

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ

KATEDRA ELEKTROENERGETIKY A EKOLOGIE

DIPLOMOVÁ PRÁCE

SILOVÁ A ŘÍDICÍ ČÁST MĚNIČŮ PRO MODERNÍ ELEKTRICKÉ SERVOPOHONY

Autor práce: Bc. Jiří Dražan

Vedoucí práce: Doc. Ing. Martin Pittermann, Ph.D.

Plzeň 2020

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI

Fakulta elektrotechnická
Akademický rok: 2019/2020

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE (projektu, uměleckého díla, uměleckého výkonu)

Jméno a příjmení: **Bc. Jiří DRAŽAN**
Osobní číslo: **E17N0020K**
Studijní program: **N2644 Aplikovaná elektrotechnika**
Studijní obor: **Aplikovaná elektrotechnika**
Téma práce: **Silová a řídicí část měničů pro moderní elektrické servopohony**
Zadávající katedra: **Katedra elektroenergetiky a ekologie**

Zásady pro vypracování

Provedte popis současného stavu techniky v oblasti elektrických servopohonů se zaměřením na sortiment výrobních řad od předních světových výrobců. Dále proveďte popis několika konkrétních příkladů aplikace těchto servopohonů. Práce bude obsahovat tyto body:

1. Stručný úvod do problematiky servopohonů.
2. Typické příklady aplikace elektrických servopohonů.
3. Popis stávajícího stavu technologií měničů z hlediska silové části měniče (usměrňovač, vlivy na síť, brzda, možnost využití brzděné energie pro jiný motor, filtry atd.). Popis stávajícího stavu technologií měničů z hlediska řídicí části měniče (komunikace s okolními zařízeními, možnosti nastavování parametrů, vstupy od zpětných vazeb a čidel, softwareové ochrany, stručné principy řízení pohonu, nadřazené řízení a další technologické funkce atd.).
4. Stručný popis sortimentu výrobních řad od několika předních světových výrobců a od jednoho vybraného producenta poněkud detailnější popis sortimentu jeho výrobních řad.
5. Několik modelových příkladů návrhu servopohonů a to vždy od vstupního popisu daného řazení (zadání, počet poháněných os, jejich výkony atd.), volba vhodného typu servopohonů (měnič+motor+čidla) až po stručný popis zapojení (ve smyslu návaznosti na body zadání č. 3 a 4).

Rozsah diplomové práce: **40 – 60 stran**
Rozsah grafických prací: **podle doporučení vedoucího**
Forma zpracování diplomové práce: **tištěná/elektronická**

Seznam doporučené literatury:

1. Vondrášek, F., Glasberger, T., Fořt, J., Jára, M., Michalík, J.: Výkonová elektronika. Sv. 3, Měniče s vlastní komutací a bez komutace. Část 2, Měniče kmitočtu a střídavého napětí. 3. vyd. Plzeň : Západočeská univerzita v Plzni, 2017, 287 s. ISBN: 978-80-261-0688-3
2. Pittermann M.: Přehled měničů pro elektrické pohony. Západočeská univerzita v Plzni, 2015, 258 s. ISBN: 978-80-261-0598-5
3. Pittermann M.: Elektrické pohony – základy. Západočeská univerzita v Plzni, 2008, 98 s. ISBN: 978-80-7043-729-2

Vedoucí diplomové práce: **Doc. Ing. Martin Pittermann, Ph.D.**
Katedra elektromechaniky a výkonové elektroniky

Datum zadání diplomové práce: **4. října 2019**
Termín odevzdání diplomové práce: **28. května 2020**



Prof. Ing. Zdeněk Peroutka, Ph.D.
děkan



L.S.



Doc. Ing. Karel Noháč, Ph.D.
vedoucí katedry

Abstrakt

Tato diplomová práce se zabývá silovou a řídicí částí moderních servopohonů a konkrétními příklady jejich aplikace. Popis silové části je zaměřen především na elektromagnetickou kompatibilitu a problematiku brzdné energie. V kapitole o řídicí části je pozornost věnována zejména enkodérům a regulační struktuře servoměniče, včetně praktické ukázky nastavení regulačních konstant. Dále je uveden stručný popis sortimentu výrobních řad od několika předních světových výrobců a poněkud podrobnější popis výrobních řad společnosti Schneider Electric. Poslední kapitola práce se zabývá nejprve praktickým návrhem servopohonů pro vybraný jednoúčelový stroj, včetně zvolení vhodných servoměničů, servomotorů a enkodérů. Následně je uveden popis zapojení silové a řídicí části a zdůvodnění zvoleného řešení. Práce poskytuje základní přehled v oblasti moderních servopohonů.

Klíčová slova

Servopohon, silová část servopohonu, řídicí část servopohonu, enkodér, regulační struktura, dimenzování servopohonu

Abstract

Dražan, Jiří. *Power and control part of inverters for modern electric actuators [Silová a řídicí část měničů pro moderní elektrické servopohony]*. Pilsen, 2020. Diploma thesis (in Czech). University of West Bohemia. Faculty of Electrical Engineering. Department of Electrical Power Engineering and Environmental Engineering Supervisor: Martin Pittermann

This thesis deals with the power and control parts of modern actuators and specific examples of their application. The description of the power part focuses mainly on electromagnetic compatibility and the problems of braking energy. The chapter on the control part deals mainly with encoders and the control structure of the servo inverter, including a practical example of setting control constants. Then follows a brief description of the product range from several of the world leading manufacturers. It offers a more detailed description of Schneider Electric product range. The last chapter deals with the design of servo drives for a selected single-purpose machine, including the selection of suitable servo inverters, servomotors and encoders. Subsequently, the description of the power and control part connection and the justification of the chosen solution are given. The work provides a basic overview of modern actuators.

Keywords

Servodrive, power part of servodrive, control part of servodrive, encoder, control structure, servo drive sizing

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem svou závěrečnou práci vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce. Souhlasím s umístěním bakalářské práce v knihovně a s jejím dalším užitím v různých předmětech nebo k vlastní potřebě jednotlivým zájemcům. Také prohlašuji, že veškerý software použitý při řešení této bakalářské práce je legální.

V Plzni dne 26. května 2020

Bc. Jiří Dražan

.....
podpis

Obsah

Seznam obrázků	vi
Úvod	1
1 Úvod do problematiky servopohonů	2
1.1 Elektrické servomotory	3
1.2 Servopohon se synchronním motorem s permanentními magnety PMSM	4
1.2.1 Momentová charakteristika	4
1.2.2 Vektorové řízení	6
2 Silová část servopohonu	8
2.1 Usměrňovač	8
2.1.1 Jednofázové napájení	9
2.2 Stejnoseměrný meziobvod	9
2.2.1 Přednabíjecí obvod	9
2.2.2 Brzdny rezistor	10
2.3 Využití brzdny energie	13
2.3.1 Společná stejnosměrná sběrnice	13
2.4 Výkonový výstupní IGBT můstek	14
2.5 Elektromagnetická kompatibilita	15
2.5.1 Nízkofrekvenční rušení a způsob eliminace	15
2.5.2 Vysokofrekvenční rušení a způsob eliminace	17
3 Řídicí část servopohonu	21
3.1 Logické vstupy a výstupy	21
3.2 Bezpečnostní logické vstupy a funkce	21
3.3 Analogové vstupy	22
3.4 Pulzní vstupy PTI a výstupy PTO	23
3.5 Ochrany servopohonů	23
3.6 Regulační struktura	23
3.6.1 Popis regulační struktury servoměniče Lexium32	24
3.6.2 Nastavení parametrů regulačního obvodu servoměniče Lexium 32	26
3.7 Enkodéry	32
3.7.1 Absolutní enkodér	32
3.7.2 Inkrementální enkodér	33
3.7.3 Inkrementální enkodér typu Sin/Cos	34
3.7.4 Absolutní enkodér typu Sin/Cos s komunikací Hiperface společnosti Sick	36

3.7.5	Resolver	37
3.8	Nadřazené řízení a komunikace	38
4	Přehled výrobců servopohonů a popis produktových řad	40
4.1	Schneider Electric	40
4.1.1	Servoměniče Lexium 32	40
4.1.2	Servomotory BMH a BSH	42
4.1.3	Kompaktní servopohony Lexium 32i	42
4.2	Siemens	43
4.3	Yaskawa	44
4.4	Lenze	45
5	Poloautomat na kompletaci a kontrolu ovladačů nouzového zastavení	47
5.1	Dimenzování servopohonu - osa X manipulátoru	48
5.2	Dimenzování servopohonu - osa Z manipulátoru	51
5.3	Dimenzování servopohonu - natočení tělesa ovladače	54
5.4	Dimenzování servopohonu - kontrola funkce	56
5.5	Stručný popis zapojení a funkce	57
5.5.1	Popis silového zapojení	58
5.5.2	Popis zapojení řídicí části	58
	Závěr	61
	Literatura	63

Seznam obrázků

1.1	<i>Základní uspořádání mechatronického systému (převzato a upraveno z [20]) . . .</i>	2
1.2	<i>Omezující vlivy na výslednou momentovou charakteristiku servopohonu s PMSM</i>	5
1.3	<i>Příklad momentové charakteristiky servopohonu se zobrazením oblasti možného využití metody odbuzování tokotvornou složkou statorového proudu (převzato a upraveno z interní dokumentace Schneider Electric)</i>	7
1.4	<i>Fázorové diagramy PMSM, vlevo bez odbuzování, vpravo s odbuzováním (převzato z [22])</i>	7
2.1	<i>Typické výkonové schéma nepřímého měniče kmitočtu s napěťovým střídačem . .</i>	8
2.2	<i>Ukázka reálného provedení servoměniče</i>	8
2.3	<i>Ukázky externích brzdných rezistorů</i>	12
2.4	<i>Zjednodušený průběh proudu odebíraného třífázovým usměrňovačem (převzato a upraveno z [29])</i>	16
2.5	<i>Výtah z katalogu LXM32 - volba síťové tlumivky (převzato a upraveno z [3]) . .</i>	17
2.6	<i>Základní zapojení síťového filtru (převzato a upraveno z [29])</i>	19
3.1	<i>Průběhy pulzních signálů pro PTI/PTO (převzato a upraveno z [1])</i>	23
3.2	<i>Základní, blokové schéma regulační, kaskádní struktury servoměniče</i>	24
3.3	<i>Schéma polohového regulačního obvodu (převzato z [1])</i>	25
3.4	<i>Schéma otáčkového regulačního obvodu LXM32M (převzato z [1])</i>	25
3.5	<i>Schéma proudového regulačního obvodu servoměniče LXM32M (převzato z [1]) .</i>	26
3.6	<i>Soustava servomotor a zátěž - ukázka návrhu parametrů regulačního obvodu . .</i>	27
3.7	<i>Chybové hlášení E1620 - velký poměr setrvačnosti zátěže a motoru</i>	27
3.8	<i>Odezva na jednotkový skok rychlosti - $KP_n = 0,041$</i>	28
3.9	<i>Odezva na jednotkový skok rychlosti - $KP_n = 0,1$</i>	28
3.10	<i>Rozkmitání pohonu - $KP_n = 0,3$</i>	28
3.11	<i>Spektrální analýza průběhu z obr. (3.10)</i>	29
3.12	<i>Odezva na jednotkový skok rychlosti po nastavení antirezonačního filtru - $KP_n = 0,3$</i>	29
3.13	<i>Odezva na jednotkový skok rychlosti - $KP_n = 0,5$</i>	29
3.14	<i>Odezva na jednotkový skok rychlosti - $TN_n = 26 \text{ ms}$</i>	30
3.15	<i>Odezva na jednotkový skok polohy - $Kpp = 30$</i>	31
3.16	<i>Odezva na pracovní cyklus po nastavení regulačních smyček - bez dopředné zpětné vazby</i>	31
3.17	<i>Odezva na pracovní cyklus po nastavení regulačních smyček - s dopřednou zpětnou vazbou</i>	32

3.18	<i>Kódovací disk binárním kódem a gray kódem (převzato a upraveno z [17])</i>	33
3.19	<i>Ukázka konstrukce optoelektronického inkrementálního enkodéru (převzato a upraveno z [15])</i>	34
3.20	<i>Struktura a signály inkrementálního Sin/Cos enkodéru (převzato a upraveno z [18])</i>	35
3.21	<i>Rozhraní absolutního enkodéru Sin/Cos s kom. Hiperface (převzato z [12])</i>	36
3.22	<i>Ilustrační elektrické schéma resolveru (převzato a upraveno z [14])</i>	37
4.1	<i>Jednotlivé komponenty servopohonu Lexium 32i (převzato a upraveno z [8])</i>	43
5.1	<i>Mechatronické sestavy - PKKO (převzato a upraveno z výrobní dokumentace se souhlasem společnosti Schneider Electric)</i>	47
5.2	<i>Jednotlivé komponenty hříbového ovladače - PKKO (převzato z výrobní dokumentace se souhlasem společnosti Schneider Electric)</i>	48
5.3	<i>Pracovní cyklus osy X manipulátoru (veličiny s, v, a) - PKKO</i>	48
5.4	<i>Momentová charakteristika servopohonu LXM32AU45M2+B5H551T (Vytvořeno pomocí [9])</i>	51
5.5	<i>Pracovní cyklus osy Z manipulátoru (veličiny s, v, a) - PKKO</i>	52
5.6	<i>Momentová charakteristika servopohonu LXM32AU45M2 + B5H040P (Vytvořeno pomocí [9])</i>	54
5.7	<i>Pracovní cyklus natočení tělesa ovladače (veličiny $\varphi, \omega, \varepsilon$) - PKKO</i>	55
5.8	<i>Aplikace PKKO - Hardwarová konfigurace</i>	57
5.9	<i>Ukázka výsledku dosažené úrovně vlastností v SW SISTEMA</i>	60

Úvod

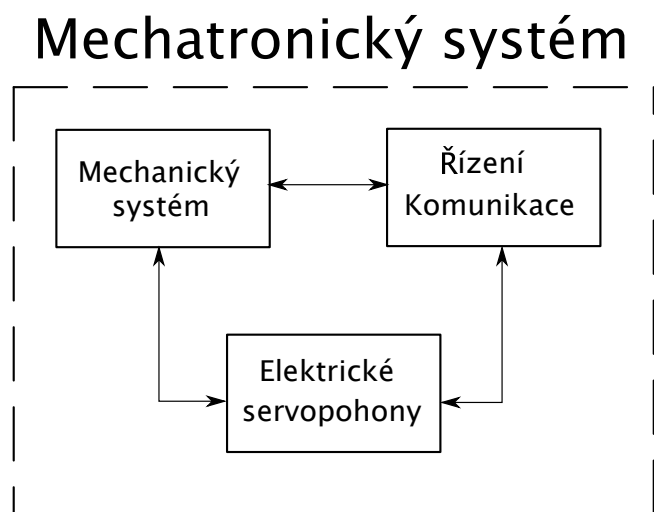
Předmětem této práce je popsání vybraných statí z problematiky elektrických servopohonů a jejich použití při návrhu konkrétních aplikací. Konstrukteři obvykle řeší otázku volby vhodných komponent pro splnění požadavků zadání dané mechatronické aplikace. Nutno poznamenat, že se jedná o rozsáhlou problematiku. Literatura se obvykle věnuje jejím jednotlivým oblastem, a chybí tedy stručný základní přehled, který by poskytl jak teoretické znalosti, tak i ukázkou jejich využití v praxi. To bylo také hlavním podnětem sepsání této práce. Je tedy především kladen důraz na základní shrnutí a vysvětlení podstatných otázek, se kterými se lze při praktickém návrhu servopohonů setkat.

První kapitola se věnuje obecnému úvodu do problematiky servopohonů. Zmíněny jsou některé typické aplikace a používané servomotory, jejich vlastnosti a způsob řízení. Hlavní pozornost je věnována PMSM servomotorům, jelikož se jedná v praxi o nejvíce využívané typy. Druhá kapitola se zaměřuje na silovou část servopohonu, tj. usměrňovač, stejnosměrný meziobvod, brzdňý rezistor, vysokofrekvenční a nízkofrekvenční rušení a způsob jejich eliminace použitím dodatečných prostředků. Třetí kapitola si klade za cíl vysvětlení hlavních bodů z řídicí části servopohonu, a proto je pozornost mimo jiné věnována regulační struktuře a zařízením poskytujícím informaci o aktuální poloze a otáčkách servomotoru, tj. enkodérům. Čtvrtá kapitola popisuje produktové řady čtyř významných výrobců servopohonů – Siemens, Lenze, Yaskawa, Schneider Electric. Poslednímu ze zmíněných je věnována největší pozornost, jelikož tyto servopohony byly použity v praktických částech práce. Poslední kapitola se zabývá návrhy čtyř servopohonů vybraného jednoúčelového stroje spolu s rozbořem funkce a silového a řídicího zapojení.

V práci jsou uváděny odkazy na literaturu, která může posloužit k prohloubení znalostí o daných tematicích.

1 Úvod do problematiky servopohonů

Servopohon je obecně součástí určitého mechatronického systému sestávajícího se dále z řídicího a komunikačního bloku a mechanického systému, viz obr. (1.1). Elektrický servopohon je jednou z podskupin regulačních pohonů, která je charakteristická čtyřkvadrantovou pracovní charakteristikou a zpětnovazební regulační strukturou, což je i hlavním rozdílem od „běžných“ pohonů, které mohou v řadě případů pracovat v otevřené regulační smyčce, tzn. bez zpětné vazby.



Obrázek 1.1: Základní uspořádání mechatronického systému (převzato a upraveno z [20])

Obecně lze servopohon rozdělit na dvě hlavní části, a to servomotor a servoměnič. Tyto dvě části jsou výrobci realizovány nejčastěji v provedení odděleném nebo integrovaném do jednoho zařízení jako kompaktní servopohon, viz např. kap. (4.1.3). Do pojmu servopohon lze dále zařadit snímače polohy, resp. úhlu natočení v praxi označované jako enkodéry a dále také příslušenství jako např. motorový a enkodérový kabel.

Dle požadavků na funkci lze uvést následující rozdělení:

- polohový servopohon, který umožňuje řízení polohy, resp. úhlu natočení
- rychlostní servopohon pouze s otáčkovou zpětnou vazbou, který sleduje zadávanou rychlost
- servopohon pro generování a řízení momentu

Jako typické příklady využití servopohonů lze uvést následující aplikace:

- Balicí technologie
- Navíjecí stroje
- Manipulační technika - portálové systémy

- Tiskařské lisy
- Stroje na řezání a tváření kovů
- Výrobní linky a jednoúčelové stroje
- Textilní průmysl
- Robotika a další...

Tyto aplikace kladou na servopohony technologické požadavky, mezi které především patří kvalita regulace (polohy, rychlosti a momentu), která je dána její dynamikou a stabilitou. Jako další požadavky lze uvést např.: vysokou účinnost, zajištění trvalého výkonu, výkonovou přetížitelnost, malé rozměry, spolehlivost, bezúdržbovost apod.

Výkonová část moderního servoměniče je obvykle v provedení nepřímého měniče kmitočtu s napěťovým střídačem. Je tedy nutné se zabývat vlivem měniče na napájecí síť, na napájená zařízení a na ostatní zařízení v blízkosti měniče (viz kap. 2.5).

Regulační struktura využívá obvykle kaskádní řazení regulátorů, lze se však také setkat s paralelní regulační strukturou. Využívá se většinou nepřímého vektorového řízení. Problematice servoměniče jsou věnovány dvě samostatné kapitoly této práce.

1.1 Elektrické servomotory

Pro získání přehledu o jednotlivých principech servomotorů se lze odkázat na literaturu [20]. Zde je uveden pouze stručný přehled a v případě synchronních servopohonů s permanentními magnety jsou vysvětleny některé problematiky poněkud podrobněji, jelikož s tímto typem servopohonu je pracováno v praktické části diplomové práce.

Historicky jsou nejstarší stejnosměrné servopohony s permanentními magnety na statoru, které se dnes již nepoužívají vzhledem k nutnosti mechanického komutátoru, který vyžaduje údržbu a je zdrojem rušení. V oblasti stejnosměrných servopohonů se lze dnes setkat s elektronicky komutovanými servomotory, které jsou označovány zkratkou BLDC (Brushless DC motor). Tyto motory mají PM na rotoru a stator je tvořen třemi cívkami, které jsou napájené z napěťového střídače obdélníkovými signály. Poloha rotoru je zjišťována pomocí hallových sond, které určují, v kterém z šesti úseků se rotor nachází a dle toho je vždy připojena příslušná fáze.

Dále se lze také setkat s asynchronními servomotory, které se využívají spíše na vyšších výkonech. Oproti níže uvedeným PMSM servomotorů, mají horší účinnost díky nutnosti rotorového vinutí, mají větší moment strvačnosti, ovšem jsou levnější.

V současnosti jsou nejvíce zastoupeny na trhu s malými a středními výkony výhradně servopohony se synchronními motory s permanentními magnety (dále pouze PMSM), kterým je věnována následující kapitola.

1.2 Servopohon se synchronním motorem s permanentními magnety PMSM

Konstrukcí a principem funkce PMSM se zabývá např. literatura [20]. Níže jsou popsány základní výhody a nevýhody, dále pak je uveden popis momentové charakteristiky a základní princip vektorového řízení.

Jak již bylo uvedeno, pro servopohony jsou synchronní motory buzené permanentními magnety na rotoru nejvíce nasazovány v průmyslových aplikacích. Důvodem jsou jejich výhodné vlastnosti:

- Vysoká účinnost - není potřeba vyvářet magnetické pole
- Vysoký poměr výkon/hmotnosti motoru
- Velká momentová přetížitelnost, resp. proudová (až 6x)
- Vysoký rozsah a přesnost regulace
- Velký rozběhový moment
- PMSM má tvrdou momentovou charakteristiku

Lze také uvést některé nevýhody:

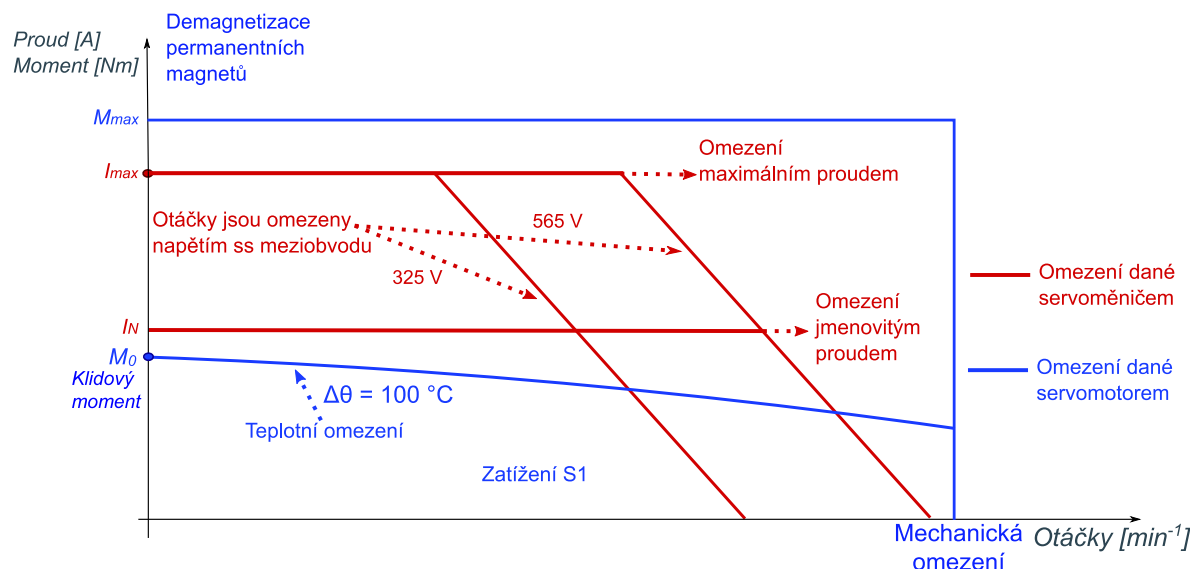
- Problematické odbuzování tokotvornou složkou
- Nejsou vhodné pro vysoké výkony vzhledem k ceně permanentních magnetů

Nutno poznamenat, že v běžných průmyslových aplikacích jsou však tyto nevýhody bezvýznamné a tyto motory jsou obvykle nejlepší variantou.

1.2.1 Momentová charakteristika

Obr. (1.2) zobrazuje omezující vlivy na výslednou momentovou charakteristiku celého servopohonu, které je nutné brát v úvahu při návrhu aplikace. Moment je s proudem jednoznačně svázaný momentovou konstantou servomotoru, což umožňuje zobrazovat na jedné ose charakteristiky jak krouticí moment servomotoru, tak proud servoměniče, který krouticímu momentu odpovídá.

Při typové zkoušce servomotoru se provádí řada testů. Jedním z nejdůležitějších je oteplovací zkouška, která stanoví závislost krouticího momentu na otáčkách v trvalém provozu při maximální povolené teplotě vinutí. Ta je dána izolační třídou dle normy ČSN EN 60034-1 [36]. U PMSM je typicky specifikována třída F, která určuje maximální dovolenou teplotu vinutí motoru na 155 °C. Servomotory jsou standardně konstruovány na teplotu okolí 40 °C + 15 °C



Obrázek 1.2: Omezující vlivy na výslednou momentovou charakteristiku servopohonu s PMSM

se uvažuje jako teplotní spád směrem od vinutí na povrch servomotoru, na kterém by tedy oteplení nemělo přesáhnout $100\text{ }^{\circ}\text{C}$. Výsledkem je informace o možnosti trvalého zatížení motoru, při kterém nedojde při daných otáčkách k překročení maximální hranice oteplení. Ze strany servomotoru se dále jedná o mechanická omezení¹ a maximální kroutcí moment, který je stanovený výrobcem a nachází se pod kritickou hodnotou momentu (proudu), kde by hrozila demagnetizace permanentních magnetů.

Ze strany servoměniče se jedná o velikost napájecího napětí (fázové/sdružené) a jeho trvalý jmenovitý a maximální krátkodobý proud.

Pokud je servomotor roztočen externím zásahem na konstantní otáčky, bude se do statoru indukovat elektromotorické (magnetometrické) napětí \bar{E}_b , které je úměrné mechanické úhlové rychlosti. Toto napětí je přítomné i ve chvíli, kdy je servomotor napájen ze servoměniče. Z rovnice (1.1) je patrné, že po dosažení určité úrovně velikosti \bar{E}_b již není k dispozici maximální proud, resp. moment. Bod zlomu je dán právě napětím ve stejnosměrném meziobvodu, tedy výstupním napětím \bar{U}_s , více viz kap. (1.2.2).

$$\bar{U}_s = \bar{E}_b + R_s \bar{I}_s + j\omega L_s \bar{I}_s \quad (1.1)$$

kde:

R_s je odpor statorového vinutí jedné fáze

L_s je indukčnost statorového vinutí jedné fáze

Menší z hodnot trvalého jmenovitého proudu servoměniče či servomotoru rozděluje pracovní oblast servopohonu na trvalé a krátkodobé zatížení. Žádaný efektivní moment vypočtený při návrhu aplikace musí ležet pod křivkou trvalého zatížení a taktéž žádaný krátkodobý maximální moment musí ležet pod křivkou krátkodobého zatížení servopohonu.

¹ložiska, vyvážení rotoru, max. odstředivé síly s ohledem na fixaci magnetů na rotoru

1.2.2 Vektorové řízení

Princip vektorového řízení je již odborně popsán v mnoha publikacích, z toho důvodu je tato kapitola pojata spíše v obecné rovině. Blokové schéma s jeho kompletním popisem a fázorové diagramy s podrobnějším popisem lze nalézt např. v literatuře [26], [19], [21].

