



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV MECHANIKY TĚLES, MECHATRONIKY A BIOMECHANIKY

INSTITUTE OF SOLID MECHANICS, MECHATRONICS AND BIOMECHANICS

ROBOTICKÝ STOLNÍ FOTBAL - ŘÍZENÍ HERNÍCH OS

ROBOTIC TABLE FOOTBALL - CONTROL OF GAME AXES

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Ondřej Sláma

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Roman Parák

BRNO 2018

Zadání bakalářské práce

Ústav: Ústav mechaniky těles, mechatroniky a biomechaniky
Student: **Ondřej Sláma**
Studijní program: Aplikované vědy v inženýrství
Studijní obor: Mechatronika
Vedoucí práce: **Ing. Roman Parák**
Akademický rok: 2017/18

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

Robotický stolní fotbal – řízení herních os

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Práce bude věnována problematice robotického stolního fotbalu, konkrétně řízení pohonů automatizovaných os. Součástí práce bude stručná rešerše v oblasti zpracovávaného úkolu, následovat bude implementace na zařízení.

Práce je realizována ve spolupráci s firmou B+R Automatizace s r.o.

Cíle bakalářské práce:

- Seznamte se s aktuálním stavem řešení robotického stolního fotbalu.
- Seznamte se s řídicími prostředky společnosti B&R Automation.
- Proveďte stručnou rešerši v oblasti řízení pohonů.
- Vytvořte softwarový modul pro řízení os stolního fotbalu.
- Diskutujte potřebné modifikace dynamiky pohybů herních os.
- Vytvořte softwarový modul zajišťující optimalizaci dynamiky pohybů herních os.

Seznam doporučené literatury:

MAREČEK, P.: Robotický stolní fotbal. VUT FSI, Brno, 2016

JEDINÝ, L.: Robotický stolní fotbal. VUT FSI, Brno, 2016

PARÁK, R.: Robotický stolní fotbal - herní strategie. VUT FSI, Brno, 2017

OTRADOVSKÝ, R.: Robotický stolní fotbal - detekce polohy protihráče. VUT FSI, Brno, 2017

BUBENÍK, L.: Model robotického stolního fotbalu. VUT FEKT, Brno, 2017

MAŇAS, M.: Teorie her a její aplikace, SNTL, Praha, 1991

B&R Automation, <http://www.br-automation.com/cs/>, přístup 17. října 2017

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2017/18

V Brně, dne

L. S.

prof. Ing. Jindřich Petruška, CSc.
ředitel ústavu

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

ABSTRAKT

Cílem této bakalářské práce je navázání na řešení robotického stolního fotbalu od společnosti B&R Automation z minulých let a zdokonalení stávajících problematických oblastí. Konkrétně se jedná o modularizaci softwarového řešení řízení os a následné dynamické optimalizace pohybu. V úvodní části práce jsou rozebrány již vyvinuté řešení, přiblížena firma B&R a stručně popsána problematika řízení elektrických pohonů. Prakticky je dále řešeno téma samotného řízení os spolu s návrhem dvou typů dynamické optimalizace. Práce byla rozšířena o návrh modulu pro detekci lidských os spolu se simulací a implementací navržených algoritmů filtrace signálu ve vývojovém prostředí MATLAB.

ABSTRACT

The purpose of this bachelor thesis is to build on top of already developed solution of B&R Automation's robotic table football and to improve existing problematic areas. Particularly aiming at modularization of the axis control software and subsequent dynamic motion optimization. In the introductory part of the thesis already developed solution are discussed as well as brief description of B&R company and research on the topic of electric drive control. Following chapters describe the implementation of axis control software along with the design of two types of dynamic optimization. The thesis was extended with design of module for human axis detection along with simulation and implementation of proposed signal filtering algorithms developed in the MATLAB development environment.

KLÍČOVÁ SLOVA

Robotický stolní fotbal, B&R Automatizace, řízení pohonů, dynamická optimalizace, detekce polohy.

KEYWORDS

Robotic table football, B&R Automation, drive control, dynamic optimization, position detection.

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

SLÁMA, O. Robotický stolní fotbal – řízení herních os. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2018. 72 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Roman Parák.

PODĚKOVÁNÍ

Děkuji tímto Ing. Romanovi Parákovi za cenné připomínky a rady, které mi poskytl při vypracování závěrečné práce. Zároveň bych chtěl poděkovat firmě B+R Automatizace, spol. s.r.o v Brně za poskytnuté prostory a hardwarové vybavení pro tvorbu bakalářské práce.

.....
Ondřej Sláma

ČESTNÉ PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že tato práce je mým původním dílem, zpracoval jsem ji samostatně pod vedením Ing. Romana Paráka a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou součástí bibliografických citací uvedených v seznamu literatury.

V Brně dne

.....

Ondřej Sláma

OBSAH

1	ÚVOD.....	15
2	SOUČASNÉ ŘEŠENÍ ROBOTICKÉHO STOLNÍHO FOTBALU	17
2.1	Diplomová práce Vojtěcha Myslivce ČVUT Praha	17
2.2	Ecole polytechnique fédérale de Lausanne.....	18
2.3	University of Freiburg	19
2.4	RSF od společnosti Pilz GmbH & Co. KG.....	20
2.5	The University of Akron.....	21
2.6	Birmingham Young University	22
3	B&R AUTOMATION	23
3.1	Automation Studio.....	25
3.2	Řídící prostředky společnosti B&R	26
3.2.1	Ethernet Powerlink	26
3.2.2	Řízení pohybu	27
3.2.3	I/O systémy	27
3.2.4	Průmyslové počítače	28
4	ŘÍZENÍ POHONŮ.....	29
4.1	Typ motoru	29
4.1.1	Stejnoseměrný motor	30
4.1.2	Asynchronní motor	30
4.1.3	Synchronní motor	31
4.1.4	Lineární motor	32
4.2	Frekvenční měnič.....	33
4.3	Řídící algoritmy	34
5	SOUČASNÝ STAV RSF	35
5.1	Konstrukční řešení	35
5.2	Pohony	36
5.3	Detekce	37
5.4	Software	38
5.5	Systém X20.....	39
5.6	Panel PC.....	39
5.7	Safety	40
6	SPOLUPRACUJÍCÍ PROJEKTY	41
7	NÁVRH MODULU PRO ŘÍZENÍ OS.....	43
7.1	Konfigurace AS	43
7.1.1	Hardwarová konfigurace.....	43
7.1.2	Konfigurace os motorů	44
7.1.3	Nastavení parametrů motorů.....	44
7.1.4	Konfigurace mapp Motion.....	45
7.2	Komunikace s Frameworkem	46
7.3	Struktura programu	47
7.4	Algoritmus modulu	48
7.4.1	Algoritmus inicializace	49
7.4.2	Algoritmus hledání referenční polohy	50
7.5	Safety	51
7.6	Modul pro pokyny ze strategie	52

7.6.1	Střela.....	52
7.6.2	Střela zezadu	52
7.6.3	Střela s přihrávkou	52
8	MODIFIKACE DYNAMIKY POHYBU	53
8.1	Struktura programu	53
8.2	Rychlostní regulace	54
8.3	Zpětnovazební regulace.....	56
8.4	Optimalizace sledování míče.....	57
8.5	Porovnání řešení	57
9	DETEKCE PROTIHRÁČE	59
9.1	Přepočet hodnot.....	59
9.2	Filtrace.....	60
9.2.1	Filtrace dolní propusti	60
9.2.2	S omezením časté změny	61
9.2.3	Bez omezení časté změny	62
10	ZÁVĚR.....	63
11	SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY	65
12	SEZNAM OBRÁZKŮ.....	69
14	SEZNAM PŘÍLOH	71

1 ÚVOD

Mechatronika, jako aktuálně rychle se rozvíjející technický obor zařazuje tři hlavní odvětví moderní doby. Uplatňuje základní heslo tohoto perspektivního oboru, mechatronika synergicky integruje části elektroniky, konstrukce a softwaru ve výsledek převyšující kvalitu pouhého součtu jednotlivých prvků. Příklad mechatronické soustavy ve formě robotického stolního fotbalu (dále jen RSF) kladoucí důraz na všechny aspekty moderní robotiky vznikl pod záštitou společnosti B&R Automation jako reprezentace a předvedení nových technologií v oblastech průmyslové automatizace.

Cílem této bakalářské práce bylo rozvinutí stávajícího řešení řízení počítačem ovládaných os a návrh dynamické optimalizace pohybu. Mimo jiné se práce zabývá také detekcí a filtrací dat polohy os protihráče. Vzhledem ke komplexnosti problematiky byla softwarová část RSF modularizována a přepracována na snadno upravitelnou verzi.

Úvod práce přibližuje již vyvinutá řešení RSF jinými institucemi. V kapitole je stručně shrnuto řešení stěžejních oblastí RSF s důrazem kladeným zejména na způsob řízení os, zajištění bezpečnosti a řešení detekce protihráče. Následuje představení samotné společnosti B&R Automation poskytující zázemí a finanční kapitál pro vývoj RSF spolu se shrnutím základního portfolia nabízených produktů. Předmětem další kapitoly je rešerše problematiky řízení elektrických pohonů s popisem nejpoužívanějších typů motorů a jejich regulace. Teoretickou část práce zakončuje stručný popis stavu RSF před započítím práce. Jsou zde přiblíženy řešení konstrukce, řízení os a detekce protihráče spolu se snímáním polohy míčku a detekci vstřeleného gólu. Praktická část se zabývá návrhem modulu pro řízení zaměřený především na efektivní komunikaci s řídicím modulem Frameworku a bezchybnou inicializaci všech herních os. V další kapitole je popsán návrh modulu pro dynamickou optimalizaci pohybu os využívající dva rozdílné druhy pro regulaci rychlosti a dosažení plynulejšího průběhu pohybu. Poslední kapitola pojednává o problematice detekce polohy os protihráče. Je zde přiblížen způsob přepočtu spolu s návrhem efektivní a rychle reagující filtrace za pomoci vývojového prostředí MATLAB.

2 SOUČASNÉ ŘEŠENÍ ROBOTICKÉHO STOLNÍHO FOTBALU

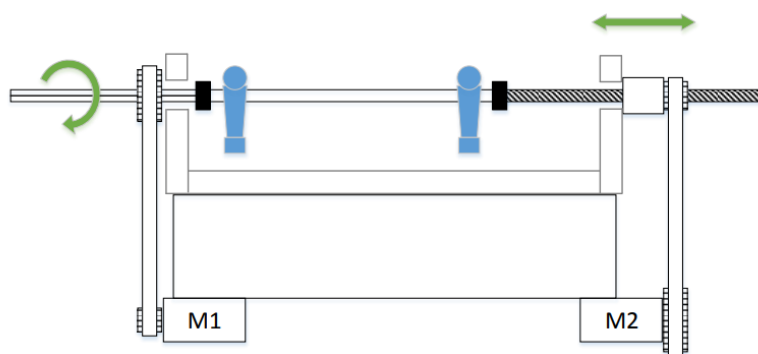
Problematika robotického stolního fotbalu (dále jen RSF) není stále příliš rozšířená, i tak ale proběhlo několik úspěšných projektů z různých částí světa. Většinu pozornosti výzkumu robotickému stolnímu fotbalu věnují zejména univerzity, kde na podobných problémech pracují především studenti formou bakalářských a diplomových prací. Vývoj robotického fotbalu ale vykazují i firmy, využívající atraktivní téma pro propagaci svých služeb/produktů.

Ne vždy je pod pojmem RSF vnímán tradiční stolní fotbal pro čtyři hráče s osmi herními osami ovládanými z určité části počítačem. V některých projektech může jít například pouze o pokus chytání člověkem vystřeleného míčku brankářem v naději zamezení gólu nebo o mírně zjednodušenou verzi fotbálku pouze se čtyřmi osami. V této kapitole budou shrnuty nejpovedenější práce a nejzajímavější řešení z této oblasti.

2.1 Diplomová práce Vojtěcha Myslivce ČVUT Praha

Cílem práce studenta z elektrotechnické fakulty ČVUT v Praze bylo navrhnout automatické řízení jedné osy stolního fotbalu. Celý projekt byl realizován s pomocí průmyslového řešení PLC¹ od firmy Siemens. Přenos dat mezi periferiemi a řídicím systémem byl zajištěn sítí Profinet. [1]

Princip ovládání a schématické umístění servomotorů je znázorněno na Obr. 1. Oba motory jsou uchyceny na stranách konstrukce stolu a spojeny s osou herní tyče přes řemeny nasazené na ozubených kolech. Pro lineární pohyb byla zvolena translace rotačního pohybu na lineární přes kuličkový šroub. Toto řešení zajistí poměrně přesný pohyb s nevýhodou omezené maximální axiální rychlosti. Z propagačních videí demonstrující chod osy byla také při rychlých pohybech patrná značná vibrace celé tyče.



Obr. 1: Schéma uspořádání servomotorů [1]

¹ Relativně kompaktní počítač s důrazem kladeným na co nejkratší dobu odezvy a zpracování instrukcí v reálném čase.

Kamera Cognex In-Sight 7402 umístěná nad herní plochou se snímkovací frekvencí 60 FPS² byla po zpracování obrazu schopná doručit informaci řídicí jednotce za dobu 25,5 ms. Program byl tedy schopný aktualizovat instrukce zasílané motorům 39krát za vteřinu. S těmito hodnotami byla výsledná reakce dostatečně rychlá pro zachycení míčku vystřeleného střední až vyšší rychlostí. Pro velice rychlé pohyby míčků (ve stolním fotbale poměrně časté) ale tato frekvence příkazů stále nedostačuje. [1][2]

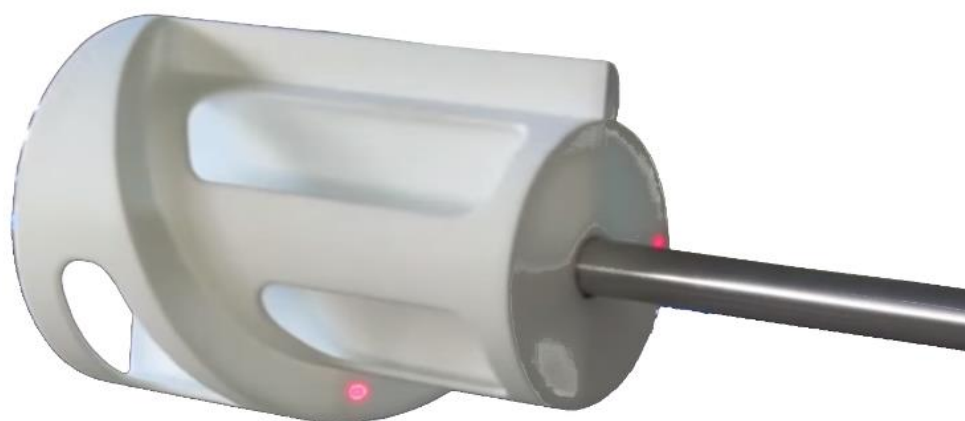
2.2 Ecole polytechnique fédérale de Lausanne

Švýcarskou univerzitou Ecole polytechnique fédérale de Lausanne vyvíjený RSF se díky neustálému vylepšování předcházejících generací dostal na absolutní špičku v dané problematice.

Z původních testů na jedné ose a snímání hrací plochy frekvencí 90 FPS se studenti ze švýcarské univerzity dostali na velice přesné a rychlé ovládání všech čtyřech os. Motory s výbornými dynamickými vlastnostmi dosahují zrychlení až 9g s přesností menší než 1 mm a se snímkovací frekvencí kamery v posledních verzích stolu přesáhla 300 FPS. Spolu s rychlým zpracováním obrazu dokáže tak stůl zachytit i velice rychlé pohyby míčku a reagovat na jakoukoli změnu trajektorie během okamžiku. [3][4]

V nejnovější verzi je kamera umístěna zespodu stolu, kde snímá hrací plochu skrz průhlednou desku. Díky tomu nedochází k blokování zorného pole figurkami a zpracování obrazu se tak urychluje.

Důležitý prvek pro další rozvoj strategie je i propracovaný způsob snímání polohy os protihráče. Princip je založen na měření dvou vzdáleností plastové šnekové násady (Obr. 2) od referenčních bodů přesnými laserovými snímači. Tímto způsobem je možné zjistit polohu i natočení osy s velmi rychlou odezvou.[4][5]

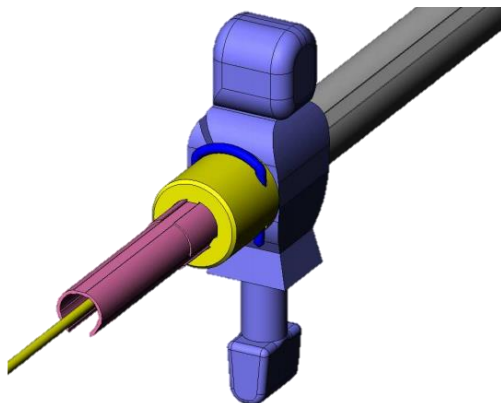


Obr. 2: Plastová šneková násada určená pro detekci polohy os protihráče. [5]

² „Frames Per Seond“ odpovídá počtu snímků za vteřinu a je obvykle udávána jako jednotka snímkovací frekvence.

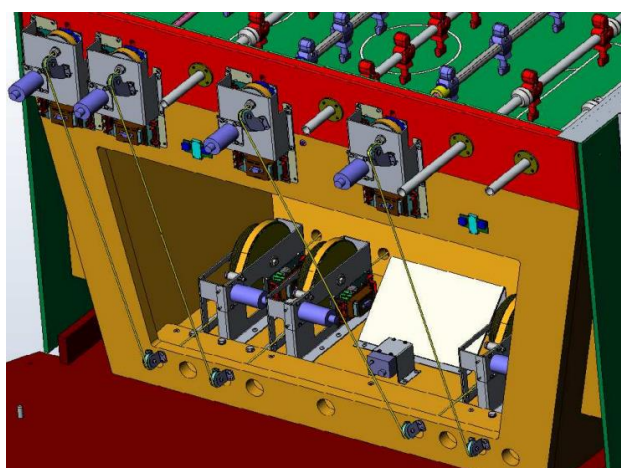
2.3 University of Freiburg

Jeden z prvních komerčně vyvíjených stolů vznikl ve spolupráci s firmou Gauselman AG na německé univerzitě Freiburg v roce 2005. RSF využívá zajímavého řešení ovládání herních os osmi rotačními servomotory značky Faulhaber. Tyče, ovládané počítačem se skládají ze dvou dutých hřídelí a jsou sestaveny tak, že rotace vnitřní se přenáší na vnější (Obr. 3). Vnější tyč je pak napojena na drát oboustranně namotaný na cívce ve spodní části stolu. Lineárního pohybu hráčů je docíleno rotací v jednom nebo druhém směru této cívky.



Obr. 3: Detail struktury počítačem ovládané tyče. [6]

Umístění infračervené kamery pro sledování herní plochy se zrcadlem nakloněným v úhlu odrazu na herní rovinu spolu s řídicími jednotkami je znázorněn na Obr. 4. Z vrchní části je herní pole nasvícováno infračervenými LED diodami. Výsledný obraz je pak neovlivňován okolním zdrojem světla a rozpoznávání pozice míčku je tak velmi konzistentní.



Obr. 4: Pohled na vnitřek stolu odhalující řídicí jednotky a stojan infračervené kamery se zrcadlem. [6]

Celý RSF je ovládaný přes počítač spojený se stolem sériovým multiportovým I/O adaptérem značky Stallion Easy. [6]

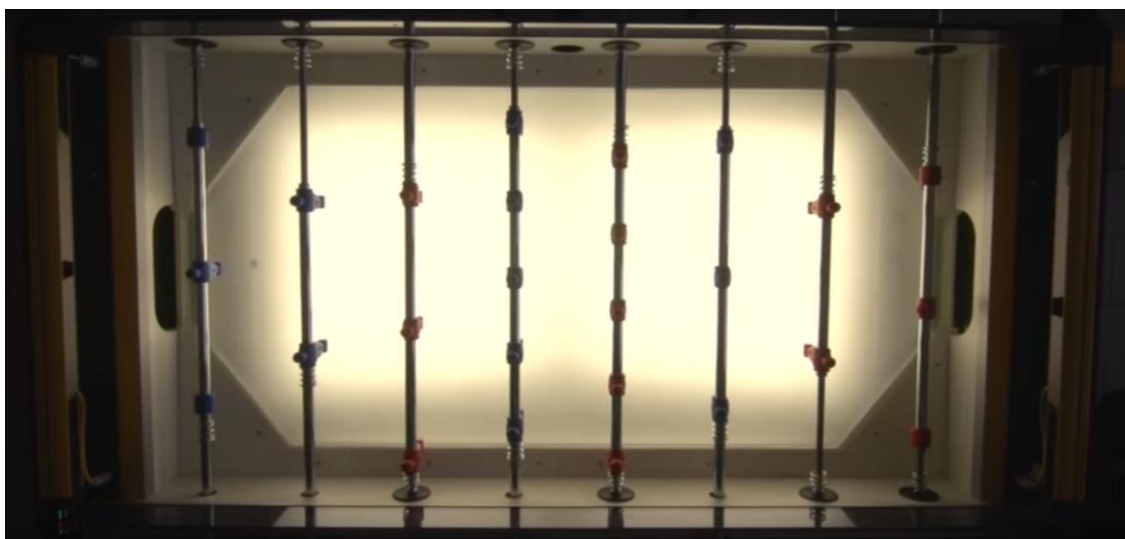
2.4 RSF od společnosti Pilz GmbH & Co. KG

V roce 2015 představila svoje řešení RSF ve městě Hannover firma PILZ. Komerční projekt, zaměřený na propagaci firmy, nabízel kromě spolehlivého ovládání os rotačními servomotory hlavně propracované bezpečnostní prvky. Optická brána, umístěná nad hrací plochou (Obr. 5) okamžitě po přerušení signálu (detekce tělesa v hracím poli) odstavila řídicí jednotky pohonů a zamezila tak možnost poranění zasahujících hráčů. Nezbytným prvkem při vystavování na veletrzích bylo i bezpečnostní E – stop tlačítko plnící podobnou funkci jako optická brána. [7]



Obr. 5: Optická brána zajišťující bezpečný zásah do hrací plochy i při aktivní hře. [8]

Detekce míče byla zajištěna kamerou, umístěnou vespod stolu. Poloprůhledná matná deska zajistila při dostatečném osvětlení viditelnost míče i ze spodní strany a zároveň omezením průhlednosti nerozptylovala hráče při hře případným pohledem skrz herní plochu (Obr. 6).



