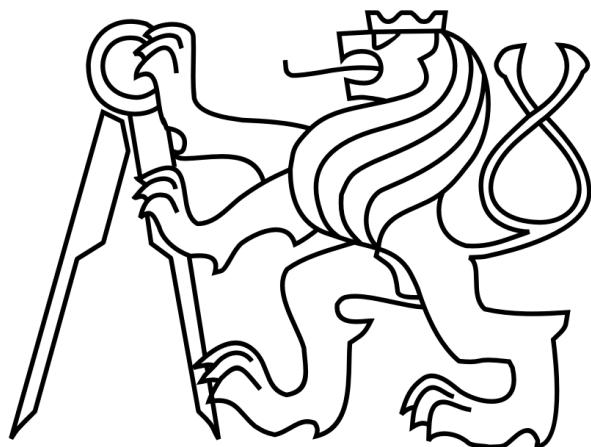


ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE  
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ  
KATEDRA ŘÍDICÍ TECHNIKY



BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Návrh elektronické řídicí jednotky založený na  
modelování

**Autor:** Jiří Pich

**Vedoucí práce:** Ing. Libor Waszniowski, Ph.D. Praha, 2009

České vysoké učení technické v Praze  
Fakulta elektrotechnická

Katedra řídicí techniky

## ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Student: Jiří Pich

Studijní program: Elektrotechnika a informatika (bakalářský), strukturovaný  
Obor: Kybernetika a měření

Název téma: Návrh elektronické řídicí jednotky založený na modelování

Pokyny pro vypracování:

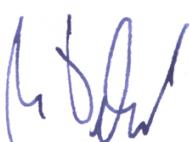
1. Seznamte se s principy návrhu řídicích systémů založených na modelování. (Model-based Design). Dále se seznamte s vhodnými nástroji Matlab.
2. Modelujte hydraulický akční člen s elektricky řízeným servoventilem a mechanickou zálohou.
3. Navrhněte řídicí algoritmy pro redundantní řídicí jednotku a modelujte je.
4. Pomocí simulace a případně i jiných metod ověřte chování systému.

Seznam odborné literatury:

Dodá vedoucí práce

Vedoucí: Ing. Libor Waszniowski, Ph.D.

Platnost zadání: do konce zimního semestru 2009/10



prof. Ing. Michael Šebek, DrSc.  
vedoucí katedry



doc. Ing. Boris Šimák, CSc.  
děkan

V Praze dne 27. 2. 2009

### **Prohlášení**

Prohlašuji, že jsem svou bakalářskou práci vypracoval samostatně a použil jsem pouze podklady (literaturu, projekty, SW atd.) uvedené v přiloženém seznamu.

V Praze dne: .....

Podpis: .....

## **Poděkování**

Na tomto místě bych chtěl poděkovat především vedoucímu práce, panu Ing. Liborovi Waszniowskému, Ph.D. za konzultace a přínosné rady, které mě v práci vždy posunovaly o krok vpřed. Dále bych chtěl poděkovat všem, kdo mi přímo či nepřímo pomáhali při vzniku této práce, zejména Jiřímu Dostálovi za poskytnutí jeho funkce PlotScope, usnadňující tvorbu grafů v prostředí Matlab.

V neposlední řadě mé poděkování patří mým rodičům a blízkým za podporu při vytváření této práce a za cenné rady a připomínky k ní.

## **Abstrakt**

Cílem práce je vytvoření kompletního modelu řídicího algoritmu použitelného při vývoji elektronické řídicí jednotky akčního členu metodou Model Based Design (Vývoj založený na modelování).

Práce se zabývá návrhem simulinkového modelu redundantního elektrohydraulického akčního členu, který byl vyvinut ve společnosti Aero Vodochody a.s. pro účely řízení kormidel letounu. Navrženy jsou řídicí algoritmy pro řízení tohoto akčního členu pomocí redundantní elektronické jednotky.

Chování řídicího algoritmu je ověřeno počítačovou simulací. Simulovány jsou poruchy elektronických a hydraulických komponent řídicího i řízeného systému.

## **Abstract**

The aim of this Bachelor thesis is to create a complete model of a control algorithm, which will be applicable to a design of electronic controller unit of an actuating device, which will be designed using the Model Based Design method.

A Matlab Simulink model of a redundant electrohydraulic actuating device is created. The actuating device was designed by Aero Vodochody a.s. company to control a rudder and elevators of an airplane. Control algorithms for a redundant electronic control unit, which controls this action device, are designed.

The behaviour of the designed algorithms is examined by a series of model simulations. Both electronic and hydraulic system components failures are simulated in order to examine the behaviour of the model.

# Obsah

<b>Seznam obrázků</b>	<b>iv</b>
<b>Seznam používaných zkratek</b>	<b>vi</b>
<b>1 Úvod</b>	<b>1</b>
1.1 Řídicí systém malého proudového letounu . . . . .	1
1.1.1 Fly By Wire . . . . .	3
<b>2 Model Based Design</b>	<b>5</b>
2.1 Metoda Model Based Design . . . . .	5
2.2 Volba nástroje pro modelování . . . . .	8
<b>3 Obvod EHSA</b>	<b>11</b>
3.1 Funkce obvodu EHSA . . . . .	11
3.2 Elektrohydraulický Servoventil . . . . .	13
3.3 Hydraulický válec . . . . .	16
3.4 Systém hydraulických ventilů obvodu EHSA . . . . .	17
3.5 Záložní mechanické ovládání obvodu EHSA . . . . .	18
<b>4 Modelování obvodu EHSA</b>	<b>20</b>
4.1 Dekompozice obvodu pro vytvoření modelu . . . . .	20
4.2 Model obvodu EHSA . . . . .	21
4.2.1 Model elektrohydraulického servoventilu . . . . .	22
4.2.2 Model ovládacích ventilů . . . . .	23
4.2.3 Model přemost'ovacího ventilu BYPASS VALVE . . . . .	24
4.2.4 Model přepínacího ventilu SWITCH VALVE . . . . .	25
4.2.5 Model záložního mechanického ovládání . . . . .	26
4.3 Model hydraulických válců a jejich společné pístnice . . . . .	27
4.3.1 Propojení redundantních okruhů obvodu EHSA . . . . .	28
4.4 Ověření základní funkčnosti systému . . . . .	29
<b>5 Návrh řídicího systému pro obvod EHSA</b>	<b>32</b>
5.1 Struktura řídicího systému . . . . .	32
5.2 Modelování řídicího systému . . . . .	36

5.2.1	Struktura modelu řídicí jednotky . . . . .	37
5.2.2	Regulátory proudů cívek servoventilu . . . . .	38
5.2.3	Další součásti modelu řídicí jednotky . . . . .	40
5.3	Stavové řízení obvodu EHSA . . . . .	41
<b>6</b>	<b>Ověření chování modelu a řídicích algoritmů</b>	<b>45</b>
6.1	Nastavení parametrů regulátorů a ověření chování s modelem . . . . .	45
6.2	Ověření chování systému v různých situacích . . . . .	51
<b>7</b>	<b>Závěr</b>	<b>55</b>
<b>A</b>	<b>Schémata pro Simulink</b>	<b>I</b>
<b>B</b>	<b>Obsah přiloženého CD</b>	<b>III</b>

# Seznam obrázků

1.1	Celkové schéma systému . . . . .	2
1.2	Detailní schéma zapojení systému (převzato z [1]) . . . . .	3
2.1	Návrhový cyklus Model Based Design (převzato z [14]) . . . . .	6
2.2	Model soustavy křídélka letounu v prostředí SimScape (převzato z [6]) . . . . .	9
3.1	Schéma vnitřního zapojení obvodu EHSA (převzato z [1]) . . . . .	12
3.2	Princip činnosti servoventilu (převzato z [4]) . . . . .	14
3.3	Servoventil po změně hodnoty vstupního proudu (převzato z [3], str. 7) . . . . .	15
3.4	Servoventil po ustálení polohy šoupátka (převzato z [3], str. 7) . . . . .	16
3.5	Zjednodušené schéma propojení servoventilu a hydraulického válce . . . . .	17
4.1	Struktura modelu servoventilu s vyznačením přidaných částí . . . . .	23
4.2	Struktura modelu ovládacího ventilu . . . . .	24
4.3	Model přemost'ovacího ventilu BYPASS VALVE . . . . .	25
4.4	Model přepínacího ventilu SWITCH VALVE . . . . .	26
4.5	Simulinkové schéma mechanického záložního ovládání . . . . .	27
4.6	Model hydraulického válce HYDRAULIC VALVE . . . . .	28
4.7	Odezva otevřené smyčky obvodu . . . . .	30
4.8	Srovnání odezvy v normálním režimu a v režimu s podřízeným hydraulickým válcem . . . . .	31
5.1	Zjednodušené schéma zavedení záporné polohové zpětné vazby . . . . .	32
5.2	Simulinkové schéma soustavy s řídicím systémem . . . . .	35
5.3	Model řídicí soustavy systému . . . . .	37
5.4	Schéma modelu řídicí jednotky ECU . . . . .	38
5.5	Blok regulace proudu cívkou Coil S11 . . . . .	39
5.6	PI regulátor se sledováním . . . . .	40
5.7	Schéma bloku LVDT_C_Logic . . . . .	41
5.8	Schéma stavového automatu StateFlow_ECU1 . . . . .	44
6.1	Odezva regulačního obvodu na skokovou změnu reference. . . . .	47
6.2	Odezva regulačního obvodu s jedinou funkční cívkou na skokovou změnu reference . . . . .	48

6.3	Srovnání akčních zásahů regulátorů v bezporuchovém stavu a ve stavu, kdy obvod ovládá jediný z regulátorů. . . . .	49
6.4	Odezva soustavy ovládané mechanickým záložním řízením . . . . .	50
6.5	Odezva soustavy na referenční signál s konečnou strmostí hran . . . . .	50
6.6	Odezva systému při přechodu z bezporuchového režimu do režimu s pře-mostěným válcem . . . . .	52
6.7	Ověření chování systému při poruše cívek ovládajících servoventil . . . . .	53
6.8	Ověření chování systému při přechodu z elektronického do mechanického ovládání . . . . .	54
6.9	Síla působící na pístnici při změně režimu ovládání . . . . .	54
A.1	Model jednoho okruhu obvodu EHSA . . . . .	I
A.2	Model kompletního obvodu EHSA . . . . .	II

# **Seznam používaných zkratek**

CAN	Controller Area Network
ECU	Electronic Control Unit
EHSA	Electro Hydraulic Servo Actuator
EL	Electronical
FBW	Fly By Wire
FCC	Flight Control Computer
LVDT	Linear Variable Differential Transformer
MECH	Mechanical
MDB	Model Based Design
PC	Personal computer
REF	Reference

# Kapitola 1

## Úvod

Tato práce se zabývá návrhem modelu a řídicích algoritmů elektronické řídicí jednotky systému ovládání kormidel malého proudového letounu. Řešené úkoly jsou součástí projektu Katedry řídicí techniky, zabývajícího se kompletním řešením návrhu řídicího systému metodou Model Based Design.

Práce je rozdělena do tří, vzájemně provázaných částí. V první části je prezentována metoda Model Based Design<sup>1</sup>, s jejímž využitím budou navrženy algoritmy řídicích jednotek. Zmíněna jsou i její další uplatnění v návrhu řídicích systémů. Dále je zde podrobněji představen a popsán modelovaný systém, jeho součásti a vlastnosti. Druhá část práce se zabývá vytvářením modelu a s tím související dekompozicí systému. Ve třetí části je pak vytvořený model využit k návrhu řídicích algoritmů pro celý systém. V závěru této části je model podroben testování a ověření očekávaného chování v různých modelových situacích, včetně simulace chování v případě výskytu reálných poruch soustavy.

### 1.1 Řídicí systém malého proudového letounu

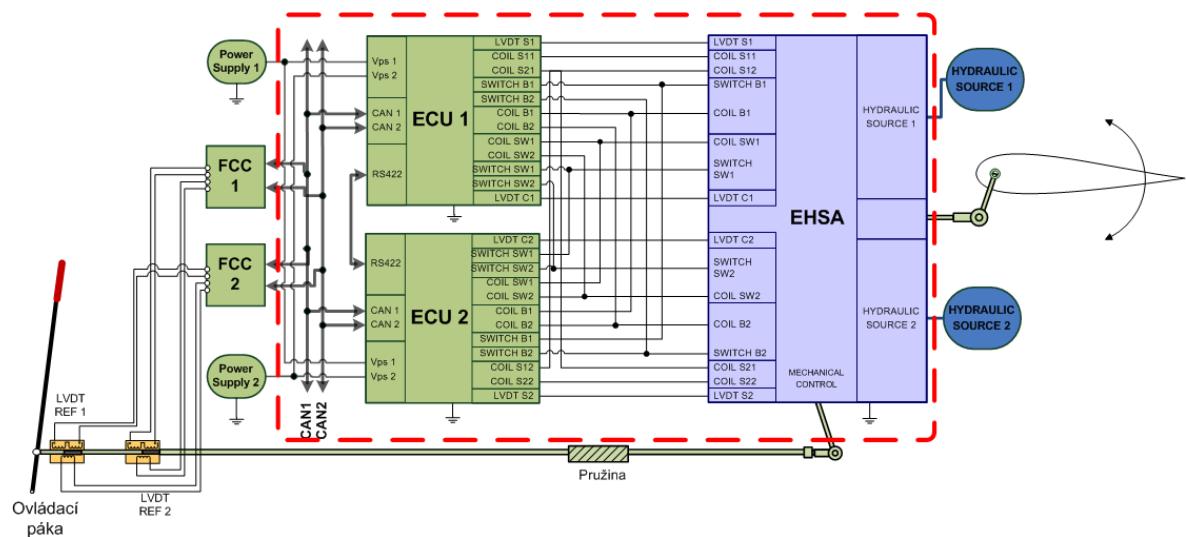
Projekt, jehož je tato práce součástí, se zabývá kompletním řešením systému řízení a systému autopilota malého proudového letounu s využitím metody Model Based Design. Spoluřešitelem projektu je společnost Aero Vodochody a.s.. Cílem projektu je studie modulového řešení systému řízení FLY-BY-WIRE pro lehký proudový letoun, které by mělo být v budoucnosti využíváno v letounech společnosti Aero Vodochody a.s.. Projekt se zabývá návrhem hardwaru, řídicích algoritmů a praktickou realizací systému na prototypu soustavy.

---

<sup>1</sup>Model Based Design je metoda návrhu systému založená na vytvoření jeho počítačového modelu

Řešení projektu by mělo být komplexní, úkolem je vytvoření počítačového modelu systému, testování funkčnosti systému, dále pak hardwarové řešení a v samém závěru i testování na reálném modelu, který byl poskytnut společností Aero Vodochody a.s.. Projekt je přizpůsoben požadavkům spoluřešitele, respektuje proto jeho požadavky na systém a použité metody.

Pro účely projektu je nutné vytvořit počítačový model soustavy, s jehož pomocí budou navrženy a otestovány řídicí algoritmy systému. Principy, na kterých je založen návrh systému s využitím počítačového modelu, jsou popsány v kapitole 2. Model bude dále využit pro automatické generování kódu řídicího programu soustavy. Tato práce se zabývá právě tvorbou počítačového modelu a návrhem řídicích algoritmů.



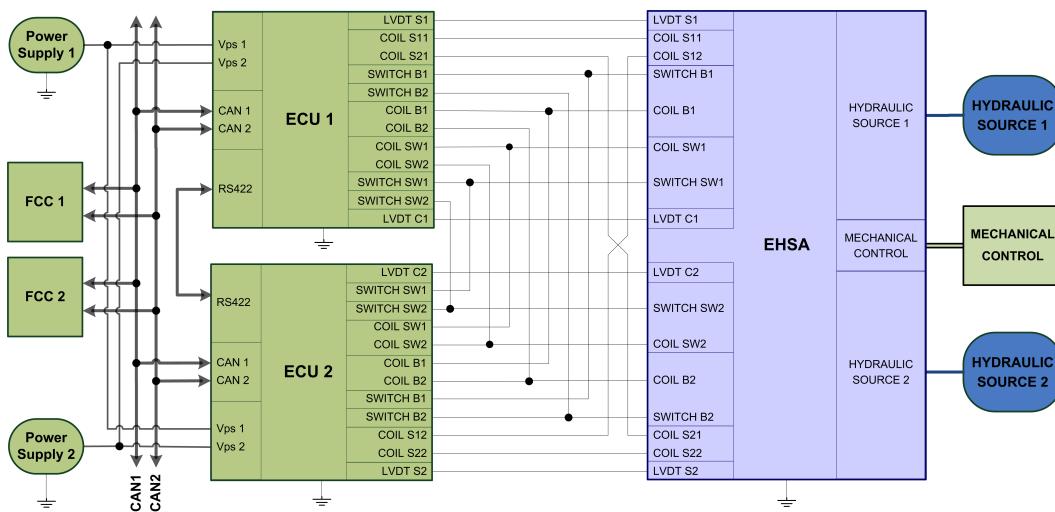
Obrázek 1.1: Celkové schéma systému

Řídicí systém letounu je postaven na koncepci FLY-BY-WIRE (FBW)[1], která je podrobněji popsána v sekci 1.1.1. Z této koncepce vychází zavedení redundantních obvodů, zajišťujících spolehlivost systému. Systém tvoří dvouokruhový hydraulický obvod s elektronicky řízenými akčními členy a záložním mechanickým ovládáním. Obrázek 1.1 znázorňuje zjednodušené schéma systému řízení kormidla letounu s červeně vyznačenou oblastí, které se tato práce týká.

Vstupem systému je poloha řídicí páky letounu, snímaná LVDT senzory<sup>2</sup>, jejichž výstup je přiveden do počítačů řízení letu (FCC). Počítače řízení letu jsou jádrem řízení celého letounu. Zajišťují funkci autopilotu a s tím spojený výpočet referenčních hodnot pro řídicí jednotky systému. Základní komponentou řízené soustavy je obvod EHSA (Electro- hydraulic servo

<sup>2</sup>LVDT (Linear variable differential transformer)- převodník lineární polohy na elektrický proud, využívaný jako senzor polohy

actuator). Jde o hydraulický akční člen s elektrickým a mechanickým ovládáním. Akční člen je tvořen dvěma redundantními okruhy. Jeho výstupem je kromě údajů senzorů, využitých ve zpětné vazbě, také síla přenášená pomocí pístnice na kormidlo letounu. Obvod EHSA umožňuje připojení záložního mechanického ovládání letounu. Mechanické ovládání je využíváno při selhání redundantních elektronických řídicích obvodů. Detailním popisem funkcí obvodu EHSA se zabývá kapitola 4. Oba okruhy obvodu EHSA jsou řízeny nezávisle, prostřednictvím řídicích jednotek (ECU1 a ECU2). Tyto řídicí jednotky zajišťují řízení kormidla na základě referenčních signálů, přicházejících z počítačů řízení letu. Každá z řídicích jednotek disponuje nezávislým napájením. Ke komunikaci mezi řídicími jednotkami a počítačem řízení letu (FCC) je využíváno redundantní sběrnice CAN<sup>3</sup>.



Obrázek 1.2: Detailní schéma zapojení systému (převzato z [1])

Obě řídicí jednotky mají možnost řídit oba kanály obvodu EHSA. Schéma propojení součástí soustavy je naznačeno na obrázku 1.2. Mezi obvodem EHSA a řídicími jednotkami je zavedena zpětná vazba, využívaná jak pro řízení, tak pro kontrolu funkčnosti součástí systému. Úkolem této práce je vytvoření modelu obvodu EHSA a algoritmů řídicích jednotek (ECU1 a ECU2), které obvod EHSA ovládají.

### 1.1.1 Fly By Wire

Principielní řešení systému vychází z požadavků a koncepcí systému FLY-BY-WIRE (FBW). Jde o systém nepřímého řízení letounu, modernizující starší koncepci mechanické vazby

<sup>3</sup>CAN (Controller area network) je vysokorychlostní sběrnice vhodná pro aplikace vyžadující komunikaci v reálném čase

mezi řídicími a výkonovými členy. Mechanické vazby jsou nahrazeny vazbami elektrickými, propojení mezi řídicími a výkonovými členy jsou tedy realizována pomocí elektrických vodičů. Mezi výhody takového řešení patří odlehčení systému řízení letounu, úspora místa oproti systémům ryze hydraulickým a mechanickým a větší flexibilita systému řízení v pilotní kabинě. Rozmístění přístrojů je možné uzpůsobit potřebám pilota, bez závislosti na potřebných mechanických propojeních, jak tomu bylo u systémů ryze hydraulických. Pro práci na tomto projektu je významnou vlastností systému FLY-BY-WIRE možné zvýšení spolehlivosti celého systému řízení. Umístění redundantních obvodů je prostorově i finančně méně náročné než u obvodů hydraulických či mechanických. Navrhovaný systém obsahuje dva redundantní obvody. Každý z nich se skládá z řídicí jednotky a elektrohydraulického obvodu, zakončeného hydraulickým válcem. Propojení řídicích jednotek a okruhů elektrohydraulického obvodu je křížové, každá z řídicích jednotek proto může ovládat každý z elektrohydraulických okruhů. Elektrická vedení jsou oproti hydraulickým vedením méně náchylná na poškození, navíc umožňují integraci s dalšími systémy uvnitř letounu (např. s navigačními systémy). Na druhé straně je však nutné zvažovat i možná rizika, která by zavedení elektrických obvodů do systému mohlo přinést, je proto nutné ošetřit například elektromagnetickou kompatibilitu použitých zařízení.

# Kapitola 2

## Model Based Design

### 2.1 Metoda Model Based Design

Zadání projektu vyžaduje řešení návrhu a realizace řídicího systému metodou Model Based Design. Úkolem této práce je vytvoření jednoho ze základních prvků, na kterém je tato metoda postavena, počítačového modelu systému. Považuji proto za důležité věnovat pozornost představení této metody a uvedení některých výhod jejího využití při vývoji systému ovládání malého proudového letounu.

