



**VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ**

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

**FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ**

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

**ÚSTAV VÝROBNÍCH STROJŮ, SYSTÉMŮ A ROBOTIKY**

INSTITUTE OF PRODUCTION MACHINES, SYSTEMS AND ROBOTICS

**VLIV NASTAVENÍ REGULÁTORU SERVOPOHONU NA  
ENERGETICKOU NÁROČNOST**

INFLUENCE OF SERVO DRIVE CONTROLLER SETTINGS ON ENERGY CONSUMPTION

**DIPLOMOVÁ PRÁCE**

MASTER'S THESIS

**AUTOR PRÁCE**

AUTHOR

**Bc. Ondřej Kura**

**VEDOUCÍ PRÁCE**

SUPERVISOR

**Ing. Rostislav Huzlík, Ph.D.**

**BRNO 2021**



# Zadání diplomové práce

Ústav:	Ústav výrobních strojů, systémů a robotiky
Student:	<b>Bc. Ondřej Kura</b>
Studijní program:	Strojní inženýrství
Studijní obor:	Výrobní stroje, systémy a roboty
Vedoucí práce:	<b>Ing. Rostislav Huzlík, Ph.D.</b>
Akademický rok:	2021/22

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

## **Vliv nastavení regulátoru servopohonu na energetickou náročnost**

### **Stručná charakteristika problematiky úkolu:**

Cílem práce je vytvoření modelu, na kterém bude možné ověřovat energetickou náročnost servopohonů při různých nastavení regulátorů. Model bude tvořen v programu Matlab/Simulink.

### **Cíle diplomové práce:**

Literární rešerše na téma vliv nastavení regulátoru servopohonu na účinnost.

Systémový rozbor servopohonu z pohledu ztrát a účinnosti.

Tvorba modelu servopohonu .

Ověření vytvořeného modelu na reálném servopohonu.

Zhodnocení možností využití pro praxi.

### **Seznam doporučené literatury:**

MAREK, Jiří. Konstrukce CNC obráběcích strojů III. Praha: MM publishing, s.r.o., 2014. MM speciál. ISBN 978-80-260-6780-1.

DRURY, Bill. Control techniques drives and controls handbook, 2nd edition. IET, 2001. ISBN 978--84919-013-8.

SOUČEK, Pavel, 2004. Servomechanismy ve výrobních strojích. Praha: Vydavatelství ČVUT. ISBN 80-010-2902-6.

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku.

V Brně, dne

L. S.

---

doc. Ing. Petr Blecha, Ph.D.  
ředitel ústavu

---

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

## **ABSTRAKT**

Cílem této práce je prozkoumat energetickou náročnost servopohonu při různých regulačních nastaveních. Nejprve je v teoretické části popsán servopohon jakožto mechatronický systém s následným rozebráním z pohledu ztrát a účinnosti, kde jsou definovány veškeré ztráty, které v servopohonu vznikají. Následně teoretickou část uzavírá kapitola o regulátorech, díky kterým je možné servopohony ovládat a je zde popsán i jejich vliv na výslednou regulaci. V praktické části byl poté v programu Simulink nejprve vytvořen model DC motoru s lineární osou a regulací. Následně se v programu Matlab definoval pohyb s lineárním zrychlením a pohyb pomocí S-křivek, jimiž se daný model ovládal. Poté proběhlo měření modelu při různém nastavení regulátorů a výsledné průběhy spolu s energetickými hodnotami byly mezi sebou porovnány. Ve druhé půlce praktické části této práce bylo poté provedeno měření reálného servopohonu s následným srovnáním s vytvořeným modelem. Při tomto srovnání se rovněž porovnávaly výsledné průběhy a energetické hodnoty. Výsledkem této práce je poté zjištění vlivu změn na výslednou regulaci, které jsou provedeny v nastavení regulátorů. Funkční modely poté můžou sloužit pro zjištění, jak se různé servopohony budou chovat při daných regulačních podmínkách.

## **ABSTRACT**

The aim of this work is to investigate the energy consumption of the servo drive at different control settings. First, the theoretical part describes the servo drive as a mechatronic system with subsequent disassembly in terms of losses and efficiency, where all the losses that occur in the servo drives are defined. Subsequently, the theoretical part concludes with a chapter on controllers, thanks to which it is possible to control servo drives and describes their influence on the resulting control. In the practical part, a model of a DC motor with a linear axis and regulation was first created in the Simulink program. Subsequently, the Matlab program defined motion with linear acceleration and motion using S-curves, which controlled the model. Then the model was measured at different settings of the controllers and the resulting waveforms together with the energy values were compared with each other. In the second half of the practical part of this work, a real servo drive was then measured with a subsequent comparison with the created model. In this comparison, the resulting waveforms and energy values were also compared. The result of this work is then to determine the effect of changes on the resulting control, which are made in the controller settings. The functional models can then be used to determine how the various servo drives will behave under the given control conditions.

## **KLÍČOVÁ SLOVA**

Servopohon, ztráty, účinnost, regulace, energie, měnič

## **KEYWORDS**

Servo Drive, Losses, Efficiency, Regulation, Energy, Inverter



## **BIBLIOGRAFICKÁ CITACE**

KURA, Ondřej. *Vliv nastavení regulátoru servopohonu na energetickou náročnost*. Brno, 2022. Dostupné z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/137059>. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav výrobních strojů, systémů a robotiky. Vedoucí práce Rostislav Huzlík.





## **PODĚKOVÁNÍ**

Tímto bych chtěl poděkovat vedoucímu mé diplomové práce Ing. Rostislavu Huzlíkovi, Ph.D. za odborné vedení, konzultace ke studované problematice a rady v průběhu práce. Na závěr bych chtěl poděkovat mé rodině za motivaci při studiu a umožnění studovat na vysoké škole.



## **ČESTNÉ PROHLÁŠENÍ**

Prohlašuji, že tato práce je mým původním dílem, zpracoval jsem ji samostatně pod vedením Ing. Rostislava Huzlíka, Ph.D. a s použitím literatury uvedené v seznamu.

V Brně dne 30.07.2021

.....

Kura Ondřej



# OBSAH

<b>1</b>	<b>ÚVOD</b> .....	<b>15</b>
<b>2</b>	<b>SERVOPOHON</b> .....	<b>17</b>
2.1	Co je to servopohon? .....	17
2.2	Rozdělení servomotorů .....	17
2.3	Snímače polohy.....	18
2.4	Měniče .....	18
2.5	Řídící jednotky (kontroléry) .....	19
2.6	Využití servopohonů.....	20
<b>3</b>	<b>SYSTÉMOVÝ ROZBOR SERVOPOHONU Z POHLEDU ZTRÁT A ÚČINNOSTI</b> .....	<b>21</b>
3.1	Ztráty v servopohonu a jejich rozdělení .....	21
3.2	Ztráty v měniči.....	21
3.2.1	Ztráty ve výkonových polovodičových součástkách.....	22
3.2.1.1	Ztráty ve vedení.....	22
3.2.1.2	Spínací ztráty .....	23
3.2.2	Ztráty v kondenzátorech .....	24
3.2.3	Ztráty v kontaktech.....	26
3.2.4	Ztráty v jisticích prvcích.....	26
3.3	Ztráty v motoru .....	26
3.3.1	Ztráty ve vinutí .....	27
3.3.2	Ztráty v železe .....	28
3.3.2.1	Hysterezní ztráty .....	28
3.3.2.2	Ztráty vířivými proudy .....	28
3.3.2.3	Ztráty v magnetech .....	29
3.3.3	Mechanické ztráty.....	29
3.3.3.1	Ztráty v ložiscích.....	29
3.3.3.2	Vzduchové ztráty .....	30
3.4	Dodatečné ztráty .....	30
3.5	Účinnost motoru .....	30
<b>4</b>	<b>REGULÁTORY A JEJICH NASTAVENÍ S VLIVEM NA SERVOPOHON</b> .....	<b>32</b>
4.1	Princip zpětnovazebního řízení.....	32
4.2	Regulátory a vliv regulačních členů na regulaci.....	32
4.2.1	Proporcionální člen (P-regulátor) .....	32
4.2.2	Integrační člen (I-regulátor).....	33
4.2.3	Derivační člen (D-regulátor) .....	33
4.2.4	PD-regulátor .....	33
4.2.5	PI-regulátor .....	34
4.2.6	PID-regulátor .....	34
4.2.7	Vliv parametrů na regulaci a přechodové charakteristiky regulátorů.....	35
4.3	Kaskádní regulace.....	36
4.3.1	Proudová zpětná vazba .....	37
4.3.2	Rychlostní zpětná vazba .....	37
4.3.3	Polohová zpětná vazba .....	38
<b>5</b>	<b>PRAKTICKÁ ČÁST- MODEL REGULACE DC MOTORU S LINEÁRNÍ OSOU</b> .....	<b>39</b>

5.1	Volba motoru a elektrická část modelu .....	39
5.2	Mechanická část modelu .....	39
5.2.1	Rotační část .....	40
5.2.2	Translační část .....	41
5.3	Řídící část modelu a nastavení jednotlivých regulátorů .....	42
5.3.1	Nastavení PI-regulátoru proudu .....	42
5.3.2	Nastavení PI-regulátoru rychlosti .....	43
5.3.3	Nastavení P-regulátoru polohy .....	43
5.4	Definice pohybu .....	43
5.4.1	Pohyb s lineárním zrychlením .....	43
5.4.2	Pohyb s S-křivkami .....	44
5.5	Stanovení požadovaného pohybu .....	46
5.5.1	Výpočet pohybu s lineárním zrychlením .....	47
5.5.2	Výpočet pohybu s S-křivkami .....	50
5.6	Propojení Matlabu se Simulinkem a vygenerování výsledků .....	52
5.6.1	Výsledky regulací pohybu s lineárním zrychlením .....	52
5.6.2	Zhodnocení výsledků energií s lineárním pohybem .....	57
5.6.3	Výsledky regulací pohybu s S-křivkami .....	58
5.6.4	Zhodnocení výsledků energií při pohybu pomocí S-křivek .....	62
<b>6</b>	<b>MODEL REGULACE SYNCHRONNÍHO SERVOPOHONU A PRAKTICKÉ MĚŘENÍ REÁLNÉHO SERVOPOHONU .....</b>	<b>63</b>
6.1	Praktické měření reálného servopohonu .....	63
6.2	Zhodnocení výsledků praktického měření .....	67
6.3	Tvorba modelu servopohonu .....	67
6.4	Nastavení regulátorů v modelu .....	68
6.5	Simulace na vytvořeném modelu servopohonu .....	69
6.6	Zhodnocení výsledků měřeného modelu a porovnání s praktickým měřením .....	72
6.7	Časové srovnání simulací DC motoru a synchronního servopohonu .....	73
<b>7</b>	<b>ZÁVĚR .....</b>	<b>75</b>
<b>8</b>	<b>SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ .....</b>	<b>77</b>
<b>9</b>	<b>SEZNAM ZKRATEK, SYMBOLŮ, OBRÁZKŮ A TABULEK .....</b>	<b>79</b>
10.1	Seznam tabulek .....	79
10.2	Seznam obrázků .....	79
10.3	Seznam zkratk a symbolů .....	80
<b>10</b>	<b>SEZNAM PŘÍLOH .....</b>	<b>85</b>

# 1 ÚVOD

V dnešní době, kdy světem začíná převládat snaha o automatizaci ve všech výrobních odvětvích se inženýři snaží předhánět různými nápady, které vedou k zefektivnění celkové výroby. Většina těchto výrobních řešení využívá CNC obráběcí stroje nebo robotické manipulátory, které šetří čas, peníze, a navíc potřebují jen minimum lidského dozoru pro provoz. Ve všech těchto strojích, které usnadňují práci, lze nalézt pohony, jenž slouží k pohybu jednotlivých částí daného stroje. Pokud je výsledný pohyb stroje řízen pomocí takového pohonu pak lze hovořit o tzv. servopohonu.

Servopohony představují rychlé, přesné a kvalitní řešení pohybu zejména u CNC obráběcích strojů a robotů. Pro dosažení požadovaného pohybu musí být tento typ pohonu řízen pomocí regulace. Během řízení vznikají v servopohonu různé druhy ztrát, které se tvoří v samotném motoru servopohonu nebo také v řídicí části servopohonu. Tyto ztráty mohou výrazným způsobem ovlivnit výslednou účinnost stroje. Základem pro zvýšení účinnosti servopohonu je kvalitně nastavená regulace pro daný pohon, která splňuje nejen požadavky pro výsledný pohyb stroje, ale také se snaží provést pohyb, pokud možno co energeticky nejšetněji. To se provádí za pomoci různých regulátorů, ve kterých se volí hodnoty tak aby byl splněn požadovaný pohyb a tím i zajištěna správná funkčnost daného stroje.

Cílem této práce je proto prozkoumat a popsat veškeré ztráty tvořené v servopohonu a zároveň zjistit jaká je energetická náročnost při různých nastaveních regulátorů. To bude nejprve realizováno na modelu DC motoru s lineární osou vytvořeném v programu Matlab/Simulink a posléze i na modelu pro servopohon, který bude srovnán s reálným servopohonem, na kterém bude rovněž provedeno měření. Také zde bude objasněno, jaký vliv má změna jednotlivých parametrů v regulátorech na výslednou regulaci. Výsledkem by měly být dva funkční modely, které by do budoucna mohly sloužit jako simulační řešení pro zjištění výsledných regulací různých servopohonů, které chce inženýr použít.





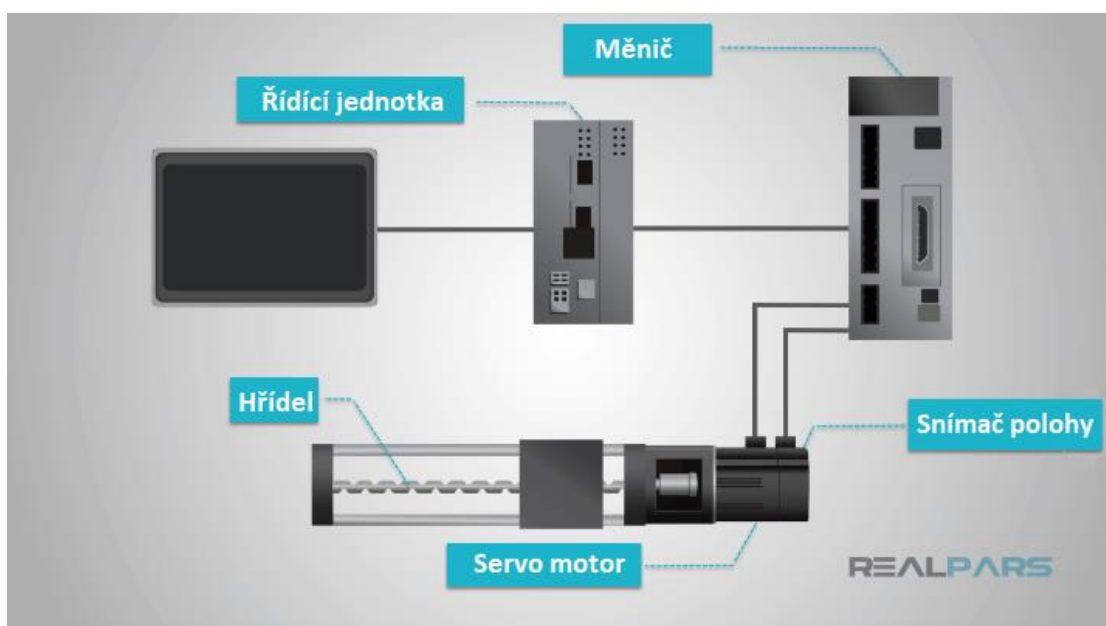
## 2 SERVOPOHON

V této kapitole zde bude seznámeno s pojmy a částmi ze kterých se servopohon skládá a jak vlastně pracuje. Budou zde popsány a rozděleny motory, které mohou být pro servopohony použity stejně jako snímače polohy, měniče a řídicí jednotky. Nakonec zde bude zodpovězena otázka, jaké je využití těchto pohonů.

### 2.1 Co je to servopohon?

Pod tímto pojmem je chápán jakýsi mechatronický systém, který je z pravidla tvořen z několika základních částí. Tento systém obsahuje jeden nebo více elektrických motorů, napájecí výkonový měnič, řídicí jednotku neboli tzv. regulátor a snímač polohy natočení motoru (viz Obr. 1). Na rozdíl od klasických elektrických pohonů musí mít servopohon tzv. uzavřenou zpětnovazební regulační smyčku. [1][2]

Servopohony lze ovládat elektrickým signálem, ať už analogovým nebo digitálním. Úlohou servopohonu je v zásadě převádět povelové signály z řídicí jednotky na napájecí napětí a proud do motoru. V závislosti na aplikaci může servopohon regulovat a správně koordinovat požadovanou polohu motoru, rychlost, točivý moment atd. Hlavní aspekt, který je u servopohonů sledován, je regulace, a to z pohledu její rychlosti, přesnosti a spolehlivosti. [3]



Obr. 1: Servopohon a jeho jednotlivé komponenty [3]

### 2.2 Rozdělení servomotorů

Servomotor je rotační nebo translační motor, do kterého je dodáván výkon skrze měnič a slouží k aplikaci točivého momentu nebo síly na mechanický systém. Servomotory umožňují přesné ovládání, pokud jde o polohu, rychlost a zrychlení. Tento typ motoru je spojen s řídicím systémem s uzavřenou zpětnou smyčkou, pomocí které je ovládán pohyb a poloha výstupní hřídele. [4]

Typy servomotorů jsou rozděleny do několika skupin podle jejich použití. Inženýři si z pravidla vybírají mezi stejnosměrnými DC (Direct Current) motory do kterých se v poslední době řadí také stále častější elektronicky komutované EC (Electronically Commutated) motory, střídavými AC (Alternate Current) motory, které se dále dělí na asynchronní a synchronní, a nakonec mezi krokovými motory. [5]

### 2.3 Snímače polohy

Pro informace o poloze a rychlosti hnacího systému pro zpětnovazební smyčku se využívají snímače polohy, které výrazným způsobem zlepšují kvalitu regulace celého systému. Tyto snímače jsou mechanickými jednotkami, jenž slouží pro transformaci úhlového pohybu na elektrický signál. Snímače polohy pro servopohony se rozdělují do tří hlavních skupin, a to na inkrementální enkodéry, absolutní enkodéry a na tzv. resolvery (viz Obr. 2). [6]



Obr. 2: Snímače polohy: absolutní enkodér (vlevo), inkrementální enkodér a resolver (vpravo) [6]

### 2.4 Měníče

Jestliže používané motory v servopohonech reprezentují svaly celého systému, pak měniče zastupují jeho nervové ústrojí. Měníče v podstatě dodávají signály v podobě napětí a proudu do motoru, které přicházejí z řídicího kontroléru. Protože generované napěťové a proudové signály jsou velmi nízké, tak se v měniči zesílí a často se proto o měniči hovoří jako o zesilovači. [2][7]

Tyto signály, kterými může být ovládána a regulována zpravidla poloha, rychlost a točivý moment motoru mohou být analogového nebo digitálního typu. U všech moderních měničů se nejčastěji setkáváme s digitálními verzemi, které jsou sice nákladnější, ale za to mají daleko větší funkcionalitu než měniče analogové. [8]

Existuje mnoho druhů měničů, které jsou klasifikovány na základě jejich použití. Jako základní zde mohou být uvedeny usměrňovače, střídače, frekvenční měniče a transformátory. Při rozlišování mezi různými typy je třeba vzít v úvahu několik faktorů. Např. zdali je napájený motor AC nebo DC, jestli obsahuje sběrací kartáče či nikoliv nebo zda se otáčí synchronními nebo asynchronními otáčkami. V průmyslových servopohonech však nachází největší uplatnění frekvenční měnič. [9]

Moderní digitální měniče umožňují ladění pomocí softwaru oproti manuálnímu ladění pomocí potenciometrů u analogových verzí a jsou schopny sledovat vnitřní funkce systému a poskytovat podrobnou diagnostiku poruch. Některé měniče jsou dokonce dostatečně

pokročilé, aby ukládaly indexy pohybu a sekvence do své paměti a používaly logiku vstupu k výstupu k samostatnému provozu bez vyhrazeného ovladače. [2][7]



Obr. 3: Různé typy měničů pro servopohony [2]

## 2.5 Řídící jednotky (kontroléry)

Řídící jednotka, která je často označována jako kontrolér je zodpovědná za výpočet a rozhodování v celém servosystému, což může být analogicky přirovnáno k mozku tohoto systému. Je to vysoce přesný systém komponent, který operátorům umožňuje měnit způsob, jak se daný motor chová. Přestože kontrolér zpracovává mnoho úkolů, tak jeho nejzákladnější funkcí je sledování požadovaných hodnot polohy, rychlosti a točivého momentu, kterých chceme dosáhnout. [7]

Kontrola těchto příkazů znamená zajistit, aby daný motor sledoval pohybový profil aplikace bez chyby nebo s minimální chybou. Regulátor toto provádí kontinuálním porovnáváním skutečné hodnoty polohy, rychlosti nebo točivého momentu motoru s požadovanou hodnotou na základě zpětné vazby od enkodéru a následným vysláním signálu do měniče k opravě chyb mezi skutečnými a požadovanými hodnotami. [8]

Způsob, kterým je řízen výstup motoru, je dán tím, jak jeho regulátor vysílá povely prostřednictvím elektrických signálů. To se děje několika způsoby a velmi závisí na tom, jaký typ motoru se používá. Jako dvě nejběžnější metody řízení motoru se však používají pulzní šířková modulace (PWM) a proporcionální, integrální a derivační (PID) řízení. U PWM řízení není potřeba zpětné vazby, což může být někdy výhodnější, ale metoda PID s pomocí uzavřené zpětné vazby je přesto jedním z nejlepších způsobů, jak eliminovat chyby jakéhokoliv servosystému. [10]

Vyladění servopohonu pomocí kontroléru zahrnuje nalezení vhodných korekcí pro různé chybové podmínky k dosažení uspokojivého sledování příkazů, aniž by došlo k nestabilitě systému. Aplikace těchto zařízení umožňuje operátorům měnit způsob, jakým se jejich motor chová, a jako taková umožňují větší flexibilitu používaných strojů. [7][10]

## **2.6 Využití servopohonů**

Servopohony existují již dlouhou dobu. Vzhledem ke své velikosti poskytují velmi dobrý výkon a mají také velmi dobrou energetickou účinnost. Používají se v aplikacích, kde se vyžaduje rychlá změna rychlosti a přesnost polohy, aniž by docházelo k přehřátí systému. Díky svým přesným schopnostem nacházejí servopohony uplatnění v robotice, automatizaci, CNC obrábění, montážních linkách, hračkách, a dokonce i v procesech výroby polovodičů.  
[1][2]

## 3 SYSTÉMOVÝ ROZBOR SERVOPOHONU Z POHLEDU ZTRÁT A ÚČINNOSTI

Následující kapitola rozebírá veškeré ztráty, které v servopohonu vznikají. Budou zde popsány a rozděleny ztráty v měniči stejně tak jako ztráty v motoru. Cílem této kapitoly je rozbor a pochopení celého servopohonu vzhledem k jeho výsledné účinnosti a efektivitě, což je podmíněno právě jeho ztrátami.

### 3.1 Ztráty v servopohonu a jejich rozdělení

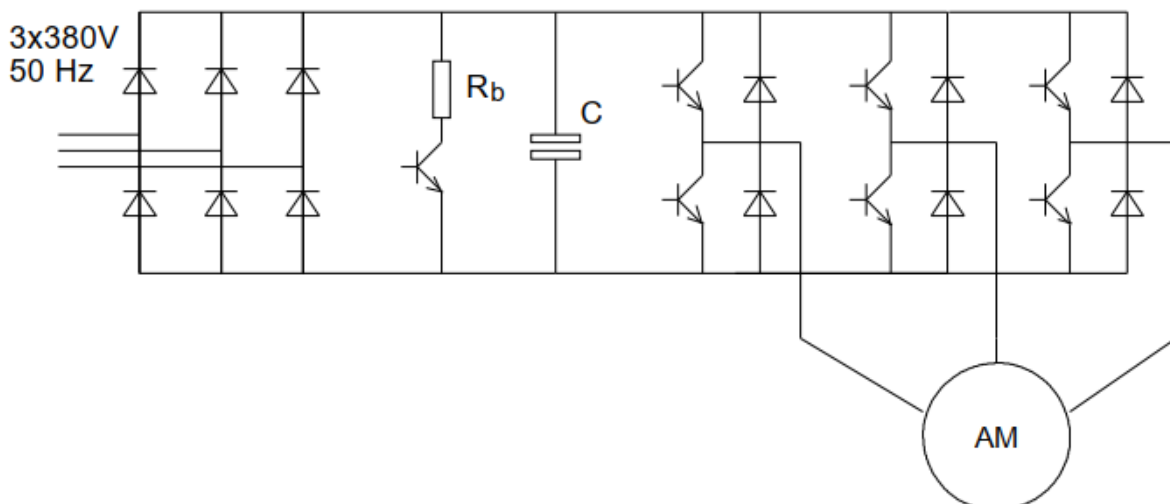
I navzdory tomu, že servopohony mají velmi dobrou účinnost, tak v nich přesto vznikají ztráty, které znatelně ovlivňují jejich výkon. Prvním krokem k pochopení efektivity celého řešení servopohonu je to, kde a jak se ztrácí část energie, která je do systému dodávána. Několik nežádoucích přírodních dějů způsobuje různé ztráty. Místo toho, aby byl celý výkon přenesen na další část v systému, se určité procento z toho rozptýlí v teple, což značně znekválitňuje přenos. Aby bylo možné správně navrhnout a ovládat výsledná zařízení se zaměřením na jejich účinnost, je důležité znát fyzikální jevy, které způsobují tyto ztráty. V celém systému servopohonu lze ztráty kategorizovat na ztráty v měniči a na ztráty v motoru. [11]

### 3.2 Ztráty v měniči

Základní přehled o tom, co jsou to měniče a jak fungují byl zmíněn již v podkapitole 2.4. Nyní zde bude přiblížena hlubší problematika měniče, a to zejména z pohledu jeho ztrát. Měnič jako takový je tvořen několika výkonovými polovodičovými součástky. Použité součástky a jejich uspořádání závisí na daném řešení výsledného zařízení. Tyto součástky a jejich obvody však vykazují ztráty, které v jisté míře mohou ovlivnit výslednou účinnost servopohonu. [12]

Pro představu, jak vypadá vnitřní schéma měniče, je na Obr. 4 zobrazen napěťový frekvenční měnič pro asynchronní motor, který obecně bývá v servopohonech hojně užíván. Tento měnič je tvořen napěťovým usměrňovačem pomocí 6 diod pro převedení střídavého napětí na stejnosměrné. Poté je zde meziobvod z elektrolytického kondenzátoru, brzdného odporu a tranzistoru pro stabilizaci, filtraci a vyhlazení napětí. Nakonec se upraví frekvence napětí na požadovanou hodnotu a převede se na asynchronní motor skrze třífázový střídač. [1]

Následující podkapitoly se budou zabývat popisem jednotlivých ztrát, které v měniči vznikají. Většina těchto ztrát je zanedbatelných a výsledný výkon servopohonu v podstatě nijak neovlivňují, avšak stojí za zmínku, aby se o nich vědělo.