Vektorové řízení² je standardním typem řízení pro servopohony, jelikož zaručuje optimální chod servopohonu, jak v ustálených stavech, tak i v přechodových dějích, což umožňuje kvalitní řízení proudu (momentu) i v dynamicky náročných aplikacích.

Základem jsou transformace z 3fázového systému (a, b, c) do 2fázového, statického, statorového, souřadného systému (α, β) ³ a následná transformace do rotorového souřadného systému (d,q)⁴, který se otáčí a je spjat s polohou rotoru. V systému (d,q) probíhá regulace proudu (momentu) a následně je provedena inverzní transformace zpět do 3fázového systému.

Je zřejmé, že tento typ řízení obecně vyžaduje informaci o poloze vektoru magnetického toku, která je u PMSM shodná s polohou rotoru. Ta je měřena čidlem polohy rotoru⁵, které je známé jako enkodér, viz kap. (3.7). Tím je určeno natočení systému (d,q). Osa d je ve směru buzení a je označována jako tokotvorná. Osa q je ve směru indukovaného napětí \bar{E}_b a je označována jako momentotvorná. Proud statoru \bar{I}_s lze rozložit do systému (d,q), a tím získáme tokotvornou I_{sd} a momentotvornou I_{sq} složku statorového proudu.

Za běžného stavu je proud statoru \bar{I}_s řízen tak, že je ve fázi s napětím \bar{E}_b indukovaném magnetickým tokem permanentních magnetů, tzn., že tokotvorná složka proudu statoru I_{sd} je nulová. V tomto případě lze dosáhnout maximálního momentu. Tato skutečnost vyplývá z náhradního schématu, resp. z matematického modelu PMSM, z kterého je pro elektromagnetický moment odvozena rovnice (1.2)⁶.

$$M = \frac{3}{2} p i_{sq} \Psi_m = \frac{3}{2} p \Psi_m |i_s| \sin \delta \quad (1.2)$$

kde:

- p je počet pólových dvojic
- Ψ_m je velikost magnetického toku PM
- i_{sq} je momentotvorná složka proudu statoru
- δ je úhel mezi vektorem proudu \bar{I}_s a vektorem $\bar{\Psi}_m$

Jak již bylo zmíněno, velikost indukovaného napětí je úměrná elektrické úhlové rychlosti. Pokud by elektrická úhlová rychlost dosáhla takové úrovně, že by napětí poskytnuté servoměničem nebylo dostatečné, je možné využít metodu nepřímého odbuzování. To lze provést zavedením složky proudu statoru \bar{I}_s v záporném směru osy d, což znamená, že tokotvorná složka I_{sd} pak není nulová. Lze pak dále zvyšovat úhlovou rychlost rotoru, ovšem pro získání stejného mo-

²Přesněji nepřímé vektorové řízení.

³Clarke transformation

⁴Park transformation

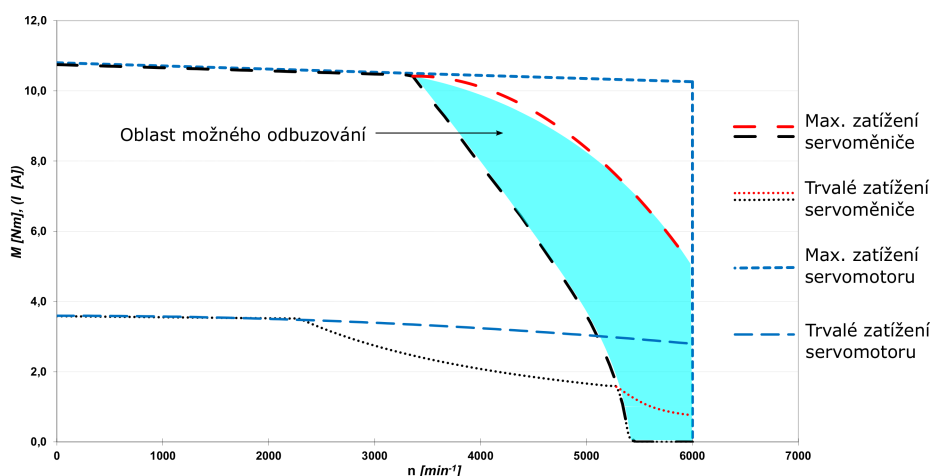
⁵Případně lze polohu rotoru odhadnout tzv. „Sensor Less“ algoritmy.

⁶Za předpokladu, že $L_d = L_q = L_s$ a $k_d = k_q = 2/3$ více viz např. literatura [33].

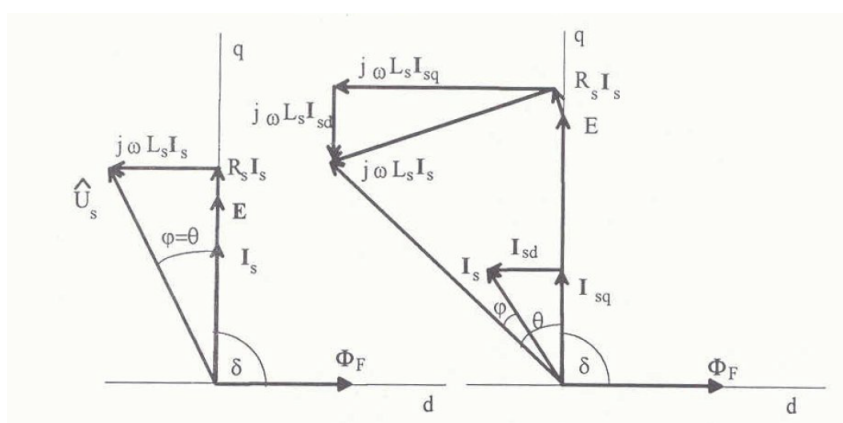
mentu jako bez odbuzování je nutné poskytnout větší hodnotu statorového proudu. Ze vztahu (1.3) je zřejmé, že je nutné splnit podmínku proudového omezení, která je dána dimenzováním statorového vinutí, případně maximálním dovoleným proudem servoměniče. Dochází ke snížení maximálního možného momentu, jelikož momentotvorná složka musí být snížena v důsledku zavedení tokotvorné složky [21].

$$I_s = \sqrt{I_{sd}^2 + I_{sq}^2} \leq I_{smax} \tag{1.3}$$

V praxi v oblasti servopohonů se PMSM se lze s použitím odbuzování setkat jen zřídka. Nicméně možnost nastavení tokotvorné složky výrobci servoměničů obvykle umožňují. Obr. (1.3) ukazuje oblast momentové charakteristiky, ve které lze využít metodu nepřímého odbuzování.



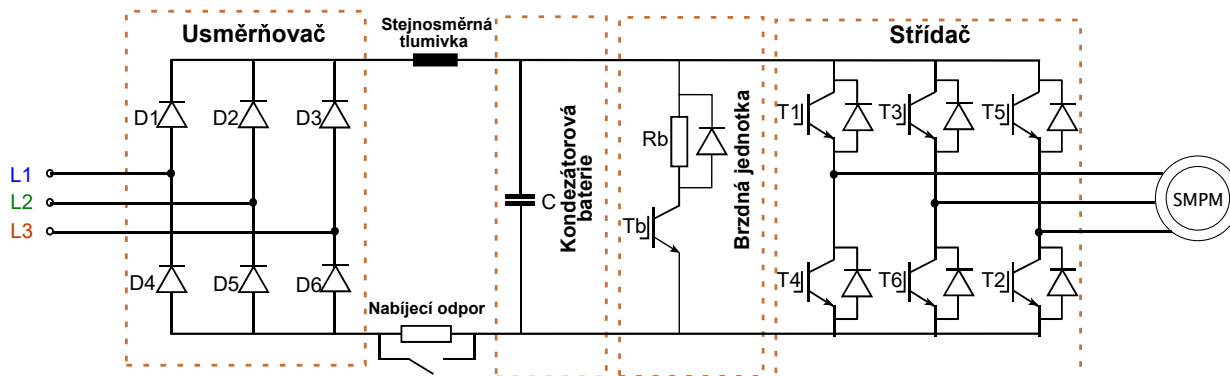
Obrázek 1.3: Příklad momentové charakteristiky servopohonu se zobrazením oblasti možného využití metody odbuzování tokotvornou složkou statorového proudu (převzato a upraveno z interní dokumentace Schneider Electric)



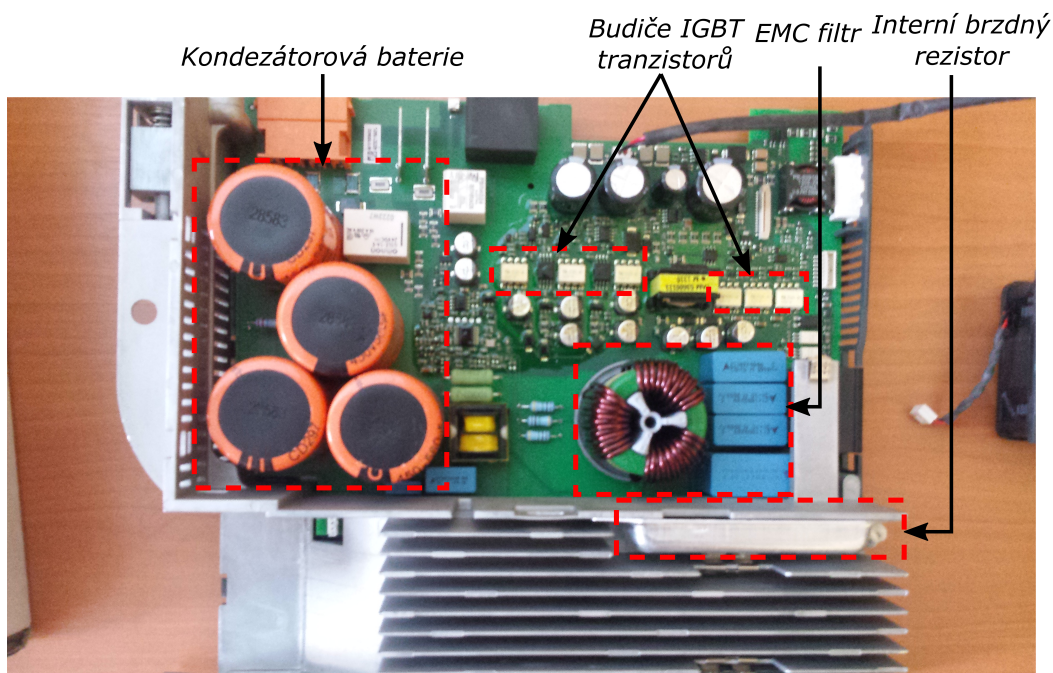
Obrázek 1.4: Fázorové diagramy PMSM, vlevo bez odbuzování, vpravo s odbuzováním (převzato z [22])

2 Silová část servopohonu

Silová část moderních servoměničů je založena na struktuře nepřímého měniče kmitočtu s napěťovým střídačem. Principiální výkonové schéma je na obr. (2.1). Praktická ukázka reálného provedení je na obr. (2.2)¹. Dále jsou probrány jednotlivé hlavní části této struktury.



Obrázek 2.1: Typické výkonové schéma nepřímého měniče kmitočtu s napěťovým střídačem



Obrázek 2.2: Ukázka reálného provedení servoměniče

2.1 Usměrňovač

Jedná se zpravidla o zapojení třífázového šestipulzního, neřízeného, nerezervačního usměrňovače, viz obr. (2.1). Toto uspořádání je nejvýhodnější z pohledu konstrukce i ceny. Usměrňovač

¹Na obrázku není vidět modul výstupního můstku se silovými prvky - je pod deskou s plošnými spoji.

vytváří stejnosměrné napětí dodávané do stejnosměrného meziobvodu, kde dochází k akumulování energie v kondenzátorové baterii. Ze sítě je tedy odebírán proud pouze v případě, že napětí v síti je vyšší než napětí ve stejnosměrném meziobvodu. Z pohledu sítě má toto uspořádání nelineární charakter, a způsobuje tím vznik negativních vlivů na napájecí síť v podobě odebírání vyšších harmonických proudů, viz kap. (2.5).

Diodový usměrňovač neumožňuje tok energie oběma směry. Při toku energie ze zátěže zpět do měniče je nutné tuto energii zmařit v rezistoru, případně využít jiným měničem. Pokud bychom chtěli umožnit rekuperaci energie zpět do sítě, bylo by potřeba doplnit rekuperační jednotku připojenou na svorky stejnosměrného meziobvodu. Vzhledem k tomu, že silová struktura má uspořádání takové, že je proveden dvojnásobný převod energie (st - ss - st), je možné i jednofázové napájení.

2.1.1 Jednofázové napájení

Využívá se tam, kde není k dispozici 3fázová síť nebo není požadován velký výkon servoměniče. Například společnost Schneider Electric nabízí servoměnič s nejvyšším jmenovitým výkonem 1,6 kW při střídavém jednofázovém napájení 200-240 V.

Při porovnání napájení 1f. a 3f. obr. (1.2) a uvažování stejného motoru, je zřejmé, že nelze u 1f. napájení dosáhnout tak vysokých otáček při maximálním momentu jako u 3f. napájení. Důvodem je právě maximální hodnota napětí ve stejnosměrném meziobvodu, tedy vstupní napájecí napětí měniče, viz kap. (1.2.1).

2.2 Stejnosměrný meziobvod

Základním stavebním blokem stejnosměrného meziobvodu je filtrační kondenzátor, resp. kondenzátorová baterie, která se chová z pohledu střídače jako napěťový zdroj. Umožňuje výměnu jalového výkonu pomocí změny smyslu proudu mezi zátěží střídače a stejnosměrným meziobvodem. Aby nedocházelo ke zvlnění a kolísání napětí vlivem zatížení, je potřeba, aby měla kondenzátorová baterie co největší hodnotu (běžně několik mF) a co nejmenší parazitní indukčnost. Jak bude dále uvedeno v kapitole (2.5.1), velká hodnota kapacity kondenzátoru vede k větším hodnotám harmonických proudů odebíraných ze sítě a dále také na velké nabíjecí proudy při připojení servoměniče k napájení.

2.2.1 Přednabíjecí obvod

Při prvním startu z tzv. „studeného stavu“ odebírá měnič velký proud z důvodu nabíjení velké kapacity. Tento proud může dosahovat hodnot, při kterých by mohlo dojít ke zničení vstupního polovodičového můstku. Aby nebylo nutné z toho důvodu předimenzovávat polovodiče, používá se několik způsobů omezení, nejčastěji zapojení přednabíjecího obvodu s přemostěním tzv. „bypass“ do stejnosměrného meziobvodu. Přemostění je obvykle realizováno stykačem,

který musí být dimenzován na plný proud servoměniče.

2.2.2 Brzdňý rezistor

Této problematice je věnována poněkud větší pozornost, jelikož je nezbytné se jí zabývat při návrhu aplikace a následném uvedení do provozu.

Ve stejnosměrném meziobvodu je ke kondenzátorové baterii paralelně zařazen brzdňý rezistor spolu s odpovídající řídicí a ochrannou elektronikou. Při brzdění je energie vracena zpět do stejnosměrného meziobvodu, čímž dochází ke zvyšování jeho napětí. Při překročení určité meze je rezistor připojen a kinetická, či potenciální brzdňá energie je v něm přeměněna na energii tepelnou, která vyzařuje do okolí rezistoru. Zároveň dochází k vybíjení kondenzátorové baterie. Rezistory jsou konstruovány tak, aby vyzářily co nejvíc energie za jednotku času. Při jeho odpojení je nezbytné, aby byla vytvořena cesta pro vybíjecí proud vlastní indukčnosti rezistoru. Cestu lze zajistit například přes obvod s antiparalelní diodou. Toto zapojení si lze také analogicky představit jako pulzní měnič odporu.

Servoměniče zpravidla obsahují interní brzdňý rezistor. Při návrhu aplikace je nutné ověřit, zda tento rezistor bude pro danou aplikaci postačující. Hodnoty interního brzdňého rezistoru lze nalézt v technické dokumentaci výrobce a jejich reprezentace může vypadat například takto:

R_i	Odpor interního rezistoru $[\Omega]$
P_{PR}	Trvalý výkon, při kterém nedojde k přetížení $[W]$
E_{rmax}	Maximální možná krátkodobá absorbovaná energie $[Ws]$

Výrobci dále umožňují pomocí svorek připojit externí brzdňý rezistor, resp. brzdňou jednotku. Příklady provedení externího rezistoru jsou uvedeny na obr. (2.3). Externí připojení rezistoru je vyžadováno v případě, že brzdňá kinetická či potenciální energie převyšuje interní poměry energetické absorpce servoměniče².

Energie, které absorbují brzdňou energii:

E_{var}	energetická rezerva kondenzátorové baterie $[Ws]$
E_{Ri}	energie přeměněná na teplo interním rezistorem $[Ws]$
E_{el}	energie respektující elektrické ztráty v servoměniči $[Ws]$
E_{mech}	energie respektující mechanické ztráty $[Ws]$

E_{var} je udávána výrobcem a lze ji rovněž vypočítat dle rovnice (2.1). E_{Ri} určují veličiny P_{PR} a E_{max} popsané výše. E_{el} jsou elektrické ztráty v servoměniči, a je možné je zanedbat, jelikož při výpočtu nehrají velkou roli a navíc působí proti E_b , tudíž jejich zanedbáním nedojde k poddimenzování brzdňého rezistoru. E_{mech} jsou dány převážně třením vyskytujícími se v mechanické soustavě. Pokud je doba volného doběhu mechanické soustavy několikanásobně větší než doba žádaná k zastavení, je rovněž možné tyto ztráty zanedbat, jelikož působí proti E_b a zanedbáním taktéž nemůže dojít k poddimenzování [2], [1].

²Pokud není brzdňá energie využita jinak, viz kap. (2.3).

$$E_{var} = \frac{1}{2} C_s \left[U_p^2 - \left(\sqrt{2} U_n \right)^2 \right] \quad (2.1)$$

kde:

- C_s je kapacita kondenzátorové baterie [F]
- U_p je prahové napětí ss meziobvodu (napětí, při kterém spíná brzdňá jednotka) [V]
- U_n je napájecí napětí servoměniče [V]

Brzdnou energii pro jeden decelerační interval lze vyjádřit ze zákona zachování energie:

$$E_b = \frac{1}{2} J_c \omega_p^2 - \frac{1}{2} J_c \omega_F^2 \quad (2.2)$$

po úpravě:

$$E_b = \frac{1}{2} J_c \left(\frac{2\pi}{60} \right)^2 (n_p - n_k)^2 \quad (2.3)$$

kde:

- J_c je celkový moment setrvačnosti [kgm²]
- ω_p je počáteční úhlová rychlost (před brzděním) [$\frac{rad}{s}$]
- n_p jsou počáteční otáčky (před brzděním) [min⁻¹]
- ω_k je konečná úhlová rychlost (po brzdění) [$\frac{rad}{s}$]
- n_k jsou konečné otáčky (po brzdění) [min⁻¹]

Celkový moment setrvačnosti lze vyjádřit jako:

$$J_c = J_z + J_m \quad (2.4)$$

kde:

- J_z je moment setrvačnosti zátěže (mech. soustavy) redukováný na hřídel motoru [kgm²]
- J_m je moment setrvačnosti motoru [kgm²]

Z aplikačního dynamického diagramu, např. viz obr. (5.3) jsou vypočteny jednotlivé hodnoty E_b pro všechny jednotlivé decelerační intervaly. Je zřejmé, že brát v úvahu je zapotřebí pouze ty, které převyšují E_{var} .

Výsledná hodnota energie v i-tém intervalu brzdění E_{Di} , která je potřeba zpracovat, je rovna:

$$E_{Di} = E_{bi} - E_{var} \quad (2.5)$$

kde:

- E_{bi} je brzdňá energie v i-tém intervalu brzdění [Ws]

Střední hodnotu výkonu P_c , v jedné periodě cyklu T_c lze určit jako:

$$P_c = \frac{\sum_{i=1}^n E_{Di}}{T_c} \quad (2.6)$$

Někteří výrobci doporučují tuto hodnotu navýšit o určitý koeficient bezpečnosti k_s například na 125 procent (firma ABB) z P_c . Výsledná hodnota P_c nesmí být nikdy větší než hodnota P_{Pr} jak interního či externího rezistoru, případně jejich kombinace. Lze tedy zapsat následující výkonovou podmínku:

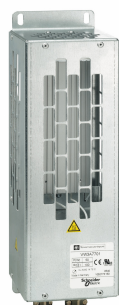
$$P_c < k_s P_{Pr} \quad (2.7)$$

Při dimenzování je nutné vždy uvažovat nejhorší možný případ. Ten nemusí být definován za standardního provozu, nicméně vždy je potřeba uvažovat bezpečnostní požadavky stroje, především požadavky na bezpečné zastavení stroje. Lze tedy definovat energetickou podmínku právě z nejhoršího možného stavu, který může nastat.

$$E_{bmax} < E_{rmax} \quad (2.8)$$

V případě, že interní rezistor nesplňuje jednu z výše uvedených podmínek, je vyžadován externí rezistor. Při výběru externího rezistoru je potřeba zajistit, aby jeho odpor nebyl menší, než určuje výrobce. V opačném případě by mohlo dojít k přetížení brzděného spínače. Lze tedy definovat odporovou podmínku externího brzděného rezistoru. Externí brzděný rezistor musí zřejmě také splňovat podmínky (2.8) a (2.7).

$$R_{min} \leq \frac{U_p^2}{P_{max}} \quad (2.9)$$



(a) Drátový brzděný rezistor



(b) Plochý brzděný rezistor

Obrázek 2.3: Ukázky externích brzděných rezistorů

2.3 Využití brzdné energie

Jak již bylo uvedeno, kinetická či potenciální energie je při brzdění rekuperována zpět do servoměniče. Pokud tato energie převyšuje energetickou kapacitu kondenzátorové baterie, je nezbytné tuto přebytečnou energii zpracovat. Výše byl již popsán způsob přeměny na teplo v brzděném rezistoru. Dalším způsobem je energii prostřednictvím vyvedených svorek stejnosměrného meziobvodu poskytnout jinému servopohonu či regenerovat zpět do sítě pomocí přídatné jednotky, což s sebou může přinést zvýšení efektivity systému. Zavedení tohoto řešení však není možné vždy a ne v každé aplikaci přináší benefit. Je nutné nejprve posoudit možnou úsporu energie, zajištění bezporuchového provozu, vhodnost použití a v neposlední řadě nákladovost.

Jako příklady aplikací, kde je toto řešení výhodné, lze uvést anticyklické operace, aplikace s velkou dynamikou pohybu, proudu (zatížení) a rychlosti. Naopak nevýhodné je to tam, kde všechny osy zrychlují a zpomalují zároveň, a tam, kde je požadavek na nízkou dynamiku pohybu.

Je zřejmé, že musí platit zákon o zachování energie, tzn. energie, která přitéká do společné sběrnice, se musí rovnat energii, která z této sběrnice odtéká³. V případě, že by přitékající energie nemohla opouštět systém v dostatečné míře, došlo by k přepětí na stejnosměrné sběrnici a na jednotlivých kondenzátorech a mohlo by dojít k havarijnímu stavu systému, obvykle zapůsobení ochran stejnosměrného meziobvodu. Proto je nutné při navrhování adekvátně provést energetickou bilanci všech možných stavů, které mohou nastat. Následně je možné provést porovnání možností a optimální návrh. Postup při návrhu lze nalézt např. v literatuře [11].

2.3.1 Společná stejnosměrná sběrnice

Jak již bylo zmíněno, připojení několika servoměničů na společnou stejnosměrnou sběrnici umožňuje sdílení brzdné energie mezi jednotlivými servomotory. To zvyšuje efektivitu systému, jelikož brzdná energie není mařena v brzděných jednotkách a pohonům v motorickém režimu není nutné dodávat tak velký výkon ze střídavé sítě.

Tímto systémem lze také snížit počet vstupních komponent oproti samostatnému připojení na síť. Další benefit je, že na sběrnici je využívána celková energetická kapacita všech kondenzátorů a také brzdné rezistory mohou pracovat společně, což vede ke snížení počtu potřebných externích brzděných rezistorů. Pokud je brzdná energie taková, že nestačí interní brzděné rezistory, je možné připojit jeden (případně více) společný externí brzděný rezistor, který se zpravidla připojuje k servoměniči s největším výkonem, jelikož tímto servoměničem může procházet největší proud.

Systém má samozřejmě i své nevýhody. Propojení stejnosměrných meziobvodů musí být výrobcem umožněno a také povoleno. Je nutné dodržet stanovené pokyny, jako např. nepropojovat měniče s rozdílným napětím ve stejnosměrném meziobvodu. Při návrhu musí být kladen důraz na zajištění odolnosti proti poruchovým stavům měniče. Přímé propojení stejnosměrných meziobvodů znamená rovněž přímé propojení kondenzátorových baterií, které v sobě ukládají

³Samozřejmě při respektování kapacity jednotlivých kondenzátorů, ztrát v měniči apod.

značné množství energie. V případě poruchy v podobě zkratu by všechna nahromaděná energie procházela skrze sběrnici do místa poruchy. Takový stav může mít destruktivní účinek pro všechny připojené komponenty, proto je nezbytné eliminovat jej použitím pojistek. Pojistky zároveň chrání připojovací terminál a propojovací kabely daných servoměničů. Obecně lze doporučit, aby jištění bylo provedeno v každém připojovacím bodě, a to v plusovém i minusovém vedení stejnosměrné sběrnice. Záleží také na doporučení výrobců, např. v případě servoměničů společnosti Schneider Electric - Lexium 32 je umístění pojistek dáno maximálním proudem měniče, a v určitém případě stačí použít pojistky pouze na vstupu střídavé sítě. Dále například u servoměničů ABB MotiFlex e180 je určeno, že pojistkami musí být vybaven každý připojovací bod stejnosměrné sběrnice. V manuálu jsou obvykle uvedeny doporučené hodnoty, typ pojistek a také doporučený obecný postup jejich dimenzování. Pro jištění se využívají rychlé polovodičové pojistky, které musí být dimenzovány na vyšší napětí, obvykle okolo 700 V [11], [2]. Dále je potřeba poznamenat, že pro správnou funkci musí měniče připojené na stejnosměrné sběrnici obsahovat přednabíjecí obvody pro „studený start“. V opačném případě je nutné implementovat systém, který tento stav ošetří (externí přednabíjecí komponenty).

Typickým příkladem využití systému propojení stejnosměrné sběrnice jsou navíjecí aplikace, kde jeden servopohon zajišťuje navíjení materiálu a druhý odvíjení. Servopohon pro odvíjení poskytuje adekvátní moment pro napnutí materiálu, tzn. že brzdí a může pracovat například v režimu řízení momentu. Brzdnou energii lze předávat prostřednictvím propojených stejnosměrných meziobvodů servopohonu pro navíjení, a tím pádem šetřit podstatné množství energie.

V aplikacích, kde je velký přebytek rekuperované energie, je možné využít jednotku, která umožňuje vrácení přebytečné energie zpět do sítě. V praxi je tato jednotka známá jako rekuperační jednotka AFE, v odborných literaturách pak přesněji jako VSAR „Voltage Source Active Rectifier“. V aplikacích nízkého a středního výkonu se s tímto řešením setkat jen výjimečně.

2.4 Výkonový výstupní IGBT můstek

Jedná se o již obecně známé zapojení střídače napěťového typu s vlastní komutací. Úkolem je vytvořit ze stejnosměrného napětí meziobvodu 3fázové střídavé napětí s požadovanou frekvencí, tvarem, fázovým posuvem a velikostí napětí. Střídač v dnešní době využívá vypínatelné IGBT tranzistory. Zapojeny jsou 3 větve s IGBT tranzistorem, kde každá větev tvoří jednu fázi. Ke každému IGBT tranzistoru je antiparalelně zapojena dioda, viz obr. (2.1), čímž je umožněn průtok energie oběma směry. Řízení střídače využívá PWM modulaci, což umožňuje dosáhnout téměř sinusového průběhu proudu⁴. Podrobnější popis lze nalézt v literatuře [26]. Rušením, které je způsobeno součástkami IGBT, se z části zabývá následující kapitola.

