v železe	[W]
ΔP_j	ztráty ve vinutí	[W]
ΔP_m	mechanické ztráty	[W]
p	stoupání kuličkového šroubu	[m]
R_a	odpor vinutí kotvy	[Ω]
R_i	vnitřní odpor zdroje	[Ω]
r_1	poloměr kuličkového šroubu	[m]
r_2	vnější poloměr matice kuličkového šroubu	[m]
s	střída	[–]
$s(t)$	poloha matice	[m]
s_0	počáteční poloha matice	[m]
U_a	napětí na kotvě v ustáleném stavu	[V]
U_z	napětí na svorkách zdroje	[V]
U_e	elektromotorické napětí	[V]
U_m	výstupní napětí měniče	[V]
u_a	napětí na kotvě v přechodném stavu	[V]
u_i	indukované napětí v přechodném stavu	[V]
v_s	střední rychlost	[m · s ⁻¹]
α	úhel stoupání	[°]
ω	úhlová rychlost	[rad · s ⁻¹]
η	účinnost motoru	[–]
$\varphi(t)$	úhlové natočení	[rad]

10. Seznam obrázků

Obr. 2.1: Obecný model systému [7]	17
Obr. 2.2: Struktura obvodu [10].....	19
Obr. 2.3: Množina Θ [7]	21
Obr. 2.4: Obecná struktura diagnostické aplikace [7]	24
Obr. 2.5: Obecný diagnostický systém [7]	25
Obr. 3.1: Náhradní schéma stejnosměrného motoru [15]	27
Obr. 3.2: Uložení kuličkového šroubu [19]	31
Obr. 4.1: Nastavení bloku „Solver Configuration“	33
Obr. 4.2: Zapojení elektrické části modelu	34
Obr. 4.3: Blok „DC Motor“	34
Obr. 4.4: Záložka „Electrical Torque“	35
Obr. 4.5: Záložka „Mechanical“	35
Obr. 4.6: Záložka „Temperature Dependance“	35
Obr. 4.7: Záložka „Thermal Port“	35
Obr. 4.8: Rotační část modelu	36
Obr. 4.9: Translační část modelu	37
Obr. 4.10: Mechanická část pro test teplotní simulace	37
Obr. 4.11: Teplotní část modelu.....	38
Obr. 4.12: Generátor s – křivky.....	40
Obr. 4.13: PI regulátor proudu	41
Obr. 4.14: PI regulátor úhlové rychlosti.....	41
Obr. 4.15: P regulátor úhlového natočení	41
Obr. 5.1: Závislost teploty vinutí a pláště na čase (zjednodušený model).....	42
Obr. 5.2: Závislost polohy matice na čase (S – křivka)	43
Obr. 5.3: Závislost rychlosti matice na čase (S – křivka)	43
Obr. 5.4: Závislost teploty vinutí a pláště na čase (S – křivka).....	44
Obr. 5.5: Závislost polohy matice na čase (lineární přímka)	45
Obr. 5.6: Závislost rychlosti matice na čase (lineární přímka)	45
Obr. 5.7: Závislost teploty vinutí a pláště na čase (lineární přímka)	46
Obr. 5.8: Závislost polohy matice na čase (skoková změna).....	47
Obr. 5.9: Závislost rychlosti matice na čase (skoková změna)	47

Obr. 5.10: Závislost teploty vinutí a pláště na čase (skoková změna)..... 48

11. Seznam tabulek

Tab. 3.1: Specifikace stejnosměrného motoru MAXON 353300 [13]	26
Tab. 3.2: Parametry spojky ROTEX GS standard [17]	32
Tab. 5.1: Porovnání teplotních výstupů	48