Obr. 4: Napěťový frekvenční měnič pro asynchronní motor [1]

### 3.2.1 Ztráty ve výkonových polovodičových součástkách

Do výkonových polovodičových součástek se řadí diody, tranzistory a tyristory. Pomocí těchto komponent se ovládá řídicí napětí, a právě zde vznikají největší ztráty v celém měniči. Tyto ztráty jsou ještě kategorizovány na ztráty ve vedení a na spínací ztráty. [12]

#### 3.2.1.1 Ztráty ve vedení

Důvodem těchto ztrát je odpor křemíku, ze kterého jsou výkonové polovodičové součástky složeny a také samotný vnitřní odpory přechodů každé z těchto součástek. Pro zjištění, jakou ztrátu ve vedení  $P_{ved}$  má daná komponenta, lze využít běžně zjednodušeného vztahu:

$$P_{ved} = U_P \cdot I_{stř} + R_d \cdot I_{ef}^2 \quad (1)$$

Kde  $U_P$  je prahové napětí součástky a  $R_d$  je její dynamický odpor. Tyto hodnoty lze určit z katalogu výrobce dané komponenty nebo je lze vypočítat z jejich volt-ampérových charakteristik.  $I_{stř}$  a  $I_{ef}$  jsou střední a efektivní hodnota proudu tekoucího součástí, který můžeme vypočítat z rovnic odvozených v [13] pro tranzistor:

$$I_{stř,T} = I_{A1} \left( \frac{1}{2\pi} + \frac{M}{4\sqrt{3}} \cos\varphi \right) \quad (2)$$

$$I_{ef,T} = I_{A1} \left( \frac{1}{8} + \frac{2M}{3\sqrt{3}\pi} \cos\varphi \right) \quad (3)$$

a pro diodu:

$$I_{stř,D} = I_{A1} \left( \frac{1}{2\pi} - \frac{M}{4\sqrt{3}} \cos\varphi \right) \quad (4)$$

$$I_{ef,D} = I_{A1} \left( \frac{1}{8} - \frac{2M}{3\sqrt{3}\pi} \cos\varphi \right) \quad (5)$$

Kde  $\cos\varphi$  je fázový posun mezi první harmonickou napětí a proudu a jeho hodnota je uvedena na štítku motoru.  $I_{A1}$  značí amplitudu první harmonické fázového proudu a vypočítá se jako:

$$I_{A1} = I_{ef,\Delta} \cdot \sqrt{2} \quad (6)$$

Kde  $I_{ef,\Delta}$  je štítková hodnota efektivního sdruženého proudu, který odebírá motor zapojený do trojúhelníku.  $M$  je modulační činitel, jenž nabývá hodnot od 0 do 1 a lze ho vypočítat jako:

$$M = \frac{U_{AB1}}{U_{max}} \quad M \in \langle 0; 1 \rangle \quad (7)$$

Kde  $U_{AB1}$  je amplituda první harmonické sdruženého fázového napětí a  $U_{max}$  značí maximální amplitudu fázového napětí. [12][13]

### 3.2.1.2 Spínací ztráty

Spínací ztráty, kterým se také říká přepínací, vznikají při zapínání a vypínání polovodičových součástek, ale i při jejich ustálených sepnutých stavech. Tyto ztráty mohou být minimalizovány správným výběrem výkonové součástky. Pro výpočet celkové velikosti spínacích ztrát je použit vzorec:

$$P_{sp} = \frac{1}{\pi} \cdot f \cdot K \cdot (W_{on} + W_{sep} + W_{off}) \quad (8)$$

Kde  $f$  je pracovní kmitočet spínače,  $K$  je činitel proudového využití tranzistoru, který nabývá hodnot 0 až 1 a lze ho vypočítat jako:

$$K = \frac{I_{A1}}{I_C} \quad K \in \langle 0; 1 \rangle \quad (9)$$

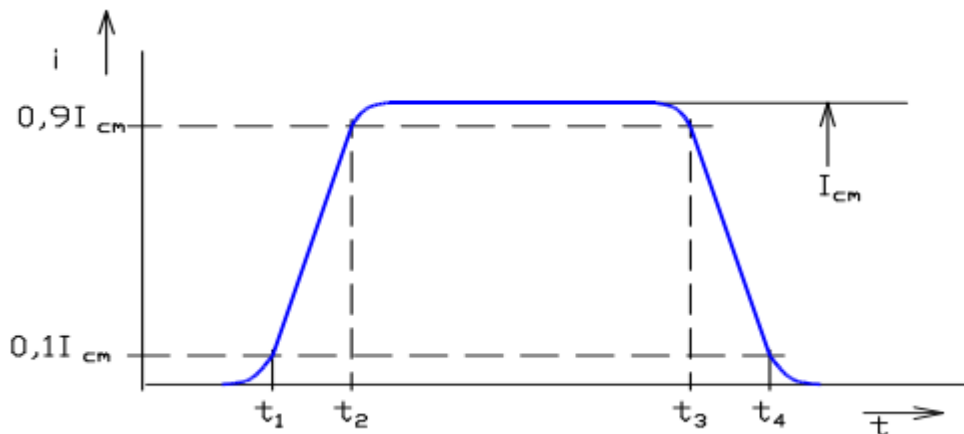
Hodnoty amplitudy fázového proudu  $I_{A1}$  a typového proudu  $I_C$  jsou udávány v katalozích výrobců výkonových spínacích součástek, stejně jako ztrátová energie  $W$  jednotlivých stavů, kterou lze vypočítat i podle vzorců:

$$W_{on} = \int_{t_1}^{t_2} u_{CE}(t) \cdot i_C(t) \cdot dt \quad (10)$$

$$W_{sep} = \int_{t_2}^{t_3} u_{CE}(t) \cdot i_C(t) \cdot dt \quad (11)$$

$$W_{off} = \int_{t_3}^{t_4} u_{CE}(t) \cdot i_C(t) \cdot dt \quad (12)$$

Kde  $u_{CE}(t)$  je kolektorové napětí a  $i_C(t)$  je kolektorový proud tranzistoru. Jednotlivé časy  $t$  jsou zobrazeny na Obr. 5. [12][13]



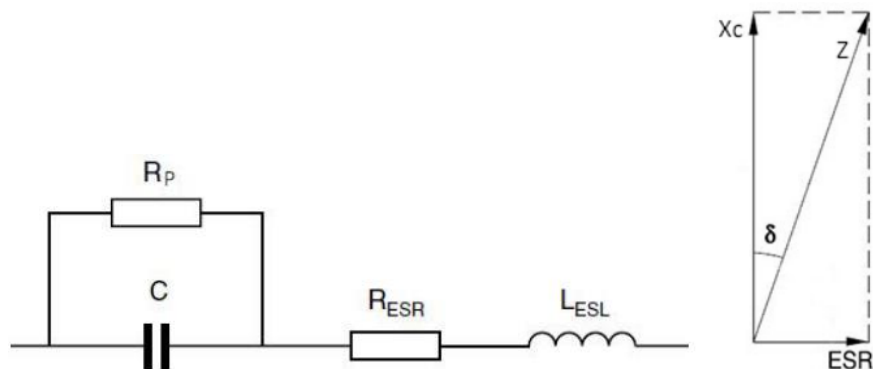
Obr. 5: Časový průběh proudu při zapínání a vypínání polovodičové součástky [12]

### 3.2.2 Ztráty v kondenzátorech

Tyto ztráty představují taktěž významnou složku v celkových ztrátách měniče, jelikož jsou kondenzátory používány pro filtraci signálu z výkonových komponent a jsou kmitočtově závislé. Na Obr. 6 lze vidět schéma reálného kondenzátoru o vlastní kapacitě  $C$  spolu s nežádoucími parazitními jevy jako jsou svodové ztráty dielektrika, které jsou reprezentované paralelním odporem  $R_p$  jemuž se také často říká izolační odpor. Tento odpor je zapříčiněn parazitním svodovým proudem, který prochází dielektrikem. Dále pak je zde



ekvivalentní sériový odpor  $R_{ESR}$ , jenž značí ztráty přivodních kontaktů a elektrod, a nakonec má kondenzátor i svou sériovou indukčnost  $L_{ESL}$ . [12][14]



Obr. 6: Schéma reálného kondenzátoru [12]

Výkonové ztráty v kondenzátoru jsou vyjádřeny pomocí ztrátového činitele  $tg\delta$ , který znázorňuje poměr mezi impedančními složkami kapacity a odporu kondenzátoru. Lze ho vypočítat jako:

$$tg\delta \approx \omega C \cdot R_{ESR} \approx \frac{1}{\omega C \cdot R_p} \quad (13)$$

Ztrátový výkon v kondenzátoru je poté určen pomocí vztahu:

$$P_{kon} = I^2 \cdot R_{ESR} \quad (14)$$

Kvůli parazitní indukčnosti a parazitnímu odporu v kondenzátoru se jeho impedance vypočítá jako:

$$Z = \sqrt{R_{ESR}^2 + \left(\omega L_{ESL} - \frac{1}{\omega C}\right)^2} \quad (15)$$

Ztrátový činitel se někdy také vyjadřuje jako tzv. činitel jakosti  $Q$ , což je pouze jeho převrácená hodnota:

$$Q = \frac{1}{tg\delta} \quad (16)$$

Hodnoty těchto veličin bývají běžně uváděny v katalozích výrobců kondenzátorů a na jejich ztráty je potřeba brát ohled, protože mohou vést k přehřátí a následnému zničení komponenty. U kvalitních kondenzátorů nabývá ztrátový činitel hodnot v řádu  $10^{-4}$ . [9][12][14]

### 3.2.3 Ztráty v kontaktech

I v jednotlivých kontaktech celého měniče vznikají ztráty, které jsou zapříčiněny tzv. přechodovým odporem. Tento odpor, kterému se také říká stykový, produkuje na kontaktech nežádoucí teplo. Skládá se ze dvou složek, a to z odporu úžinového  $R_u$ , který je dán díky nedokonalosti povrchu, jelikož se na něm nacházejí nerovnosti a z odporu cizích vrstev  $R_w$ , jež se vytvářejí na kontaktu (oxidy, sulfidy a jiné nečistoty). Výsledný přechodový odpor  $R_k$  lze tedy zapsat jako součet obou složek:

$$R_k = R_u + R_w \quad (17)$$

Díky složitosti výpočtu obou složek odporů se obecně využívá empirický vzorec:

$$R_k = \frac{k_n}{\left(\frac{F_k}{F_1}\right)^{n_1}} \quad (18)$$

Kde  $k_n$  je činitel zachycující druh materiálů a vliv cizích vrstev,  $F_k$  je přítláčná síla,  $F_1$  je síla 1 Newton a  $n_1$  je činitel udávající druh kontaktního styku. Právě díky větší velikosti přítláčné síly a dobrou volbou materiálu, ze kterého bude kontakt vyroben je schopno značně snížit celkový přechodový odpor a zamezit, tak celkovým ztrátám v kontaktech. Tyto ztráty jsou již k dříve uvedeným ztrátám velmi malé, a proto jsou zanedbávány. [12][15]

### 3.2.4 Ztráty v jisticích prvcích

Tyto ztráty se tvoří v komponentách pro omezení přepětí a také vznikají v pojistkách a jiných jisticích prvcích. Jejich hodnoty lze nalézt v katalozích od výrobců daných komponent. Velikost těchto ztrát se v praxi zanedbává. [12]

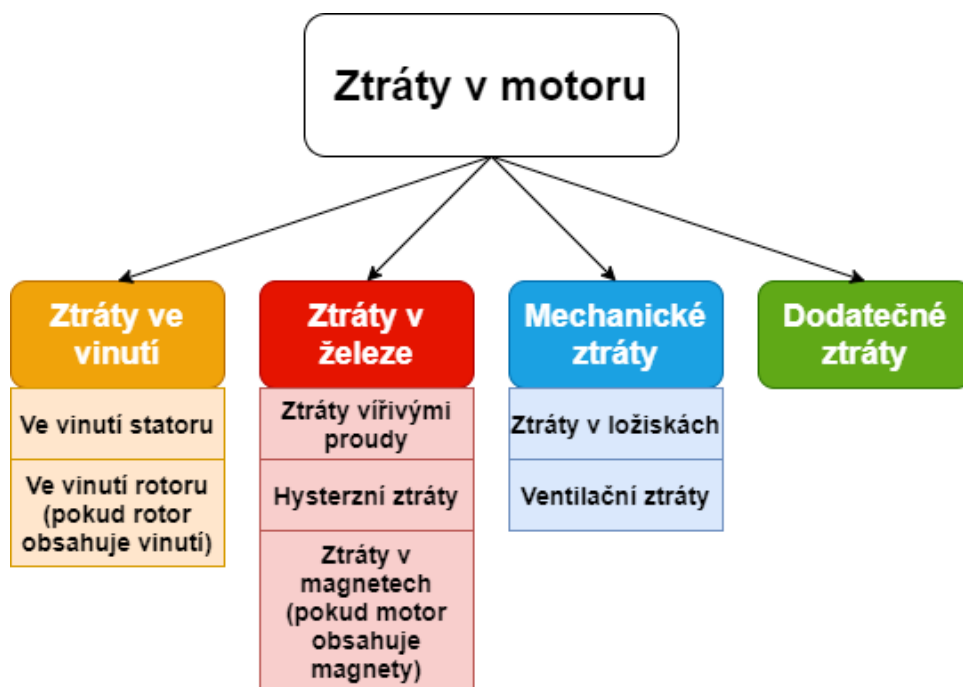
## 3.3 Ztráty v motoru

Existuje několik způsobů, jak zlepšit účinnost a snížit ztráty v elektrických strojích. Obecně lze ztráty v elektrických motorech rozdělit na mechanické ztráty, ztráty ve vinutí, ztráty v železe a dodatečné ztráty, jak je znázorněno na Obr. 7. Tyto ztráty závisí na velikosti, struktuře, typu stroje a dalších faktorech, jako jsou např. vlastnosti magnetického materiálu. [16]

Ztráty výkonu motoru se týkají spotřeby elektrické energie, která se nepřevádí na užitečnou mechanickou energii. Většina ztrát této nevyužité energie se přeměňuje na teplo, které se rozptyluje do motoru a jeho okolního prostředí a podstatně zvyšuje nárůst teploty ve vinutí a zhoršuje výkonové charakteristiky motoru. U motorů s permanentními magnety může dokonce vysoká teplota způsobit i celkovou ztrátu jejich magnetických vlastností. Malá část celkové ztráty výkonu může být přeměněna na zvukovou energii, což vede k vysokému akustickému hluku vyzařovanému z motoru. [11]

I z ekonomického hlediska musí být na vyšší ztráty energie brán ohled, jelikož jsou vždy spojeny se zvýšenými náklady na motor, jako je rychlejší degradace izolačního materiálu, snížená životnost a nižší účinnost. V důsledku toho je velmi žádoucí pochopit mechanismy různých ztrát energie pro jejich maximální snížení a poskytnout nejvhodnější řešení chlazení motoru. [11]

Podle zdroje [11] je přibližné procentuální zastoupení ztrát v motoru následovné. Největší podíl mají ztráty ve statorovém vinutí 35 %. Poté následují ztráty v železe 20 % a ztráty ve vinutí rotoru 20 %. Mechanické ztráty jsou nejmenší 10 %. Zbylé dodatečné ztráty jsou reprezentovány 15 %. [11]



Obr. 7: Rozdělení ztrát v motoru

### 3.3.1 Ztráty ve vinutí

Nejvýznamnější ztráta energie v motoru pochází právě z elektrického odporu statorového vinutí a společně se ztrátami z vinutí rotoru tvoří největší složku celkových ztrát v motoru. Často jsou tyto ztráty nazývány jako ztráty odporové nebo ztráty v mědi. U běžných vodivých materiálů, jako je měď a hliník, je elektrický proud zapříčiněn pohybem elektronů z jednoho atomu na druhý díky působení elektrického pole. Během tohoto procesu do sebe elektrony navzájem narážejí, což spotřebovává určitou energii, která je charakterizována právě jako základní příčina odporu. Odpor ve vinutí závisí především na teplotě, jelikož s vyšší teplotou dochází k většímu počtu srážek elektronů, což má za následek zvětšení celkových ztrát ve vinutí. Ztráty ve vinutí motoru  $P_{cu}$  se obecně vypočítají jako:

$$P_{cu} = m_f \cdot I^2 \cdot R_f \quad (19)$$

Kde  $m_f$  je počet fází motoru,  $I$  je elektrický proud, který protéká motorem a  $R_f$  je elektrický odpor jedné fáze vinutí, který je dán vzorcem:

$$R_f = k_R \cdot \frac{N \cdot l_{av}}{\sigma \cdot S_C} \quad (20)$$

Kde  $N$  je počet závitů jedné fáze vinutí,  $l_{av}$  je průměrná délka vodiče jednoho závitu,  $\sigma$  je specifická elektrická vodivost vodiče a  $S_C$  je průřez jednoho závitu.  $k_R$  je odporový faktor charakterizující skin efekt. Jak již bylo zmíněno, tak velikost odporu je závislá na teplotě, což je vyjádřeno jako:

$$R_f = R_0 \cdot (1 + \alpha \cdot \Delta t) \quad (21)$$

Kde  $R_0$  je odpor vodiče při počáteční teplotě  $t_0$  (zpravidla 20 stupňů Celsia),  $\alpha$  je teplotní součinitel daného materiálu a  $\Delta t$  je teplotní rozdíl od počáteční teploty a aktuální teploty. [11][16]

### 3.3.2 Ztráty v železe

Ztráty v železe vznikají v magnetických částech elektrického stroje a také se někdy označují jako ztráty jádra nebo magnetické ztráty. Jsou vytvářeny měnicím se magnetickým polem v jádrech statoru a rotoru stroje. U vodivých feromagnetických materiálů se ztráty v železe často dělí na ztráty hysterezní a ztráty vířivými proudy. [11][16]

#### 3.3.2.1 Hysterezní ztráty

Hystereze se týká jevu, při kterém magnetická indukce feromagnetického materiálu zaostává za měnicím se magnetickým polem. Když je feromagnetický materiál vystaven magnetickému poli, mají magnetické částice v materiálu sklon se srovnávat s magnetickým polem. Vzhledem k tomu, že magnetické pole stále mění svůj směr, tak se magnetické částice snaží vyrovnat s magnetickým polem. Nepřetržitý pohyb magnetických částic tak produkuje molekulární tření, což vede ke ztrátě energie. Ztráta hystereze je silně ovlivněna elektromagnetickými vlastnostmi materiálu. Empirický vzorec vyjadřující hysterezní ztráty se zapisuje jako:

$$P_h = k_h \cdot B^s \cdot V_c \cdot f \quad (22)$$

Kde  $k_h$  je hysterezní koeficient daného materiálu.  $B$  je velikost magnetické indukce,  $s$  je tzv. Steinmetzův koeficient, který nabývá hodnot od 1,6 do 2,3.  $V_c$  značí objem magnetického jádra a  $f$  je frekvence otáčení magnetického pole. [11][16]

#### 3.3.2.2 Ztráty vířivými proudy

Druhým typem ztrát, které vznikají v železe jsou ztráty vířivými proudy. Na základě Faradayova indukčního zákona se v materiálu, na který působí měnicí se magnetické pole, indukuje vlastní elektromagnetické pole a vznikají v něm proudové smyčky neboli vířivé proudy. Tyto proudy jsou nežádoucí a spotřebovávají značné množství energie. Stejně jako u hysterezních ztrát dochází v důsledku vířivých proudů ke zvýšení teploty. Velikost těchto

ztrát závisí na elektrickém odporu feromagnetické materiálu, a proto jsou jádra v motoru tvořena jednotlivými, tenkými a izolovanými plechy, jelikož mají celkově menší elektrický odpor a také v nich vznikají menší vířivé proudy, než kdyby bylo jádro tvořeno jedním kusem materiálu. Velikost ztrát, které způsobují vířivé proudy lze zjistit z následující rovnice:

$$P_e = \frac{\pi^2}{6} \cdot \sigma \cdot V_c \cdot B^2 \cdot d^2 \cdot f^2 \quad (23)$$

Kde právě  $d$  značí tloušťku plechu nebo materiálu.  $B$  je velikost magnetické indukce,  $V_c$  značí objem magnetického jádra,  $f$  je frekvence otáčení magnetického pole a  $\sigma$  je elektrická vodivost materiálu. [11][16]

### 3.3.2.3 Ztráty v magnetech

Jak již bylo zmíněno dříve, některé principy motorů využívají permanentní magnety, které poskytují lepší vlastnosti stroje. Ovšem i zde musí být brány v potaz tepelné ztráty, jenž vznikají v permanentních magnetech. Vypočítají se jako:

$$P_m = \frac{V_m \cdot B^2 \cdot b_m^2 \cdot f^2}{12 \cdot \rho_m} \quad (24)$$

Kde  $\rho_m$  je měrný elektrický odpor magnetu,  $b_m$  značí tloušťku magnetu,  $B$  je velikost magnetické indukce,  $V_m$  je objem magnetu a  $f$  je frekvence otáčení. [11]

### 3.3.3 Mechanické ztráty

Mechanické ztráty v elektromotoru se vztahují ke ztrátám vznikajících v důsledku mechanického tření mezi dvěma nebo mezi více částmi motoru, které se navzájem dotýkají a mají vůči sobě relativní pohyby. Jakmile tedy dojde k relativnímu pohybu dvou povrchů, které jsou v kontaktu, tak poté vzniká třecí odpor, jehož třecí síla působí proti pohybu daných těles. Ztráty třením nejsou závislé na zatížení, ale jsou závislé na rychlosti stroje. U elektromotorů je velmi žádoucí minimální tření. Hlavní částí mechanických ztrát v elektrickém stroji jsou třecí ztráty v ložiscích a vzduchové ztráty pohyblivých částí stroje v plynech nebo kapalinách. [11][16]

#### 3.3.3.1 Ztráty v ložiscích

Ložiska jsou klíčové komponenty pro rotující stroje, které umožňují pevné usazení rotorové části s co nejmenším třením. Nejběžnějšími používanými ložisky v elektrických strojích jsou ložiska valivá, a to zpravidla kuličková ložiska nebo se také využívají válečková ložiska. Za normálního provozu se valivé prvky ložisek (kuličky nebo válečky) otáčejí a posouvají mezi vnitřní a vnější oběžnou dráhou. Kvůli toho se proto vytváří třecí odpor mezi valivými tělesy a jejich kontaktními součástmi, jako jsou oběžné dráhy, klec a mazivo. [11][16]

Odhaduje se, že ztráty v ložiscích tvoří asi 4 % z celkových ztrát energie v motoru. Na ztráty v ložisku má vliv řada faktorů, například zatížení ložiska, rychlost otáčení hřídele, rozměry ložiska, drsnost valivých těles a oběžných drah, stav mazání a vlastnosti maziva. Pro výpočet celkových ztrát v ložisku se uvádí jeho třecí moment  $M_{lož}$ , který lze vypočítat jako:

$$M_{lož} = 0,5 \cdot \mu \cdot P \cdot D \quad (25)$$

Kde  $\mu$  je koeficient tření daného ložiska,  $P$  je ekvivalentní dynamické zatížení ložiska a  $D$  je jeho vnitřní průměr. Tuto rovnici lze ještě rozepsat jako:

$$M_{lož} = 0,5 \cdot \mu \cdot 0,1 \cdot C \cdot D \quad (26)$$

Kde  $C$  je dynamické zatížení ložiska. Pro zjištění celkové ztráty v ložisku  $P_{lož}$  poté jen stačí jeho třecí moment vynásobit úhlovou rychlostí  $\omega$ :

$$P_{lož} = M_{lož} \cdot \omega \quad (27)$$

Třecí moment daného ložiska je udáván v katalogích od jejich výrobců. [11][16]

### 3.3.3.2 Ventilační ztráty

Ventilační ztráty, které se též nazývají ztráty ve vzduchové mezeře, jsou následkem tření mezi proudícím plynem (obvykle vzduchem) a rotujícími částmi motoru. Vzduch, který se ve vzduchové mezeře pohybuje, začne mít při vyšších otáčkách rotoru turbulentní chování a začnou se tvořit tzv. Taylorovy víry. Právě toto chování vede k většímu tření mezi vzduchem a plochami rotoru. Tyto ztráty závisí především na rychlosti otáčení rotoru, dále pak na tvaru a povrchu materiálu a v neposlední řadě i na daném plynu. Pro výpočet vzduchových ztrát  $P_{\delta}$  je použit vzorec:

$$P_{\delta} = k_r \cdot \pi \cdot \rho \cdot r^4 \cdot \omega^2 \cdot f \cdot l \quad (28)$$

Kde  $k_r$  je koeficient drsnosti povrchu rotoru,  $\rho$  je hustota vzduchu,  $r$  je poloměr rotoru,  $\omega$  je úhlová rychlost,  $f$  je koeficient tření a  $l$  je délka rotoru. [11]

### 3.3.4 Dodatečné ztráty

Dodatečné ztráty se skládají z řady menších ztrát, které nebyly probrány dříve. Výpočet nebo měření těchto ztrát je velmi obtížné, a proto se většina motorových inženýrů při jejich odhadu spoléhá na empirické rovnice. Tyto ztráty představují jen malou část celkové ztráty výkonu motoru. [11][16]

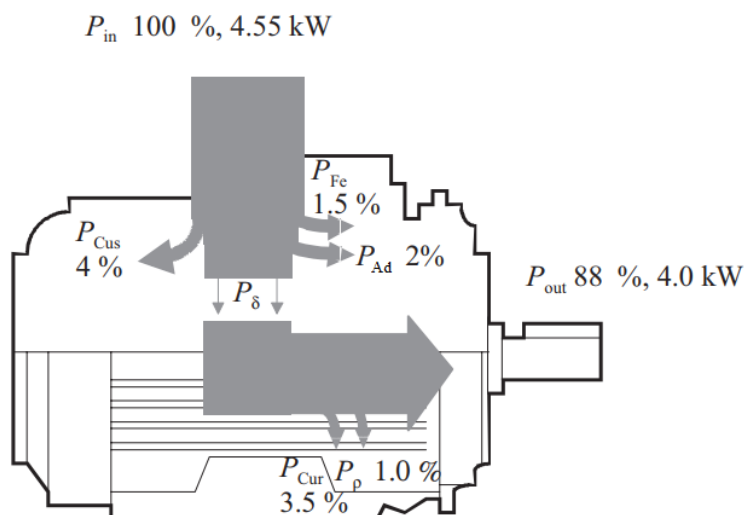
### 3.3.5 Účinnost motoru

Elektrické stroje a motory slouží primárně k transformaci elektrické energie na energii mechanickou nebo také i naopak. Jelikož v motoru vždy vznikají ztráty, tak přeměněná energie nemá stejný výkon, jako energie dodávaná do stroje. Tento fakt popisuje účinnost motoru  $\eta$ :

$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{in}} \quad (29)$$

Kde  $P_{out}$  je výkon motoru a  $P_{in}$  je příkon dodávaný do motoru. Účinnost je pak vyjádřena v procentech. [16]

Na následujícím Obr. 8 lze vidět Sankeyův diagram klasického indukčního motoru o výkonu 4 kW, na kterém jsou zaznamenány jednotlivé ztráty v motoru, které byly v předchozích podkapitolách detailně popsány a kvůli nimž právě klesá celková účinnost motoru. Lze vidět, že z dodávaného příkonu se 12% energie přemění v teplo nebo jiné neúčinné jevy. [16]

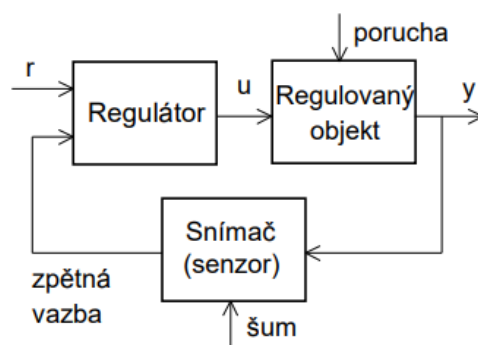


Obr. 8: Sankeyův diagram klasického indukčního motoru o výkonu 4kW ( $P_{Fe}$  – ztráty v železe,  $P_{Cus}$  – ztráty ve satorovém vinutí,  $P_{Ad}$  – dodatečné ztráty,  $P_{\delta}$  – ventilační ztráty,  $P_{Cur}$  – ztráty v rotorovém vinutí,  $P_p$  – ztráty v ložiscích) [16]