⁴Při uvažování indukční zátěže, tedy vinutí motoru.

2.5 Elektromagnetická kompatibilita

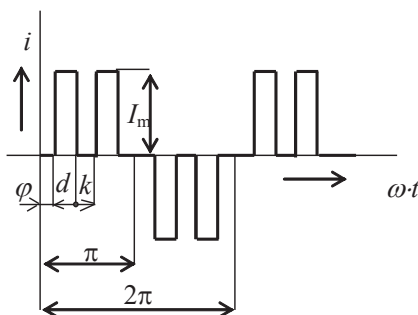
Struktura nepřímého měniče se stejnosměrným meziobvodem napěťového typu je zdrojem rušení v širokém spektru. Lze rozlišit nízkofrekvenční rušení a vysokofrekvenční rušení. Pro nízkofrekvenční rušení je kmitočtový rozsah uváděn maximálně do 2.5 kHz. Toto rušení je způsobeno především usměrňovačem zatíženým velkým kapacitorem. Vysokofrekvenční rušení je uvažováno v pásmu 10 kHz až 400 GHz a jeho vznik způsobují komutační pochody diod usměrňovače a střídač na výstupní straně.

2.5.1 Nízkofrekvenční rušení a způsob eliminace

Zapojení vstupní části - usměrňovače společně s kondenzátorovou baterií - se z pohledu sítě chová jako nelineární zátěž, která spotřebovává nesinusový proud, tj. je zdrojem vyšších - lichých harmonických proudů. Tyto proudy způsobují úbytek napětí na vstupních impedancích měniče, a tím je deformováno napětí v síti. Měnič zatěžuje síť deformačním výkonem. Velikost harmonických proudů je z pohledu sítě ovlivněna zkratovým výkonem. Bude-li měnič připojen v místě s vysokým zkratovým výkonem (malá impedace sítě), bude odebírat velké hodnoty vyšších harmonických. Výrobci například specifikují hodnotu zkratového výkonu, resp. proudu, od kterého musí být instalovaná síťová tlumivka, viz manuál [1] parametr SCCR (Short-circuit current rating). Naopak pokud bude měnič instalován v místě s nižším zkratovým proudem (vyšší impedance sítě), bude odebírat v proudu méně harmonických, ovšem napětí v místě bude více deformováno, což může mít negativní dopad na okolní zařízení [27].

Matematické odvození časových průběhů harmonických proudů je složitá záležitost. Při uvažování používaného vstupního neřízeného třífázového usměrňovače a zjednodušeného odebíraného proudu dle obr. (2.4), lze využít zobecněného amplitudového zákona pro určení velikostí vyšších řádů harmonických proudů I_h dle rovnice (2.11). Vyplývající je vliv doby vedení diody d usměrňovače na harmonické proudy, respektive velikost C_{ss} . Doba vedení diody je z hlediska harmonických požadovaná co nejdelší (malá C_{ss} stejnosměrného meziobvodu), což je ovšem v přímém protikladu s požadavky střídače na nízké zvlnění střední hodnoty napětí ve stejnosměrném meziobvodu, které mají obvykle při návrhu měniče větší váhu [29].

Při zjednodušujících podmínkách se ve spektru vyskytují pouze tzv. charakteristické harmonické. Tyto harmonické vyhovují rovnici (2.11). V praxi se dále ve spektru vyskytují tzv. necharakteristické harmonické, které naopak nevyhovují rovnici (2.11). Vznikají vlivem nesymetrií napájecí soustavy. Dále se lze také zmínit o mezharmionických, které vznikají při měření, například vlivem dynamické změny zátěže během měření. Charakteristické harmonické dosahují při porovnání s necharakteristickými a mezharmionickými vyšších hodnot. Hlubší teoretický rozbor záležitosti, odvození amplitudového zákona a příklad výsledků měření v laboratorních podmínkách je uveden v literatuře [29] převážně kap. 5 a 11.3.2



Obrázek 2.4: Zjednodušený průběh proudu odebíraného třífázovým usměrňovačem (převzato a upraveno z [29])

$$I_h = \frac{1}{h} I_1 \frac{\sin \frac{d}{2}}{\sin \frac{d}{2}} \quad (2.10)$$

$$h = kp \pm 1; \quad \text{když } p = 6 \text{ pak } h = 5, 7, 11, 13, \dots \quad (2.11)$$

$$I_1 = 2,205 I_m \sin \frac{d}{2} \quad \text{pro obr. (2.4)} \quad (2.12)$$

kde:

- h je řád harmonické $[-]$
- k je celé kladné číslo $(0, \infty)$ $[-]$
- d je úhel vedení diody $[rad]$
- I_1 je velikost první harmonické $[A]$

Zjednodušeně lze říci, že při sepnutí diody dochází na kondenzátoru a indukčnosti k přechodovému ději. Z toho můžeme odvodit diferenciální rovnici, jejímž řešením je charakteristická rovnice druhého řádu. Dle charakteru kořenů této rovnice mohou obecně nastat různé průběhy proudů - v praxi se lze nejčastěji setkat s proudem přerušovaným s jedním kmitem, přerušovaným s více kmity a nepřerušovaným s více kmity. Analytické řešení je v praxi velice obtížné. Z této úvahy však plyne skutečnost, že pomocí indukčnosti je možné přejít, nebo se alespoň přiblížit k nepřerušovanému charakteru odebíraného proudu, při kterém dochází k omezení celkového harmonického zkreslení. Je to způsobeno tím, že indukčnost prodlužuje dobu nabíjení kondenzátoru, respektive prodlužuje se doba vedení diody.

Celkové harmonické zkreslení (THD) je obvyklý parametr pro vyhodnocení úrovně zkreslení střídavého průběhu. Je definované normou ČSN EN 61000-2-2 jako:

$$THD = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^H Q_h^2}}{Q_1} \quad \text{dle normy je doporučeno } H = 50 \text{ nebo } 25 \text{ dle rizika rezonance (2.13)}$$

kde:

- Q představuje buď proud nebo napětí
- Q_h je efektivní hodnota harmonické složky řádu h
- Q_1 je efektivní hodnota základní složky

V praxi je užíváno celkové harmonické zkreslení proudu THD_i . Existují však i jiné ukazatele, viz např. literatura [29] kap. 2.3.

Nejrozšířenějším řešením harmonických proudů jsou stejnosměrné tlumivky řazené v stejnosměrném meziobvodu a střídavé tlumivky řazené na vstupní střídavé straně měniče. Co do harmonických proudů mají obě varianty ekvivalentní vlastnosti. Pro vytvoření stejného efektu na harmonické proudy vychází střídavá tlumivka větší a má také větší ztráty, vytváří větší úbytek ve stejnosměrném meziobvodu a v neposlední řadě je vyšší i její cena. Naproti tomu má i své výhody. Vzhledem k umístění vně měniče chrání před impulzními poruchami v síti a před trvalým přepětím dále omezuje komutační proudové špičky a částečně potlačuje vysokofrekvenční složku rušení.

Je také nezbytné poznamenat, že nesprávné poměry indukčnosti k daným hodnotám servoměniče, respektive výkonu a velikosti stejnosměrné kapacity, nemusí přinést kladný výsledek, jelikož na indukčnosti dochází k úbytku napětí. (Pro více informací lze opět odkázat na literaturu [29] kap. 5.6.9). Z tohoto důvodu výrobci obvykle určují k měničům o daných výkonech typové velikosti tlumivek, a to buď z vlastního sortimentu, nebo udávají alespoň doporučené velikosti a k nim hodnoty THD_i při použití dané tlumivky. Jako příklad lze uvést výtah z katalogu společnosti Schneider Electric, viz obr. (2.5).

References								
For servo drive	Inductance value	Losses	Line current and THD				Reference	Weight
			Without choke		With choke			
	mH	W	A	%	A	%		kg/lb
Single-phase supply voltage: 115 V ~ 50/60 Hz								
LXM32•U45M2	5	20	2.9	173	2.6	85	VZ1L007UM50	0.880/ 1.940
LXM32•U90M2	2	30	5.4	159	5.2	90	VZ1L018UM20	1.990/ 4.387
LXM32•D18M2	2	30	8.5	147	9.9	74		
LXM32•D30M2	2	30	12.9	135	9.9	72		

Obrázek 2.5: Výtah z katalogu LXM32 - volba síťové tlumivky (převzato a upraveno z [3])

2.5.2 Vysokofrekvenční rušení a způsob eliminace

Hlavním zdrojem jsou spínací pochody na výstupním IGBT a dále také v menším měřítku komutační špičky vstupního usměrňovače. Rušení se od zdroje k přijímači šíří prostřednictvím

jejich vzájemných vazeb.

Rušení se tedy může šířit:

- vedením - galvanické, induktivní, kapacitní vazby
- vyzařováním - vazba elektromagnetickým polem

Z pohledu motoru je požadavek na harmonický průběh proudu. Průběh se více podobá harmonickému - čím větší je spínací frekvence IGBT tranzistorů střídače, respektive frekvence nosného PWM signálu. Čím je vyšší spínací frekvence IGBT tranzistorů střídače, tím se průběh více přibližuje k harmonickému průběhu proudu.

PWM spínací frekvence je u servoměničů standardně 8 kHz. Aby bylo možné této frekvence dosáhnout, je nutné omezit spínací ztráty polovodičových součástek. Ztráty jsou závislé především na době sepnutí. Gradient používaných IGBT tranzistorů dosahuje $10 \text{ kV}/\mu\text{s}$. Střídač s IGBT a PWM mají spínací dobu od $0,1 \mu\text{s}$ do $1 \mu\text{s}$, což odpovídá strmosti změny až $5\,000 \text{ V/s}$ [32]. Velké hodnoty du/dt jsou příčinou vysokofrekvenčního rušení. Dále také mohou vznikat napěťové špičky s vysokou strmostí. Tento projev rušení vzniká v momentu otevření polovodičové součástky. Při vypnutí součástky dochází ke komutačnímu přepětí ve tvaru strmého napěťového pulzu, který se interferuje na vysokofrekvenční kmitů. [28]

Frekvence kmitů je závislá především na délce motorového kabelu, jelikož zde figuruje indukčnost a kapacita kabelu na jednotku délky (odpor kabelu je možné zanedbat). Amplituda přepětových špiček je závislá nejen na délce připojeného motorového kabelu, ale také na velikosti du/dt . [31] Přepětové špičky mohou dosahovat více než dvojnásobku výstupního napětí. V případě dlouhého kabelu (např. 200 m) a velké frekvence se kabel chová již jako vedení s rozprostřenými parametry, a jelikož zde není impedanční přizpůsobení mezi kabelem a motorem, může docházet k vlnovým odrazům. Velké hodnoty přepětových kmitů (kV) mohou mít za následek například částečné výboje v izolaci kabelu či vinutí motoru a dochází k její postupné nebo úplné degradaci.

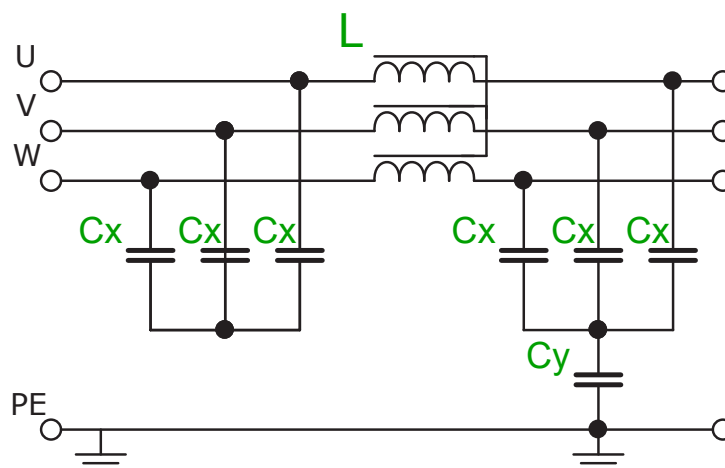
Dalším negativním vlivem je anténní efekt kabelu. Do prostoru je vyzařováno elektromagnetické pole, a může tak docházet k rušení například řídicích zpětnovazebních signálů od čidel.

Pro omezení vysokofrekvenčních vysokonapěťových kmitů existuje obecně několik možných řešení. Z pohledu dodatečných zařízení na výstupu měniče se jedná především o du/dt a sinusové filtry. V případě servoměničů, kde je vyžadována zpětná vazba minimálně proudová, není možné využít výstupní filtry a servomotor musí být k měniči připojen napřímo. To vede k značnému omezení v aplikacích servoměničů z hlediska vzdálenosti servomotoru a servoměniče. Výrobci vždy uvádějí maximální možnou délku kabelu, kterou je z bezpečnostních důvodů nutné respektovat.

K omezení šíření vedením se používají síťové filtry na vstupu měniče. Servoměniče malých a středních výkonů zpravidla obsahují interní síťový filtr a jako příslušenství pro zvýšení odolnosti proti EMC rušení a k možnosti delšího motorového kabelu se využívají externí síťové filtry. Ty dokáží potlačit rušení pronikající do sítě v rozsahu 150 kHz - 30 MHz. Stručný princip

síťového filtru vyplývá z obr. (2.6). Filtr pracuje jako dolní propust potlačující symetrické a nesymetrické rušení. Při symetrickém rušení se uplatňují kondenzátory C_x . Rušení se částečně vykompenzuje mezi sebou přes kondenzátory. Kondenzátory C_y spolu s kompenzovanou indukčností slouží pro potlačení nesymetrického rušení, které je svedeno na zemnicí vodič. Z tohoto základního principu vyplývá, že zde existuje pro určité frekvence spojení mezi fázovým vodičem a zemí. Filtry jsou zdrojem reziduálního kapacitního proudu. Tento reziduální kapacitní proud může způsobovat problémy v kombinaci s proudových chráničem. Je tedy nutné zvolit takový proudový chránič, který nebude reagovat na tyto rušivé reziduální proudy (tj. typ B⁵). Dále je možné tyto filtry využívat pouze v sítích TN a TT. Jelikož u některých výrobců je síťový filtr již integrovaný, není možné je používat v sítích IT, a pokud je tak vyžadováno, musí být nainstalován izolovaný transformátor pro obnovu TT sítě. Případně, pokud je tak umožněno, kondenzátor C_y odpojit, ovšem to pak degraduje samotnou funkci filtru, jelikož nesymetrická složka rušení nebude filtrována.

K omezení šíření vyzařování převážně prostřednictvím motorového kabelu je nezbytné, aby byl motorový kabel stíněn.



Obrázek 2.6: Základní zapojení síťového filtru (převzato a upraveno z [29])

Tato opatření ovšem nestačí. Pro správný návrh je potřeba se řídit pokyny výrobce, které se především týkají použité kabeláže, stínění, vyrovnání potenciálů, způsobu zemnění, uložení kabelů a připojení k napájecí síti. Výrobce vydává prohlášení o shodě „declaration of conformity“ s danou normou při respektování jím popsaných požadavků. Normy, na které je odkazováno, a kde jsou uvedené požadavky a rozdělení dle EMC, jsou ČSN EN 61800-3 a ČSN EN 55011.

Norma ČSN EN 61800-3 rozděluje použití podle prostředí na:

- První prostředí - obsahuje obytné objekty a také závody, které nejsou oddělené mezilehlým transformátorem
- Druhé prostředí - lze zařadit všechny organizace, které jsou napájené z vyhrazeného transformátoru, nejsou spojeny s rozvodnou sítí nízkého napětí pro napájení obytných budov

⁵U servoměničů s jednofázovým vstupem zapojeného (L-N) je možný i typ A.

Dále jsou specifikovány kategorie:

- C1 - napětí $> 1\ 000\text{V}$ - určeno pro první prostředí
- C2 - napětí $> 1\ 000\text{V}$ - instalace provedena odborníkem, pevné připojení, nepřemístitelná zařízení, určeno pro první prostředí
- C3 - napětí $> 1\ 000\text{V}$ - určeno pro druhém prostředí a není určeno pro použití v prostředí prvním
- C4 - napětí $< 1\ 000\text{V}$ - toto napětí se v diskutované oblasti servopohonů nepoužívá

Čerpáno z [34].

Norma ČSN 55100 rozděluje zařízení do skupin:

- Zařízení skupiny 1 - Všechna zařízení, která nespádají do skupiny 2.
- Zařízení skupiny 2 - Všechna zařízení, kde je vysokofrekvenční energie využívána a vytvářena záměrně.

Dále rozděluje dle uvažovaného umístění (podobně jako norma ČSN EN 61800-3) na třídy. Norma stanovuje meze pro tyto třídy:

- Zařízení třídy A - zařízení pro všechna místa kromě těch, která jsou galvanicky spojena se sítí nn pro rozvod elektrické energie pro obytné účely
- Zařízení třídy B - zařízení vhodná pro použití v místech, která jsou přímo připojená na rozvod nn elektrické energie určené pro napájení obytných objektů

Čerpáno z [35].

3 Řídicí část servopohonu

3.1 Logické vstupy a výstupy

Servoměniče mají konfigurovatelné logické (binární) vstupy a výstupy, které umožňují základní řízení a monitorování servopohonu. Různé funkce vstupů jsou vždy popsány v manuálu daného výrobce a mohou to být např. odblokování výkonového stupně, limitní či referenční snímač, reset poruchy, změna pracovního režimu, uvolnění parkovací brzdy, změna sady regulačních parametrů regulátorů, rychlostní a proudové omezení, pokyn k zastavení po rampě (decelerační, momentové) apod.

Dále také záleží na pracovním režimu, např. v režimu krokování „JOG“ vstupy mohou definovat směr a počet kroků, resp. dobu pohybu. Pokud má servoměnič integrovanou možnost sekvenčního polohování „Motion Sequence“, lze pomocí logických vstupů spustit předdefinovanou sekvenci, případně pomocí kombinace vstupů lze zvolit konkrétní polohovou úlohu.

K dispozici jsou obvykle také rychlé vstupy, které mají krátkou dobu odezvy a jsou vhodné pro zaznamenání přesné polohy, například po aktivaci externího snímače.

Výstupům lze přidělit monitorovací funkce jako např. hlášení poruchy, směru otáčení, překročení dovolené odchylky žádané hodnoty polohy/rychlosti od skutečné hodnoty polohy/rychlosti, ukončení pohybové sekvence apod.

3.2 Bezpečnostní logické vstupy a funkce

Norma ČSN EN 61800-5-2 [37] definuje tři funkce bezpečného zastavení, které odpovídají třem kategoriím zastavení dle ČSN EN 60204-1 [38]:

- STO – Bezpečné vypnutí kroutícího momentu (Safe Torque Off) – tato funkce odpovídá kategorii zastavení 0. Při aktivaci dojde k okamžitému zablokování výkonového můstku servoměniče, tzn. odpojení servomotoru od energie, což způsobí jeho volný doběh. Spuštění není dovoleno, dokud nedojde k resetu poruchového stavu, čímž je zajištěna ochrana proti neočekávanému spuštění.
- SS1 – Bezpečné zastavení typu 1 (Safe stop 1) – při aktivaci této funkce dochází nejprve k zpomalení dle předdefinované brzdě rampy. Po uplynutí předdefinovaného bezpečnostního zpoždění dochází k aktivaci funkce STO. To odpovídá kategorii zastavení 1.
- SS2 – Bezpečné zastavení typu 2 (Safe stop 2) – při aktivaci této funkce stejně jako v případě SS1 dochází k zpomalení dle předdefinované brzdě rampy. Po uplynutí předdefinovaného bezpečnostního zpoždění dochází k aktivaci funkce bezpečného provozního zastavení SOS (Safe operating stop), která zabezpečuje klidový stav servomotoru. Tento

typ bezpečného zastavení odpovídá kategorii zastavení 2. V tomto případě nedochází k odpojení servomotoru od zdroje energie.

Dále norma ČSN EN 61800-5-2 definuje monitorovací bezpečnostní funkce jako např.:

- SLS – Bezpečně omezená rychlost (Safety limited speed) – zabraňuje překročení nastavené meze bezpečné rychlosti.
- SOS – Bezpečné provozní zastavení (Safe operating stop) – již popsáno u SS2.

Obvykle mají servoměniče v základu integrované dva redundantní certifikované bezpečnostní vstupy STO_A a STO_B ¹. Redundance vstupů zajišťuje zvýšení bezpečnosti. Pokud by se vyskytla rozdílná logická úroveň na vstupech, servomenič by přešel do nouzového zastavení nebo by nedovolil opětovné spuštění stroje.

V případě požadavku na kategorii zastavení 1 je nezbytné do bezpečnostního obvodu zapojit bezpečnostní modul se zpožděnými výstupy, na které by byly připojeny vstupy STO_A a STO_B . Nezpžděné výstupy bezpečnostního modulu, zapojené přímo na logické vstupy servoměniče nebo prostřednictvím nadřazeného řídicího systému, by nejprve spustily řízené zastavení a poté by došlo k aktivaci funkce STO.

Někteří výrobci nabízejí jako volitelné příslušenství servoměniče bezpečnostní kartu s bezpečnostními vstupy, které umožňují funkce STO, SS1, SS2, SOS, SLS, apod. bez nutnosti dalších externích bezpečnostních modulů.

Při návrhu bezpečnosti stroje se vychází z provedené analýzy a následného posouzení rizik dle normy ČSN EN ISO 13849 - 1 [39], která stanovuje požadovanou úroveň vlastností Pl_r , dle které musí být adekvátně dlouhá střední doba do nebezpečné poruchy MTTFd. Ověření bezpečnostních parametrů navrženého zapojení lze velice pohodlně provést prostřednictvím SW SISTEMA.

3.3 Analogové vstupy

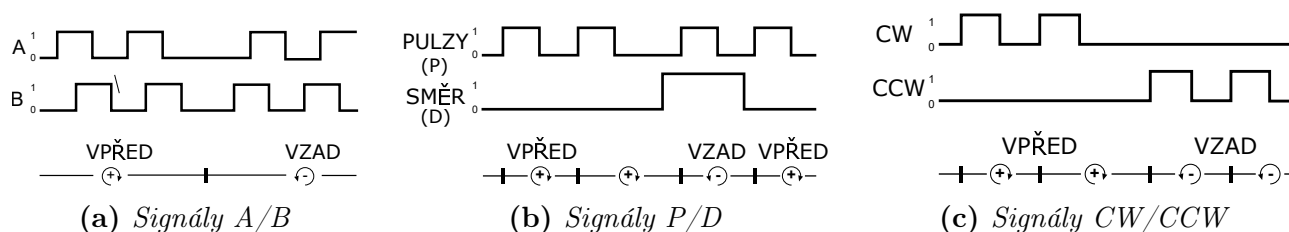
Analogové vstupy umožňují řízení rychlosti nebo momentu. Standardem pro vstup je analogový signál ± 10 V (případně 0-10 V), kde + 10 V odpovídá maximální možné kladné hodnotě a -10 V maximální možné záporné hodnotě. 0 V znamená, že není zadávána žádaná hodnota. Lze se setkat i s proudovým analogovým vstupem obvykle v rozsahu 4-20 mA.

Většinou je možné nastavit napěťový (proudový) offset analogového vstupu (input voltage offset) pro korekci odpovídajícího napětí. Pak např. při nastaveném offsetu 3 V by hodnota 7 V na vstupu byla servoměničem respektována jako 10 V. Dále někteří výrobci umožňují nastavit pásmo nulového napětí, kdy hodnoty ve zvoleném pásmu budou měničem respektovány jako nulové.

¹Označení bezpečnostních vstupů se může lišit dle výrobce. STO_A , STO_B je označení společnosti Schneider Electric.

3.4 Pulzní vstupy PTI a výstupy PTO

Pulzní vstupy PTI a výstupy PTO umožňují pulzní řízení servopohonu, kde rychlost a poloha se určuje pomocí vyslaných pulsů. Servopohon pracuje v polovém módu. Informace o žádaném pohybu či rychlosti a směru je možno přenášet pomocí třech typů signálu A/B, P/D, CW/CCW viz obr. (3.1).



Obrázek 3.1: Průběhy pulzních signálů pro PTI/PTO (převzato a upraveno z [1])

Pokud nadřazený systém disponuje PTO výstupem, lze jednodušší aplikace řídit pomocí pulsů. Další využití lze nalézt například při požadavku na polohovou či otáčkovou synchronizaci os dvou servopohonů. Signál pro synchronizaci může být například od IRC enkodéru (viz kap. 3.7.2), nebo od jiného servoměniče, který má pulzní výstup.

3.5 Ochrany servopohonů

Servoměniče postačuje zpravidla chránit pouze proti zkratu, jelikož obvykle dokáží vyhodnotit základní poruchové stavy jako: výpadek fáze, nadproud na výstupní straně, poškození přednabíjecího rezistoru, podpětí, či přepětí ve stejnosměrném meziobvodu, zemní nebo mezi fázový zkrat na straně servomotoru, přehřátí servoměniče, přehřátí servomotoru, poruchy komunikace, rozdílnou logickou úroveň na bezpečnostních vstupech apod.

Informace o vzniklé poruše a jejím typu je možné číst po komunikaci, případně je možné některá poruchová hlášení přiřadit logickým výstupům. Pokud má servoměnič integrován vlastní HMI panel, je možné poruchu na něm zobrazit. Poruchy se většinou zapisují do paměti, a je možné jejich historii zobrazit prostřednictvím SW na PC, viz např. obr. (3.7).

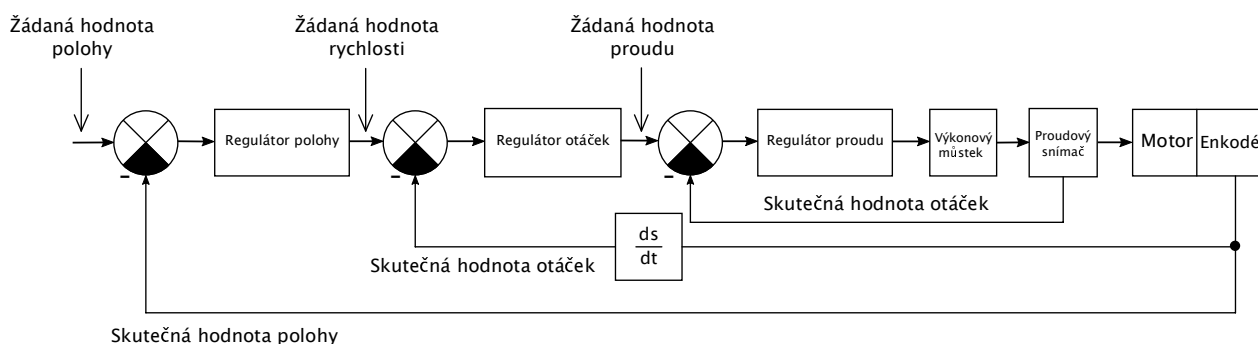
V případě výskytu poruchy, má servoměnič definováno, jak se má v daném případě zachovat. Některé poruchy mohou být pouze nahlášeny do nadřazeného řídicího systému a některé mohou způsobit okamžité zastavení servopohonu a neumožnění dalšího provozu dříve, než bude porucha resetována, odstraněna či nedojde k vypnutí a zapnutí servoměniče.