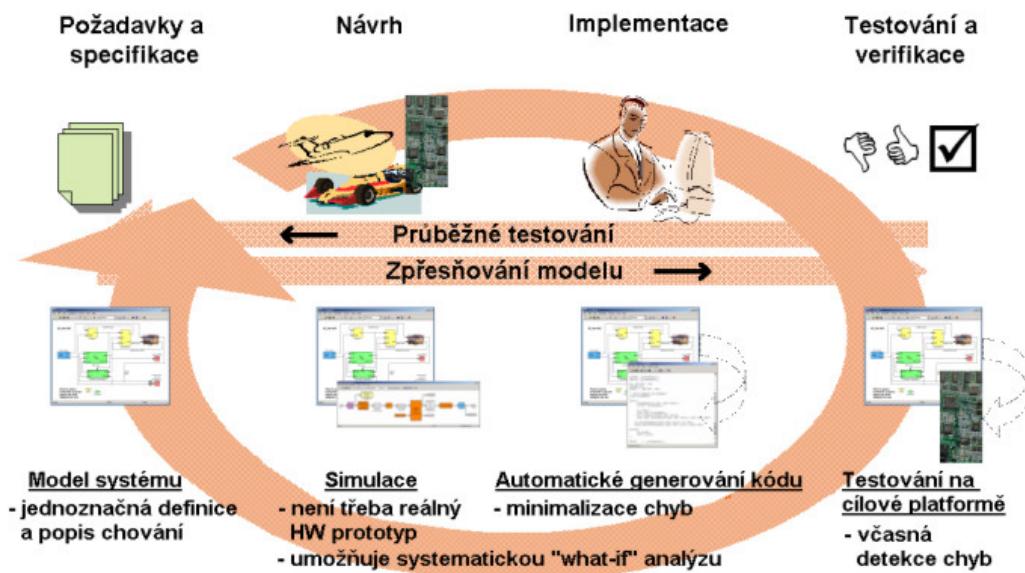
Model Based Design (MBD) je moderní metoda návrhu systému. Tradiční vývojový cyklus projektu využívá přímého postupu. V počáteční fázi jsou vyjádřeny požadavky na výsledný systém. Následuje návrh samotný, včetně prvních fyzických prototypů. Tyto prototypy jsou dále využívány pro implementaci řídicích programů. Teprve ve fázi, kdy je hotova jak hardwarová, tak softwarová část projektu, přichází na řadu testování. Až v této fázi jsou tedy odhaleny případné chyby v systému, které mohly vzniknout jak při návrhu programové části, tak při návrhu fyzického zařízení. Nejhorší variantou je případ, kdy se až v této fázi odhalí chyba ve specifikaci počátečních požadavků.

Některé nevýhody tradičního vývojového cyklu pomáhá odstranit právě metoda Model Based Design. Oproti klasickým metodám probíhá návrh v případě Model Based Designu v uzavřeném cyklu. Vývojový cyklus znázorňuje obrázek 2.1. Na počátku jsou, stejně jako v klasickém přístupu, požadavky zadavatele a specifikace systému. Na základě těchto požadavků je vytvořen počítačový model systému. Tento první, často jen přibližný model může být prezentován zadavateli projektu, který si už v této rané fázi může uvědomit případné potřebné

změny svého zadání. Vedlejším, ale často nezanedbatelným přínosem může být i to, že zadavatel vidí, že práce na jeho projektu pokračuje, a on je součástí vývojového procesu.

Model systému je vytvářen postupně. Zpočátku je vytvořen hrubý model, který je v průběhu modelování zpřesňován jednotlivými detaily. Odpadá nutnost čekání na dokončení hardwarových periferií před začátkem návrhu řídicího systému. Při znalosti jejich specifikací mohou být nahrazeny modelem, řídící systém tedy může být navrhován, zatímco jsou potřebné periferie ve stádiu vývoje či výroby. Testy modelu jsou prováděny průběžně, během zpřesňování modelu. Případné chyby jsou proto většinou odhaleny včas. Po dokončení a úspěšném ověření funkčnosti počítačového modelu následuje testování chování systému s navrženými regulátory. Ve většině projektů následuje i testování na fyzickém systému. Z vytvořeného modelu lze automaticky vygenerovat kód, který je použit ve fyzickém modelu soustavy. S využitím propojení fyzické soustavy s počítačovým modelem lze provádět testování v uzavřené smyčce (Hardware in the loop simulation), umožňující snadné úpravy v řídicím systému navrhovaném s využitím modelu.

## Model-Based Design



Obrázek 2.1: Návrhový cyklus Model Based Design (převzato z [14])

Návrh metodou Model Based Design je postaven na matematických a vizuálních metodách. Grafická reprezentace částí systému v podobě funkčních bloků umožňuje snadnou orientaci v modelu a přehlednost. Vzhledem k univerzálnosti dnešních programů, určených pro ná-

vrh metodou Model Based Design (např. Simulink společnosti MathWorks) se toto prostředí stává společnou platformou pro většinu pracovních skupin vývojářů. Usnadňuje vzájemnou komunikaci a celkové porozumění systému během všech vývojových stádií projektu. Přínosem metody Model Based Design je i takzvaná "what-if" analýza. Vytvořený model umožňuje sledovat chování systému v různých situacích, částečně je tak možné simuloval například možné poruchy systému a řídicími algoritmy zajistit správné chování systému, pokud takové poruchy nastanou. Právě tato možnost metody Model Based Design je důležitým přínosem při návrhu řídicího systému pro malý proudový letoun, kterým se zabývá tato práce. Simulace modelu systému s vnesenými chybami umožňuje sledování chování elektrohydraulické jednotky v různých kritických situacích. O vhodnosti využití metody Model Based Design pro návrh řídicích systémů pro letecké aplikace svědčí i fakt, že společnost Boeing, přední americký výrobce letounů, byla jednou z prvních společností, která začala tuto metodu využívat v praxi, a to s využitím vlastního programového vybavení s grafickým rozhraním, pojmenovaného EASY5 [12].

Hlavním přínosem použití metody Model Based Design v projektu návrhu řízení malého proudového letounu je již zmíněná možnost testování krizových scénářů systému. Návrh systému pro letecký průmysl má svá specifika, mezi která patří například obtížnost testování za reálného provozu. Testování za letu je v tomto případě nemyslitelné, možnost počítačové simulace je tedy velkou výhodou. Společnost Aero Vodochody a.s. poskytla pro účel tohoto projektu fyzický model hydraulického systému letounu. Řídicí systém však není navrhován pro konkrétní typ letounu, tento model proto reprezentuje základní funkce systému, detailně však neodpovídá systému, který bude použit při praktické realizaci. S využitím počítačového modelování je možné vytvořený model upravit na základě znalostí přesné specifikace pro konkrétní použití řídicího systému. Flexibilita počítačového modelu umožňuje pozdější změnu parametrů a případnou aplikaci řídicího systému na různé typy letounů.

Nástroje využívané při tvorbě počítačových modelů umožňují automatické generování kódů pro fyzické řídicí systémy. Generovat lze například kód v programovacím jazyce C, který je použitelný přímo na hardwarové platformě, pro kterou byl model vytvářen. Snadné generování kódu je výhodou v případě dodatečných změn v systému, kdy může být po provedení změn kód generován znova.

Metoda Model Based Design je využitelná nejen v návrhu řídicích systémů, jak je tomu v případě tohoto projektu, ale je aplikovatelná například při návrhu systémů pro zpracování

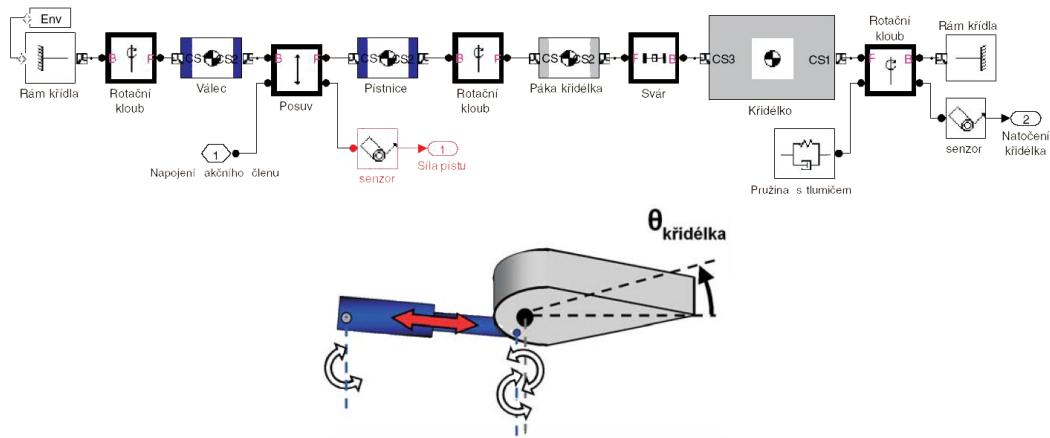
signálu a obrazu, či při návrhu komunikačních systémů [13].

## 2.2 Volba nástroje pro modelování

Jak bylo v předchozí sekci zmíněno, úkolem této práce je vytvoření funkčního počítačového modelu obvodu EHSA a návrh řídicího systému tohoto obvodu. Důležitým krokem v projektu využívajícím metodu Model Based Design je volba vhodného programového vybavení pro tvorbu modelu a případných podpůrných programů. V současné době je na trhu mnoho programů, umožňujících vytváření takovýchto modelů. Mnoho z nich je multidoménových, umožňují tedy modelování jak řídicích systémů například pro automobilový a letecký průmysl, tak i jiných systémů pro vědu, průmysl a zdravotnictví. Mezi tyto programy patří například asi nejznámější program tohoto typu, Simulink společnosti The MathWorks. Alternativami jsou programy MapleSim společnosti Maplesoft, VisSim společnosti Visual Solutions, či dříve zmiňovaný program Easy5, původně vyvinutý společností Boeing, nyní produkovaný společností MSC Software[12].

Již v dřívější vývojové fázi projektu bylo rozhodnuto o využití modelovacího prostředí Simulink. Toto prostředí je celosvětovým standardem v oblasti počítačového modelování, poskytuje mnoho efektivních nástrojových sad (toolboxů), umožňujících modelování systémů. Kromě využití standardních knihoven Simulinku se v případě tohoto konkrétního projektu nabízelo i využití modernějšího pojetí modelování, nazývaného modelování fyzické. Tento způsob modelování nepracuje s modelováním diferenciálních rovnic a matematických vztahů, jak je tomu v případě standartních knihoven Simulinku, ale využívá předem naprogramovaných modelů fyzických bloků. Výstupem bloků jsou fyzikální veličiny jako například síla, průtok, tlak apod.. Výhodou takového přístupu je především srozumitelnost modelů i pro uživatele, kteří přímo nerozumí matematickému modelování. Využívána je klasická technická notace používaná v jednotlivých doménách (elektrické, hydraulické a mechanické obvody) [15]. K porozumění modelům proto stačí znalost běžně užívané notace, není potřebná znalost matematických vztahů, které popisují chování komponent modelu. Modelování je proto přirozené, nevyžaduje hlubokou znalost jednotlivých prvků systému, přesto je výsledný model velmi přesný. Pro fyzické modelování je určena knihovna SimScape, která je k dispozici od verze R2007a programu Matlab. Knihovna SimScape obsahuje nástroje pro modelování elektrických, hydraulických a mechanických systémů. Výhodou je možné

propojení mezi jednotlivými doménami. S pomocí transformačních bloků je možné propojit modely vytvořené s využitím této knihovny s klasickými bloky Simulinku. Bloky SimScape jsou na pozadí popsány diferenciálními rovnicemi, což umožňuje pozdější automatické generování kódu s využitím Real-Time Workshop<sup>1</sup>. Pro ilustraci praktického použití knihovny SimScape je na obrázku 2.2 uveden příklad modelování soustavy křídélka letounu.



Obrázek 2.2: Model soustavy křídélka letounu v prostředí SimScape (převzato z [6])

Pro využití v tomto projektu by bylo fyzické modelování použitelné, konečné rozhodnutí však padlo na modelování s využitím klasických knihoven Simulinku. Modely z knihovny SimScape pro fyzické modelování jsou velmi obsáhlé, funkční bloky z těchto knihoven obsahují mnoho detailních parametrů, které pro tento projekt nejsou tolik významné. Velké množství z těchto parametrů nebylo ze strany spoluřešitele poskytnuto, pro účely simulace v prostředí SimScape by proto musely být odhadnuty. Detailní model by byl velmi náročný na výpočetní výkon. Pro účely tohoto projektu je významný především abstraktní model soustavy. Model bude využíván především k simulaci změn řízení soustavy při poruchách, nikoliv k detailnímu modelování přechodových stavů. S využitím klasického přístupu k modelování má celý vývojový tým úplnou kontrolu nad modelem, ten je možné podle potřeby zpřesňovat do detailů, v jiných částech modelu je naopak možné zanedbat vlastnosti systému, které pro tento projekt nejsou důležité. V neposlední řadě je v případě tohoto projektu výhodou i budoucí využití zkušeností s tvorbou modelu, či dokonce využití modelu samotného. Tvorba modelu klasickými metodami navíc přináší hlubší náhled do funkčnosti systému a jeho jednotlivých bloků, což je pro návrh dobrého řídicího systému velmi důležité. Některé

<sup>1</sup>Real-Time Workshop je nástrojová sada programu Matlab, umožňující překlad modelů vytvořených v Simulinku do zdrojového textu v jazyce C

bloky pro počítačový model byly vytvořeny již dříve v průběhu projektu s využitím klasického přístupu k modelování [4], pro konzistenci celého modelu je proto vhodné ve zvolené koncepci pokračovat.

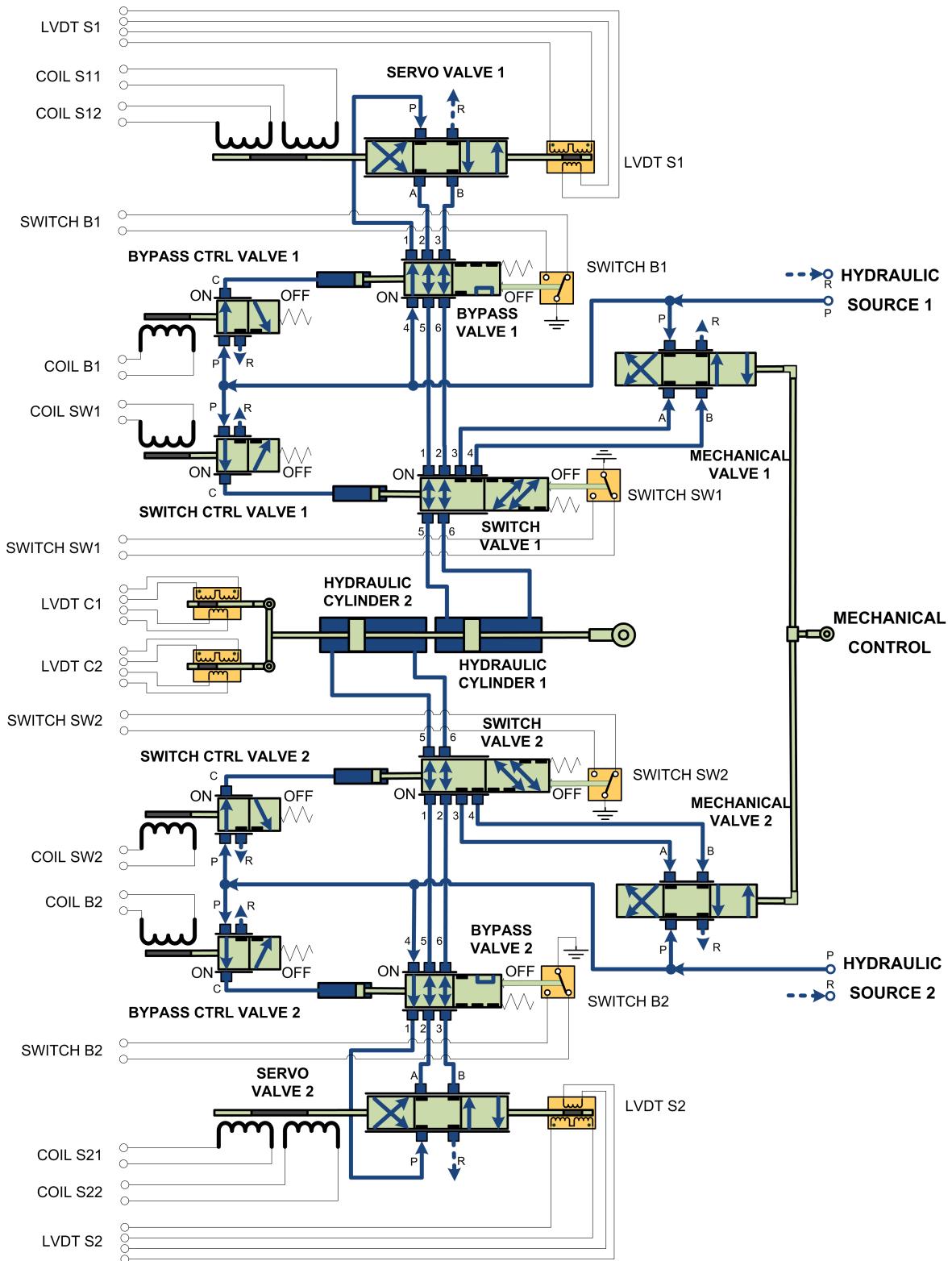
# Kapitola 3

## Obvod EHSA

### 3.1 Funkce obvodu EHSA

Obvod EHSA (Electro Hydraulic Servo Actuator) je významnou součástí navrhovaného řídicího systému pro malý proudový letoun. Umístění tohoto elektrohydraulického obvodu je naznačeno na obrázku 1.1. Schéma vnitřního zapojení obvodu EHSA je uvedeno na obrázku 3.1.

Jde o akční člen, který na základě proudů vstupních cívek elektrohydraulických servoventilů ovládá polohu kormidla letounu. Obvod se skládá ze dvou redundantních okruhů, propojených s oběma řídicími jednotkami *ECU1* a *ECU2*. Každému z okruhů náleží jak nezávislé připojení řídicích signálů, tak i nezávislý hydraulický okruh. Ústředním prvkem celého obvodu EHSA jsou dva hydraulické válce (*Hydraulic cylinder 1* a *2*), umístěné na společné pístnici. Každý z válců může být ovládán elektrohydraulickým servoventilem (*Servo Valve 1*, respektive *2*), mechanickým proporcionálním ventilem (*Mechanical Valve 1*, respektive *2*), nebo může být odpojen, a to tak, aby nebránil pohybu válce druhého. Kromě hydraulických válců, elektrohydraulických a proporcionálních ventilů je obvod tvořen systémem hydraulických přepínacích ventilů. S jejich pomocí je přepínáno mezi různými nastaveními obvodu EHSA. Funkce obou okruhů obvodu EHSA je totožná, stejně jako jednotlivé prvky obvodu. Dále proto budou podrobně popsány jen součásti jednoho okruhu obvodu. Pro přehlednost bude v této kapitole používán symbol # pro číslo kanálu řídicí jednotky ECU a symbol \$ pro číslo okruhu obvodu EHSA.



Obrázek 3.1: Schéma vnitřního zapojení obvodu EHSA (převzato z [1])

Vstupy a výstupy obvodu EHSA zobrazuje obrázek 3.1. Vstupy obvodu tvoří přívodní vedení čtyř cívek, označovaných *COIL S\$#*. Proudem těchto cívek je ovládána poloha šoupátka elektrohydraulického servoventilu *SERVO VALVE \$*, a tím nepřímo i poloha pístnice. Dal-

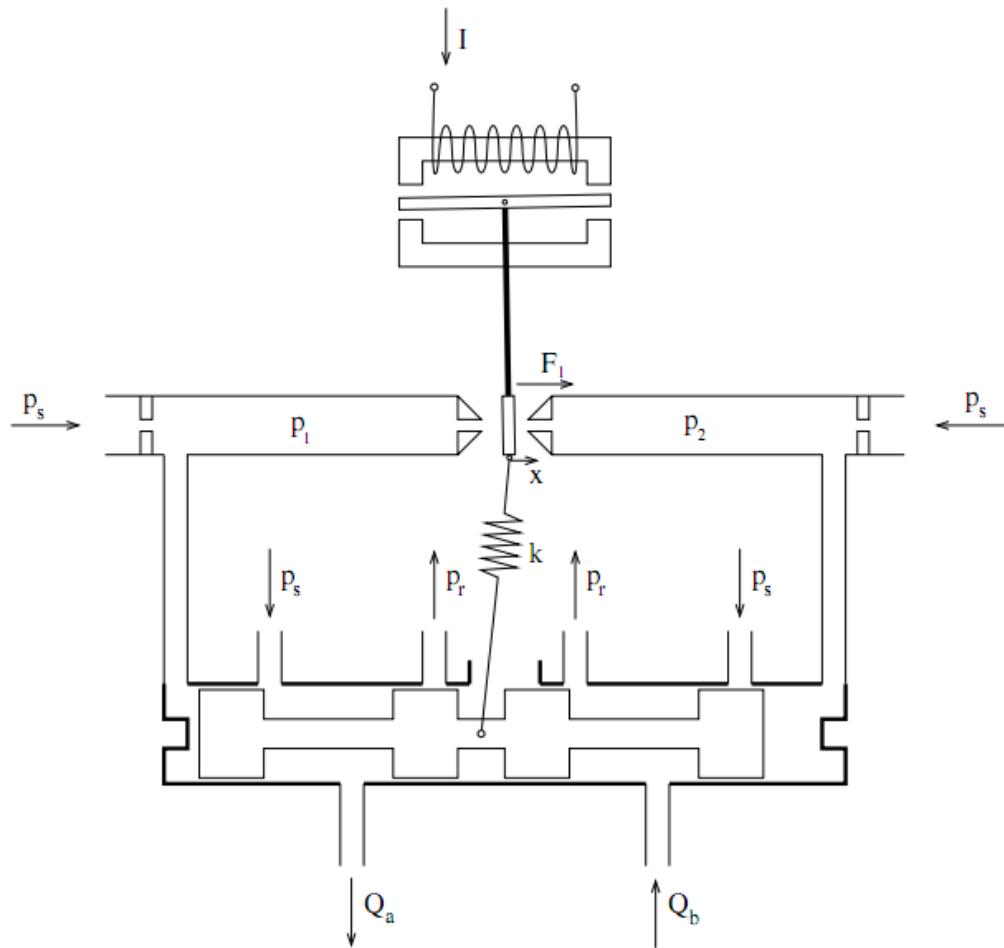
šími vstupy systému jsou přívodní vedení cívek, ovládajících jednotlivé přepínací hydraulické ventily. Vstup *Coil B\$* zajišťuje přepínání ventilu *BYPASS CTRL VALVE \$*, vstup *Coil SW\$* zajišťuje přepínání ventilu *SWITCH CTRL VALVE\$*. Funkce těchto ventilů bude popsána dále v této kapitole. Vstupem akčního členu je také přívodní vedení hydraulického média. Pro případ poruchy elektronického ovládání vstupuje do obvodu i táhlo ovládací páky letounu, které může prostřednictvím proporcionálního ventilu *MECHANICAL VALVE \$* ovládat polohu pístnice.

Výstupem akčního členu je poloha pístnice, měřená LVDT senzorem *LVDT C\$*. Dalším výstupem akčního členu je i poloha šoupátka elektrohydraulického servoventilu, měřená senzorem *LVDT S \$*. Kromě výstupních signálů polohových senzorů tvoří výstupy obvodu i signály mikrospínačů, nesoucí informaci o stavu sepnutí jednotlivých ovládacích ventilů obvodu. Signál *SWITCH B\$* informuje o stavu sepnutí ventilu *BYPASS VALVE \$*, signál *SWITCH SW\$* nese informaci o sepnutí ventilu *SWITCH VALVE \$*. Výstupem obvodu je i vratné potrubí hydraulického média.