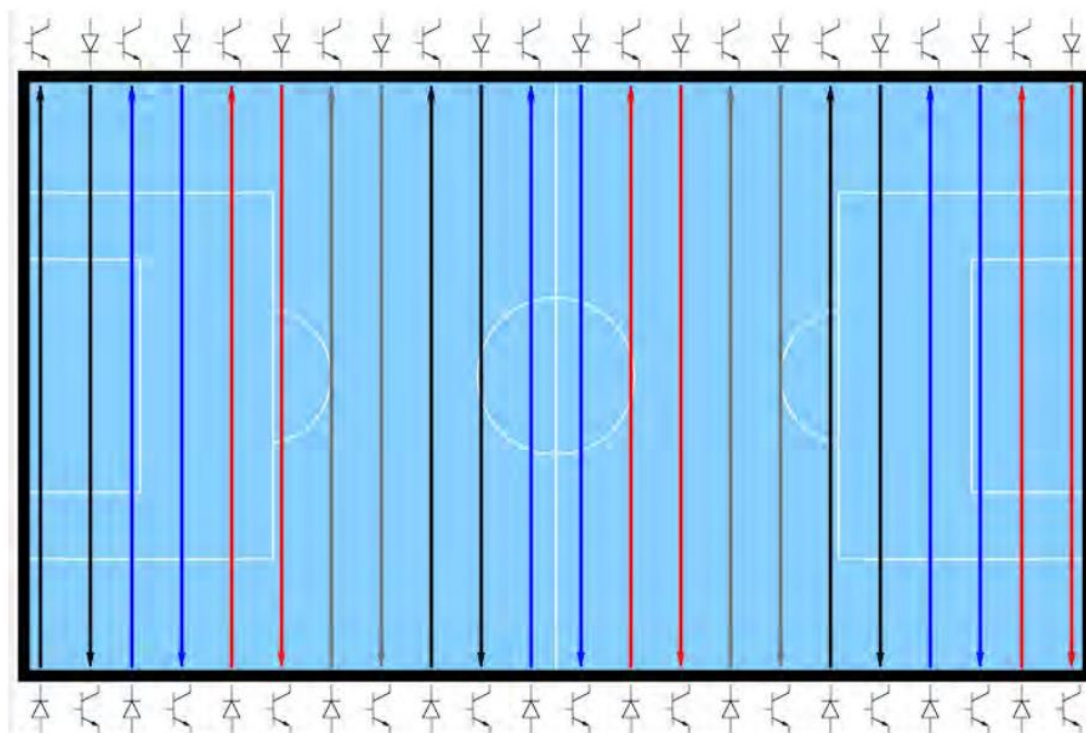
Obr. 6: Pohled shora na herní plochu RSF od firmy PILZ [8]

Lineární pohyb os byl řešen převodem z rotačního pomocí kuličkového šroubu. Rotaci pak zajišťoval druhý motor pomocí řemenového převodu. [8]

2.5 The University of Akron

Každé řešení RSF je v závislosti na místě vývoje něčím unikátní. Princip sledování polohy míčku rozpoznáváním obrazu z kamery však zůstává převážně neměnný. Tímto se ale liší práce studentů polytechnické univerzity z Ohia. Přišli s unikátním přístupem k detekci míčku pomocí infračervených LED diod a fototranzistorů. Řešení vyniká vysokou rychlostí odezvy.

Problémem může být rušení a vzájemné ovlivňování sousedních dvojic (dioda – tranzistor). Toto je řešeno dvěma způsoby. První z nich je zahlobením diod do boční stěny stolu. Tímto se omezí šířka emitovaného signálu a velikost ovlivněné plochy na protější straně. Druhým řešením je fázové posunutí intervalů sepnutí diod. Integrací obou zmíněných opatření jsou pak nejbližší, ve stejný okamžik sepnuté diody od sebe vzdáleny asi 32 cm. Celkový počet takto fázově posunutých dvojic je 16. Princip zapojení je naznačen na Obr. 7 (různé časové intervaly zapnutí jsou znázorněny barevným odlišením). [9]



Obr. 7: Princip zapojení a uspořádání infračervených LED diod a tranzistorů [9]

Takto zapojené dvojice jsou orientovány v horizontálním (117 párů) a vertikálním (68 párů) směru. Z obrázku je také patrná hlavní nevýhoda tohoto řešení. A tedy, že přesnost detekované polohy silně závisí na počtu párů. Oproti tomu počet párů zase zesiluje rušení a zvyšuje cenu celé soustavy. [10]

2.6 Birmingham Young University

Cílem studentů z univerzity Brigham Younga bylo vytvořit počítačem ovládaný RSF s prvky umělé inteligence. Algoritmus se sám přizpůsoboval stylu hry protihráče a zdokonaloval se tak ve všech aspektech hry. Po dostatečném množství trénovacích cyklů dokonce údajně porážel i pokročilejší hráče.

Samotná konstrukce a způsob detekce míče byla principiálně velmi podobná většině ostatních zmíněných příkladů. Kamera umístěná na parabolické konstrukci (Obr. 8) nad stolem snímala herní plochu a po rozpoznání pozice míčku byla data posílána algoritmu umělé inteligence.



Obr. 8: Umístění kamery RSF studentů z univerzity Brigham Younga [11]

Automatické osy byly řízeny pomocí osmi rotačních servomotorů, kde čtyři z nich pohybovali tyčemi v axiálním směru transformací rotačního pohybu na lineární pomocí kuličkového šroubu. [11][12]

3 B&R AUTOMATION

Jako výrobce automatizační techniky se společnost s názvem B&R Automation (dále jen B&R) (Obr. 9) založená v roce 1979 Erwinem Berneckerem a Josefem Rainerem specializuje na aplikaci řídicích systémů, automatizaci továrenských komplexů, sofistikované řízení pohonů a výrobu k tomu potřebného sortimentu. [13]



Obr. 9: Logo společnosti B&R Automation [14]

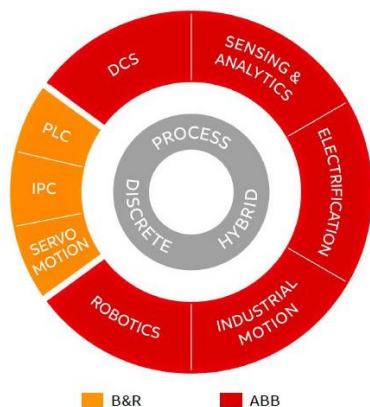
Výroba komponent a rovněž školení nových pracovníků probíhá převážně v hlavním sídle firmy – Egglesberg v Rakousku. Na český trh se ale firma dostala už v roce 1997 s první pobočkou v Brně. Nyní má B&R v Česku pobočky dvě - kromě Brna také v Praze. Česko je zároveň jedna z mála zemí, kde společnost soustředí část vývoje a pořádá školení pro nové zaměstnance/partnery.

Do popředí v oblasti automatizační techniky se firma dostala už v roce 1980, kdy uvedla na trh jedno z nejpokrokovějších automatizačních řešení své doby – volně programovatelný PLC Unicontrol (Obr. 10). Dalším důležitým datem byl rok 1993, kdy firma vstoupila na trh průmyslových počítačů. V roce 2000 se společnost podílela na vývoji komunikačního protokolu Ethernet Powerlink - nyní využívaným v naprosté většině produktů firmy B&R. Od tohoto roku také firma nabízí vývojový software Automation Studio využívaný ve všech fázích vývoje projektu. [15]



Obr. 10: Volně programovatelný PLC Unicontrol z roku 1980 [15]

V roce 2017 byla firma začleněna do skupiny ABB Group. Od této akvizice si obě společnosti slibují díky navzájem doplňující nabídce služeb a sortimentů rychlejší vývoj v oblasti automatizace a synergickou integraci silného zastoupení společnosti ABB v procesní výrobě s vyspělými automatizačními a pohonnými systémy společnosti B&R (Obr. 11). Spolu s partnery se tak rozšiřuje působení společností B&R do více než 75 zemí světa. [16]



Obr. 11: Znázornění doplňujícího se sortimentu společností B&R a ABB [16]

V poslední době firma se zvyšující poptávkou po nejnovějších technologiích představila hned několik inovativních řešení a technologií. Od víceosých řízení servopohonů pomocí speciálních ACOPOS měničů, přes modulární X20 systémy až po čistě softwarové inovace pro efektivnější návrh automatizačních systémů – technologie mapp. Nejnovějším přínosem společnosti B&R je průmyslové řešení sériových výrobních linek ACOPOStrak využívající jednotlivě nezávisle ovládaných magnetických dopravníků (Obr. 12) pro rychlý a přesný přesun produktů mezi procesními stanicemi. Technologie slibuje vysokou rychlost transportů produktů po libovolné trajektorii, paralelní výrobu, zvýšení celkové efektivity a zkrácení doby uvedení vyráběného produktu na trh. [17] [18]



Obr. 12: Detail magnetického dopravníku v systému ACOPOStrak [18]

3.1 Automation Studio

Automation Studio (dále jen AS) je ucelený softwarový nástroj pro vývoj všech částí projektu v oblasti automatizace. Integruje v sobě komplexní správu hardwarových prvků spolu se softwarovou konfigurací, programováním, regulací, vizualizací, komunikací i řízením pohonů. Především nejnovější generace AS slibuje snížení času vývoje, minimalizaci potřeb školení, možnost modulárního projektování a celkové zvýšení efektivity práce.

Jak již bylo zmíněno výše, společnost B&R přišla na trh se svým softwarovým řešením vývoje projektů AS v roce 2000. Od té doby program prošel řadou změn a vylepšení. Aktuálně čtvrtá generace softwaru nabízí kromě plné podpory B&R produktů také možnost implementace sortimentu jiných výrobců. Podmínka je pouze doplnění tabulky parametrů daného produktu do softwarové konfigurace. Výhodou je také možnost návrhu a vývoje kompletního softwarového řešení na pokročilé simulaci ARsim před zavedením na reálném hardwaru.

AS umožňuje programovat v programovacích jazycích daných normou IEC 61131-3. Konkrétně se jedná Strukturovaný text (ST), Ladder diagram (LD), IL, FBD a SFC. Kromě toho je také možnost kód psát například v rozšířeném ANSI C nebo v objektově orientovaném ANSI C++. Projekt v AS nelimituje uživatele používat pouze jeden jazyk. Výsledný projekt se pak může skládat z několika modulů psaných různými programovacími jazyky. Díky přehlednému uživatelskému rozhraní (Obr. 13) pak není problém se v takto modulárně napsaném projektu vyznat. [19]



Obr. 13: Náhled na uživatelské rozhraní Automation Studia V4 [19]

AS mimo jiné disponuje i nedávno vyvinutými Mapp komponenty. Jedná se o předem napsané komplexní knihovny usnadňující a urychlující vývoj a implementaci softwarového programu. Mapp komponenty lze rozdělit na celky spravující řízení pohonů (mapp Motion), bezpečnost (mapp Safety), vizualizaci (mapp View) a spoustu dalších. [20]

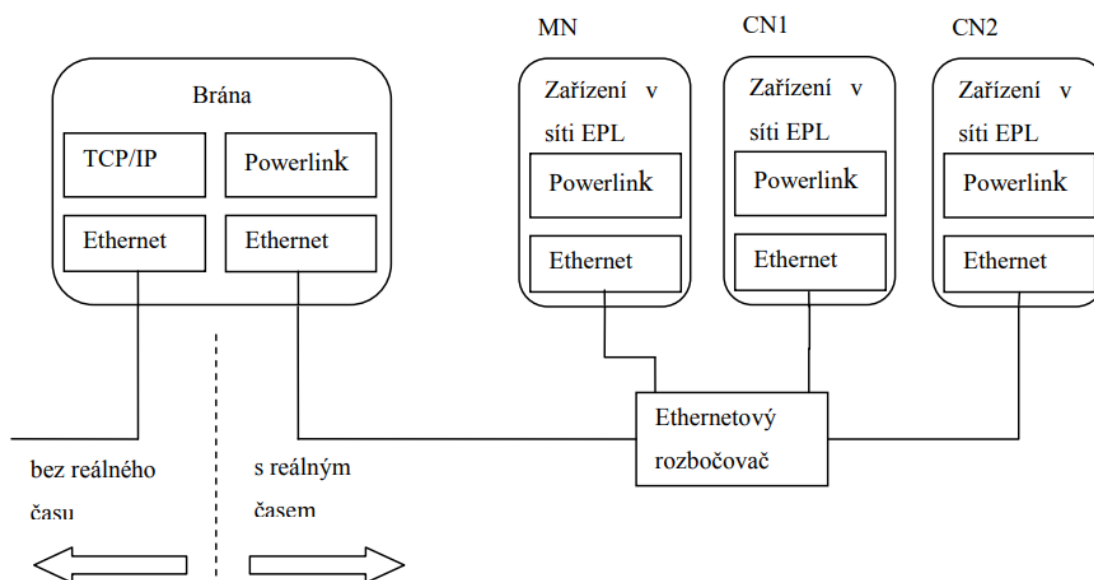
3.2 Řídící prostředky společnosti B&R

Pro spolehlivé a bezchybné provozování automatizovaných systémů je mimo jiné potřeba zajistit kvalitní a rychlou komunikaci, přesné řízení pohonů, komplexní I/O systém a výkonný řídicí procesor. Společnost B&R poskytuje řešení na všechny tyto aspekty ve formě nabízeného sortimentu.

3.2.1 Ethernet Powerlink

První verzi Ethernet Powerlink (dále jen EPL) přivedla na trh v roce 2001 společnost B&R pod cílem zjednodušit a zrychlit komunikaci v průmyslových automatizovaných systémech. V roce 2002 byla založena standardizační skupina Ethernet Powerlink Standardization Group (EPSG) a EPL byl otevřen veřejnosti. Aktuálně pojem Powerlink označuje druhou verzi rozšířenou o aplikační vrstvu komunikačního protokolu CANopen.

V EPL síti je vždy jedno zařízení označováno jako MN (Managing Node) řídící komunikaci po síti. Ostatní prvky jsou označovány jako CN (Controlled Nodes). Celá EPL síť pracuje v reálném čase. Tím je zajištěna časová determinace komunikace. Pro oddělení části sítě nepodporující komunikaci v reálném čase se používají tzv. brány. Základní architektura je znázorněna na Obr. 14.



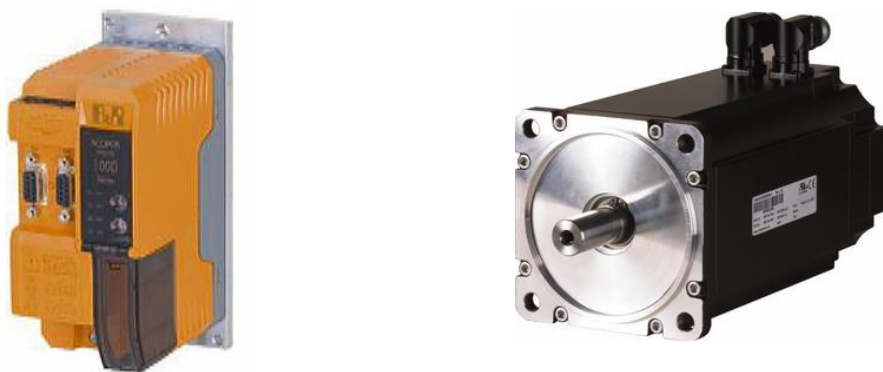
Obr. 14: Znázornění architektury EPL [21]

Mezi zásadní výhody patří mimo jiné nastavitelnost parametrů EPL, podpora až 240 najednou připojených zařízení, možnost využití všech druhů síťových topologií a jejich kombinací nebo například podpora funkce hot plugging – možnost odpojení a připojení zařízení bez narušení fungování sítě. Nejkratší nastavitelný komunikační cyklus je roven 200 μ s s nejistotou synchronizace menší jak 1 μ s a rychlost přenosu dat dosahuje 100 Mb/s (standard Fast Ethernet). [21]

3.2.2 Řízení pohybu

K řízení nejen vlastních pohonů využívá firma B&R digitální servozesilovač ACOPOS (obr. 15 vlevo). ACOPOS plní dvě základní funkce. Výkonová část se stará o regulovatelné napájení motoru. Obsahuje napěťový frekvenční měnič využívající k řízení PWM³. Řídící část monitoruje a vypočítává za pomoci speciálních algoritmů průběh pohybu motoru. Samotný způsob regulace a algoritmy řízení budou přiblíženy v dalších kapitolách. Komunikace s PLC probíhá pomocí komunikačního protokolu Powerlink s cyklem trvajícím 400 μ s.

Spolu se servozesilovačem je standardně firmou B&R dodáván i bezkartáčový synchronní motor se zpětnou vazbou (Obr. 15 vpravo). Ta může být zajištěna pomocí inkrementálního snímače, absolutního snímače nebo kombinací obou. [22][23]



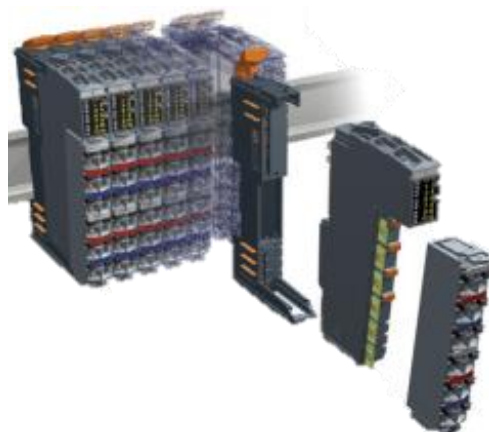
Obr. 15: ACOPOS Micro (vlevo) a synchronní motor 8JSA (vpravo) nabízený firmou B&R [23]

3.2.3 I/O systémy

I/O systémy (nebo také vstup/výstup systémy) firmy B&R disponující ochranou IP20 a IP67 patří k nejvšestrannějším a nejpokročilejším I/O systémům na trhu. Nabízí podporu všech standardních sběrnicevých systémů a umožňují využít kompletní flexibilitu týkající se topologie zapojení pro optimální adaptaci k ostatnímu hardwaru. Nabízené produkty lze rozdělit do dvou základních kategorií. X20 systémy, umístěvané především uvnitř rozvaděče a X67 systémy, využívané mimo rozvaděč. [24]

Výhody X20 systémů jsou především jejich velmi kompaktní provedení, snadná montáž na DIM lištu a rozdělení prvku na sběrnicevý modul, modul elektroniky a svorku (Obr. 16). Sběrnicevý modul tak dokáže pracovat i bez modulu elektroniky a je možné velmi levně vytvořit volné rezervní sloty v dané skupině I/O pro pozdější využití. [25]

³ Pulsně šířková modulace (PWM) je metoda, kterou lze pomocí dvoustavového signálu získat signál se spojitým průběhem.



Obr. 16: Rozdělení modulu systému X20 na svorku, modul s elektronikou a sběrnice modul [25]

X67 systémy jsou oproti systémům X20 s výhodou umísťovány mimo rozvaděč pro dodatečné připojení ostatních periférií. Jsou navrženy tak, aby odolaly nepříznivým podmínkám a zároveň podporovaly všechny využívané komunikační protokoly. [26]

3.2.4 Průmyslové počítače

Hlavní důraz kladený na průmyslové počítače firmou B&R je především spolehlivost nepřerušovaného a bezchybného dlouhodobého provozu. I proto je místo ventilátorového chlazení implementováno chlazení pasivní. Omezení pohyblivých částí je zajištěno i absencí harddisků. Data jsou proto ukládány na univerzální vyjímatelnou CFast kartu využívající sériovou sběrnici ATA. Počítače jsou vybaveny výkonnými procesory od firmy Intel a to od jedno jádrového procesoru Celeron až po čtyřjádrový Core i7 zajišťující dostatečný výkon pro ty nejnáročnější aplikace.

Integrovaním průmyslového počítače do zobrazovacího panelu vznikne skupina tzv. výkonnostních panelů. Hlavní výhoda takovýchto celků je potom kompaktní provedení a redukce propojovacích kabelů. Podle potřeby uživatele lze oba tyto komponenty zaměňovat. [27]

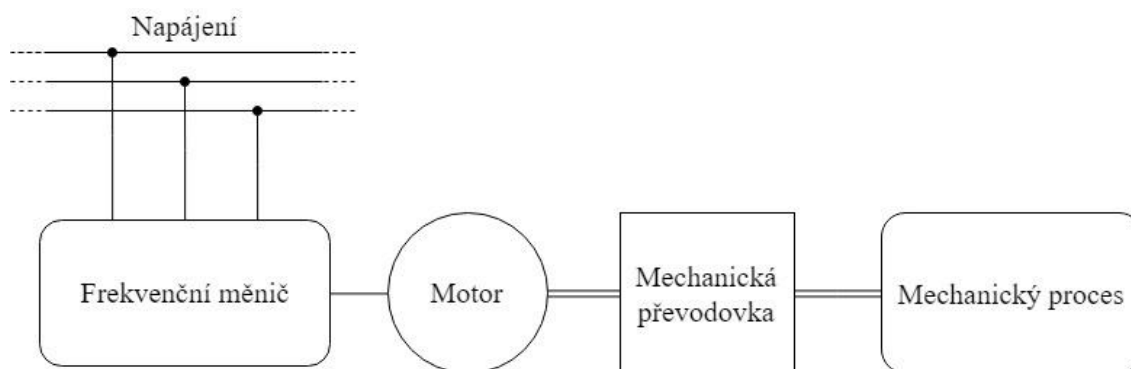


Obr. 17: Výkonnostní panel PC 2100 multi-touch nabízený firmou B&R [28]

4 ŘÍZENÍ POHONŮ

V této kapitole bude stručně shrnuto řízení synchronních, asynchronních (indukčních) a stejnosměrných (DC) motorů. Detailněji bude přiblíženo především řízení tří-fázových synchronních motorů nejčastěji využívaných firmou B&R.