## 4 REGULÁTORY A JEJICH NASTAVENÍ S VLIVEM NA SERVOPOHON

### 4.1 Princip zpětnovazebního řízení

Pro servopohony se využívá především zpětnovazebního řízení v uzavřené smyčce, jehož princip lze vidět na Obr. 9. Do regulátoru vstupuje informace o žádané hodnotě  $r$  společně s informací o skutečné hodnotě  $y$ , která je získána právě díky zpětné vazby kde probíhá odměřování pomocí daného senzoru. Regulátor poté nastaví řídicí veličinu  $u$  pro regulovaný objekt. Pro snímanou zpětnovazební hodnotu musí být brán v úvahu i šum, který ovlivňuje výslednou velikost měřené veličiny. Stejně tak vstupují do regulovaného objektu i poruchy, které reprezentují různé změny nastavení či zátěže dané soustavy. Vhodným zvolením regulátoru a jeho následným správným nastavením lze docílit stabilní regulace s požadovaným dynamickým chováním regulované soustavy. [17][18]



Obr. 9: Schéma principu zpětnovazebního řízení [17]

### 4.2 Regulátory a vliv regulačních členů na regulaci

Díky regulačním členům, ze kterých je regulátor složen, lze při vhodném nastavení jednotlivých složek získat požadovanou odezvu regulátoru. Každý regulační člen má jiné vlastnosti, které ovlivňují výslednou regulaci. Regulátory fungují pomocí tří členů, a to pomocí proporcionálního členu, integračního členu a derivačního členu. [19]

#### 4.2.1 Proporcionální člen (P-regulátor)

Proporcionální člen si lze jednoduše představit jako zesilovač. Díky tomuto členu dochází pouze k zesílení signálu. V ideálním případě bude odezva na jednotkový skok u proporcionálního členu konstantní a přenosová funkce bude mít tedy tvar:

$$F(p) = K_p \quad (30)$$

Kde  $K_p$  je právě zesílení proporcionálního členu. P-regulátor má velmi dobré stabilní vlastnosti a používá se např. pro stabilizaci napětí, proudu, polohy atd. [17][19]



#### 4.2.2 Integrovační člen (I-regulátor)

Integrovační člen reguluje danou soustavu pomocí časové integrace odchylky mezi skutečnou a požadovanou hodnotou, která vstupuje do regulátoru. Je tedy logické, že při konstantní odchylce vzrůstá akční veličina vycházející z regulátoru lineárně s časem. Tento růst bude pokračovat tak dlouho, dokud nebude regulační odchylka nulová nebo dokud nebude dosaženo maximální výstupní hodnoty. Přenosová funkce bude mít tedy tvar:

$$F(p) = \frac{K_i}{p} = \frac{1}{p\tau_i} \quad (31)$$

Kde  $K_i$  je zesílení integrovačního členu, které navíc určuje sklon přímky při odezvě např. na jednotkový skok. Lze využít i vyjádření pomocí integrovační časové konstanty  $\tau_i$ . Doba regulace je podstatně pomalejší než u regulátoru P, ale je daleko přesnější a plynulejší. Při špatném nastavení může ovšem dojít k nestabilitě a rozkmitání regulované soustavy. [17][19]

#### 4.2.3 Derivační člen (D-regulátor)

Derivační člen na rozdíl od integrovačního členu reguluje danou soustavu pomocí časové derivace odchylky mezi skutečnou a požadovanou hodnotou, která vstupuje do regulátoru. Akční veličina je tedy úměrná změnám regulační odchylky v čase. Přenosová funkce má tvar:

$$F(p) = pK_d \quad (32)$$

Kde  $K_d$  je zesílení derivačního členu. V praxi se D-regulátor samostatně nevyužívá díky jeho neschopnosti odstranit regulační odchylku. Ovšem v kombinaci s výše uvedenými členy je velmi přínosný, jelikož díky němu dochází k ustálenému stavu daleko rychleji a má příznivý účinek i na stabilitu regulované soustavy. [17][19]

#### 4.2.4 PD-regulátor

Kombinací proporcionálního a derivačního členu je získán PD-regulátor, jenž má velice dobré dynamické vlastnosti. Oproti jednoduchému P-regulátoru dokáže rychleji zregulovat soustavu, snížit velikost regulační odchylky a zlepšit stabilitu regulované soustavy. Je vhodný pro zařízení, kde není důležitá přesnost řízení, nýbrž rychlost odezvy. V praxi se moc často nepoužívá a tvar přenosové funkce je následující:

$$F(p) = K_p + pK_d \quad (33)$$

Často se však přenosová funkce vyjadřuje pomocí časových konstant:

$$F(p) = K_p(1 + p\tau_d) \quad \tau_d = \frac{K_d}{K_p} \quad (34)$$

V tomto případě je definována derivační časová konstanta  $\tau_d$  jako poměr derivačního zesílení  $K_d$  ku proporcionálnímu zesílení  $K_p$ . [17][19]

#### 4.2.5 PI-regulátor

Proporcionálně integrační regulátor nachází v praxi největší uplatnění především díky schopnosti vynulování regulační odchylky. PI-regulátor má velmi dobrou odezvu na změnu požadované vstupní hodnoty a integrační člen regulátoru zajišťuje vysokou přesnost výsledné regulace. Používá se např. pro regulaci proudu, rychlosti nebo momentu a jeho přenosová funkce má tvar:

$$F(p) = K_p + \frac{K_i}{p} \quad (35)$$

Po úpravě pomocí časové konstanty lze vyjádřit přenosovou funkci jako:

$$F(p) = K_p \left( \frac{1 + p\tau_i}{p\tau_i} \right) \quad \tau_i = \frac{K_p}{K_i} \quad (36)$$

U PI-regulátoru je definována integrační časová konstanta  $\tau_i$  jako poměr proporcionálního zesílení  $K_p$  k integračnímu zesílení  $K_i$ . [17][19]

#### 4.2.6 PID-regulátor

Posledním regulátorem, o kterém zde bude zmínka, je PID-regulátor, který kombinuje všechny tři základní členy dohromady. Díky tomu přejímá i jejich hlavní vlastnosti, které vytvoří regulátor, jenž má vysoké dynamické vlastnosti, dobrou stabilitu a výbornou přesnost výsledné regulace. Z tohoto pohledu se PID-regulátor jeví jako nejkvalitnější, ale na druhou stranu i jako nejsložitější. Přenosová funkce tohoto regulátoru je:

$$F(p) = K_p + \frac{K_i}{p} + pK_d \quad (37)$$

S využitím časových konstant je přenosová funkce upravena a její tvar je nyní následovný:

$$F(p) = K_p \left( 1 + \frac{1}{p\tau_i} + p\tau_d \right) \quad (38)$$

PID-regulátor tedy využívá integrační časovou konstantu  $\tau_i$  i derivační časovou konstantu  $\tau_d$ . [17][19]

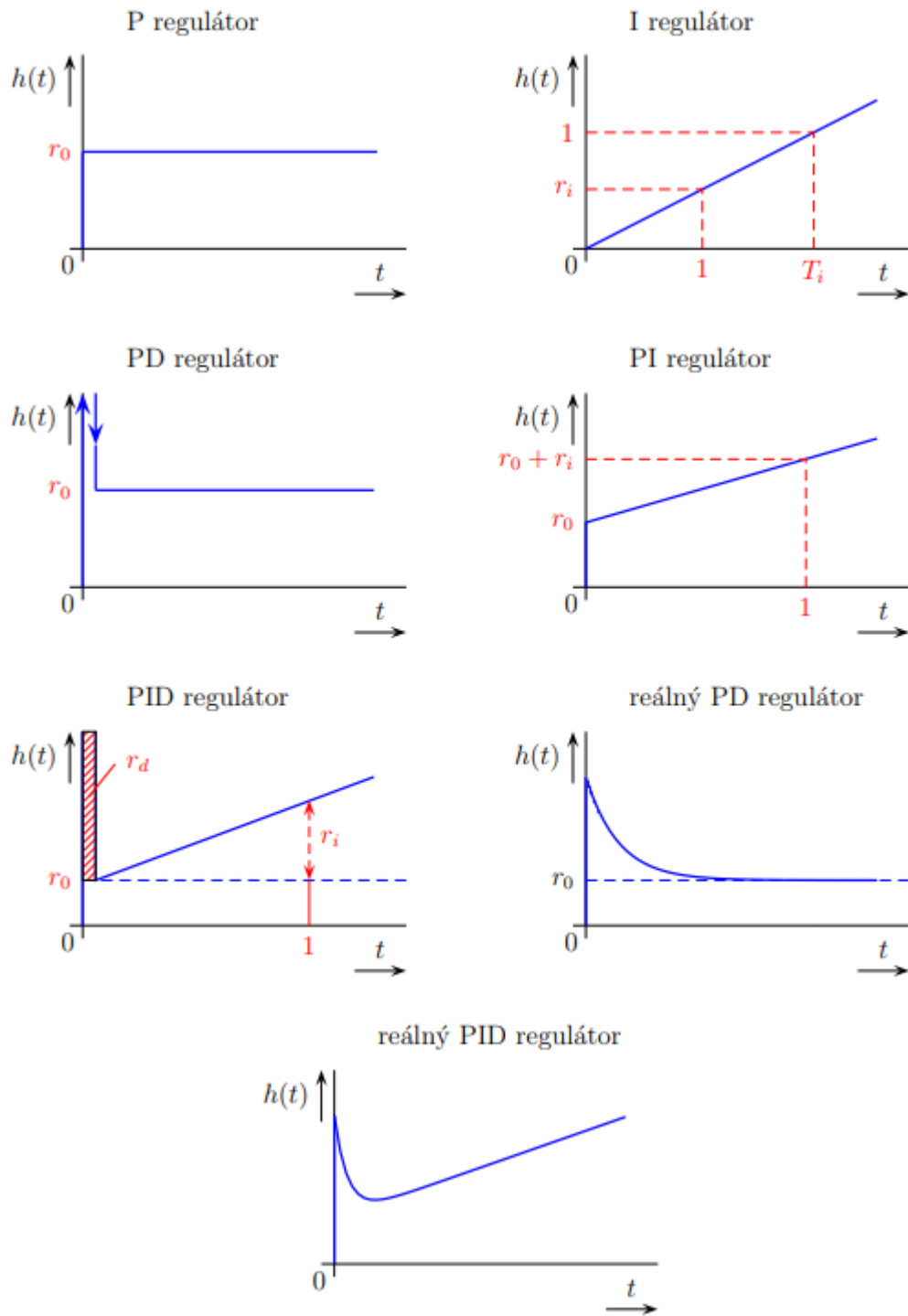
#### 4.2.7 Vliv parametrů na regulaci a přechodové charakteristiky regulátorů

Každý z jednotlivých regulačních členů má svůj charakteristický vliv na danou regulační soustavu. Pro přehlednost těchto účinků byla vytvořena následující Tab. 1, kde je srozumitelně znázorněno, jak daný parametr ovlivňuje výslednou regulaci.

Zvyšující se parametr	Doba nárůstu	Překmit	Doba ustálení	Ustálená chyba	Stabilita
$K_p \uparrow$	Snižuje	Zvyšuje	Malé změny	Snižuje	Zhoršuje
$K_i \uparrow$	Snižuje	Zvyšuje	Zvyšuje	Eliminuje	Zhoršuje
$K_d \uparrow$	Malý nárůst	Snižuje	Snižuje	Bez vlivu	Zlepšuje

Tab. 1: Vliv parametrů na výslednou regulaci [20]

Každý typ regulátoru má také svoji přechodovou charakteristiku. Tato charakteristika je vytvořena na základě odezvy regulátoru na jednotkový skok. Základní přechodové charakteristiky jednotlivých regulátorů jsou zobrazeny na Obr. 10.

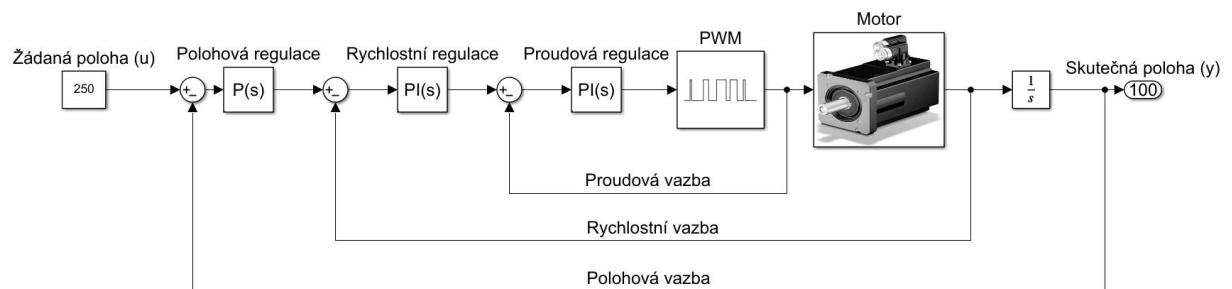


Obr. 10: Přečhodové charakteristiky pro jednotlivé regulátory [17]

### 4.3 Kaskádní regulace

Pro vhodnou regulaci servopohonů se využívá především tzv. kaskádní regulace. Je to forma zpětnovazebního řízení, jenž využívá zapojení více regulátorů do kaskády, což vede k celkovému zlepšení regulace. Nejčastěji se používá kaskádní regulace ve formě tří hierarchicky uspořádaných uzavřených smyček. Jedná se o smyčku proudovou, rychlostní a polohovou. [21]

Na Obr. 11 lze vidět princip funkce kaskádní regulace, kdy do P-regulátoru polohy vstupuje rozdíl mezi žádanou a skutečnou polohou. Výstupem je pak požadovaná rychlost daného motoru, která se následně porovná se skutečnou rychlostí motoru. Tento rozdíl poté vstupuje do PI-regulátoru rychlosti. Z regulátoru rychlosti nyní vychází signál o požadovaném proudu, který se opět porovná se skutečným proudem, jenž teče motorem. Rozdíl těchto hodnot je použit jako vstupní signál do PI-regulátoru proudu. Výstupem proudového regulátoru je signál pro řízení obvodů výkonových spínacích tranzistorů (měničů). Toto řízení se provádí pomocí pulzní šířkové modulace (PWM). Na základě PWM řízení je generováno napětí na svorkách motoru díky čemuž motorem začne protékat proud. [21]



Obr. 11: Schéma kaskádní regulace

#### 4.3.1 Proudová zpětná vazba

Pomocí proudové zpětné vazby s PI-regulátorem lze potlačit zpomalující vliv indukčnosti vinutí motoru, což vede k výraznému zrychlení proudové regulace. Dále pak lze potlačit vliv vnitřního indukovaného napětí, jenž působí proti napětí zdroje, což může vést k omezení proudu a tím i k omezení síly motoru při vysokých rychlostech. Výsledná regulace proudu je poté mnohem rychlejší a kvalitnější. Pro měření proudu se nejčastěji využívá snímač s Hallovou sondou. Jelikož proudový PI-regulátor závisí pouze na vlastnostech daného pohonu a není ovlivněn žádnými vlastnostmi stroje, na kterém je daný pohon použit, tak se seřízení jeho nastavení provádí přímo u výrobce daného pohonu. [22]

#### 4.3.2 Rychlostní zpětná vazba

Správné seřízení rychlostního PI-regulátoru je nejdůležitějším a zároveň také nejobtížnějším úkolem v celé regulaci servopohonu. Na rozdíl od proudového regulátoru už musí být počítáno s různými vlastnostmi a parametry daného zařízení (hmotnosti, setrvačnosti atd.), které je motorem poháněno. Proto již nastavení rychlostního regulátoru neprobíhá hned ve výrobě nýbrž je prováděno odborníkem na seřízení servopohonů, který je obeznámen se situací, kde má být servopohon použit. [22]

Pro správné nastavení PI-regulátoru rychlosti se nejprve doporučuje zcela vyloučit integrační složku regulátoru nebo nastavit hodnotu integračního zesílení  $K_i$  jako velmi malou, resp. integrační časovou konstantu  $\tau_i$  jako velmi velkou, čímž je zajištěna určitá rezerva stability. Poté se může začít s nastavováním proporcionální složky  $K_p$ . Snahou je nastavit co největší možné proporcionální zesílení zároveň s co nejnižší možnou integrační časovou konstantou, aniž by soustava byla přetlumená nebo začala kmitat. Díky správnému nastavení rychlostní zpětné vazby nezávisí nastavená rychlost na vnějších silách a soustava má dokonalou statickou tuhost, jenž je přenesena do polohové zpětné smyčky. [22]

### 4.3.3 Polohová zpětná vazba

Při správném nastavení proudového a rychlostního regulátoru je pro polohovou smyčku využíván pouze P-regulátor, jelikož je poloha jednoznačně matematicky svázána s rychlostí a není tedy nutné používat PI-regulátor. Celou tuto zpětnou vazbu lze v ideálním případě jednoduše popsat pomocí tří následujících rovnic:

$$\Delta = u - y \quad (39)$$

První rovnice popisuje okamžitou odchylku  $\Delta$  mezi žádanou polohou  $u$  a skutečnou polohou  $y$ .

$$v = K_p \cdot \Delta \quad (40)$$

Druhá rovnice vyjadřuje rychlost  $v$ , jenž závisí právě na okamžité odchylce  $\Delta$  a na velikosti proporcionálního zesílení  $K_p$ .

$$v = \frac{dy}{dt} \quad (41)$$

Poslední rovnice znázorňuje fyzikální závislost mezi rychlostí  $v$  a polohou  $y$ . Díky kombinaci těchto tří rovnic lze popsat průběh polohové regulace pomocí pohybové diferenciální rovnice 1. řádu jako:

$$\frac{1}{K_p} \cdot \frac{dy}{dt} + y = u(t) \quad (42)$$

Výsledkem správného a kvalitního nastavení polohové zpětné vazby by měl být plynulý průběh polohy podle žádané polohy bez žádných překmitů s minimálním obsahem kmitavých složek. [22]

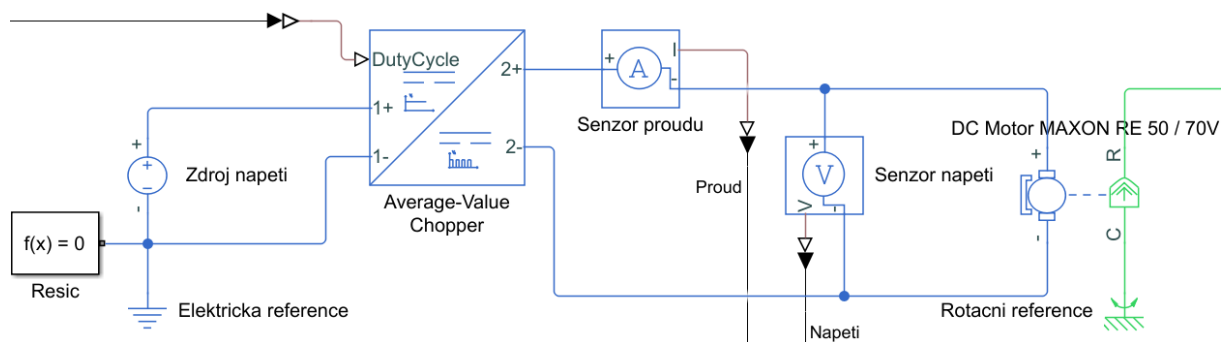
## 5 PRAKTICKÁ ČÁST – MODEL REGULACE DC MOTORU S LINEÁRNÍ OSOU

V této kapitole byl v programu Matlab/Simulink vytvořen jednoduchý model DC motoru s kaskádní regulací, který pohání mechanickou soustavu, jenž je tvořena kuličkovým šroubem se stolem a reprezentuje v podstatě jednu osu obráběcího stroje. Pro modelování byly především použity „Simscape“ bloky v knihovně programu Simulink. Dále zde byly vytvořeny skripty, ve kterých je definován požadovaný pohyb pro stůl a zároveň jsou v nich generovány požadované průběhy a data celého modelu.

### 5.1 Volba motoru a elektrická část modelu

Nejdříve byl vložen blok charakterizující DC motor z knihovny „Simscape“. Pro model byl zvolen kartáčový DC motor RE 50 od firmy MAXON s výkonem  $200\text{ W}$  a s hřídelí o průměru  $8\text{ mm}$ . Díky katalogovému listu od výrobce se v bloku motoru nastavily požadované parametry jako odpor vinutí na  $3,9\ \Omega$ , indukčnost vinutí na  $2,83\text{ mH}$ , momentová konstanta na  $242\text{ mNm/A}$  či moment setrvačnosti rotoru na  $560\text{ g}\cdot\text{cm}^2$ .

Dále zde byl přidán blok pro napájecí zdroj. Jmenovité napětí je pro daný motor  $70\text{ V}$ , a proto je v bloku použita stejná hodnota. Zdroj napětí je spojen s blokem s názvem „Average Value Chopper“, který reprezentuje „H-bridge“, jenž řídí napájecí napětí přiváděné na motor. Aby se mohl motor otáčet v obou směrech, tak je nastavení bloku „H-bridge“ definováno jako čtyř-kvadrantové. Mezi motorem a čtyř-kvadrantovým měničem je sériově zapojen senzor pro měření proudu tekoucího motorem a také je zde paralelně připojen senzor pro měření napětí na motoru. Daný signál je poté možno zobrazit přes připojený blok s názvem „Scope“. Elektrická část poté musí obsahovat elektrickou referenci společně s řešičem celého modelu. Pro daný model byl použit řešič „ode23t“, který se pro tento typ simulací hojně využívá. Samotný blok pro DC motor musí být poté připojen na rotační mechanickou referenci, což znamená, že je stator motoru pevně uchycen. Elektrickou část modelu lze vidět na Obr. 12. Z motoru poté navazuje spojení na mechanickou část modelu.



Obr. 12: Elektrická část modelu

## 5.2 Mechanická část modelu

Mechanickou část modelu, která je připojena na motor, lze rozdělit na rotační část a na část translační.

### 5.2.1 Rotační část

V rotační části (Obr. 13) jsou připojeny senzory pro měření momentu a pro měření úhlové rychlosti a natočení. Díky signálu úhlové rychlosti v radiánech za sekundu a známému přepočtu pomocí  $60/2\pi$  lze snadno získat rychlost v otáčkách za minutu, které se běžně využívají.

K přeměně rotační energie na translační byl využit kuličkový šroub s maticí, který obecně představuje velmi efektivní řešení pro výslednou výbornou přesnost a rychlost. Motor tedy pohání kuličkový šroub MDK 0802-3 od firmy THK s průměrem 8 mm, s délkou 500 mm a se stoupáním 2 mm na otáčku. Tyto hodnoty byly zapsány do příslušného bloku pro kuličkový šroub společně s jeho účinností, která byla obecně stanovena jako 92 % podle [23]. Kuličkový šroub je rotační částí mechanické soustavy, a proto musí být brán v potaz i jeho moment setrvačnosti, který má velikost  $3,16 \cdot 10^{-9} \text{ kg} \cdot \text{m}^2/\text{mm}$ . Jelikož je tento moment setrvačnosti definován na milimetr, tak je nutné ho ještě v daném bloku vynásobit i délkou šroubu 500 mm.

Spojení 8 milimetrové hřídele motoru s 8 milimetrovým kuličkovým šroubem bylo řešeno pomocí rotační pružné spojky ROTEX GS. Díky pozdějšímu znehodnocování výsledků z důvodu zvýšeného kmitání byla tato spojka z modelu odebrána. Samotný kuličkový šroub byl na obou koncích uchycen v kuličkových ložiscích W617/8 od firmy SKF. Do modelu byly proto přidány bloky vyjadřující rotační ztráty pro ložiska, ve kterých se zadaly parametry jako třecí moment ložiska vypočtený pomocí dosazení známých parametrů do rovnice (26), kde součinitel tření kuličkového ložiska byl 0,0015. Vnitřní průměr ložiska byl 8 mm a ekvivalentní dynamické zatížení se vypočítalo pomocí dynamického zatížení ložiska, což bylo 312 N. Výsledný třecí moment ložiska měl tedy velikost:

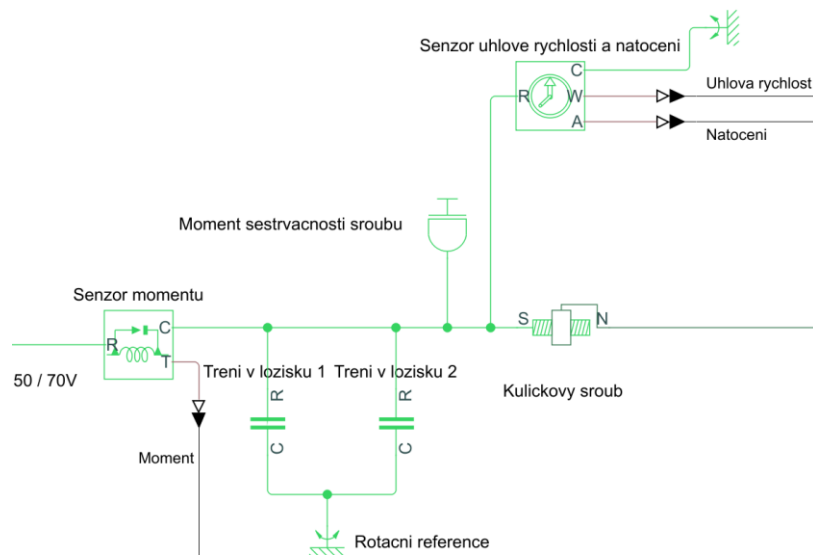
$$M_{lo\check{z}} = 0,5 \cdot \mu \cdot 0,1 \cdot C \cdot D = 0,000187 \text{ Nm} \quad (43)$$

Dále se pak zde zadal i součinitel viskózního tření  $b$ , který byl vypočítán pomocí vzorce:

$$b = \frac{M_{lo\check{z}}}{\omega} = \frac{M_{lo\check{z}}}{\frac{2 \cdot \pi \cdot n_{jm}}{60}} = \frac{0,000187}{251,33} = 7,44 \cdot 10^{-7} \text{ Nm} \cdot \text{s} \quad (44)$$

Kde úhlová rychlost  $\omega$  byla vypočítána z jmenovitých otáček motoru  $n_{jm}$ , které jsou 2470 *ot/min*. V rotační části jsou poté ještě přidány rotační reference.





Obr. 13: Rotační část modelu

### 5.2.2 Translační část

Stejně jako v rotační části je i v translační části (Obr. 14) analogicky připojen senzor pro snímání síly a senzor pro snímání polohy a posuvové rychlosti. Kuličkový šroub pohybuje s maticí a se stolem na kterém je umístěn obrobek, a proto musí být v této části přidány bloky reprezentující hmotnost těchto objektů. Hmotnost matice je zadána jako  $0,034 \text{ kg}$  a hmotnost stolu s obrobkem je reprezentována blokem o hmotnosti  $5 \text{ kg}$ . Na obrobek poté působí určitá obráběcí síla, kterou do modelu lze přidat pomocí bloku zdroje síly. Samotná obráběcí síla bude definována později.