3.6 Regulační struktura

Jak již bylo zmíněno, nejčastěji je používána kaskádní regulační struktura. Tato struktura je používána, jelikož je možné oddělit regulační smyčky a nastavení provést jednotlivě. V případě servopohonů se jedná o proudovou, otáčkovou a polohovou část. Základní principiální schéma

je uvedeno na obr. (3.2). Proudová smyčka je typicky tvořena regulátorem typu PI, otáčková smyčka regulátorem typu PI případně PID a polohová regulátorem typu P. Proudová smyčka je obvykle nastavena automaticky po připojení motoru dle jeho parametrů, které jsou např. uloženy v elektronickém štítku motoru. Rychlostní a polohovou smyčku je nezbytné adaptovat s ohledem na parametry mechanické soustavy připojené k motoru. Výrobci umožňují automatické nastavení regulačních smyček, kdy měnič sám pomocí sekvencí pohybů dopočítá jednotlivé parametry. Pro většinu aplikací je automatické nastavení dostačující. Při větším požadavku na přesnost a dynamiku polohování je standardně umožněno i manuální nastavení parametrů, které ovšem vyžaduje hlubší znalost problematiky regulační techniky.

V regulačních smyčkách servopohonů jsou implementovány další funkční bloky jako např. dopředné zpětné vazby, filtry žádaných hodnot, antirezonační filtry, generátory profilu, omezovače žádaných hodnot apod.

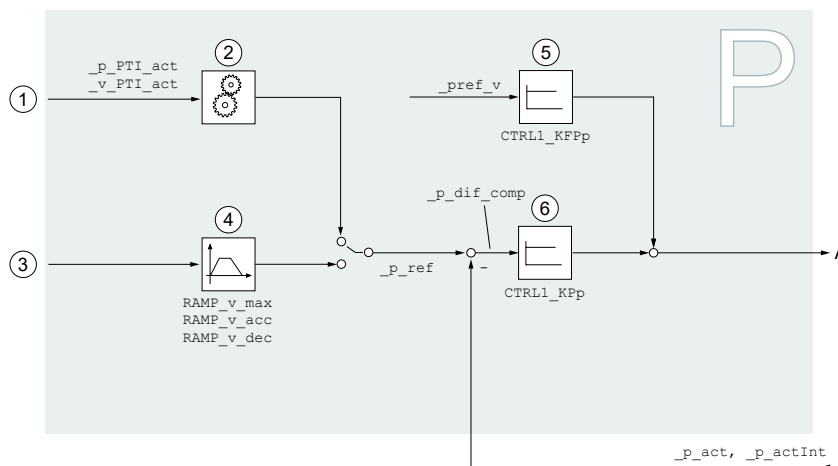


Obrázek 3.2: Základní, blokové schéma regulační, kaskádní struktury servoměniče

3.6.1 Popis regulační struktury servoměniče Lexium32

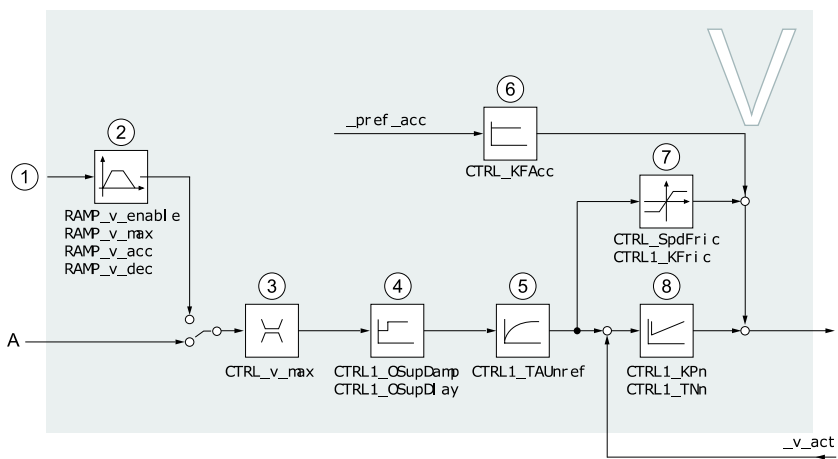
Regulační struktura servoměniče LXM32 je kaskádní. Polohový regulační obvod je na obr. (3.3). Má dva vstupy. Vstup číslo 1 slouží pro řízení polohy pomocí pulzních signálů s polohovou nebo otáčkovou vazbou. Druhým vstupem, označeným číslem 3, se zadává žádaná hodnota polohy. Blok číslo 4 slouží pro nastavení profilu polohování, tedy nastavení rozběhové a doběhové rampy, maximální rychlosti. V tomto bloku je také obsažen blok „Jerk limit“, který slouží k úpravě pohybového profilu pro omezení trhnutí. V rozdílovém členu je aktuální změřená hodnota odečtena od žádané hodnoty a odchylka je přivedena do regulátoru polohy typu P s proporcionální konstantou KP_p . Výstupem tohoto regulátoru jsou žádané hodnoty otáček. Blok číslo 5 slouží pro zavedení otáčkové dopředné zpětné vazby, která umožňuje snížit, resp. eliminovat dynamickou regulační odchylku polohy.

Na obr. (3.4) je otáčková regulační struktura, která má dva vstupy. Vstup označený písmenem A je výstup z polohové regulace. Druhý vstup slouží pro přímé řízení rychlosti při neaktivní polohové smyčce. Blok číslo 2 slouží jako generátor profilu rychlosti pro řízení otáčkové smyčky, který definuje maximální rychlost, akceleraci a decelaci. V bloku číslo 3 dochází k případnému omezení maximální žádané hodnoty rychlosti. Blok číslo 4 je speciální filtr, který potlačuje



Obrázek 3.3: Schéma polohového regulačního obvodu (převzato z [1])

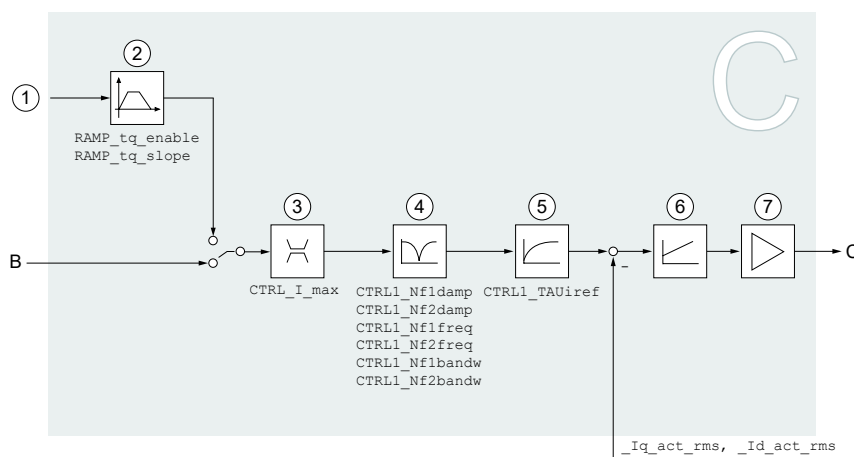
prekmit. Blok číslo 5 je zpožďující člen 1. řádu a slouží jako filtr typu dolní propust žádaných otáček. V rozdílovém členu jsou odečteny aktuální otáčky od žádaných. Odchylka vstupuje do vlastního regulátoru otáček, který je typu PI, s proporcionální KP_n a časovou TN_n konstantou. Regulátor je možné v expertním režimu doplnit o derivační složku pro regulaci PID. Výstupem je žádaná hodnota proudu, resp. momentu. Blok číslo 7 slouží pro nastavení úrovně kompenzace tření. Blok číslo 6 umožňuje zavedení dopředné zpětné vazby do proudového regulátoru.



Obrázek 3.4: Schéma otáčkového regulačního obvodu LXM32M (převzato z [1])

Proudový regulátor, viz obr. (3.5), má opět dva vstupy. Vstup označený číslem 1 slouží pro přímé řízení momentu při neaktivní otáčkové a polohové smyčce. Písmenem B je označený vstup z nadřazené otáčkové smyčky. Žádaná hodnota proudu je případně omezena blokem číslo 3. Blok číslo 4 označuje úzkopásmové antirezonační filtry „Notch filter“, které jsou k dispozici dva, což umožňuje nastavit dvě zádržná pásma. Blok číslo 5 je filtr 1. řádu žádané hodnoty. Do rozdílového členu vstupují změřené a přepočtené (do systému d,q) hodnoty proudu, které jsou odečteny od žádaných hodnot. Vlastní regulátor proudu je typu PI a v případě použití

motorů BMH či BSH motorů, viz kap. (4.1.2), se nastavuje automaticky dle elektronického štítku motoru. V případě použití motorů tzv. třetí strany je potřeba nastavit parametry motoru ručně, což vyžaduje znalost parametrů motoru pro správnou funkci proudové regulační smyčky. Výstup regulátoru jsou napěťové hodnoty stále v systému (d,q) a následně dochází k zpětné transformaci do třífázového systému. Takto přepočtené napětí slouží jako řídicí signály pro PWM modulaci spínání (pomocí budících obvodů) výkonového můstku označeného číslem 7.



Obrázek 3.5: Schéma proudového regulačního obvodu servoměniče LXM32M (převzato z [1])

Čerpáno z [1]

3.6.2 Nastavení parametrů regulačního obvodu servoměniče Lexium 32

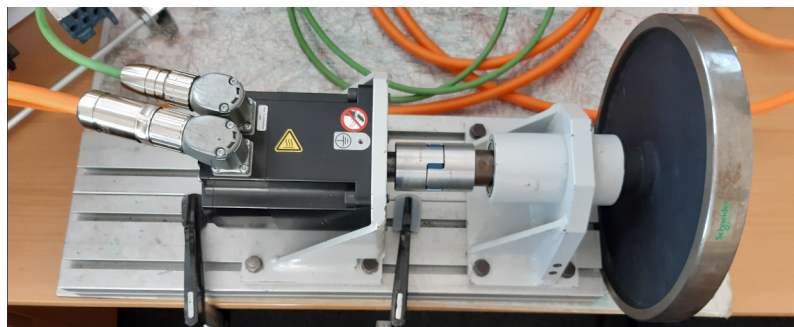
V této části práce je demonstrován případ nevhodně navrženého servopohonu s ohledem na poměr momentů setrvačností zátěže a motoru. Na příkladu je ukázáno, že i při špatném návrhu lze pomocí funkcí měniče nastavit regulační obvod s přijatelnými výsledky. Je však nutno vzít v úvahu, že se jedná o výsledky v omezených rychlostech pracovního cyklu. Zdaleka nelze dosáhnout takových regulačních parametrů, jaké jsou u servopohonů běžné.

Je ukázáno selhání automatického nastavení parametrů regulačního obvodu, vliv konstant regulátorů otáček a polohy, funkce dopředné zpětné vazby a použití úzkopásmových „notch“ filtrů. K provedení experimentu byly využity následující komponenty: servoměnič LXM32MD30M2, servomotor BMH10001T32A2A a SW SoMove, vše od společnosti Schneider Electric.

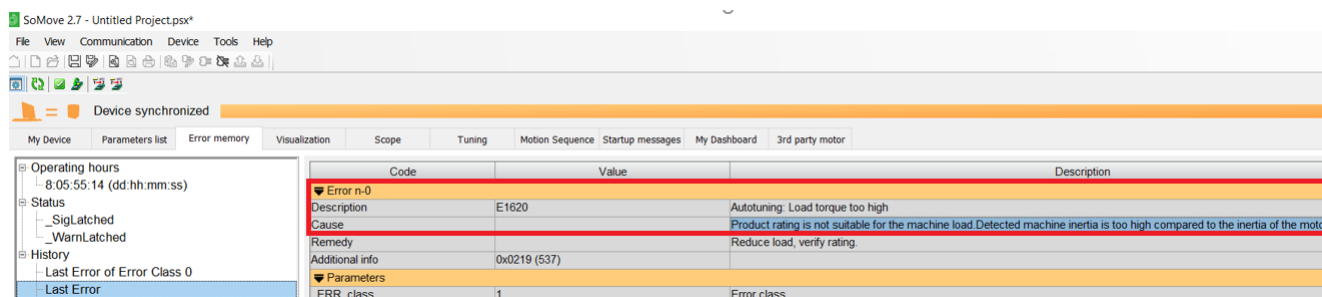
Elektromechanická soustava je na obr. (3.6). Zátěž je tvořena setrvačným diskem, který je navržen tak, aby měl co největší moment setrvačnosti. Orientačním výpočtem byl stanoven moment setrvačnosti disku na 130 kgcm^2 . Motor má moment setrvačnosti rovný $3,186 \text{ kgcm}^2$. Poměr zátěže a motoru tedy vychází přibližně 40, což je vysoko nad obecně doporučovanou mez poměru rovnému 5.²

²Vysvětlení uvedeného doporučení lze nalézt v literatuře [10].

Při spuštění automatického nastavení parametrů servoměnič přešel do poruchy E1620 - obr. (3.7), což znamená, že kvůli velkému poměru momentů setrvačností zátěže a motoru nebylo možné nastavení provést.

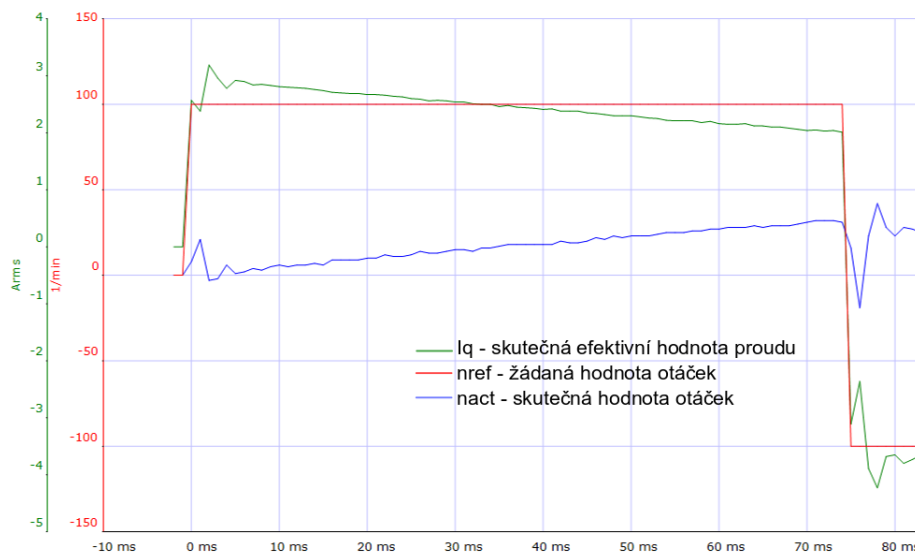


Obrázek 3.6: *Soustava servomotor a zátěž - ukázka návrhu parametrů regulačního obvodu*

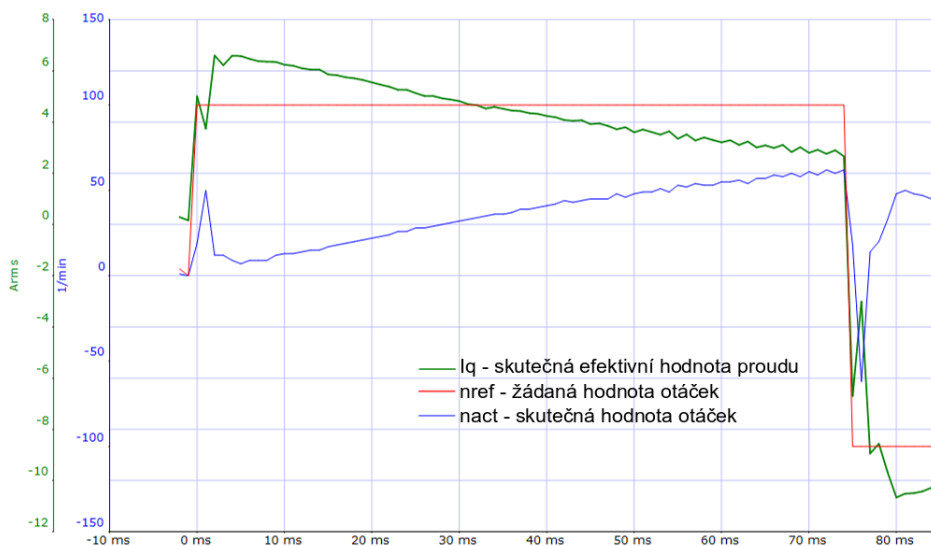


Obrázek 3.7: *Chybové hlášení E1620 - velký poměr setrvačnosti zátěže a motoru*

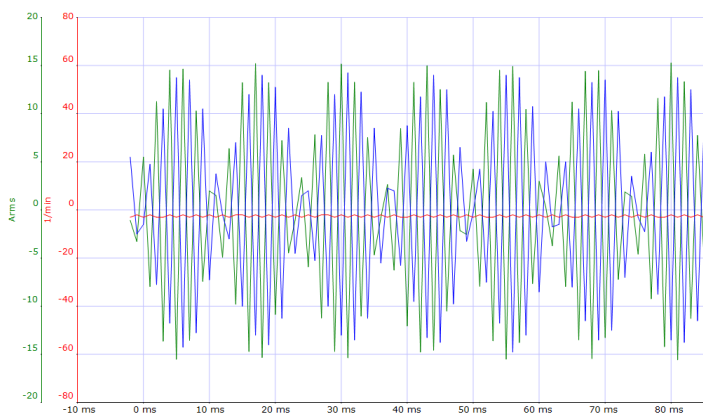
Pro nastavení parametrů bylo využito manuálního - expertního módu. Nejprve je vždy nutné provést nastavení rychlostního regulátoru. Pro jeho nastavení byla použita metoda experimentálního nastavování konstant při využití odezvy na jednotkový skok rychlosti s amplitudou 100 min^{-1} o šířce pulsu 75 ms . Jako první krok byla vyřazena integrační složka nastavením integrační časové konstanty TN_n na maximum. Dále byly vyřazeny filtry žádaných hodnot. Hodnota proporcionálního zesílení KP_n byla ponechána pro první měření ve výchozím nastavení na hodnotě 0,041. Odezva na jednotkový skok při tomto nastavení je na obr. (3.8), z kterého je zřejmé nedostatečné zesílení KP_n . KP_n je nutné po malých krocích zvyšovat do bodu, kdy nedochází k nestabilitě a zároveň doba dosažení žádané hodnoty je co nejkratší. Obr. (3.9) ukazuje, že zvýšením KP_n na 0,1 došlo ke zlepšení, žádaných otáček však nebylo dosaženo. KP_n bylo dále zvýšeno na 0,3, při kterém došlo k rozkmitání obvodu, viz obr. (3.10). V programu SoMove je možnost přejít z časové oblasti do frekvenční a zobrazit si spektrální analýzu průběhu. Jak je vidět z obr. (3.11), rezonanční frekvence se nachází přibližně na hodnotě 460 Hz. Pro omezení této rezonanční frekvence lze využít antirezonační filtr, viz blok číslo 4 na obr. (3.5). Po nastavení filtru byl proveden nový pokus s hodnotou se stejnou hodnotou KP_n . Nastavení filtru mělo pozitivní vliv na odezvu, již nedocházelo k rozkmitání obvodu, nicméně stále nebylo dosaženo požadovaných otáček, viz obr. (3.12). Obr. (3.13) zobrazuje odezvu při KP_n rovnému 0,5 - při této hodnotě bylo již dosaženo požadovaných otáček.



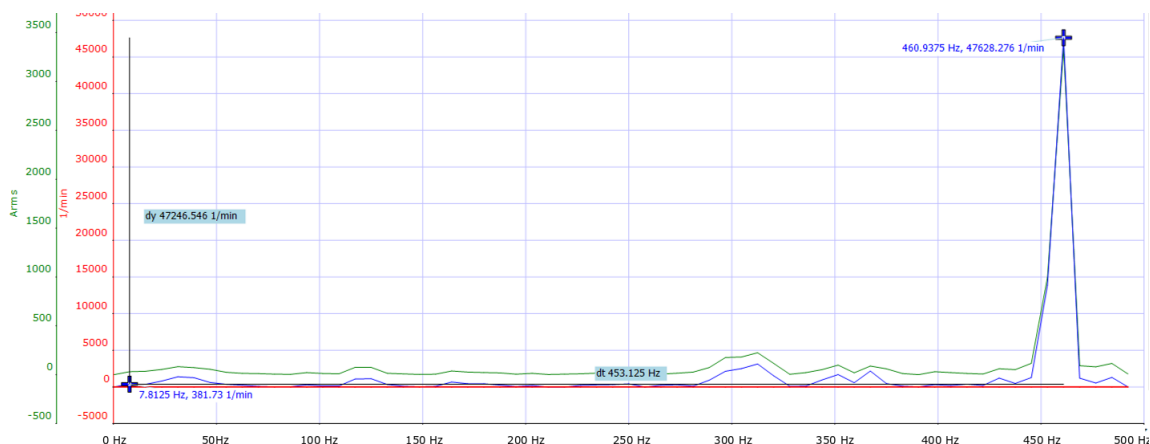
Obrázek 3.8: Odezva na jednotkový skok rychlosti - $KP_n = 0,041$



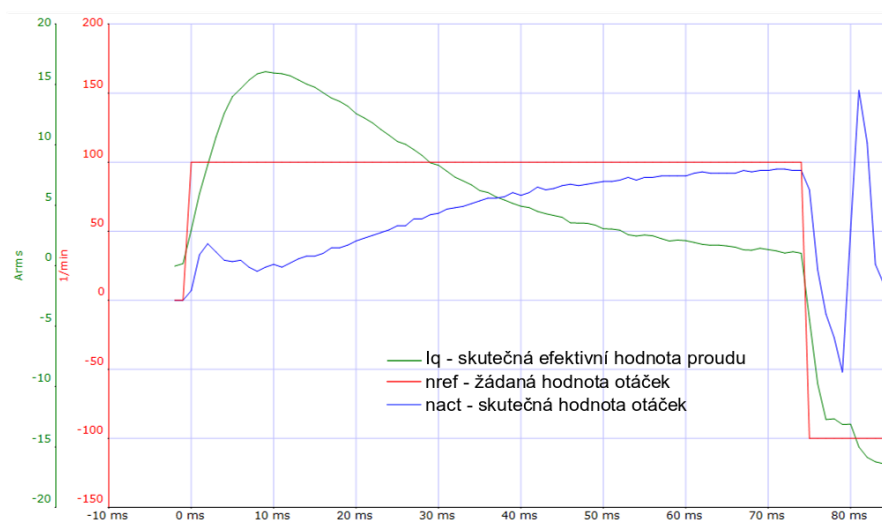
Obrázek 3.9: Odezva na jednotkový skok rychlosti - $KP_n = 0,1$



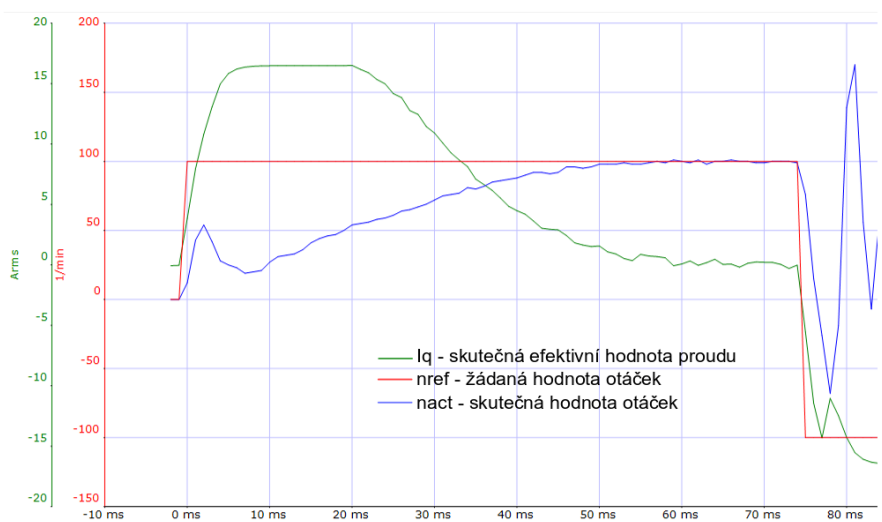
Obrázek 3.10: Rozkmitání pohonu - $KP_n = 0,3$



Obrázek 3.11: Spektrální analýza průběhu z obr. (3.10)

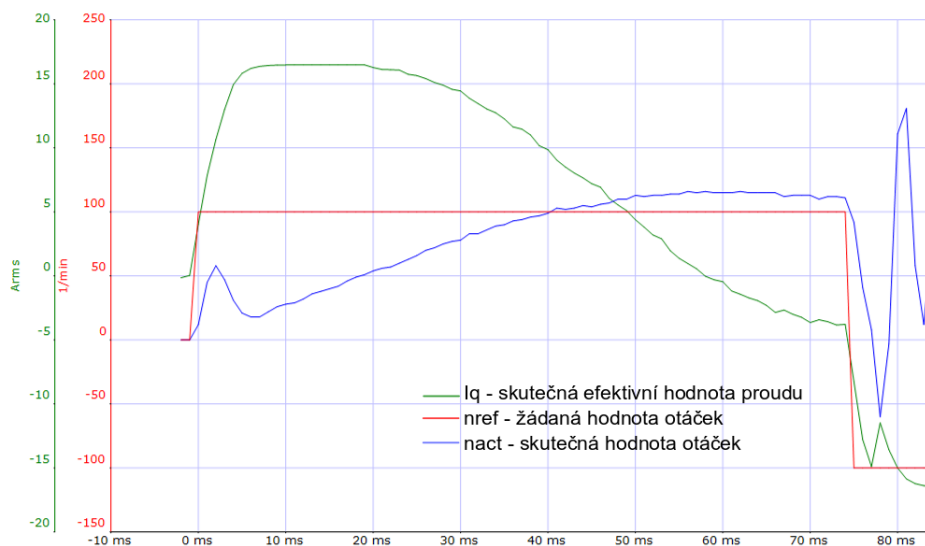


Obrázek 3.12: Odezva na jednotkový skok rychlosti po nastavení antirezonačního filtru - $KP_n = 0,3$



Obrázek 3.13: Odezva na jednotkový skok rychlosti - $KP_n = 0,5$

Nyní je možné přejít k nastavení integrační časové konstanty otáčkového regulátoru. Konstantu lze stanovit jako dobu, kdy dosáhne skutečná hodnota otáček 63 % z žádané hodnoty. Odečteno a nastaveno bylo 25 ms. Výsledek po nastavení je na obr. (3.14). Jak je vidět, zkrátila se doba dosažení žádané hodnoty, a zároveň došlo k jejímu překmitu, což v případě požadavku na řízení polohy není problém. Obecně by neměl překmit dosáhnout více jak 20-30 % žádané hodnoty.