Protože rychlost otáčení jak synchronního tak asynchronního motoru závisí na napájecí frekvenci spolu s napětím, není možné je provozovat bez patřičného frekvenčního měniče. Základní mechatronická soustava pro řízení střídavých pohonů potom obsahuje napájecí zdroj, frekvenční měnič spolu s regulátorem, motor, mechanickou převodovku a samotný řízený mechanický prvek (Obr. 18).



Obr. 18: Schéma základních komponentů mechatronické soustavy pro řízení pohonů

Měnič přeměňuje elektrickou energii zdroje s danou pevnou hodnotou frekvence a napětí na proměnnou hodnotu vhodnou pro řízený motor. Motor poté přemění elektrickou energii na energii mechanickou (kinetickou) přenesenou přes případnou převodovku (pokud je vyžadována) na zátěž. Hlavní důraz soustavy je kladen na rychlé a přesné dosažení požadované polohy/rychlosti mechanického prvku, popř. udržení konstantních otáček/momentu bez ztráty přesnosti. Toho lze dosáhnout jedině bezchybnou vzájemnou interakcí celého systému.

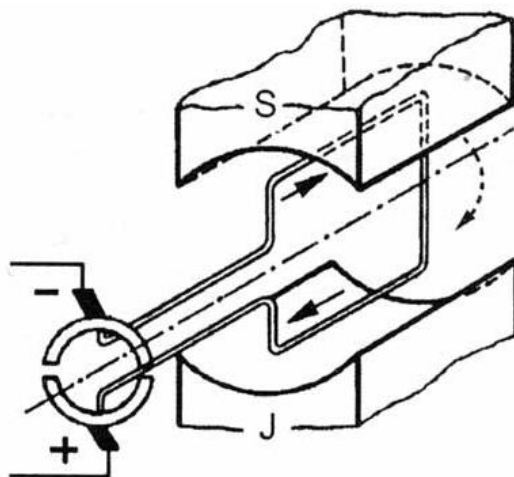
V další části kapitoly budou jednotlivé zmíněné komponenty konkrétněji popsány a vysvětleny. Důraz bude kladen především na způsob řízení využívaný firmou B&R. [31]

4.1 Typ motoru

Od počátku historie vývoje elektromotorů sahající až do 19. století vzniklo spoustu různorodých typů lišící se nejen konstrukcí ale i základními principy a charakteristikami chování při daných podmínkách. Díky tomu neexistuje univerzální typ motoru, ale s výhodou se používají různé varianty v závislosti na implementaci a požadovaných vlastnostech. Dnes se mezi tři nejpoužívanější typy motorů řadí stejnosměrný (DC) motor, synchronní motor a asynchronní (indukční) motor. [31]

4.1.1 Stejnosměrný motor

Konstrukce stejnosměrného motoru se dělí na stator a rotor. Stator obsahuje navzájem magneticky opačně orientované póly vytvářející stálé magnetické pole. Na rotoru (též kotva) jsou potom v drážkách uloženy vinutí s cívkami, vyvedenými k mechanickému komutátoru. Komutátor zajišťuje přivádění správně orientovaného proudu do cívek vinutí rotující kotvy tak, aby všechny proudem protékané cívkové strany vytvářely v magnetickém poli hlavních pólů točivý moment souhlasného smyslu. Zjednodušená konstrukce s jednou smyčkou v rotoru je naznačena na Obr. 19.



Obr. 19: Zjednodušená konstrukce stejnosměrného motoru s komutátorem [31]

Jednoduchá konstrukce a podmínka pouze stejnosměrného napájení je jedna z hlavních výhod stejnosměrných motorů. Rychlost otáčení přímo úměrně závisí na velikosti napětí na komutátoru a motor je tak velice snadno regulovatelný bez potřeby výkonového frekvenčního měniče. Díky tomu je hojně využíván v automobilovém průmyslu (stěrače předního skla, elektrická boční okna) nebo například v domácích spotřebičích (vysavač).

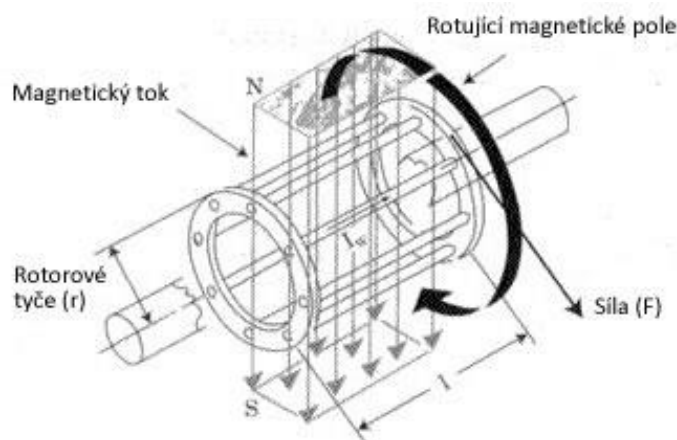
Zásadní nevýhoda je rychlé opotřebovávání kartáčů mechanického komutátoru. Motor po určité době provozu ztrácí účinnost a je potřeba poměrně často tyto kartáče měnit. [31] [32]

4.1.2 Asynchronní motor

Vývoj v oblasti elektroniky a materiálů vedl k posunu od stejnosměrných motorů směrem ke střídavým. Jedním z typických třífázových střídavých strojů je asynchronní motor patentovaný roku 1888 vynálezcem a průkopníkem v oboru elektřiny Nikolajem Teslou.

Stator asynchronního motoru je napájen třífázovou sítí a díky geometrii statorových pólů generuje rotující magnetické pole. Rotor je vyroben z transformátorových plechů s hliníkovými nebo měděnými tyčemi zalitými do drážek po obvodu rotoru a na krajích spojené kruhy ze stejného materiálu. Protože vodivé tyče protínají siločáry rotujícího magnetického pole statoru, indukují se v nich podle Lenzova

zákona elektrický proud. Vlivem Lorentzovi síly se pak podobně jako u stejnosměrných motorů vytváří moment na hřídeli (rotor se roztáčí). Rotující magnetické pole spolu s kotvou nakrátko je vidět na Obr. 20. [33]



Obr. 20: Schéma rotujícího magnetického pole statoru asynchronního motoru protínající tyče rotorové klece [34]

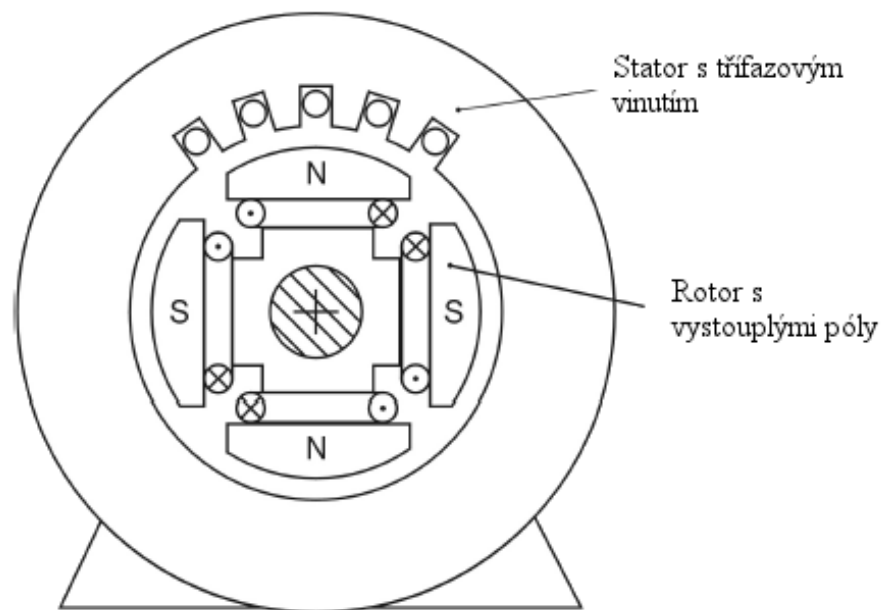
Z principu je patrné, že rychlost otáčení rotoru bude vždy o něco menší než je rychlost otáčení samotného magnetického pole statoru. Rozdíl těchto rychlostí je značen jako skluz a má zásadní roli při určování momentu na hřídeli. Čím větší skluz, tím se indukuje větší proud a tím se zvyšuje moment zapříčiněný Lorentzovou silou. Díky rozdílným rychlostem otáčení pole a rotoru dostal tento typ motoru název asynchronní motor.

Vzhledem k problematickému rozběhu a chlazení závislém na otáčkách se asynchronní stroje využívají v situacích, kdy se hřídel může otáčet dlouhodobě (pumpy, kompresory, ventilátory). Pro přesné polohování a časté zastavování je vhodnější motor synchronní. Pro regulaci otáček je na rozdíl od stejnosměrného stroje potřeba předřadit frekvenční měnič. [33]

4.1.3 Synchronní motor

Nejčastějším motorem pro přesné polohování je motor synchronní. Stator je napájen střídavým napětím stejně jako u asynchronního stroje. Rotor má ale stálé magnetické pole, které není závislé na proudu indukovaného rozdílnou rychlostí rotoru a statorového pole. Otáčky rotoru se tak nemůžou lišit od otáček rotujícího magnetického pole a motor se vždy otáčí synchronně s polem statoru.

Podle konstrukce můžeme rozlišovat motory reluktanční, s permanentními magnety a s budícím vinutím (Obr. 21). Synchronní motor s permanentními magnety má oproti ostatním typům několik výhod. Díky silným magnetům dokáže i při malých rozměrech vyvinout velký moment, velikost magnetického toku rotoru je daná vlastnostmi použitých magnetů a motor netrpí při nízkých otáčkách zvlněním výstupního momentu jako je tomu u reluktančních motorů. Nejčastější implementace je právě v oborech automatizace (roboti, přesné polohovací systémy, CNC aplikace).

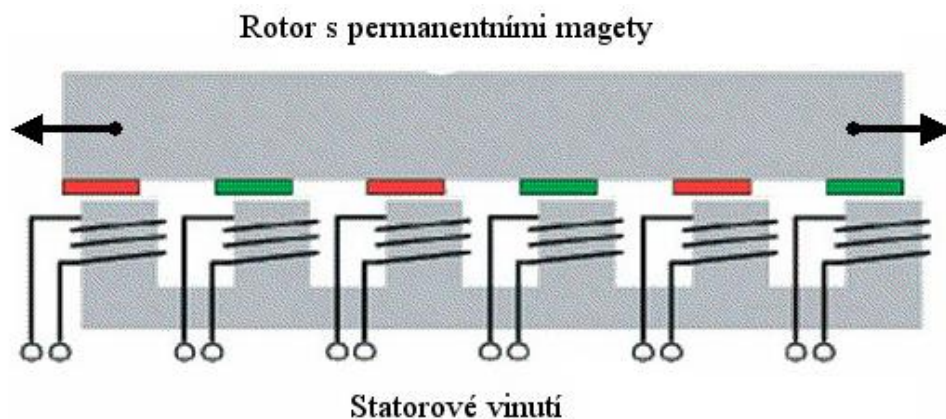


Obr. 21: Schéma synchronního motoru s budícím vinutím a vystouplými póly. [35]

Ve většině případů je pro regulaci otáček potřeba stejně jako u asynchronních motorů frekvenční měnič a zpětnou vazbu ve formě snímače polohy. Výjimkou jsou speciální synchronní krokové motory, které se posouvají „po krocích“ vyvolaných impulsy z měniče. Pozice je tedy teoreticky známá i bez přímého snímání. [35]

4.1.4 Lineární motor

Kromě rotačních motorů hrají v automatizačním průmyslu velkou roli motory lineární. Principiálně se lineární motor příliš neliší od motorů rotačních. Často lze vysvětlit fungování nejpoužívanějšího lineárního motoru na představě „rozvinutého“ synchronního rotačního motoru s permanentními magnety. I zde se skládá konstrukce ze statoru a rotoru obsahující permanentní magnety (Obr. 22). Tři fázové napájení je připojeno ke statorovému vinutí a pomocí zpětné vazby a servoměniče je zajištěno přesné polohování.



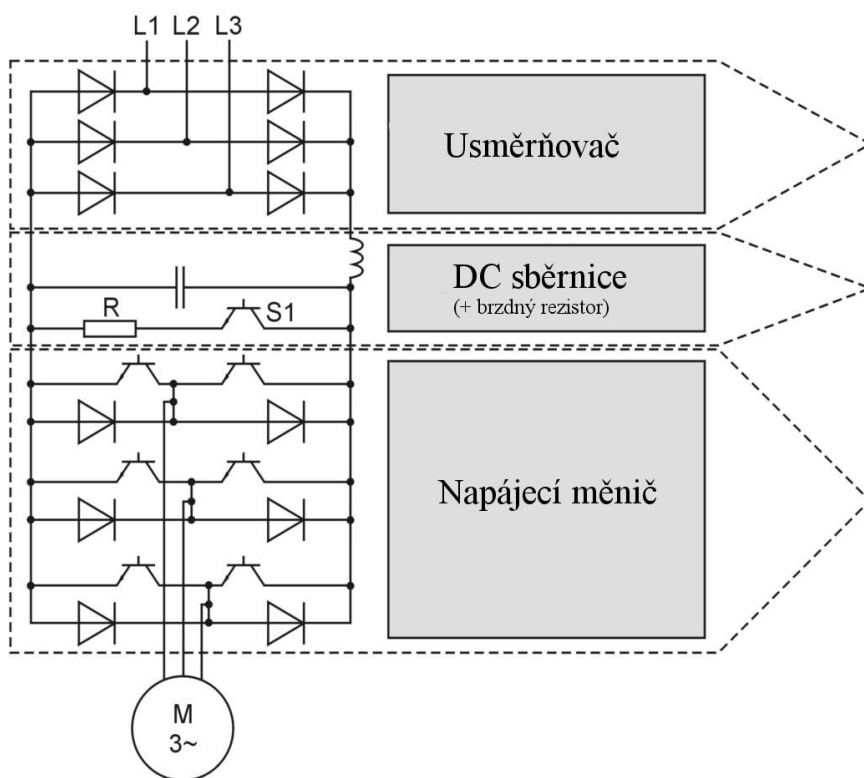
Obr. 22: Schéma synchronního lineárního motoru s permanentními magnety [36]

Mezi nejčastější oblasti využití lineárních motorů díky vysoké přesnosti a rychlé dynamice pohybu patří polohovací systémy, stříhací zařízení nebo například systém od společnosti B&R ACOPOStrak zmíněný výše. [36]

4.2 Frekvenční měnič

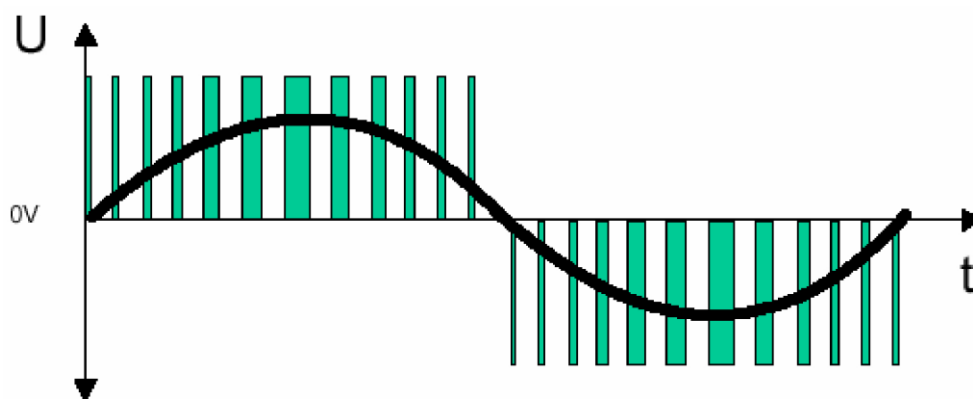
Úkolem frekvenčních měničů je přeměna elektrické energie ve formě pevného síťového napětí s danou frekvencí na formu požadovanou pro řízení elektromotorů. U některých střídavých strojů měnič není vyžadován a motor lze připojit přímo na třífázovou síť. Předřazením frekvenčního měniče lze ale proměnnými hodnotami frekvence a napětí regulovat rychlost otáčení a výkon na hřídeli, což je ve většině případů nezbytné.

Princip zapojení výkonové elektroniky je naznačený na Obr. 23. Usměrňovač přeměňuje střídavý průběh napětí ze sítě na stejnosměrnou hodnotu. Toto napětí je uloženo v DC sběrnici, která se stará jak o akumulaci, tak o stabilizaci elektrické energie. Napájecí měnič pak využívá DC sběrnici jako zdroj stejnosměrného napětí pro následnou pulzně šířkovou modulaci (PWM) zajišťující generování flexibilní napěťové charakteristiky.



Obr. 23: Zapojení výkonové elektroniky ve frekvenčním měniči [37]

Pulsně šířkovou modulací je umožněno pomocí měnící se doby zapnutí a vypnutí napětí v dané periodě upravovat efektivní hodnotu na výstupu. Čím větší část cyklu signálu je napětím zapnuto, tím vyšší je efektivní hodnota (Obr. 24). Doba cyklu PWM (perioda) je zásadní faktor kvality generované výstupní hodnoty.

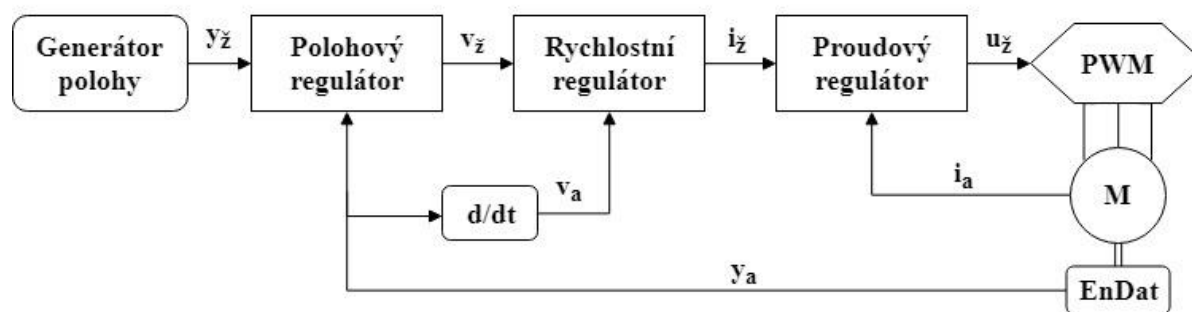


Obr. 24: Princip pulsně šířkové modulace [37]

V dnešní době se často spolu s frekvenčními měniči implementují do jednoho hardwaru také výkonné procesory starající se o regulaci, výpočet rampy, brzdící algoritmy, řešení chyb apod. Takto sestavené celky se nazývají digitální servoměniče. Servoměniče vyžadují zpětnou vazbu vyvedenou z motoru pomocí pozičního snímače. Servoměnič poté dokáže kromě regulace rychlosti i přesné polohování a je schopen udržovat danou pozici nezávisle na zatížení. Více bude o algoritmech regulace servoměničů ACOPOS od firmy B&R pojednáno níže. [37]

4.3 Řídící algoritmy

Struktura kaskádní zpětnovazební regulace využívaná k přesnému řízení motorů v ACOPOSech je naznačena na Obr. 25.



Obr. 25: Schéma řídicí struktury servoměniče.

Generátor polohy vygeneruje podle zadané hodnoty průběh polohy motoru vstupující poté jako žádaná hodnota y_z do polohového PI regulátoru. Regulační odchylka je vypočítaná jako rozdíl žádané a aktuální polohy y_a snímané EnDat snímačem na hřídeli motoru. Akční zásah regulátoru je posílán jako žádaná hodnota rychlosti v_z do PI regulátoru rychlosti. Aktuální rychlost v_a je zjištěna derivací aktuální polohy y_a . Poslední regulátor je regulátor proudu. Výstup je poté žádané napětí, které je po přepočtu souřadnic a pulsně šířkové modulaci přivedeno na cívky statoru. [38]

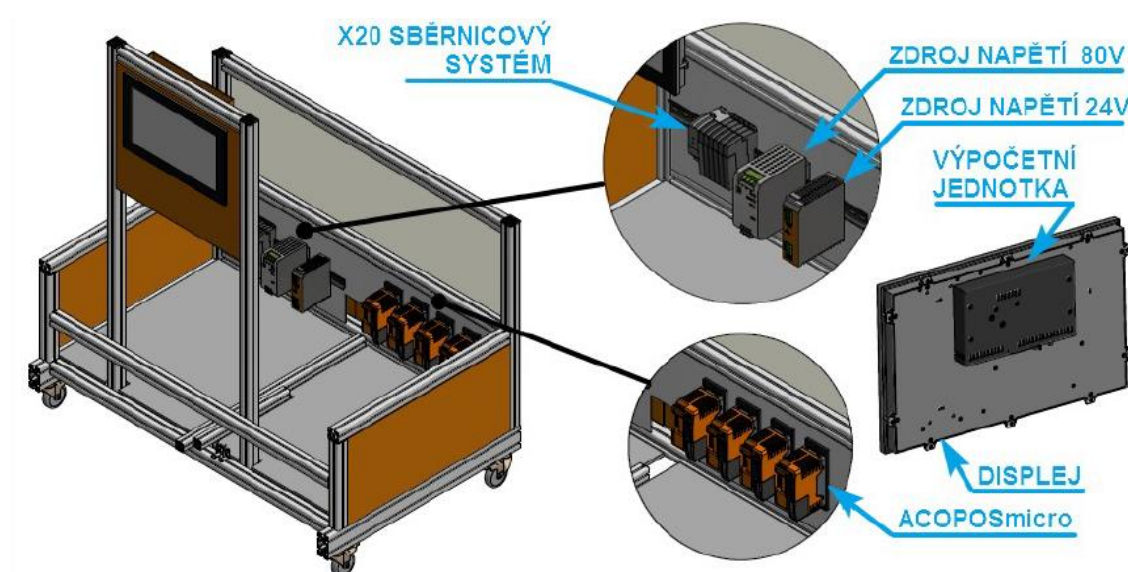
5 SOUČASNÝ STAV RSF

Práce na RSF od společnosti B&R začali formou bakalářských a diplomových prací v roce 2016 návrhem konstrukce pojízdného kabinetu a ovládání jedné osy robotizované strany stolu. Ing. Petr Mareček spolu s Ing. Lukášem Jediným ve svých pracích shrnují výběr lineárních a rotačních motorů spolu s návrhem osvětlení scény, snímání míče a detekci vstřeleného gólu.