## 3.2 Elektrohydraulický Servoventil

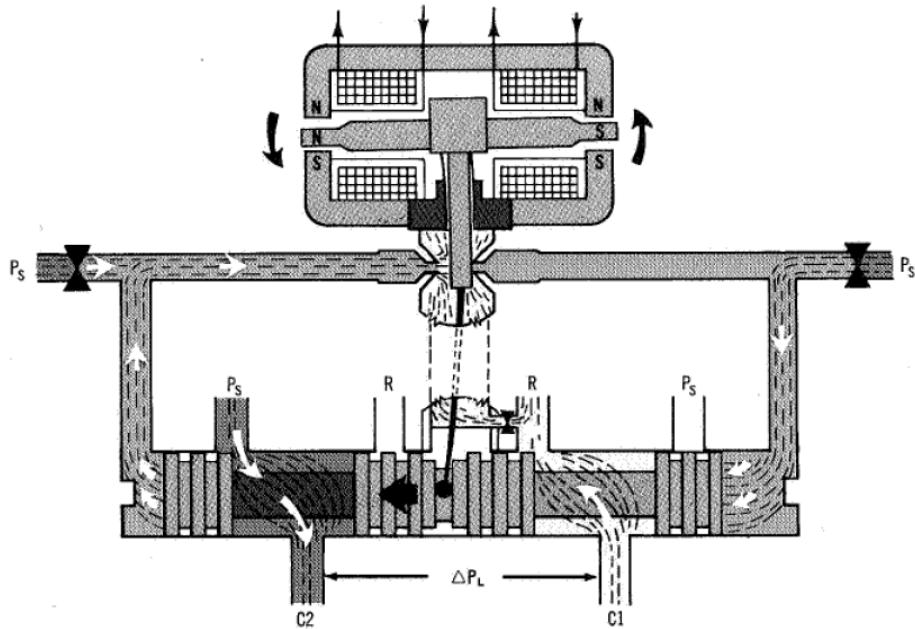
Z pohledu elektronického ovládání je nejvýznamnější částí obvodu EHSA elektrohydraulický servoventil, označovaný *Servo Valve \$*. Jde o hydraulický šoupátkový ventil, který umožňuje nejen řízení průtoku kapalného média, ale i řízení směru proudění média. Vysoká rychlosť reakce tohoto ventilu a jeho přesnost je docílena dvoustupňovým uspořádáním a zavedením mechanické zpětné vazby. Struktura servoventilu je naznačena na obrázku 3.2.

První stupeň servoventilu je tvořen protilehlými hydraulickými zesilovači typu tryska- klapka. Přívodní potrubí k tryskám je spojeno s druhou částí obvodu, ve které je umístěno šoupátko. Jeho tvar, spolu s vhodným umístěním vývodních potrubí, umožňuje regulaci jak rychlosti, tak směru proudění hydraulického média. Šoupátko je s klapkou prvního stupně propojeno pružinou o tuhosti  $k$ , tato pružina funguje jako zpětná vazba.



Obrázek 3.2: Princip činnosti servoventilu (převzato z [4])

Klasická struktura hydraulického zesilovače typu tryska- klapka je pro účely použití v servoventilu upravena. Systém obsahuje dva komplementární systémy tohoto typu. Trysky jsou uspořádány protisměrně, mezi nimi je umístěna společná klapka. Okolí trysek je napojeno na návratové potrubí hydraulického okruhu. Klapka je na jednom z konců spojena s elektromagnetem, pomocí něhož lze ovládat její vychýlení. Při vychýlení klapky na jednu stranu dojde na této straně ke zvýšení tlaku, na straně druhé dojde naopak k jeho snížení. Vzhledem k propojení přívodních potrubí se sekundární částí servoventilu dojde ke změně poměru tlaků  $p_1$  a  $p_2$ , tato změna způsobí pohyb šoupátka. Situace je naznačena na obrázku 3.3.



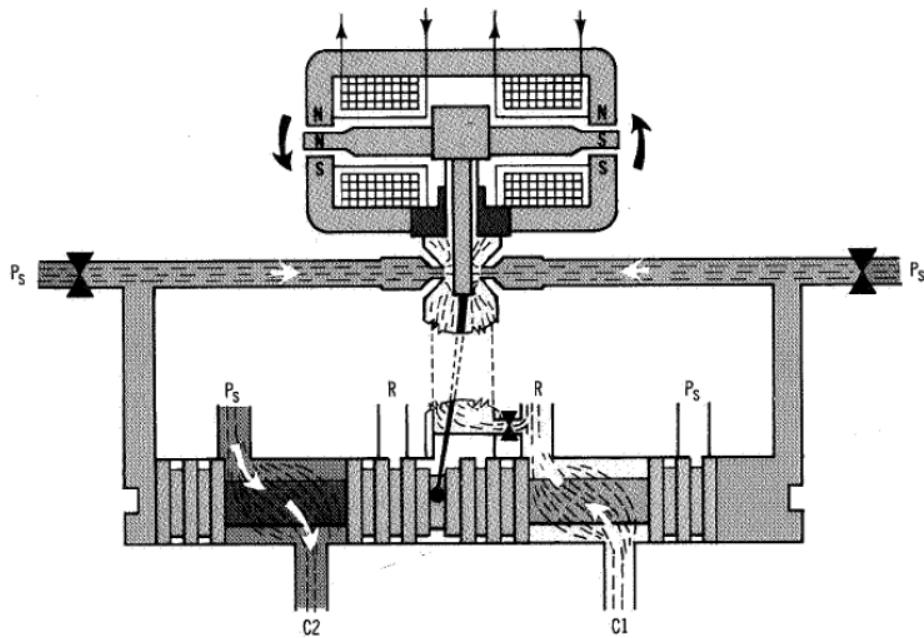
Obrázek 3.3: Servoventil po změně hodnoty vstupního proudu (převzato z [3], str. 7)

Pohybem šoupátko je vyvíjena síla na zpětnovazební pružinu. Tato síla, úměrná tuhosti pružiny ( $F=kx$ ), působí na klapku, tím je uzavřena zpětná vazba. Šoupátko zůstává v pohybu až do momentu, kdy se vyrovnejí síly elektromagnetu a pružiny, které působí na klapku. Po vyrovnání sil se klapka dostane do neutrální polohy, rozdíl tlaků  $p1$  a  $p2$  je opět nulový. Šoupátko vlivem reakce pružiny a tření zastaví svůj pohyb v takové poloze, která odpovídá požadovanému tlaku a směru toku hydraulického média. Situace je znázorněna na obrázku 3.4.

Další změna rychlosti či směru průtoku hydraulického média je vyvolána změnou proudu cívky elektromagnetu a opakováním celého procesu.

Výhodami použití elektrohydraulického ventilu v tomto uspořádání jsou především jeho dynamické vlastnosti, zejména jeho reakční rychlosť. Mezi nevýhody patří nároky na čistotu hydraulického média a vysoká cena, způsobená složitostí a přesností tohoto mechanizmu.

Každý ze servoventilů obvodu EHSA je ovládán proudy dvou redundantních cívek. Detailní technické specifikace zařízení jsou uvedeny v katalogovém listu servoventilu LUN [2], pro účely této práce jsou významné především vstupní proudy cívek elektromagnetu, které leží v rozsahu mezi  $I_{min} = -10mA$  a  $I_{max} = 10mA$ . Poloha šoupátko elektrohydraulického servoventilu je snímána LVDT senzorem, v nákresu 3.1 označeným *LVDT S1*. Výstup tohoto senzoru bude ve vytvořeném modelu sloužit jako jeden ze vstupů řídicí jednotky obvodu EHSA. Pro

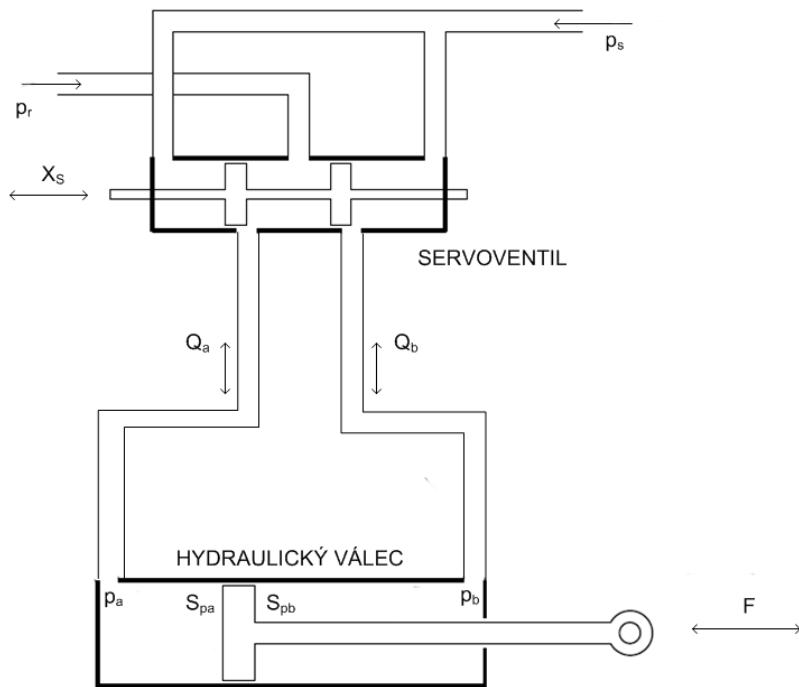


Obrázek 3.4: Servoventil po ustálení polohy šoupátka (převzato z [3], str. 7)

Vytváření modelu elektrohydraulického servoventilu je důležité, že dochází k lineárnímu převodu vstupního proudu  $I$  na objemový průtok  $Q$ . Nelinearity do prvku však vnáší suché tření. Nepřesností ve výrobě tohoto členu vzniká v okolí nulové polohy šoupátka mrtvé pásmo.

### 3.3 Hydraulický válec

Další velmi důležitou součástí obvodu EHSA je hydraulický válec (*Hydraulic Cylinder §*). Jeho zjednodušené uspořádání a náznak propojení s elektrohydraulickým ventilem, popsáným v kapitole 3.2 je zachyceno na obrázku 3.5. Pohyb pístu válce je ovládán dvěma přívodními vedeními hydraulického média. Pohyb válce vzniká rozdílem tlaků  $p_b$  a  $p_a$ , působících na píst válce. Píst válce je připojen k pístnici, která je společná pro hydraulické válce prvního i druhého okruhu obvodu EHSA. Pístnice válce je pak spojena se směrovkou letounu. Pohyb pístnice tedy ovládá polohu kormidla.



Obrázek 3.5: Zjednodušené schéma propojení servoventilu a hydraulického válce

Poloha společné pístnice je snímána redundantními senzory LVDT (označenými *LVDT C1*, respektive *C2*). Výstupní signály těchto senzorů budou využity v navrhované řídicí jednotce pro získání informace o poloze pístnice.

### 3.4 Systém hydraulických ventilů obvodu EHSA

Význam obvodu EHSA pro celkové řízení kormidla letounu spočívá v možnosti řízení přepínání jednotlivých hydraulických okruhů systému. Elektrohydraulický servoventil popsaný v sekci 3.2 a hydraulický válec popsaný v sekci 3.3 jsou propojeny systémem přepínacích hydraulických ventilů. Nastavením ventilů lze přepojovat mezi elektronickým a záložním mechanickým řízením kormidla. Pomocí ventilů obvodu EHSA je také možné přepínat režimy hydraulického válce. Pokud se na některé z částí okruhu objeví závažná porucha, hydraulický válec náležící tomuto okruhu musí být přepnut do podřízeného režimu tak, aby nebránil pohybu společné pístnice. Přepínací ventily jsou ovládány pomocí elektronických spínacích cívek. Jejich zapojení v obvodu je patrné z obrázku 3.1.

Spínací cívka *Coil B1* ovládá prostřednictvím ventilu *Bypass CTRL Valve 1* přemost' ovací ventil *Bypass Valve 1*. Tento ventil zajišťuje přepínání okruhu mezi aktivním a podřízeným režimem. V aktivním režimu je hydraulický válec ovládán elektrohydraulickým servoven-

tilem okruhu. Pokud je na spínací cívku *Coil B1* přiveden signál logické hodnoty 0, ventil *Bypass Valve B1* je prostřednictvím ventilu *Bypass CTRL Valve 1* vypnut. Hydraulický válec příslušící tomuto okruhu obvodu EHSA je v pasivním režimu. V tomto režimu jsou potrubí vedoucí do obou komor válce přemostěna, válec se pohybuje v závislosti na pohybu pístnice ovládané hydraulickým válcem druhého okruhu. V podřízeném režimu by válec neměl bránit pohybu pístnice, přepouštění hydraulického média z jedné komory do druhé komory válce s pomocí přemost'ovacího okruhu však z válce činí tlumič s malým útlumem. I tento fakt je nutné při pozdějším modelování a návrhu řídicího systému uvážit. Stav sepnutí přemost'ovacího ventilu *Bypass Valve 1* je indikován mikrospínačem *Switch B1*. Výstup tohoto mikrospínače bude ve vytvořeném modelu sloužit jako jeden ze vstupů řídicí jednotky obvodu EHSA.

Dalším důležitým vstupem obvodu EHSA je spínací cívka označená *Coil SW1*. Tato cívka ovládá řídicí ventil *Switch CTRL Valve 1*, pomocí něhož je ovládán přepínací ventil *Switch Valve 1*. Tento ventil slouží k přepojování ovládacího hydraulického obvodu válce. V zapnutém stavu je hydraulický válec ovládán elektrohydraulickým servoventilem. Ve vypnutém stavu jsou potrubí vedoucí do válce přepojena na záložní, mechanicko-hydraulický obvod. Při přepnutí na záložní obvod je hydraulický válec ovládán prostřednictvím proporcionálního ventilu, na který je připojena ovládací páka v kabině letounu. Tento prvek se tak stává velmi významným, v případě kolapsu elektronického řízení musí právě přepínací ventil zajistit přepojení na mechanické ovládání a tím zajistit bezpečnou ovladatelnost letounu. Stav sepnutí přepínacího ventilu *Switch Valve 1* je indikován mikrospínačem *Switch SW1*. Výstup tohoto mikrospínače bude ve vytvořeném modelu sloužit jako jeden ze vstupů řídicí jednotky obvodu EHSA.

### 3.5 Záložní mechanické ovládání obvodu EHSA

Kromě již zmíněných součástí obsahuje obvod EHSA ještě záložní okruh pro mechanické ovládání. Jak již bylo v sekci 3.4 popsáno, toto ovládání je k okruhu připojováno přepojovacími ventily *Switch Valve 1 a 2*. Jeho úkolem je zajistit bezpečné ovládání letounu v případě selhání elektronického ovládání. Mechanické ovládání je tvořeno mechanickým propojením ovládací páky v kabině letounu s proporcionálním mechanicko-hydraulickým ventilem. Pohybem ovládací páky letounu jsou měněny tlaky hydraulického média v potrubích A a B,

které vedou do hydraulického válce. Se změnou tlaků dochází k pohybu pístnice a s tím souvisejícímu pohybu kormidla letounu. Mechanické ovládání je opět propojeno s oběma okruhy obvodu EHSA tak, aby bylo možné letoun ovládat například i při výpadku jednoho z hydraulických okruhů.

# Kapitola 4

## Modelování obvodu EHSA

### 4.1 Dekompozice obvodu pro vytvoření modelu

Ještě před modelováním samotným bylo nutné zvolit správnou koncepci pro vytvářený model a obvod EHSA vhodně dekomponovat. Dekompozice obvodu vychází jak z jeho vlastností a uspořádání, tak i z požadavků na výsledný model. Schéma obvodu je uvedeno na obrázku 3.1 v kapitole 3. Základní charakteristikou soustavy je přítomnost dvou redundantních okruhů. Tato vlastnost musí být v modelu nutně zachována. Pro snadnou orientaci v modelu byl obvod rozdělen do jednotlivých bloků, odpovídajících prvků obvodu. Takové rozdelení umožňuje jak úpravy elementárních bloků, tak případnou změnu struktury modelu podle požadavků na přesnost funkce obvodu, která je simulována. Pro nastavení parametrů regulátorů tak může být podrobně specifikována dynamika servoventilu a válců. Pro zjištění reakce ventilů obvodu EHSA na poruchy soustavy je naopak důležité přesné modelování jednotlivých ventilů.

Elektronickou část obvodu EHSA je v prostředí Simulink možné modelovat beze změny struktury. Odlišný náhled je však potřebný pro vytvoření modelu hydraulické části obvodu. V reálném obvodu je síla na pístnici válce ovládána rozdílem tlaků v potrubích A a B, spojujících hydraulický válec a servoventil. Poměr tlaku v potrubí A a tlaku v potrubí B je určen polohou šoupátku elektrohydraulického servoventilu a směrem toku hydraulického média. Na základě známé přenosové funkce reálného servoventilu, popsané v [3] byl již v dřívější fázi projektu vytvořen model vnitřní struktury elektrohydraulického servoventilu, popsaný v [4]. Vstupem tohoto modelu je elektrický proud v řádech mA, výstupem modelu je poloha šoupátku uvnitř servoventilu. Model byl vytvořen pouze s ohledem na potřeby řízení hydraulického válce.

lického válce, kde je poloha pístu ovlivňována právě polohou šoupátka v servoventilu. Pro potřeby modelování obvodu EHSA je však nutné uvážit i směr toku hydraulického média. Tuto změnu si vyžádala především přítomnost přemost'ovacího ventilu (*BYPASS VALVE*). Ve vypnutém stavu tento ventil přemost'uje přívody hydraulického válce a umožňuje volný, tlumený pohyb ventilu v závislosti na pohybu pístnice. Bez uvážení směru toku hydraulického média by takovéto přemostění v modelu bylo obtížné. Jako možné řešení se ukázala koncepce vnášející do modelu dvě vedení, modelující potrubí A a B. Tlak v potrubích dosahuje pouze dvou hodnot, a to bud' hodnoty odpovídající tlaku napájecímu, nebo hodnoty odpovídající tlaku vratnému. Poměr velikosti tlaků v těchto potrubích určuje směr proudění hydraulického média, a s tím související směr pohybu pístnice hydraulického válce. Kromě těchto tlaků tvoří rozhraní hydraulických komponent i výchylka šoupátka elektrohydraulického servoventilu. Poloha šoupátka servoventilu ovlivňuje průtok hydraulického média potrubími A a B reálného systému a tím i případnou změnu polohy pístu v hydraulickém válci. Pomocí této koncepce je možné modelovat obvod tak, aby se model choval stejně jako reálný systém.

## 4.2 Model obvodu EHSA

Jak již bylo v sekci 4.1 uvedeno, model obvodu EHSA byl vytvářen s využitím některých komponent vytvořených v předchozí fázi projektu. Konkrétně se jedná o funkční bloky elektrohydraulického servoventilu a hydraulického válce, převzaté z [4]. Tyto bloky zde proto nebudou detailně popsány, jejich podrobná specifikace je uvedena v [4]. Upravení koncepce modelu, využívající dvou potrubí vedoucích hydraulické médium, popsané v sekci 4.1, si však vyžádalo úpravu i těchto převzatých bloků. V této části, stejně jako v kapitole 3, bude popsán pouze jeden ze dvou redundantních okruhů. Funkce druhého okruhu je stejná. Aby byla dodržena jednotná forma, používaná v rámci celého projektu, jsou pro označování jednotlivých komponent modelu používány anglické názvy.

Schéma modelu jednoho okruhu obvodu EHSA je zobrazeno v příloze na obrázku A.1. Vstupy i výstupy modelu, stejně jako jednotlivé bloky, odpovídají prvkům obvodu EHSA. Pro účely pozdějšího propojení obou redundantních okruhů a celkovou přehlednost modelu je hydraulický válec uveden v samostatném bloku, mimo blok modelující soustavu ventilů obvodu EHSA. Dále byl do obvodu přidán samostatný blok modelující mechanické ovlá-

dání. Přidán byl také vstup *Ys\_Mech*, který reprezentuje mechanickou výchylku ovládací páky letounu, a vstup *X\_rudder*, přivádějící do bloku mechanického ovládání zpětnou vazbu polohy pístnice. Jednotlivé bloky a jejich funkce budou představeny v následujících odstavcích. Propojení bloků je také téměř stejné jako v reálné soustavě, kromě rozdílu v pojetí tlakového potrubí, popsáného v sekci 4.1.

Po prvních testech obvodu se ukázalo, že Simulinkové bloky přepínačů, hojně používané v tomto modelu, nefungují příliš spolehlivě při detekci nulové rozhodovací úrovně na vstupu. Aby se tato jejich vlastnost v modelu neprojevila, jako nulová logická úroveň je v celém modelu uvažována hodnota 0.1. Logická úroveň 1 byla stanovena na hodnotu 1.

#### 4.2.1 Model elektrohydraulického servoventilu

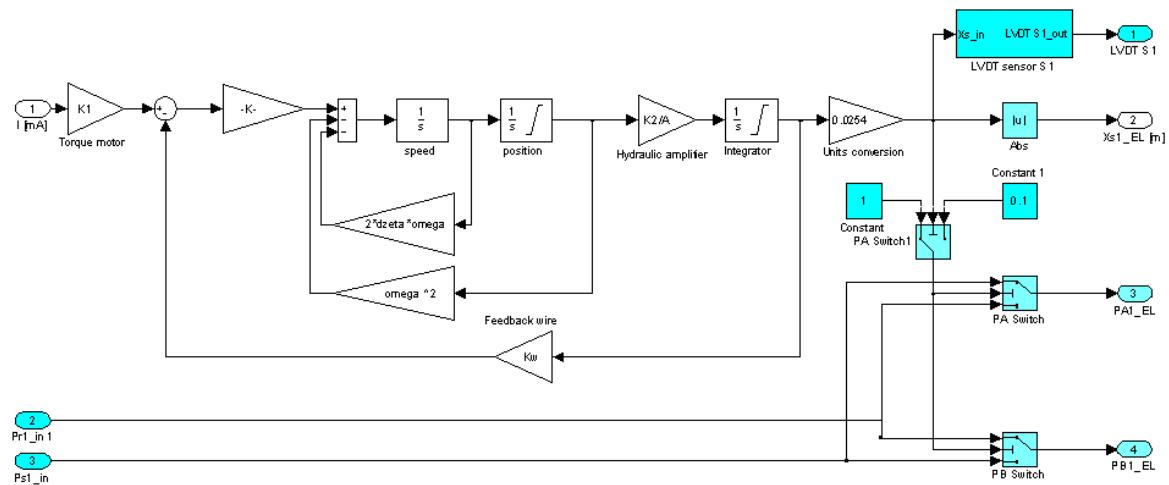
Vnitřní struktura modelu servoventilu vychází z matematického modelu, uvedeného v dokumentaci k této součástce [3]. Vstupem modelu je elektrický proud protékající cívkou elektromagnetu, výstupem pak poloha šoupátka servoventilu. Vnitřní struktura modelu, přepracovaná k využití pro modelování obvodu EHSA je zobrazena na obrázku 4.1. Model servoventilu vychází z modelu vytvořeného v předchozí fázi projektu [4].