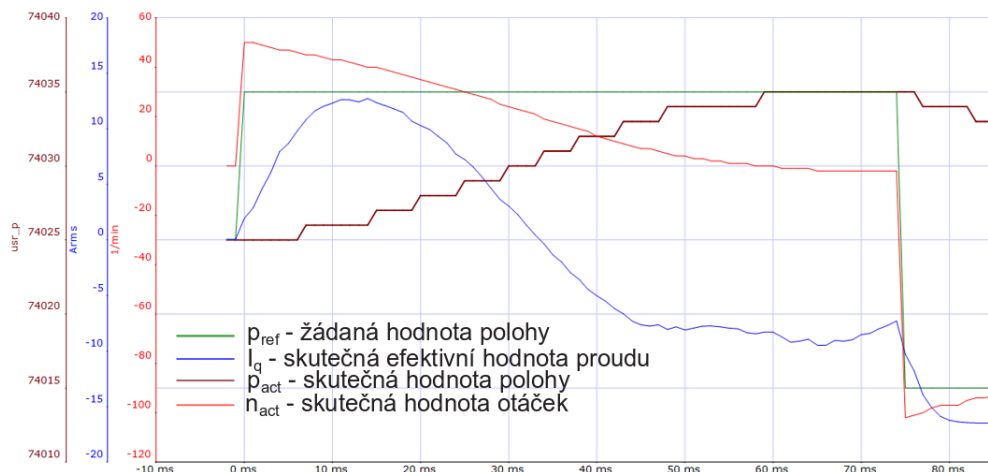


Obrázek 3.14: Odezva na jednotkový skok rychlosti - $TN_n = 26 \text{ ms}$

Po nastavení otáčkového regulátoru je možné přejít k nastavení proporcionální konstanty polohového regulátoru KP_p . Pro jeho nastavení byla opět zvolena metoda odezvy na jednotkový skok. Normování polohové smyčky bylo pro jednoduchost 360 inkrementů na jednu otáčku, pak tedy každý stupeň odpovídal jednomu inkrementu. Žádaná hodnota polohy byla otočení o 10° za čas 75 ms. Postupně v přiměřených krocích bylo zvyšováno zesílení až do bodu, kdy bylo dosaženo nejkratší doby odezvy bez překmitu. Ve výchozím nastavení byla hodnota zesílení 22, která nebyla dostačující. Vyhovující odezva byla experimentálně zjištěna při KP_p rovném 30, jak ukazuje obr. (3.15). Při vyšších hodnotách docházelo k nepřijatelnému překročení žádané hodnoty polohy.

Tímto bylo ukončeno nastavení regulátorů rychlosti a polohy. Pro další nastavování byl vytvořen testovací pracovní cyklus. Servopohon byl řízen v pracovním režimu sekvenčního polohování „Motion sequence“, který umožňuje pomocí SW SoMove vytvořit pracovní cyklus a uložit ho do servoměniče. Umožněno je vytvoření až 128 jednotlivých polohových úloh, z nichž byly využity dvě.

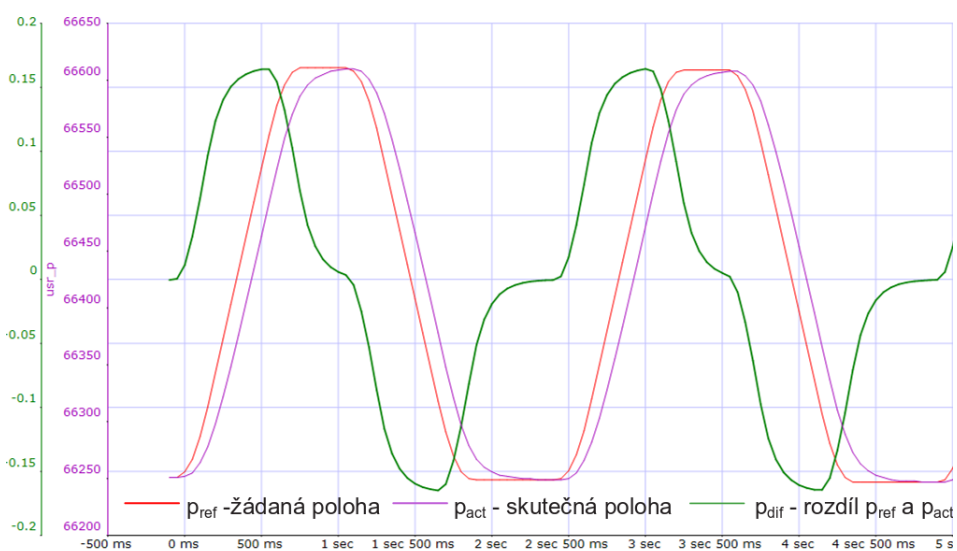
V první úloze bylo nastaveno otočení o jednu otáčku ve směru hodinových ručiček s maximální rychlostí 100 min^{-1} a zrychlením/zpomalením $52,35 \text{ rad/s}^2$ následováno pauzou 500 ms. Po vykonání byl nastaven přechod na druhou úlohu, ve které bylo téměř vše ponecháno stejné, zvolen byl pouze opačný směr otáčení a po vykonání byl nastaven přechod na první úlohu. Při vytváření testovacího cyklu byl brán ohled na velice špatný poměr setrvačností.



Obrázek 3.15: Odezva na jednotkový skok polohy - $K_{pp} = 30$

Z obr. (3.16) vyplývá, že dynamická regulační odchylka polohy je značná a je nezbytné ji eliminovat. K eliminaci je možné použít dopředné zpětné vazby do otáčkového regulátoru. Nastavena byla na hodnotu 100 procent. Výsledek po zavedení dopředné zpětné vazby je na obr. (3.17). Jak je vidět, regulační odchylka se snížila přibližně stonásobně.

Z této kapitoly plyne skutečnost, že i při špatném poměru se lze v omezených rychlostech pracovního diagramu pohybovat v přijatelných mezích kvality a stability regulace, například díky dopředným vazbám a úzkopásmovým filtrům. Nutno však poznamenat, že při požadavku na rychlejší pracovní cyklus nebo odezvu na skok žádané hodnoty by bylo nezbytné využít převodovku, která snižuje s kvadrátem převodu moment setrvačnosti zátěže, ovšem zvyšuje potřebné otáčky.



Obrázek 3.16: Odezva na pracovní cyklus po nastavení regulačních smyček - bez dopředné zpětné vazby



Obrázek 3.17: Odezva na pracovní cyklus po nastavení regulačních smyček - s dopřednou zpětnou vazbou

3.7 Enkodéry

Enkodéry jsou zdrojem informací o aktuální poloze a otáčkách servomotoru. Dle fyzikálního principu získávání informace je možné uvést tato provedení:³

- Fotoelektrické
- Indukční
- Kapacitní

Dále lze uvést rozdělení dle způsobu odměřování:

- Absolutní
- Inkrementální
- Kombinované

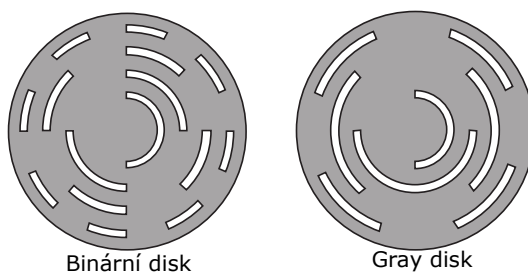
Tato kapitola neposkytuje kompletní přehled všech enkodérů. Pro více informací o ostatních používaných enkodérech se lze odkázat na literaturu [15].

3.7.1 Absolutní enkodér

Absolutní enkodér pro získání informace o absolutní poloze využívá kódovaný disk nejčastěji s binárním kódem nebo gray kódem (3.18). Binární kódování má jednu velkou nevýhodu, a to vznik hazardních stavů. Ty mohou vznikat, pokud se při přechodu z jednoho stavu do druhého

³Existují však i jiné typy snímačů polohy, např. odporové a magnetické.

mění více než jeden bit. Například při přechodu z 01 do stavu 10 by se mohl vlivem nedokonalostí na krátký okamžik objevit stav 00. Čím větší má enkodér rozlišení, resp. čím více má bitů, tím je vznik hazardních stavů pravděpodobnější. Je pak tedy nutné, aby elektronika byla navržena s ohledem na tento problém. Při využití tohoto kódování se uživatel této problematice však nemusí věnovat, jelikož je vždy vyřešena například použitím synchronní komunikace, kdy je signál synchronizován s hodinovým signálem. Toto řeší například komunikace SSI. Při využití vlastnosti Grayova kódování je vznik hazardních stavů eliminován, jelikož se v něm při přechodu z jednoho stavu do druhého mění právě jeden bit. Výhodou tohoto enkodéru je, že v každém okamžiku poskytuje informaci o absolutní poloze a to i v případě vypnutí a následném zapnutí napájení. V praxi se lze standardně setkat s 20-22 bitovými enkodéry. Vyrábí se v provedení jednootáčkovém a víceotáčkovém⁴. Tento typ je jednou z částí níže popsaného absolutního enkodéru s komunikací Hiperface společnosti Sick.



Obrázek 3.18: Kódovací disk binárním kódem a gray kódem (převzato a upraveno z [17])

3.7.2 Inkrementální enkodér

Lze se setkat s označením IRC (Incremental rotary encoder). Z názvu je patrné, že poloha je určována pomocí inkrementů a po zapnutí je nutné najetí na referenční bod. V případě inkrementálních enkodérů, které umožňují detekovat změnu úhlu natočení a zároveň směr otáčení, je jedna vlastnost společná, a to generování dvou signálů (např. A a B), které jsou vzájemně posunuté o 90° - elektrických. Generovány jsou 4 možné kombinace stavů 00, 01, 10 a 11. Proto se tyto enkodéry označují jako kvadrurní. Pomocí posloupnosti těchto signálů je možné určit směr otáčení. Dále tyto enkodéry poskytují tzv. nulový pulz, který umožňuje čítat počet otáček.

Konstrukční provedení jsou různá. Kódovaný disk může mít po obvodu dvě dráhy clonek, které jsou vzájemně posunuté o čtvrtinu rozteče otvorů a pro každou dráhu je jeden přijímač a vysílač. Další možností je jedna dráha clonek a dvě LED diody, které jsou od sebe posunuté o čtvrtinu rozteče clonek. Vyhodnocení se provádí pomocí kvadrurního dekodéru.

Tyto enkodéry mají většinou relativně malé rozlišení. Rozlišení je závislé na počtu clonek na jednu otáčku. Horní hranice⁵ rozlišení je dána minimální možnou šířkou clonky, při které kolem ní ještě nedochází k ohýbu světelného paprsku, což závisí patrně na šířce clonky a na vlnové délce

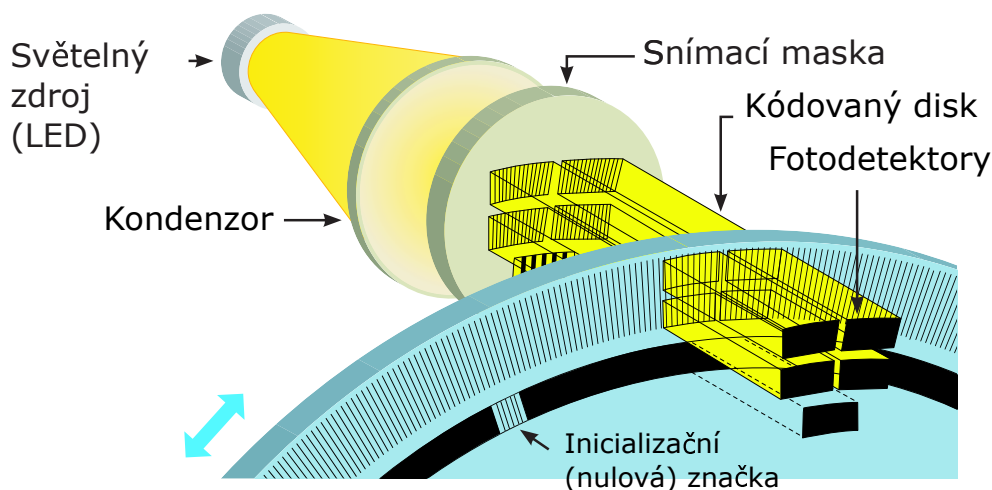
⁴Princip víceotáčkového enkodéru je uveden např. v literatuře [15] v kap. 3.7.

⁵Teoreticky ještě 4x větší, pokud by bylo možné detekovat náběžné a sestupné hrany signálů A, B.

generovaného světla. Nutno však vzít v úvahu výstupní frekvenci enkodéru. Například, pokud bychom uvažovali sto tisíc inkrementů na jednu otáčku, tak při rychlosti otáčení $3\,000\text{ min}^{-1}$ by výstupní frekvence byla 5 MHz. Jak vidno, výstupní frekvence omezuje rozlišení, a tím pádem i použití těchto enkodérů pro PMSM. Z uvedeného důvodu byly vyvinuty a jsou používány enkodéry typu Sin/Cos.

3.7.3 Inkrementální enkodér typu Sin/Cos

Obr. (3.19) ukazuje konstrukční uspořádání fotoelektrického inkrementálního enkodéru typu Sin/Cos. Světelný zdroj generuje paprsky, které kondenzor usměrňuje do rovnoběžné podoby. Paprsky procházejí skrze pevné snímací mřížky, proti kterým se otáčí kódovaný disk. Otáčením kódovaného disku dochází k postupnému periodickému maximalizování a minimalizování světelné intenzity na fotodetektorech, a tím jsou vytvořeny elektrické signály sinusového průběhu, jejichž frekvence závisí na rychlosti otáčení. Jednotlivé snímací mřížky jsou vůči sobě předsazeny o čtvrtinu dělicí periody.



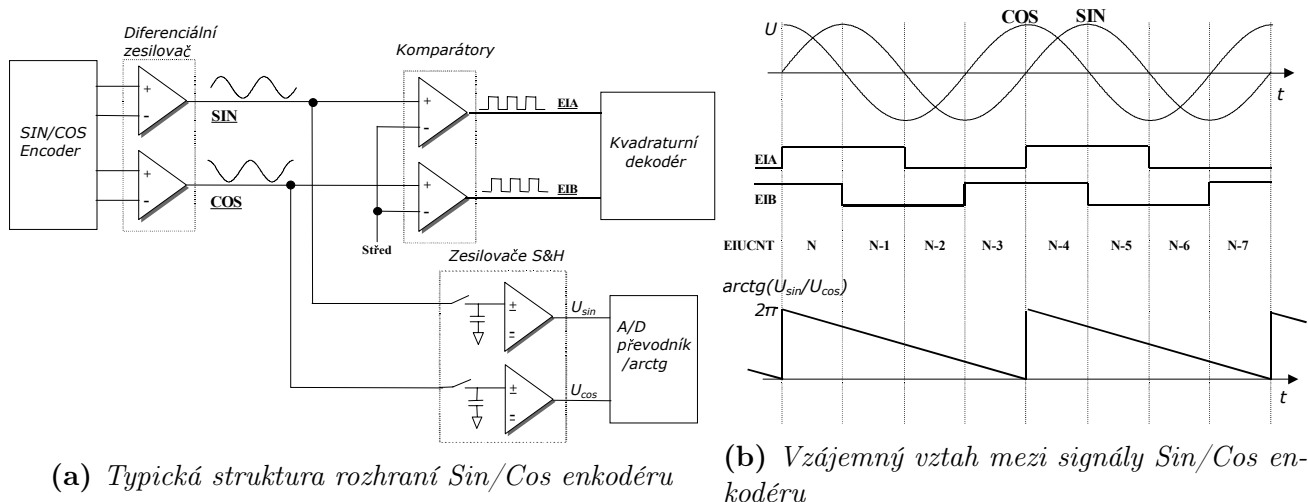
Obrázek 3.19: Ukázka konstrukce optoelektronického inkrementálního enkodéru (převzato a upraveno z [15])

Vznikají 4 stejnosměrné signály modulované sinusovými průběhy, které lze označit I_0 , I_{90} , I_{180} a I_{270} , kde každý je od předchozího posunut o 90° - elektrických. Rozdíl $I_{90} - I_{270}$ definuje sinusový průběh a $I_0 - I_{180}$ průběh kosinusový. Tyto signály jsou dále elektronicky zpracovávány v servoměniči. Možnosti provedení přenosu a zpracování dat je více, avšak principiálně jsou si podobné. Struktura rozhraní může vypadat např. dle obr. (3.20a).

Z enkodéru odchází čtveřice signálů $SIN + RefSin$, $COS + RefCos$. Signály $RefSin$, $RefCos$ jsou stejnosměrné signály, které reprezentují stejnosměrný offset signálů SIN a COS . Na straně servoměniče jsou tyto dvojice signálů zpracovány diferenčním zesilovačem, což zajišťuje odolnost proti rušení a šumu. Prostřednictvím komparátorů jsou signály převedeny na obdélníkové průběhy EIA a EIB s vzájemným posunutím 90° . Vznikají tedy 4 možné stavy během jedné periody. EIA a EIB dále zpracovává kvadrurní dekodér, který na svém vý-

stupu poskytuje informaci o směru otáčení a také informaci o hrubé poloze, která určuje, v jaké čtvrtině periody dané sinusovky je pracováno.

Signály *SIN*, *COS* jsou navíc převáděny do digitální podoby pomocí A/D převodníku. Na vstupu převodníku jsou zesilovače S&H (Sample and Hold), které udržují konstantní vstupní napětí v době převodu. Výsledný úhel natočení je určen pomocí funkce argtanges poměru U_{sin}/U_{cos} , kde hodnoty U_{sin} a U_{cos} jsou vzorkované hodnoty průběhů. Určení, v jaké čtvrtině periody je úhel vypočítáván, jak již bylo zmíněno, je dáno kombinací signálů *EIA* a *EIB*. Vztah mezi jednotlivými popsanými signály ukazuje obr. (3.20b).



(a) Typická struktura rozhraní Sin/Cos enkodéru

(b) Vzájemný vztah mezi signály Sin/Cos enkodéru

Obrázek 3.20: Struktura a signály inkrementálního Sin/Cos enkodéru (převzato a upraveno z [18])

Tyto enkodéry mají většinou více period Sin/Cos signálu na jednu otáčku, např. 16, 128, 1 028. Rozlišení polohy je dáno počtem period signálu Sin/Cos na otáčku, rozlišením A/D převodníku a počtem průchodů signálů Sin/Cos nulou v jedné periodě, tzn. při uvažování rozlišení 128 period Sin/Cos na jednu otáčku a využití 8 bitů A/D převodníku, by bylo možné pracovat s inkrementálním rozlišením polohy 131 072 inkrementů na otáčku.

Neumožnění získávání absolutní polohy je hlavní problém pro PMSM, protože po zapnutí není k dispozici úhel natočení rotoru, resp. není znám úhel natočení systému (d, q), který je nezbytný pro řízení servomotoru. Proto při práci pouze s tímto enkodérem by musel být stator po zapnutí na určitý okamžik napájen stejnosměrným napětím, aby se rotor natočil do známé polohy a regulační struktura proudu využívající vektorového řízení mohla správně řídit I_q složku proudu statoru. Tato procedura bývá označována jako „Wake and Shake“.

Výhodou tohoto enkodéru je zajištění vysokého rozlišení při relativně nízké výstupní frekvenci signálu, např. při uvažování enkodéru s 512 Sin/Cos periodami na otáčku by při rychlosti 12 000 min^{-1} byla výstupní frekvence 102,4 kHz, tzn. že je možné dosáhnout mnohem většího rozlišení při podstatně menší výstupní frekvenci než u IRC.

Vysoké inkrementální rozlišení je výhodné pro otáčkovou zpětnou vazbu, převážně při práci při nízkých otáčkách. Ovšem nevýhodou je neznalost absolutní polohy při zapnutí. Tento problém řeší např. absolutní enkodér typu Sin/Cos s komunikací Hiperface společnosti Sick, který

je popsán v následující kapitole.

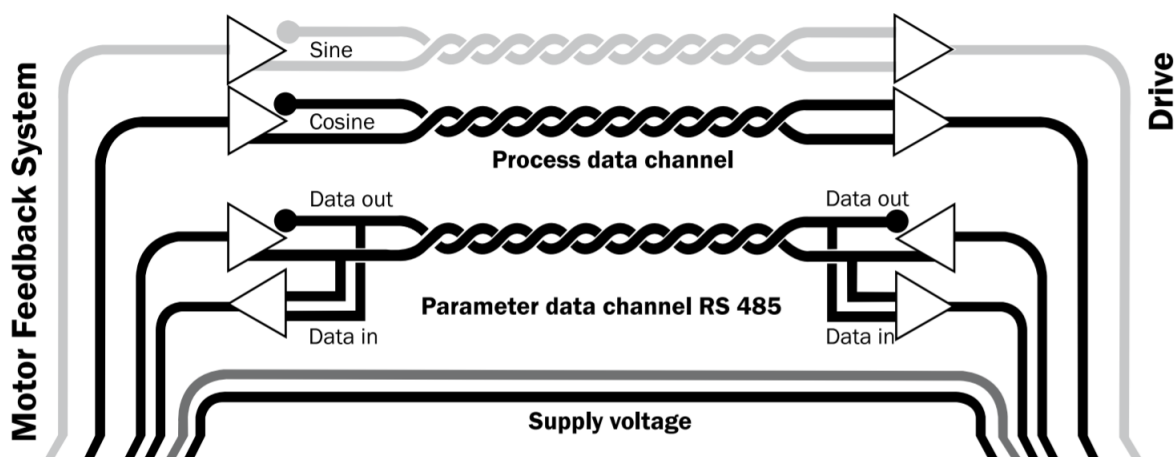
Čerpáno z [25], [18], [15].

3.7.4 Absolutní enkodér typu Sin/Cos s komunikací Hiperface společnosti Sick

Absolutní enkodér typu Sin/Cos s komunikací Hiperface⁶ kombinuje výhodné vlastnosti absolutního a inkrementálního Sin/Cos enkodéru. Kódovaný disk má po obvodu inkrementální stopu a dále směrem ke středu má několik stop, které tvoří kód absolutní polohy.

Informace o absolutní poloze je přenášena v digitální podobě po sériové komunikační lince RS 485. Analogový signál Sin/Cos je přenášen a zpracováván stejným způsobem, jako je uvedeno v předchozí kapitole.

Enkodér se připojuje pomocí šesti signálových vodičů a další 2 vodiče slouží pro napájení, viz obr. (3.21).



Obrázek 3.21: Rozhraní absolutního enkodéru Sin/Cos s kom. Hiperface (převzato z [12])

Princip činnosti je následovný, po zapnutí napájení je zjištěna absolutní poloha a ta je odeslána po sériové lince do servoměniče. Následně je poloha měřena inkrementálně pomocí analogových Sin/Cos signálů s vysokým rozlišením. Absolutní hodnota může být cyklicky v určitých intervalech polohy využita pro kontrolu inkrementálního zjišťování polohy.

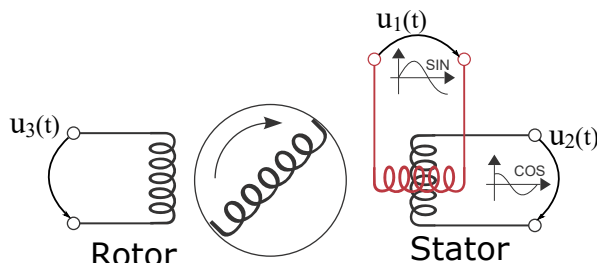
Enkodér dále obsahuje paměť EEPROM, do které je možné uložit např. elektronický štítek motoru a offset nulové pozice enkodéru. Tyto hodnoty je možné číst a zapisovat prostřednictvím sériové linky RS485.

Čerpáno z [13], [12].

⁶Podobně funguje i enkodér s komunikací EnDat či SSI, viz literatura [15].

3.7.5 Resolver

Konstrukčně je resolver složen z pohyblivé části - rotor a nepohyblivé části - stator. Rotor je spojen s hřídelí motoru, nebo případně s jinou částí stroje, kde je potřeba vyhodnocovat změnu polohy, resp. úhel natočení. Na statoru jsou obvykle dvě vinutí, která jsou vzájemně prostorově natočena o 90 stupňů a rotor obsahuje jedno vinutí, viz obr. (3.22).



Obrázek 3.22: *Ilustrační elektrické schéma resolveru (převzato a upraveno z [14])*

Obecně lze říci, že se jedná o druh rotačního transformátoru. Základní princip je založen na změně velikosti vzájemné indukčnosti mezi vinutím rotoru a statoru. Vzájemná indukčnost se mění při natočení rotoru sinusově, a tudíž i indukovaná napětí se mění sinusově. Resolver je možné napájet do statoru nebo do rotoru. U každé varianty je jiná veličina nesoucí informaci, a tím pádem i rozdílná metoda vyhodnocení.

Při napájení do statoru (primární vinutí) je stator napájen dvěma harmonickými napětími se shodnou amplitudou a frekvencí. Fázový posuv mezi napětími je 90 stupňů, viz rov. (3.1). Tato napětí vytvářejí rotující magnetické pole, které indukuje do rotoru (sekundární vinutí) napětí o stejné frekvenci s amplitudou dle převodového poměru a fázovým posunem odpovídajícím úhlu natočení rotoru v daný okamžik, viz rov. (3.2). Značení v následujících rovnicích odpovídá obr. (3.22) .

$$u_1(t) = U \sin(\omega t); u_2(t) = U \cos(\omega t) \quad (3.1)$$

$$u_3(t) = kU \sin(\omega t - \varphi) \quad (3.2)$$

V druhém případě je rotor (primární vinutí) napájen střídavým harmonickým signálem s konstantní frekvencí. Tím se indukuje v každém statorovém vinutí napětí, jehož amplituda odpovídá natočení rotoru. Konstrukčním uspořádáním statoru dochází k rozložení vektoru na kosinovou a sinovou složku. Dle rov. (3.3) lze vyhodnotit úhel natočení v rozsahu 0-90 stupňů.

$$\varphi(t) = \arctan\left(\frac{u_1(t)}{u_2(t)}\right) \quad (3.3)$$

Je zřejmé, že je potřeba určit, v jakém kvadrantu se rotor nachází. Vždy, když prochází napětí nulou, dojde ke změně jeho fáze. To platí jak u napětí v sinusovém, tak v kosinusovém vinutí.

Pohledem na fázový souběh budícího napětí s výstupními napětími jsou možné 4 kombinace stavů, tedy 4 kvadranty. Obě výstupní napětí jsou ve fázi s budícím, obě výstupní napětí jsou v protifázi s budícím a vzájemné kombinace. Výstupní analogové signály se následně přivádějí do vyhodnocovacích obvodů a dochází k převedení na digitální signál. Na rozlišení resolveru tedy má vliv bitovost A/D převodníku.

Jedná se vlastně o podobný princip jako inkrementální enkodér typu Sin/Cos, ovšem pouze s jednou periodou⁷ Sin/Cos signálu na otáčku, tzn. dosahuje se menšího rozlišení. Naproti tomu pouze jedna otáčka na periodu umožňuje měření jednootáčkové absolutní polohy. Jako další výhodu lze uvést, že samotný resolver neobsahuje žádnou elektroniku a neobsahuje žádnou mechanickou nebo elektronickou vazbu mezi rotorem a statorem. Je tak vhodný do prostředí s extrémními podmínkami co do teploty, vibrací, radiace apod. Provozní teploty mohou dosahovat méně než -50 °C a více než 200 °C. Je tedy vhodný pro využití např. v armádních či nemocničních aplikacích.

Čerpáno z [15], [16], [25].

3.8 Nadřazené řízení a komunikace

Ve většině aplikací je servopohon součástí rozsáhlejšího systému. Tento systém je obvykle řízen nadřazeným systémem, který je tvořen programovatelným logickým automatem PLC, programovatelným řídicím automatem PAC nebo průmyslovým PC IPC.

Na trhu je široké spektrum řídicích systémů. Nezávislá organizace PLCopen se věnuje standardizaci v oblasti programování průmyslových řídicích systémů a je původcem mezinárodní normy IEC 61131-3, která definuje mj. programovací jazyky. PLCopen založila standard pro řízení pohybu pohonu, tzv. PLCopen Motion standard, který poskytuje normované knihovny funkčních bloků pro nejvíce využívané funkce. Tyto funkční bloky poskytují jak pohybové tak administrativní funkce. Jedná se například *MC_Power* pro odblokování výkonové můstku, *MC_MoveVelocity* pro řízení rychlosti, *MC_MoveAbsolute* pro absolutní polohování, *MC_Reset* pro resetování poruchy, *MC_ReadDigitalInput* čtení stavů digitálních vstupů apod. To přináší zjednodušení a zefektivnění práce programátora, jelikož se nemusí zabývat datovou strukturou při nastavování jednotlivých požadavků ale pouze parametrizuje daný funkční blok.