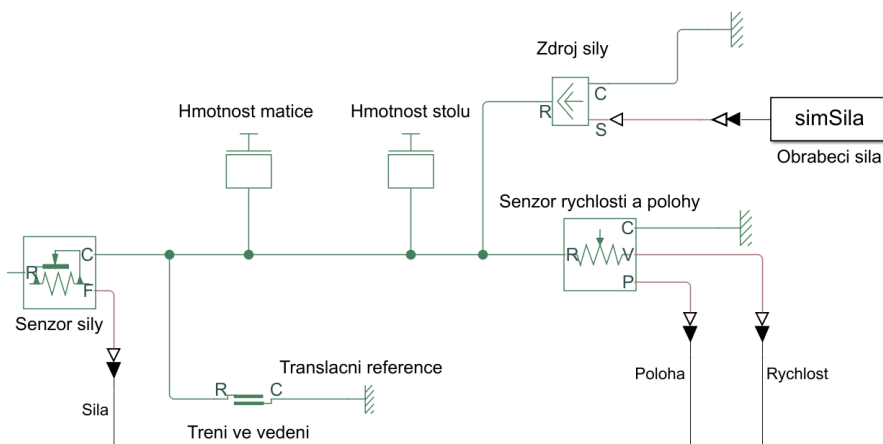
Stůl se pohybuje po lineárním vedením, ve kterém vznikají třecí ztráty. Pro tyto ztráty je do modelu přidán blok vyjadřující translační ztráty. Do tohoto bloku jsou analogickým způsobem, jako tomu bylo u rotačních ztrát v ložiscích, zadány parametry jako třecí síla  $F_t$ , která se vypočítá jako:

$$F_t = F_g \cdot \mu = m \cdot g \cdot \mu = 5 \cdot 9,81 \cdot 0,15 = 7,358 \text{ N} \quad (45)$$

Kde  $\mu$  je součinitel smykového tření ve vedení, jehož hodnota je pro ocelové nebo povrchy ze šedé litiny  $0,15$ . Tíhová síla  $F_g$  pak lze rozepsat jako hmotnost  $m$  (v tomto případě  $5 \text{ kg}$ ) vynásobenou gravitačním zrychlením  $g$ , což je  $9,81 \text{ m/s}^2$ . Dále se pak zde zadal i součinitel viskózního tření  $b$ , který byl vypočítán pomocí vzorce:

$$b = \frac{F_t}{v} = \frac{F_t}{\frac{n_{jm} \cdot s}{60}} = \frac{7,358}{0,08} = 91,975 \text{ N} \cdot \text{s/m} \quad (46)$$

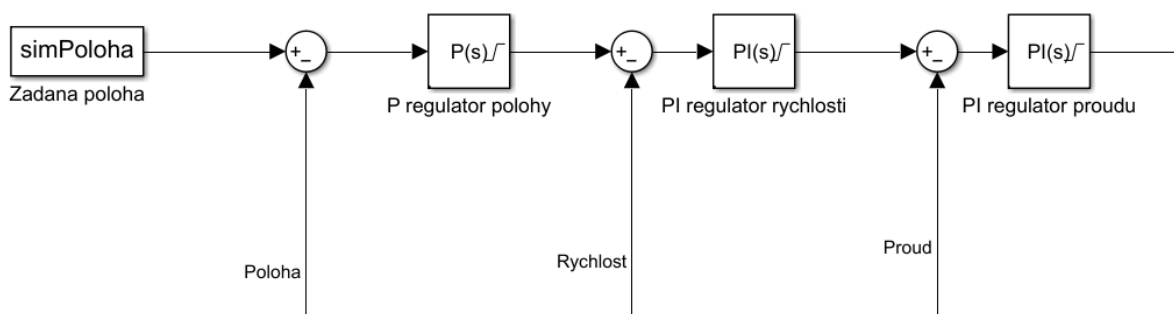
Kde posuvová rychlost  $v$  byla vypočítána z jmenovitých otáček motoru  $n_{jm}$ , které jsou  $2470 \text{ ot/min}$  a ze stoupání závitu šroubu  $s$  ( $2 \text{ mm}$  na otáčku). V translační části jsou poté ještě přidány translační reference.



Obr. 14: Translační část modelu

### 5.3 Řídící část modelu a nastavení jednotlivých regulátorů

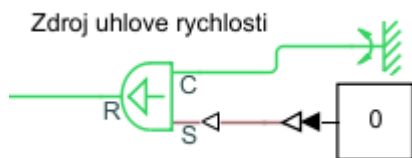
V řídicí části modelu (Obr. 15) je vytvořena kaskádní regulace pomocí PI-regulátoru proudu, PI-regulátoru rychlosti a P-regulátoru polohy. Každý regulátor se nastavuje zvlášť s tím, že se nejprve začíná od proudového regulátoru. Musí být brán v potaz fakt, že regulátory jsou do modelu přidávány postupně to znamená, že další regulátor může být připojen až po úspěšném naladění předchozího regulátoru.



Obr. 15: Regulační část modelu

#### 5.3.1 Nastavení PI-regulátoru proudu

Pro nastavení PI-regulátoru proudu je vhodné nejprve motor zabrzdit. To je realizováno pomocí bloku zdroje úhlové rychlosti (Obr. 16), který je připojen na motor a do kterého je přivedena nulová hodnota. Tento blok tedy zamezí jakémukoliv otáčení motoru. Nyní se může připojit blok pro proudový regulátor, před který je umístěn blok, do kterého vstupuje žádaná a aktuální hodnota proudu. V bloku regulátoru se nejprve zvolí typ regulátoru jako PI a v ideální formě. Z regulátoru proudu vystupují signály pro ovládání čtyř-kvadrantového měniče. Tyto signály nabývají hodnot od 1 do -1 a proto musí být v bloku regulátoru v záložce „Saturation“ nastaveny omezení na 1 a -1. Nyní je možné nastavit regulátor pomocí nástroje „Tune“ na doporučené hodnoty, které jsou poté manuálně dopraveny, tak aby odezva na jednotkový skok byla optimální. V tomto případě bylo použito nastavení 0,08 pro proporcionální složku a 400 pro integrační složku. Jakmile je PI-regulátor proudu naladěn, tak se může motor odbrzdit odebráním zdroje úhlové rychlosti.



Obr. 16: Nulový zdroj rychlosti pro zabrzděný motor

### 5.3.2 Nastavení PI-regulátoru rychlosti

Po úspěšném nastavení PI-regulátoru proudu lze připojit PI-regulátor rychlosti pomocí dalšího bloku. Do tohoto regulátoru vstupuje rozdíl mezi žádanou posuvovou rychlostí stolu a skutečnou posuvovou rychlostí stolu. Výstupem je pak proud vstupující do regulátoru proudu. Jelikož je maximální proud motorem stanoven na 17,9 A podle datasheetu motoru, tak je v bloku regulátoru v záložce „Saturation“ nastaveno omezení na hodnoty 8 a -8 A. Tyto hodnoty jsou záměrně přibližně o polovinu menší, proto aby se předcházelo mezním hodnotám motoru a zkreslením výsledků. Stejně jako u předchozího regulátoru je i v tomto případě nastaven v bloku typ regulátoru jako PI v ideální formě. Dále byl regulátor pomocí nástroje „Tune“ naladěn a poté manuálně upraven na hodnoty proporcionální složky jako 100 a integrační složky jako 2. Toto nastavení představovalo optimální odezvu na jednotkový skok.

### 5.3.3 Nastavení P-regulátoru polohy

V posledním kroku byl připojen P-regulátor polohy. Do tohoto regulátoru vstupuje rozdíl mezi požadovanou a skutečnou polohou stolu. Výstupem je pak posuvová rychlost stolu. I v tomto regulátoru je nastaveno omezení v záložce „Saturation“ na 0,08 a -0,08 m/s. Tyto hodnoty představují jmenovitou posuvovou rychlost stolu získanou pomocí přepočtu jmenovitých otáček a stoupání šroubu. Na rozdíl od předešlých regulátorů je v bloku vybrán typ regulátoru jako P. Regulátor je opět naladěn na doporučenou hodnotu skrze nástroj „Tune“ a poté byla proporcionální hodnota manuálně stanovena na 10, což zajistilo kvalitní průběh celé regulované soustavy.

## 5.4 Definice pohybu

Pro definici pohybu se v tomto případě postupovalo stejným způsobem, jako je uvedeno ve zdroji [24], kde autor použil dvě metody definice. Za prvé byl pohyb definován s lineárním zrychlením a za druhé byl pohyb definován pomocí zrychlení s tzv. S-křivkami. V obou případech se musely stanovit 3 parametry, které určily celý průběh pohybu. Nejprve musela být stanovena rovnoměrná rychlost při běhu. Poté se stanovil čas rozběhu a doběhu to znamená za jak dlouho má stůl dosáhnout požadované rychlosti. Poslední parametr byl čas běhu, ve kterém se stůl pohyboval právě rovnoměrnou rychlostí. [24]

### 5.4.1 Pohyb s lineárním zrychlením

Tento typ pohybu je rozdělen do 3 částí. V první části se motor rozbíhá na rovnoměrnou rychlost pomocí lineárního zrychlení  $a_s$ . To je jednoduše definované pomocí vzorce:

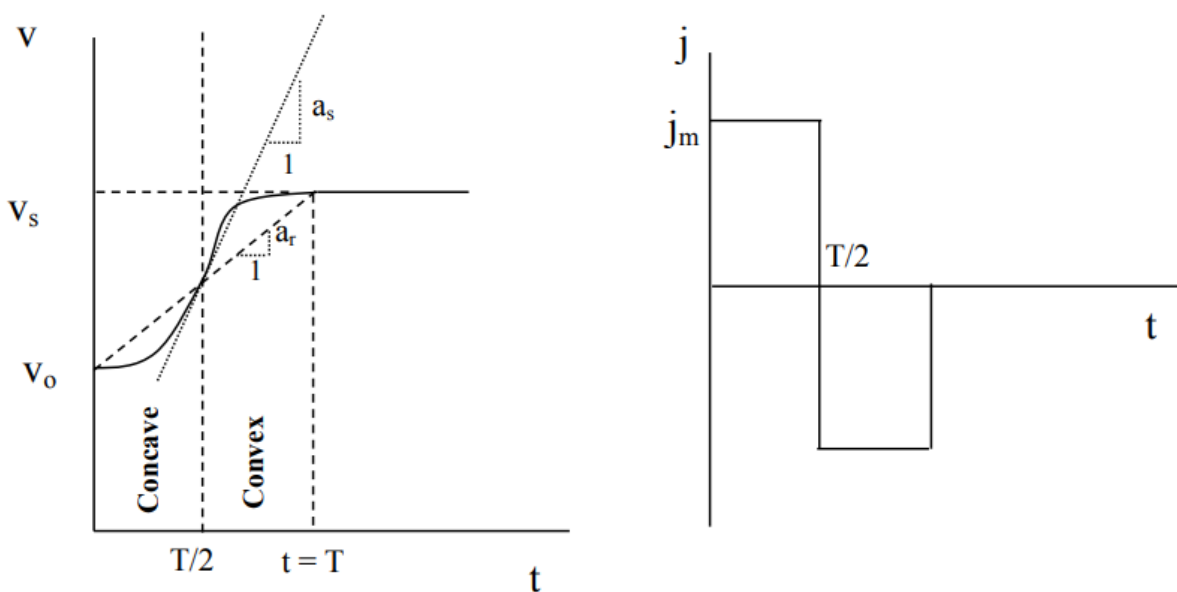
$$a_s = \frac{v_s}{t} \quad (47)$$

Kde  $v_s$  je rovnoměrná rychlost a  $t$  je čas za který se tato rychlost musí dosáhnout. Následuje rychlostně konstantní část, při které se motor otáčí požadovanou rychlostí. V poslední části motor zpomaluje opačným zrychlením jako je uvedeno v rovnici (59). [24]

### 5.4.2 Pohyb s S-křivkami

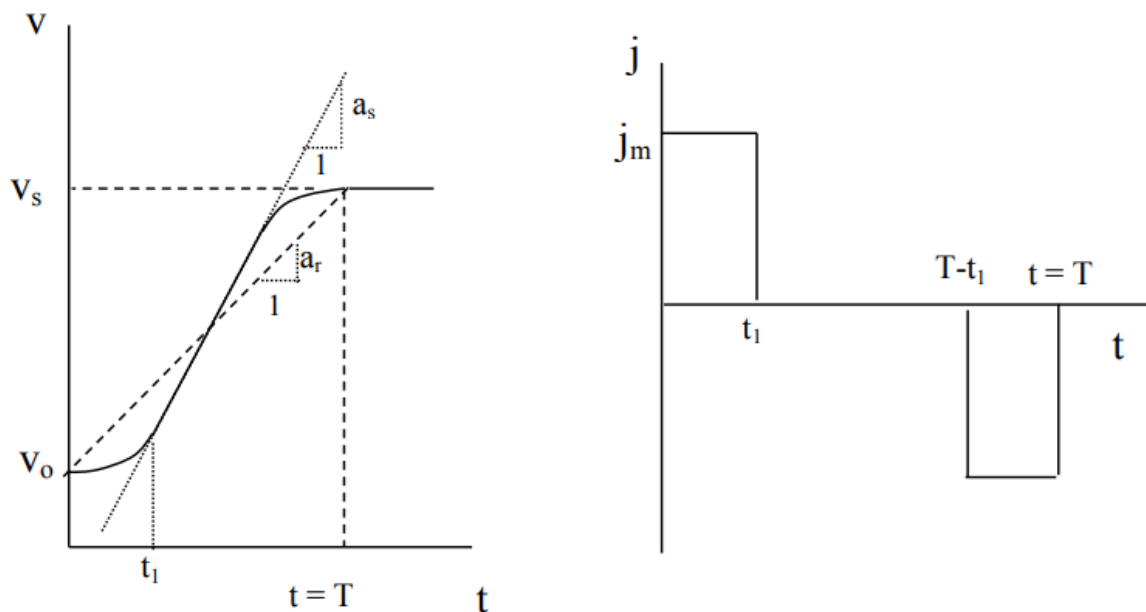
Stejně jako u pohybu s lineárním zrychlením, tak i zde bude pohyb rozdělen do 3 základních částí. Jedná se však o trochu složitější problematiku, kterou je potřeba více objasnit. Sládek (2019, s. 38) definuje tento pohyb s využitím zdroje [25] takto: „S-křivky se středně konstantním zrychlením se často používají ke zkrácení doby potřebné pro velké změny rychlosti. Konstantní jerky S-křivek se používají k přechodným pohybům stroje, používá se k eliminaci nespojitosti zrychlení, které jsou škodlivé pro výkon stroje. Nejčastější typ pohybu zahrnuje konvexní a konkávní S-křivky, lineární zrychlení (nebo zpomalení) neboli oblast, kde je jerk nulový a oblast, kde je zrychlení nulové, tedy oblast s konstantní rychlostí, kde se uskutečňuje většina pohybu.

Ideální S-křivka je zobrazena na Obr. 17, jedná se o S-křivku bez lineární přechodové části. Plocha pod konkávní a konvexní částí křivky S je stejná jako plocha pod konstantní zrychlovací rampou ( $a_r$ ). Konstantní profil rampy tak může být použit pro pomoc při rozhodování o trajektorii profilu S-křivky, jako je předvídaní času  $T$  pro pohyb na nastavenou rychlost.



Obr. 17: Ideální S-křivka [25]

V případě velké změny rychlosti se aplikuje S-křivka s lineárním zrychlením mezi konvexní a konkávní částí. Tento případ platí i pro zadaný příklad. Na Obr. 18 je zobrazený průběh rychlosti na čase, který je proložený křivkou s popisovanými vlastnostmi, tedy v oblasti do  $t_1$  je konvexní, poté je zrychlení lineární a následuje konkávní přechod do zrychlení rovno nule, kdy je konstantní rychlost.“ [24][25]



Obr. 18: S-křivka s lineárním zrychlením [25]

Aby tento příklad mohl být zapsán pomocí vzorců, tak je potřeba si tuto oblast rozdělit na tři fáze. Na konvexní, lineární a konkávní. [24][25]

Fáze 1 – konkávní ( $0 \geq t \geq t_1$ )

Pro konkávní část platí tyto rovnice pro dráhu, rychlost a zrychlení:

$$s(t) = v_0 \cdot t + j_m \cdot \frac{t^3}{6} \quad (48)$$

$$v(t) = v_0 + j_m \cdot \frac{t^2}{2} \quad (49)$$

$$a(t) = j_m \cdot t \quad (50)$$

Kde  $j_m$  je jerk, který se vypočítá jako:

$$j_m = \frac{a_s}{t_1} \quad (51)$$

Fáze 2 – lineární ( $0 \geq t \geq t_1$ )

Pro lineární část platí tyto rovnice:

$$s(t) = v_1 \cdot t + a_s \cdot \frac{t^2}{2} \quad (52)$$

$$v(t) = v_1 + a_s \cdot t \quad (53)$$

Fáze 3 – konvexní ( $0 \geq t \geq T - 2 \cdot t_1$ )

Pro konvexní část platí tyto rovnice:

$$s(t) = v_2 \cdot t + a_s \cdot \frac{t^2}{2} - j_m \cdot \frac{t^3}{6} \quad (54)$$

$$v(t) = v_2 + a_s \cdot t - j_m \cdot \frac{t^2}{2} \quad (55)$$

$$a(t) = a_s - j_m \cdot t \quad (56)$$

## 5.5 Stanovení požadovaného pohybu

Pro model byl určen požadovaný průběh rychlostí, ze kterého byl poté vytvořen průběh požadovaného pohybu, který vstupuje do simulované soustavy. V prvním fázi stůl najede z počáteční polohy A do určité polohy B s časem rozběhu a doběhu 1 sekunda a s časem běhu 2 sekundy ve kterém se pohybuje jmenovitou posuvovou rovnoměrnou rychlostí 0,08 m/s. Poté na stůl začne působit obráběcí síla od nástroje o velikosti 1600 N. Stůl se za působení této síly začne přesouvat do další polohy C s časem rozběhu a doběhu 1 sekunda a s časem běhu 8 sekund ve kterém se opět pohybuje jmenovitou posuvovou rovnoměrnou rychlostí 0,08 m/s. Následuje pauza, jenž trvá 1 sekundu a poté se stůl začne pohybovat do předešlé polohy B se stejnými časy, rychlostmi a silou, která působí opět proti pohybu. Následuje další přestávka a celý tento cyklus se mezi polohami B a C ještě 4krát zopakuje. Jakmile stůl najede naposledy do polohy C, tak pak začne pokračovat do polohy D stejným pohybem jako tomu bylo mezi polohou A a B. Pro tento popsany pohyb byla vytvořena v Matlabu matice o 4 sloupcích (Obr. 19). V prvním sloupci je zadána rovnoměrná rychlost. Ve druhém sloupci je zadán čas rozběhu a doběhu. Ve třetím sloupci je pak zadán čas běhu a ve čtvrtém je řezná síla. [24]

```

%% Nadefinování požadovaného průběhu rychlosti pro sektory
MATICE_V = [0.08 1 2 0;...
0.08 1 8 -1600;...
0 0 1 0;...
-0.08 1 8 1600;...
0 0 1 0;...
0.08 1 8 -1600;...
0 0 1 0;...
-0.08 1 8 1600;...
0 0 1 0;...
0.08 1 8 -1600;...
0 0 1 0;...
-0.08 1 8 1600;...
0 0 1 0;...
0.08 1 8 -1600;...
0 0 1 0;...
-0.08 1 8 1600;...
0 0 1 0;...
0.08 1 8 -1600;...
0 0 1 0;...
-0.08 1 8 1600;...
0 0 1 0;...
0.08 1 8 -1600;...
0.08 1 2 0];... .

```

Obr. 19: Matice definující pohyb stroje

### 5.5.1 Výpočet pohybu s lineárním zrychlením

Na následujícím Obr. 20 lze vidět skript jednotlivých sektorů ve kterém byly nejprve rozděleny parametry z matice definující průběh rychlostí. Také zde bylo vyjádřeno lineární zrychlení podle rovnice (59). Poté zde byly vytvořeny vektory času, rychlosti, síly a zrychlení. Nakonec byl pomocí numerické integrace vytvořen polohový vektor.

```

%% Cyklus jednotlivých sektorů
for k = 1:m
    v_s = MATICE_V(k,1); %[m/s] - rovnoměrná rychlost při běhu
    T = MATICE_V(k,2); %[s] - délka rozběhu a doběhu
    T_s = MATICE_V(k,3); %[s] - délka běhu
    F = MATICE_V(k,4); % síla

    a_s = v_s/T; % lineární zrychlení

    %% Vektor času
    T_all = 2*T + T_s; % celková časová délka (rozběh+běh+doběh)
    t_k(k,:) = linspace(0,T_all,N);
    N_1 = floor(T/T_all*N);
    N_2 = floor((T+T_s)/T_all*N);
    t_1 = linspace(0, T, N_1);
    t_2 = linspace(0, T_s, N_2-N_1);
    t_3 = linspace(0, T, N-N_2);

    %% Vytvoření vektoru rychlostí
    v_1 = a_s*t_1;
    v_2 = 0*t_2 + v_s;
    v_3 = -a_s*t_3 + v_s;
    rychlost_k(k,:) = [v_1 v_2 v_3];

    %% Průběh síly
    sila_k(k,:) = t_k(k,:)*0 + (F);

    %% Vytvoření vektoru zrychlení
    a_1 = 0*t_1+a_s;
    a_2 = 0*t_2;
    a_3 = 0*t_3-a_s;

    zrychleni_k(k,:) = [a_1 a_2 a_3];
    %% Výpočet vektoru polohy (pomocí numerické integrace -Obdélníková formule)
    dt = T_all/(N-1);
    for r = 1:N
        poloha_k(k,r) = sum(dt*rychlost_k(k,1:r));
    end
end
end

```

Obr. 20: Vytvoření jednotlivých vektorů (lineární zrychlení)



```

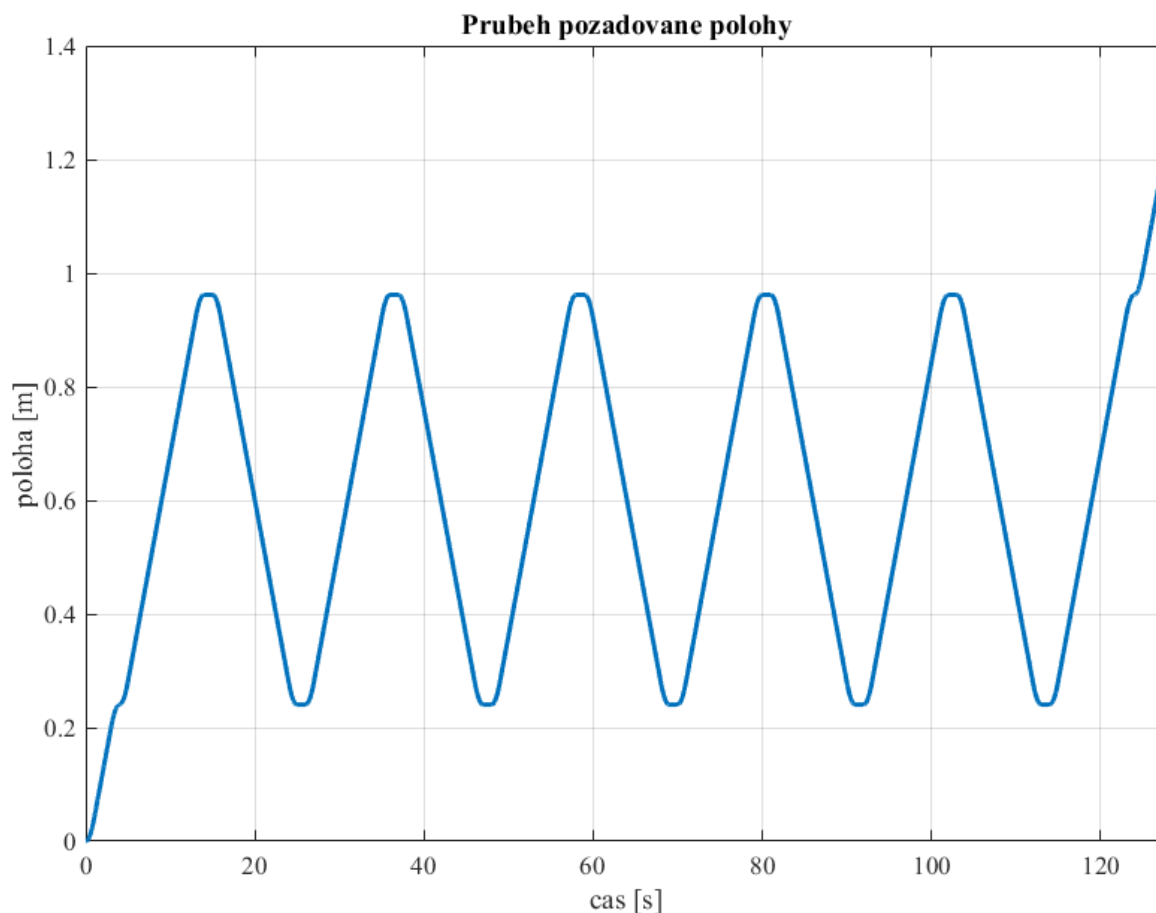
%% Cyklus ''slepení'' sektoru
t = t_k(1,:);
rychlost = rychlost_k(1,:);
sila = sila_k(1,:);
zrychleni = zrychleni_k(1,:);
poloha = poloha_k(1,:);

for k = 2:m
    t = [t, t_k(k, 2:end)+t(end)];
    rychlost = [rychlost, rychlost_k(k,2:end)];
    sila = [sila, sila_k(k,2:end)];
    zrychleni = [zrychleni, zrychleni_k(k,2:end)];
    poloha = [poloha, poloha_k(k,2:end)+poloha(end)];
end

%% Konečný čas (ořiznutí grafu)
T_all = t(end);
    
```

Obr. 21: Slepení všech částí jednotlivých sektorů

Všechny tyto vygenerované části jednotlivých sektorů musely být posléze slepeny v jeden celek, což lze vidět na skriptu, jenž je zobrazen na Obr. 21. Poté mohl být vygenerován průběh požadované polohy, který lze vidět na Obr. 22.



Obr. 22: Průběh požadované polohy (lineární zrychlení)

### 5.5.2 Výpočet pohybu s S-křivkami

Obdobným způsobem byl vytvořen skript i pro pohyb pomocí S-křivek. V tomto skriptu se ovšem definovalo zrychlení do 3 částí a vytvoření jednotlivých částí daných vektorů bylo o trochu delší (Obr. 23 a 24). Sloučení do výsledných vektorů je poté stejné jako v předchozím případě. Výsledkem je opět průběh požadované polohy (Obr. 25).