Elektromagnet převádějící proud na sílu působící na kotvu je v modelu vyjádřen blokem označeným Torque motor. Kotva s pákou přenášející sílu elektromagnetu na polohu klapky (primární část) je vyjádřena blokem druhého řádu, její dynamika je tedy zřejmě nezanebatelná. Dynamiku bloku popisují přirozená frekvence  $\omega$ , relativní tlumení  $\zeta$  a zesílení  $K_f$ . Převod výchylky klapky  $X_f$  na diferenciální průtok  $\Delta Q$  odbočkami k sekundární části ventilu je lineární s konstantou  $K_2$ . Poloha šoupátka  $X_s$  vznikne integrací diferenciálního průtoku s konstantou integrace, kde  $A$  je plocha konce šoupátka – setrvačnost a tlumení šoupátka se tedy v modelu neuvažuje. Zpětnovazební pružina je popsána její tuhostí, tedy lineární konstantou převodu prodloužení na sílu, která se odečítá od síly na výstupu bloku elektromagnetu – výchylky klapky jsou velmi malé a proto lze jejich vliv na prodloužení pružiny zanedbat ([4], str.11).

Barevně jsou zvýrazněny nově přidané bloky do modelu vytvořeného v [4]. Vstupy *Ps1* a *Pr1* reprezentují vstup potrubí s napájecím, respektive vratným tlakem hydraulického média. Důležitým blokem je přepínač označený *Pressure Switch 1*. Výstupem tohoto přepínače je řídicí signál, odpovídající znaménku výchylky šoupátka servoventilu. Tento signál je dále

distribuován do bloků *PA Switch* a *PB Switch*. V těchto blocích je pak na základě zmíněného řídicího signálu rozhodnuto o tom, ve kterém z potrubí bude tlak média odpovídající tlaku napájecímu, respektive tlaku vratnému.

Jak již bylo v sekci 4.1 popsáno, směr výchylky šoupátka je určen právě tím, které potrubí přivádí napájecí tlak. Proto není nutné, aby se výchylka šoupátka šířila i se znaménkem, označujícím tento směr. Blok *Abs* vytváří absolutní hodnotu polohy šoupátka. Důležitý je blok *LVDT*, modelující přítomnost LVDT senzoru polohy šoupátka. Nově přidány byly výstupy *PA1* a *PB1* reprezentující výstupní potrubí servoventilu, výstup *LVDT S1* pak výstup senzoru polohy šoupátka servoventilu.

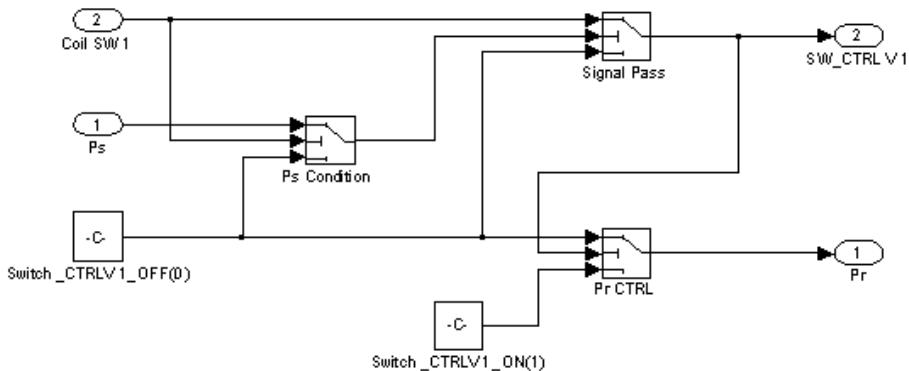


Obrázek 4.1: Struktura modelu servoventilu s vyznačením přidaných částí

#### 4.2.2 Model ovládacích ventilů

Vnitřní struktura ventilů Bypass CTRL Valve 1 a Switch CTRL Valve 1 je velmi podobná, bude proto popsána současně. Struktura přepínacího ventilu SWITCH CTRL Valve 1 je zobrazena na obrázku 4.2. Vstupem ventilu jsou signály Coil SW 1 a Ps. Signál Coil SW1 reprezentuje proud cívky Coil SW1, ovládající nastavení tohoto ventilu. Pokud je v cívce magnetický tok logické úrovně 1, ventil je v zapnutém stavu a napájecí potrubí s tlakem Ps je připojeno k výstupu. Signál Ps již není potřeba dále šířit systémem, ke správnému ovládání následujícího ventilu stačí pouze informace, že tlak je přítomný a ventil sepnutý. Pokud však na vstupní cívce Coil SW1 není dostatečný magnetický tok, výstupní řídicí signál je nulový. Odtok hydraulického média je v takovém případě symbolizován logickou hodnotou 1 na výstupu Pr (vratné potrubí). Přítomnost výstupu Pr také není pro správnou funkci

nezbytně nutná, ale s její přítomností se model více podobá reálnému systému.

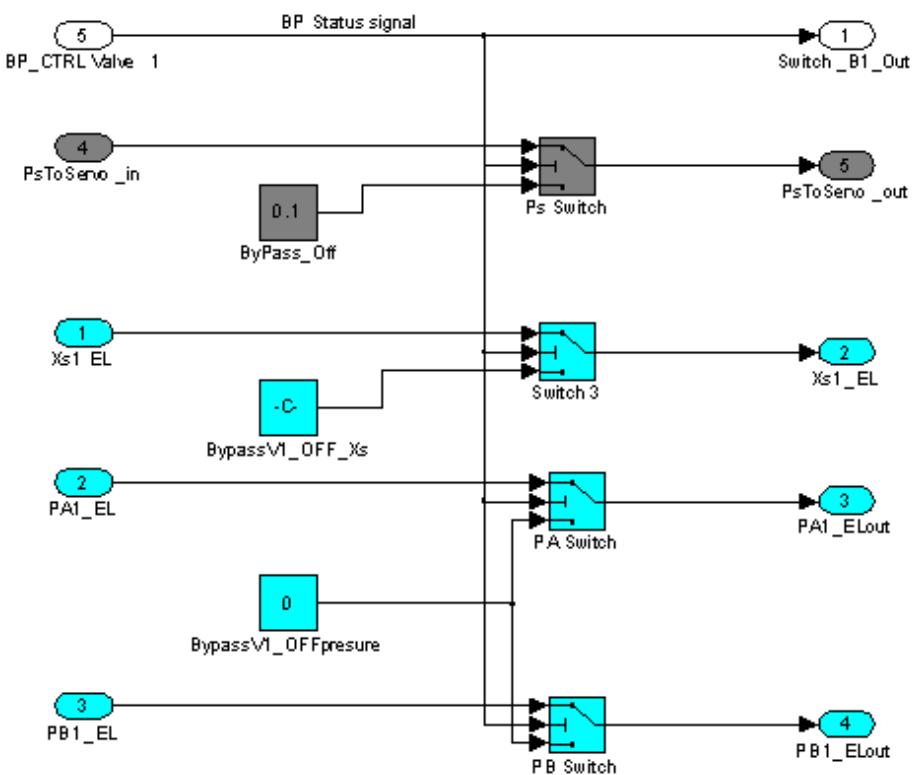


Obrázek 4.2: Struktura modelu ovládacího ventilu

#### 4.2.3 Model přemost'ovacího ventilu BYPASS VALVE

Velmi významným ventilem obvodu EHSA je přemost'ovací ventil Bypass CTRL Valve. Model tohoto ventilu je zobrazen na obrázku 4.3. Jeho funkcí je přepínání mezi aktivním a podřízeným režimem hydraulického válce. Řídicím vstupem tohoto ventilu je výstupní signál ventilu *BYPASS CTRL VALVE 1*, popsaného v sekci 4.2.2. Ventil je v sepnutém stavu, pokud je tento signál na logické úrovni 1. Ventil lze rozdělit na tři části, které jsou v obrázku barevně rozlišeny. První, nezvýrazněná část, odpovídá řídicí části ventilu. Druhá, tmavě obarvená část, zajišťuje přívod hydraulického média do servoventilu. Třetí, světle zvýrazněná část, odpovídá výstupům ventilu, směřujícím do hydraulického válce.

V sepnutém stavu ventilem prochází hydraulické médium potrubími PA a PB ze servoventilu do hydraulického válce. Dále je otevřen i přívod napájecího tlaku servoventilu. S hydraulickým válcem je spojen i signál, nesoucí informaci o poloze šoupátka servoventilu (signál Xs).



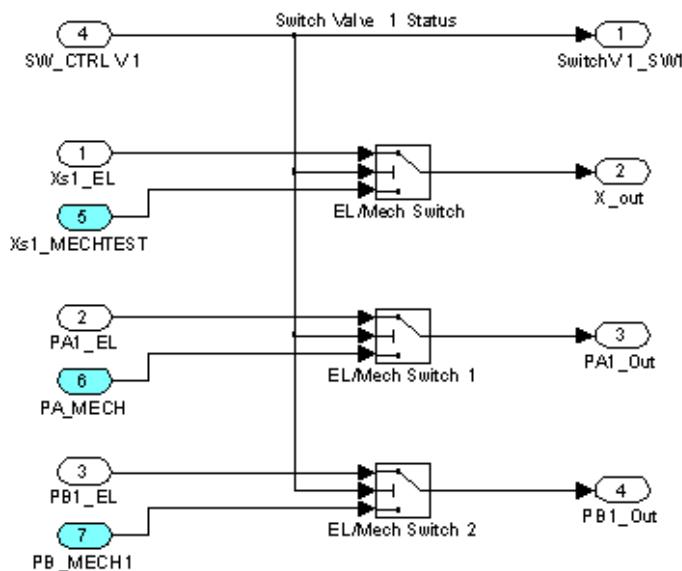
Obrázek 4.3: Model přemostovacího ventilu BYPASS VALVE

Pokud je ventil ve vypnutém stavu (vstup *BP\_CTRLVI* na logické úrovni 0), válec náležící okruhu je v podřízeném režimu. Od servoventilu je odpojeno napájecí potrubí. Tlak v potrubích PA a PB, vedoucích do hydraulického válce je nulový. Právě nulový tlak umožňuje volný pohyb pístu válce v závislosti na pohybu pístnice. Příčina této vlastnosti systému je vysvětlena v sekci 4.3, popisující model hydraulického válce. Výstupní hodnota výchylky  $X_s$  je nastavena na konstantní hodnotu, odpovídající maximálnímu vychýlení šoupátka servoventilu ( $X_s = 3.81 \cdot 10^{-4} m$ , hodnota byla získána z katalogového listu servoventilu [3]). Takovéto nastavení konstanty odpovídá minimálnímu odporu válce vůči pohybu pístnice. Výstup *Switch B1* má úlohu mikrospínače v obvodu EHSA, který informuje o stavu sepnutí ventilu *BYPASS VALVE 1*.

#### 4.2.4 Model přepínacího ventilu SWITCH VALVE

Dalším významným ventilem obvodu EHSA je přepínací ventil *SWITCH VALVE*. Jeho funkcí je přepínání mezi elektronicko-hydraulickým a mechanicko-hydraulickým ovládáním hydraulického válce. Řídicím vstupem tohoto ventilu je výstupní signál ventilu *SWITCH CTRL Valve*, popsaného v sekci 4.2.2. Ventil je v sepnutém stavu, pokud je tento signál na hodnotě

logické 1. Model ventilu je uveden na obrázku 4.4. Barevně jsou zvýrazněny vstupy odpovídající mechanickému ovládání, vstupy elektronického ovládání nejsou zvýrazněny. Výstup  $X_{out}$  reprezentuje výstup odpovídající výchylce šoupátka, at' už elektro-hydraulického, či mechanicko-hydraulického ventilu, v závislosti na hodnotě řídicího signálu. Další dva výstupy  $PA1\_Out$  a  $PB1\_Out$  reprezentují tlaky v jednotlivých přívodních potrubích hydraulického válce. Je-li ventil v sepnutém stavu, poměr tlaků odpovídá směru výchylky šoupátka elektrohydraulického servoventilu. Je-li ventil ve vypnutém stavu, poměr tlaků v potrubích, a tím i směr pohybu pístu válce je ovlivňován mechanickým řízením. Výstup  $SwitchVI\_SW1$  reprezentuje mikrospínač, informující řídicí jednotku ECU o stavu sepnutí přepínacího ventilu.

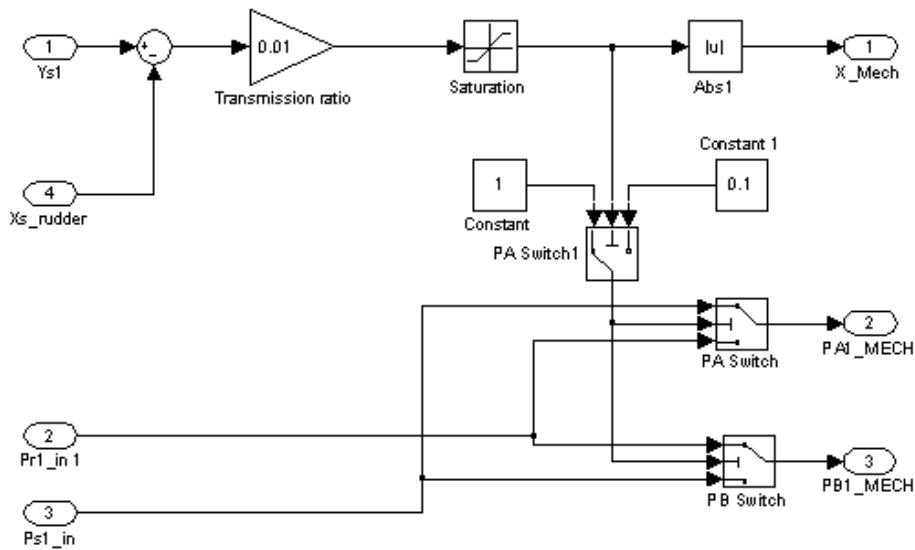


Obrázek 4.4: Model přepínacího ventilu SWITCH VALVE

#### 4.2.5 Model záložního mechanického ovládání

Jako záloha elektronického ovládání je pro případ poruchy v obvodu EHSA přítomné mechanické ovládání. Ústředním prvkem mechanického ovládání je mechanicko-hydraulický servoventil. Jeho vstupem je poloha pákového ovladače letounu, umístěného v kabině pilota. Servoventil je k mechanické spojnici připojen tak, že zároveň vytváří zpětnovazební systém. Vstupní síla, vyvájená pilotem na pákový ovladač, je přivedena na servoventil, který ovládá pomocí polohy šoupátka jak směr toku hydraulického média, tak i poměr tlaků v potrubích vedoucích do hydraulického válce. Schéma vytvořeného modelu mechanického ovládání je uvedeno na obrázku 4.5. Násobení konstantou Transmission ratio modeluje převodní poměr

zapojení mechanického ovládání.



Obrázek 4.5: Simulinkové schéma mechanického záložního ovládání

### 4.3 Model hydraulických válců a jejich společné pístnice

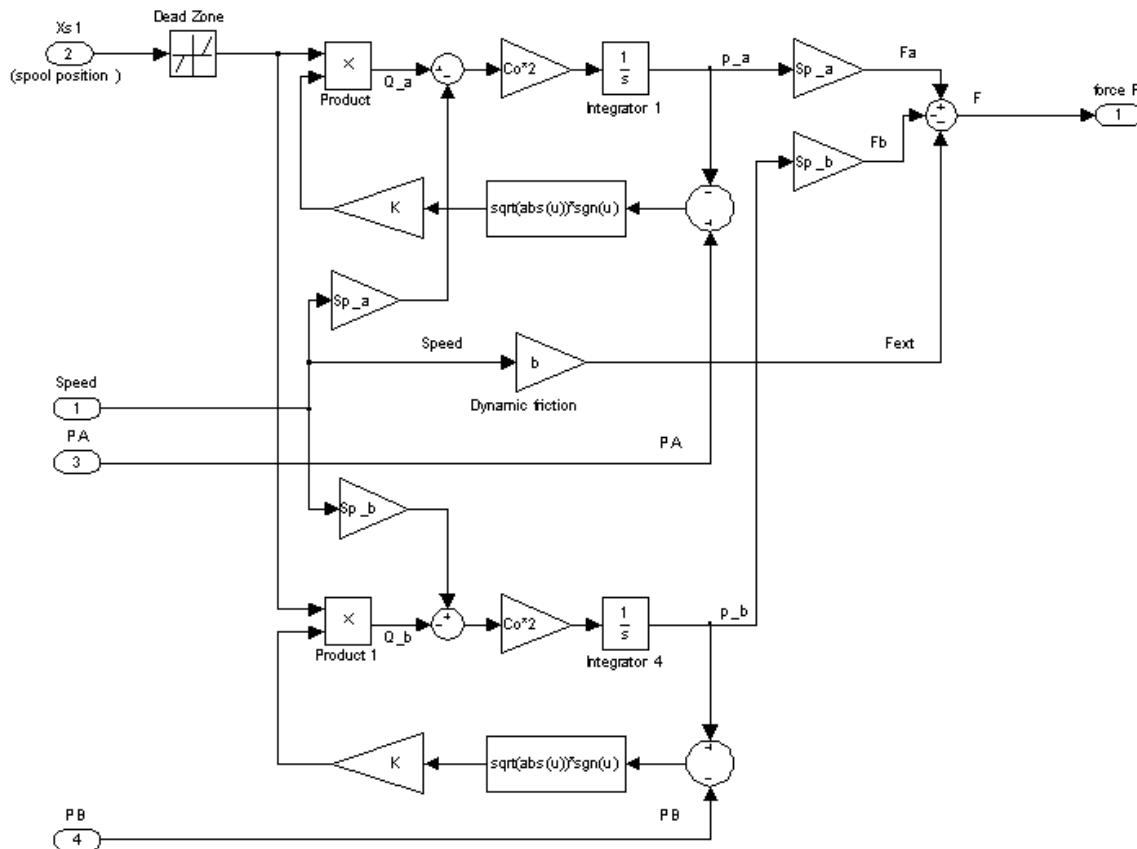
Pro přehlednost celého modelu a snazší orientaci v něm byl model hydraulického válce umístěn mimo model obvodu EHSA, popsaný v sekci 4.2. Vnitřní struktura modelu hydraulického válce byla převzata z [4]. Kromě závislosti průtoku hydraulického média na rozdílu tlaků model uvažuje i nelineární člen, modelující stlačitelnost hydraulického média a pružnost stěn potrubí. Bez uvážení těchto vlastností hydraulického válce by chování modelu neodpovídalo chování reálného systému. Dynamika pístu spojeného s pístnicí a dalšími pevně připojenými částmi je v upraveném modelu odstraněna, přidána je až ve spojené soustavě obou válců. Dynamika obou válců je stejná.

Vstupem bloku hydraulického válce je výchylka šoupátka servoventilu, označovaná  $X_s$ . V případě elektronického ovládání jde o výchylku elektrohydraulického servoventilu, v případě mechanického ovládání jde o výchylku šoupátka mechanicko-hydraulického servoventilu. Zóna mrtvého chodu reprezentuje nenulový překryv šoupátka v uzavřené poloze servovenitilu. Integrační a proporcionální bloky reprezentují dynamiku válce, popsanou v [4].

Do obvodu vstupují také potrubí vedoucí hydraulické médium. Dalším vstupem válce je ve zpětnovazební smyčce přivedena rychlosť pohybu společné pístnice válců. Koncepcie modelování obvodu EHSA popsaná v sekci 4.2 si vyžádala úpravy převzatého modelu. Hydraulické

lické médium do válce vstupuje potrubími PA a PB, směr jeho proudění byl určen již v bloku servoventilu, popsaném v sekci 4.2.1.

Výstupem modelu hydraulického válce je síla, vyvíjená válcem na píst společné pístnice hydraulických válců obou okruhů. Model hydraulického válce je zobrazen na obrázku 4.6.



Obrázek 4.6: Model hydraulického válce HYDRAULIC VALVE

### 4.3.1 Propojení redundantních okruhů obvodu EHSA

Dosud se tato kapitola zabývala pouze jediným okruhem obvodu EHSA. Oba okruhy jsou tvořeny stejnými součástmi. Jejich propojení je realizováno společnou pístnicí hydraulických válců. Pro správný chod systému je nutné zajistit plynulý pohyb společné pístnice bez rázů, které může způsobit rozdílný tlak působící na písty jednotlivých válců. Síly vyvinuté na jednotlivé písty pístnice jsou sčítány. Až na tomto místě je vzata v úvahu hmotnost pístnice, táhel a kormidla. S využitím integračních bloků a znalosti hmotnosti připojených částí je ze síly působící na pístnici získána rychlosť a následně i poloha pístnice. Poloha pístnice je, stejně jako poloha šoupátka v servoventilu v kapitole 4.2, měřena s využitím LVDT senzorů

polohy.

Oproti schématu obvodu EHSA z obrázku 3.1 jsou v modelu přidány bloky modelující linearizovanou aerodynamickou sílu působící na kormidlo. Linearizovaná aerodynamická síla je simulována pružinou o tuhosti  $k$ . Tato síla je vypočtena s využitím vzorce  $F = k \cdot x$ , kde  $x$  odpovídá výchylce kormidla. Pružině odpovídá v modelu blok označený *Spring*. Do modelu je dále vneseno i tlumení, představující tření v mechanickém systému kormidla. Toto tření představuje blok nazvaný *friction*. Funkce těchto dvou bloků je významná pro následné testování odezvy modelu. Celkové schéma spojených okruhů EHSA je zobrazeno v příloze A.2.