V roce 2017 vznikla díky spolupráci Bc. Lubomíra Bubeníka, Bc. Radka Otrádovského a především Ing. Romana Paráka pokročilejší strategie, zabezpečení herní plochy, detekce protihráče a vylepšené snímání míčku. Aktuální stav lze tedy rozdělit na část konstrukční, část věnovanou řízení robotizovaných os, detekci míče a protihráče, herní strategii a vizualizaci.

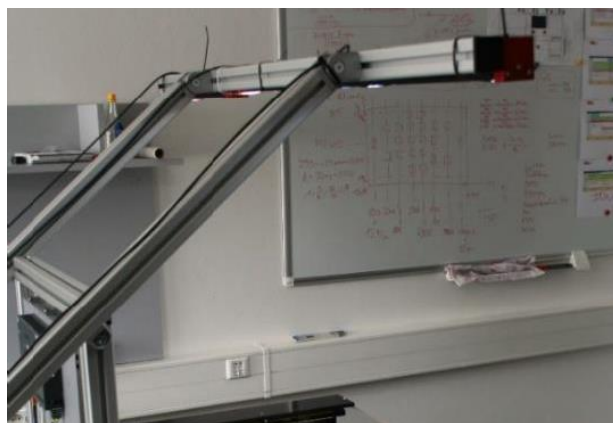
5.1 Konstrukční řešení

Pro snadné přemísťování a poskytnutí krytého prostoru pro ostatní prvky RSF byl Ing. Petrem Marečkem navržen pojízdný kabinet zastřešující řídicí, podpůrné a napájecí prvky stolu (Obr. 26). Konstrukce byla pro zajištění snadného přenosu vytvořena z lehkých hliníkových profilů a opatřena koly s brzdami. [39]



Obr. 26: Návrh pojízdného kabinetu s umístěním prvků od Ing. Petra Marečka [39]

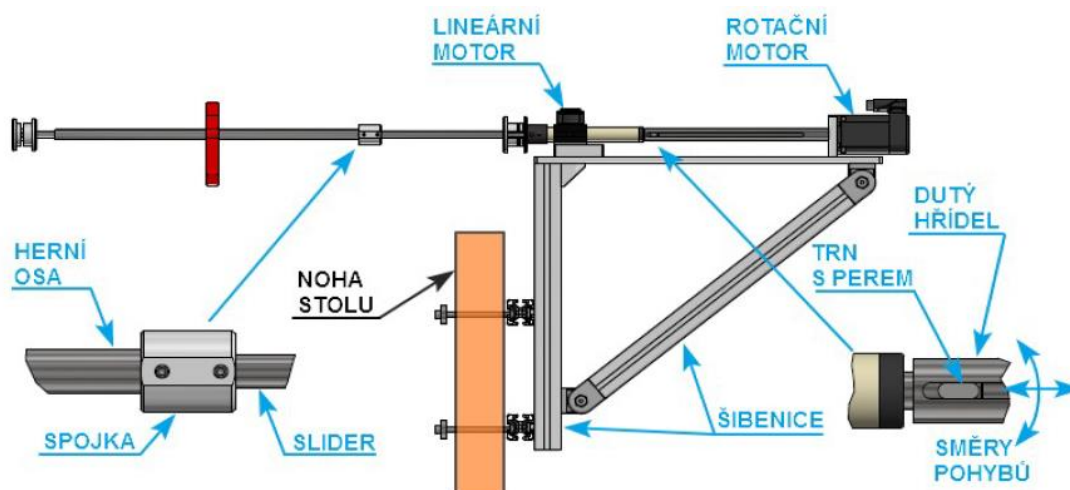
V následujícím roce byla Bc. Lubomírem Bubeníkem navržena a implementována nosná konstrukce osvětlení nad RSF zajišťující rovnoměrné osvětlení po celé herní ploše a sloužící zároveň jako místo pro případné umístění kamery (Obr. 27).



Obr. 27: Nosná konstrukce pro osvětlení navržená Bc. Lubomírem Bubeníkem

5.2 Pohony

Schéma uložení motoru navržené Ing. Petrem Marečkem je naznačena na Obr. 28. V současném stavu jsou tímto způsobem uloženy všechny 4 robotické herní osy.



Obr. 28: Schéma uložení pohonů navržené Ing. Petrem Marečkem [39]

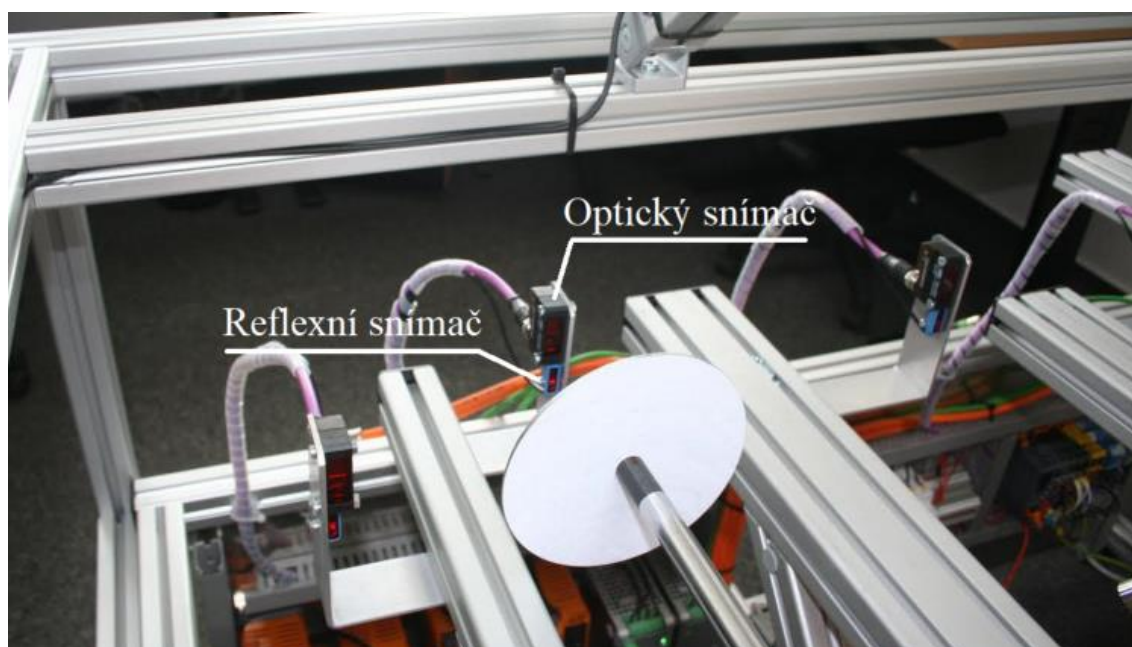
Výběr motorů byl po zátěžovém testu provedeném pomocí diagnostického nástroje NC Test v AS spolu s umístěním a uložením pohonů zachován. Veškeré menší úpravy konstrukce a návrhy pro lepší a plynulejší posuv tyče v axiálním směru je i spolu s výše zmíněným zátěžovým testem popsán v práci Ing. Romana Paráka. Aktuální výběr pohonů spolu s digitálními ACOPOS měniči určenými pro jejich řízení tedy sestává z: [39]

- 4x lineární motor P01-23x80 od firmy LinMot
- 4x rotační motor 8LVA23.B1030D100-0 od firmy B&R
- 2x digitální servoměnič ACOPOS Micro 80VD100PD.C000-01 pro rotační motory
- 2x digitální servoměnič ACOPOS Micro 80VD100PD.C188-01 pro lineární motory

5.3 Detekce

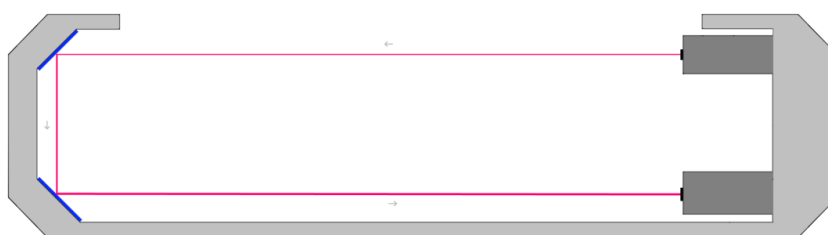
Způsob detekce míče navržený Bc. Lubomírem Bubeníkem zahrnoval umístění kamery Cognex IS 7402 ze spodu hrací plochy snímající herní plochu skrz poloprůhlednou skleněnou desku. Výhodou tohoto řešení byla viditelnost míče po celé oblasti a zajištění neblokovaní výhledu naklánějícími se hráči.

Detekce protihráče byla řešena použitím optického snímače vzdálenosti FADK 14/4470/S14/IO umístěného naproti kruhové desky připevněné k herní ose (Obr. 29). Změřená vzdálenost přeposílaná do PLC byla následně přepočítána na unifikované jednotky stolu – unity. Práce Bc. Radka Otradvského zároveň zahrnovala řešení detekce natočení. Pro tu byl použit reflexní snímač od WL2S-2P3230/1/063572 firmy Sick a na kruhovou desku přilepena reflexní páska. Tento způsob tak dokázal zjistit, kdy je protihráč natočený do polohy kde již míč není danou osou blokován. [40]



Obr. 29: Řešení detekce polohy protihráče [40]

V neposlední řadě byla Ing. Petrem Marečkem řešena detekce vstřeleného gólu. Do prostoru mezi brankou a zásobníkem míčů byl vložen detekující prvek skládající se ze dvou odrazových zrcadel a fotoelektrického snímače OESV 19 200 P3K od firmy Di-Sonic. Schéma zapojení je vidět na Obr. 30. [41]



Obr. 30: Schéma upevnění fotoelektrického snímače s odrazovými zrcadly [41]

5.4 Software

Nedílnou součástí celého projektu je software zajišťující řízení a provázání všech hardwarových prvků stejně jako vytvoření uživatelského prostředí pro snadné a intuitivní ovládání. Práce Ing Romana Paráka co se týče softwaru zahrnovala vytvoření programu pro ovládání herních os, návrh a implementace herní strategie a vytvoření na první pohled příjemné a přehledné vizualizace.

Vizualizace zobrazená na dotykové obrazovce umístěné naproti lidskému hráči byla vytvořena v AS pomocí komponentů MappView (Obr. 31). MappView zapadající do skupiny mapp technologií umožňuje rychlou a efektivní tvorbu interaktivních uživatelských rozhraní pomocí webových technologií. Samotná vizualizace obsahovala náhledy na stav hry, statistiky hráčů, možnosti nastavení hry a informace o osách.



Obr. 31: Vizualizace vytvořená pomocí technologie MappView Ing. Romanem Parákem [42]

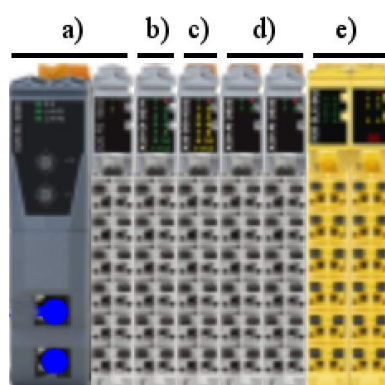
Program pro ovládání os byl spolu se strategií a všemi ostatními komponentami zajišťující spolehlivý běh fotbalu napsán v jazyce ANSI C v jednom rozsáhlém souboru. Nevýhodou takového řešení je i přes kompaktnost celého programu složité upravování již implementovaných funkcionalit a obtížná orientace v komunikaci mezi oddělenými komponentami. Jedním z cílů této práce je vytvoření nového modulárního designu pro celkové softwarové řešení RSF. Více o rozdělení a provázání jednotlivých modulů bude pojednáno níže. [42]

5.5 Systém X20

I/O (vstupní/výstupní) systém je nedílnou součástí každého mechatronického systému. Je možné skrze něj napojit a ovládat různé periferie nebo číst analogický/digitální signál ze snímačů. Proto byly pro RSF předchozími studenty vybrány tyto moduly: [42]

- a) Komunikační modul X20BC0083 a modul X20PS9400
- b) Modul pro digitální vstupy X20DI9371
- c) Modul pro digitální výstupy X20DO9322
- d) Moduly pro analogové vstupy X20AI2622, X20AI2632
- e) Modul pro bezpečnostní vstupy/výstupy X20SLX842

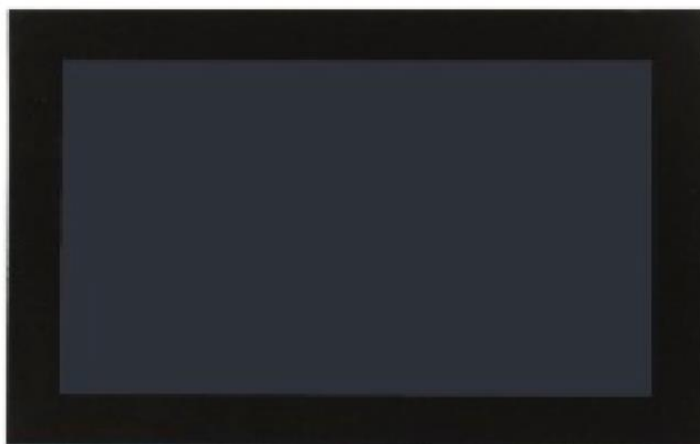
Všechny označené moduly lze vidět na Obr. 32



Obr. 32: Moduly X20 systému

5.6 Panel PC

Pro rozhraní mezi člověkem a počítačem byl využit uživatelský panel PC 5AP933.156B00. Zároveň je s panelem integrovaná i výkonná řídicí jednotka se čtyřjádrovým procesorem Intel Atom a operačním systémem Windows potřebným pro běh vizualizace postavené na technologii mappView. [42]

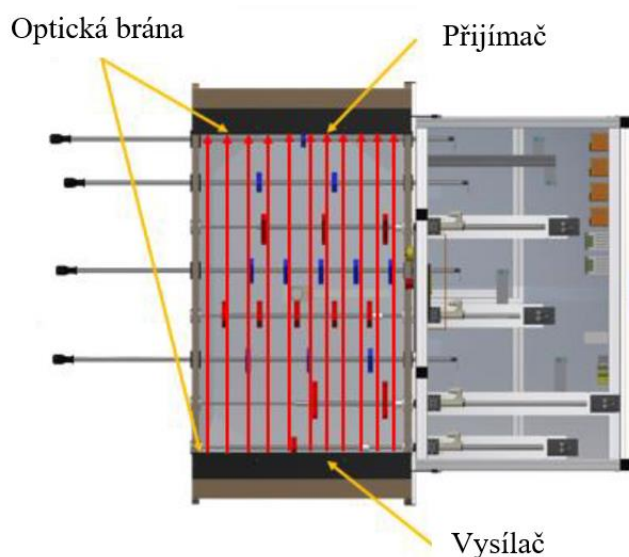


Obr. 33: Uživatelský panel PC 5AP933.156B-00 [42]

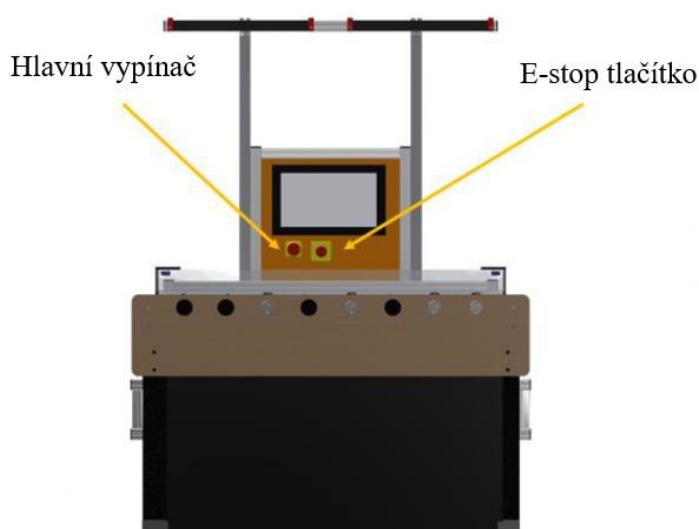
5.7 Safety

Bezpečnost je pro strojní zařízení velmi důležitým faktorem. Zejména pro výstavní projekty jako je právě RSF. Proto byly minulými studenty navrženy celkem dva bezpečnostní prvky.

Pro zabezpečení lidské obsluhy při snaze ručně posunout míč z místa nedosažitelného pro figurky ani jednoho z týmů byla navržena optická brána okamžitě detekující přerušení signálu (Obr. 34). Zároveň bylo implementováno bezpečnostní tlačítko zajišťující odbavení napájení při zmáčknutí. E-stop tlačítko lze vidět na



Obr. 34: Optická brána umístěná nad hrací plochou RSF [42]

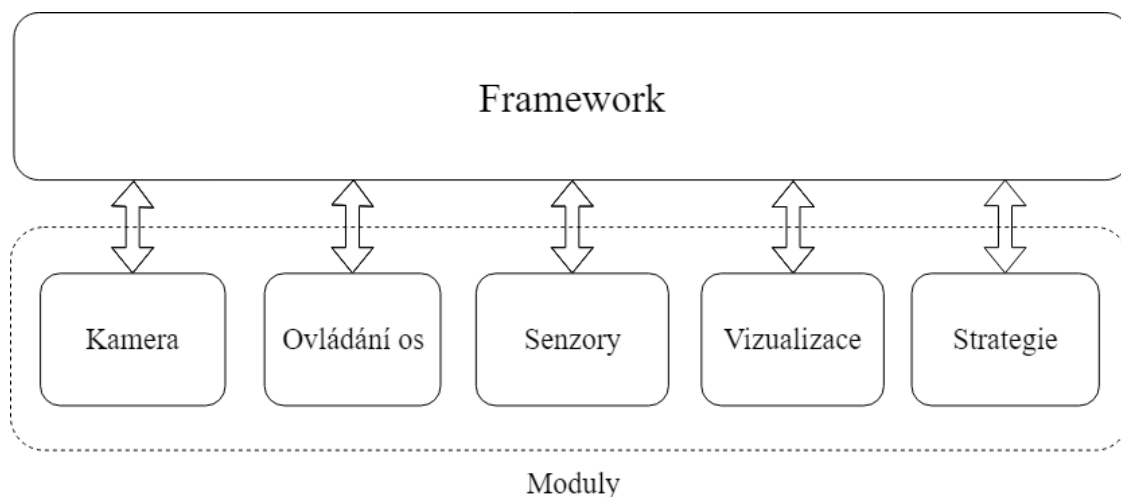


Obr. 35: Bezpečnostní E-stop tlačítko s vypínačem na přední desce [42]

Pro detekci aktivaci bezpečnostních prvků slouží X20 systém X20SLX842. Implementací celého safety systému se zabývala mimo jiné loňská práce Romana Paráka. [42]

6 SPOLUPRACUJÍCÍ PROJEKTY

Cílem letošních prací bylo modularizovat software, optimalizovat pohyb os, zrychlit detekci míče a protihráče, upravit stávající vizualizaci a vylepšit strategii hry. Kromě výše popsaných problematik bylo také potřeba vytvořit software pracující jako spojující článek mezi jednotlivými softwarovými moduly. Názorné schéma naznačující rozdělení jednotlivých modulů lze vidět na Obr. 36. Více o komunikaci mezi moduly a časové návaznosti jednotlivých programů pojednává práce Ondřeje Švandy.



Obr. 36: Schéma rozdělení softwarového řešení na moduly

Vzhledem k velké komplexnosti každé z těchto částí byla práce rozdělena celkem mezi pět lidí. Kromě mimo rámcových aktivit bylo rozdělení práce následující:

- Modul pro ovládání os a dynamická optimalizace pohybu je tématem této bakalářské práce.
- Způsob detekce míčku pomocí kamery COGNEX je řešen v práci Simony Sijkové. [43]
- Alternativní detekci míčku za pomoci externího hardwaru – Raspberry Pi se zabýval Alex Korotynskiy.
- Framework, komunikace mezi moduly a simulace míčku bylo téma práce Ondřeje Švandy. [44]
- Vylepšená strategie přepracovaná do upravitelného modulu a vypracování simulačního prostředí pro testování strategie byla náplň práce Pavla Vaverky. [45]

Velmi klíčová byla neustálá komunikace celého týmu. Díky modularitě byla umožněna částečná samostatná práce, ale komunikace skrz globální strukturu podléhala určitým pravidlům. Podrobnosti o samotném modulu pro ovládání os spolu s částí globální struktury *Motion* určenou pro komunikaci frameworku s tímto modulem bude pojednáno v následující kapitole.

7 NÁVRH MODULU PRO ŘÍZENÍ OS

Pro úspěšnou implementaci RSF je důležitá rychlá a přesná odezva herních os na pokyny strategie. Zároveň je ale potřeba brát ohled na limity motorů a samotné konstrukce stolu. V následující kapitole bude shrnut postup při návrhu modulu pro řízení os. Bude stručně popsán způsob konfigurace AS pro správné propojení motorů se softwarem. Následně bude zmíněn algoritmus inicializace a řešení případných chyb. Důležitým tématem je komunikace s hlavní logikou RSF (frameworkem) a zpracování pokynů. V neposlední řadě bude také popsána implementace safety prvků.