Nadřazený systém typicky provádí řízení servopohonů prostřednictvím komunikace, která zabezpečuje přenos požadavků, parametrů, stavových hlášení apod. Komunikačních protokolů je celá řada. Obecně je lze rozdělit na komunikace pro řízení závislých a nezávislých os. Komunikace pro řízení nezávislých os jsou např. CANopen, Device Net, EtherNet/IP, Profibus DP, Profinet apod. Mezi komunikace, které umožňují řízení závislých os v reálném čase lze zařadit CANmotion, Sercos III, EtherCat, Profinet RT apod.

⁷V případě dvupólového provedení. Lze se setkat i s vícepólovým provedením resolveru, např. 8pólovým, ovšem ten již neumožňuje měření absolutní polohy.

Problematika nadřazeného řízení a komunikačních protokolů je rozsáhlá, cílem této práce není jejich detailní popis. Podrobnější popis jednotlivých komunikací a způsobu jejich použití výrobci uvádějí v uživatelských manuálech, viz např. [4].

4 Přehled výrobců servopohonů a popis produktových řad

Tato část práce se zabývá stručným popisem sortimentu výrobních řad od několika předních světových výrobců a od jednoho vybraného producenta, je uveden podrobnější popis sortimentu jeho výrobních řad. V následujících kapitolách je čerpáno z webových stránek, katalogu a manuálů jednotlivých výrobců.

4.1 Schneider Electric

Produktové portfolio Schneider electric je v oblasti elektrických servopohonů velmi bohaté. Lze je rozdělit do třech oblastí:

- elektrické servopohony
- kompaktní elektrické servopohony
- pohony s krokovými motory

Nabízeno je mnoho různých řad servoměničů pod společným označením Lexium (například LXM28, LXM32, LXM52, LXM62 atd.) a rodin servomotorů (například BSH, BMH, SH3, MH3, SHS atd.). Dále jsou popsány nejvíce používané řady servoměničů Lexium 32, servomotorů BSH/BMH a také kompaktní servopohony Lexium 32i.

4.1.1 Servoměniče Lexium 32

Řada pokrývá výkonový rozsah 0,15 kW - 11 kW. Dle vstupního napájecího napětí lze uvést následující dělení:

- jednofázové 115/230 V, 50/60 Hz, 0,15 kW - 1,6 kW
- trojfázové 230/400/480 V, 50/60 Hz, 0,35 - 11 kW

Integrovan je EMC filtr, který splňuje požadavky pro zařazení do kategorie C3 dle normy ČSN EN 61800-3 [34]. V případě servoměničů s jednofázovým napájením a max. 10metrového motorového kabelu filtr dosahuje úrovně odrušení kategorie C2 v prostředí typu 1, tzn. napájecí síť pro obytné prostory. Servoměniče mají vyvedené svorky stejnosměrného meziobvodu. Dále je v základu interní brzdná jednotka, včetně brzdného rezistoru. Proudové přetížení je typicky 300 % jmenovité efektivní hodnoty výstupního proudu po dobu až 5 sekund.

Jak vyplývá z kap. (3.6.1), regulátory jsou řazeny kaskádně. Proudová a rychlostní regulační smyčka má odezvu 62,5 μ s, polohová 250 μ s. Pro připojení zpětné vazby mají servoměniče

v základu rozhraní enkodéru SinCos s komunikační linkou Hiperface. Všechny typy mají v základu bezpečnostní funkci STO.

Řada Lexium 32 je dále rozdělena do čtyř variant provedení, které jsou odlišené především typem řízení, pracovními režimy a možnostmi volitelného příslušenství. Všechny níže uvedené typy mají rozhraní sériové linky Modbus pro konfiguraci a nastavení servoměniče prostřednictvím SW SoMove pro PC.

Lexium 32C (Compact) - tento typ je určen pro pulzní řízení nebo řízení prostřednictvím analogových/digitálních vstupů. Neumožňuje řízení po komunikační lince. Poskytuje následující pracovní režimy, jog (kontinuální pohyb a krokování), řízení proudu (momentu), řízení rychlosti, pulzní řízení - polohová či rychlostní synchronizace.

Lexium 32A (Advanced) - tento typ má zabudované rozhraní pro komunikaci CANopen/CANmotion, což přináší možnost řízení i v reálném čase. Umožňuje provoz v následujících pracovních režimech, jogování (kontinuální pohyb a krokování), nájezd do referenční polohy, řízení polohy, řízení otáček, řízení proudu (momentu).

Lexium 32M (Modular) - tento servoměnič má tři sloty, do kterých lze jako volitelné příslušenství vložit různé typy modulů.

První slot je určen pro vložení bezpečnostního modulu, díky kterému je možné využít bezpečnostní funkce jako SS1, SS2, SLS, SOS. Další méně využívanou variantou je vložení modulu, který obsahuje analogové a logické vstupy/výstupy.

Druhý slot je určený pro vložení enkodérového modulu, který je vhodný v případě, že servoměničem má být řízen servomotor od jiného výrobce nebo ho lze použít jako zdroj aktuální hodnoty polohy pro aplikace, kde je vyžadováno přesné polohování nezávislé na vůlích mechanického systému mezi servomotorem a místem, kde je potřeba regulovat polohu. Polohová smyčka by tedy v tomto případě pracovala s informací z druhého enkodéru. Motorový enkodér by zajišťoval správné řízení servomotoru (komutace) a poskytoval informaci o skutečné hodnotě otáček servomotoru. Dle typu výstupu enkodéru jsou na výběr tři moduly: digitální (SSI, BISS, Endat 2,2 a signály A/B), analogový (SinCos 1Vpp, Hiperface), resolver.

Poslední slot umožňuje vložení širokého spektra komunikačních modulů umožňující komunikace: CANopen, CANmotion, EtherCAT, PROFIBUS DP, PROFINET, DeviceNet, EtherNet IP, Modbus TCP, SERCOS II, SERCOS III a další. Tato variabilita dovoluje řízení servopohonu v podstatě libovolným nadřazeným systémem.

Lexium 32M umožňuje kromě všech pracovních režimů, které jsou zmíněné u Lexium 32A a Lexium 32C, také integrovanou funkci sekvenčního řízení. Disponuje stejně jako Lexium 32C i vstupem PTI a výstupem PTO.

Lexium 32S (Sercos) - Je určen pro řízení pomocí Motion kontroléru Modicon LMC078 po komunikaci SERCOS III. Dále má slot pro vložení bezpečnostního modulu jako Lexium 32M. Umožňuje provoz v pracovních režimech jogování (kontinuální pohyb a krokování), nájezd do referenční polohy a dále cyklické řízení polohy, otáček a momentu.

4.1.2 Servomotory BMH a BSH

Servomotory BSH a BMH jsou určeny pro kooperaci se servoměniči Lexium 32. Rozdělení je především dle momentu setrvačnosti motoru, s čímž je spojeno aplikační použití. Nabízeny jsou dva typy, které je vhodné použít pro aplikace se střední a velkou dynamikou pohybu. Servomotory jsou dle typu vybaveny následujícími absolutními Sin/Cos enkodéry s komunikací Hiperface společnosti Sick:

- SEL37 - jednootáčkový, 16 SinCos period
- SEK37 - víceotáčkový (4 096 otáček), 16 SinCos period
- SKS36 - jednootáčkový, 128 SinCos period
- SKS36 - víceotáčkový (4 096 otáček), 128 SinCos period

Servomotory BMH - Jedná se o 10pólový PMSM servomotor, který má 3 fázový stator a magnety ze vzácných zemin (NdFeB). Motory jsou určeny pro aplikace s větším momentem setrvačnosti zátěže. Pokrývají rozsah trvalého kroutícího momentu 1,2 Nm - 100 Nm v závislosti na jmenovitých otáčkách motorů, které u některých typů dosahují až 8 000 min⁻¹.

Servomotory BSH - jedná se o 6-10pólový PMSM servomotor, který má 3fázový stator a magnety ze vzácných zemin (NdFeB). Motory jsou určeny pro dynamické aplikace s malým momentem setrvačnosti zátěže. Pokrývají rozsah trvalého kroutícího momentu 0,5 Nm - 33,4 Nm v závislosti na jmenovitých otáčkách motorů, které u některých typů dosahují až 9 000 min⁻¹.

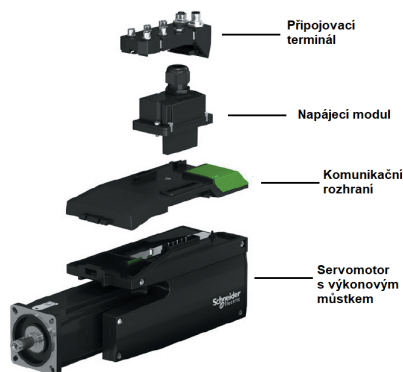
4.1.3 Kompaktní servopohony Lexium 32i

Tato řada nabízí provedení servoměniče a servopohonu v integrovaném provedení. Servoměnič je integrován přímo do pláště servomotoru. Smyslem integrace elektroniky servopohonu do pláště servomotoru je úspora kabeláže, snížení nároků na rozvaděčový prostor a jeho chlazení a snížení nákladů na montáž.

Dle vstupního napětí lze rozdělit do následných skupin:

- jednofázové 115/230 V, 50/60 Hz, 0,4 kW - 1,3 kW, 1,7 Nm - 5,4 Nm
- trojfázové 230/400/480 V, 50/60 Hz, 0,4 kW - 2 kW, 2 Nm - 7,2 Nm

Servopohony umožňují následující pracovní režimy, jogování (kontinuální pohyb a krokování), nájezd do referenční polohy, řízení proudu (momentu), rychlosti a polohy. Pohon je fyzicky rozdělen na 4 hlavní části viz obr. (4.1). Jednotlivé části je možné kombinovat, což dovoluje konfiguraci servopohonu dle požadavků aplikace.



Obrázek 4.1: Jednotlivé komponenty servopohonu Lexium 32i (převzato a upraveno z [8])

4.2 Siemens

SINAMICS V90 - dle napájecího napětí pokrývá tato řada jednoosých servoměnů následující výkonový rozsah:

- jednofázové 230 V, 50/60 Hz, 0,1 kW - 2 kW
- trojfázové 400/480 V, 50/60 Hz, 0,4 - 7 kW

Umožňují proudové přetížení 300 % jmenovité efektivní hodnoty výstupního proudu po dobu až 0,3 s. K dispozici jsou dvě řady. Jedna je určena především pro pulzní řízení polohy a druhá pro řízení po komunikaci PROFINET.

SIMOTICS S-1FL6 - tato řada PMSM servomotorů je výhradně určena pro servoměniče SINAMICS V90. Je rozdělena do dvou skupin dle požadavku na dynamiku pohybu, resp. moment setrvačnosti. Pokrývá rozsah kroutícího momentu od 0,16 Nm - 33,4 Nm, kde některé typy dosahují až 8 000 min^{-1} jmenovitých. Servomotory jsou určeny pro aplikace s malým a středním momentem setrvačnosti, tedy pro středně a velmi dynamické aplikace.

Servomotory s malým momentem setrvačnosti je možné vybavit víceotáčkovým absolutním enkodérem s rozlišením 20 bitů v rámci jedné otáčky + 12 bitů na počet otáček nebo inkrementálním enkodérem s rozlišením 2 500 pulzů na otáčku. Pro servomotory s velkým momentem setrvačnosti je navíc k dispozici jednootáčkový absolutní enkodér s rozlišením 21 bitů.

SINAMICS S210 - tato řada jednoosých servoměnů pokrývá následující výkonový rozsah:

- jednofázové 230 V, 50/60 Hz, 0,1 kW - 0,75 kW
- trojfázové 230/400/480 V, 50/60 Hz, 0,24 kW - 7 kW

Umožněno je proudové přetížení 380 % jmenovité efektivní hodnoty výstupního proudu po dobu až 0,3 s. Servoměniče jsou výhradně určeny pro napájení servomotorů SIMOTICS S-1FK2 a řízení prostřednictvím komunikace PROFINET.

SIMOTICS S-1FK2 - tato řada servomotorů pokrývá rozsah trvalého kroutícího momentu od 0,16 Nm - 33,4 Nm v závislosti na jmenovitých otáčkách, které u některých typů dosahují až $6\ 000\ \text{min}^{-1}$. Jsou rozděleny do dvou skupin dle požadavku na dynamiku pohybu. Jsou vhodné pro aplikace se středními a většími nároky na dynamiku a přesnost pohybu. Disponují absolutním jednotáčkovým enkodérem s rozlišením 20 bitů nebo víceotáčkovým rozlišením 20 bitů v rámci jedné otáčky + 12 bitů na počet otáček.

SINAMICS S110 - tato řada servoměnů pokrývá široký rozsah výkonů od 0,55 kW do 132 kW, dle vstupního napětí:

- jednofázové 230 V, 50/60 Hz, 0,55 kW - 4 kW
- trojfázové 400/480 V, 50/60 Hz, 0,55 kW - 132 kW

Umožňují řízení jak PMSM servomotorů, tak asynchronních motorů s kotvou nakrátko. Servoměnič se skládá z částí, výkonového modulu PM340 a řídicí jednotky CU305, která je k dispozici ve dvou variantách, dle komunikačního rozhraní: CU305 DP - PROFIBUS a CU305 PM - PROFINET. Dovolují připojení inkrementálního enkodéru nebo absolutního enkodéru s komunikací SSI.

SINAMICS S120 - jedná se modulární systém servoměnů, kdy se zvláště specifikují silové a řídicí komponenty, jako např. napájecí modul, výstupní modul, řídicí jednotka, komunikační jednotka apod. Rozsah výkonu je zde opravdu široký 1,6 kW - 6 840 kW v závislosti na napájecím napětí, které je k dispozici 3 x 380-480 V a 3 x 500-690 V.

4.3 Yaskawa

Sigma 7 - tato řada servoměnů disponuje jak jednoosými, tak dvouosými servoměnů. Výkonový rozsah jednoosých servoměnů dle napájecího napětí:

- jednofázové 230 V, 50/60 Hz, 0,05 kW - 1,5 kW
- trojfázové 230/400/480 V, 50/60 Hz, 0,5 kW - 15 kW

Výkonový rozsah dvouosých servoměnů dle napájecího napětí:

- jednofázové 230 V, 50/60 Hz, 2 x 0,2 kW - 2 x 0,75 kW
- trojfázové 230/400/480 V, 50/60 Hz, 2 x 0,2 kW - 2 x 1,5 kW

Poskytují možnost proudového přetížení až 350 % jmenovité efektivní hodnoty výstupního proudu po dobu až 3-5 s (dle typu). V závislosti na provedení měniče jsou k dispozici varianty pro řízení pulzním/analogovým signálem a pro řízení po komunikaci EtherCAT, MECHATRONIK-III a MECHATRONIK-II. K těmto servoměnům jsou nabízeny 3 typy PMSM servomotorů SGM7A, SMG7J a SGM7G, které pokrývají rozsah trvalého kroutícího momentu 0,159 Nm - 95,4 Nm, rozsah jmenovitých otáček je od 1 500 do 3 000 min^{-1} , a jsou určeny pro aplikace s

malým a středním momentem setrvačnosti. Disponují absolutním nebo inkrementálním enkodérem se sériovou komunikací s rozlišením 24 bitů.

Sigma 5 tato řada má stejný výkonový rozsah se stejným odstupňováním jako řada Sigma 7. Rovněž proudové přetížení je stejné. Oproti řadě Sigma 7 jsou navíc k dispozici varianty pro řízení pomocí komunikací CANopen, Ethernet POWERLINK, PROFINET.

Tyto servoměniče jsou určeny pro PMSM servomotory typu SGMJV, SGMAV, SGMEV, SGMGV, SGMSV, které rovněž pokrývají rozsah 0,159 Nm - 95,4 Nm, ovšem poskytují větší variabilitu co do momentu setrvačnosti a jmenovitých a maximálních otáček.

Řada Sigma 7 je ve srovnání s řadou Sigma 5 novější a má lepší některé parametry jako např. teoretická šířka pásma rychlostní smyčky je u řady Sigma 7 uváděna 3,6 kHz, oproti tomu řada Sigma 5 má 1,6 kHz.

4.4 Lenze

Pro všechny níže uvedené řady servoměničů jsou nabízeny PMSM servomotory a asynchronní servomotory. PMSM servomotory jsou vyráběny ve třech základní skupinách MCS, m850, MDxKS tyto řady pokrývají rozsah trvalého kroutícího momentu od 0,5 Nm do 200 Nm, kde některé typy dosahují až $6\ 000\ \text{min}^{-1}$ jmenovitých. Jsou určeny pro aplikace s malým a středním momentem setrvačnosti, tedy pro středně a velmi dynamické aplikace.

Asynchronní servomotory jsou nabízené také ve třech řadách MQA, MCA, SDSQA. Řada MQA pokrývá rozsah 66 Nm - 1 000 Nm a je vhodná pro aplikace s velkým zatěžným momentem motoru. Řada MCA pokrývá rozsah 2 Nm - 1 100 Nm a je vhodná pro aplikace s požadavkem na vysokou bezpečnost provozu a poslední řada s rozsahem 0,29 Nm - 1,9 Nm je vhodná pro aplikace se zvýšeným požadavkem na hygienu.

i700 - jedná se o víceosý modulární systém, který umožňuje dle požadavku aplikace jedním napájecím modulem napájet větší počet jednoosých a víceosých výkonových modulů. Pokrývá výkonový rozsah 0,75 kW - 15 kW pro jednoosý výkonový modul a pro dvouosý 2 x 0,75 kW - 2 x 7,5 kW. Napájecí moduly jsou k dispozici ve dvou variantách: do 15 kW a do 30 kW.

Disponují rozhraním pro řízení po komunikaci EtherCAT a dále jsou vybaveny rozhraním pro absolutní enkodér s komunikací Hiperface.

i950 - tyto servoměniče pokrývají široký výkonový rozsah od 0,55 kW do 110 kW při třífázovém napájení 3 x 400 V. Proudové přetížení je až 200 % jmenovité efektivní hodnoty výstupního proudu po dobu až 3 s.

Servoměniče je možné vybavit kartami s rozhraním pro komunikace EtherCAT, PROFINET a je možné vybavit modulem pro resolver nebo multifunkčním enkodérovým modulem, který umožňuje připojení následujících enkodérů: inkrementální SinCos, absolutní s komunikací Hiperface, SSI, absolutního SinCos s SSI.

9000 - tato řada nabízí provedení kompaktního servoměniče pro jednu osu s širokým výkonovým rozsahem od 0,37 kW - 240 kW a modulární variantu pro systém více os s výkonovým

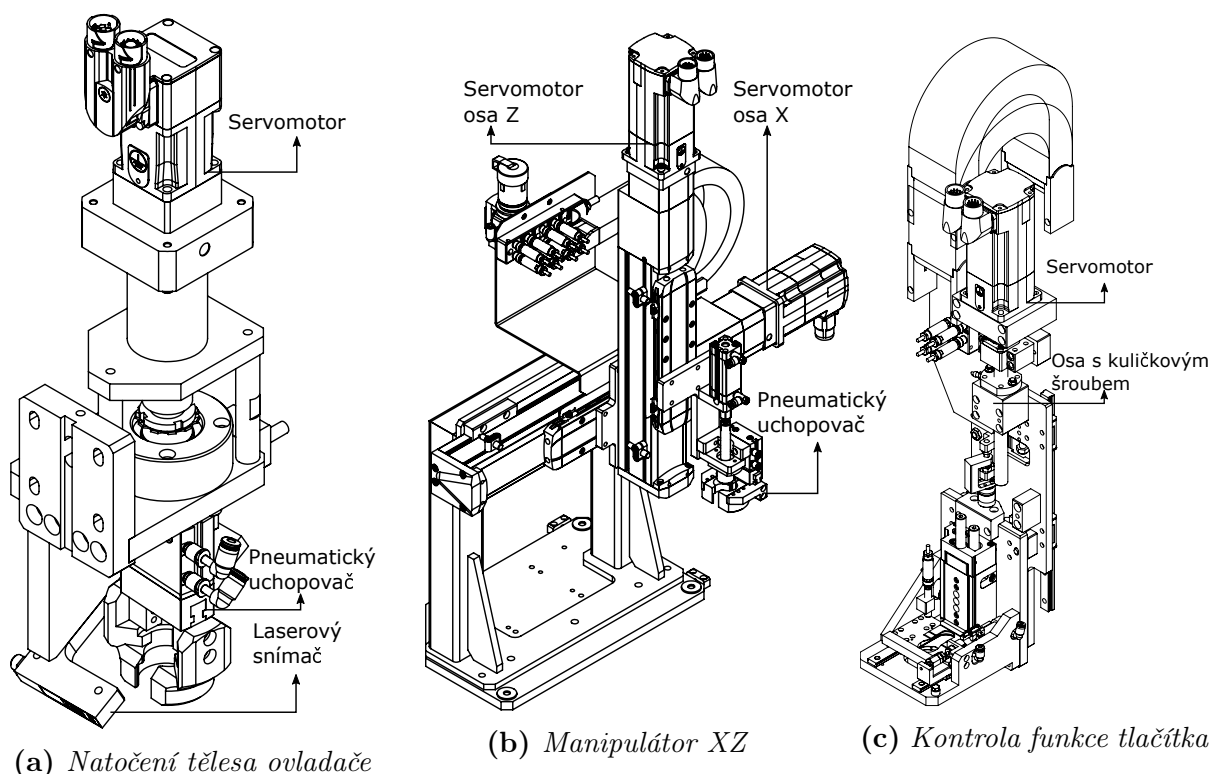
rozsahem výkonového modulu od 0,37 kW - 30 kW, pro které jsou určeny napájecí moduly s rozsahem 4,9 kW - 119 kW. Proudové přetížení je až 400 % menovité efektivní hodnoty výstupního proudu po dobu 0,5 s. Servoměniče je možné vybavit kartami s rozhraním pro komunikace EtherCAT, PROFINET, PROFIBUS, EtherNet/IP, CANopen. Nabídka rozhraní pro připojení enkodérů je stejná jako v případě řady i950.

5 Poloautomat na kompletaci a kontrolu ovladačů nouzového zastavení

Tato kapitola se zabývá popisem vybraných částí jednoúčelového stroje pro kompletaci tlačítek nouzového zastavení. Jednotlivé části sestavovaného nouzového tlačítka jsou na obr. (5.2). Stroj má několik stanovišť. Servopohony jsou využity u třech, dále blíže popsanych. Kompletní popis celého stroje přesahuje rozsah a zadání této práce. Pro tento stroj dále je používána zkratka PKKO.

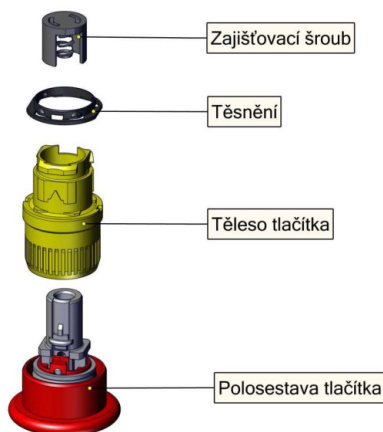
Na prvním stanovišti se servopohonem je těleso tlačítka ustanoveno otočením na přesnou polohu. Uchycení a zdvih je řešen pneumatickým uchopovačem. Servopohon má za úkol natočení uchopovače s tělesem tlačítka, viz obr. (5.1a). Druhým stanovištěm je manipulátor v osách X a Z viz obr. (5.1b). Manipulátor se stará o přesunutí tělesa tlačítka a nasazení na polosestavu tlačítka. Posledním stanovištěm je svislá osa s kuličkovým šroubem, která zajišťuje kontrolu síly při stisknutí a vypnutí složeného hříbového tlačítka viz, obr. (5.1c).

Kvůli přehlednosti vzorců a zjednodušení zadání není počítáno v základních jednotkách. Použité jednotky jsou vždy uvedeny u jednotlivých výpočtů.



Obrázek 5.1: Mechatronické sestavy - PKKO (převzato a upraveno z výrobní dokumentace se souhlasem společnosti Schneider Electric)

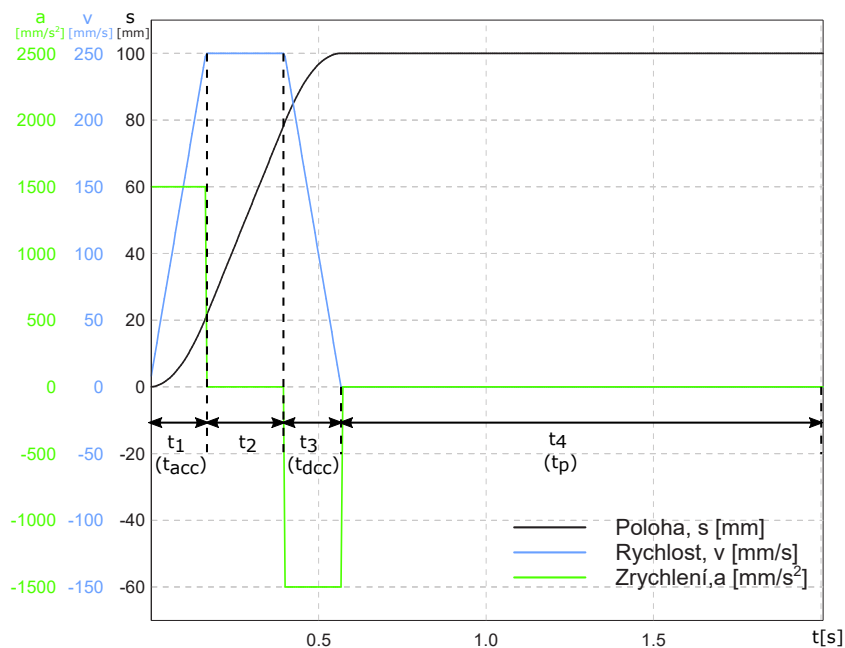
Zadání elektrických parametrů - napájecí napětí 1fázové 230 V 50Hz, komunikace CANopen/CANmotion/, pro všechny níže uvedené jednotlivé části stroje je toto zadání stejné.



Obrázek 5.2: Jednotlivé komponenty hříbového ovladače - PKKO (přezvato z výrobní dokumentace se souhlasem společnosti Schneider Electric)

5.1 Dimenzování servopohonu - osa X manipulátoru

Zadání pracovního cyklu pro dimenzování - dráha v ose X je $s_x = 100$ mm za čas 0,5 s, následuje pauza $t_p = 1,5$ s, a poté návrat do počáteční polohy stejným způsobem. Maximální rychlost je $v_{max} = 250$ mm/s, doba zrychlení je $t_{acc} = 0,1$ s, doba zpomalení je $t_{dec} = 0,1$ s. Pro dimenzování postačuje uvažovat pouze jeden směr. Z uvedeného zadání lze vytvořit pracovní cyklus polohy, rychlosti a zrychlení, viz obr. (5.3).



Obrázek 5.3: Pracovní cyklus osy X manipulátoru (veličiny s, v, a) - PKKO

Zadání mechanické části - pohyb je realizován lineární osou s kuličkovým šroubem, stoupání šroubu je $h = 5$ mm, moment setrvačnosti lineární osy bez zatížení je $J_s = 0,06$ kgcm², hmotnost přesouvané hmoty je $m_z = 8$ kg, třecí síla je $F_{tr} = 0,4$ N.