## 4.4 Ověření základní funkčnosti systému

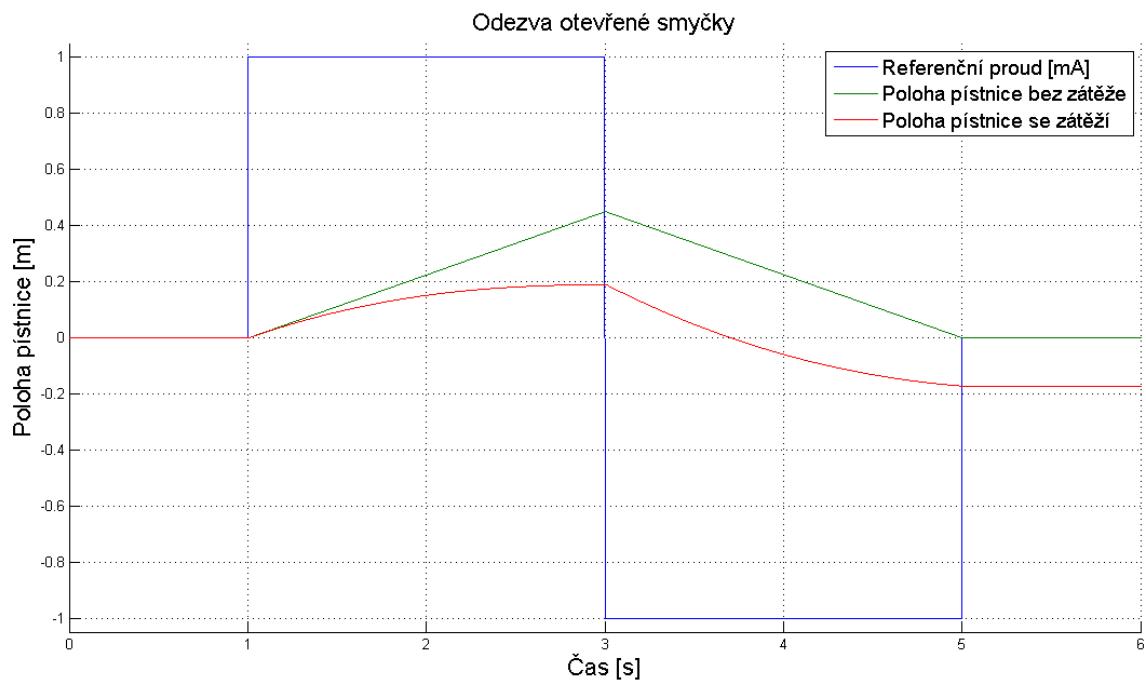
Před návrhem řídicího systému pro obvod EHSA bylo nutné ověřit funkčnost tohoto obvodu. Pro snadné testování soustavy byly vytvořeny skripty v Matlabu, inicializující nastavení soustavy. Jedná se o soubory s příponou *.m*<sup>1</sup>. Soubory jsou automaticky volány pomocí Callback funkcí<sup>2</sup> přiřazených událostem. Soubor načítající základní parametry systému je nazván *Parametry\_FIX.m*. Tento soubor je volán při otevření modelu, čímž je zajištěna inicializace parametrů. Druhý soubor, nazvaný *Settings.m*, je určen ke změně nastavení systému. Tento soubor je volán pomocí callback funkce při spuštění simulace systému, zajišťuje tedy aktualizaci nastavení při každém spuštění simulace.

V předchozích fázích projektu byly navrženy regulátory síly vyvíjené hydraulickým válcem. Tyto regulátory jsou popsány v práci [4], z této práce je patrná funkčnost základních prvků obvodu, tedy hydraulického válce a elektrohydraulického servoventilu. V této fázi je tedy potřeba ověřit zejména funkci spojené soustavy dvou okruhů obvodu EHSA. Oproti regulaci výstupní síly na pístnici válce bude v této práci navrhován řídicí systém pro řízení polohy pístnice. Proto zde budou uvedeny pouze průběhy výstupní polohy společně pístnice hydraulických válců. Základní ověření funkce soustavy dokládá obrázek 4.7. Vstupem soustavy je skokově se měnící proud vedoucí do každého ze servoventilů. Skoková změna proudu je krajním, v praxi nepříliš běžným případem. Pro ilustraci chování jde však o vhodný příklad.

<sup>1</sup>Soubory s příponou *.m* jsou soubory používající syntaxi programu Matlab, jejich spuštění je možné i z prostředí Simulink.

<sup>2</sup>Callback funkce je funkce volaná na základě výskytu definované události. V tomto případě jsou událostmi otevření souboru s modelem a spuštění simulace.

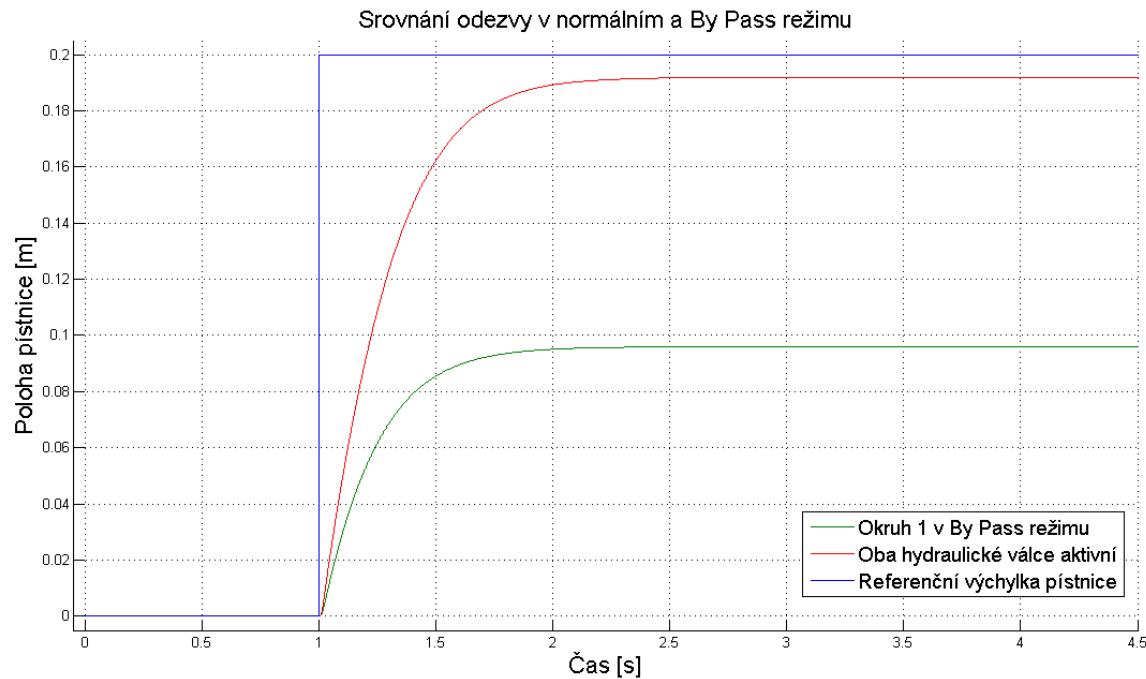
Průběh vstupního proudu simuluje nejdříve vychýlení ovládací páky letounu na jednu stranu, po uplynutí 3 s je páka vychýlena na stranu opačnou tak, aby se pístnice vrátila do původní polohy. Pro ilustraci vlivu přidané aerodynamické síly na výstup soustavy jsou uvedeny průběhy jak s touto zátěží, tak bez ní. Průběh bez zátěže ukazuje lineární růst výchylky pístnice z rovnovážné polohy. Vzhledem k tomu, že je ovládací páka v obou extrémních polohách po stejnou dobu, pístnice se vrací do původní polohy. V případě přidání aerodynamické síly je situace odlišná. Výchylka pístnice je v důsledku aerodynamické síly menší než v předchozím případě. Pístnice se po vychýlení ovládací páky nevrací do původní polohy, síla potřebná k navrácení pístnice do původní polohy je nižší než v případě nezatížené pístnice. Simulovaný aerodynamický odpor působí tak, že usnadňuje navrácení směrovky připojené k pístnici do původní polohy. Směrovka se pak vlivem působící síly vychýlí na stranu opačnou. Základní funkce obvodu byla tímto pokusem ověřena.



Obrázek 4.7: Odezva otevřené smyčky obvodu

Kromě odezvy systému ve výchozím nastavení bylo ověřeno chování i v případě mimořádných událostí. Jako příklad je uvedeno chování systému v situaci, kdy je jeden z hydraulických válců obvodu EHSA přemostěn Bypass ventilem. Přemostěný válec se chová jako tlumič připojený na pístnici. Soustava je řízena jen jedním servoventilem. Srovnání normálního režimu s oběma funkčními válci a režimu s jedním podřízeným válcem. Z obrázku 4.8

je vidět rozdíl ve výstupní výchylce pístnice.



Obrázek 4.8: Srovnání odezvy v normálním režimu a v režimu s podřízeným hydraulickým válcem

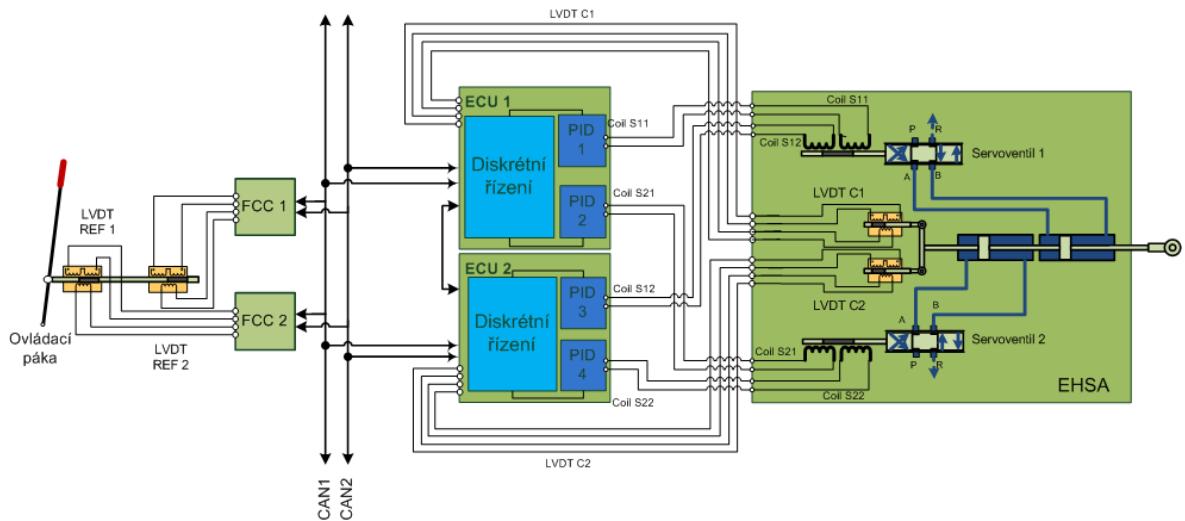
Dále byla ověřena funkčnost jednotlivých ventilů systému. Změna nastavení vstupních parametrů znamenala změnu příslušných výstupních parametrů, systém se choval dle očekávání. V této fázi byl model soustavy EHSA připraven k návrhu zpětnovazební smyčky a příslušných řídicích algoritmů.

# Kapitola 5

## Návrh řídicího systému pro obvod EHSA

### 5.1 Struktura řídicího systému

Úkolem této práce je návrh řídicích algoritmů pro obvod EHSA. Zavedením záporné zpětné vazby výstupní polohy pístnice byla vytvořena řídicí smyčka. Zjednodušené schéma zpětnovazebního zapojení je uvedeno na obrázku 5.1.



Obrázek 5.1: Zjednodušené schéma zavedení záporné polohové zpětné vazby

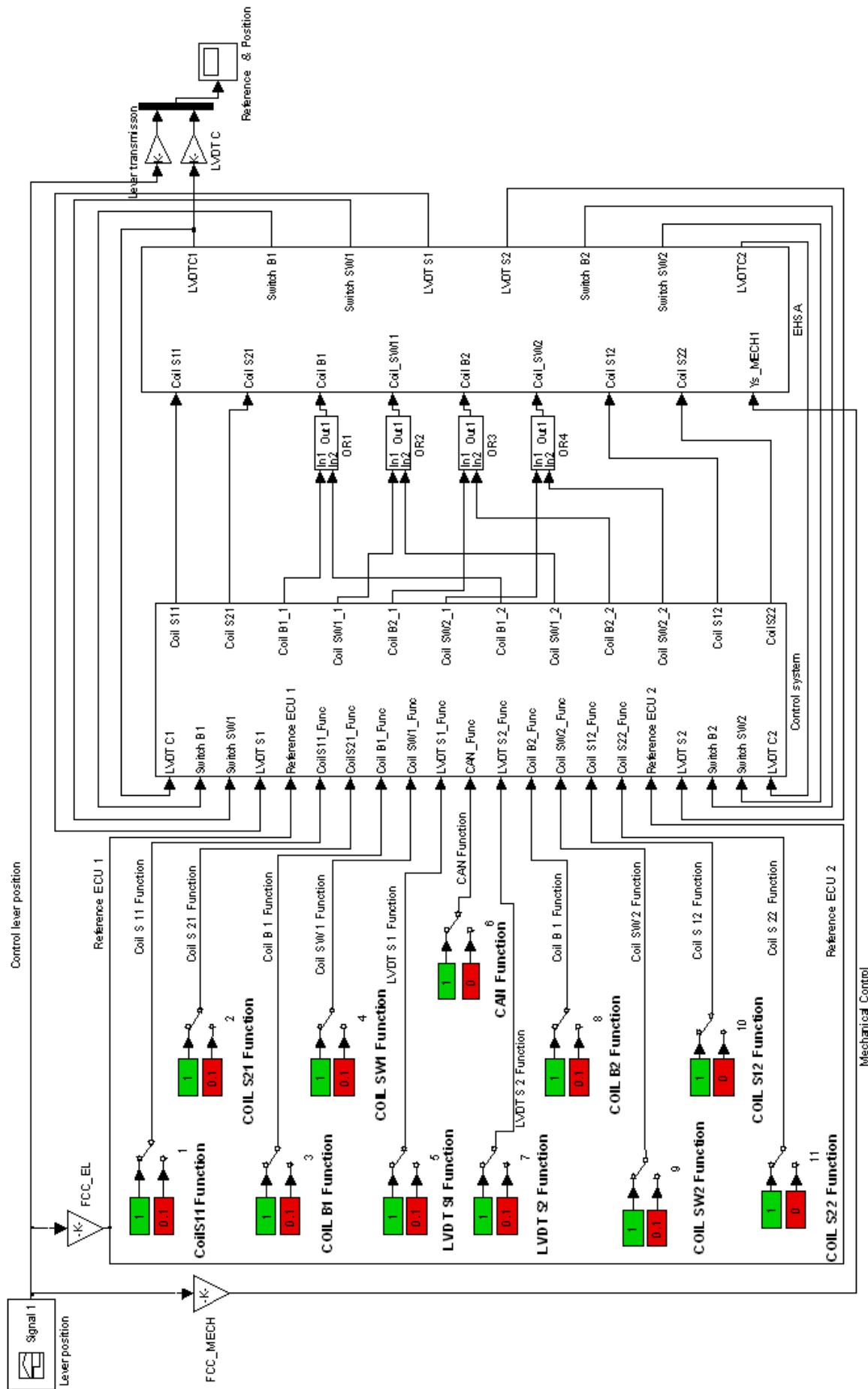
Řídicí systém je tvořen dvěma redundantními řídicími jednotkami (ECU1 a ECU2), křížově propojenými s obvodem EHSA. Vstupem řídicí smyčky elektronického ovládání obvodu EHSA je referenční poloha pístnice, přicházející z počítače řízení letu (FCC). Výstupem soustavy je poloha společné pístnice hydraulických válců, která je snímána redundantními senzory LVDT C1 respektive LVDT C2. Výstupní signály těchto senzorů jsou přivedeny do

řídicích jednotek ECU, kde je uzavřena záporná zpětná vazba. Zjednodušené schematické zobrazení řídicího systému na obrázku 5.1 naznačuje vnitřní strukturu algoritmů obou redundančních řídicích jednotek ECU. V obrázku je pro přehlednost vynecháno propojení diskrétních signálů, ovládajících nastavení obvodu EHSA. Propojení těchto signálů je detailně zobrazeno na obrázku 1.2. V bloku nazvaném Řídicí algoritmy je na základě diskrétních vstupních signálů, přicházejících z obvodu EHSA, zvolena strategie řízení. Samotné řízení polohy pístnice je realizováno čtyřmi PID regulátory, každý z nich reguluje proud jedné z cívek elektrohydraulických servoventilů. Každá z ECU jednotek vykonává funkci dvou ze čtyř implementovaných regulátorů. Soustava EHSA se může s ohledem na funkčnost jednotlivých obvodových prvků nacházet v několika stavech, které budou popsány dále v této kapitole. Na základě stavu soustavy jsou nastaveny konstanty použitých PID regulátorů.

Na obrázku 5.2 je zobrazeno Simulinkové schéma soustavy obsahující obvod EHSA a model řídicího systému. V tomto schématu je kromě polohové zpětné vazby zavedena také zpětná vazba výstupů mikrospínačů obvodu EHSA, informujících o nastavení jednotlivých ventilů obvodu EHSA. Kromě vstupního referenčního signálu a signálů přivedených zpětnou vazbou obsahuje model řídicího systému (nazvaný *Control System*) také pomocné vstupy. Tyto vstupy obsahují ve svém názvu příponu *Func*. Jejich funkcí je možnost vnášení chyb do soustavy a s tím spojená možnost testování různých konfigurací a scénářů chování obvodu. Implementace těchto vstupů byla jedním z požadavků na vlastnosti modelu řídicí soustavy. Diskrétní signály těchto vstupů informují o funkčnosti jednotlivých prvků systému (např. vstup *CoilS11\_Func* nese informaci o funkčnosti cívky označené *Coil S11*), nebo mění přepnutí hydraulických ventilů (např. signál *Coil B1\_Func* mění nastavení přemost'ovacího ventilu *BYPASS VALVE 1*). Navíc byl přidán také vstup, indikující funkčnost sběrnice CAN. Sběrnice CAN je využívána jak k vzájemné komunikaci řídicích jednotek ECU, tak ke komunikaci mezi řídicími jednotkami a počítači řízení letu (*FCC*). Pro účel snadné změny nastavení diskrétních vstupů během simulace k nim byly připojeny manuální přepínače, umožňující změnu nastavení i v průběhu simulace. Model tak splňuje požadavek na možnost vnášení náhodných chyb. Takovými chybami může být například zničení některé z ovládacích cívek, porucha některého ze senzorů polohy pístnice, či výpadek komunikace po sběrnici CAN. Pro testování pevně daných scénářů je možné manuální přepínání mezi logickými hodnotami nahradit bloky jednotkového skoku. Změnou jejich parametrů je možné ověřovat chování soustavy při přechodu mezi odlišnými stavami.

Výstupy bloku modelu řídicího systému odpovídají vstupům obvodu EHSA. Každé z řídicích jednotek ECU odpovídají výstupy kompletně ovládající obvod EHSA. Pro získání konečného řídicího signálu diskrétních vstupů obvodu EHSA jsou použity bloky označené *OR*, obsahující funkci logického součtu. Na základě signálů přicházejících od obou řídicích jednotek je v těchto blocích určena logická hodnota signálu vstupujícího do obvodu EHSA.

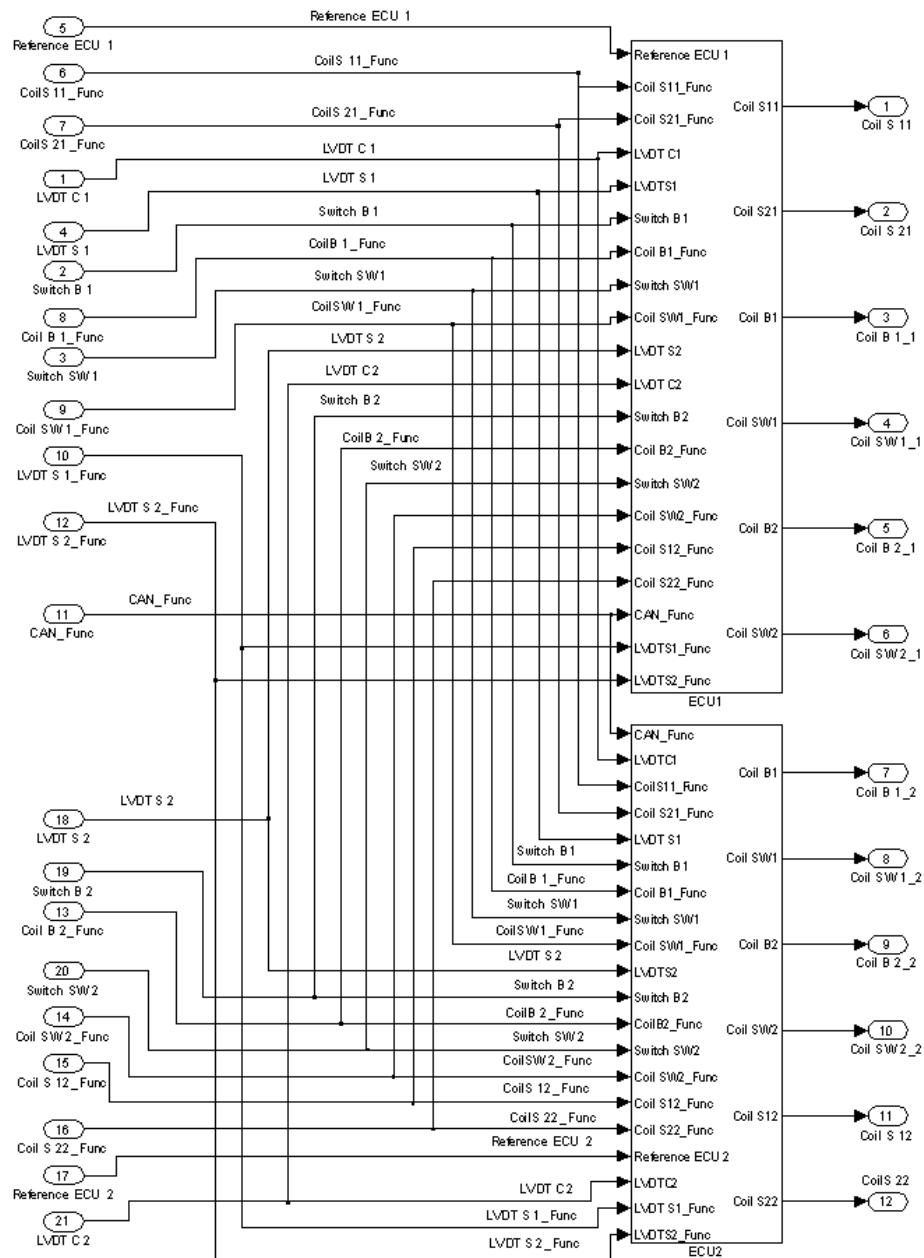
Kromě již zmíněných bloků obsahuje schéma modelu ještě bloky zesílení. Blok *FCC\_EL* nahrazuje převod referenční výchylky ovládací páky letounu, který je v reálném systému stanoven v letovém počítači *FCC*. Blok *MECH\_TRANS* nahrazuje převodní poměr pohybu ovládací páky a mechanického ovládání obvodu EHSA. Před blok zobrazující výstupní polohu pístnice jsou zapojeny převodní bloky srovnávající měřítka výstupu a referenční polohy ovládací páky.



Obrázek 5.2: Simulinkové schéma soustavy s řídicím systémem

## 5.2 Modelování řídicího systému

Vnitřní strukturu modelu řídicího systému tvoří, stejně jako v případě reálného systému, dvě redundantní řídicí jednotky (ECU). Vnitřní schéma řídicí soustavy je zobrazeno na obrázku 5.3. Uvnitř tohoto bloku je modelováno křížové propojení jednotlivých výstupů soustavy EHSA se vstupy řídicích jednotek ECU. Model neobsahuje přesné přenášení informace mezi redundantními jednotkami ECU pomocí sběrnice CAN. Pro účely tohoto modelu je dostačující informace o funkčnosti této komunikace, která je v modelu určena vstupem *CAN\_Func*. V reálném systému získává řídicí jednotka informace pouze o stavu některých komponent obvodu, ostatní informace potřebné k řízení soustavy získává právě po sběrnici CAN od druhé řídicí jednotky. V Simulinkovém modelu řídicí jednotky jsou jejím vstupem všechny signály potřebné k řízení obvodu EHSA, při výpadku sběrnice CAN je však ve stavovém regulátoru, popsaném v sekci 5.3, modelován výpadek informace přenášené po sběrnici.