7.1 Konfigurace AS

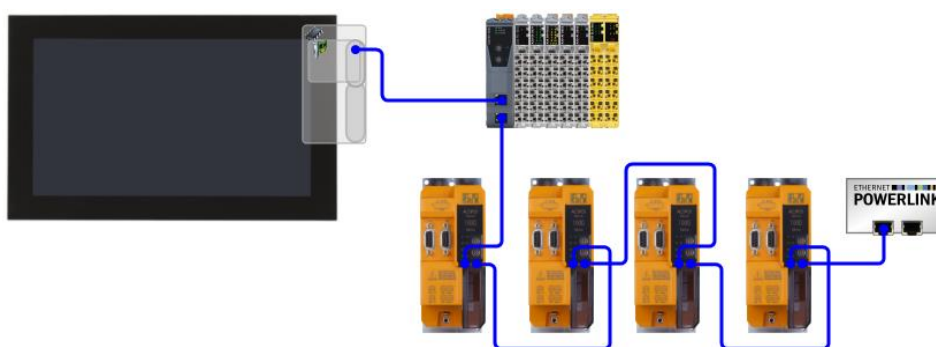
Prvním důležitým krokem při konfiguraci AS je zajištění používání nejnovějších verzí runtime a softwarových komponentů. AS nabízí možnost automatického stažení nesouhlasných verzí. Seznam aktuálně používaných verzí je vidět na Obr. 37.

Component	Preferred	In use
Automation Runtime	D4.34	D4.34
Safety Release	1.10	1.10
Visual Components	V4.33.0	V4.33.0
mapp View	5.0.2	5.0.2
ACP10/ARNC0 (Motion)	3.16.2	3.16.2
mapp	1.60.0	1.60.0

Obr. 37: Aktuální seznam využívaných runtime verzí

7.1.1 Hardwarová konfigurace

Po stáhnutí a nainstalování nejnovějších verzí softwarových komponentů je zapotřebí vytvořit hardwarovou konfiguraci celého systému. I přes to, že byl projekt zakládán od začátku, bylo možno využít konfiguraci připravenou z minulých let. Výhodou AS je plně grafické znázornění. Konfigurace je tak přehledná a snadno upravitelná. Samotné motory nebylo potřeba do konfigurace vkládat. Jsou připojeny k ACOPOSům typem EnDat, který zajistí načtení parametrů motoru bez potřeby manuálního zadávání.



Obr. 38: Hardwarová konfigurace RSF

7.1.2 Konfigurace os motorů

Při vkládání ACOPOS měničů do hardwarové konfigurace nabídne AS automatické okno s možnostmi nastavení samotných ovládaných os. V tomto kroku se nastavují základní parametry objektů os, přes které je potom možné motory programově ovládat. Vzhledem k modularizaci bylo domluveno, že se ke každé reálné ose vytvoří i osa virtuální, na které půjdou posléze testovat nedokonalosti strategie bez potřeby spouštění a inicializace reálného hardwaru. Pro každou osu byl potřeba zvolit specifický název, přes jehož referenci je poté možné danou osu v řídicím programu ovládat. Konfigurace rotačních motorů od firmy B&R proběhla bez problémů. Nastavení motorů lineárních musela být přeskočena a proběhla manuálně vzhledem ke skutečnosti, že motory nejsou dodávány firmou B&R. Výsledný seznam objektů os je vidět na Obr. 39.

Name	Type	Constant	Retain	Replicable	Description [1]
//////// Axis objects ////////// (generated automatically)					
DFRlin	ACP10AXIS_typ	☐	☐	☒	Object for real linear defender axis
DFRrot	ACP10AXIS_typ	☐	☐	☒	Object for real rotational defender axis
DFVlin	ACP10VAXIS_typ	☐	☐	☒	Object for virtual linear defender axis
DFVrot	ACP10VAXIS_typ	☐	☐	☒	Object for virtual rotational defender axis
FWRlin	ACP10AXIS_typ	☐	☐	☒	Object for real linear forward axis
FWRrot	ACP10AXIS_typ	☐	☐	☒	Object for real rotational forward axis
FWVlin	ACP10VAXIS_typ	☐	☐	☒	Object for virtual linear forward axis
FWVrot	ACP10VAXIS_typ	☐	☐	☒	Object for virtual rotational forward axis
GKRlin	ACP10AXIS_typ	☐	☐	☒	Object for real linear goalkeeper axis
GKRrot	ACP10AXIS_typ	☐	☐	☒	Object for real rotational goalkeeper axis
GKVlin	ACP10VAXIS_typ	☐	☐	☒	Object for virtual linear goalkeeper axis
GKVrot	ACP10VAXIS_typ	☐	☐	☒	Object for virtual rotational goalkeeper axis
MDRlin	ACP10AXIS_typ	☐	☐	☒	Object for real linear midfielder axis
MDRrot	ACP10AXIS_typ	☐	☐	☒	Object for real rotational midfielder axis
MDVlin	ACP10VAXIS_typ	☐	☐	☒	Object for virtual linear midfielder axis
MDVrot	ACP10VAXIS_typ	☐	☐	☒	Object for virtual rotational midfielder axis

Obr. 39: Seznam objektů všech nakonfigurovaných os

7.1.3 Nastavení parametrů motorů

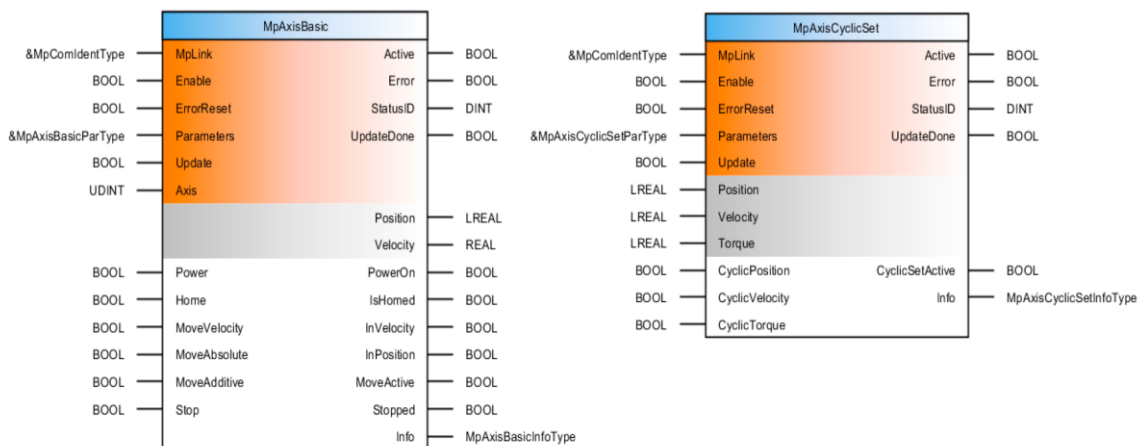
Pro správný chod motoru je nezbytně důležité nastavit správné inicializační parametry obou motorů. Přes rozlišení polohy, parametrů kaskádních regulátorů po limitní hodnoty polohy, rychlosti a zrychlení. Většina těchto hodnot byla převzata z řešení minulých let. Upravit bylo potřeba pouze limitní hodnoty polohy a tzv. Jolt time, který definuje, jak velká strmost se může objevit na rampě zrychlení. Více o dynamické optimalizaci bude pojednáno v další kapitole. Tyto změny byly provedeny pro rotační i pro lineární motory.

Name	Value	Unit	Description
ACP10AXIS_typ			
dig_in			Digital Inputs
encoder_if			Encoder Interface
limit			Limit value
parameter			Parameters
v_pos	30000.0	Units/s	Speed in positive direction
v_neg	30000.0	Units/s	Speed in negative direction
a1_pos	490000.0	Units/s ²	Acceleration in positive direction
a2_pos	490000.0	Units/s ²	Deceleration in positive direction
a1_neg	490000.0	Units/s ²	Acceleration in negative direction
a2_neg	490000.0	Units/s ²	Deceleration in negative direction
t_jolt	0.04	s	Jolt time
t_in_pos	0.0	s	Settling time before message 'In Position'
pos_sw_end	2000	Units	Positive SW end
neg_sw_end	-821	Units	Negative SW end

Obr. 40: Limitních hodnoty pro lineární motor v inicializační tabulce parametrů

7.1.4 Konfigurace mapp Motion

K inicializaci a následnému cyklickému řízení byla využita část komplexní technologie mapp Motion. Konkrétní využití funkčních bloků byly MpAxisBasic a MpAxisCyclicSet. MpAxisBasic slouží k rychlé inicializaci, výčet stavových veličin a základním pohybům motorů. Nevýhoda je však nemožnost zadávat cyklické, často se měnící polohy bez nutnosti aktualizaci celého bloku. K tomu se s výhodou využívá funkční blok MpAxisCyclicSet, kde se po zadání požadované polohy motor okamžitě začne pohybovat. Schéma vstupních a výstupních typů funkčních bloků lze vidět na Obr. 41.



Obr. 41: Funkční bloky MpAxisBasic a MpAxisCyclicSet

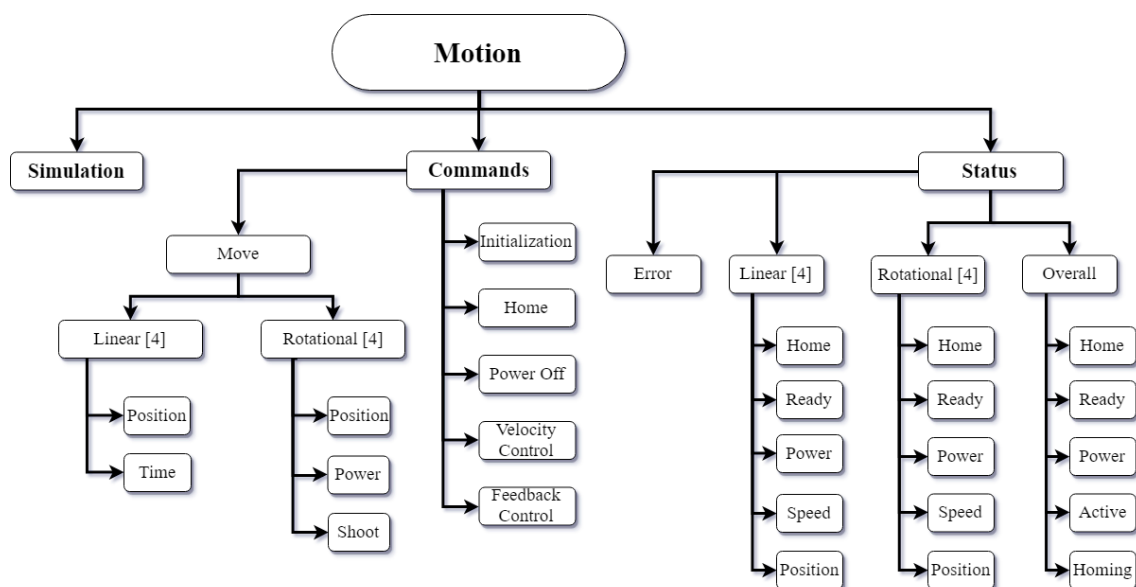
Z obrázku je patrné, že kromě reference na objekt osy (axis) je ke kompletní konfiguraci potřeba také reference na tzv. MpLink a strukturu parametrů. Globální proměnné mapp komponentů (typu MpComIdentType) specifické pro každou ovládanou osu byly vytvořeny v konfigurační části programu. Struktury parametrů potom manuálně skrz tabulky proměnných. Seznam globálních proměnných mapp komponentů pro reálné lineární a rotační motory útočné a prostřední osy lze vidět na Obr. 42. Proměnné nezobrazených reálných a virtuálních os se kromě názvu proměnné v ničem neliší.

Name	Value	Unit	Description
mappRotFWR			
Axis configuration	Init Parameter Table		Initial axis configuration defined by the Init Parameter Table or by this file
Energy measurement	None		
Alarms	MpAlarm		
mappLinFWR			
Axis configuration	Init Parameter Table		Initial axis configuration defined by the Init Parameter Table or by this file
Energy measurement	None		
Alarms	MpAlarm		
mappRotMDR			
Axis configuration	Init Parameter Table		Initial axis configuration defined by the Init Parameter Table or by this file
Energy measurement	None		
Alarms	MpAlarm		
mappLinMDR			
Axis configuration	Init Parameter Table		Initial axis configuration defined by the Init Parameter Table or by this file
Energy measurement	None		
Alarms	MpAlarm		

Obr. 42: Globální proměnné mapp komponentů útočné a prostřední osy

7.2 Komunikace s Frameworkem

K zajištění obousměrné komunikace bylo potřeba vytvořit globální strukturu umožňující jak čtení stavů motorů, tak zápis příkazů ze strany frameworku. Schéma struktury lze vidět na Obr. 43.



Obr. 43: Schéma komunikační struktury *Motion*

Proměnná *simulation* indikuje, zda budou příkazy aplikovány na virtuální nebo reálné osy. Podstrukturu *commands* využívá framework pro zadávání příkazů modulu pro řízení os. Je skrze ni možné motory inicializovat, zreferovat do výchozí pozice, vypnout, nastavit požadovanou pozici nebo přepínat mezi typy dynamické optimalizace.

Podstruktura *status* slouží ke čtení aktuálních stavů motorů. V obecné části *overall* lze vyčíst celkový stav řízených os. Jakmile jakákoliv osa nesplňuje například status *ready*, ve struktuře *overall* se projeví změnou statusu *ready* z hodnoty 1 na hodnotu 0. K detailnější informaci statusů konkrétních os lze přistoupit skrz podstruktury *Rotational* a *Linear*. Každá z těchto struktur obsahuje čtyři řízené osy a ke každé informaci o stavu a aktuální pozici a rychlosti osy.

Mezi základní statusy os patří:

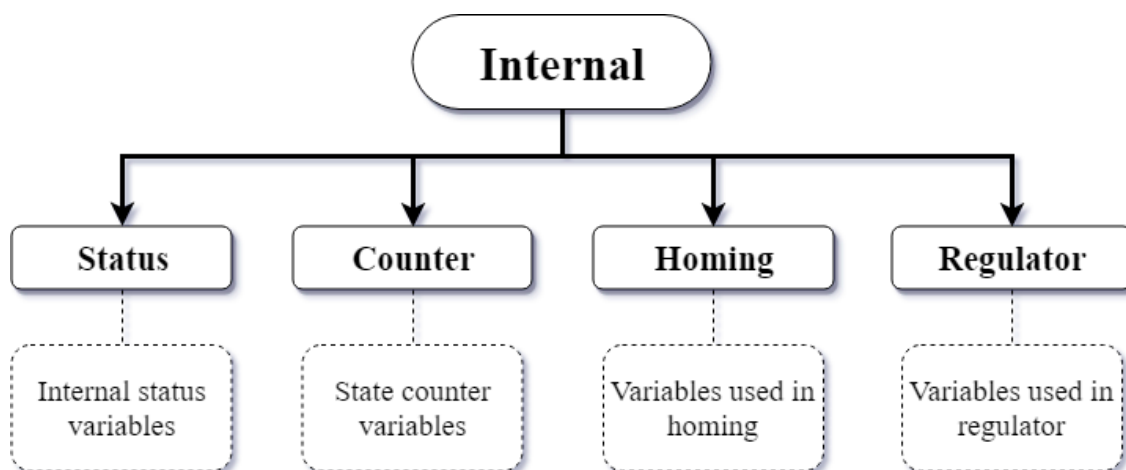
- *Power* – indikuje, zda je osa zapnutá.
- *Home* – indikuje, zda je daná osa zreferovaná k základní poloze.
- *Ready* – stav, kdy je osa připravená k pohybu do žádané polohy.

Kromě těchto dvou statusů se ve struktuře *overall* vyskytují ještě tyto proměnné:

- *Homing* – značí stav os, při kterém je aktivní vyhledávání referenční polohy.
- *Active* – indikuje, zda jsou aktivní oba funkční bloky. *MpAxisBasic* a *MpAxisCyclicSet*.

7.3 Struktura programu

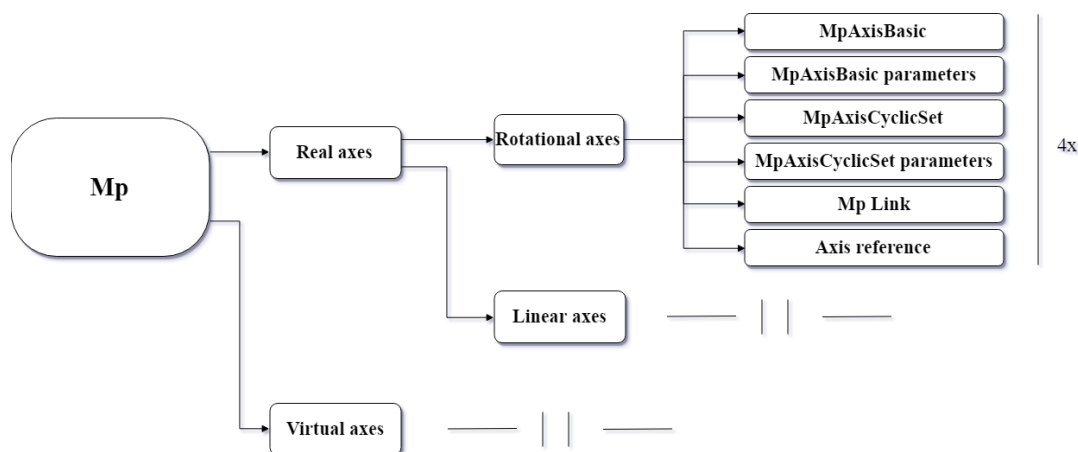
Kromě komunikační struktury bylo potřeba vytvořit i strukturu pro interní hodnoty proměnných (Obr. 44). Pomocí této struktury bylo možno ukládat dočasné hodnoty do uspořádané formy. Zároveň struktura sloužila pro sledování chybných zpráv a počítání doby každého programového stavu. Častým problémem bylo zastavení inicializačního procesu na některém ze stavů pospaných níže. Proto pokud tento čas překročil kritickou dobu, osa byla restartována a proces daného stavu proběhl znovu.



Obr. 44: Schéma interní struktury *Internal*

Struktura je pro její obsáhlost uvedena pouze schematicky. Kromě dvou výše zmíněných podstruktur byla zapotřebí samostatná podstruktura pro parametry automatické hledání referenční polohy (*homing*) a struktura pro parametry dynamické optimalizace (*regulator*). Celý obsah je k vidění v programu přiloženém v příloze D.

Pro uložení referencí na objekty, struktury potřebné pro správnou konfiguraci funkčních bloků *MpAxisBasic* a *MpAxisCyclicSet* a instance funkčních bloků samotných byla vytvořena ještě jedna struktura s názvem *Mp* (Obr. 45). S tou se v průběhu programu zásadněji nepracuje. Slouží pouze pro přehledné a jednoduché uložení potřebných dat.

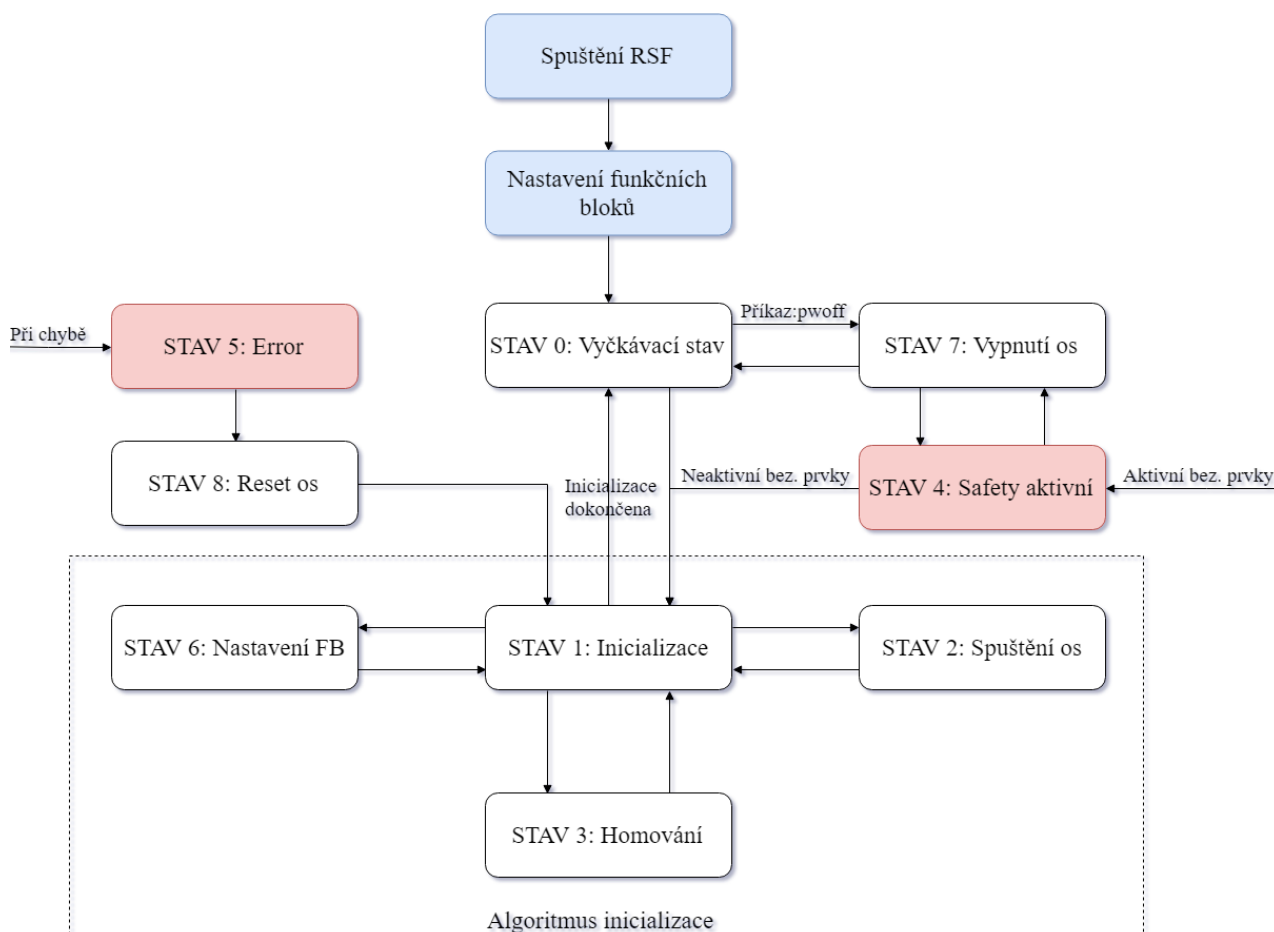


Obr. 45: Schéma struktury *Mp*

7.4 Algoritmus modulu

Přesun osy do žádané polohy z velké části řeší funkční blok MpAxisCyclicSet sám. Cílem modulu pro řízení os je tedy hlavně správná interpretace příkazů zasílaných z frameworku a jejich bezchybné vykonání. Stěžejním úkonem je právě inicializace veškerých motorů a případné řešení chybových hlášek. Zároveň bylo potřeba, aby modul okamžitě reagoval na výstup ze safety modulu a při opětovném uvolnění E-Stop tlačítka, respektive znovu zapnutí optické brány okamžitě inicializoval motory pro plynulé pokračování hry.