Výpočet celkového momentu setrvačnosti redukovaného na výstup mechanického systému (na šroub) zahrnující posuvné hmoty (zátěž) a rotační hmoty (šroub):

$$J_{Reds} = m_z \left(\frac{h \cdot 10^{-1}}{2\pi} \right)^2 + J_s = 8 \left(\frac{5 \cdot 10^{-1}}{2\pi} \right)^2 + 0,06 = 0,111 \quad [kgcm^2] \quad (5.1)$$

Výpočet maximálních otáček motoru:

$$n_{max} = \frac{60 \cdot v_{max}}{h} = \frac{250 \cdot 60}{5} = 3000 \quad [min^{-1}] \quad (5.2)$$

Rovnice (5.3) uvádí výpočet dynamického momentu v přechodových stavech. V tomto případě je akcelerační moment v absolutní hodnotě rovný deceleračnímu, jelikož $t_{acc} = t_{dec}$.

$$M_d = \frac{2\pi n_{max} J_{Reds} \cdot 10^{-4}}{60 \cdot t_{acc}} = \frac{2 \cdot \pi \cdot 3000 \cdot 0,111 \cdot 10^{-4}}{60 \cdot 0,1} = 0,035 \quad [Nm] \quad (5.3)$$

Výpočet přidavného třecího momentu:

$$M_{tr} = \frac{F_{tr} h}{2\pi} \cdot 10^{-1} = \frac{0,4 \cdot 5}{2\pi} \cdot 10^{-3} = 0,03 \quad \text{lze zanedbat} \quad [Ncm] \quad (5.4)$$

Jelikož je třecí moment zanedbatelný, lze určit maximální dynamický moment na výstupu mechanického systému, který nastává v časovém intervalu t_1 , jako:

$$M_{t1} = M_d = 0,035 \quad [Nm] \quad (5.5)$$

Na základě vypočtených parametrů je předběžně zvolen motor z produktové řady BSH společnosti Schneider Electric typové velikosti BSH551T s momentem setrvačnosti $J_m = 0,057 \text{ kgcm}^2$, jmenovitým momentem $M_n = 0,48 \text{ Nm}$ při jmenovitých otáčkách $n_N = 6000 \text{ min}^{-1}$ a maximálním momentem $M_{max} = 1,5 \text{ Nm}$. Parametry respektují napájecí napětí 230 V viz [3].

Ověření poměru setrvačnosti:

$$\frac{J_z}{J_m} = \frac{0,111}{0,057} = 1,947 \quad \text{akceptovatelné} \quad (5.6)$$

Výpočet přidavného dynamického momentu způsobeného vlastním momentem setrvačnosti motoru:

$$M_{dm} = \frac{2\pi n_{max} J_m \cdot 10^{-4}}{60 t_{acc}} = \frac{2\pi \cdot 3000 \cdot 0,057 \cdot 10^{-4}}{60 \cdot 0,1} = 0,018 \quad [Nm] \quad (5.7)$$

Výpočet jednotlivých momentů v časových intervalech t_1 , t_2 , t_3 při uvažování momentu setrvačnosti motoru:¹

$$M_{ct1} = M_d + M_{dm} = 0,035 + 0,018 = 0,056 \quad [Nm] \quad (5.8)$$

¹Pokud by nebyl zanedbán M_{tr} , byl by přičten k M_{ct1} a M_{ct3} .

$$M_{ct2} = M_{tr} \quad \text{je zanedbáno} \quad (5.9)$$

$$M_{ct3} = -M_d - M_{dm} = -0,035 - 0,018 = -0,056 \quad [Nm] \quad (5.10)$$

Výpočet efektivního momentu systému (mechanická část + motor):²

$$M_{ef} = \sqrt{\frac{M_{ct1}^2 t_1 + M_{ct3}^2 t_3}{t_1 + t_2 + t_3 + t_4}} = \sqrt{\frac{0,53^2 \cdot 0,1 + (-0,053)^2 \cdot 0,1}{0,1 + 0,3 + 0,1 + 1,5}} = 0,017 \quad [Nm] \quad (5.11)$$

Výpočet středních otáček motoru:³

$$n_{str} = \frac{|n_1| t_1 + |n_2| t_2 + |n_3| t_3}{t_1 + t_2 + t_3 + t_4} = \frac{\frac{3000}{2} \cdot 0,1 + 3000 \cdot 0,3 + \frac{3000}{2} \cdot 0,1}{0,1 + 0,3 + 0,1 + 1,5} = 600 \quad [min^{-1}] \quad (5.12)$$

Ověření motoru:

$$M_{ct1} < M_{max} \quad \text{splněno s rezervou} \quad (5.13)$$

$$M_{ef} < M_n \quad \text{splněno s rezervou} \quad (5.14)$$

Momentová konstanta servomotoru je $k_t=0,36$ Nm/A viz [6]. Požadovaný výstupní proud servoměniče je tedy $I=0,472$ A. Na základě doporučení výrobce a uvedeného požadavku na proud je zvolen servoměnič LXM32AU45M2. Tento servoměnič umožňuje komunikaci CanOpen/CanMotion. Napájecí napětí je jednofázové 230 V. Obr. (5.4) ukazuje momentovou charakteristiku kombinace zvoleného servopohonu.

Ověření brzdného rezistoru - dle rov. (2.3) je dopočtena brzdná energie v čase t_3 :

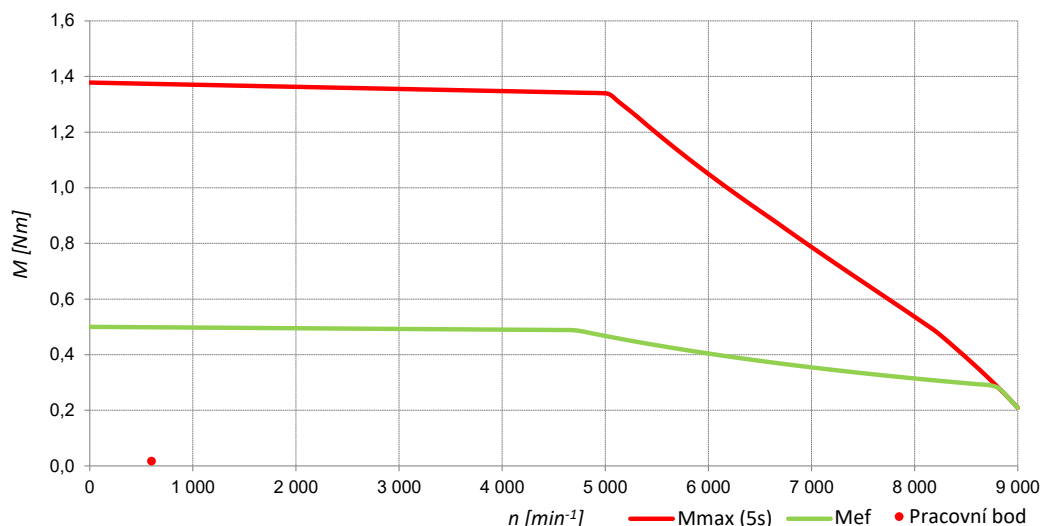
$$E_{B(t3)} = \frac{1}{2} \cdot 0,168 \cdot 10^{-4} \left(\frac{2\pi \cdot 3000}{60} \right)^2 = 0.829 \quad [Ws] \quad (5.15)$$

Energetická rezerva kondenzátorové baterie E_{var} zvoleného měniče je 11 Ws při uvažování výchozího nastavení napěťového prahu sepnutí 430 V, viz [1]. $E_{B(t3)}$ nepřevyšuje E_{var} . Brzdný interval je pouze jeden a v žádném případě poruchy nejsou motory řízeně zastavovány. Interní brzdny rezistor tedy bude v nečinnosti a není se nutné tomuto dále věnovat.

Volba a ověření enkodéru - jelikož se v mechanickém systému nevyskytují podstatné vůle (ztráta pohybu), je možné využít enkodér umístěný na motoru. Po vypnutí a opětovném zapnutí napájení pohonu je požadovaná znalost aktuální polohy. Servomotory typu BSH551T jsou z výroby osazeny absolutními SinCos enkodéry s komunikací Hiperface viz (kap. 4.1.2). Jelikož dochází k otočení o více než jednu otáčku, je zvolen víceotáčkový enkodér, tedy SKM36.

²V čitateli zlomku nejsou zahrnuty členy $M_{ct4}^2 t_4$ - nulový, $M_{ct2}^2 t_2$ - zanedbán.

³V čitateli zlomku není zahrnut člen $|n_4| t_4$, jelikož je nulový.



Obrázek 5.4: Momentová charakteristika servopohonu LXM32AU45M2+B5H551T (Vytvořeno pomocí [9])

Tento enkodér má rozlišení absolutní polohy $\pm 0,089^\circ$ a rozlišení 128 SinCos period na jednu otáčku. Odchyłka aktuální polohy od měřené, zavedená do systému enkodérem, vychází po přepočtení na translační pohyb $1 \mu\text{m}$. Tato odchyłka je při požadavku na přesnost polohování stroje $0,5 \text{ mm}$ zanedbatelná.

5.2 Dimenzování servopohonu - osa Z manipulátoru

Zadání pracovního cyklu pro dimenzování - dráha v záporném směru osy Z je $s_z = 60 \text{ mm}$ za čas $0,5 \text{ s}$, maximální rychlost je $v_{\text{max}} = 150 \text{ mm/s}$, maximálním zrychlením/zpomalením je $|a| = 1500 \text{ mm/s}^2$. Následuje klidová fáze, při které je požadováno udržení polohy při působení přídatné síly $F_p = 40 \text{ N}$ po dobu $t_4 = 0,5 \text{ s}$. Po dokončení uvedené operace je požadován návrat na původní polohu se stejnou maximální rychlostí, maximálním zrychlením/zpomalením a za stejný čas $0,5 \text{ s}$, a poté je pauza $t_p = 0,5 \text{ s}$. Pracovní cyklus pro dimenzování ukazuje obr. (5.5).

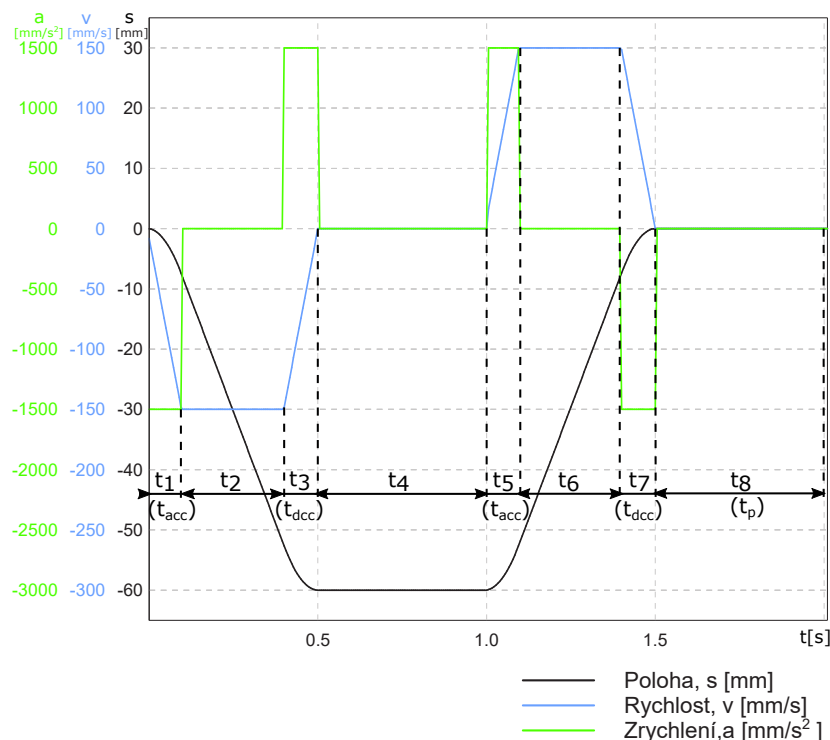
Zadání mechanické části - pohyb je realizován lineární osou s kuličkovým šroubem, stoupání šroubu je $h = 5 \text{ mm}$, moment setrvačnosti lineární osy bez zatížení (šroubu) je $J_s = 0,06 \text{ kgcm}^2$, hmotnost přesouvané hmoty je $m_z = 3 \text{ kg}$. Jelikož osa bude umístěna horizontálně, nebude se uplatňovat tření na vedení lineární osy.

Vzhledem k zadání je možné použít stejný způsob výpočtu, jako je uvedeno v rovnicích (5.1), (5.2) a (5.3). Jsou tedy stanoveny následující parametry $J_{\text{Reds}} = 0,079 \text{ kgcm}^2$, $n_{\text{max}} = 1800 \text{ mm}^{-1}$ a $M_d = 0,015 \text{ Nm}$.⁴

Výpočet krouticího momentu způsobeného gravitací:

$$M_{gz} = \frac{F_g h}{2\pi} \cdot 10^{-3} = \frac{29,43 \cdot 5}{2\pi} \cdot 10^{-3} = 0,023 \quad [\text{Nm}] \quad (5.16)$$

⁴Podobně jako u rov. (5.3) platí $t_1 = t_3 = t_5 = t_7 = t_{\text{acc}} = t_{\text{dec}}$.



Obrázek 5.5: Pracovní cyklus osy Z manipulátoru (veličiny s , v , a) - PKKO

Výpočet přídatného momentu způsobeného přídatnou silou F_p v časovém intervalu t_4 :

$$M_p = \frac{F_p h}{2\pi} \cdot 10^{-3} = \frac{40 \cdot 5}{2\pi} \cdot 10^{-3} = 0,031 \quad [Nm] \quad (5.17)$$

Výpočet maximálního dynamického momentu na výstupu mechanického systému - nastává v časových intervalech t_3 a t_5 :

$$M_{t3} = M_{t5} = M_d + M_{gz} = 0,015 + 0,031 = 0,046 \quad [Nm] \quad (5.18)$$

Na základě vypočtených parametrů je předběžně zvolen motor z produktové řady BSH společnosti Schneider Electric typové velikosti BSH040P s momentem setrvačnosti $J_m = 0,04 \text{ kgcm}^2$ (s parkovací brzdou), jmenovitým momentem $M_n = 0,19 \text{ Nm}$ při jmenovitých otáčkách $n_N = 4\,000 \text{ min}^{-1}$ a maximálním momentem $M_{max} = 0,75 \text{ Nm}$. Parametry respektují napájecí napětí 230 V, viz [6].

Ověření poměru setrvačnosti:

$$\frac{J_z}{J_m} = \frac{0,079}{0,04} = 1,975 \quad \text{akceptovatelné} \quad (5.19)$$

Již v této části by bylo možné konstatovat, že zvolený motor vyhoví požadavkům na maximální a efektivní moment.

Výpočet přídatného dynamického momentu způsobeného vlastním momentem setrvačnosti

motoru:

$$M_{dm} = \frac{2\pi n_{max} J_m \cdot 10^{-4}}{60 t_{acc}} = \frac{2\pi \cdot 1800 \cdot 0,04 \cdot 10^{-4}}{60 \cdot 0,1} = 0,008 \quad [Nm] \quad (5.20)$$

Výpočet jednotlivých momentů v časových intervalech $t_1 - t_7$ při uvažování momentu setrvačnosti motoru:

$$M_{ct1} = -M_d - M_{dm} + M_{gz} = -0,015 - 0,008 + 0,023 = 0 \quad [Nm] \quad (5.21)$$

$$M_{ct2} = M_{gz} = 0,023 \quad [Nm] \quad (5.22)$$

$$M_{ct3} = M_d + M_{dm} + M_{gz} = 0,015 + 0,008 + 0,023 = 0,046 \quad [Nm] \quad (5.23)$$

$$M_{ct4} = -M_p + M_{gz} = -0,031 + 0,023 = -0,008 \quad [Nm] \quad (5.24)$$

$$M_{ct5} = M_{ct3} = 0,046 \quad [Nm] \quad (5.25)$$

$$M_{ct6} = M_{ct2} = 0,023 \quad [Nm] \quad (5.26)$$

$$M_{ct7} = M_{ct1} = 0 \quad [Nm] \quad (5.27)$$

Výpočet efektivního momentu systému (mechanická část + motor):⁵

$$M_{ef} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^7 M_{cti}^2 t_i}{\sum_{i=1}^8 t_i}} = 0,027 \quad [Nm] \quad (5.28)$$

Výpočet středních otáček motoru:⁶

$$n_{str} = \frac{\sum_{i=1}^7 |n_i| t_i}{\sum_{i=1}^8 t_i} = 720 \quad [min^{-1}] \quad (5.29)$$

Ověření motoru:

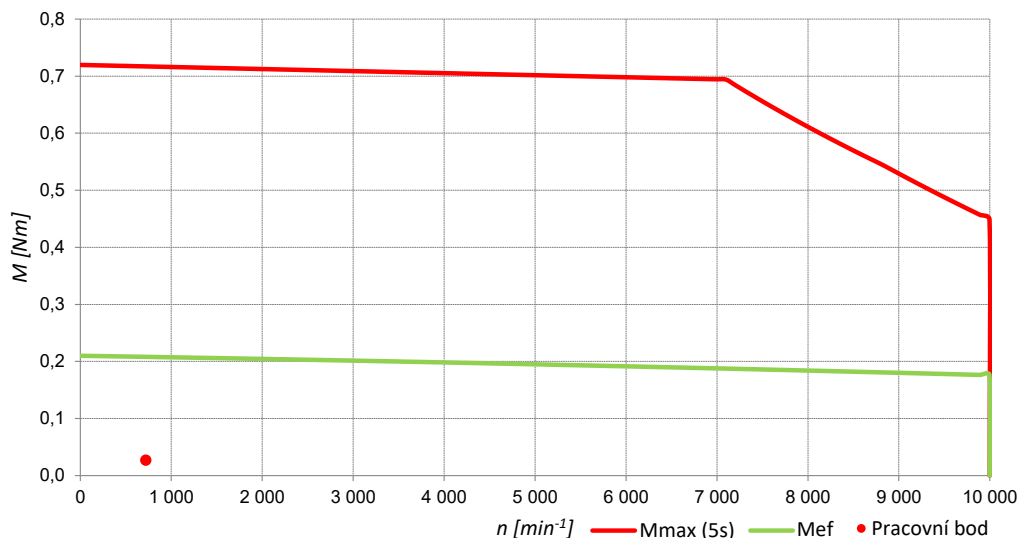
$$M_{ct1} < M_{max} \quad \text{splněno s rezervou} \quad (5.30)$$

⁵V čitateli zlomku není zahrnut člen $M_{ct8}^2 t_8$, jelikož je nulový.

⁶V čitateli zlomku není zahrnut člen $|n_8| t_8$, jelikož je nulový.

$$M_{ef} < M_n \quad \text{splněno s rezervou} \quad (5.31)$$

Momentová konstanta servomotoru je $k_t = 0,19 \text{ Nm/A}$ viz [6]. Požadovaný výstupní proud servoměniče je tedy $I_{ef} = 0,142 \text{ A}$. Na základě doporučení výrobce a uvedeného požadavku na proud je zvolen servoměnič LXM32AU45M2.⁷ Obr. (5.6) ukazuje momentovou charakteristiku kombinace zvoleného servopohonu.



Obrázek 5.6: Momentová charakteristika servopohonu LXM32AU45M2 + BSH040P (Vytvořeno pomocí [9])

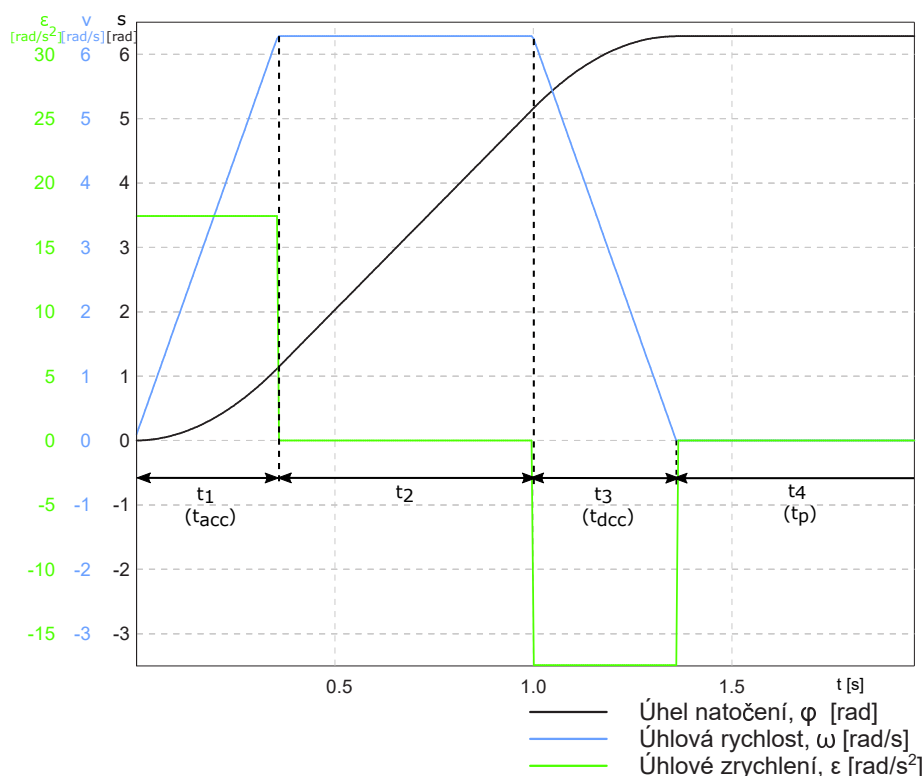
Ověření brzdného rezistoru - lze provést obdobně jako u výpočtu (5.15). Protože parametry n_{max} , J_m a J_{Reds} dosahují nižších hodnot než v případě osy X a je zvolen stejný servoměnič, lze s jistotou uvést, že energetická kapacita kondenzátorové baterie pojme veškerou brzdnou energii a interní brzdový rezistor bude v nečinnosti.

Volba a ověření enkodéru - požadavky jsou stejné jako v případě osy X, tedy volba enkodéru je prakticky identická. Rozdílem je pouze zvolení typové velikosti servomotoru BSH040P, u které výrobce umožňuje enkodér s nižším rozlišením, a to 16 sin/cos period signálu na otáčku. Přesný typ je SEL37. Rozlišení absolutní polohy je $\pm 0,08^\circ$, což je stejně jako v předchozím případě dostatečné.

5.3 Dimenzování servopohonu - natočení tělesa ovladače

Zadání pracovního cyklu pro dimenzování - výsledný pohyb záleží na vyhodnocení aktuální polohy tělesa ovladače. Pro dimenzování je stanoveno otočení o jednu otáčku. Maximální úhlová rychlost $\omega_{\text{max}} = 6,281 \text{ rad/s}$, úhlové zrychlení $\varepsilon = 17,45 \text{ rad/s}^2$. Na tento cyklus je vyhrazeno 5 sekund. Po správném umístění těla na trn následuje čekání na další cyklus. Pro případ dimenzování se jedná o pauzu 3,64 s. Lze vytvořit pracovní cyklus pro dimenzování, viz obr. (5.7). Je zřejmé, že maximální otáčky motoru (bez převodovky) jsou $n_{\text{max}} = 60 \text{ min}^{-1}$.

⁷Jedná se o stejný typ servoměniče jako v předchozím případě osy X.



Obrázek 5.7: Pracovní cyklus natočení tělesa ovladače (veličiny φ , ω , ε) - PKKO

Zadání mechanické části - moment setrvačnosti mechanické soustavy $J_s = 3,2 \text{ kgcm}^2$. Třecí moment, který se vyskytuje v mechanické soustavě, není definován. Pro následující výpočty byl orientačně odhadnut na $M_{tr} = 0,1 \text{ Nm}$.

Vzhledem k zadanému momentu setrvačnosti mech. soustavy a relativně pomalém pracovním cyklu je výhodné zvolit převodovku s převodem do pomala. Při převodu $i = 8$ vycházejí maximální otáčky motoru n_{pmax} a moment setrvačnosti mech. soustavy redukováný na hřídel motoru J_{Reds} následovně:

$$n_{pmax} = n_{max} \cdot i = 60 \cdot 8 = 480 \quad [\text{min}^{-1}] \quad (5.32)$$

$$J_{Reds} = \frac{J_s}{i^2} = \frac{3,2}{8^2} = 0,05 \quad [\text{kgcm}^2] \quad (5.33)$$

Dále je nezbytné zahrnout do výpočtu i samotný moment setrvačnosti převodovky. Při zvolení převodovky GBX040008K (Schneider Electric) s momentem setrvačnosti $0,019 \text{ kgcm}^2$ viz [7] je výsledný moment setrvačnosti zátěže $J_z = 0,069 \text{ kgcm}^2$. S ohledem na moment setrvačnosti je zvolen motor typu BSH0401P (Schneider Electric) s momentem setrvačnosti $J_m = 0,023 \text{ kgcm}^2$, jmenovitým momentem $M_n = 0,19 \text{ Nm}$ při jmenovitých otáčkách $n_N = 4000 \text{ min}^{-1}$ a maximálním momentem $M_{max} = 0,75 \text{ Nm}$. Parametry respektují napájecí napětí 230V , viz [6].

Rovnice (5.34) vyjadřuje poměr momentů setrvačností zátěže a zvoleného servomotoru.

$$\frac{J_z}{J_m} = \frac{0,069}{0,023} = 2.97 \quad \text{akceptovatelné} \quad (5.34)$$

Celkový maximální dynamický moment při uvažování motoru a převodovky:

$$\begin{aligned} M_{ct1} &= \frac{2\pi n_{max} (J_z + J_m) \cdot 10^{-4}}{60t_{acc}} + \frac{M_{tr}}{i} = \\ &= \frac{2\pi \cdot 480 \cdot (0,069 + 0,023) \cdot 10^{-4}}{60 \cdot 0,36} + \left(\frac{0,1}{8}\right) = 0,013 \quad [Nm] \end{aligned} \quad (5.35)$$

Nyní by mělo následovat dopočítání ostatních intervalů, výpočet efektivního momentu a ověření motoru. Jelikož je jmenovitý moment motoru 0,19 Nm, je zřejmé, že motor požadavkům vyhovuje s velkou rezervou a není tedy nezbytné zde uvádět jednotlivé výpočty. Zvolený pohon je nejmenší možný z produktového portfolia Schneider Electric, což je výhodné, jak z pohledu zástavby, tak z pohledu ceny, a to i při uvažování převodovky. Návrh byl proveden primárně s ohledem na moment setrvačnosti mechanické soustavy.

Jak již bylo uvedeno v předchozím případě, pro tento zvolený servomotor je vhodný servo-měnič LXM32AU45M2 a momentová charakteristika servopohonu je taktéž na obr. (5.6).

Ověření brzdného rezistoru - by bylo obdobné jako u výpočtu (5.15). Lze ovšem také s jistotou říci, že energetická kapacita kondenzátorové baterie pojme veškerou brzdou energii.

Volba a ověření enkodéru - typ enkodéru, jeho přesnost a rozlišení pro servomotor typové velikosti BSH0401P jsou již uvedeny u osy Z manipulátoru. Jak bude dále uvedeno, aplikace nevyžaduje pro polohování znalost absolutní víceotáčkové polohy, je tedy možné použít jednootáčkový enkodér. Jedná se tedy o typ SEK37.

5.4 Dimenzování servopohonu - kontrola funkce

Zadání pro dimenzování - je požadováno zabezpečení kontroly, zda síla při zapnutí hřibového ovladače nepřekročí hodnotu $F = 100 \text{ N} \pm 2 \text{ N}$. Kontrola síly, resp. kroutícího momentu, je realizována lineární osou s kuličkovým šroubem, viz obr. (5.1c), stoupání šroubu je $h = 20 \text{ mm}$, hmotnost uchopovací části ovladače je $m_z = 5 \text{ kg}$. Směr působící síly je v kladném směru osy Z. Tření v tomto případě působí pouze v matici kuličkového šroubu a je možné ho zanedbat. Žádaná síla v ose šroubu je tedy rovna $F_c = 149,05 \text{ N} \pm 2 \text{ N}$. Dále osa slouží k polohování uchopovacího a měřicího systému, ovšem jedná se o relativně pomalý pohyb. Vzniklé dynamické momenty lze při dimenzování taktéž zanedbat. Jejich výpočet by prakticky vypadal podobně jako v případě osy Z manipulátoru.