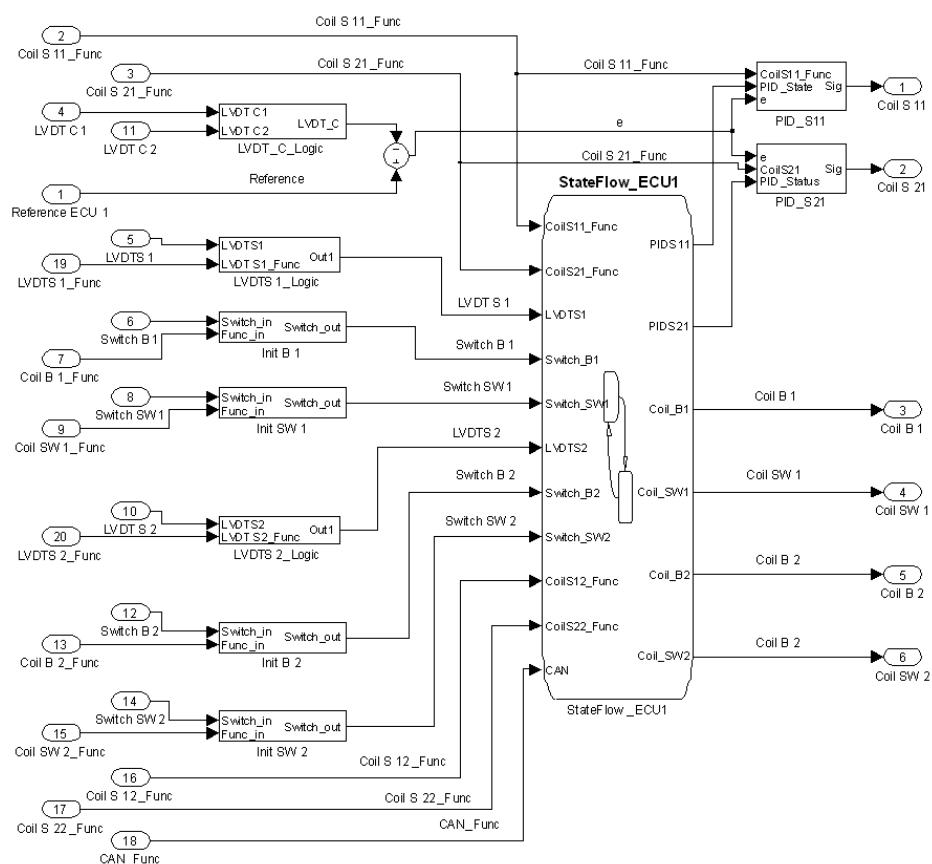
Obrázek 5.3: Model řídicí soustavy systému

### 5.2.1 Struktura modelu řídicí jednotky

Vnitřní struktura modelů obou redundantních řídicích jednotek ECU je shodná, na tomto místě proto bude představena pouze jedna z nich, druhá jednotka obsahuje bloky se stejnou funkčností, odlišné jsou jen názvy některých bloků. Pro sjednocení notace bude v této kapitole používán symbol # pro označení čísla řídicí jednotky ECU, a symbol \$ pro označení čísla okruhu obvodu EHSA.

Strukturu modelu řídicí jednotky zachycuje obrázek 5.4. Ústředním blokem modelu řídicí

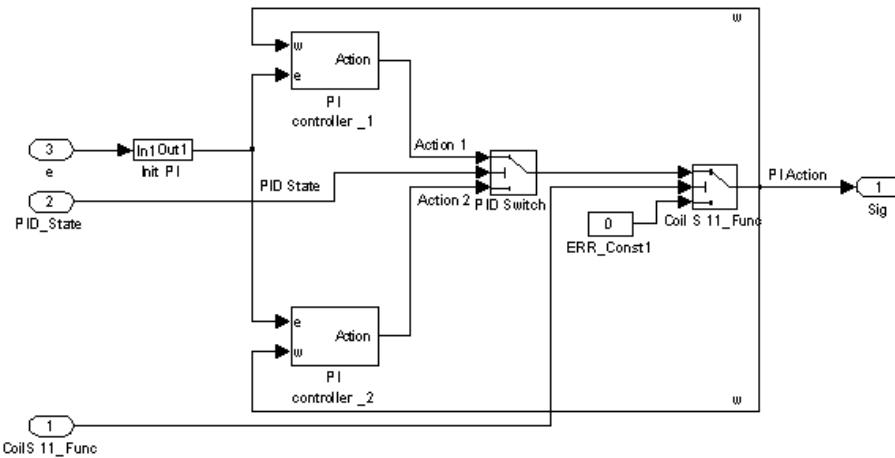
jednotky je blok nazvaný *StateFlow\_ECU1*, který obsahuje stavový automat, řídící nastavení jednotlivých ventilů obvodu EHSA a nastavení PID regulačních bloků. Strukturou stavového automatu se zabývá sekce 5.3. V bloku *StateFlow\_ECU1* je na základě vstupních signálů rozhodnuto o stavu, ve kterém se systém nachází, na základě tohoto stavu je zvolena strategie řízení soustavy. V modelu řídící jednotky jsou dále implementovány dva regulační bloky označené *PID\_S11*, respektive *PID\_S21*, inicializační bloky vstupních signálů označované *Init* (např. blok *Init\_B1* a *Init\_SW1*) a bloky obsahující algoritmy rozhodující o funkčnosti součástí soustavy EHSA (např. blok *LVDT\_C\_Logic* a *LVDTS1\_Logic*). Funkce těchto bloků jsou vysvětleny dále v této kapitole.



Obrázek 5.4: Schéma modelu řídicí jednotky ECU

### 5.2.2 Regulátory proudů cívek servoventilu

V každé řídící jednotce jsou implementovány dva bloky PI řízení, každý z nich reguluje proud v jedné z cívek přívodního vedení elektrohydraulických ventilů obvodu EHSA. Řídící jednotka je s obvodem EHSA propojena křížově, jeden z regulátorů tedy řídí proud v cívce náležící prvnímu okruhu obvodu EHSA (v případě *ECU1* jde o proud cívkou *Coil*

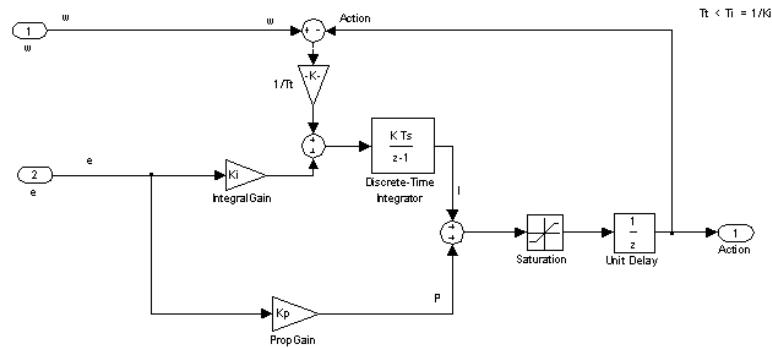


Obrázek 5.5: Blok regulace proudu cívkou Coil S11

*S11*), druhý regulátor pak řídí proud cívku okruhu druhého (v případě *ECU1* jde o proud cívku *Coil S21*). Jedním z požadavků na řídicí systém je jeho schopnost kvalitní regulace výstupní polohy pístnice hydraulických válců i při poruše až tří cívek elektrohydraulických ventilů. Řízení celé soustavy proudem jedné cívky vyžaduje odlišné nastavení regulátorů, než řízení ve stavu bez poruchy. Implementován byl proto regulační blok, obsahující dva PI regulátory. Mezi těmito regulátory je přepínáno na základě signálu *PID\_State*, generovaného stavovým automatem *StateFlow\_ECU1*. Vnitřní strukturu modelu regulačního bloku proudu cívky *Coil S11* zobrazuje obrázek 5.5. Možnost přepínání mezi dvěma PI regulátory si vyžádala implementaci PI regulátorů se sledováním<sup>1</sup>. Implementace regulátoru se sledováním eliminuje skok akčního zásahu v případě přepojení z jednoho regulátoru na druhý. Model regulačního bloku proudu cívky *Coil S11* je uveden na obrázku 5.5.

Kromě dvou PI regulátorů se sledováním obsahuje tento blok i inicializační blok *Init PI*. Inicializace je nutná vzhledem ke zpoždění hydraulických obvodů v systému. Regulace je sepnuta až po vypršení této inicializační doby, nutné k uvedení obvodu EHSA do chodu. Vstup *PID\_State* reprezentuje signál generovaný stavovým automatem. Tento signál ovlivňuje výběr aktivního PI regulátoru. Třetím vstupem bloku je vstup *CoilS11\_Func*, nesoucí informaci o funkčnosti cívky *Coil S11*. V případě její poruchy je výstupem regulátoru nulový akční zásah. Do PI regulátorů je přivedena zpětná vazba výstupního akčního zásahu, umožňující sledování výstupního proudu i odpojenému regulátoru. Signál umožňující sledování výstupu je označen *w*.

<sup>1</sup>PI regulátor se sledováním obsahuje zpětnou vazbu z výstupu regulačního bloku, umožňující sledování výstupního signálu regulátorem, který je v pasivním režimu [16].



Obrázek 5.6: PI regulátor se sledováním

Vnitřní struktura PI regulátorů se sledováním výstupního signálu je zobrazena na obrázku 5.6. Proporcionální blok je charakterizován konstantou  $K_p$ , v případě integrátoru pak jde o diskrétní integrátor integrující podle obdélníkového pravidla bez zpoždění<sup>2</sup>. Do větve obsahující integrační část je přivedena zpětná vazba výstupu regulátoru a akčního zásahu bloku regulátorů, implementovaná dle [16]. Součástí zpětnovazební smyčky regulátoru je i blok saturace, který spolu se sledovací smyčkou zajišťuje funkci antiwindupu<sup>3</sup>. Nastavením konstant regulátorů se zabývá kapitola 6.

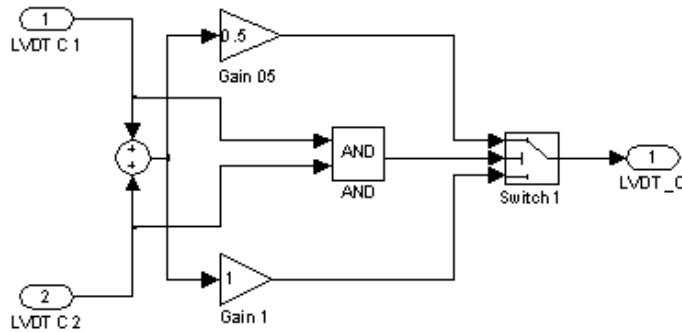
### 5.2.3 Další součásti modelu řídicí jednotky

Jak již bylo v úvodu této sekce zmíněno, model řídicí jednotky obsahuje i další pomocné bloky. Každému ze vstupních diskrétních signálů náleží inicializační blok označený *Init*. Tyto bloky plní úlohu inicializace signálů na počátku simulace. Pro správné nastavení obvodu je třeba krátkým signálem logické úrovně 1 nastavit výchozí stav stavového automatu StateFlow\_ECU1. Úkolem inicializačních bloků je i eliminace počátečního zpoždění nastavení ventilů obvodu EHSA, které bylo do modelu obvodu EHSA pro účely testování přidáno. Vstupem inicializačních bloků je i signál nesoucí informaci o funkčnosti příslušných komponent. Tento vstup je označen *Func*, ovládán je přepínači popsanými v části 5.1. Při logické úrovni 0 tohoto signálu je do obvodu vnesena porucha, výstupem inicializačního bloku je pak signál logické úrovně 0.

Důležitým blokem řídicí jednotky je blok označený *LVDT\_C\_Logic*. V tomto bloku je implementován algoritmus stanovení výchylky pístnice hydraulických válců na základě vý-

<sup>2</sup>Obdélníkové pravidlo integrace bez zpoždění je definováno vztahem  $y(k) = y(k-1) + K_I \cdot T_s \cdot u(k)$  [19].

<sup>3</sup>Antiwindup je mechanizmus zamezuječí nadměrnému narůstání integrační složky výstupu regulátoru, které by snižovalo kvalitu regulace.



Obrázek 5.7: Schéma bloku LVDT\_C\_Logic

stupních signálů dvou polohových senzorů *LVDT C1* a *LVDT C2*. Polohové senzory jsou umístěny na společné pístnici, jejich výstupní hodnota však může být v závislosti na přítomném šumu a počáteční kalibraci odlišná. Blok *LVDT\_C.Logic* pak rozhoduje o reálné poloze pístnice, která je po uzavření zpětné vazby odečítána od polohy referenční. V modelu byl implementován algoritmus vytvářející aritmetický průměr obou vstupních signálů bloku. Schéma bloku je uvedeno na obrázku 5.7. Pomocí logického součinu, reprezentovaného blokem AND je rozhodnuto o funkčnosti senzorů. Pokud jsou oba senzory funkční, je vytvořen aritmetický průměr jejich hodnot. Pokud je jeden ze senzorů nefunkční, výstupem je hodnota funkčního senzoru.

Posledním významným blokem modelu řídicí jednotky je blok označený *LVDT\$\_Logic*. Úkolem tohoto bloku je kromě inicializace vstupu stavového automatu, odpovídajícího správné funkčnosti elektrohydraulického servoventilu, také stanovení funkčnosti servoventilu. Vstupní signál bloku Označený *LVDT\$#* je výstupem LVDT senzoru polohy šoupátka servoventilu. Blok na základě polohy šoupátka a znalosti vstupních proudů odpovídajících příslušnému servoventilu určuje funkčnost tohoto ventilu. Stanovení funkčnosti servoventilu v této fázi vytváření modelu nebylo implementováno, řešení tohoto problému vyžaduje implementaci složitých algoritmů. Jedním z řešení by mohlo být například využití Kalmanova filtru.<sup>4</sup>.

### 5.3 Stavové řízení obvodu EHSA

Pro řízení nastavení ventilů obvodu EHSA a konfiguraci PI regulátorů proudu cívek ovládajících servoventily bylo zvoleno řízení s využitím stavového automatu. V prostředí Simulink je

<sup>4</sup>Kalmanův filtr je rekurzivní filtr, pomocí něhož lze z naměřených hodnot obsahujících šum stanovit hodnotu nezašuměného signálu.

pro tyto účely určen blok StateFlow Chart. Uvnitř tohoto bloku je možné definovat stavы, ve kterých se soustava může nacházet. Přechod mezi stavы je vyvolán splněním podmínky definovaného přechodu, či výskytem definovaných událostí. Pro účely ovládání obvodu EHSA byl implementován stavový regulátor, v modelu označený jako *StateFlow\_ECU#*. Vstupní a výstupní signály tohoto bloku jsou zobrazeny v obrázku 5.4. Kromě signálů, reprezentujících funkčnost vstupních cívek obvodu EHSA a signálů odpovídajících stavu mikrospínačů obvodu EHSA je přidán i vstup *CAN\_Func*, nesoucí informaci o funkčnosti komunikace po sběrnici CAN. Výstupem obvodu jsou kromě diskrétních signálů, které ovlivňují nastavení ventilů EHSA, i signály, reprezentující požadavek nastavení PID regulátorů. Tyto signály jsou označeny *PIDS\$#*, označení odpovídá názvu cívky, jejíž proud daný regulátor ovládá.

Uvnitř jednotlivých stavů regulátoru jsou měněny logické hodnoty výstupních konstant. Nastavení těchto konstant ovlivňuje chování obvodu EHSA v různých situacích. Pojmenování konstant je stejné jako v kapitole 4, zabývající se tvorbou modelu obvodu. Logická úroveň 1 na výstupu *PIDS\$#* odpovídá výběru PID regulátoru, nastaveného pro funkčnost v režimu bez poruchy některé z cívek servoventilu. Logická úroveň 0 tohoto signálu pak odpovídá nastavení, kdy je servoventil ovládán pouze proudem jediné cívky.

Vnitřní struktura Stavového regulátoru *StateFlow\_ECU#* je znázorněna na obrázku 5.3. Rozlišit lze dva základní stavы systému. Stav *MECH\_CTRL* odpovídá záložnímu mechanickému ovládání. V rámci tohoto stavu existuje jediné nastavení výstupních signálů obvodu, řízení polohy pístnice je plně přenecháno mechanickému ovládání. Všechny výstupní signály stavového automatu jsou nastaveny na hodnotu logické nuly.

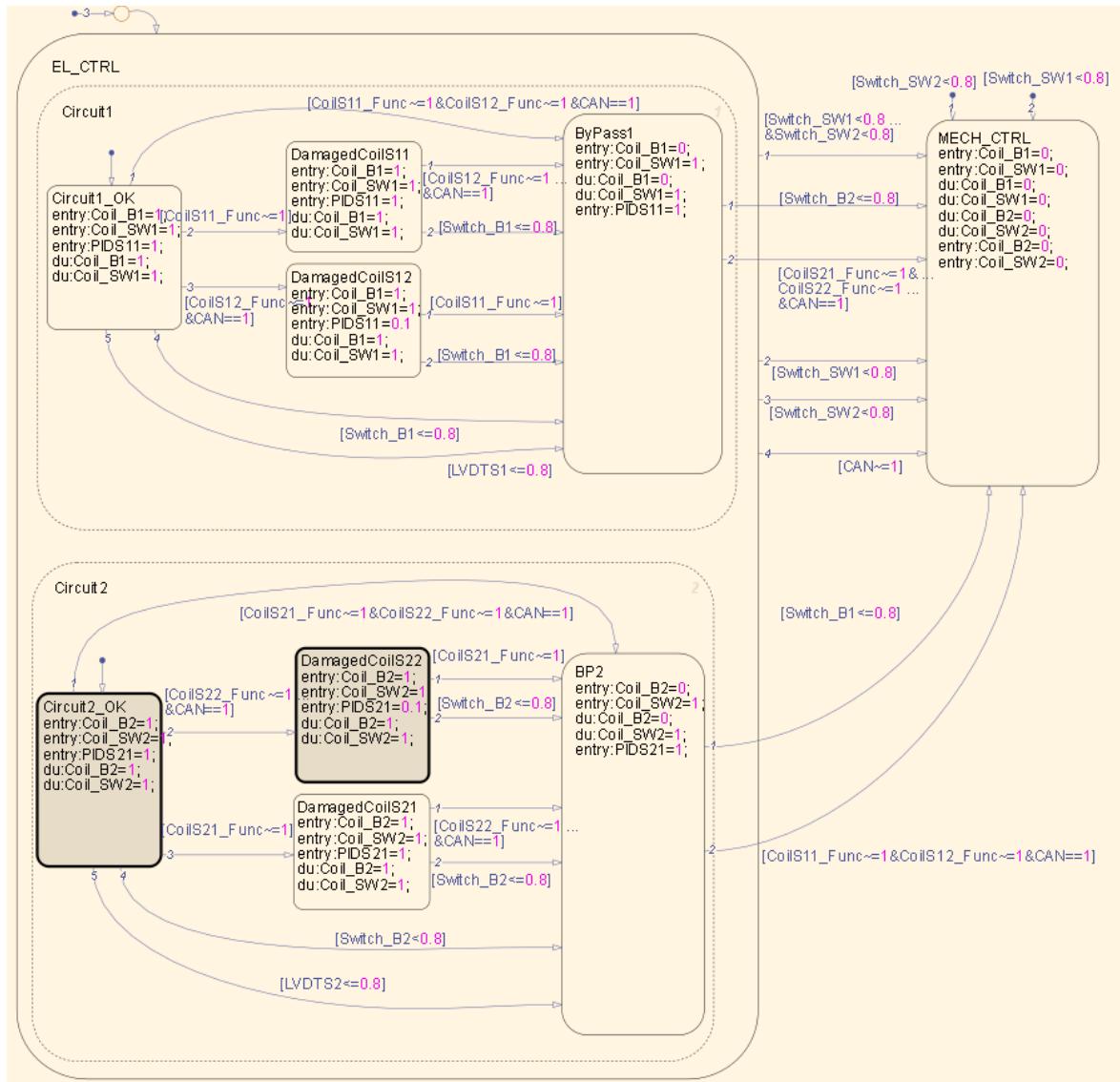
Druhým základním stavem je stav označený *EL\_CTRL*. Jde o nadstav, ve kterém je obvod ovládán elektronicky. Uvnitř tohoto nadstavu jsou dva paralelní stavы, odpovídající ovládání jednotlivých okruhů obvodu EHSA. Tyto paralelní stavы jsou označeny *Circuit\$*. Uvnitř každého z nich se pak nacházejí stavы, ve kterých se obvod může nacházet během elektronického ovládání. Stav *Circuit\$\_OK* odpovídá bezporuchovému stavu okruhu, výstupní signály jsou nastaveny na úroveň logické 1.

Další dva stavы, nazvané *DamagedCoilS\$#*, odpovídají výpadku funkce jedné z cívek, která ovládá elektrohydraulický servoventil. Do těchto stavů obvod přechází na základě vstupních signálů *CoilS\$#\_Func*. Uvnitř těchto stavů je při výpadku funkce příslušné cívky změněna konstanta regulátoru náležícího servoventilu, jehož jedna cívka je porouchána. Změna konstanty regulátoru je však možná jen v bloku PI regulace, který je součástí příslušné řídicí

jednotky ECU. V obrázku 5.3 je zobrazen *StateFlow\_ECU1*, proto jsou ve stavovém automatu měněny konstanty pouze u regulátorů *PIDS11* a *PIDS21*, náležících ECU jednotce 1. Při výpadku funkce některé z cívek není nutné přepínat do mechanického režimu, či přepnout některý z hydraulických válců do podřízeného režimu. Výstupy přepínající ventily obvodu EDSA proto zůstávají na logické hodnotě 1. Pokud jsou však v systému zničeny dvě cívky náležící jednomu servoventilu, je nutné příslušný okruh EDSA přemostit. V přemost'ovacím režimu se nachází obvod, pokud se nalézá ve stavu *ByPass\$*. Do tohoto stavu se obvod dostává i v případě hodnoty log 0 signálu *Switch\_B1*, či v případě výpadku funkce senzoru polohy šoupátka servoventilu, indikované signálem *LVDTSS\$*. V tomto stavu je na výstupu *Coil\_B1* logická hodnota 0, příslušný okruh je přemostěn.

Do mechanického režimu je systém přepnut, kdykoliv je jeden ze signálů *Switch\_SW\$* na hodnotě logické nuly. Do mechanického ovládání je nutné přejít i v případě, že není funkční ani jedna z cívek ovládajících servoventil, nebo v situaci, kdy by oba hydraulické válce měly být přepnuty do přemost'ovacího režimu. Výpadek komunikace po sběrnici CAN, indikovaný logickou nulou signálu *CAN*, znamená taktéž přechod do záložního mechanického ovládání.

Z bezpečnostních důvodů nebyly zavedené zpětné přechody mezi jednotlivými stavami. Pokud je tedy cívka označena jako nefunkční, nemůže být již dále používána. Tím je zabráněno používání cívky, která má poničený kontakt a funguje jen nespolehlivě.