<pre>%% Cyklus jednotlivých sektorů for k = 1:m     v_s = MATICE_V(k,1); %[m/s] - rovnoměrná rychlost při běhu     T = MATICE_V(k,2); %[s] - délka rozběhu a doběhu     T_s = MATICE_V(k,3); %[s] - délka běhu     F = MATICE_V(k,4); % síla      a_s_max = (2*v_s)/T;     a_s_min = v_s/T;     a_s = a_s_min + (0.5)*(a_s_max-a_s_min); %[mm*s^-2] - ustálené zrychlení při rozběhu  %% Výpočet časové délky t_1 T_1 = T-v_s/a_s; if isnan(T_1)     T_1=0; end  %% Výpočet jerku j_m = a_s/T_1; %% Vektor času T_all = 2*T + T_s; % celková časová délka (rozběh+běh+doběh)  t_k(k,:) = linspace(0,T_all,N);  N_1 = floor(T_1/T_all*N); N_2 = floor((T-T_1)/T_all*N); N_3 = floor(T/T_all*N); N_4 = floor((T+T_s)/T_all*N); N_5 = floor((T+T_s+T_1)/T_all*N); N_6 = floor((T_all-T_1)/T_all*N);  t_1 = linspace(0, T_1, N_1); t_2 = linspace((T-2*T_1)/(N_2-N_1-1), T-2*T_1, N_2-N_1); t_3 = linspace(T_1/(N_3-N_2-1), T_1, N_3-N_2); t_4 = linspace(T_s/(N_4-N_3-1), T_s, N_4-N_3); t_5 = linspace(T_1/(N_5-N_4-1), T_1, N_5-N_4); t_6 = linspace((T-2*T_1)/(N_6-N_5-1), T-2*T_1, N_6-N_5); t_7 = linspace(T_1/(N-N_6-1), T_1, N-N_6);</pre>	
--	--

Obr. 23: Vytvoření jednotlivých vektorů (S-křivky)

```

%% Vytvoření vektoru rychlosti
v_1 = j_m*(t_1.^2)/2;
v_2 = (a_s^2)/(2*j_m) + a_s*t_2;
v_3 = v_s-a_s^2/(2*j_m) + a_s*t_3 - j_m*(t_3.^2)/2;
v_4 = 0*t_4+v_s;
v_5 = v_s - j_m*(t_5.^2)/2;
v_6 = v_s - j_m*(T_1^2)/2 - a_s*t_6;
v_7 = (a_s^2)/(2*j_m) - a_s*t_7 + j_m*(t_7.^2)/2;

rychlost_k(k,:) = [v_1 v_2 v_3 v_4 v_5 v_6 v_7];

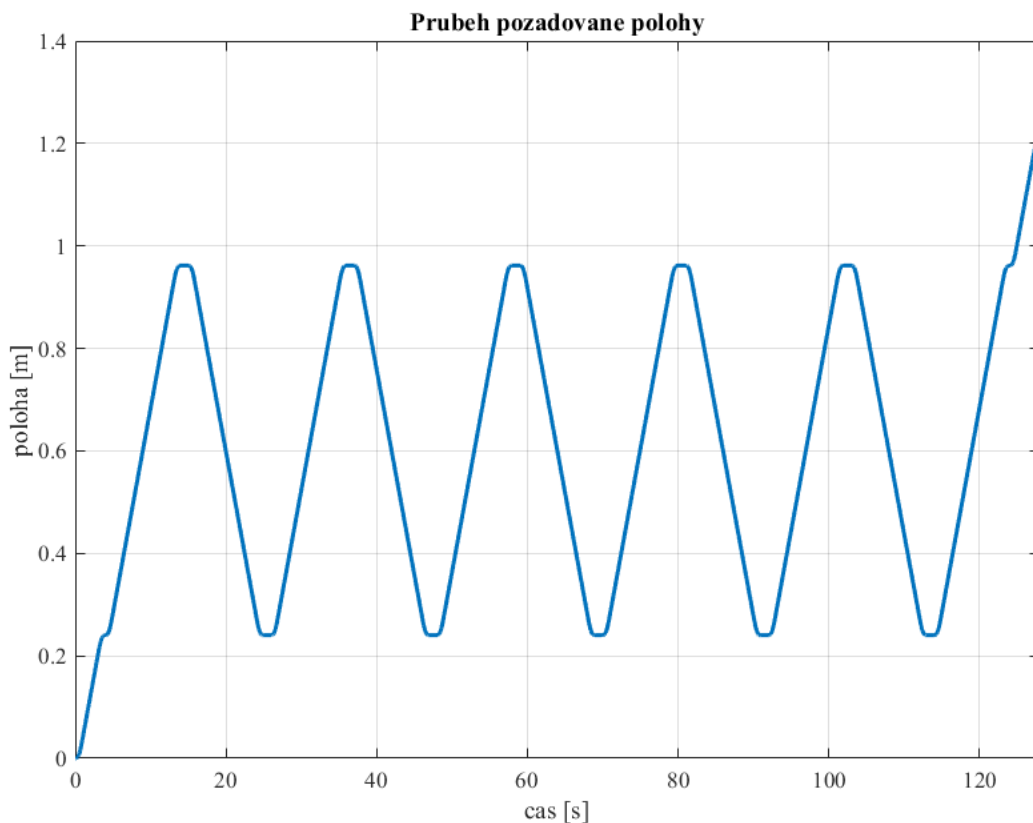
%% Průběh sily
sila_k(k,:) = t_k(k,:)*0 + (F);

%% Vytvoření vektoru zrychlení
a_1 = j_m*t_1;
a_2 = 0*t_2+a_s;
a_3 = a_s-j_m*t_3;
a_4 = 0*t_4;
a_5 = -j_m*t_5;
a_6 = 0*t_6-a_s;
a_7 = -a_s+j_m*t_7;

zrychleni_k(k,:) = [a_1 a_2 a_3 a_4 a_5 a_6 a_7];
%% Výpočet vektoru polohy (pomocí numerické integrace - Obdélníková formule)
dt = T_all/(N-1);
for r = 1:N
    poloha_k(k,r) = sum(dt*rychlost_k(k,1:r));
end
end
end

```

Obr. 24: Vytvoření jednotlivých vektorů (S-křivky)



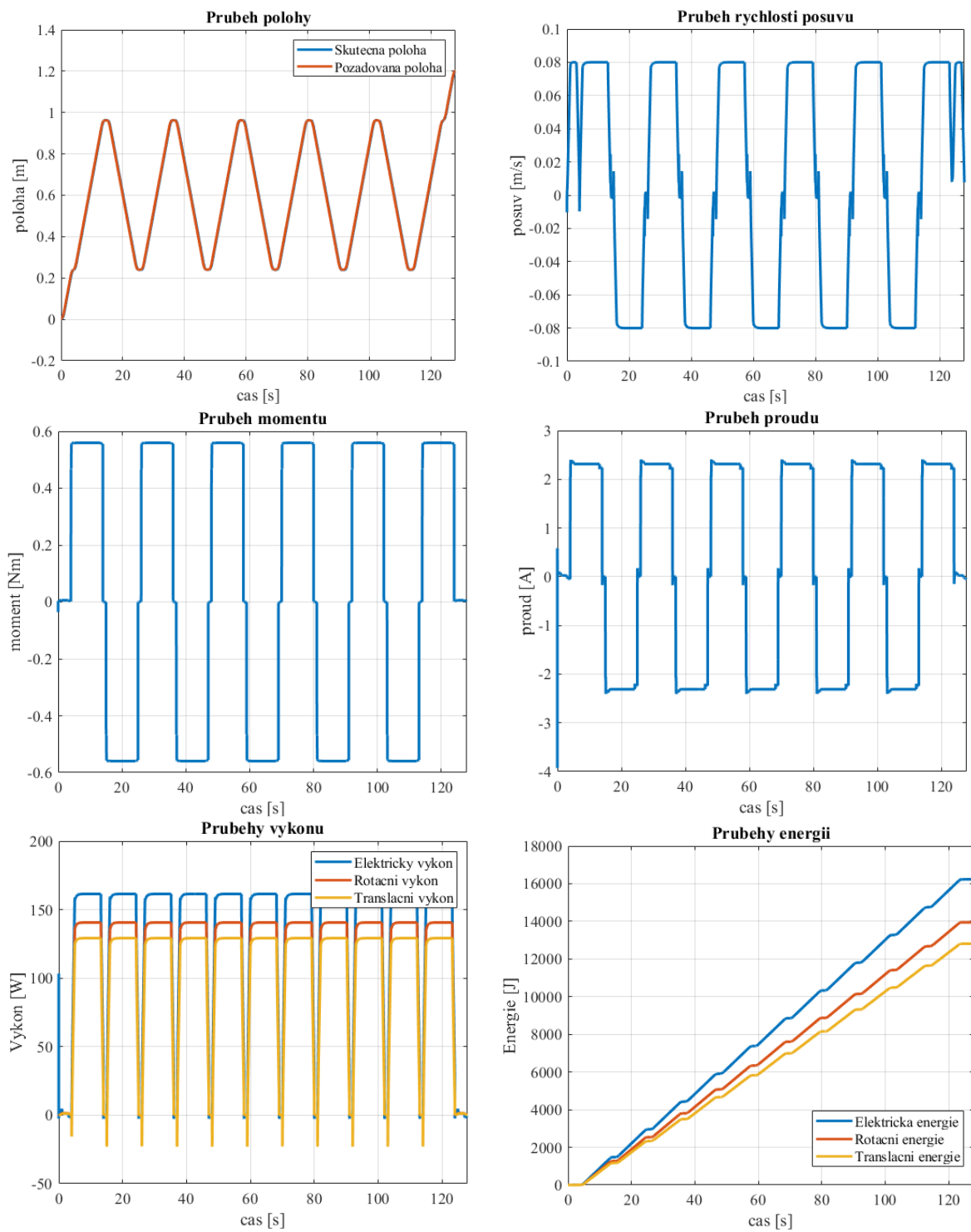
Obr. 25: Průběh požadované polohy (S-křivky)

## 5.6 Propojení Matlabu se Simulinkem a vygenerování výsledků

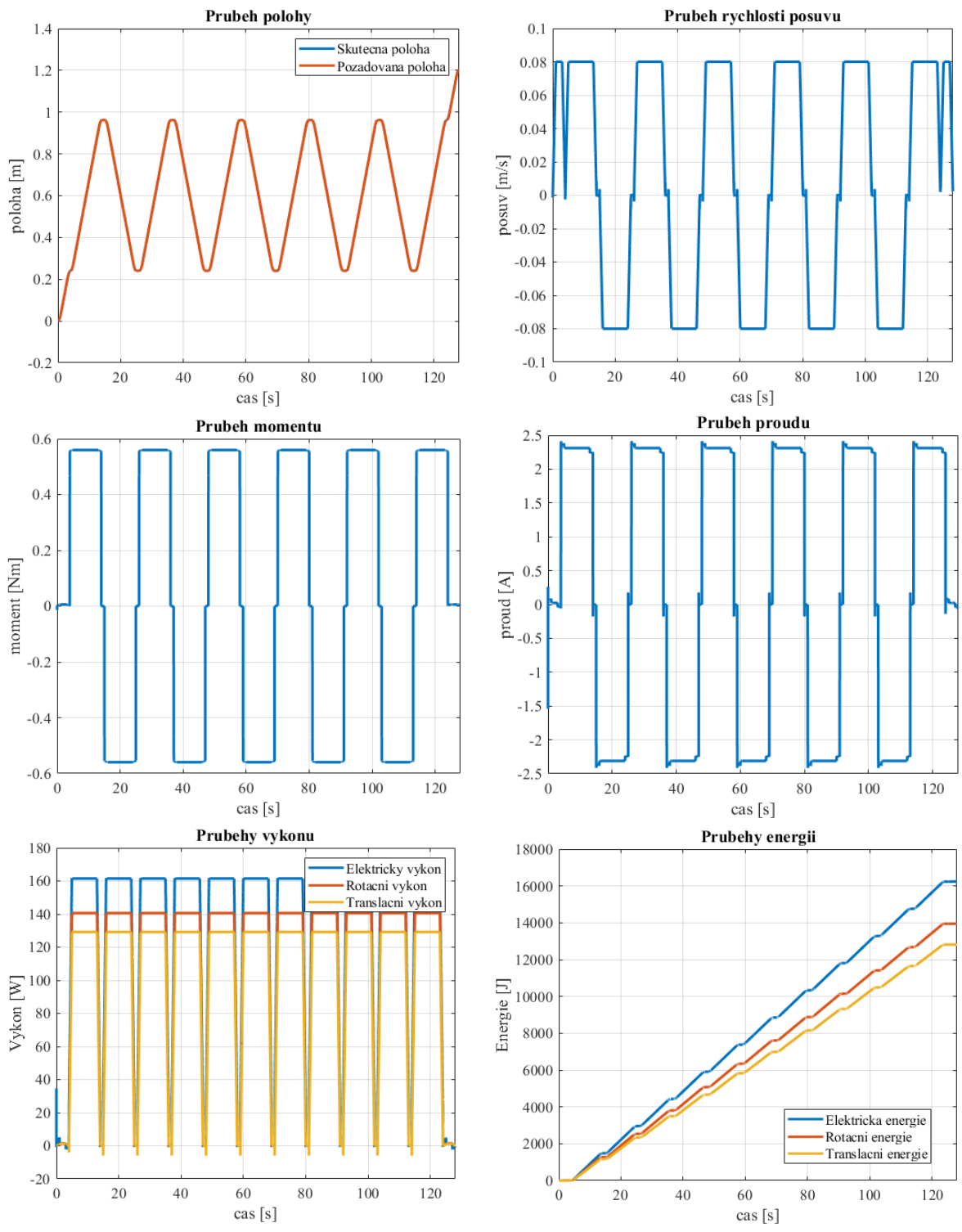
Průběhy požadované polohy a síly jsou po spuštění daného skriptu uloženy v paměti „*Workspace*“ a lze je snadno poslat z Matlabu do Simulinku pomocí bloku „*From Workspace*“. V Simulinku byly poté vytvořeny průběhy všech důležitých signálů jako např. proud, napětí, moment, posuvová rychlost, aktuální poloha, síla atd. Dále byly vytvořeny průběhy jednotlivých výkonů. Elektrický výkon byl spočítán jako součin proudu procházející motorem a napětí na motoru. Rotační výkon byl spočítán jako součin momentu na výstupu motoru a úhlové rychlosti motoru. Translační výkon byl spočítán jako součin fiktivní síly na matici kuličkového šroubu a posuvové rychlosti stolu. Pokud jsou jednotlivé výkony integrovány, obdrží se pak příslušné energie, které jsou rovněž zobrazeny v modelu. Všechny tyto průběhy jsou pak posílány ze Simulinku zpět do Matlabu pomocí bloku „*To Workspace*“.

### 5.6.1 Výsledky regulací pohybu s lineárním zrychlením

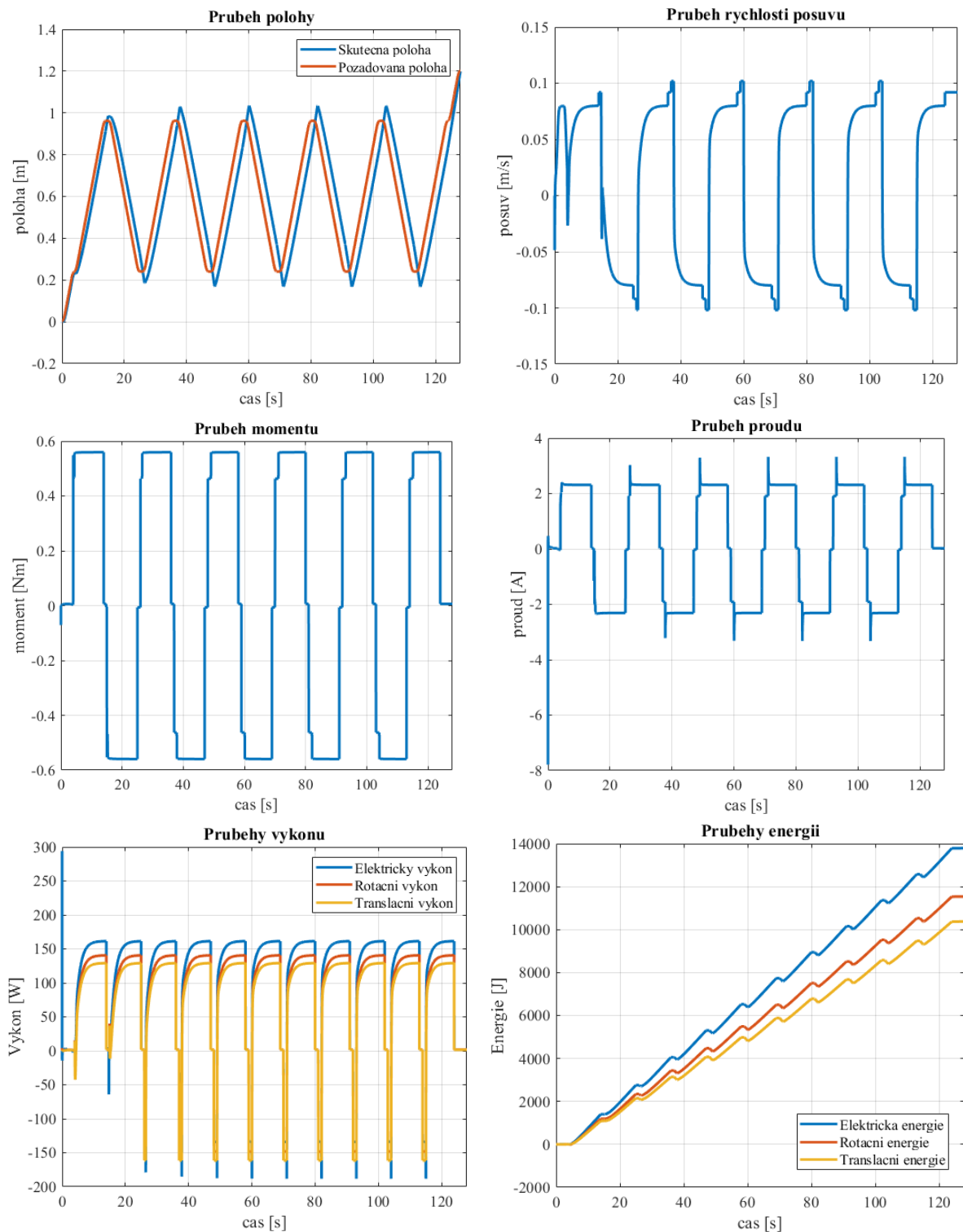
Jako základní nastavení regulátoru bylo použito nastavení z podkapitoly 5.3. Po spuštění byly vykresleny a uloženy všechny průběhy. Nejdůležitějším bodem bylo zaznamenání výsledných energií do Tab. 2. Mimo jiné se do této tabulky zaznamenaly i hodnoty středního proudu tekoucího motorem na druhou a středního proudu tekoucím měničem. Základní nastavení regulátorů se poté několikrát různým způsobem změnil a jednotlivé výsledné energie se poměřily, jak je zaznamenáno v Tab. 3. Pro příliš velký počet grafů zde byly vloženy pouze grafy s průběhem polohy, proudu, momentu, výkonů a energií, a to pro základní nastavení regulátorů, 3krát větší nastavení regulátorů a 3krát menší nastavení regulátorů (Obr. 26 až 28). Další grafy lze nalézt na CD v příloze.



Obr. 26: Průběhy při základním nastavení regulátorů (lineární zrychlení)



Obr. 27: Průběhy při 3krát větším nastavení všech regulátorů (lineární zrychlení)



Obr. 28: Průběhy při 3krát menším nastavení všech regulátorů (lineární zrychlení)

<b>Pohyb s lineárním zrychlením</b>	<b>Elektrická energie [J]</b>	<b>Rotační energie [J]</b>	<b>Translační energie [J]</b>	<b>Kvadrát středního proudu motorem [A<sup>2</sup>]</b>	<b>Střední proud měničem [A]</b>
<b>Základní nastavení</b>	16232,91	13950,1	12813,94	3,27	0,62
<b>Vše 2x větší</b>	16232,91	13951,45	12816,65	4,38	1,11
<b>Vše 2x menší</b>	16189,18	13908,57	12769,13	3,38	0,60
<b>Vše 3x větší</b>	16236,58	13951,08	12816,64	4,25	1,03
<b>Vše 3x menší</b>	13793,1	11541,09	10376,26	4,59	0,29
<b>Reg. proudu 8x větší</b>	16233,05	13950,14	12814,03	3,30	0,65
<b>Reg. proudu 8x menší</b>	16228,04	13947,79	12810,79	3,74	0,78
<b>Reg. otáček 2.5x větší</b>	16225,96	13941,11	12807,42	4,20	0,98
<b>Reg. otáček 2.5x menší</b>	15738,17	13439,94	12338,6	3,05	0,33
<b>Reg. ot. 2.5x menší a reg. proudu 4x větší</b>	15737,62	13436,96	12336,05	3,74	0,23
<b>Reg. ot. 2.5x větší a reg. proudu 4x menší</b>	16226,75	13941,34	12807,49	3,85	0,67
<b>Proporcionální složka reg. ot. 4x větší</b>	16227,39	13942,22	12808,7	3,86	0,87
<b>Proporcionální složka reg. ot. 4x menší</b>	16266,15	13983,47	12833,5	3,14	0,48
<b>Integrační složka reg. ot. 4x větší</b>	16227,5	13942,69	12807,68	3,46	0,73
<b>Integrační složka reg. ot. 4x menší</b>	15990,41	13696,59	12580,69	2,87	0,41

Tab. 2: Jednotlivé energie při různých nastaveních regulátorů (lineární zrychlení)



Pohyb s lineárním zrychlením	Změna energie elektrické	Změna energie rotační	Změna energie translační	Změna kvadrátu středního proudu motorem	Změna středního proudu měničem
Základní nastavení	-	-	-	-	-
Vše 2x větší	0,00 %	0,01 %	0,02 %	33,89 %	77,29 %
Vše 2x menší	-0,27 %	-0,30 %	-0,35 %	3,29 %	-3,69 %
Vše 3x větší	0,02 %	0,01 %	0,02 %	29,85 %	64,79 %
Vše 3x menší	-15,03 %	-17,27 %	-19,02 %	40,13 %	-53,53 %
Reg. proudu 8x větší	0,00 %	0,00 %	0,00 %	0,76 %	4,60 %
Reg. proudu 8x menší	-0,03 %	-0,02 %	-0,02 %	14,12 %	25,12 %
Reg. otáček 2.5x větší	-0,04 %	-0,06 %	-0,05 %	28,28 %	56,48 %
Reg. otáček 2.5x menší	-3,05 %	-3,66 %	-3,71 %	-6,79 %	-47,42 %
Reg. ot. 2.5x menší a reg. proudu 4x větší	-3,05 %	-3,68 %	-3,73 %	14,30 %	-63,11 %
Reg. ot. 2.5x větší a reg. proudu 4x menší	-0,04 %	-0,06 %	-0,05 %	17,59 %	7,57 %
Proporcionální složka reg. ot. 4x větší	-0,03 %	-0,06 %	-0,04 %	17,89 %	39,56 %
Proporcionální složka reg. ot. 4x menší	0,20 %	0,24 %	0,15 %	-4,10 %	-23,00 %
Integrační složka reg. ot. 4x větší	-0,03 %	-0,05 %	-0,05 %	5,68 %	17,10 %
Integrační složka reg. ot. 4x menší	-1,49 %	-1,82 %	-1,82 %	-12,34 %	-34,23 %

Tab. 3: Změna energií při různých nastaveních regulátorů (lineární zrychlení)

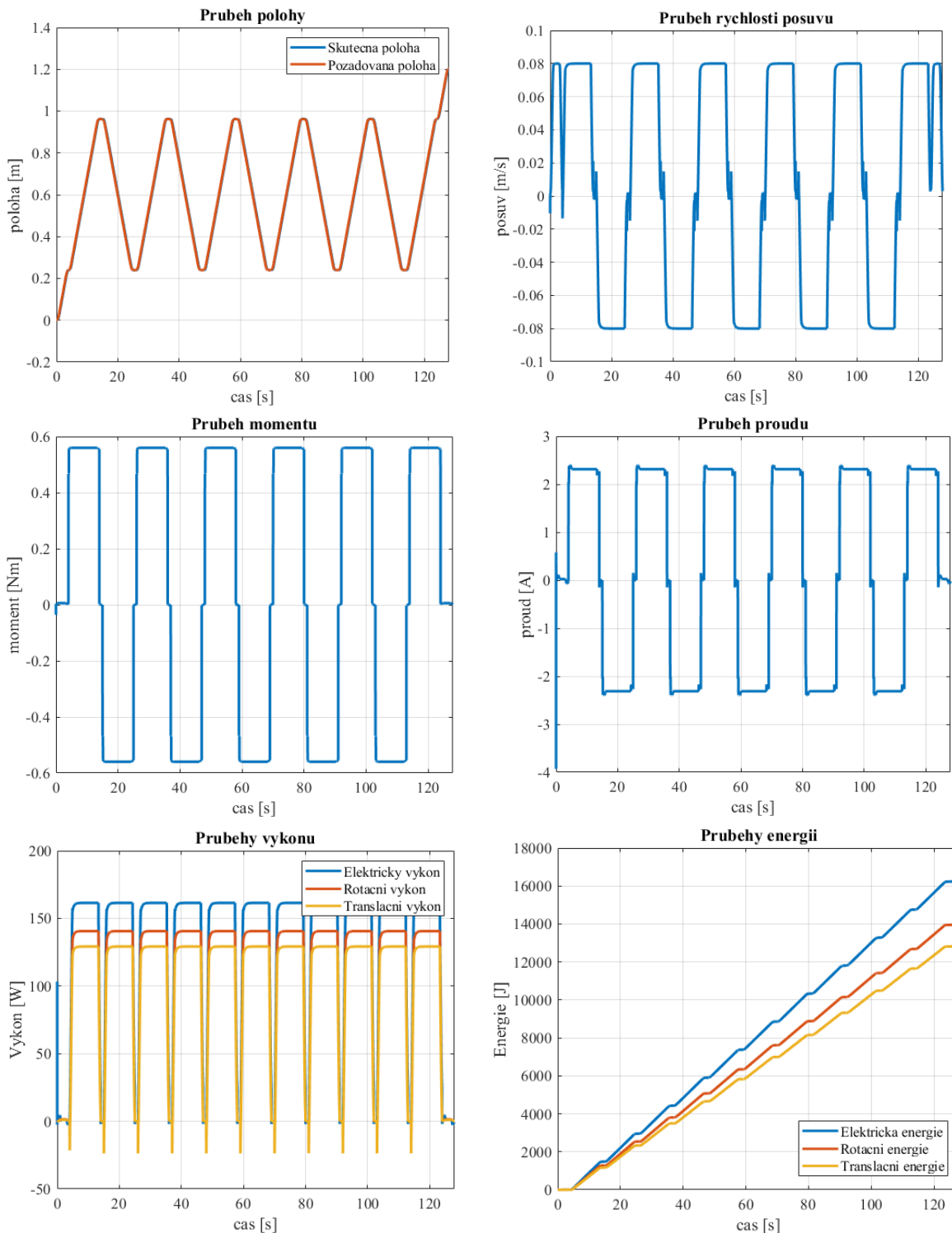
### 5.6.2 Zhodnocení výsledků energií s lineárním pohybem

Při základním nastavení lze vidět, že skutečná poloha odpovídá požadované poloze a že veškeré průběhy jsou bez nežádoucího kmitání či větších špiček. Drobné špičky (např. u proudu a posuvu) nastávají pouze v případě začátku a konce působení obráběcí síly. Dále je možno z Tab. 3 vyčíst fakt, že zmenšování parametrů v otáčkovém regulátoru výrazným způsobem snižuje výslednou energii. To se na první pohled může jevit jako užitečné, nicméně výsledná regulace je velmi nekvalitní (skutečná poloha neodpovídá požadované poloze), jak je možné vidět např. na průbězích na Obr. 28 a proto nelze tyto regulace brát v úvahu.