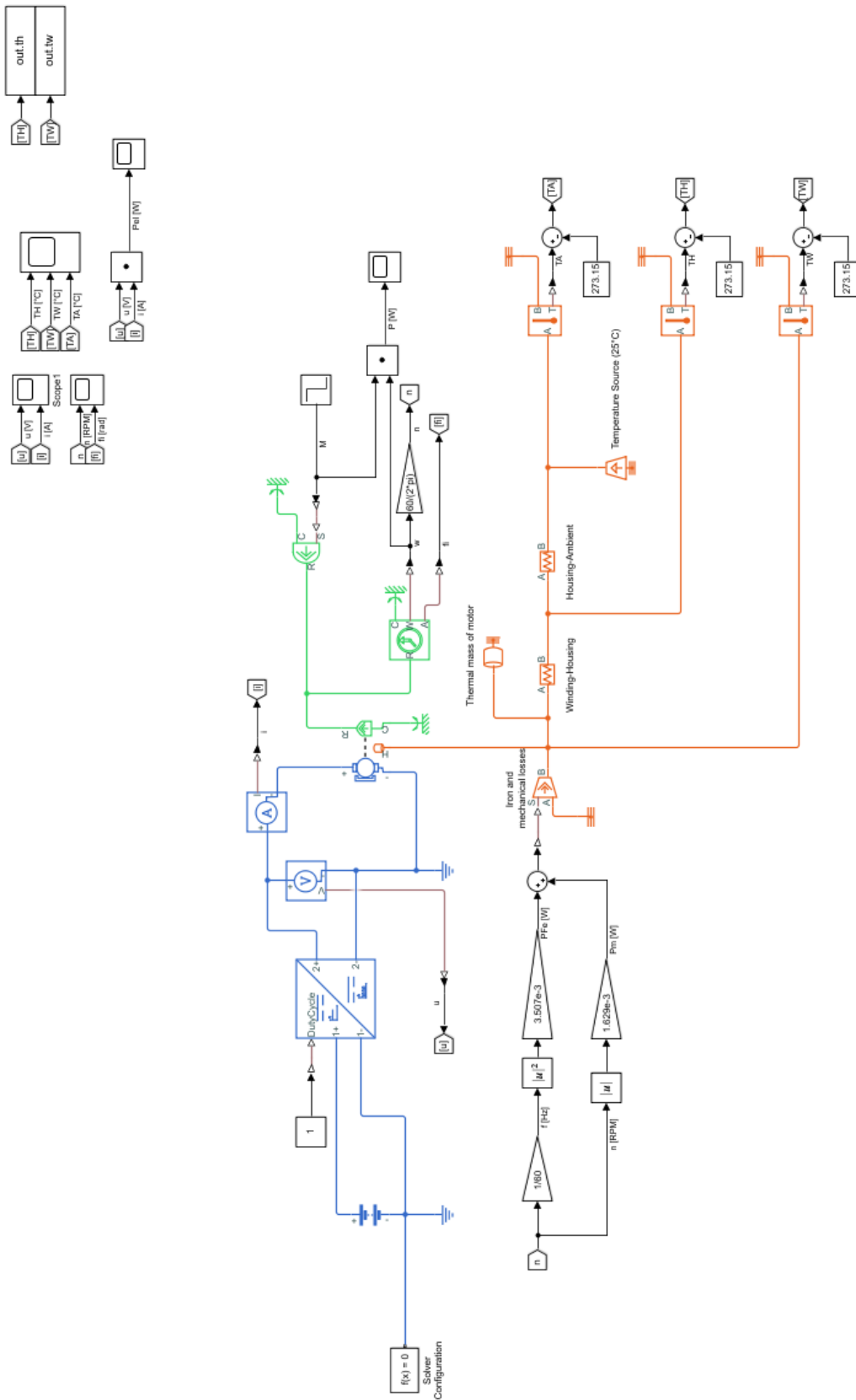
12. Seznam příloh

Příloha 1: Schéma zapojení modelu k testování teplotní části

Příloha 2: Schéma zapojení celého modelu

13. Přílohy

Příloha 1: Schéma zapojení modelu k testování teplotní části



Příloha 2: Schéma zapojení celého modelu