Obrázek 5.8: Schéma stavového automatu StateFlow\_ECU1

# Kapitola 6

## Ověření chování modelu a řídicích algoritmů

Dalším úkolem této práce bylo ověření funkčnosti vytvořeného modelu soustavy a implementovaných řídicích algoritmů. V první fázi testování byly nastaveny dosud chybějící parametry soustavy. Mezi ně patří především vzorkovací frekvence diskrétních PI regulátorů a stavového automatu. Dále pak konstanty PI regulátorů pro oba implementované režimy funkce. Perioda vzorkování diskrétních PI regulátorů byla převzata z předchozí fáze projektu, kde byla zvolena hodnota  $T_s = 0.0001\text{s}$ . Perioda vzorkování stavového regulátoru pak byla nastavena na hodnotu  $T_{ss} = 0.01\text{s}$ . Z možných způsobů návrhu regulátoru připadaly v úvahu například metody empirické, pro stanovení konstant implementovaných regulátorů byly použity metody cyklické optimalizace konstant.

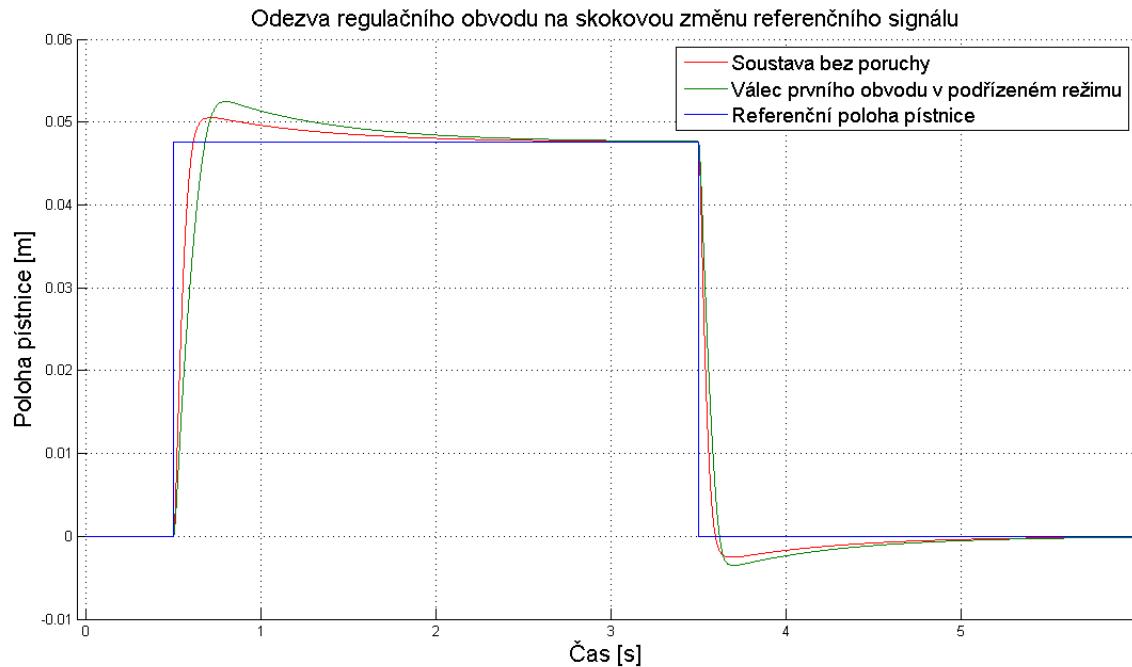
### 6.1 Nastavení parametrů regulátorů a ověření chování s modelem

Vzhledem ke koncepcí regulačních bloků, obsahujících PI regulátory, bylo nutné stanovit konstanty pro dvě nastavení regulátorů. První nastavení odpovídá situaci, kdy je elektrohydraulický servoventil řízen proudem dvou cívek, druhé pak odpovídá situaci, kdy servoventil řídí proud jediné cívky. Pro návrh parametrů regulátorů i pro následné testování je v modelu simulováno zatížení pístnice pružinou o dané tuhosti  $k$ , modelující linearizovanou aerodynamickou sílu působící na směrovku letounu. Dále je přidáno absolutní tlumení, modelující

tření v mechanickém systému kormidla. Pro nastavení regulátorů byl zvolen skokový vstupní signál, reprezentující nejhorší možný vstup. V reálné soustavě takto strmý vstupní signál nepřichází. Poloha ovládací páky nemůže být měněna nekonečně rychle, v hydraulickém systému však mohou vznikat prudké změny sil, proto je nastavení regulátorů pro nejhorší možný případ vhodné.

Na soustavu s regulátorem byly požadavky na co možná nejrychlejší odezvu výstupní polohy pístnice při změně polohy ovládací páky. Zároveň však soustava nesmí vykazovat příliš velký překmit. V případě testování odezvy na skokovou změnu referenčního signálu se však dalo očekávat, že při praktickém provozu soustavy bez skokových změn referenčního signálu budou překmity odezvy podstatně nižší.

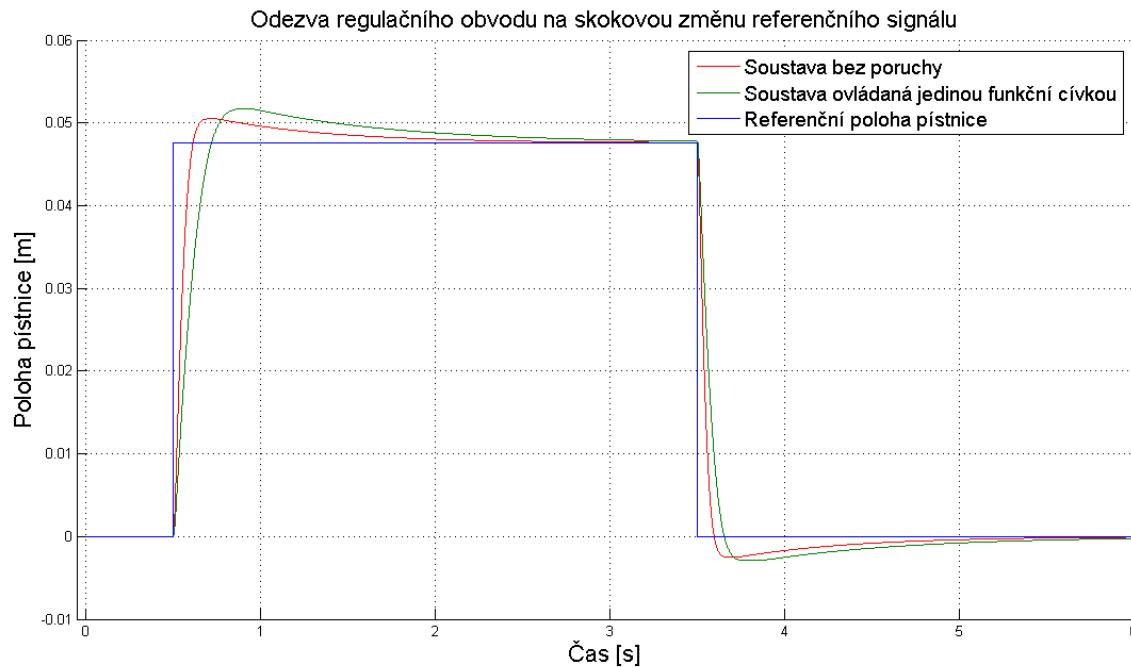
V první fázi byly nastaveny parametry regulátorů, ovládajících systém v režimu bez poruchy některé z cívek. Při stanovování parametrů regulátorů byla nejprve zvyšována proporcionální konstanta tak, aby systém vykazoval co nejrychlejší odezvu na vstupní skok. Dále byla postupně zvyšována konstanta integrační. Nejlepší odezvy bylo dosaženo při nastavení proporcionální konstanty na hodnotu  $K_p = 0.7$  a při nastavení integrační konstanty na hodnotu  $K_I = 1$ . Odezva regulačního obvodu na skokovou změnu referenčního signálu je zobrazena červeně na obrázku 6.1. Referenční signál odpovídá vychýlení ovládací páky o 0.15m, což je polovina možné maximální výchylky, která činí 0.3m. Přechodová charakteristika má 6.1% překmit, doba ustálení je  $T_{s2\%} = 1$  s. Vzhledem k tomu, že jde o extrémní případ, který při reálném provozu nenastane, jde o odezvu velmi dobrou. Během cyklické optimalizace konstant byly stanoveny i konstanty regulátorů, se kterými je doba ustálení obvodu menší než 0.7 s. Rychlejší regulace však bylo dosaženo za cenu vyšších překmitů odezvy. V aplikacích pro letecký průmysl patří překmit vzhledem k možnému vzniku oscilací k velmi nevítanému jevu, proto bylo zvoleno nastavení regulátorů s pomalejší odezvou.



Obrázek 6.1: Odezva regulačního obvodu na skokovou změnu reference.

Kromě odezvy v bezporuchovém režimu musejí být regulátory ve stejném nastavení schopny regulovat obvod v případě, že je jeden z obvodů okruhu EHSA v přemost'ovacím režimu. Hydraulický válec náležící přemostěnému obvodu pracuje v podřízeném režimu, píst tohoto válce se pohybuje pouze v závislosti na pohybu pístu válce druhého. Podřízený válec však působí jako tlumič, což se projeví i v odezvě na skokovou změnu referenčního signálu. Odezva obvodu s jedním válcem v podřízeném režimu je zobrazena zeleně v obrázku 6.1. Tlumení podřízeného válce je z průběhu jasně patrné. Delší doba ustálení  $T_{s2\%} = 1.45\text{s}$  je doprovázena i větším překmitem odezvy, který dosahuje 10.2%.

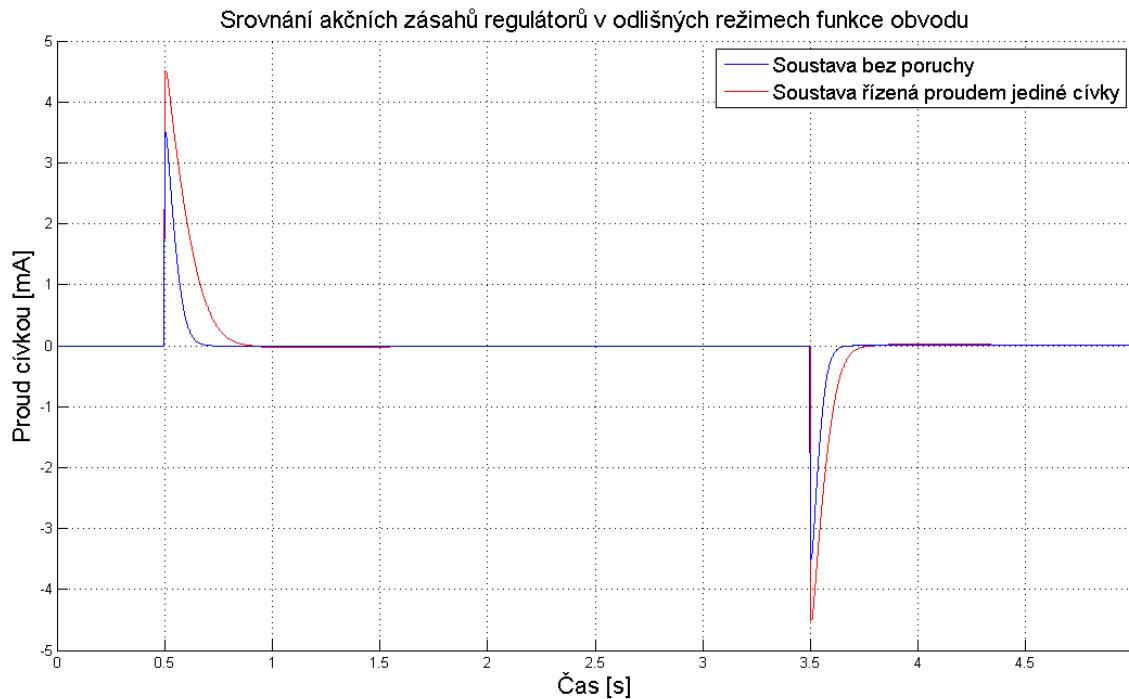
Dále bylo nutné nastavit konstanty regulátorů pro případ, kdy je servoventil ovládán pouze proudem jedné z cívek. Použita byla opět metoda cyklické optimalizace konstant. Nejlepší odezvy bylo dosaženo s nastavením proporcionalní konstanty  $K_p = 0.9$  a integrační konstanty  $K_I = 1$ . Odezva regulačního obvodu, ovládaného proudem jediné funkční cívky, je zobrazena na obrázku 6.2. Pro srovnání byl vložen i průběh polohy pístnice v bezporuchovém stavu soustavy.



Obrázek 6.2: Odezva regulačního obvodu s jedinou funkční cívkou na skokovou změnu reference

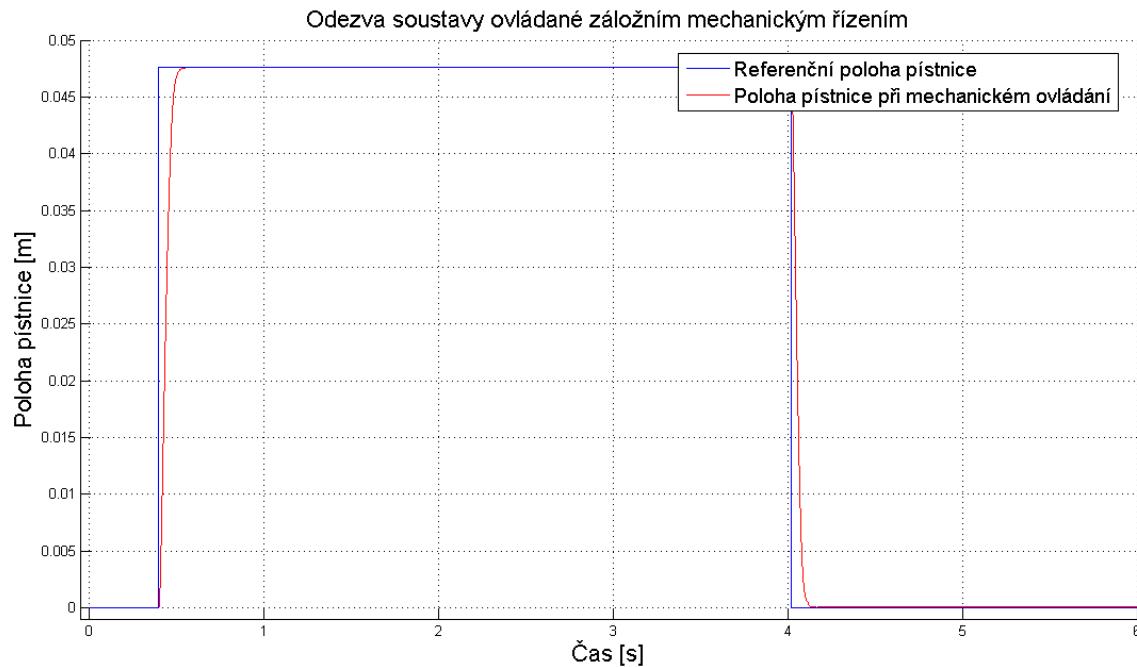
Z průběhů na obrázku 6.2 je patrné, že odezva systému na jednotkový skok je pomalejší než v bezporuchovém režimu, obvod však stále reaguje dostatečně rychle a s překmitem 8.6%. Doba ustálení je  $T_{s2\%} = 1.6$  s

Zajímavé je v tomto případě i srovnání akčních zásahů regulátorů. Obrázek 6.3 zobrazuje srovnání akčních zásahů v režimu bez poruchy, a v režimu, kdy je celý obvod řízen proudem jediné cívky. Jak je z průběhů patrné, v případě ovládání proudem jediné cívky je akční zásah regulátoru této cívky vyšší a delší než v bezporuchovém stavu. Oba zásahy leží v povoleném pásmu, maximální vstupní proud cívky servoventilu je  $I_{max} = 10mA$ .



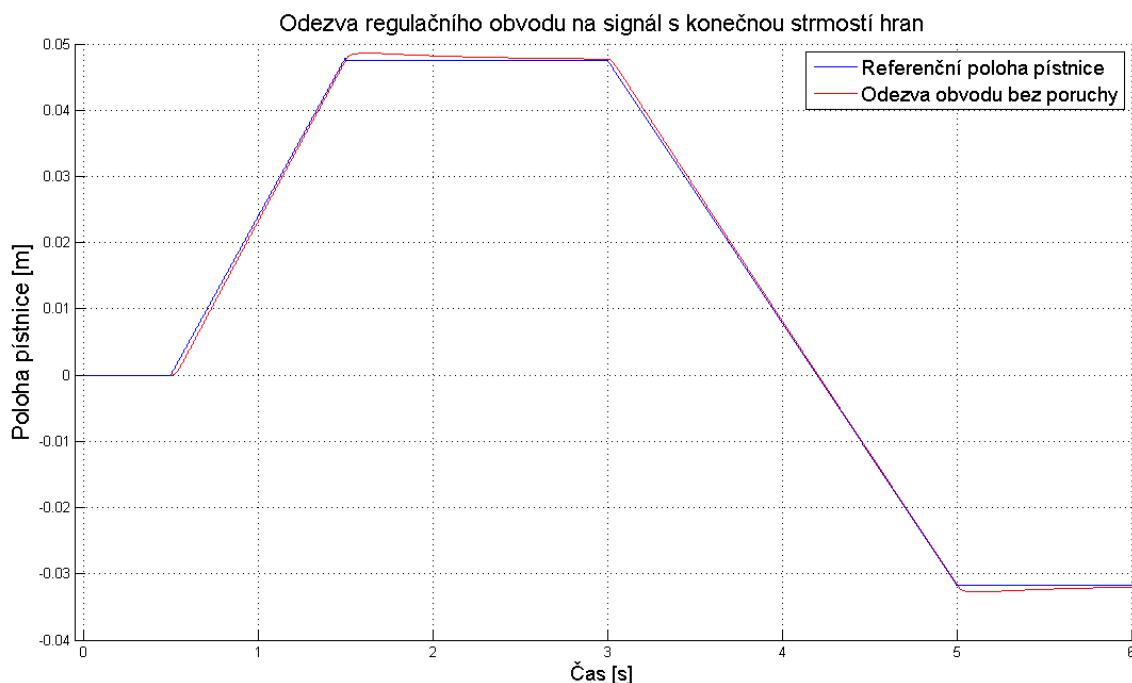
Obrázek 6.3: Srovnání akčních zásahů regulátorů v bezporuchovém stavu a ve stavu, kdy obvod ovládá jedený z regulátorů.

Ačkoliv se tato práce zabývá elektronickou částí řízení obvodu EHSA, součástí modelu tohoto obvodu je i část modelující chování mechanického záložního ovládání soustavy. Tato část byla do modelu přidána vzhledem k potřebě testování přechodu mezi elektronickým a mechanickým ovládáním obvodu. Funkčnost tohoto ovládání byla během testování modelu také ověřena, odezva soustavy na skokovou změnu reference v režimu mechanického ovládání je zobrazena na obrázku 6.4. Jak je z obrázku vidět, odezva soustavy v mechanickém režimu je velmi uspokojivá, v případě skokové změny referenčního signálu bylo dosaženo nulové ustálené odchylky a velmi krátké doby ustálení  $T_{S2\%} = 0.12$  s.



Obrázek 6.4: Odezva soustavy ovládané mechanickým záložním řízením

Z pohledu ověření funkce navržených regulátorů je zajímavé ověřit schopnost výstupní polohy pístnice sledovat referenční signál s konečnou strmostí hran. Výsledky simulace jsou zobrazeny na obrázku 6.5. Z odezvy je patrné, že je obvod schopný sledovat signál s konečnou strmostí vzestupných i sestupných hran s dosažením nulové regulační odchylky.



Obrázek 6.5: Odezva soustavy na referenční signál s konečnou strmostí hran

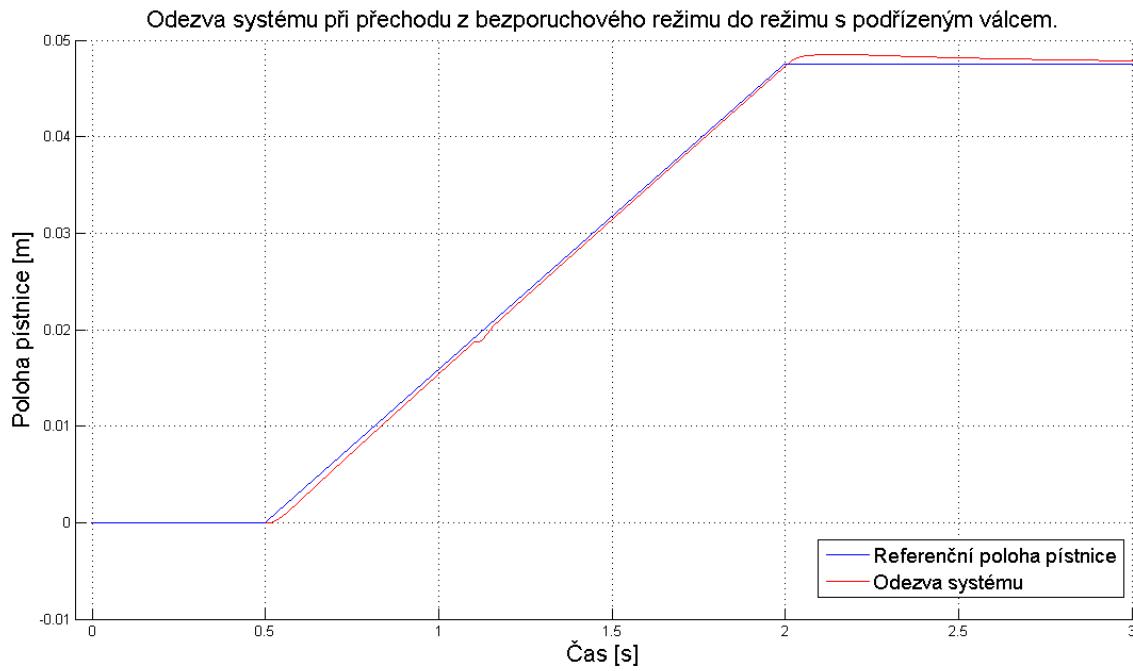
Kromě uvedených průběhů byly ověřeny i další požadované funkce obvodu. Implementace stavového řízení pomocí simulinkového bloku StateFlow umožňuje během simulace sledovat přechody stavového regulátoru mezi jednotlivými stavami. S využitím manuálních přepínačů vnášejících do obvodu možné poruchy systému byla vyzkoušena funkčnost všech přechodů mezi stavami. Řídicí jednotky ECU pracují paralelně, paralelní jsou i změny stavů uvnitř jednotek, obvod se chová dle očekávání.