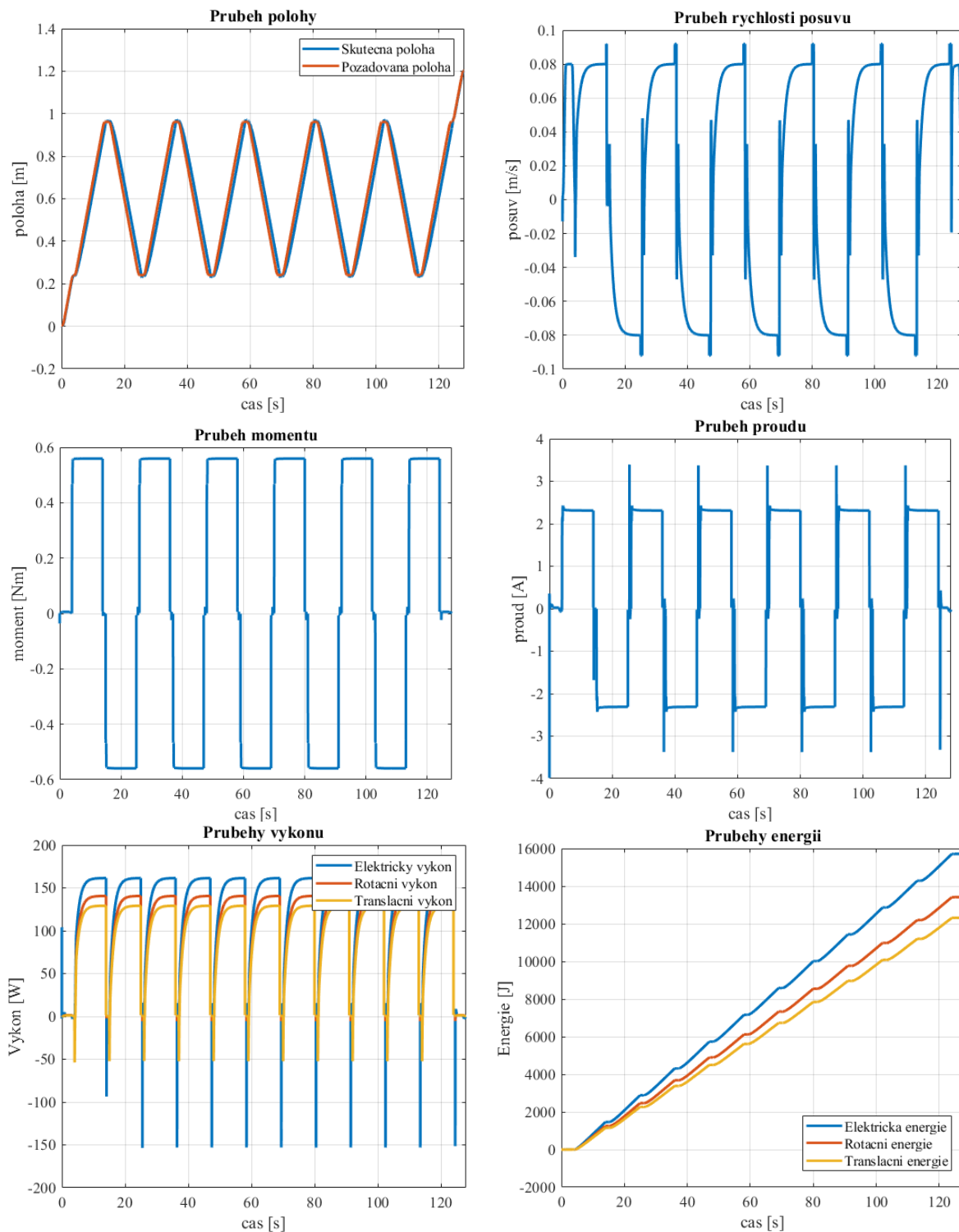
Při pohledu na změnu středního proudu, který teče do měniče, si lze všimnout, že při snižování parametrů v regulátorech tento proud klesá a při zvyšování těchto parametrů tento proud roste. V důsledku toho vycházejí v daném nastavení menší energie, jelikož není odebíraný proud tak velký a průběhy jsou vesměs pomalejší. U zvyšujícího se středního proudu měničem už se výsledné energie příliš nemění. Výsledné průběhy jsou, ale o něco přesnější právě díky většímu odebíranému proudu.

### 5.6.3 Výsledky regulací pohybu s S-křivkami

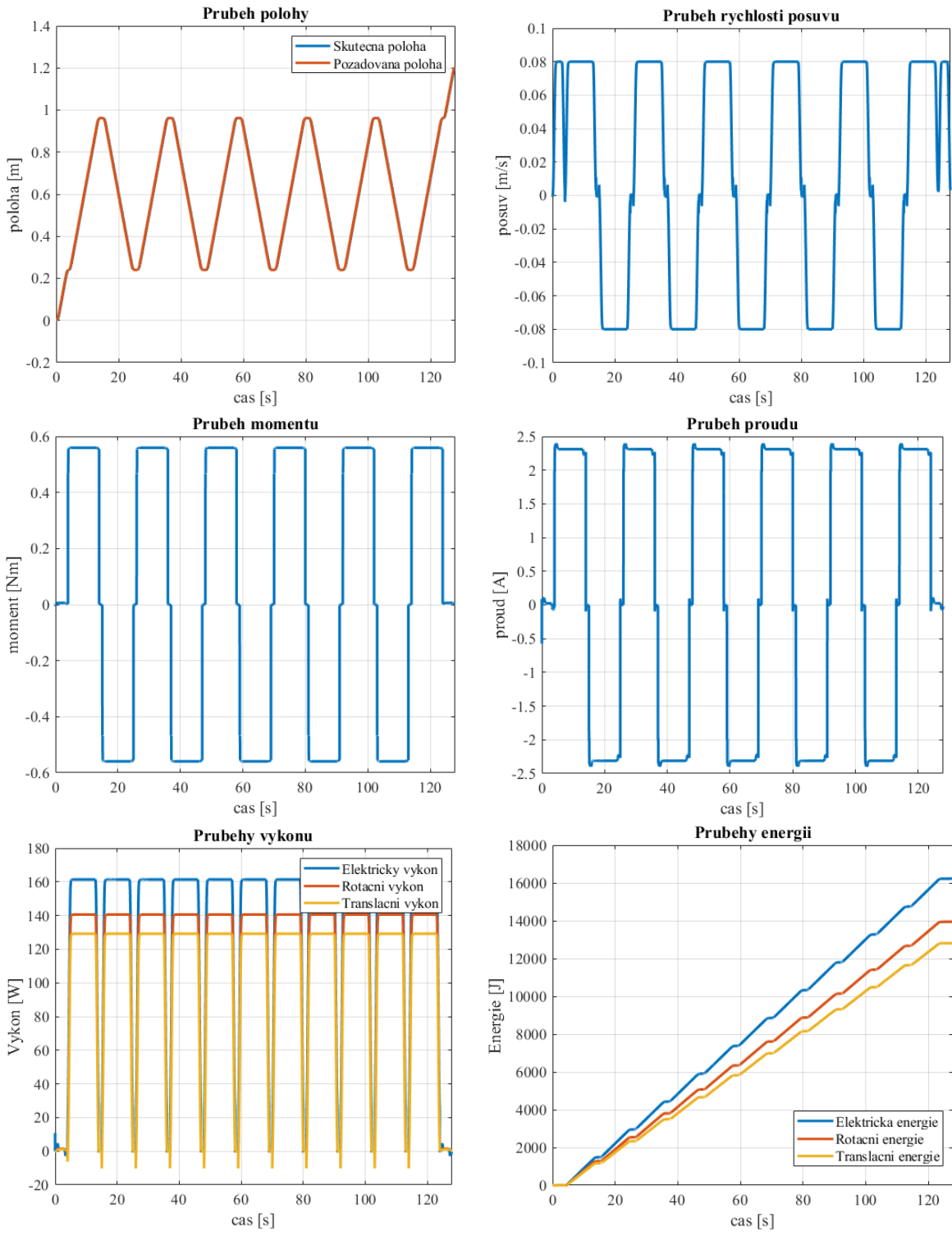
Stejným způsobem jako u pohybu s lineárním zrychlením se provedlo zaznamenání všech průběhů a výsledných energií i pro pohyb pomocí S-křivek. Výsledné energie byly zapsány do Tab. 4 a jejich rozdíly do Tab. 5. V tomto případě zde byly vloženy pouze grafy s průběhem polohy, proudu, momentu, výkonů a energií pro základní nastavení regulátorů, 2,5krát menší nastavení otáčkového regulátoru a 2,5krát větší nastavení otáčkového regulátoru (Obr. 29 až 31). Další grafy lze nalézt na CD v příloze.



Obr. 29: Průběhy při základním nastavení regulátorů (S-křivky)



Obr. 30: Průběhy při 2,5krát menším nastavení otáčkového regulátoru (S-křivky)



Obr. 31: Průběhy při 2,5krát větším nastavení otáčkového regulátoru (S-křivky)

<b>Pohyb S-křivky</b>	<b>Elektrická energie [J]</b>	<b>Rotační energie [J]</b>	<b>Translační energie [J]</b>	<b>Kvadrát středního proudu motorem [A<sup>2</sup>]</b>	<b>Střední proud měničem [A]</b>
<b>Základní nastavení</b>	16235,53	13955,94	12818,62	3,2907	0,58
<b>Vše 2x větší</b>	16234,36	13951,45	12816,65	4,1881	0,94
<b>Vše 2x menší</b>	16173,7	13894,86	12755,07	3,3799	0,61
<b>Vše 3x větší</b>	16235,37	13951,12	12816,78	4,4777	0,99
<b>Vše 3x menší</b>	13734,56	11484,9	10315,73	4,5751	0,26
<b>Reg. proudu 8x větší</b>	16235,56	13956,02	12818,74	3,3472	0,65
<b>Reg. proudu 8x menší</b>	16227,48	13951,07	12812,77	3,843	0,63
<b>Reg. otáček 2.5x větší</b>	16228,31	13946,84	12812,34	3,8776	0,83
<b>Reg. otáček 2.5x menší</b>	15713,36	13417,13	12316,46	3,0768	0,31
<b>Reg. ot. 2.5x menší a reg. proudu 4x větší</b>	15712,53	13413,97	12313,74	3,8016	0,25
<b>Reg. ot. 2.5x větší a reg. proudu 4x menší</b>	16228,91	13946,48	12811,88	3,7365	0,56
<b>Proporcionální složka reg. ot. 4x větší</b>	16229,13	13947,9	12813,61	3,97	0,87
<b>Proporcionální složka reg. ot. 4x menší</b>	16269,48	13988,45	12836,88	3,14	0,44
<b>Integrační složka reg. ot. 4x větší</b>	16230,79	13948,23	12812,36	3,36	0,66
<b>Integrační složka reg. ot. 4x menší</b>	15965,2	13674,22	12559,3	2,89	0,43

Tab. 4: Jednotlivé energie při různých nastaveních regulátorů (S-křivky)

Pohyb S-křivky	Změna energie elektrické	Změna energie rotační	Změna energie translační	Změna kvadrátu středního proudu motorem	Změna středního proudu měničem
Základní nastavení	-	-	-	-	-
Vše 2x větší	-0,01 %	-0,03 %	-0,02 %	27,27 %	62,07 %
Vše 2x menší	-0,38 %	-0,44 %	-0,50 %	2,71 %	5,17 %
Vše 3x větší	0,00 %	-0,03 %	-0,01 %	36,07 %	70,69 %
Vše 3x menší	-15,40 %	-17,71 %	-19,53 %	39,03 %	-55,17 %
Reg. proudu 8x větší	0,00 %	0,00 %	0,00 %	1,72 %	12,07 %
Reg. proudu 8x menší	-0,05 %	-0,03 %	-0,05 %	16,78 %	8,62 %
Reg. otáček 2.5x větší	-0,04 %	-0,07 %	-0,05 %	17,84 %	43,10 %
Reg. otáček 2.5x menší	-3,22 %	-3,86 %	-3,92 %	-6,50 %	-46,55 %
Reg. ot. 2.5x menší a reg. proudu 4x větší	-3,22 %	-3,88 %	-3,94 %	15,53 %	-56,90 %
Reg. ot. 2.5x větší a reg. proudu 4x menší	-0,04 %	-0,07 %	-0,05 %	13,55 %	-3,45 %
Proporcionální složka reg. ot. 4x větší	-0,04 %	-0,06 %	-0,04 %	20,64 %	50,00 %
Proporcionální složka reg. ot. 4x menší	0,21 %	0,23 %	0,14 %	-4,58 %	-24,14 %
Integrační složka reg. ot. 4x větší	-0,03 %	-0,06 %	-0,05 %	2,11 %	13,79 %
Integrační složka reg. ot. 4x menší	-1,67 %	-2,02 %	-2,02 %	-12,18 %	-25,86 %

Tab. 5: Změna energií při různých nastaveních regulátorů (S-křivky)

#### 5.6.4 Zhodnocení výsledků energií při pohybu pomocí S-křivek

Při porovnání tabulek 2 a 4 si lze povšimnout, že průběhy regulace pohybu pomocí S-křivek pro základní nastavení regulátorů je o něco více energeticky náročnější než v případě regulace pohybu s lineárním zrychlením. Je to z toho důvodu, že pohyb pomocí S-křivek odebírá větší proud, aby splnil požadovaný plynulejší průběh. Výsledné energie jsou také více citlivější na regulační změnu nastavení. Při 2,5krát zmenšení otáčkové regulátoru lze vyčíst z průběhů na Obr. 30, že výsledná poloha odpovídá poloze požadované, ale v průbězích se začínají vyskytovat větší špičky než při základním nastavení. Na druhou stranu výsledné energie klesnou o 3-4 %. Změna střední hodnoty proudu vstupujícího do měniče se mění stejně jako u pohybu s lineárním zrychlením.

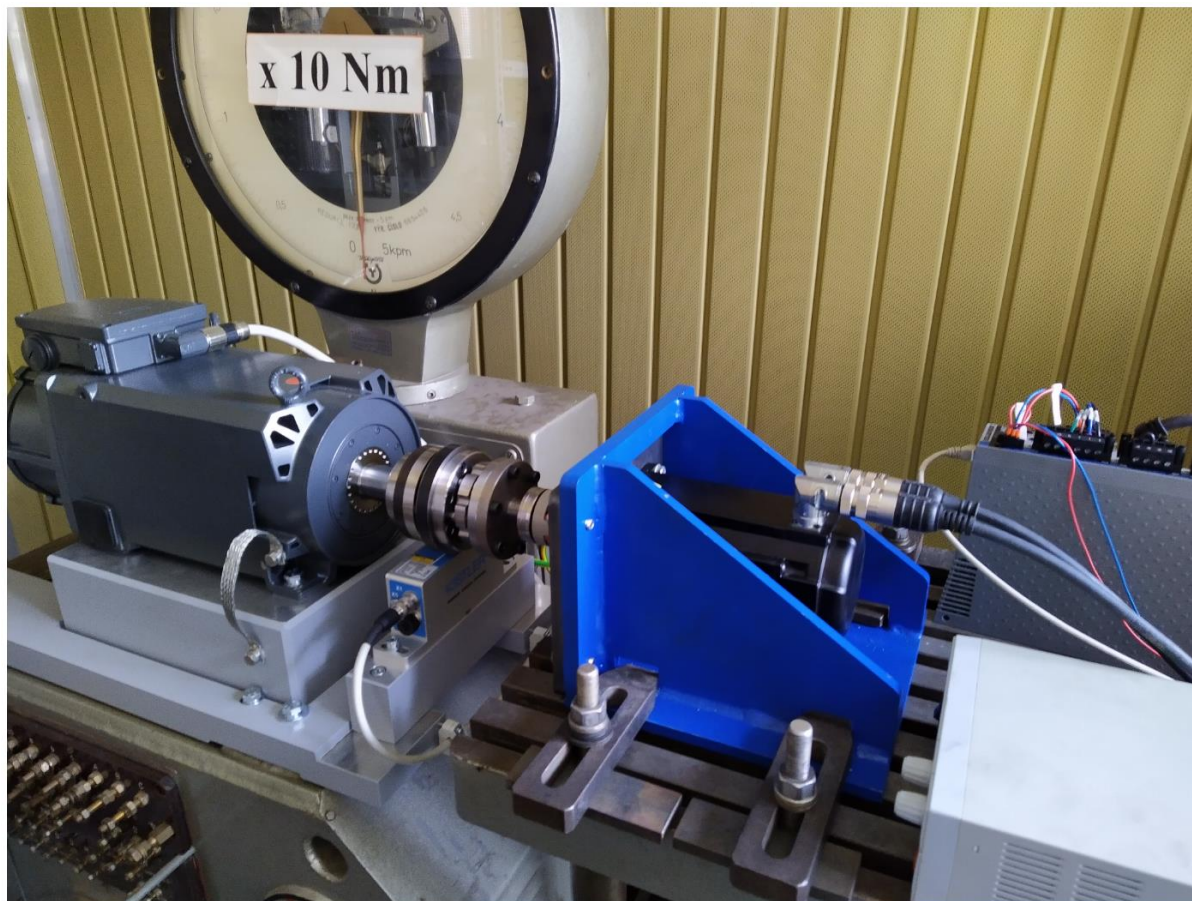
Z výsledků jde také odvodit skutečnost, že největších energetických a proudových změn dosahuje změna parametrů v otáčkovém regulátoru. Tento regulátor je tudíž nejdůležitějším prvkem v celém regulačním systému a jeho správné a přesné nastavení je nezbytné. Pokud jsou nastavovány pouze jednotlivé složky jen v otáčkovém regulátoru, tak bylo zjištěno, že výsledné průběhy odpovídají Tab. 1. Tento fakt platí jak u pohybu s lineárním zrychlením, tak i u pohybu pomocí S-křivek.

## 6 MODEL REGULACE SYNCHRONNÍHO SERVOPOHONU A PRAKTICKÉ MĚŘENÍ REÁLNÉHO SERVOPOHONU

V této kapitole byl změřen reálný servopohon s různým nastavením otáčkového regulátoru. Výsledné energie se mezi sebou porovnaly a následně byly také srovnány s modelem servopohonu vytvořeným v Simulinku ve kterém proběhly procentuálně stejné změny nastavení v regulaci jako u skutečného servopohonu.

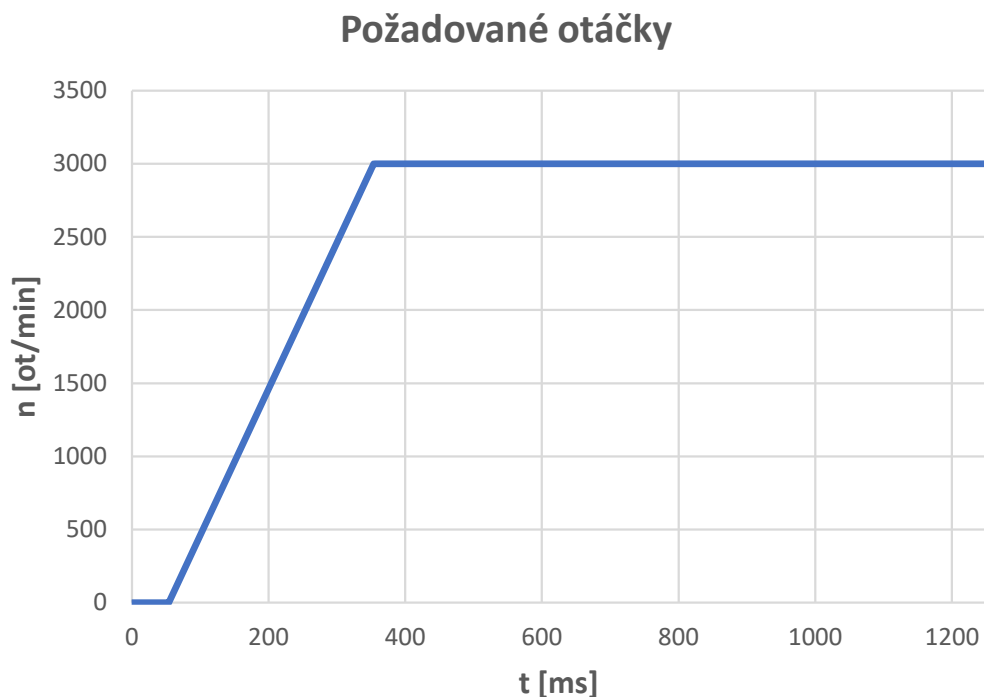
### 6.1 Praktické měření reálného servopohonu

Pro praktické měření byl využit servopohon AKM53K-ACANAB90 od firmy Kollmorgen. K tomuto servopohonu byl jako další moment setrvačnosti ještě připojen motor 1PH9105-1MF00-0LA2 od firmy Siemens. Zapojení lze vidět na Obr. 32.



Obr. 32: Měření servopohonu Kollmorgen (vpravo) s připojeným motorem Siemens (vlevo)

Servopohon Kollmorgen byl řízen pomocí programu Kollmorgen Workbench. V něm se definovala rychlost v otáčkách za minutu, kterou má motor splnit. Bylo zadáno, že motor se má roztočit na 3000 *ot/min*. Průběh požadovaných otáček lze vidět na Obr. 33.



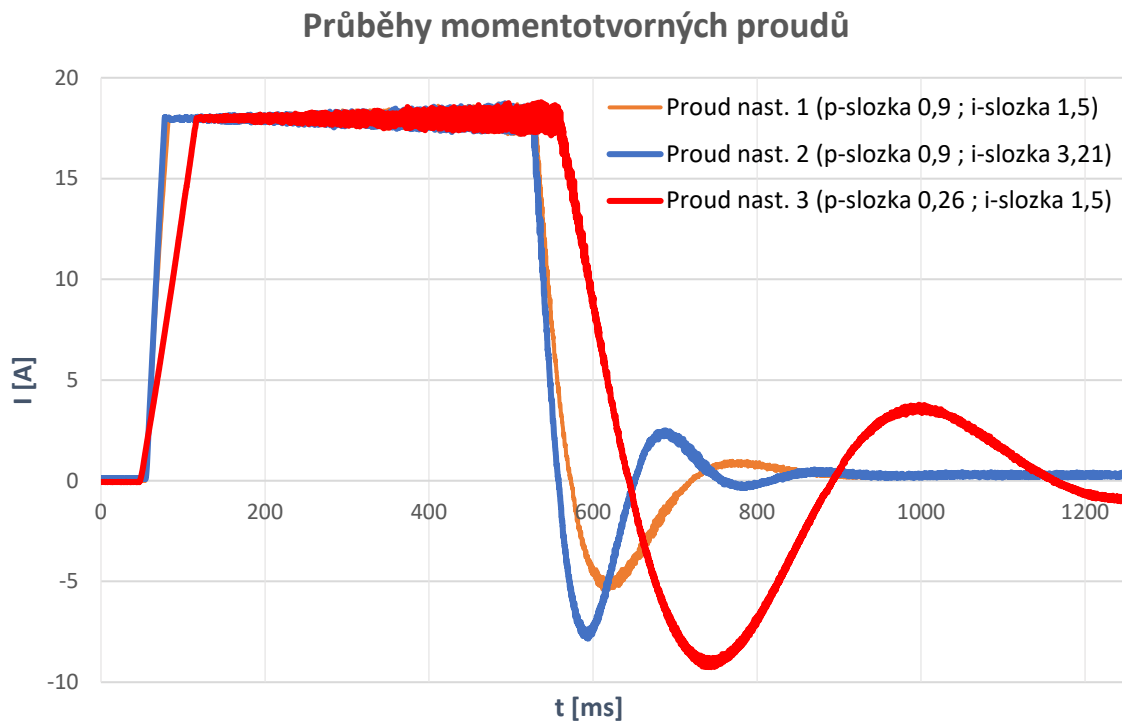
Obr. 33: Požadovaný průběh otáček

Jak již bylo zmíněno v podkapitole 4.5.1, tak proudový regulátor je nastaven už od výrobce stroje, a proto i v tomto případě nebyl nijak upravován. Laděn byl pouze otáčkový regulátor. Pro základní nastavení (nastavení 1) otáčkového regulátoru byla použita proporcionální složka o velikosti 0,7 a integrační složka o velikosti 3,275. V dalším nastavení (nastavení 2) se integrační složka zvětšila na 7 (prop. složka 0,7) a v posledním nastavení (nastavení 3) se proporcionální složka zmenšila na 0,2 (int. složka 3,275). V programu pak byla získána data pro tato 3 nastavení, ze kterých se mohly vymodelovat průběhy skutečných otáček (Obr. 34), proudu (Obr. 35) a výsledných energií (Obr. 36). Vykreslení průběhu proudu je nutné si specifikovat trochu podrobněji. V programu byla získána data pro proudovou d-složku, jež charakterizuje magnetizační část proudu a data pro celkový proud. Jelikož proudová d-složka byla velmi malá, tak bylo pro zjednodušení možno stanovit, že celkový proud odpovídá q-složce proudu, která představuje momentotvorný proud. Díky součinu momentotvorného proudu a napětí, které souvisí s tímto proudem byla získána data pro výkon, ze kterých se už pomocí jednotlivých přírůstků v daném časovém intervalu vytvořily průběhy energií.

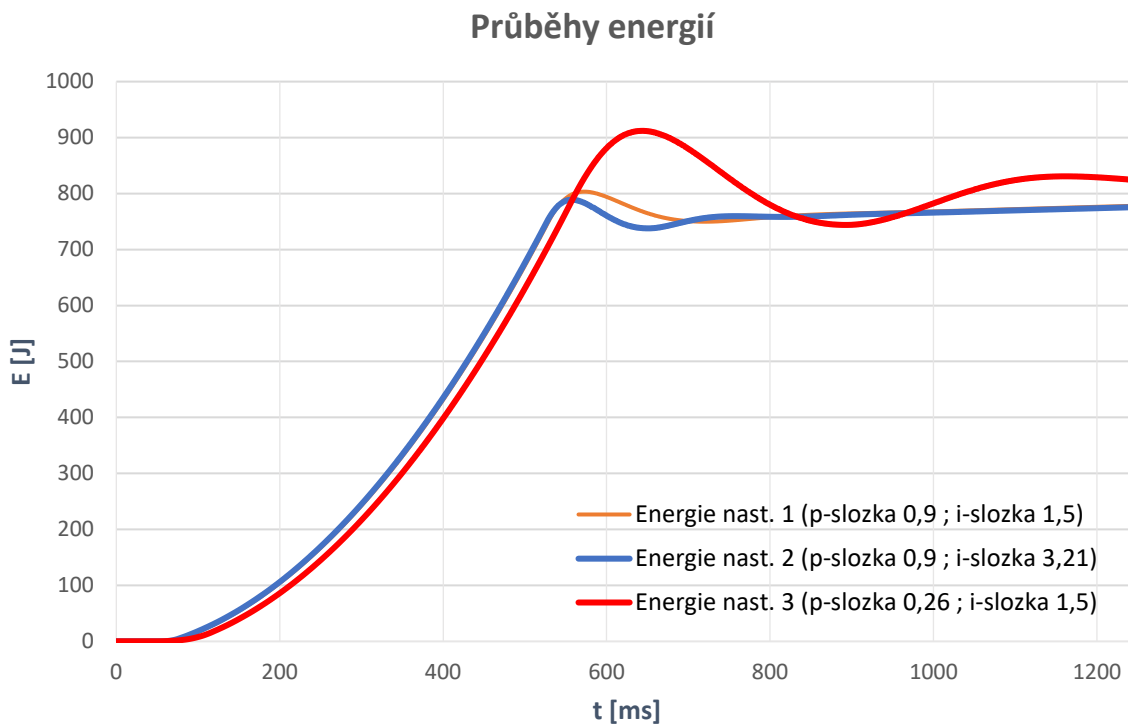




Obr. 34: Průběhy otáček servopohonu Kollmorgen pro nastavení 1 až 3



Obr. 35: Průběhy momentotvorných proudů servopohonu Kollmorgen pro nastavení 1 až 3



Obr. 36: Průběhy energií servopohonu Kollmorgen pro nastavení 1 až 3

## 6.2 Zhodnocení výsledků praktického měření

Do Tab. 6 byly zapsány finální energetické hodnoty pro jednotlivá nastavení. Z těchto hodnot je patrné, že při zvětšení integrační složky v otáčkovém regulátoru se výsledná energie nepatrně zmenší a při zmenšení proporcionální složky se hodnota energie zvětší. Důležitější je, ale zhodnocení předchozích průběhů. U nastavení 2 (zvýšení integrační složky) si lze všimnout, že nedochází k tak velkému překmitu u průběhu otáček jako v nastavení 1, ale průběh je už více rozkmitaný. Skutečná odezva otáček je agresivnější (rychlejší náběh i reakce na požadovaný signál), což dokazuje i průběh proudu na Obr. 35, který je rovněž agresivnější. Průběhy energií u těchto dvou nastavení jsou velmi podobné. U nastavení 3 (zmenšení proporcionální složky), lze už vidět markantní rozdíly v průběhu otáček. Průběh otáček má daleko větší překmit, zároveň i více kmitá a odezva na požadované otáčky je mnohem pomalejší než v předchozích nastavení. Průběh momentotvorného proud je také robustnější, pomalejší a o něco větší než v předchozích nastavení, čímž má zásadní vliv na výsledný průběh energie. Výsledná energie při nastavení 3 je proto o necelých 6 % větší než při nastavení 1. Je nutné ovšem podotknout, že otáčky ani proud v nastavení 3 ještě nejsou ustálené a finální energetický rozdíl bude proto o něco menší.