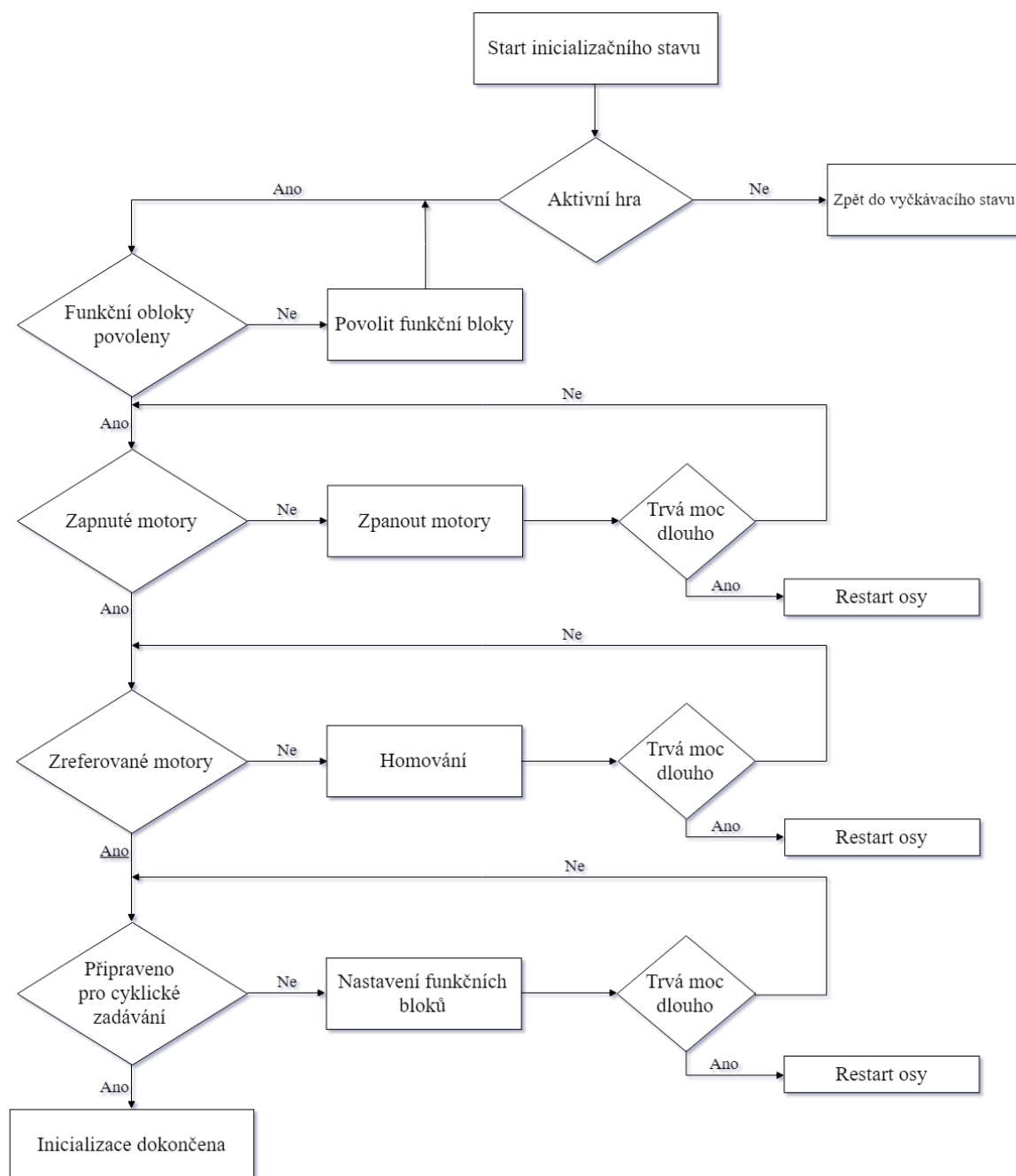
Celá struktura programu se tak dá rozdělit na tři části. Část inicializační, kdy algoritmus kontroluje stavy všech motorů a v závislosti na jejich statusu pokračuje v inicializačním postupu znázorněném na Obr. 47. Část reakční, která řeší chybové hlášení a stará se o výstupy ze safety modulu. A část, která zajišťuje zapisování aktuálních stavů do komunikační struktury a přeposílá informace o žádané poloze do funkčních bloků MpAxisCyclicSet. Zjednodušený vývojový diagram pro tento modul je vidět na Obr. 46.



Obr. 46: Zjednodušený vývojový diagram modulu pro řízení os

7.4.1 Algoritmus inicializace

Stav inicializace se díky níže zobrazené struktuře algoritmu může zavolat při jakékoli žádané změně statusů os. Například při příkazu žádající zreferování os, spuštěním inicializačního procesu se zároveň zkontroluje status zapnutí motoru stejně nezbytný pro úspěšné zreferování. Není potřeba tedy psát samostatný algoritmus pouze pro homování. Na veškeré inicializační příkazy vystačí jeden algoritmus. Zároveň se ve stavu kontroluje, zda je hra aktivní. Nedojde tak k inicializaci motorů pouhým aktivováním a deaktivováním bezpečnostních prvků stolu bez aktivní hry (kontroluje framework).



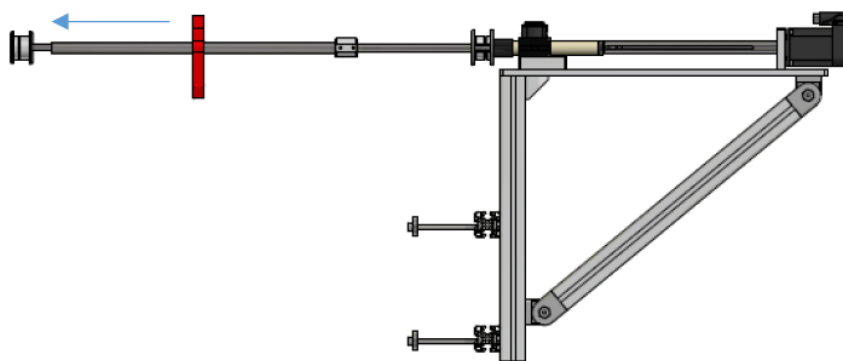
Obr. 47: Vývojový diagram inicializačního algoritmu

7.4.2 Algoritmus hledání referenční polohy

Určení počáteční polohy je jak pro rotační, tak pro lineární motory zásadní podmínkou pro správné a přesné řízení os. Pro RSF je zásadní, aby byla referenční poloha nalezena bez lidského zásahu. Rotační a lineární osa má v tomto ohledu odlišný přístup. Níže bude popsáno řešení pro oba druhy motorů.

Hledání referenční polohy lineárního motoru

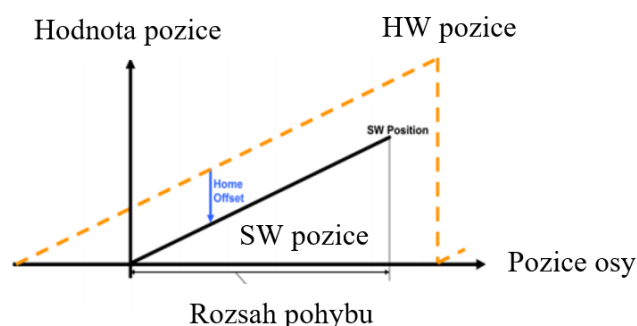
Pro nalezení referenční polohy lineárního motoru bylo potřeba z počátku nastavit konstantní rychlost v jednom směru (Obr. 48). Funkční blok MpAxisBasic umožňuje vyčítat hodnotu tzv. *lag error* pro každý motor. Tato hodnota odpovídá rozdílu reálné pozice a žádané v daném okamžiku. Při zablokování lineárního motoru překážkou (konečná poloha) začne *lag error* narůstat. Při dosažení určité kritické hodnoty algoritmus vyhodnotí dosažení referenční polohy a zreferuje osu.



Obr. 48: Inicializace lineárního motoru

Hledání referenční polohy rotačního motoru

Problém využívaného rotačního motoru byla absence absolutního enkodéru. Tedy po vypnutí a zapnutí motoru je informace o předchozí poloze ztracená. Řešení pro tento druh motoru vycházel z algoritmu navrženém v minulém roce. V diagnostickém nástroji *NcTest* bylo nastaveno absolutní inicializování osy (Obr. 49). Tím se vždy po spuštění detekovala poloha, který sice neobsahovala hodnotu absolutní pozice, ale dala se zní vyčíst pozice relativního natočení, což v tomto případě dostačuje. Přepočtem unikátním pro každou osu bylo pak zjištěno natočení oproti nulové pozici.

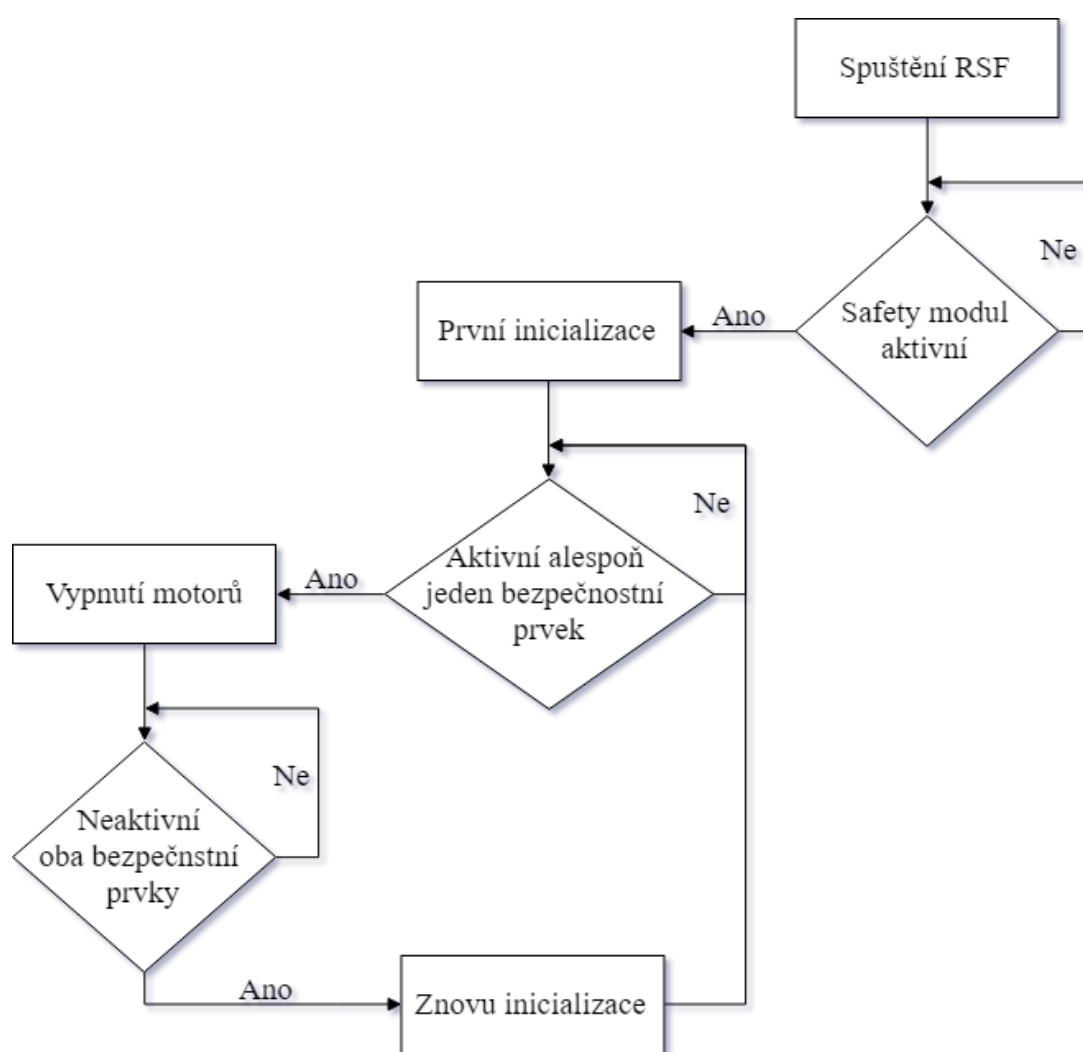


Obr. 49: Schéma principu absolutního inicializování rotační osy

7.5 Safety

Pro zajištění bezpečnosti lidské obsluhy byly implementovány dva základní prvky. E-stop tlačítko a optické brány. Tato kapitola pojednává o implementaci modulu, který dokáže na aktivaci těchto bezpečnostních prvků reagovat a vypnout napájení obou motorů respektive je opět po deaktivaci prvků znovu inicializovat.

Program, vytvořený v prostředí SafeDESIGNER a nahrávaný přímo do safety modulu X20, který zároveň při aktivaci bezpečnostních prvků hardwarově odpojuje motory od napájení, byl převzat z minulých let z práce Ing. Romana Paráka. Bylo potřeba dopsat pouze softwarový modul, který posléze zasílá informaci do modulu pro řízení os a zároveň restartuje hardwarový safety systém X20 při opětovné deaktivaci bezpečnostních prvků. Vývojový diagram safety modulu je vidět na Obr. 50.



Obr. 50: Vývojový diagram pro modul safety

7.6 Modul pro pokyny ze strategie

Pro usnadnění práce strategií s komplexními pohyby byl paralelně s modulem pro řízení os také vytvořen modul pro aplikaci složitějších, avšak ve své podstatě stále stejných a opakovaných pohybů os. Jde především o různé druhy střel a nahrávek. Velký důraz je při takovýchto pohybech na sladění pohybu obou v mnoha ohledech velmi rozdílných motorů. S Pavlem Vavrkou, který se vývoji strategie zabýval, bylo dohodnuto vytvořit prozatím tři druhy střel.

- Střela s nastavitelnou silou
- Střela při zastavení míčku zezadu figurky s nastavitelnou silou
- Střela s předcházející nahrávkou do boku s nastavitelnou silou

Seznam takto definovaných pokynů není pevný a je možné jednoduše přidat další druhy složitých přeprogramovaných pohybů.

Pro dosažení nezávislých pohybů rotačního a lineárního motoru jsou v programu využívány dva stavové automaty běžící nezávisle na sobě pro každý z motorů. V další části budou pouze stručně shrnuty principy pohybů obou motorů pro každý pokyn. Video, zobrazující příslušnou střelu v praxi jsou k dispozici v příloze D.

7.6.1 Střela

Nejjednodušší ze zmíněných tří. V principu se jedná pouze o pohyb rotačního motoru. Celý pohyb sestává z náprahu a samotné střely. Velikost náprahu je úměrná žádané síle a je experimentálně nastavená tak, aby úhlová rychlost střelící figurky byla maximální v počáteční poloze před pokynem. Po dokončení střely se figurka vrací zpět do počáteční polohy.

7.6.2 Střela zezadu

Střela v případě, že se míč nachází za střelící figurkou. Figurka tak musí míč bez kolize obejít a dostatečně rychle vystřelit s předem nastavenou silou. Pro co nejrychlejší provedení je nutné provádět pohyby lineárního a rotačního pohybu paralelně. Důležitý je počáteční pohyb. Při zastaveném míčku je potřeba figurku mírně nadzvednout. V okamžiku odpoutání je možné s figurkou uhýbat do boku. V průběhu pohybu a v určité limitní vzdálenosti opět rotační motor otáčí figurkou na připravovaný náprah. Ten je dokončen ve chvíli, kdy je lineární motor zpátky na počáteční poloze, tedy na úrovni míčku. Poté následuje střela s nastavenou silou.

7.6.3 Střela s přihrávkou

Střela s přihrávkou se využívá v případě, že vertikální poloha hráče s míčem nesouhlasí s polohou brány. V takovém případě by střela netrefila bránu a bezvýznamně se odrazila od boční stěny. Velmi důležitý parametr při podobném pohybu je rychlost nahrávky a následný zpětný pohyb hráče na střeleckou pozici. Zároveň jsou parametry této akce specifické pro každou osu. Tento pohyb vyžaduje dlouhé testování a není zatím funkční.

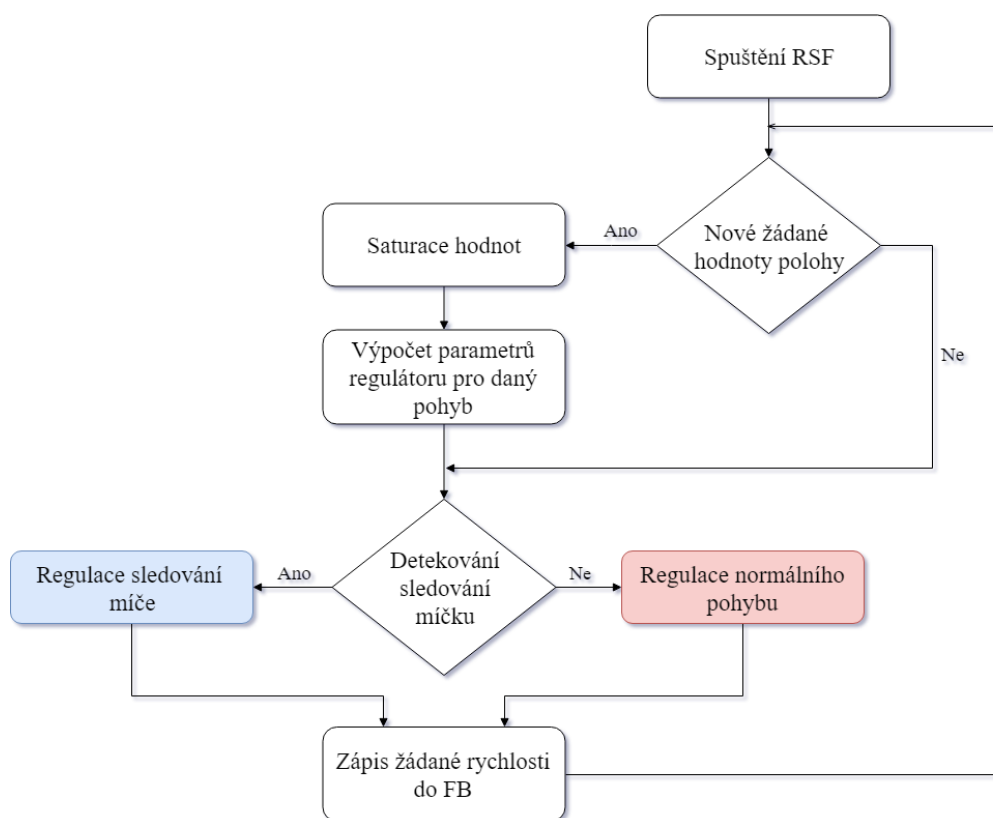
8 MODIFIKACE DYNAMIKY POHYBU

Vzhledem k velké dynamice lineárních motorů firmy LinMot byl vytvořen modul pro dynamickou optimalizaci pohybu os. Základní vlastnosti funkčního bloku MpAxisCyclicSet neumožňovali dynamicky měnit rychlost a zrychlení při nastavení žádané polohy. Bylo možno upravit nastavení bloku tak, aby cyklicky přijímal žádanou rychlost ovšem bez možnosti upřesnění, na jaké pozici má osa s danou rychlostí zastavit. Osy se tak na zadanou pozici vždy posouvali maximální rychlostí s maximálním zrychlením. To zejména při častých změnách polohy zapříčinilo otřesy celého RSF.

V této kapitole bude shrnut návrh modulu implementující dva přepínatelné způsoby nadřazené regulace obou typů motorů. Zároveň zde bude přiblížen návrh pro optimalizaci sledování polohy míčku figurkami.

8.1 Struktura programu

Princip činnosti modulu pro dynamickou optimalizaci byl navržen tak, aby z hodnot žádané pozice a času, za který má osa na dané pozici nejpozději být (zadávané strategií), dopočítal hodnoty rychlosti motoru posílané přímo do funkčního bloku MpAxisCyclicSet. V důsledku tak osa pojede vždy pouze takovou rychlostí, aby byla v zadané době na žádané pozici. Zjednodušený vývojový diagram pro obecný typ dynamického regulátoru lze vidět na Obr. 51.



Obr. 51: Zjednodušený vývojový diagram modulu pro dynamickou optimalizaci

Výpočet parametrů regulátoru stejně jako princip samotné regulace je specifický pro typ optimalizace. Jak bylo zmíněno výše, byly navrženy dva způsoby. Rychlostní a zpětnovazební.