Výpočet žádaného momentu:

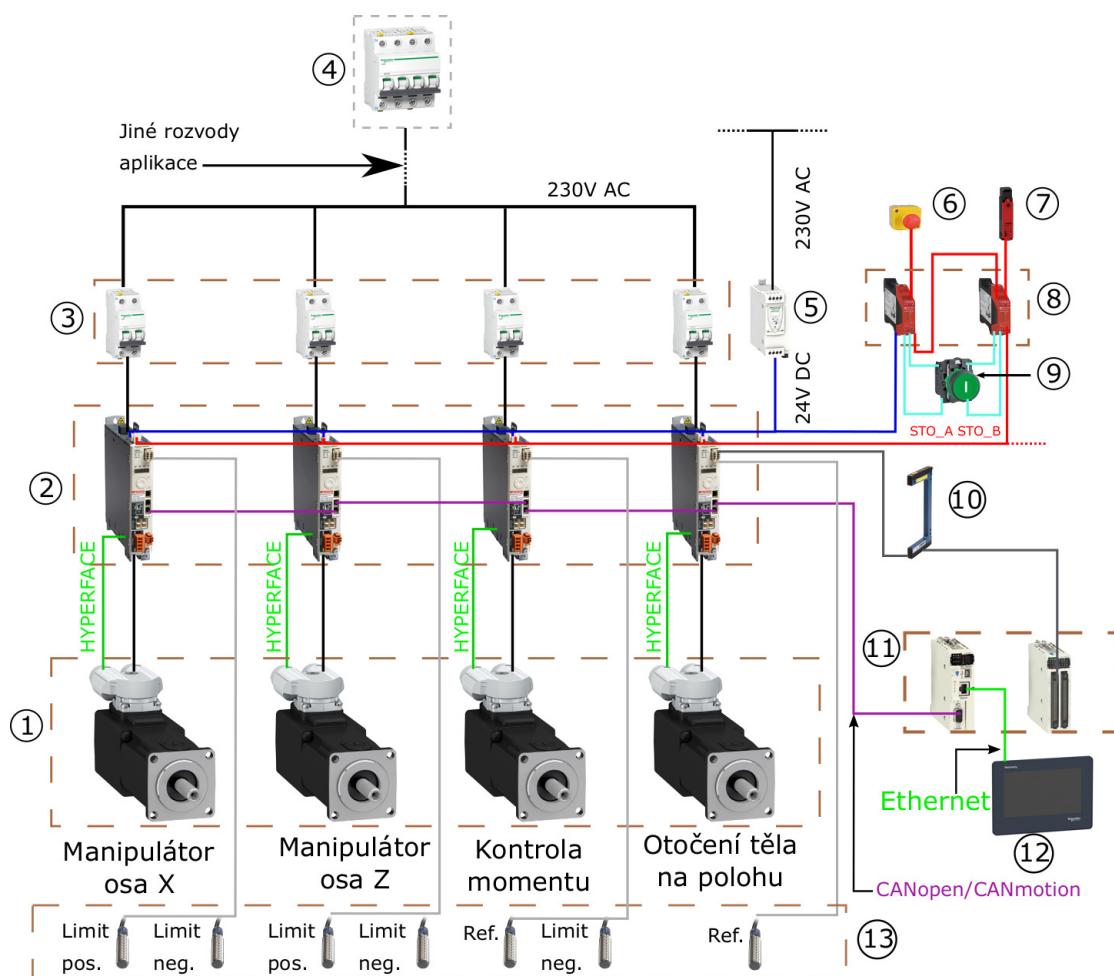
$$M_p = \frac{F_c \cdot h}{2\pi} \cdot 10^{-3} = \frac{149,05 \cdot 5}{2\pi} \cdot 10^{-3} = 0,474 \quad [Nm] \quad (5.36)$$

Zvolen je motor typové velikosti BSH552M s relativně vyšší momentovou konstantou. Tento typ je vhodný pro práci v režimu řízení momentu při nižších otáčkách. Hodnota klidového momentu motoru je $M_o = 0,8 \text{ Nm}$. Momentová konstanta motoru je $k_t = 1,33 \text{ Nm/A}$ viz [6].

Požadovaný výstupní proud servoměniče pro vytvoření žádané síly je tedy 0,336 A. Zvolen je opět servoměnič LXM32AU45M2. S tímto servopohonem je možné dosáhnout nastavení žádané hodnoty momentu s rozlišením 0,1 % z M_o , tzn. rozlišení žádané síly 0,25 N, což je vzhledem k toleranci ± 2 N dostačující.

5.5 Stručný popis zapojení a funkce

Základní zobrazení hardwarové konfigurace popisovaných servopohonů je na obr. (5.8). Dále je uveden stručný popis funkčnosti a zapojení sestavy. V popisu jsou zahrnuty pouze ty části, které jsou v přímé návaznosti na servopohonny. Kompletní popis zapojení překračuje rozsah této práce.



Obrázek 5.8: Aplikace PKKO - Hardwarová konfigurace

Význam jednotlivých bloků na obr. (5.8) - č. 1 - skupina servopohonů, č. 2 - skupina servoměničů, č. 3 - jističní servoměničů, č. 4 - hlavní jistič stroje, č. 5 - spínaný napájecí zdroj 230 V AC/24 V DC, č. 6 - hříbové tlačítko nouzového zastavení, č. 7 - bezpečnostní spínače servisních krytů, č. 8 - bezpečnostní moduly, č. 9 - tlačítko reset, č. 10 - laserové čidlo, č. 11 - nadřazené řízení aplikace PAC systém, č. 12 - operátorský panel HMI, č. 13 - skupina referenčních a koncových indukčních spínačů.

5.5.1 Popis silového zapojení

Servoměniče a servomotory jsou již probrány u dimenzování jednotlivých os. Vzhledem k typu aplikace a nulovému přebytku brzděné energie je zřejmé, že propojení stejnosměrných obvodů nemá význam. Jelikož je zařízení umístěno ve výrobním závodě, který je k síti připojený přes vyhrazený transformátor, a jednotlivé motorové kabely nejsou delší než 5 metrů, není zapotřebí instalovat externí EMC filtr. Interní EMC filtr je vyhovující. Jsou splněny požadavky norem ČSN EN 61800-3 (druhé prostředí kategorie C3) a ČSN EN 55011 (třída A) viz [3] a také [1].

V místě instalace zařízení se nepoužívají systémy pro kompenzaci jalového výkonu a zároveň se v připojené síti nevyskytují zařízení, na které by mohlo mít vliv zkreslení napětí způsobené servoměniči. Zkratový proud v místě připojení nepřesahuje parametr SCCR servoměničů (12kA) a zároveň se v síti nevyskytuje rušení ani přepětí, které by mohlo mít negativní účinek na servoměniče. Z kapitol o dimenzování je dále zřejmé, že jmenovitý výkon servoměniče je dostačující. Z uvedených důvodů použití síťové tlumivky není vyžadováno.

Servoměniče poskytují ochranu proti zkratu a přetížení pro motor. Dále je potřeba zajistit ochranu napájení servoměničů, ta je tvořena skupinou jističů, viz obr. (5.8) blok č. 3.

5.5.2 Popis zapojení řídicí části

Nadřazený řídicí systém je tvořen kontrolérem Modicon M340 s procesorem zprostředkávajícím komunikaci CANopen/CANmotion pro řízení servoměničů a Ethernet pro operátorský panel. K procesoru jsou přiřazeny moduly digitálních vstupů, do kterých je připojen například výstup z laserového čidla pro monitorování správného založení tělesa tlačítka do stroje.

U všech os je pro odblokování výkonového můstku využit funkční blok *MC_Power*. Dále je u všech os pro resetování poruch, které je možné provést prostřednictvím komunikace, využit funkční blok *MC_Reset*. Jsou také využity některé informační funkční bloky, například *MC_ReadAxisError* - čtení poruch jednotlivých os, *MC_ReadDigitalInput* - čtení stavů digitálních vstupů servoměniče, *MC_ReadActualTorque* - čtení aktuální polohy dané osy apod. Dále jsou popsány základní principy funkčnosti diskutovaných částí stroje.

Otočení těla - před zahájením pohybu je provedena kontrola, zda je těleso tlačítka umístěno ve stroji (na trnu) v tolerančním pásmu, tzn. vidlicový laserový snímač není zastíněn hranou výřezu a jeho polovodičový spínací výstup je v log. 0. Pokud je tato podmínka⁸ splněna, řídicí systémem zadá povel pro spuštění operace na tomto stanovišti. Následně se provede uchopení tělesa tlačítka pneumatickým uchopovačem a poté je nadřazeným řídicím systémem spuštěn pracovní režim řízení rychlosti pomocí funkčního bloku *MC_MoveVelocity*. Servoměnič dále využívá funkci RMAC „Relative Movement After Capture“, která umožňuje vykonat přerušení pohybu signálem na rychlém vstupu servoměniče a pokračovat relativním polohováním. Signál pro rychlý vstup poskytuje vidlicový laserový snímač, jehož polovodičový spínací výstup pře-

⁸Nejedná se o jedinou podmínku spuštění, další je například zavření servisních krytů.

jde do log. 1 při zastínění paprsku hranou výřezu tělesa tlačítka. Žádaná hodnota relativního polohování *RMAC* je nastavena na 0, tedy těleso tlačítka je natočeno tak, že hrana výřezu odpovídá poloze zachycení změny stavu výstupu laserového snímače. Poté je těleso tlačítka opět ustanoveno zpět. Nakonec dochází k natočení zpět na referenční polohu pomocí funkčního bloku *Home_LXM32*. Referenční, resp. výchozí poloha je dána indukčním čidlem.

Manipulátor osa X a Z - obě osy pracují v pracovním režimu polohování. Poloha je zadávána absolutně pomocí funkčního bloku *MC_MoveAbsolute*. Pro absolutní polohování je nutné mít definovanou nulovou polohu enkodéru. Ta je definována při uvádění stroje do provozu a je zapsána jako offset do EEPROM enkodéru servomotoru. Taktéž lze pro určení nulové polohy enkodéru využít najetí na pozitivní limitní spínač pomocí funkčního bloku *Home_LXM32*. Tím je umožněno dále pracovat pouze s absolutní polohou. U manipulátoru osy Z v čase t_4 při zapůsobení externí síly regulátory servoměniče zareagují zvýšením proudu, a tím zajistí udržení žádané polohy. Lineární osy X a Z jsou osazeny dvěma indukčními čidly, které zajišťují zjištění nájezdu do koncové polohy lineární osy. V případě aktivace výstupu jednoho ze snímačů přejde měnič do poruchy a aktivuje se rychlé zastavení. Dále je povolen pouze pohyb v opačném směru, než předcházel tomuto stavu. Za normálního provozu by tento stav neměl nastat.

Kontrola funkce - servopohon pracuje v režimu řízení momentu. Požadovaný moment je zadáván pomocí funkčního bloku *MC_torquecontrol*. Při působení nastavené síly by mělo dojít k sepnutí tlačítka. Sepnutí je monitorováno kontrolérem prostřednictvím čidla. Pokud je tlačítko sepnuto, je aktivován funkční blok *MC_Halt*, který zastaví působení momentu. Následně je tlačítko uvolněno z uchopovače a poté pomocí funkčního bloku *MC_home* je najeto servopohonem zpět na výchozí polohu, která je definována referenčním indukčním čidlem. V případě, že by nedošlo k sepnutí tlačítka, nadřazený systém toto tlačítko automaticky vyřadí jako jalový kus.

Zabezpečení nebezpečného pracovního prostoru provozu stroje - Na základě provedené analýzy a následného posouzení rizik dle normy ČSN EN ISO 13849 - 1 je požadovaná úroveň vlastností $Pl_r = e$. Pro dosažení této úrovně vlastností je nutné zvolit zapojení bezpečnostních prvků kategorie 4 a kategorii zastavení 0.

Funkce nouzového zastavení je řešena pomocí dvoukanálově zapojeného hřibového tlačítka a bezpečnostního modulu (dále jen modulu), jehož reléové bezpečnostní výstupy jsou zapojené do série s bezpečnostními výstupy modulu pro monitorování bezpečnostních spínačů. Tyto spínače slouží pro monitorování a blokování servisních krytů. Certifikované bezpečnostní vstupy servoměničů *STO_A* a *STO_B* jsou napájené prostřednictvím výše uvedených sériově zapojených modulů, viz obr. (5.8).

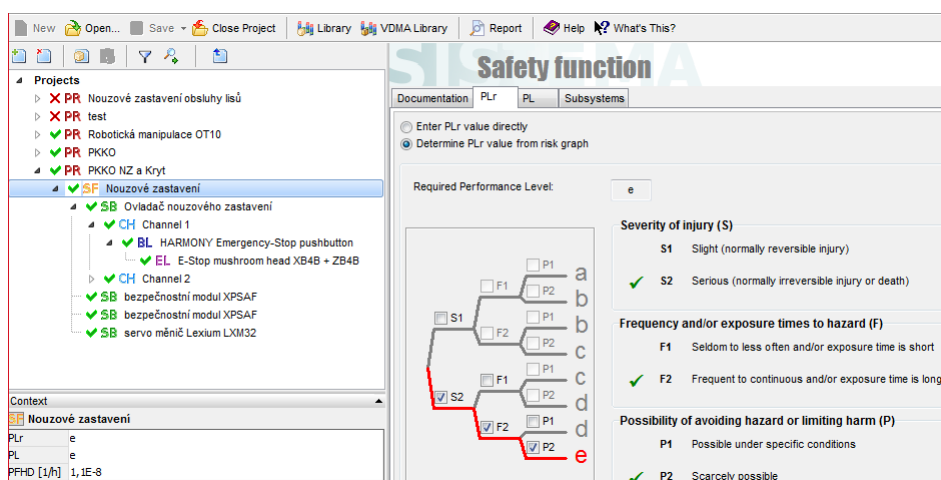
Bezpečnostní spínače servisních krytů jsou v provozním stavu stroje blokovány. Otevření lze provést pouze na základě napájení cívkou spínačů a splnění řady podmínek pro bezpečné otevření krytů.

V případě, že dojde k aktivaci bezpečnostní funkce nouzového zastavení, nebo je povolen vstup prostřednictvím servisních krytů do nebezpečné zóny stroje, je aktivována funkce bezpečného vypnutí točivého momentu. Bezpečnostní vstupy *STO_A* a *STO_B* jsou v tomto

případě bez potenciálu. Servoměniče přejdou do poruchy definované jako porucha třídy 3, což způsobí okamžité zablokování výkonového můstku. Stejnoseměrný meziobvod, resp. kondenzátorová baterie, je stále napájena a nedochází tak k jejímu vybíjení. Řídicí část servoměničů zůstává taktéž napájena.

Pro obnovení činnosti výkonového můstku je nutné provést reset poruchy např. prostřednictvím komunikace a dále reset modulů, pomocí tlačítka zapojeného ve zpětné vazbě modulů, viz obr. (5.8).

Na základě výpočtu provedeného v SW SISTEMA je dosaženo úrovně vlastností $PL = e$ (e), čímž je splněn požadavek na zabezpečení bezpečného provozu stroje, viz obr. (5.9).



Obrázek 5.9: Ukázka výsledku dosažené úrovně vlastností v SW SISTEMA

Závěr

Cílem této práce bylo popsání vybraných statí z problematiky elektrických servopohonů a jejich použití při návrhu konkrétních aplikací.

V úvodní části jsou stručně vysvětleny základy dané problematiky spolu s uvedenými oblastmi jejich průmyslového použití. Hlavní pozornost je věnována servopohonům s PMSM servomotorem, které jsou v současné době v praxi nejvíce využívány. Uvedeny jsou jejich výhody, nevýhody a omezující vlivy na výslednou momentovou charakteristiku servopohonu, jež je potřeba vzít v úvahu při vytváření návrhu pro danou aplikaci. Dále je popsán základní princip vektorového řízení se zmínkou o metodě nepřímého odbuzování.

V následující části se práce věnuje silové struktuře servopohonu. Stručně je řešen usměrňovač a výstupní můstek. Poněkud podrobněji je vysvětlena problematika brzděného rezistoru, resp. brzděné jednotky, protože k vytvoření správného návrhu je nezbytné tomu věnovat pozornost. Dále je probrána elektromagnetická kompatibilita, resp. nízkofrekvenční a vysokofrekvenční rušení a způsob jejich eliminace. S tím je spojeno použití dodatečných prostředků pro zmírnění těchto vlivů. Jedná se především o použití EMC filtru a síťové tlumivky.

Následuje kapitola o řídicí části servopohonu. Pozornost je nejprve věnována zejména regulační struktuře, jelikož se jedná o jednu z nejdůležitějších částí řídicí části servopohonu. Po obecném úvodu do problematiky následuje podrobnější rozbor konkrétní regulační struktury servoměniče Lexium 32 společnosti Schneider Electric, na nějž navazuje praktická ukázka manuálního nastavení regulačních konstant jednotlivých regulátorů regulační struktury. Následně se práce zaměřuje na zařízení poskytující informaci o aktuální poloze a otáčkách servomotoru, tj. na nejčastěji používané enkodéry. Mimo tato dvě hlavní témata jsou stručně popsány ochrany servopohonů, logické vstupy a výstupy, pulzní vstupy PTI a výstupy PTO, bezpečnostní logické vstupy a funkce atd.

Čtvrtá část se věnuje významným výrobcům servopohonů a popisem jejich produktových řad. Nejpodrobněji jsou rozebrány nejvíce používané řady společnosti Schneider Electric, tzn. servoměniče Lexium 32, servomotory BSH/BMH a kompaktní servopohony Lexium 32i.

Poslední část se zabývá popisem vybraných částí jednoúčelového stroje pro kompletaci tlačítek nouzového zastavení. Jsou uvedeny výpočty a ověření klíčových parametrů, dle kterých je možné zvolit adekvátní typ servopohonu. Jedná se především o maximální dynamický a efektivní moment, poměr setrvačností zátěže a motoru a maximální a střední otáčky servomotoru. U každého návrhu je uveden rovněž typ enkodéru a zdůvodnění jeho použití. Na závěr je zmíněn stručný rozbor společné hardwarové konfigurace všech čtyř servopohonů. Krátce je také popsáno jejich silové zapojení. Dále se práce věnuje zapojení řídicí části a pro jednotlivé servopohony je uveden stručný princip funkce.

Poskytuje čtenáři základní přehled v oblasti moderních servopohonů. Pokud by měla být práce dále rozšířena, je možné se detailněji zaměřit například na složitější aplikace se synchro-

nizovaným řízením v reálném čase, s čímž souvisí i hlubší rozbor nadřazeného řízení.

Literatura

- [1] SCHNEIDER ELECTRIC - LEXIUM32 . *LXM32M Servo Drive, User Guide* [online]. [cit. 15. 4. 2019]. Dostupné z: <https://www.se.com>.
- [2] SCHNEIDER ELECTRIC - LEXIUM32. *LXM32M Common DC bus Application note* [online]. [cit. 20. 4. 2019]. Dostupné z: <https://www.se.com>.
- [3] SCHNEIDER ELECTRIC - LEXIUM32. *Lexium 32 motion control, Catalogue* [online]. [cit. 3. 1. 2020]. Dostupné z: <https://www.se.com>.
- [4] SCHNEIDER ELECTRIC - LEXIUM32. *LXM32M CANopen Module, Fieldbus manual* [online]. [cit. 22. 5. 2020]. Dostupné z: <https://www.se.com>.
- [5] SCHNEIDER ELECTRIC - BMH. *BMH -Servo motor-Motor manual* [online]. [cit. 1. 2. 2020]. Dostupné z: <https://www.se.com>.
- [6] SCHNEIDER ELECTRIC - BSH. *BSH Servo motor, Motor manual* [online]. [cit. 20. 2. 2020]. Dostupné z: <https://www.se.com>.
- [7] SCHNEIDER ELECTRIC - GBX AND GBY. *GBX and GBY Planetary gearboxes, Catalogue* [online]. [cit. 3. 1. 2020]. Dostupné z: <https://www.se.com>.
- [8] SCHNEIDER ELECTRIC - LEXIUM32i. *LXM32i Integrated servo drive, Catalogue* [online]. [cit. 18. 5. 2020]. Dostupné z: <https://www.se.com>.
- [9] SCHNEIDER ELECTRIC - LEXIUM - TORQUE SPEED CURVES - V 2. 15 *Excelovský soubor pro zobrazení momentových charakteristik servopohonů Schneider Electric* Dostupné na vyžádání: <https://www.se.com>.
- [10] SCHNEIDER ELECTRIC - WHITE PAPER. *Understanding Inertia Ratio in Synchronous Motor Control* [online]. [cit. 9.1.2020]. Dostupné z: https://www.se.com/ww/en/download/document/998-2095-07-08-12AR0_EN/.
- [11] ABB - MOTIFLEX E180. *MotiFlex e180 Common DC systems* [online]. [cit. 21.2.2020]. Dostupné z: <http://abbmotion.com/support/supportme/ProductSupport.asp?ID=MTE180>.
- [12] SICK - SKS/SKM36. *SKS/SKM36 Motor feedback systems rotary HIPERFACE® - Product information* [online]. [cit. 24. 4. 2020]. Dostupné z: <https://www.sick.com/>.
- [13] SICK - HIPERFACE. *Specification Hiperface® Motor feedback protocol - Operating instructions* [online]. [cit. 24. 4. 2020]. Dostupné z: <https://www.sick.com/>.

- [14] Brož, V., *Snímače stejnosměrných motorů do 400 W* [online]. [cit. 26.11.2019]. Dostupné z: https://www.uzimex.cz/soubory/20080311_te_2008-04.pdf.
- [15] NIDEC *An Engineering Guide to Position and Speed Feedback Devices for variable speed drives and servos* [online]. [cit. 27.11.2019]. Dostupné z: <https://www.nidec-netherlands.nl/media/2927-an-engineering-guide-to-position-and-speed-feedback-devices-for-variable-speed-drives-and-servos-iss2x-0704-0010-02x.pdf>.
- [16] DYNAPAR - INDUSTRY WHITE PAPERS *Resolvers 101: Understanding the Basics* [online]. [cit. 27. 11. 2019]. Dostupné z: https://info.dynapar.com/wp-social-resolvers-101?_ga=2.184985322.270674432.1574875325-100688325.1574785323.
- [17] TELEMECANIQUE *Opto-electronic rotary encoders OsiSense XCC, Catalogue* [online]. [cit. 2. 10. 2019]. Dostupné z: <http://www.tesensors.com/cz/cs/document/DIA4ED2160312EN/>.
- [18] Burke, J., Moynihan F., Unterkofler K., *EXTRACTION OF HIGH RESOLUTION POSITION INFORMATION FROM SINUSOIDAL ENCODERS* [online]. [cit. 24. 4. 2020]. Dostupné z: https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/technical-articles/452913422000_sin_encoder.pdf.
- [19] 2019 IEEE 8th Joint International Information Technology and Artificial Intelligence Conference (ITAIC) *Research on Servo Control System of Embedded AC Permanent Magnet Synchronous Motor* [online]. [cit. 16. 3. 2020]. Dostupné z: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8785808>.
- [20] Skalický, J., *Elektrické servopohony.*, BRNO: Vydavatelství VUT, 2001. ISBN 80-214-1978-4.
- [21] Koberle, P., PAVELKA, J., *Elektrické pohony a jejich řízení.* 3. přepracované vydání. Praha: nakladatelství ČVUT, 2016. ISBN 978-80-01-06007-0.
- [22] Pavelka, J., Čerovský, Z., Javůrek, J., *Elektrické pohony.* Praha: Vydavatelství ČVUT, 2001.
- [23] Černohorský, J. *Momentové řízení jako součást regulačních struktur moderních elektrických pohonů a jeho aplikace.*, Liberec, 2015 Habilitační práce, Technická univerzita v Liberci. Fakulta mechatroniky, informatiky a mezioborových studií. 2015
- [24] Klán, P., *Metody zlepšení PI regulace* [online]. [cit. 15. 4. 2020]. Dostupné z: https://valter.by1.cz/sites/default/files/soubory/metody_pi.pdf.
- [25] Piskač, L., *Elektrotechnika průmyslových robotů a manipulátorů.* Plzeň: ZČU - Plzeň, 1993. ISBN 80-7082-104-3.

- [26] Pittermann, M., *Přehled měničů pro elektrické pohony*. Plzeň: ZČU - Plzeň, 2015. ISBN 978-80-261-0598-5.
- [27] Pittermann, M., *Elektrické pohony základy*. Plzeň: ZČU - Plzeň, 2018. ISBN 978-80-7043-729-2.
- [28] Vaculíková, P., *Elektromagnetická kompatibilita elektrotechnických systémů*. Praha: nakladatelství BEN - technická literatura, 2015. ISBN 978-80-7300-476-7.
- [29] Kůs, V., Skála, J., Hammerbauer J., *Elektromagnetická kompatibilita výkonových elektronických systémů*. Praha: nakladatelství BEN - technická literatura, 2015. ISBN 978-80-7300-476-7.
- [30] Wurst, D., Kořínek, P., *EMC: Omezení harmonických proudů a vysokofrekvenčního rušení in DPS - odborný časopis* [online]. [cit.15. 3. 2019]. Dostupné z: <https://www.dps-az.cz/vyvoj/id:7703/emc-omezeni-harmonickych-proudu-a-vysokofrekvencniho-ruseni>.
- [31] Kůs V., *Nízko frekvenční rušení*. Plzeň: ZČU - Plzeň, 2003. ISBN 80-7082-976-1.
- [32] Novák, J., *Frekvenčně řízené elektrické pohony a jejich elektromagnetická kompatibilita in časopis z vydavatelství FCC PUBLIC* [online]. [cit. 15. 3. 2019]. Dostupné z: <http://www.odbornecasopisy.cz/elektro/casopis/tema/frekvencne-rizene-elektricke-pohony-a-jejich-elektromagneticka-kompatibilita--13558>.
- [33] RAJCHMAN, Zbyněk. Vektorové řízení synchronního stroje [online]. Brno, 2009 [cit. 16. 3. 2020]. Dostupné z: <http://hdl.handle.net/11012/11272>. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně. Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií. Ústav výkonové elektrotechniky a elektroniky.
- [34] ČSN EN 61800-3 ED.2, *Systémy elektrických výkonových pohonů s nastavitelnou rychlostí - Část 3: Požadavky EMC a specifické zkušební metody*. Praha: Český normalizační institut, 2005.
- [35] ČSN EN 55011, *Průmyslová, vědecká a zdravotnická zařízení – Charakteristiky vysokofrekvenčního rušení – Meze a metody měření*. Praha: Český normalizační institut, 2017.
- [36] ČSN EN 60034-1 ED.2, *Točivé elektrické stroje – Část 1: Jmenovité údaje a vlastnosti*. Praha: Český normalizační institut, 2011.
- [37] ČSN EN 61800-5-2 ED.2, *Systémy elektrických výkonových pohonů s nastavitelnou rychlostí – Část 5-2: Bezpečnostní požadavky – Funkční* Praha: Český normalizační institut, 2018.
- [38] ČSN EN 60204-1 ED.2, *Bezpečnost strojních zařízení - Elektrická zařízení strojů - Část 1: Všeobecné požadavky*. Praha: Český normalizační institut, 2007.
- [39] ČSN EN ISO 13849-1, *Bezpečnost strojních zařízení – Bezpečnostní části ovládacích systémů – Část 1: Obecné zásady pro konstrukci*. Praha: Český normalizační institut, 2017.