Nastavení otáčkového regulátoru (praktické měření)	Výsledná energie [J]	Změna energie
Nastavení 1 (p-složka 0,7 ; i-složka 3,275)	778,31	-
Nastavení 2 (p-složka 0,7 ; i-složka 7)	775,82	-0,32 %
Nastavení 3 (p-složka 0,2 ; i-složka 3,275)	823,90	5,86 %

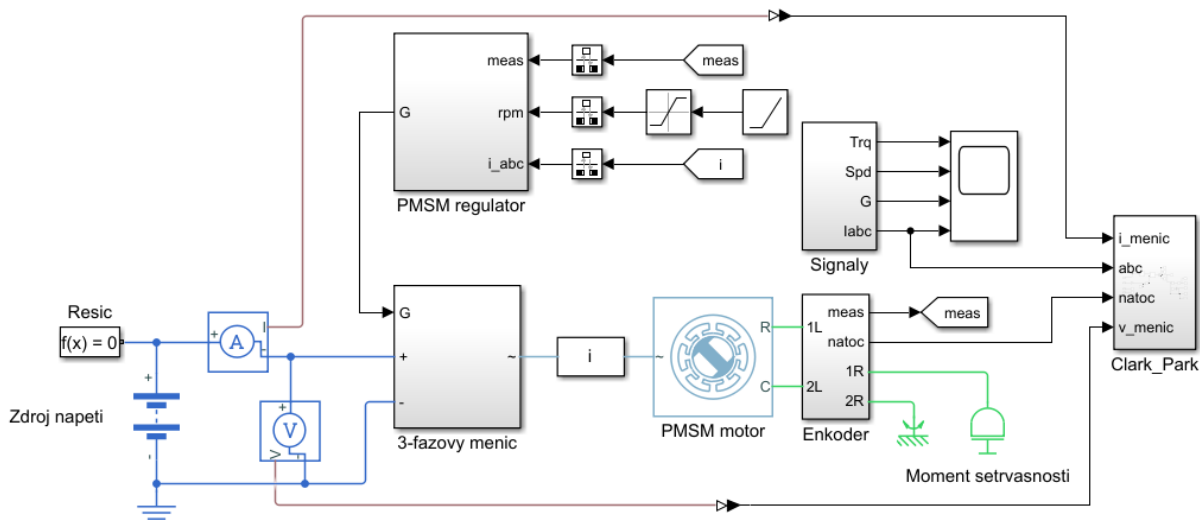
Tab. 6: Výsledné energie měřeného servopohonu pro nastavení 1 až 3

## 6.3 Tvorba modelu servopohonu

Pro srovnání s předchozím měřením byl v programu Simulink vytvořen model servopohonu. Nejprve byl vložen blok pro motor, ve kterém byly definovány jednotlivé parametry jako odpor jedné fáze vinutí  $R_s$ , indukčnost jedné fáze vinutí  $L$ , permanentní magnetický tok na  $\Phi_s$ , počet pólových dvojic  $N$  či moment setrvačnosti rotoru  $J$  podle známých parametrů z měřeného servopohonu Kollmorgen (viz Tab. 7). Před motorem byl poté vytvořen blok pro 3-fázový měnič, který je tvořen 6 bipolárními tranzistory IGBT společně s diodami. Za motor byl následně připojen blok reprezentující enkodér, ve kterém jsou získány údaje o úhlové rychlosti a natočení motoru. Na enkodér je ještě připojen blok momentu setrvačnosti, který představuje setrvačnost motoru Siemens, která byla určena odhadem jako  $136,8 \text{ kg} \cdot \text{cm}^2$ . Posledním vytvořený blok byl pro regulátory rychlosti a proudu. Do tohoto bloku vstupuje požadovaný průběh otáček společně se signálem o skutečných otáčkách a signálem o proudu vstupujícím do motoru. Regulátor je následně propojen s měničem, do kterého posílá změnu hodnot pro požadovanou výslednou otáčkovou odezvu. K měniči musí být také připojen zdroj napětí, ve kterém bylo zadáno napětí jako  $565 \text{ V}$ . Na celou soustavu je také připojen řešič „ode23t“. Model servopohonu lze vidět na Obr. 37.

Parametry motoru Kollmorgen	$R_s$ [ $\Omega$ ]	$L$ [mH]	$\Phi_s$ [Wb]	$N$ [-]	$J$ [ $\text{kg} \cdot \text{cm}^2$ ]
	1,06	5,7	0,1244	5	9,12

Tab. 7: Parametry motoru Kollmorgen



Obr. 37: Model servopohonu

#### 6.4 Nastavení regulátorů v modelu

Nastavení jednotlivých parametrů pro proudový i otáčkový regulátor bylo zjištěno nejprve pomocí výpočtu. Nejprve se pro proudový regulátor vyjádřila zpožďovací konstanta proudové smyčky  $T_{zi}$ :

$$T_{zi} = \frac{1}{f_{VM}} + \frac{1}{f_{vypl}} + \frac{1}{f_{vypl}} = \frac{1}{2000} + \frac{1}{20000} + \frac{1}{20000} = 0,0006 \text{ s} \quad (57)$$

Kde  $f_{VM}$  je spínací frekvence výkonového měniče a  $f_{vypl}$  je výpočtová frekvence proudové smyčky. Poté se vypočítala proporcionalní složka proudového regulátoru  $K_{Pi}$  pomocí známých parametrů z motoru jako:

$$K_{Pi} = \frac{L}{R_s^2 \cdot K_T \cdot T_{zi}} = \frac{0,0057}{1,06^2 \cdot 1,23 \cdot 0,0006} = 6,87 \quad (58)$$

Kde  $L$  je indukčnost jedné fáze vinutí,  $R_s$  je odpor jedné fáze vinutí a  $K_T$  je momentová konstanta motoru. Následně byla vypočítána i integrační složka proudového regulátoru  $K_{Ii}$  jako:

$$K_{Ii} = \frac{1}{R_s \cdot K_T \cdot T_{zi}} = \frac{1}{1,06 \cdot 1,23 \cdot 0,0006} = 1278,31 \quad (59)$$

Po úspěšném zjištění parametrů pro proudový regulátor byl vypočteny i parametry pro otáčkový regulátor, kde se nejprve stanovila zpožďovací konstanta otáčkové smyčky  $T_{z\omega}$  jako:

$$T_{z\omega} \cong 2 \cdot T_{zi} = 2 \cdot 0,0006 = 0,0012 \text{ s} \quad (60)$$

Poté se vypočítala proporcionální složka otáčkového regulátoru  $K_{P\omega}$  pomocí známých parametrů z motoru jako:

$$K_{P\omega} = \frac{J \cdot R_s}{\sqrt{\beta_\omega} \cdot T_{z\omega}} = \frac{0,01368 \cdot 1,06}{\sqrt{9} \cdot 0,0012} = 4,30 \quad (61)$$

Kde  $J$  je moment setrvačnosti motoru,  $R_s$  je odpor jedné fáze vinutí a  $\beta_\omega$  je ladící koeficient pro otáčkovou smyčku. Následně byla vypočítána i integrační složka otáčkového regulátoru  $K_{I\omega}$  jako:

$$K_{I\omega} = \frac{J \cdot R_s}{\sqrt{\beta_\omega^3} \cdot T_{z\omega}^2} = \frac{0,01368 \cdot 1,06}{\sqrt{9^3} \cdot 0,0012^2} = 397,83 \quad (62)$$

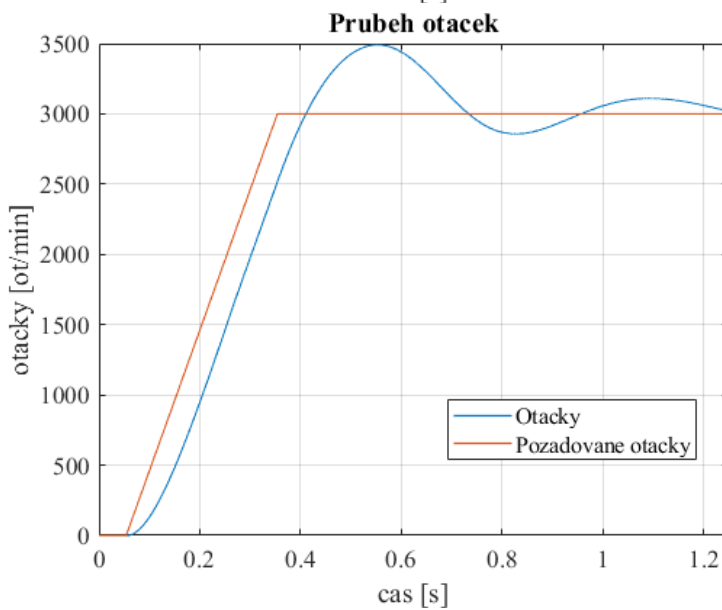
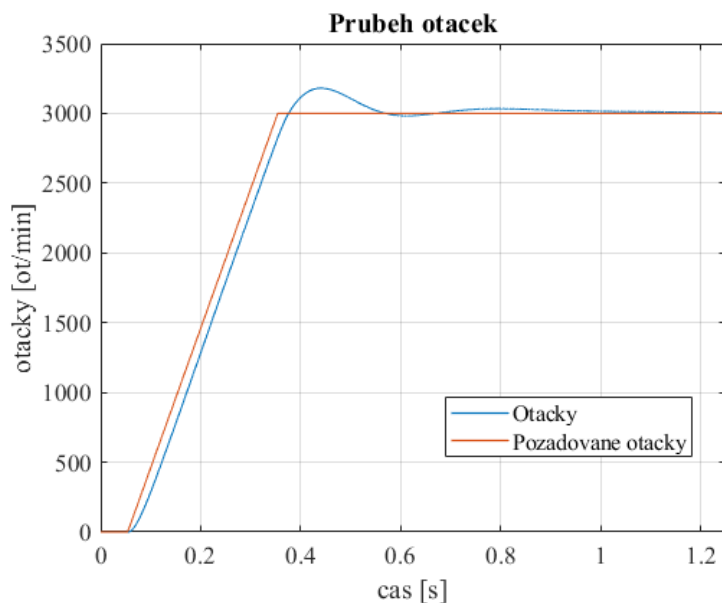
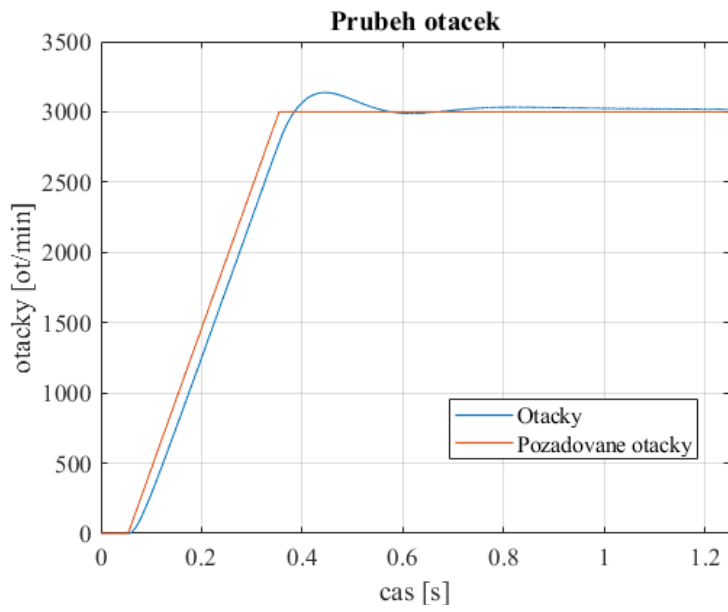
Tímto způsobem byly stanoveny orientační parametry jednotlivých regulátorů, které se poté manuálně upravily pro zlepšení regulace do následující Tab. 8. [20]

Nastavení regulátorů	Proporcionální složka (výpočet)	Proporcionální složka (finální)	Integrační složka (výpočet)	Integrační složka (finální)
Proudový regulátor	6,87	6	1278,31	70
Otáčkový regulátor	4,30	0,9	397,83	1,5

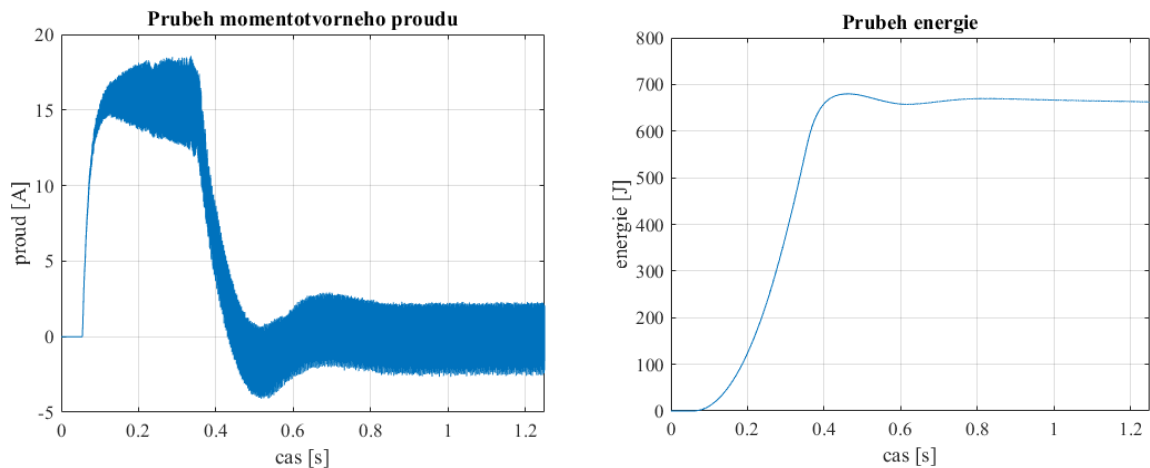
Tab. 8: Regulační parametry pro model servopohonu

## 6.5 Simulace na vytvořeném modelu servopohonu

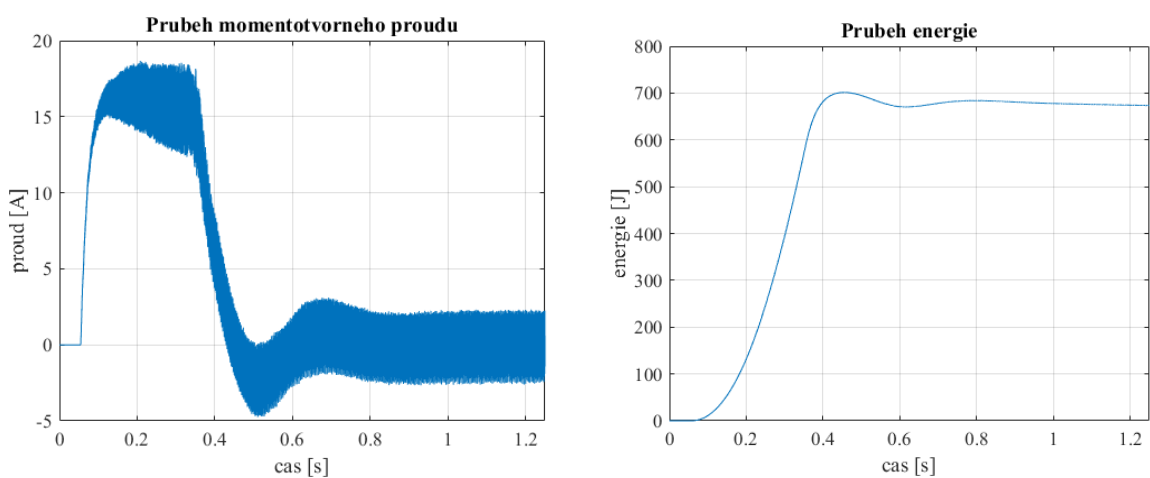
Pro srovnání s praktickým měřením se pro model provedla taktéž tři měření při třech různých nastaveních otáčkového regulátoru. V jednotlivých nastaveních byla provedena stejná procentuální změna pro danou složku podle praktického měření. Nastavení 1 mělo finální hodnoty z Tab. 8. V nastavení 2 byla zvýšena integrační složka otáčkového regulátoru na 3,21 a v nastavení 3 byla snížena proporcionální složka otáčkového regulátoru na 0,26. Ve všech nastaveních byly pro srovnání vyhodnoceny průběhy otáček (Obr. 38). Posléze byl pomocí Clarkovy a Parkovy transformace přepočítán 3-fázový proud na proud momentotvorný, který se rovněž porovnal s předchozím měřením a pomocí něhož a momentotvorného napětí byl vypočítán výkon servopohonu ze kterého se díky integraci vypočítal průběh výsledné energie. Tyto signály byly převedeny ze Simulinku do Matlabu opět pomocí bloku „To Workspace“, kde se vypracovaly jednotlivé průběhy. Průběhy momentotvorných proudů a energií pro všechna nastavení lze vidět na Obr. 39 až 41.



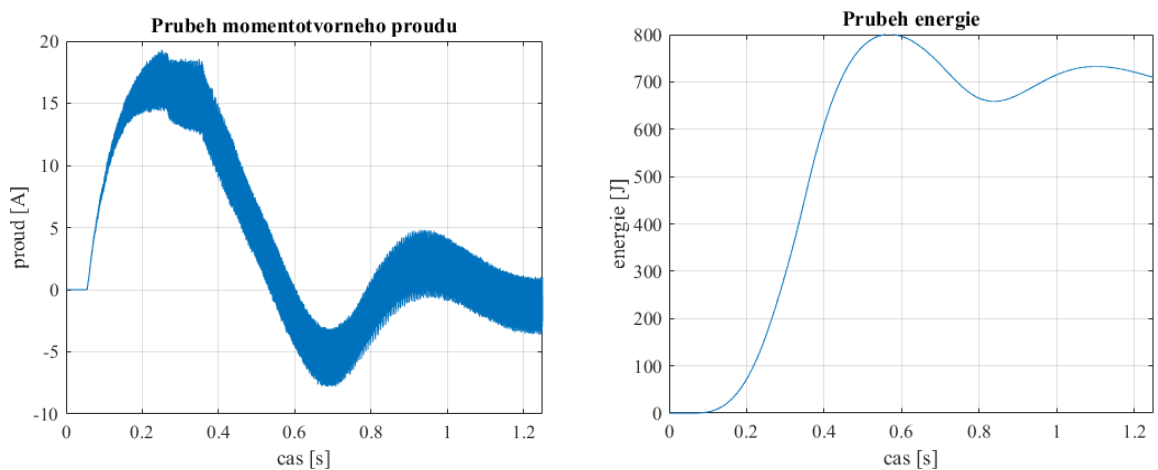
Obr. 38: Průběhy otáček modelu servopohonu pro nastavení 1 (nahore) až 3 (dole)



Obr. 39: Průběh momentotvorného proudu (vlevo) a energie (vpravo) pro nastavení 1



Obr. 40: Průběh momentotvorného proudu (vlevo) a energie (vpravo) pro nastavení 2



Obr. 41: Průběh momentotvorného proudu (vlevo) a energie (vpravo) pro nastavení 3

## 6.6 Zhodnocení výsledků měřeného modelu a porovnání s praktickým měřením

U porovnání průběhů otáček si lze všimnout, že průběhy pro nastavení 1 a 2 jsou velmi podobné. V nastavení 2 je o trochu větší překmit a průběh je také o trochu více agresivnější než v nastavení 1 v důsledku zvětšení integrační složky otáčkového regulátoru. V obou případech jsou poměrně rychle splněny požadované otáčky. V nastavení 3 již dochází k velkému otáčkovému překmitu a celý průběh je mnohem více rozkmitaný než v předchozích nastaveních. Téměř totožné jsou i průběhy momentotvorných proudů a energií pro nastavení 1 a 2. V nastavení 3 je průběh momentotvorného proudu pomalejší a zároveň kmitavější v důsledku zmenšení proporcionální složky otáčkového regulátoru. Výsledné hodnoty jednotlivých energií byly zapsány do Tab. 9. Výsledná energie byla pro první nastavení 662,63 J. U nastavení 2 se výsledná energie zvětšila o 1,56 % a u nastavení 3 o 7,09 %, což je v obou případech důsledek většího odebíraného proudu. V nastavení 3 je navíc průběh otáček pomalejší, více kmitavý a má také větší překomity, proto je už u tohoto nastavení vidět větší energetickou náročnost.

V celkovém srovnání průběhů a výsledných energií praktického měření servopohonu a modelovém měření servopohonu lze konstatovat, že průběhy otáček jsou si velmi podobné pro obě měření. Rozdíl je pouze v náběhu požadovaných otáček, kdy právě reálný motor nemá tak strmý náběh. Průběhy momentotvorných proudů v modelovém řešení jsou více kmitavější než proudy v praktickém měření, což může být zapříčiněno chybou řešiče. Při porovnání výsledných energií je zjištěno, že výsledné energie praktického měření jsou cca o 100 J větší, což je dáno tím, že je model zjednodušený oproti reálné soustavě. Při snížení proporcionálních složek v nastaveních 3 se v obou případech zvětší výsledná energie s tím, že průběhy otáček, proudů a energií jsou pomalejší, kmitavější a zároveň mají i větší překmit. V nastavení 2 s větší integrační složkou v otáčkovém regulátoru u reálného servopohonu energie klesá, zatímco v modelovém řešení roste, což může být dáno nepřesně zvolenými parametry, ať už pro proudový regulátor nebo pro regulátor otáčkový.

<b>Nastavení otáčkového regulátoru (model)</b>	<b>Výsledná energie [J]</b>	<b>Změna energie</b>
<b>Nastavení 1 (p-složka 0,9 ; i-složka 1,5)</b>	662,63	-
<b>Nastavení 2 (p-složka 0,9 ; i-složka 3,21)</b>	673,49	1,56 %
<b>Nastavení 3 (p-složka 0,26 ; i-složka 1,5)</b>	709,62	7,09 %
<b>Nastavení otáčkového regulátoru (praktické měření)</b>	<b>Výsledná energie [J]</b>	<b>Změna energie</b>
<b>Nastavení 1 (p-složka 0,7 ; i-složka 3,275)</b>	778,31	-
<b>Nastavení 2 (p-složka 0,7 ; i-složka 7)</b>	775,82	-0,32 %
<b>Nastavení 3 (p-složka 0,2 ; i-složka 3,275)</b>	823,90	5,86 %

Tab. 9: Srovnání energetických hodnot pro modelové a praktické měření



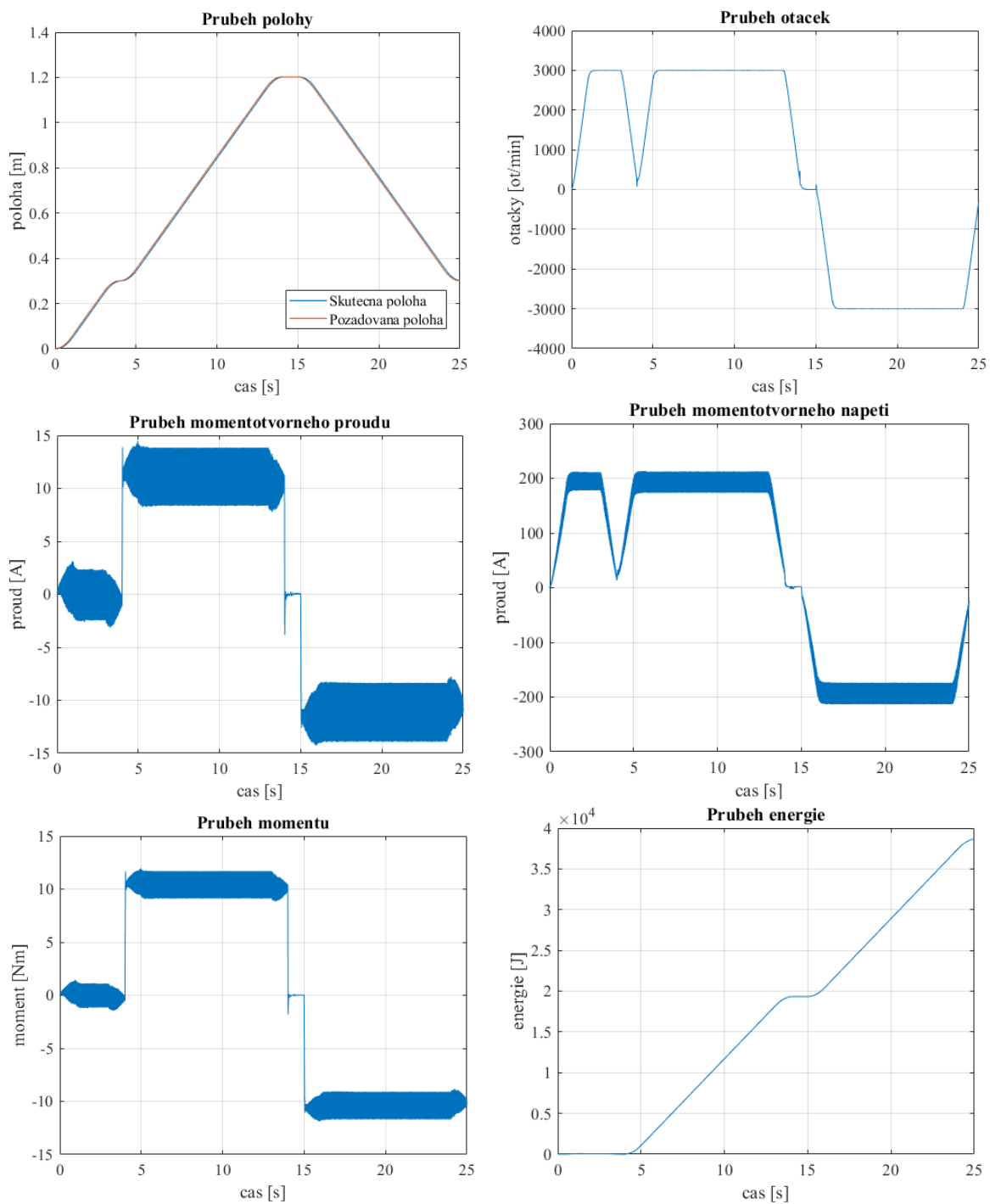
## 6.7 Časové srovnání simulace modelu DC motoru a modelu synchronního servopohonu

Pro časové srovnání obou modelů byla nejprve v modelu synchronního servopohonu vložena stejná mechanická část lineární osy, kterou využíval i model DC motoru. Pouze se zde zvětšilo zatížení pomocí síly z původních 1,6 kN na 30 kN, aby byl motor správně zatížen. Následně se do modelu přidal i proporcionální regulátor polohy jehož složka byla nastavena na 300000. Pro model synchronního servopohonu s lineární osou byl v programu Matlab vytvořen samostatný skript, ze kterého se model spouštěl a posléze v něm byly vykresleny signály ze simulace. Poté se zkoumaly průběhy a energetické rozdíly pro základní nastavení regulátorů (vypočtené hodnoty z Tab. 8) a pro 2,5krát menší nastavení otáčkového regulátoru. Průběhy polohy, otáček, momentu, energie, momentotvorného proudu a napětí pro základní nastavení lze vidět na Obr. 42. Při 2,5krát menším nastavení otáčkového regulátoru byly průběhy téměř totožné stejně jako energetické rozdíly, které se lišily v řádu setin procent, a proto zde již tyto průběhy nejsou zobrazeny.