8.2 Rychlostní regulace

Zásadním krokem pro funkční dynamickou optimalizaci bylo zajištění možnosti měnit cyklicky rychlost a polohu zároveň. Vzhledem k faktu, že do funkčního bloku MpAxisCyclicSet bylo možné zadávat pouze jednu z těchto žádaných hodnot, bylo pro účely optimalizace potřeba cyklicky ovládat rychlost a posléze motor zastavit na žádané poloze s minimálním překmitem. Rychlost pro daný pohyb zapisovaná do funkčního bloku MpAxisCyclicSet byla vypočítána podle vztahu:

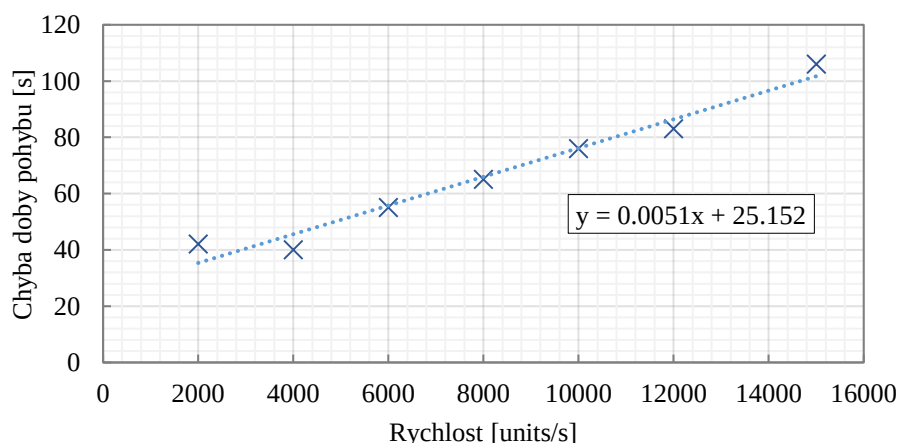
$$v_{teor} = \frac{abs(y_{\text{žád}} - y_{\text{akt}}) \cdot 1000}{t} \quad (1)$$

kde v_{teor} je teoretická rychlost pro daný pohyb, $y_{\text{žád}}$ je žádaná poloha, y_{akt} je aktuální poloha a t je zadaná doba pohybu do žádané polohy.

Ze vztahu je patrné, že vypočítaná rychlost by správně odpovídala době přesunu pouze pro ideální motor, který by dokázal zrychlit na libovolnou rychlost okamžitě. Pro malé rychlosti je tato chyba zanedbatelná, pro větší bylo potřeba tuto chybu kompenzovat. Výsledná rychlost byla pro hodnoty teoretické rychlosti v_{teor} větší jak 2000 units/s dána vztahem:

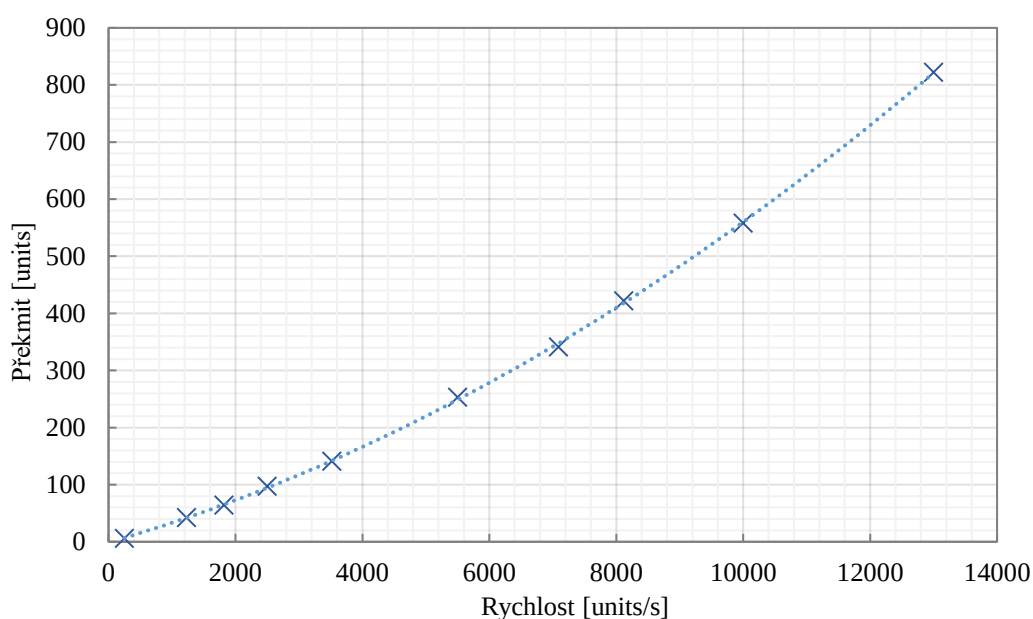
$$v_{\text{žád}} = \frac{abs(y_{\text{žád}} - y_{\text{akt}}) \cdot 1000}{t - (A \cdot v_{teor} + B)} \quad (2)$$

kde $v_{\text{žád}}$ je výsledná rychlost pohybu vždy počítána pouze pro novou žádanou polohu. Koeficienty A a B byly určeny experimentálně. Graf znázorňující dané měření je vidět na Obr. 52.



Obr. 52: Graf závislosti chyby doby pohybu na rychlosti

Vzhledem k tomu, že motor není ideální, samotný servozesilovač je nucen počítat rampu pro nárůst a pokles rychlosti resp. zrychlení. Vzdálenost, kterou motor na zastavení po nastavení rychlosti na nulu potřebuje je díky setrvačnosti motoru a počítaným rampám na servoměniči nelineárně závislá na aktuální rychlosti. Bylo tedy potřeba experimentálně zjistit průběh této závislosti a následně ji proložit polynomem 2. stupně. Závislost vzdálenosti definující změnu rychlosti na nulu (tedy překmit) na rychlosti je vidět na Obr. 53.



Obr. 53: Graf závislosti překmitu lineárního motoru na rychlosti

Výsledná rovnice polynomického proložení pak vychází:

$$y = 2 \cdot 10^{-6} \cdot x^2 + 0,0324 \cdot x - 1,484 \quad (3)$$

kde y je překmit lineárního motoru a x rychlost před začátkem zastavování.

Zastavením motoru před žádanou polohou o vzdálenost vypočítanou ze vztahu (1) bylo tedy možno v celku přesně ovládat motor za pomoci cyklicky zadávané rychlosti. Pro dosažení absolutně přesné polohy byla posléze využita zpětná vazba ve formě informace aktuální polohy motoru. Rychlost zapisovaná do funkčního bloku v určité malé vzdálenosti od žádané polohy byla dána vztahem:

$$v_{\text{žad}} = (y_{\text{žad}} - y_{\text{akt}}) \cdot q \quad (4)$$

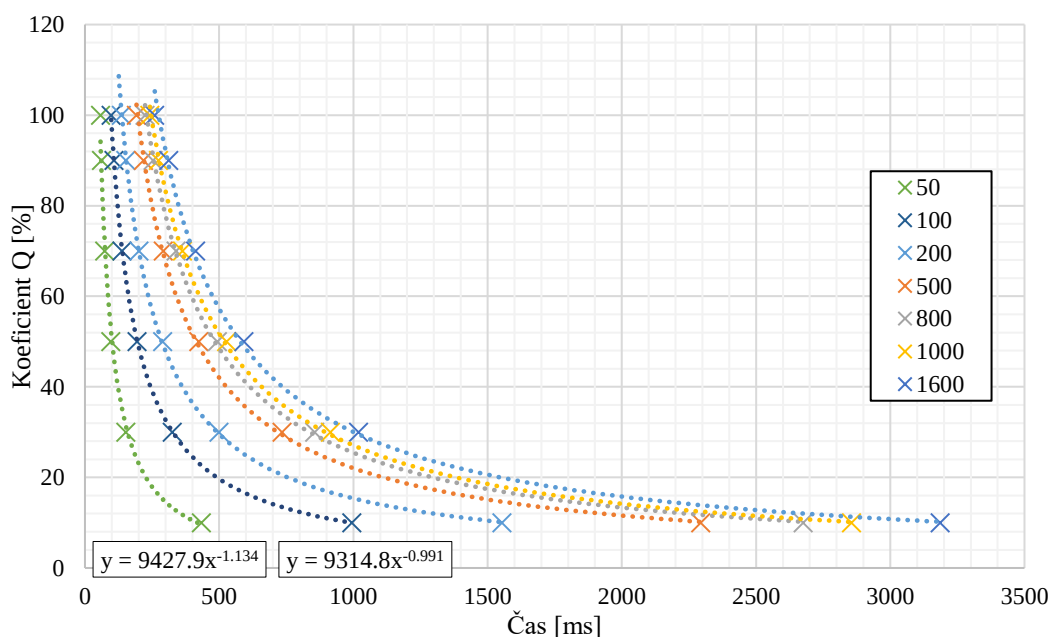
kde q je koeficient rychlosti zjištěný experimentálně.

Tato rychlost je počítána v každém cyklu, protože vzdálenost k žádané poloze je pro každý okamžik jiná.

8.3 Zpětnovazební regulace

Zpětnovazební regulace spočívá v ovládání rychlosti pomocí zpětné vazby po celý průběh pohybu. Pro výpočet rychlosti je využit vztah zmíněný výše (4). V tomto případě ale není zpětnovazební výpočet rychlosti pouze pro korekci malého překmitu, ale pro celý pohyb. Bylo nutné tedy koeficient rychlosti Q počítat pro každý nový pohyb znovu a to tak, aby celková doba pohybu do žádané polohy odpovídala době zadané strategií.

Analyticky vyjádřit vztah pro koeficient Q v závislosti na vzdálenosti a době pohybu se ukázalo jako téměř nemožné. Bylo nutné tedy experimentálně naměřit časy pohybu do určitých vzdáleností s daným koeficientem a tyto závislosti proložit vhodnými funkcemi. Nejprve byl experimentálně zjištěn maximální koeficient $Q_{\max}$, při kterém ještě motor dojel na žádanou pozici bez překmitu. Poté byly naměřeny hodnoty koeficientu vyjádřené jako procentuální část z hodnoty $Q_{\max}$ v závislosti na čase pohybu a celkové vzdálenosti. Tyto závislosti byly následně a proloženy mocninou funkcí. Celkový graf s vyznačenými měřeními vzdálenostmi je vidět na Obr. 54.



Obr. 54: Graf závislosti koeficientu Q na čase pohybu a vzdálenosti k žádané poloze

Při změně žádané polohy byl koeficient Q vypočítán z rovnice:

$$Q = (C \cdot d + D) \cdot t^{E \cdot d + F} \quad (5)$$

kde d je vzdálenost pohybu a t je zadaná doba pohybu. Koeficienty C , D , E a F jsou dány interpolací koeficientů mocninných funkcí proložení dvou sousedních vzdáleností. Například pro vzdálenost pohybu 80 unitů budou výsledné koeficienty mocninné funkce (popisující závislost koeficientu Q na době pohybu) odpovídat lineární interpolaci mezi koeficienty pro vzdálenost 50 a 100 unitů. Mocninné funkce proložení pro obě tyto vzdálenosti lze vidět na Obr. 54.

8.4 Optimalizace sledování míče

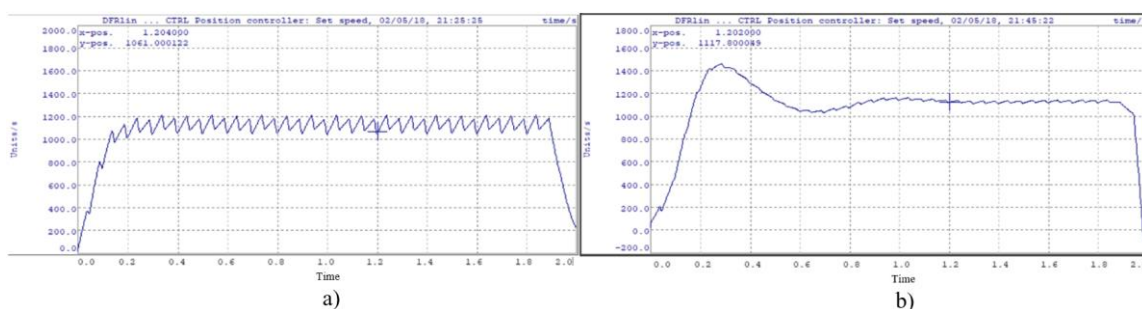
Výše byly stručně popsány algoritmy pro optimalizaci pohybů os. Při sledování míčku a tedy časté aktualizaci žádané polohy pouze o malé přírůstky se ale častý přepoččet parametrů regulátoru projevoval trhaným pohybem celé osy. Bylo tedy potřeba tento pohyb vyhladit.

Prvním krokem bylo zjištění, zda je právě míček sledován. Tento specifický druh pohybu os byl charakterizován častou změnou žádané polohy pouze o malý a stále velmi podobný přírůstek v jednom směru. Následné vyhlazení pohybu bylo zajištěno vždy přičtením pouze části nově vypočítané rychlosti k rychlosti původní. Velikost nově vypočítané rychlosti byl závislý na aktuální vzdálenosti od žádané polohy.

$$v_{vys} = v_{akt} + 0,002 \cdot abs(y_{\acute{z}ad} - y_{akt}) \cdot (v_{vyp} - v_{akt}) \quad (6)$$

kde v_{vys} je výsledná rychlost, v_{akt} je aktuální rychlost, $y_{\acute{z}ad}$ je žádaná poloha, y_{akt} je aktuální poloha a v_{vyp} je rychlost vypočítaná z předchozích kroků.

Pokud se nová žádaná hodnota lišila od původního trendu sledování, rychlost byla opět počítána normálním způsobem. Tím se zajistil vyhlazenější průběh při sledování míče a zároveň se nesnížila rychlost reakce na prudkou změnu směru. Rozdíl průběhu rychlosti bez optimalizace sledování a s optimalizací je vidět na Obr. 55.



Obr. 55: Průběh rychlosti při sledování míče a) bez optimalizace b) s optimalizací

Z grafu je patrné, že je při hladším průběhu delší náběh na odpovídající rychlost míče. Chyba je však v řádech milimetrů a dá se v tomto případě zanedbat.

8.5 Porovnání řešení

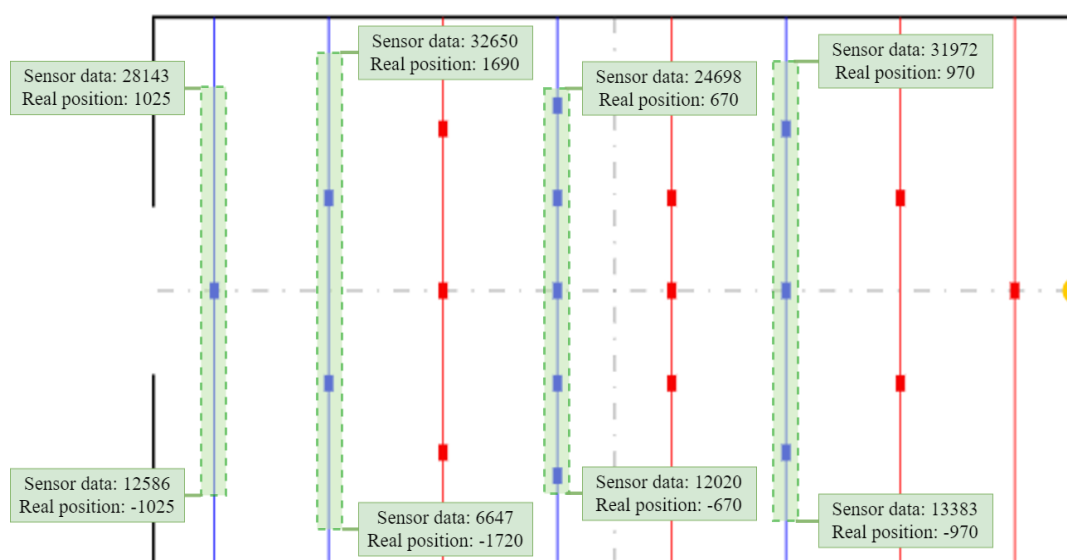
V jednom okamžiku lze provozovat pouze jeden typ dynamické optimalizace: rychlostní nebo zpětnovazební. Výhoda rychlostní spočívala v rychlejším dojezdu na určenou pozici. Zpětnovazební ale díky zpětné vazbě plynuleji dojížděla do místa zastavení. Čas, získaný rychlostní optimalizací navíc byl téměř zanedbatelný, a proto jako výchozí řešení byla zvolena optimalizace zpětnovazební. Mezi oběma typy lze ale během provozu RSF přepínat. Kompletní porovnání průběhů os zaznamenaných pomocí diagnostického nástroje NC Test v AS je k dispozici v příloze A a B

9 DETEKCE PROTIHRÁČE

Více použitelných vstupů do strategie znamená více možností pro komplexnější algoritmy a vyšší kvalitu hry. Jednou z nejdůležitější informací je informace o pozicích figurek protihráče. Hardwarové řešení bylo převzato z minulých let a je popsáno výše. Potřeba bylo tedy navrhnout modul zajišťující správnou interpretaci analogových výstupních hodnot ze snímačů a jejich následnou filtraci.

9.1 Přepočet hodnot

Závislost mezi výstupními hodnotami snímačů a reálnými hodnotami pozice os je čistě lineární. Pro návrh přepočtového vztahu bylo tedy potřeba naměřit pouze krajní hodnoty snímaných rozsahů. Hodnoty výstupu snímače spolu s reálnou pozicí osy lze vidět na Obr. 56.



Obr. 56: Hodnoty rozsahu snímání os protihráče

Hodnoty ze snímačů byli tedy následně přepočteny pomocí vztahu:

$$Y_{unit} = - \frac{(Y_{max_{unit}} - Y_{min_{unit}})}{(Y_{max_{sen}} - Y_{min_{sen}})} \cdot \frac{Y_{min_{sen}} + Y_{max_{sen}}}{2} \quad (7)$$

kde Y_{unit} je výsledná přepočítaná poloha osy, $Y_{max_{unit}}$ je hodnota maximální snímané polohy osy, $Y_{min_{unit}}$ je hodnota minimální snímané polohy osy, $Y_{max_{sen}}$ je výstupní hodnota snímače při maximální poloze osy a $Y_{min_{sen}}$ je výstupní hodnota snímače při minimální poloze osy. Všechny tyto naměřené hodnoty jsou vypsány pro každou osu na Obr. 56 výše.

9.2 Filtrace

Pro spolehlivý algoritmus filtrace s rychlou reakcí na velkou změnu dat bylo potřeba časté testování na RSF. Pro tyto účely byl vytvořen simulační program ve vývojovém prostředí MATLAB, který umožnil důkladné testy i mimo reálný hardware. Samotná testovací trajektorie simulované osy byla navržena tak, aby v ní byly promítnuty v co největší míře všechny druhy častých lidských pohybů (Obr. 57).

V první části osa přetrvávala v klidné poloze. Následný rychlý skok ji uvedl do plynulého pohybu, který byl asi v polovině opět narušen reprezentací náhlé reakce lidského oponenta. Šum byl vytvořen přičítáním náhodné hodnoty normálního rozložení k teoreticky ideální poloze. Samotná hodnota simulovaného šumu byla pro názornější vizuální výsledek oproti reálnému šumu několikrát znásobena.

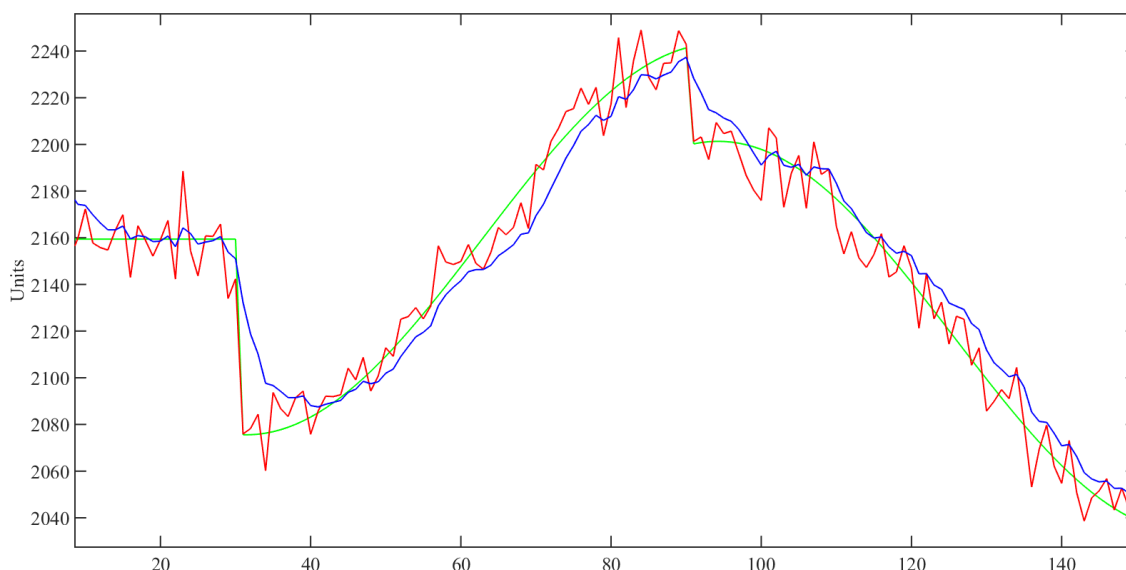
9.2.1 Filtrace dolní propusti

Pro filtraci dat senzorů byly navrženy celkem tři algoritmy. První z nich vycházel z diskrétního zápisu přenosové funkce pro dolní propust.

$$Y_{fil} = \frac{(K \cdot Y_{fil}(i-1) + Y_{sen}(i))}{(K+1)} \quad (8)$$

kde Y_{fil} je výsledná filtrovaná hodnota, K je koeficient filtrace, $Y_{fil}(i-1)$ je předchozí filtrovaná hodnota a $Y_{sen}(i)$ je aktuální nefiltrovaná hodnota polohy.

Výsledky tohoto filtru byly však nedostačující. Pro rozumnou filtraci hodnot při klidové poloze byl signál podstatně zpožděn při rychlých změnách (Obr. 57). Byly proto navrženy další dva upravené algoritmy založené na podobném principu.