## 6.2 Ověření chování systému v různých situacích

Hlavním přínosem vytvořeného modelu pro projekt návrhu řídicího systému malého proudového letounu je možnost testování různých scénářů chování obvodu. Na modelu vytvořeném v této práci je možné vyzkoušet různé algoritmy odezvy systému na změny způsobené jak ze strany pilota letounu, tak na změny způsobené poruchami v systému. V modelu je například možné sledovat vlivy přepínání mezi různými režimy ovládání. Různých scénářů pro testování může být mnoho, na tomto místě bude uvedeno několik z nich. Vybrány byly situace, ve kterých lze využít model ke zjištění předpokládané odezvy reálného systému.

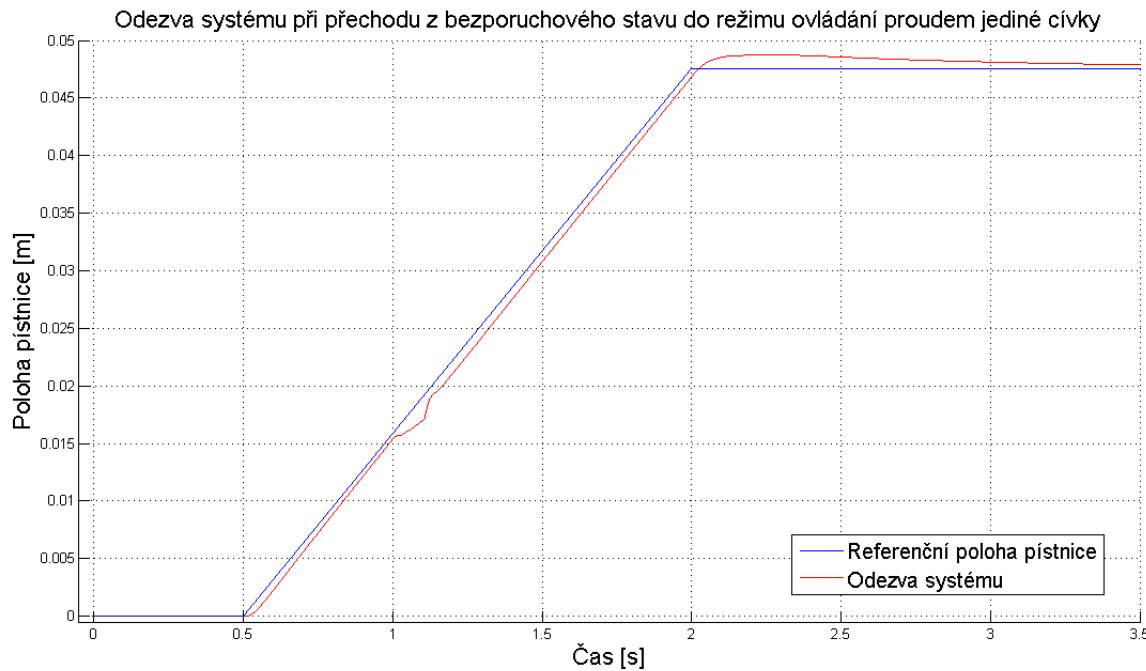
Pro testování odezvy systému na změny jeho nastavení byl zvolen průběh s konečnou strmostí hran. Tento průběh odpovídá reálné situaci. Do systému byly vnášeny poruchy některých řídicích signálů a byla sledována odezva systému na tyto změny.

Z pohledu návrhu řídicího systému je zajímavé sledování vlivu přepnutí soustavy z bezporuchového režimu do režimu, ve kterém je jeden z hydraulických válců v podřízeném stavu, funguje tedy jako tlumič společné pístnice. V čase 1 s byl změněn signál ovládající nastavení přemost'ovacího ventilu *BYPASS VALVE 1* na logickou hodnotu 0, tím byl válec prvního okruhu přepnut do podřízeného režimu. Vliv této změny na odezvu systému zobrazuje obrázek 6.6. Z průběhu je patrné, že v čase  $T=1.1\text{s}$  přichází přepnutí jednoho z válců do podřízeného režimu. Zpozdění 0.1s oproti času, kdy byla do obvodu vnesena porucha, je způsobeno zpozděním přepnutí ventilů, které bylo během vytváření modelu soustavy vzato v úvahu. Tlumení podřízeného válce zpomaluje řízení obvodu. Jak je však z průběhu patrné, obvod je i nadále řízen uspokojivě. Z pohledu tohoto testu je významné, že při přepnutí válce do podřízeného režimu nedochází k žádným prudkým změnám polohy pístnice, projevuje se pouze tlumení podřízeného válce.



Obrázek 6.6: Odezva systému při přechodu z bezporuchového režimu do režimu s přemostěným válcem

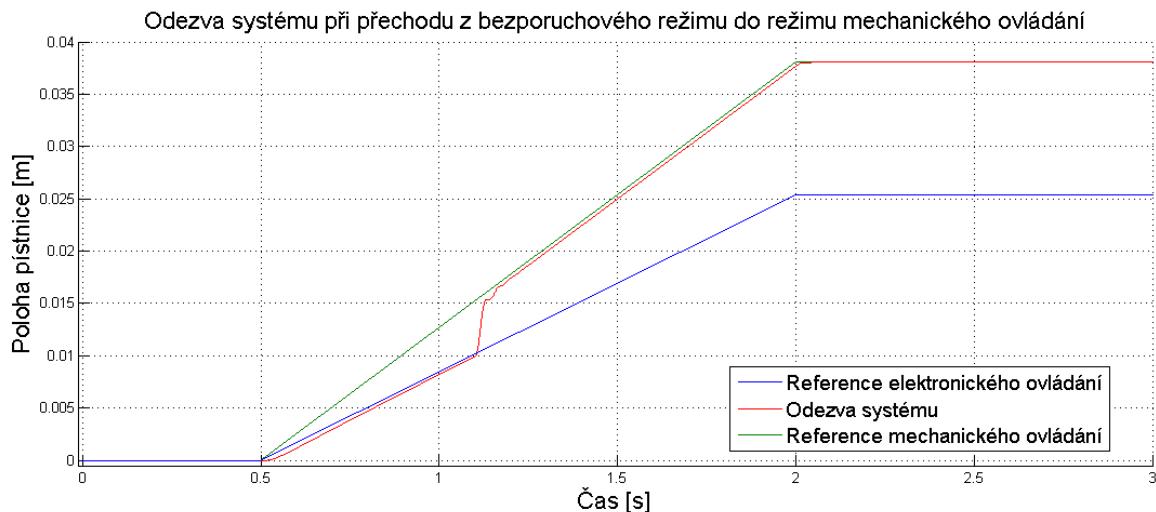
Zajímavější je případ, kdy jsou ve stejný moment zničeny tři cívky ovládající servoventily. Tato změna v simulaci nastává v čase  $T=1\text{s}$ . Soustava i nadále zůstává v elektronickém režimu řízení. V reálném systému není náhlý výpadek tří cívek v jeden časový okamžik příliš pravděpodobný, přesto jde o zajímavou simulaci možného jevu v soustavě. Vliv této změny na výstupní polohu písničky zobrazuje obrázek 6.7.



Obrázek 6.7: Ověření chování systému při poruše cívek ovládajících servoventil

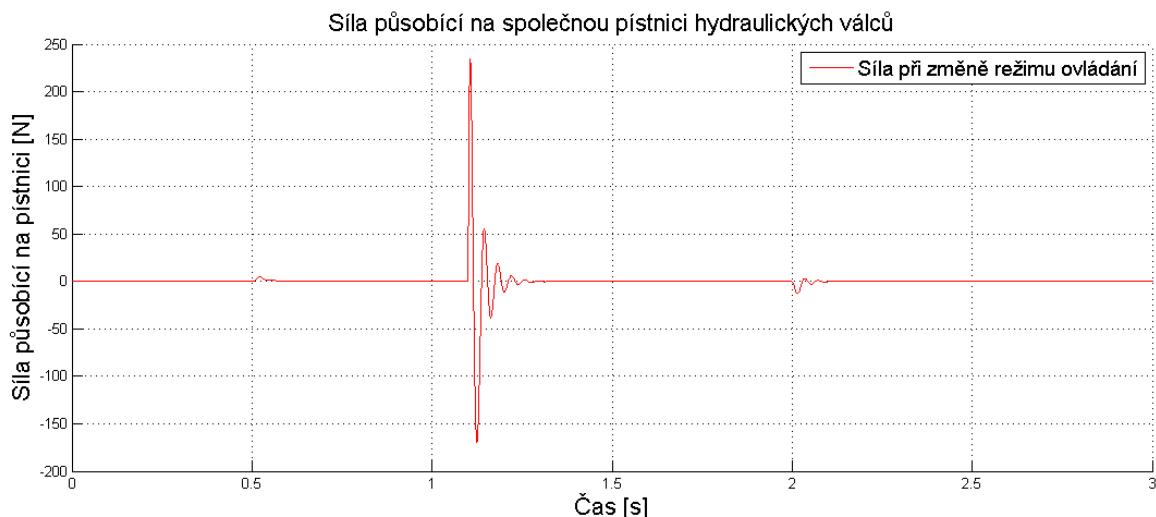
Z průběhu výstupní polohy pístnice je dobře viditelný vliv poruchy cívek, který se projevuje v čase  $T=1\text{s}$ . Jde o zajímavou situaci, kdy se výpadek proudů cívek projeví bez zpoždění. Až se zpožděním se v čase  $T=1.1\text{s}$  projeví přepnutí jednoho z hydraulických válců do podřízeného režimu, které je výpadkem funkce cívek způsobeno. Ovládání soustavy proudem jediné funkční cívky není příliš rychlé, ale rychlosť odezvy je stále přijatelná. Je docíleno nulové regulační odchylky. Z pohledu testování systému je opět důležité, že nedochází k prudkým změnám výstupní polohy pístnice, dochází však k drobným rázům pístnice hydraulických válců.

Jedním z dalších zajímavých funkčních scénářů soustavy je přepnutí z elektronického řízení do řízení mechanickou zálohou. Tato situace může nastat například při ztrátě komunikace obou sběrnic CAN, nebo při výskytu několika současných poruch v elektronickém řízení. Pro příklad je uvedeno chování systému v případě přepnutí z chybně určené reference elektronického ovládání, které může nastat například při poruše počítačů řízení letu (FCC). Simulován je případ, kdy je referenční poloha elektronického ovládání nižší, než je reference udávaná polohou ovládací páky. V čase  $T=1\text{s}$  je přepnuto do režimu záložního ovládání. Odezva systému s přepnutím do mechanického režimu ovládání je zobrazena na obrázku 6.8.



Obrázek 6.8: Ověření chování systému při přechodu z elektronického do mechanického ovládání

Z odezvy je patrná prudká změna polohy pístnice v čase  $T=1.1\text{s}$ , způsobená přepnutím do mechanického režimu ovládání. Zpoždění reakce systému je způsobeno dobou potřebnou k přepnutí ventilů do konfigurace pro mechanické ovládání. Podobné simulace jsou pro chování reálného systém důležité, v modelu je možné sledovat síly působící v době překmitu na pístnici hydraulických válců. Průběh síly v tomto případě ukazuje obrázek 6.9. Z průběhu je vidět velký překmit síly působící na pístnici. Jde o zajímavý případ ukázky možností vytvořeného modelu. Pomocí podobných testů je možné zjistit předpokládané chování systému v různých krizových situacích a případné problémy odstranit ještě před aplikací řídicích algoritmů na fyzický systém.



Obrázek 6.9: Síla působící na pístnici při změně režimu ovládání

# Kapitola 7

## Závěr

V teoretické části práce byla popsána metoda návrhu systému založená na využití počítačového modelu (Model Based Design), která je využívána v této práci. Byly uvedeny její vlastnosti, které lze využít při návrhu řídicího systému malého proudového letounu.

Výsledkem práce je model soustavy elektrohydraulického akčního členu EHSA a model redundantního řídicího systému tohoto členu. Navrženy byly řídicí algoritmy pro ovládání redundantních okruhů elektrohydraulického akčního členu. Navržené algoritmy zahrnují diskrétní řízení nastavení ventilů obvodu EHSA, implementované formou konečného stavového automatu. Implementovány jsou bloky proporcionalně-integračního řízení vstupního proudu cívek akčního členu EHSA, které umožňují přepínání konstant regulátorů na základě aktuálního stavu soustavy. Navržené řídicí algoritmy ovládají redundantní okruhy obvodu EHSA ve všech jeho stavech, nezávisle na vzniklých poruchách.

Ve výsledném modelu byly jednotlivé části systému propojeny ve zpětnovazební smyčce. Vnášení poruch do systému umožňuje přidané pomocné vstupy systému. Několika simulacemi bylo ověřeno chování celého systému v různých situacích a při výskytu různých typů poruch.

Po převedení modelu do režimu práce s plovoucí řádovou čárkou (pozn.: není součástí zadání této práce) bude možné automaticky vygenerovat programový kód s využitím nástrojové sady Matlab Real-Time Workshop. Vygenerovaný kód bude možné použít spolu s hardwarem, který je vyvíjen v rámci projektu modulového řešení systému řízení FLY-BY-WIRE pro malý proudový letoun.

# Literatura

- [1] WASZNIOWSKI, Libor. Specifikace a návrh HW elektronické řídicí jednotky hydraulického servomechanismu řídicího polohu letounu. 2009. s. 22. Technická specifikace systému.
- [2] RYNEŠ, Vladimír. Specifikace servoventilu LUN 6874-8. Jihostroj Velešín. 2005. s. 106.
- [3] MOOG. Servovalve. Katalogový list servovetnilu MOOG.
- [4] KRPATA, Pavel. Řízení hydraulického servoventilu. Praha, 2007. 35 s. ČVUT Praha. Bakalářská práce.
- [5] HORÁČEK, Petr. Systémy a modely. Praha : Vydavatelství ČVUT. 2001. 232 s.
- [6] JIRKOVSKÝ, Jaroslav. Modelování elektromechanické soustavy v prostředí Matlab a Simulink (1. část). AUTOMA. 2008, č. 8/9, s. 116-117.
- [7] JIRKOVSKÝ, Jaroslav. Modelování elektromechanické soustavy v prostředí Matlab a Simulink (2. část). AUTOMA. 2008, č. 10, s. 33-35.
- [8] DRAAXLER, Karel. Fly by wire. Studijní materiály předmětu K621EPS1 [online]. 2008 [cit. 2009-04-28].
- [9] FLIEGER, Jan., VYŠÍN, Martin. Hydraulické a pneumatické mechanizmy. VUT Brno-Fakulta strojního inženýrství. 2004. 84 s.
- [10] FRANKLIN, Gene F., POWELL, J. David, EMAMI-NAEINI, Abbas. Feedback Control of Dynamic Systems. 5th edition. New Jersey : Prentice Hall, 2006. 910 s. ISBN 0-13-149930-0.

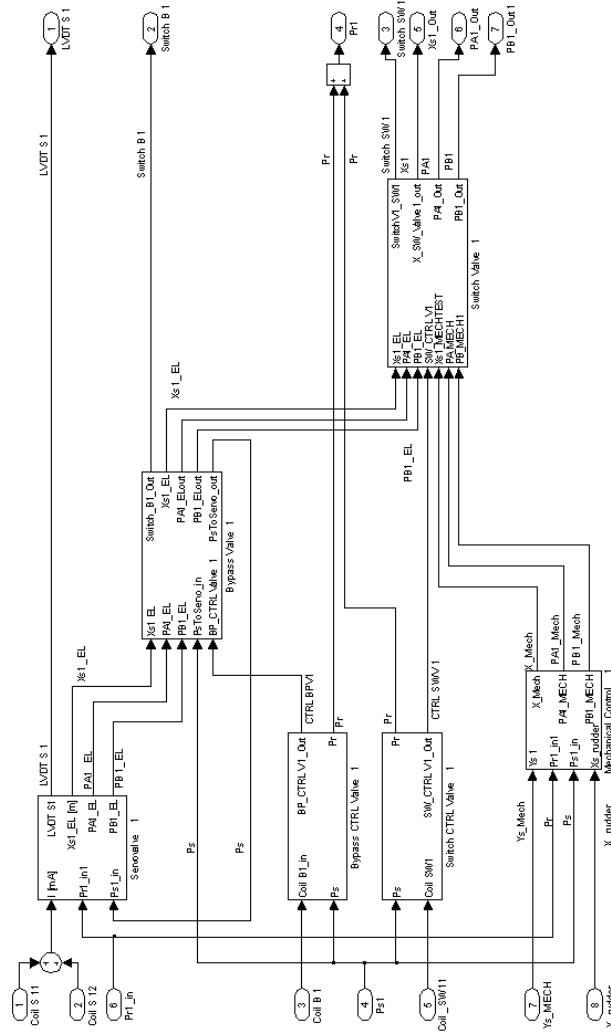
- [11] DORF, Richard C., BISHOP, Robert H. Modern Control Systems. 11th edition. New Jersey : Pearson Education, 2008. 1017 s.
- [12] Wikipedia [online]. 2009 [cit. 2009-20-04]. Dostupný z WWW: <[http://en.wikipedia.org/wiki/Model\\_based\\_design](http://en.wikipedia.org/wiki/Model_based_design)>.
- [13] BYRON, Petr. Navrhování řídicích systémů. MM Průmyslové spektrum. 2008, č. 9, s. 26.
- [14] Humusoft a.s. Model Based Design [online]. [2008] [cit. 2009-05-21]. Dostupný z WWW: <<http://www.humusoft.cz/produkty/matlab/mbd/index.php?lang=cz&p1=1&p2=1&p3=10>>.
- [15] The MathWorks [online]. 2009 [cit. 2009-05-10]. Dostupný z WWW: <<http://physical-modeling.mathworks.com>>.
- [16] ÅSTRÖM, Karl. Control System Design : kapitola 6. 2002. Výukové materiály. s. 36.
- [17] MILLER, Steve. Hydromechanical Systems in Simulink. [s.l.] : [s.n.], 2007. 40 s.
- [18] TŮMA , Jiří, et al. Základy automatizace. Ostrava : [s.n.], 2007. 288 s.
- [19] MATLAB R2008a. Návod programu, heslo "Discrete- Time Integrator".

**Poznámky:**

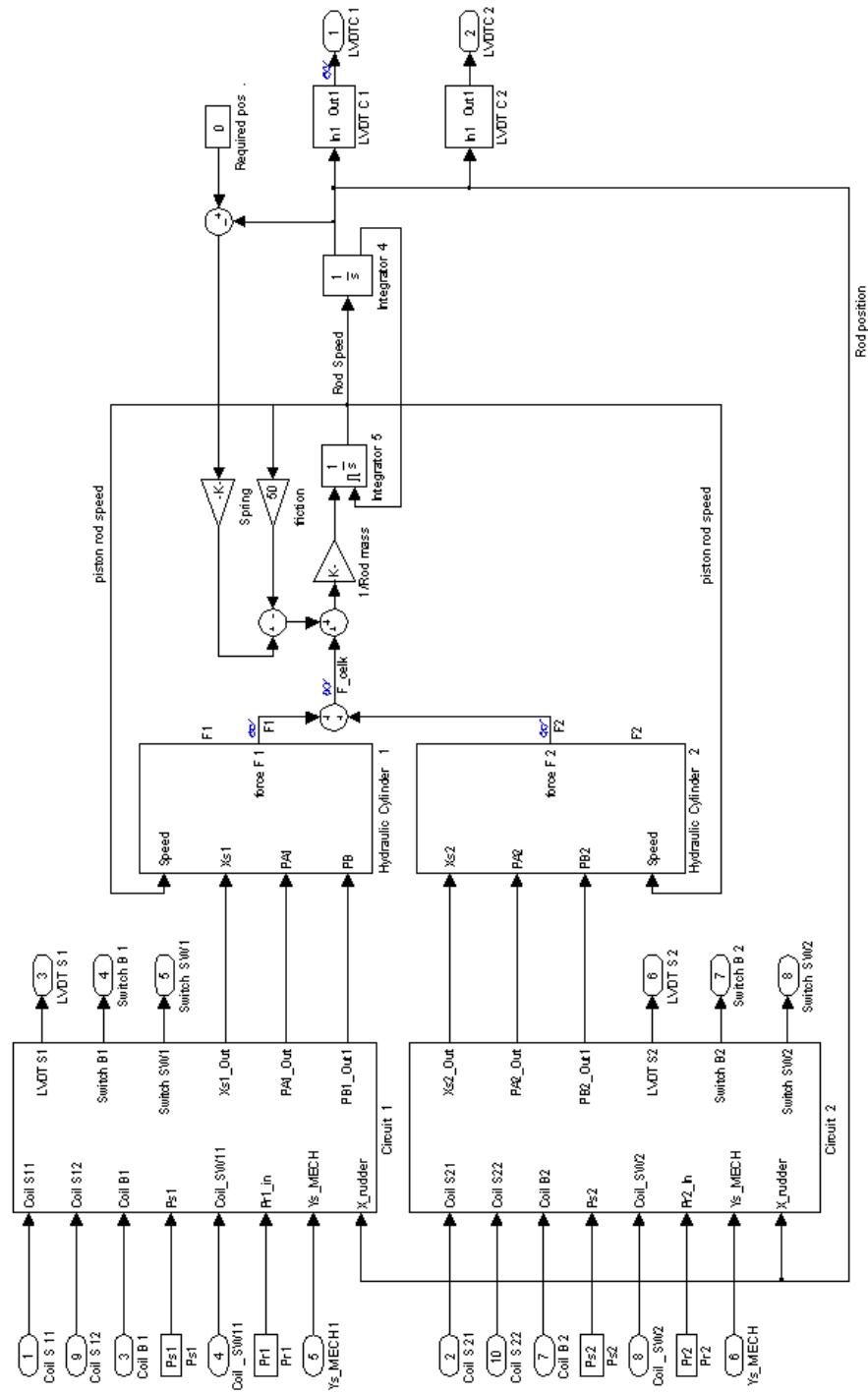
Položky [1], [2], [3], [4], [6], [7], [8], [9], [17] a [18] jsou umístěny na přiloženém CD

# Příloha A

## Schéma pro Simulink



Obrázek A.1: Model jednoho okruhu obvodu EDSA



Obrázek A.2: Model kompletního obvodu EHS

# Příloha B

## Obsah přiloženého CD

### Složka **Bakalářská Práce**

bp\_2009\_Pich\_Jiri.pdf Text bakalářské práce

### Složka **Model**

EHSA.mdl Model soustavy obvodu EHSA a řídicího systému<sup>1</sup>

Parametry\_FIX.m Soubor s parametry pro nastavení modelu

Settings.m Soubor s nastavením proměnných modelu

### Složka **Použité materiály**

Soubory jsou označeny čísly uvedenými v sekci Literatura

[1]SpecHwECU.doc

[2]servoblok.pdf

[3]MoogServoventil

[4]BC\_Krpata.pdf

[6]Automa1.pdf

[7]Automa2.pdf

---

<sup>1</sup>pozn. Simulinkový model je optimalizován pro Matlab R2008a

[8]FlyByWire.pdf

[9]hydropneu.pdf

[17]Hydromech\_in\_SL\_1.pdf

[18]ZakladyAutomatizace.pdf