Pro zrychlení simulace synchronního servopohonu a pro časové srovnání s modelem DC motoru byla simulace zkrácena z původních 120 sekund na 25 sekund. Zjištění délky simulace se provádělo v Matlabu pomocí příkazů „tic“ a „toc“, kde se po proběhnutí simulace zobrazil skutečný čas délky simulace. Tyto časy pak byly zaznamenány do Tab. 10 ze které lze vyčíst, že simulace modelu synchronního servopohonu je oproti simulaci modelu s DC motorem opravdu velmi časově náročná a proto se při základních modelových návrzích vyplatí postupovat od jednodušších modelů směrem k těm složitějším.

Časové srovnání simulací	Výsledný čas [s]	Výsledný čas [hod]
Model DC motoru	5,64	-
Model synchronního servopohonu	$4,5 \cdot 10^3$	1,25

Tab. 10: Časové srovnání simulací



Obr. 42: Průběhy pro základní nastavení modelu synchronního servopohonu s lineární osou

## 7 ZÁVĚR

Na začátku této práce byl v první kapitole popsán servopohon z pohledu mechatronického systému. Byly zde definovány a popsány všechny části ze kterých se servopohon skládá, jak funguje a jaké je vlastně jeho využití v běžné praxi. V následující kapitole byl servopohon rozebrán z pohledu ztrát a účinností. V této kapitole byly objasněny ztráty, které v servopohonu vznikají. Tyto ztráty se rozdělily na ztráty tvořené v měniči a na ztráty tvořené v motoru. U všech ztrát byl popsán i teoretický výpočet a jejich vliv na výkon servopohonu. Kapitola o regulátorech a jejich nastavení pojednávala o základním principu chování regulátorů. Bylo zde popsáno, jak jednotlivé regulační složky ovlivňují výslednou regulaci a také zde byla vysvětlena regulace servopohonů v podobě kaskádní regulace. Tyto tři kapitoly vytvářely teoretickou část celé této práce.

V následující praktické části byl vytvořen v programu Simulink model DC motoru s lineární osou. Tento model byl regulován pomocí kaskádní regulace, kde se postupně v modelu ladily jednotlivé regulátory. Jakmile byl model hotov, tak se v programu Matlab vytvořily skripty definující nejprve pohyb s lineárním zrychlením a poté pohyb se zrychlením pomocí S-křivek. Následovalo propojení modelu a skriptů v nichž se zadefinovalo různé nastavení regulátorů a vykreslily se požadované průběhy daných signálů. Na konci této kapitoly byla vytvořena tabulka s finálními energetickými hodnotami a byl zde zkoumán energetický rozdíl pro různá nastavení regulátorů. Rovněž zde byl popsán vliv jednotlivých složek regulátorů na výsledné průběhy při jejich změně.

Ve druhé polovině praktické části se nejprve změřil reálný servopohon. Měření se provádělo pro tři regulační nastavení, přičemž se měnily pouze parametry v otáčkovém regulátoru. Pro všechna tato nastavení byly vytvořeny průběhy otáček a momentotvorných proudů společně s výslednou energií. Toto měření se poté porovnávalo s modelem servopohonu vytvořeným v programu Simulink. Do modelu se zadaly známé parametry podle reálného servopohonu a rovněž zde byly vytvořeny požadované průběhy a výsledné energetické hodnoty pro srovnání s praktickým měřením.

Celkově lze říci, že při velmi malé změně jednotlivých složek regulátorů zůstává výsledná energie téměř totožná společně s ostatními průběhy. Při větší změně již, ale může nastat větší energetický rozdíl, zejména pokud jsou tyto změny prováděny v otáčkovém regulátoru, který ovlivňoval výslednou regulaci DC motoru největším způsobem, a tudíž byl stanoven jakožto nejdůležitější regulátor v kaskádní regulaci. V některých nastaveních docházelo už k poměrně obrovskému energetickému rozdílu, což mělo za následek, že výsledné průběhy byly velmi nekvalitní (např. nesplnění požadovaného průběhu polohy). U srovnání praktického měření servopohonu s jeho modelem bylo zjištěno, že výsledná energie modelu je menší, což je dáno tím, že do modelu nejsou zahrnuty veškeré ztráty a také zde mohly být nepřesně nastaveny parametry jednotlivých regulátorů (zejména proudového). Porovnávané průběhy jsou ale velmi podobné a největší vliv na energetickou náročnost mělo snížení proporcionalní složky otáčkového regulátoru, kdy došlo ke zpomalení celkové regulace s většími překmity, což mělo za následek zvýšenou výslednou energii. Ve výsledku je třeba si uvědomit, že regulace servopohonu by měla nejprve splňovat požadavky, které jsou na ní kladeny (např. požadovaný průběh polohy nebo rychlosti) ve smyslu kvalitní regulace bez ohledu na energetickou náročnost. Při splnění těchto podmínek se poté může regulace

lehce upravit pro zmenšení energetické náročnosti, aniž by však výsledná změna regulace měla vliv na požadované úkony servopohonu.

Jelikož byly v praktické části této práce vytvořeny modely tvořené DC motorem a synchronním motorem, tak tato práce může v budoucnu posloužit všem pohonářům, kteří chtějí ověřit chování motoru při daném regulačním nastavení, kdy pomocí drobných úprav v modelu lze ověřit téměř každý motor. Navíc model DC motoru s lineární osou může posloužit i konstruktérům obráběcích strojů a strojů podobných k simulaci celé reálné soustavy a zjištění, jak se daná soustava bude chovat. Tento model by se dal v budoucnu ještě více specifikovat z pohledu ztrát pro zajištění větší přesnosti a přiblížení k reálným řešením. U modelu synchronního servopohonu by pro reálnější výsledky mohl být doplněn i teplotní model, který by zohlednil velikost některých ztrát v závislosti na teplotě.

## 8 SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

- [1] SKALICKÝ, Jiří. Elektrické servopohony. Vyd. 2. Brno: Vysoké učení technické, 2001. ISBN 80-214-1978-4
- [2] What is a Sevo Drive? Top Benefits for Motion Control Applications. In: *Advanced Motion Controls*. [online]. [cit. 21.07.2021]. Dostupné z: <https://www.a-m-c.com/servo-drive-top-benefits-motion-control-applications/>
- [3] What is a Servo Motor and How it Works? In: *RealPars*. [online]. [cit. 21.07.2021]. Dostupné z: <https://realpars.com/servo-motor/>
- [4] Servo Motor Fundamentals. In: *ISL Products*. [online]. [cit. 21.07.2021]. Dostupné z: <https://islproducts.com/design-note/servo-motor-fundamentals/>
- [5] What's the Difference between AC, DC, and EC Motors? In: *MachineDesign*. [online]. [cit. 21.07.2021]. Dostupné z: <https://www.machinedesign.com/mechanical-motion-systems/article/21835874/whats-the-difference-between-ac-dc-and-ec-motors>
- [6] Encoders and Resolvers. In: *DYNAPAR*. [online]. [cit. 21.07.2021]. Dostupné z: <https://kamanautomation.com/wp-content/uploads/dynapar-encoders-and-resolvers-how-to-choose-the-right-feedback-options.pdf>
- [7] What's the difference between a servo drive and a motion controller? In: *Linear Motion Tips*. [online]. [cit. 21.07.2021]. <https://www.linearmotiontips.com/whats-the-difference-between-a-servo-drive-and-a-motion-controller/>
- [8] What a Servo Drive actually is and where is it used? In: *Ryadel*. [online]. [cit. 21.07.2021]. Dostupné z: <https://www.ryadel.com/en/servo-drive-what-how-where-usge-guide-tutorial/>
- [9] Elektrotechnika. In: *ELUC*. [online]. [cit. 21.07.2021]. Dostupné z: <https://eluc.krolomoucky.cz/>
- [10] All About Servo Motor Controllers – What They Are and How They Work? In: *Thomasnet*. [online]. [cit. 21.07.2021]. Dostupné z: <https://www.thomasnet.com/articles/instruments-controls/servo-motor-controllers/>
- [11] TONG, Wei. Mechanical design of electric motors. Boca Raton: CRC Press, Taylor & Francis Group, [2014]. ISBN 9781420091434.
- [12] Výkonové spínací prvky. In: *Učební texty: Vysoká škola báňská*. [online]. [cit. 21.07.2021]. Dostupné z: [http://dalkove2008-2013.wz.cz/ek\\_vykonove\\_spinace.pdf](http://dalkove2008-2013.wz.cz/ek_vykonove_spinace.pdf)
- [13] PATOČKA, Miroslav. Matematický nástroj pro analýzu PWM signálů, jeho využití ve střídavých pohonech: teze habilitační práce. Brno: VUTIUM, 2000. Vědecké spisy Vysokého učení technického v Brně. ISBN 80-214-1646-7.
- [14] Frik's web. In: *Frik's web*. [online]. [cit. 21.07.2021]. Dostupné z: [http://www.frik.cz/elektro/components/capacitor\\_cs.php](http://www.frik.cz/elektro/components/capacitor_cs.php)
- [15] BUŠOV, Bohuslav. Učební texty – Elektrické přístroje (BEPR) [Elektronické učební texty]. [cit. 21.07.2021].
- [16] PYRHONEN, Juha, Tapani JOKINEN a Valeria HRABOVCOVÁ. Design of rotating electrical machines. Hoboken, NJ: Wiley, c2008. ISBN 978-0-470-69516-6
- [17] SKALICKÝ, Jiří. Teorie řízení. Brno: Vysoké učení technické, 2002. ISBN 80-214-2112-6

- [18] BLAHA, P., VAVŘIN, P.: Řízení a regulace I. Elektronické skriptum VUT v Brně. Dostupné z: [https://www.uamt.feec.vutbr.cz/~richter/vyuka/1112\\_BRR1/texty/brr1.pdf](https://www.uamt.feec.vutbr.cz/~richter/vyuka/1112_BRR1/texty/brr1.pdf)
- [19] GARZINOVÁ, Romana, Zora JANČÍKOVÁ a Ondřej ZIMNÝ. Základy automatizace technologických procesů v teorii. Ostrava: Vysoká škola báňská, 2013. ISBN 978-80-248-3044-5
- [20] MALEK, Michal, Pavol MAKYŠ, a Marek ŠTULRAJTER. Riadenie elektrických pohonov. EDIS, 2019. ISBN 978-80-554-1334-1
- [21] SOUČEK, Pavel. Regulační pohony v posuvech NC strojů. MM Průmyslové spektrum č. 1,2/2010. ISSN 1212-2572
- [22] SOUČEK, Pavel. Servomechanismy ve výrobních strojích. Praha: Vydavatelství ČVUT, 2004. ISBN 80-01-02902-6
- [23] MAREK, Jiří. Konstrukce CNC obráběcích strojů III. Praha: MM publishing, 2014. MM speciál. ISBN 978-80-260-6780-1
- [24] SLÁDEK, V. Energetický model lineární osy s kuličkovým šroubem a servopohonem. Brno, Vysoké učení technické v Brně. Dostupné z: [https://www.vutbr.cz/www\\_base/zav\\_prace\\_soubor\\_verejne.php?file\\_id=193162](https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=193162)
- [25] Advanced Mechanisms/Robotics: S-Curve TG [online]. [cit. 21.07.2021]. Dostupné z: <http://www.et.byu.edu/~ered/ME537/Notes/notes.html>

## 9 SEZNAM ZKRATEK, SYMBOLŮ, OBRÁZKŮ A TABULEK

### 9.1 Seznam tabulek

TAB. 1) VLIV PARAMETRŮ NA VÝSLEDNOU REGULACI [20].....	35
TAB. 2) JEDNOTLIVÉ ENERGIE PŘI RŮZNÝCH NASTAVENÍCH REGULÁTORŮ (LINEÁRNÍ ZRYCHLENÍ) .....	56
TAB. 3) ZMĚNA ENERGIÍ PŘI RŮZNÝCH NASTAVENÍCH REGULÁTORŮ (LINEÁRNÍ ZRYCHLENÍ) .....	57
TAB. 4) JEDNOTLIVÉ ENERGIE PŘI RŮZNÝCH NASTAVENÍCH REGULÁTORŮ (S-KŘIVKY).....	61
TAB. 5) ZMĚNA ENERGIÍ PŘI RŮZNÝCH NASTAVENÍCH REGULÁTORŮ (S-KŘIVKY) .....	62
TAB. 6) PARAMETRY MOTORU KOLLMORGEN.....	67
TAB. 7) VÝSLEDNÉ ENERGIE MĚŘENÉHO SERVOPOHONU PRO NASTAVENÍ 1 AŽ 3 .....	67
TAB. 8) REGULAČNÍ PARAMETRY PRO MODEL SERVOPOHONU .....	69
TAB. 9) SROVNÁNÍ ENERGETICKÝCH HODNOT PRO MODELOVÉ A PRAKTICKÉ MĚŘENÍ .....	72
TAB. 10) ČASOVÉ SROVNÁNÍ SIMULACÍ.....	73

### 9.2 Seznam obrázků

OBR. 1) SERVOPOHON A JEHO JEDNOTLIVÉ KOMPONENTY [3].....	17
OBR. 2) SNÍMAČE POLOHY: ABSOLUTNÍ ENKODÉR (VLEVO), INKREMENTÁLNÍ ENKODÉR A RESOLVER (VPRAVO) [6] .....	18
OBR. 3) RŮZNÉ TYPY MĚNIČŮ PRO SERVOPOHONY [2] .....	19
OBR. 4) NAPĚŤOVÝ FREKVENČNÍ MĚNIČ PRO ASYNCHRONNÍ MOTOR [1].....	22
OBR. 5) ČASOVÝ PRŮBĚH PROUDU PŘI ZAPÍNÁNÍ A VYPÍNÁNÍ POLOVODIČOVÉ SOUČÁSTKY [12] .....	24
OBR. 6) SCHÉMA REÁLNÉHO KONDENZÁTORU [12] .....	25
OBR. 7) ROZDĚLENÍ ZTRÁT V MOTORU .....	27
OBR. 8) SANKEYŮV DIAGRAM KLASICKÉHO INDUKČNÍHO MOTORU O VÝKONU 4KW ( $P_{FE}$ – ZTRÁTY V ŽELEZE, $P_{CUS}$ – ZTRÁTY VE STATOROVÉM VINUTÍ, $P_{AD}$ – DODATEČNÉ ZTRÁTY, $P_{\Delta}$ – VZDUCHOVÉ ZTRÁTY, $P_{CUR}$ – ZTRÁTY V ROTOROVÉM VINUTÍ, $P_p$ – ZTRÁTY V LOŽISCÍCH) [16].....	31
OBR. 9) SCHÉMA PRINCIPU ZPĚTNOVAZEBNÍHO ŘÍZENÍ [17] .....	32

<b>OBR. 10) PŘECHODOVÉ CHARAKTERISTIKY PRO JEDNOTLIVÉ REGULÁTORY [17] .....</b>	<b>36</b>
<b>OBR. 11) SCHÉMA KASKÁDNÍ REGULACE.....</b>	<b>37</b>
<b>OBR. 12) ELEKTRICKÁ ČÁST MODELU.....</b>	<b>39</b>
<b>OBR. 13) ROTAČNÍ ČÁST MODELU .....</b>	<b>41</b>
<b>OBR. 14) TRANSLAČNÍ ČÁST MODELU .....</b>	<b>42</b>
<b>OBR. 15) REGULAČNÍ ČÁST MODELU .....</b>	<b>42</b>
<b>OBR. 16) NULOVÝ ZDROJ RYCHLOSTI PRO ZABRŽDĚNÝ MOTOR .....</b>	<b>43</b>
<b>OBR. 17) IDEÁLNÍ S-KŘIVKA [25].....</b>	<b>44</b>
<b>OBR. 18) S-KŘIVKA S LINEÁRNÍM ZRYCHLENÍM [25].....</b>	<b>45</b>
<b>OBR. 19) MATICE DEFINUJÍCÍ POHYB STROJE.....</b>	<b>47</b>
<b>OBR. 20) VYTVOŘENÍ JEDNOTLIVÝCH VEKTORŮ (LINEÁRNÍ ZRYCHLENÍ).....</b>	<b>48</b>
<b>OBR. 21) SLEPENÍ VŠECH ČÁSTÍ JEDNOTLIVÝCH SEKTORŮ .....</b>	<b>49</b>
<b>OBR. 22) PRŮBĚH POŽADOVANÉ POLOHY (LINEÁRNÍ ZRYCHLENÍ) .....</b>	<b>49</b>
<b>OBR. 23) VYTVOŘENÍ JEDNOTLIVÝCH VEKTORŮ (S-KŘIVKY).....</b>	<b>50</b>
<b>OBR. 24) VYTVOŘENÍ JEDNOTLIVÝCH VEKTORŮ (S-KŘIVKY).....</b>	<b>51</b>
<b>OBR. 25) PRŮBĚH POŽADOVANÉ POLOHY (S-KŘIVKY) .....</b>	<b>51</b>
<b>OBR. 26) PRŮBĚHY PŘI ZÁKLADNÍM NASTAVENÍ REGULÁTORŮ (LINEÁRNÍ ZRYCHLENÍ).....</b>	<b>53</b>
<b>OBR. 27) PRŮBĚHY PŘI 3KRÁT VĚTŠÍM NASTAVENÍ VŠECH REGULÁTORŮ (LINEÁRNÍ ZRYCHLENÍ).....</b>	<b>54</b>
<b>OBR. 28) PRŮBĚHY PŘI 3KRÁT MENŠÍM NASTAVENÍ VŠECH REGULÁTORŮ (LINEÁRNÍ ZRYCHLENÍ).....</b>	<b>55</b>
<b>OBR. 29) PRŮBĚHY PŘI ZÁKLADNÍM NASTAVENÍ REGULÁTORŮ (S-KŘIVKY).....</b>	<b>58</b>
<b>OBR. 30) PRŮBĚHY PŘI 2,5KRÁT MENŠÍM NASTAVENÍ OTÁČKOVÉHO REGULÁTORU (S-KŘIVKY) .....</b>	<b>59</b>
<b>OBR. 31) PRŮBĚHY PŘI 2,5KRÁT VĚTŠÍM NASTAVENÍ OTÁČKOVÉHO REGULÁTORU (S-KŘIVKY) .....</b>	<b>60</b>
<b>OBR. 32) MĚŘENÍ SERVOPOHONU KOLLMORGEN (VPRAVO) S PŘIPOJENÝM MOTOREM SIEMENS (VLEVO).....</b>	<b>63</b>
<b>OBR. 33) POŽADOVANÝ PRŮBĚH OTÁČEK.....</b>	<b>64</b>
<b>OBR. 34) PRŮBĚHY OTÁČEK SERVOPOHONU KOLLMORGEN PRO NASTAVENÍ 1 AŽ 3.....</b>	<b>65</b>
<b>OBR. 35) PRŮBĚHY MOMENTOTVORNÝCH PROUDŮ SERVOPOHONU KOLLMORGEN PRO NASTAVENÍ 1 AŽ 3 .....</b>	<b>66</b>
<b>OBR. 36) PRŮBĚHY ENERGIÍ SERVOPOHONU KOLLMORGEN PRO NASTAVENÍ 1 AŽ 3.....</b>	<b>66</b>



<b>OBR. 37) MODEL SERVOPOHONU .....</b>	<b>68</b>
<b>OBR. 38) PRŮBĚHY OTÁČEK MODELU SERVOPOHONU PRO NASTAVENÍ 1 (NAHOŘE) AŽ 3 (DOLE) .....</b>	<b>70</b>
<b>OBR. 39) PRŮBĚH MOMENTOTVORNÉHO PROUDU (VLEVO) A ENERGIE (VPRAVO) PRO NASTAVENÍ 1 .....</b>	<b>71</b>
<b>OBR. 40) PRŮBĚH MOMENTOTVORNÉHO PROUDU (VLEVO) A ENERGIE (VPRAVO) PRO NASTAVENÍ 2 .....</b>	<b>71</b>
<b>OBR. 41) PRŮBĚH MOMENTOTVORNÉHO PROUDU (VLEVO) A ENERGIE (VPRAVO) PRO NASTAVENÍ 3 .....</b>	<b>71</b>
<b>OBR. 42) PRŮBĚHY PRO ZÁKLADNÍ NASTAVENÍ MODELU SYNCHRONNÍHO SERVOPOHONU S LINEÁRNÍ OSOU.....</b>	<b>74</b>

### 9.3 Seznam zkratek a symbol

$F_g$	[N]	Gravitační síla
$F_k$	[N]	Přítlačná síla
$F_t$	[N]	Třecí síla
$F_1$	[N]	Síla o velikosti 1 N
$I_{A1}$	[A]	Amplituda první harmonické fázového proudu
$I_c$	[A]	Typový proud
$I_{ef,\Delta}$	[A]	Efektivní sdružený proud
$I_{ef,D}$	[A]	Efektivní hodnota proudu diodou
$I_{ef,T}$	[A]	Efektivní hodnota proudu tranzistorem
$I_{ef}$	[A]	Efektivní hodnota proudu
$I_{stř,D}$	[A]	Střední hodnota proudu diodou
$I_{stř,T}$	[A]	Střední hodnota proudu tranzistorem
$I_{stř}$	[A]	Střední hodnota proudu
$K_{Ii}$	[-]	Integrační složka proudového regulátoru
$K_{Pi}$	[-]	Proporcionální složka proudového regulátoru
$K_{I\omega}$	[-]	Integrační složka otáčkového regulátoru
$K_{P\omega}$	[-]	Proporcionální složka otáčkového regulátoru
$K_d$	[-]	Zesílení derivačního členu
$K_i$	[-]	Zesílení integračního členu
$K_p$	[-]	Zesílení proporcionálního členu
$K_T$	[Nm/Arms]	Momentová konstanta motoru
$L_{ESL}$	[H]	Ekvivalentní sériová indukčnost
$M_{lož}$	[Nm]	Třecí moment ložiska
$P_{cu}$	[W]	Ztráty ve vinutí
$P_e$	[W]	Ztráty vířivými proudy
$P_h$	[W]	Hysterezní ztráty
$P_{in}$	[W]	Příkon

$P_{kon}$	[W]	Ztráty v kondenzátoru
$P_{lož}$	[W]	Ztráty v ložisku
$P_m$	[W]	Ztráty v magnetech
$P_{out}$	[W]	Výkon
$P_{sp}$	[W]	Spínací ztráty
$P_{ved}$	[W]	Ztráty ve vedení
$P_{\delta}$	[W]	Vzduchové ztráty
$R_{ESR}$	[ $\Omega$ ]	Ekvivalentní sériový odpor
$R_P$	[ $\Omega$ ]	Paralelní odpor
$R_d$	[ $\Omega$ ]	Dynamický odpor
$R_f$	[ $\Omega$ ]	Elektrický odpor jedné fáze vinutí
$R_k$	[ $\Omega$ ]	Přechodový odpor
$R_s$	[ $\Omega$ ]	Odpor jedné fáze vinutí
$R_u$	[ $\Omega$ ]	Úžinový odpor
$R_w$	[ $\Omega$ ]	Odpor cizích vrstev
$R_0$	[ $\Omega$ ]	Odpor vodiče při počáteční teplotě
$S_C$	[ $m^2$ ]	Průřez jednoho závitů
$T_{zi}$	[s]	Zpoždovací konstanta proudové smyčky
$T_{z\omega}$	[s]	Zpoždovací konstanta otáčkové smyčky
$U_{AB1}$	[V]	Amplituda první harmonické sdruženého fázového napětí
$U_P$	[V]	Prahové napětí
$U_{max}$	[V]	Maximální amplituda fázového napětí
$V_C$	[ $m^3$ ]	Objem magnetického jádra
$V_m$	[ $m^3$ ]	Objem magnetu
$W_{off}$	[J]	Ztrátová energie při vypnutí
$W_{on}$	[J]	Ztrátová energie při zapnutí
$W_{sep}$	[J]	Ztrátová energie při sepnutém stavu
$a_s$	[ $m/s^2$ ]	Lineární zrychlení
$b_m$	[m]	Tloušťka magnetu
$f_{VM}$	[Hz]	Spínací frekvence výkonového měniče
$f_{vyipi}$	[Hz]	Výpočtová frekvence proudové smyčky
$i_c$	[A]	Kolektorový proud tranzistoru
$k_R$	[–]	Odporový faktor charakterizující skin efekt
$k_h$	[–]	Hysterezní koeficient
$k_n$	[–]	Činitel zachycující druh materiálu
$k_r$	[–]	Koeficient drsnosti povrchu
$l_{av}$	[m]	Průměrná délka vodiče jednoho závitů
$m_f$	[–]	Počet fází vinutí
$n_{jm}$	[ot/min]	Jmenovité otáčky motoru
$n_1$	[–]	Činitel udávající druh kontaktního styku

$t_0$	[°C]	Počáteční teplota
$u_{CE}$	[V]	Kolektorové napětí tranzistoru
$v_s$	[m/s]	Rovnoměrná rychlost
$\beta_\omega$	[-]	Ladící koeficient pro otáčkovou smyčku
$\tau_d$	[-]	Derivační časová konstanta
$\tau_i$	[-]	Integrační časová konstanta
$\Phi_s$	[Wb]	Permanentní magnetický tok
$\Delta$	[-]	Odchyłka mezi požadovanou a skutečnou polohou
$\Delta t$	[°C]	Teplotní rozdíl
$B$	[T]	Magnetická indukce
$C$	[F]	Kapacita
$C$	[N]	Dynamické zatížení ložiska
$D$	[m]	Vnitřní průměr
$F(p)$	[-]	Přenosová funkce
$I$	[A]	Proud
$J$	[kg · m <sup>2</sup> ]	Moment setrvačnosti motoru
$K$	[-]	Činitel proudového využití tranzistoru
$L$	[H]	Indukčnost jedné fáze vinutí
$M$	[-]	Modulační činitel
$N$	[-]	Počet závitů
$N$	[-]	Počet pólových dvojic
$P$	[N]	Ekvivalentní dynamické zatížení ložiska
$Q$	[-]	Činitel jakosti
$W$	[J]	Ztrátová energie
$Z$	[Ω]	Impedance
$b$	[Nm/s]	Součinitel viskózního tření
$\cos\varphi$	[-]	Fázový posun
$d$	[m]	Tloušťka plechu
$f$	[Hz]	Frekvence
$g$	[m/s <sup>2</sup> ]	Gravitační zrychlení
$l$	[m]	Délka
$m$	[kg]	Hmotnost
$n$	[ot/min]	Otáčky
$p$	[-]	Laplaceův operátor
$r$	[m]	Poloměr
$s$	[-]	Steinmetzův koeficient
$s$	[mm/ot]	Stoupání šroubu
$t$	[s]	Čas
$tg\varphi$	[-]	Ztrátový činitel
$v$	[m/s]	Rychlost
$\alpha$	[K <sup>-1</sup> ]	Teplotní součinitel

$\eta$	[%]	Účinnost
$\mu$	[-]	Koeficient tření
$\rho$	[ $kg/m^3$ ]	Hustota
$\sigma$	[ $S/m$ ]	Specifická elektrická vodivost
$\omega$	[ $rad/s$ ]	Úhlová rychlost
Obr.	zkratka	Obrázek
Ot.	zkratka	Otáčky
Reg.	zkratka	Regulátor
Tab.	zkratka	Tabulka

## 10 SEZNAM PŘÍLOH

CD - obsahuje model DC motoru s lineární osou a m-fily pro lineární pohyb a pohyb pomocí S-křivky, které spouští model. Dále obsahuje model servopohonu s výsledným m-filem a také jsou zde uloženy výsledky praktického měření.