Obr. 57: Průběh ideální polohy (zelená), naměřené polohy (červená) a filtrované polohy (modrá) pro 1. návrh filtrace

9.2.2 S omezením časté změny

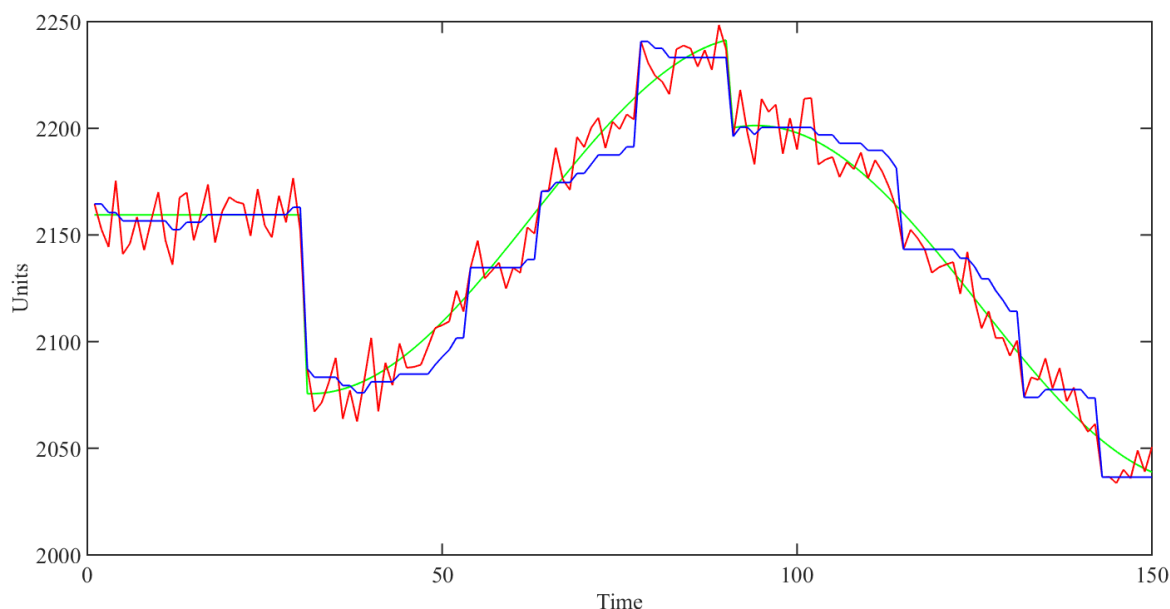
Cílem druhého návrhu bylo zajištění rychlé reakce na prudkou změnu polohy a zároveň omezení časté změny hodnoty, která se tak snažila být po co nejdelší možnou dobu konstantní. Až po překročení dané odchylky předchozí filtrované hodnoty od hodnoty naměřené byla nová hodnota skokem změněna. Algoritmus tedy využíval tři vztahy pro různé rozdíly filtrovaných a naměřených hodnot. Pokud byl rozdíl předchozí filtrované a aktuální naměřené hodnoty menší jak určitá experimentálně zjištěná limitní hodnota, nová filtrovaná hodnota se přímo rovnala hodnotě předchozí. Omezila se tak častá změna filtrované polohy i při zanedbatelných změnách naměřené polohy.

V případě většího rozdílu ale s hodnotou stále pod hranicí druhé limitní hodnoty odpovídala filtrovaná poloha vztahu:

$$Y_{fil} = Y_{fil}(i - 1) + K \cdot (Y_{sen}(i) - Y_{fil}(i - 1)) \quad (9)$$

K předchozí filtrované poloze byla tedy přičtena vždy pouze část rozdílu mezi předchozí filtrovanou a aktuální naměřenou hodnotou. Velikost této části byla dána koeficientem K který byl zjištěn experimentálně.

V případě hodnoty rozdílu nad zmíněnou druhou limitní hodnotou se poté filtrovaná hodnota polohy rovnala přímo aktuální naměřené poloze. Docílilo se tak rychlé reakce na náhle prudké změny. Výsledný graf ze simulačního softwaru znázorňující průběh ideální, naměřené a filtrované polohy osy je vidět na Obr. 58.



Obr. 58: Průběh ideální polohy (zelená), naměřené polohy (červená) a filtrované polohy (modrá) pro 2. návrh filtrace

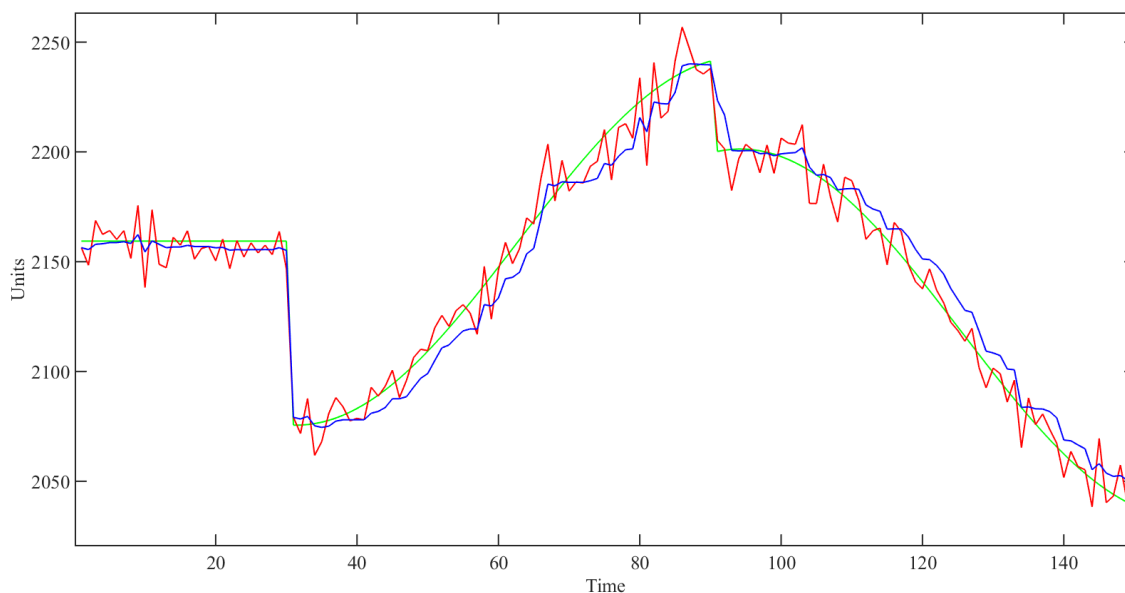
9.2.3 Bez omezení časté změny

Alternativa k předchozímu návrhu byla verze bez omezení častých malých změn hodnot. Ze tří různých stavů se tak funkce zredukovala na dva. Místo toho byl implementován návrh nekonzstantního koeficientu filtrace. Tedy oproti předchozím dvou návrhům byl koeficient závislý na velikosti rozdílu filtrované a naměřené polohy. Výsledný vztah vztahující se opět pro oblast, ve kterém je zmíněný rozdíl menší jak limitní hodnota byl roven:

$$Y_{fil} = Y_{fil}(i-1) + K_{max} \cdot \frac{abs(Y_{sen}(i) - Y_{fil}(i-1))}{Y_{max}} \cdot (Y_{sen}(i) - Y_{fil}(i-1)) \quad (10)$$

kde K_{max} je maximální hodnota koeficientu filtrace a Y_{max} je zmíněná limitní hodnota. Lineární závislostí hodnoty koeficientu filtrace na rozdílu předchozí filtrované a naměřené hodnoty se zajistilo výrazné tlumení vlivu malých změn na výslednou polohu a zároveň redukovalo zpoždění při rozdílech větších.

Pro hodnoty rozdílu vyšší jak limitní hodnota se opět filtrovaná poloha rovnala naměřené. V praxi tento typ filtrace vyšel jako nejpoužitelnější a dosahoval na reálném hardwaru překvapivě excelentní výsledky. V simulaci byla kvalita filtrace zkreslená velkými hodnotami šumu, které byly na RSF několikanásobně menší. Průběh ideální, naměřené a filtrované polohy simulované osy je vidět na Obr. 59.



Obr. 59: Průběh ideální polohy (zelená), naměřené polohy (červená) a filtrované polohy (modrá) pro 3. návrh filtrace

10 ZÁVĚR

V rámci bakalářské práce byl navržen a využit modul pro řízení os RSF spolu s návrhem a implementací dynamické optimalizace pohybu. Práce byla rozšířená o nepovinnou část zabývající se detekcí protihráče a filtrací snímaných dat algoritmem navrženým ve vývojovém prostředí MATLAB.

V úvodu práce bylo shrnuto řešení RSF institucí z celého světa. Pro nastudování různorodých názorů na řešení specifických problémů doprovázející vývoj RSF a následnou inspiraci při vlastní implementaci byly u každého projektu shrnuty zajímavé a úspěšné přístupy k problematice detekce míče spolu s polohou os protihráče, řízení os, řešení konstrukce a návržení strategie. Zmínka byla i o samotné firmě B&R Automation a portfoliu nabízených produktů pro získání základní představy hlavního přínosu společnosti v oblasti automatizace. V neposlední řadě byly shrnuty principy řízení mechatronických soustav pohonů s důrazem kladeným na regulaci synchronních motorů nejčastěji využívaných firmou B&R.

Při návrhu modulu pro řízení os byla hlavním cílem rychlá odezva na příkazy z frameworku a bezchybné ovládání synchronních motorů. Bylo tedy nutné navrhnout konvenci globální komunikační struktury pro efektivní mezimodulovou komunikaci (kapitola 7.2 *Komunikace s Frameworkem*). Neméně důležitá byla konfigurace motorů a samotný algoritmus inicializace s automatickým hledáním referenční polohy os. Ta musela probíhat bez lidského zásahu v rozumně krátké době. Struktura celého modulu pro řízení os spolu s popisem jednotlivých algoritmů je přiblížena v kapitole 7.3 *Struktura programu*. Mimo řídicí program byl pro provedení složitějších pohybů vytvořen paralelní doplňující modul pro příkazy ze strategie implementující tři základní střely popsané v kapitole 7.6 *Modul pro pokyny ze strategie*. Názorná videa prakticky zobrazující implementované střely jsou k dispozici v příloze D. Modul safety byl při návrhu z velké části inspirován řešením z minulých let, které nevykazovalo problémy v žádném ohledu. Struktura a implementace upraveného modulu je popsána v kapitole 7.5 *Safety*.

V rámci řešení problematiky dynamické optimalizace bylo zapotřebí zajistit možnost cyklického zadávání jak polohy, tak rychlosti, což v aktuální verzi funkčního bloku MpAxisCyclicSet nebylo k dispozici. Jedině tak bylo možné regulovat dynamiku pohybu. Pro tento problém byly navrženy dva typy regulace. Rychlostní a zpětnovazební. Detailní popis principu cyklického zadávání obou žádaných veličin spolu s výpočtem parametrů pro zmíněné typy regulace je přiblížen v kapitole 8 *Modifikace dynamiky pohybu*. Po rozsáhlém testování vyšla jako nejvíce vyhovující regulace zpětnovazební. Lze však mezi oběma typy v průběhu hry přepínat. Grafické znázornění průběhů polohy os v závislosti na čase jsou pro oba typy k dispozici v příloze A. Mimo jiné byla navržena i optimalizace sledování polohy míče. Tento specifický pohyb os byl doprovázen značně trhaným pohybem, který bylo potřeba eliminovat (kapitola 8.4 *Optimalizace sledování míče*). Detailní porovnání průběhů os před a po optimalizaci sledování míče jsou opět k dispozici v příloze B.

Při návrhu algoritmu filtrace bylo třeba častého testování na reálném hardwaru. Pro umožnění práce i mimo polohu RSF byl navržen program ve vývojovém prostředí MATLAB simulující výstupní hodnoty ze snímačů polohy i spolu s parazitním šumem. V simulačním programu byly následně navrženy celkově tři přístupy pro filtraci šumu. Popis principu všech tří navržených algoritmů je k vidění v kapitole 9.2 *Filtrace*. Po testování na reálném RSF vyšel nejlépe návrh vlastního filtračního algoritmu s proměnným koeficientem filtrace přiblíženém v podkapitole 9.2.3 *Bez omezení časté změny*.

Vzhledem k modularizaci a rozdělení práce mezi pět lidí bylo během vývoje občas nutné spoléhat na pokroky v ostatních oblastech. Proto byla nezbytná neustálá komunikace a častá vzájemná výpomoc. Během testovacích týdnů docházelo díky dlouhému provozu RSF a poměrně velké třecí síle mezi statorem a rotorem lineárního motoru u útočné osy k velkému přehřívání. Lineární motor byl proto osazen větráčkem zapojeným do I/O systému X20. Po diskuzi s firmou SEKO-K byla magnetická tyč motoru také poslána na vyčištění, které problém z části vyřešilo. Motor se posléze přestal neustále přehřívát. Výsledné řešení RSF dokázalo zejména díky poměrně rychlé detekci míče a sofistikované komunikaci mezi všemi moduly obstát proti průměrnému hráči. Videá obsahující záznam několika testovacích her jsou k dispozici v příloze D. Zvýšením snímkovací frekvence a doladěním strategie by RSF byl nepochybně schopný lidského protivníka i porazit.

11 SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] MYSLIVEC, Vojtěch. Robotický stolní fotbal, Praha, květen 2015. Diplomová práce. České vysoké učení technické v Praze, Fakulta elektrotechnická, Katedra řídicí techniky. Vedoucí diplomové práce Ing. Pavel Burget, Ph.D.
- [2] OTRADOVSKÝ, Radek. Robotický stolní fotbal - detekce polohy protihráče. Vysoké učení technické v Brně. Fakulta strojního inženýrství, 2017
- [3] PESSINA, Laure-Anne. Robots that fold and play table football. SCHOOL OF ENGINEERING STI: École polytechnique fédérale de Lausanne EPFL [online]. Lausanne, 2013 [cit. 2018-03-20]. Dostupné z: <http://sti.epfl.ch/page-97901-en.html>.
- [4] 2015 EPFL, All brawn, little brains: EPFL students' table-football robot, [online]. [Cit. 2018-03-20]. Dostupné z: <http://actu.epfl.ch/news/all-brawn-little-brains-epfl-students-tablefootba/>.
- [5] This Robot Is Better Than Most Humans At Foosball [online]. [cit. 2018-04-25]. Dostupné z: <https://www.youtube.com/watch?v=UdKBPbV29ek>
- [6] WEIGEL, Thilo. KiRo: A Table Soccer Robot Ready for the Market. Institut für Informatik, Universität Freiburg, 2002, , 2-6 [cit. 2018-03-20]. Dostupné z: <http://ftp.informatik.uni-freiburg.de/documents/papers/ki/weigel-ki2005.pdf>
- [7] Pilz at Motek 2016: safe drive solutions for assembly and handling technology. *Pilz: The spirit of safety* [online]. Ostfildern, 2016 [cit. 2018-03-22]. Dostupné z: <https://www.pilz.com/en-INT/company/press/messages/articles/088991>.
- [8] Pilz Belgium. Pilz Robo Kicker – Man vs. Machine. [video]. Pilz Belgium s.r.o [cit. 2018-03-22]. Dostupné z: <https://www.youtube.com/watch?v=GjHuUx3JNm0>
- [9] Alsalihi, A.; Najjar, K.; Van Scoy, B.; Zifer, J. Automated Foosball Table [PDF dokument]. The University of Akron, November 28, 2011 [cit. 2018-03-23]. Supervisor Dr. Hartley, Dr. Tran. Dostupný z: <https://www.uakron.edu/dotAsset/1e2fb3d4-8c59-475e-9473-ed98b2504f17.pdf>.
- [10] MAREČEK, Petr. Robotický stolní fotbal. Vysoké učení technické v Brně. Fakulta strojního inženýrství, 2016.
- [11] LEE, D.J.in cooperation with the students. A.I. Foosball: Humans vs. Robots [video] Birmingham Young University, Computer engineering, Birmingham, 2016 [cit. 2018-03-23] Dostupné z: <https://www.youtube.com/watch?v=VVimaZmNZZg>
- [12] CROSBIE, J. Watch BYU Students Lose to Their Own Foosball-Playing A.I. Robot [článok] Jack, Inverse's Associate News Editor, is based in Brooklyn, 2016 [cit. 2018-03-23] Dostupné z: <https://www.inverse.com/article/14800-watch-byu-students-lose-to-their-own-foosball-playing-a-i-robot>
- [13] B&R: Bernecker + Rainer Industrie-Elektronik Ges.m.b.H. In: Wikipedia: the free encyclopedia [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2018-04-05]. Dostupné z: <https://en.wikipedia.org/wiki/B%26R>.
- [14] B&R. B&R Perfection in Automation [online]. 2017, [cit. 2018-04-05]. Dostupné z: <https://www.br-automation.com/en/perfection-in-automation/>
- [15] Vaculikova, Eva. Společnost B&R bilancuje. Automa, 2009 [cit. 2018-04-05], roč. 19., č. 12, s. 12-13. SSN 12010-9592. Dostupný z: http://automa.cz/Aton/FileRepository/pdf_articles/40133.pdf.

- [16] HAND, Aaron. ABB to Acquire Factory Automation Player B&R. AutomationWorld [online]. April 4, 2017 [cit. 2018-04-13]. Dostupné z: <https://www.automationworld.com/article/technologies/plcs-pacs/abb-acquire-factory-automation-player-br>
- [17] ACOPOStrak. Br-automation [online]. [cit. 2018-04-25]. Dostupné z: <https://www.br-automation.com/en/products/versatile-transport-systems/acopostrak/>
- [18] Experience B&R's world premiere. Youtube [video]. [cit. 2018-04-25]. Dostupné z: <https://www.youtube.com/watch?v=g-iXUTT3UME>
- [19] Software: B&R Automation Studio 4. Br-automation[online]. [cit. 2018-04-13]. Dostupné z: <https://www.br-automation.com/en/products/software/>
- [20] Mapp Technology. Br-automation [online]. [cit. 2018-04-13]. Dostupné z: <https://www.br-automation.com/en/technologies/mapp-technology/>
- [21] ŠPAČEK, M. Propojení PC a PLC pomocí Ethernet Powerlink. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2010. 48 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Petr Malounek.
- [22] MRTVÝ, B. Řízení synchronních pohonů. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2011. 64 s. Vedoucí diplomové práce prof. Ing. Petr Pivoňka, CSc..
- [23] ACOPOS. Br-automation [online]. [cit. 2018-04-22]. Dostupné z: <https://www.br-automation.com/en/products/motion-control/acopos/>
- [24] I/O systems. Br-automation [online]. [cit. 2018-04-22]. Dostupné z: <https://www.br-automation.com/cs/produkty/io-systems/>
- [25] Bílek, K. Systém X20 – v inovacích je konjunktura stále [článek]. Automa.cz, 2005, [cit. 2018-04-22]. Dostupné z: http://automa.cz/cz/casopis-clanky/system-x20-v-inovacich-je-konjunktura-stale-2005_02_30320_2176/
- [26] X67 System. Br-automation [online]. [cit. 2018-04-24]. Dostupné z: <https://www.br-automation.com/en/products/io-systems/x67-system/>
- [27] B+R automatizace, spol. s r.o. Panel PC, vizualizácia alebo riadenie? [článek]. Atpjournalsk, 2011, [cit. 2018-04-24]. Dostupné z: http://www.atpjournalsk/buxus/docs/atp_12_2011_24.pdf
- [28] Panel PC 2100 multi-touch. Br-automation [online]. [cit. 2018-04-24]. Dostupné z: <https://www.br-automation.com/en/products/industrial-pcs/panel-pc-2100-multi-touch/>
- [29] PARÁK, Roman. Robotický stolní fotbal - herní strategie. Vysoké učení technické v Brně. Fakulta strojního inženýrství, 2017.
- [30] JEDINÝ, Lukáš. Robotický stolní fotbal. Vysoké učení technické v Brně. Fakulta strojního inženýrství, 2016.
- [31] Components of a drive system. Introduction to Motion Control: Školící materiál. V2.0.0.1. 2017, s. 9.
- [32] Stejnoseměrné stroje jak se o nich psalo kdysi ... ElektriKa[online]. [cit. 2018-04-27]. Dostupné z: <https://elektrika.cz/data/clanky/stejnosemerne-stroje>
- [33] POHL, L. Robustní řízení elektrických pohonů [online]. Brno: Vysoké učení technické v Brně. Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií. 2015.
- [34] Princip - asynchronní motor. Pohonnatechnika [online]. [cit. 2018-04-27]. Dostupné z: <http://www.pohonnatechnika.cz/skola/motory/asynchronni-motor/princip-asynch-motoru>

- [35] Synchronous motors. Introduction to Motion Control: Školící materiál. V2.0.0.1. 2017, s. 15-16.
- [36] Linear motors. Introduction to Motion Control: Školící materiál. V2.0.0.1. 2017, s. 18-19.
- [37] Inverters. Introduction to Motion Control: Školící materiál. V2.0.0.1. 2017, s. 30-32.
- [38] MRTVÝ, B. Řízení synchronních pohonů. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2011. 64 s. Vedoucí diplomové práce prof. Ing. Petr Pivoňka, CSc..
- [39] MAREČEK, Petr. Robotický stolní fotbal. Vysoké učení technické v Brně. Fakulta strojního inženýrství, 2016.
- [40] OTRADOVSKÝ, Radek. Robotický stolní fotbal - detekce polohy protihráče. Vysoké učení technické v Brně. Fakulta strojního inženýrství, 2017
- [41] BUBENÍK, L. Model robotického stolního fotbalu. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2017. 54 s. Vedoucí bakalářské práce prof. Ing. Petr Pivoňka, CSc.
- [42] PARÁK, Roman. Robotický stolní fotbal - herní strategie. Vysoké učení technické v Brně. Fakulta strojního inženýrství, 2017.
- [43] SIJKOVÁ, S. Robotický stolní fotbal - optimalizace snímání hrací plochy. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2018. XY s. Vedoucí bakalářské práce Ing. et Ing. Stanislav Lang, Ph.D.
- [44] ŠVANDA, O. Robotický stolní fotbal – systémová integrace. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2018. 71 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. et Ing. Stanislav Lang, Ph.D.
- [45] VAVERKA, P. Robotický stolní fotbal - herní strategie. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2018. XY s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Roman Parák.

12 SEZNAM OBRÁZKŮ

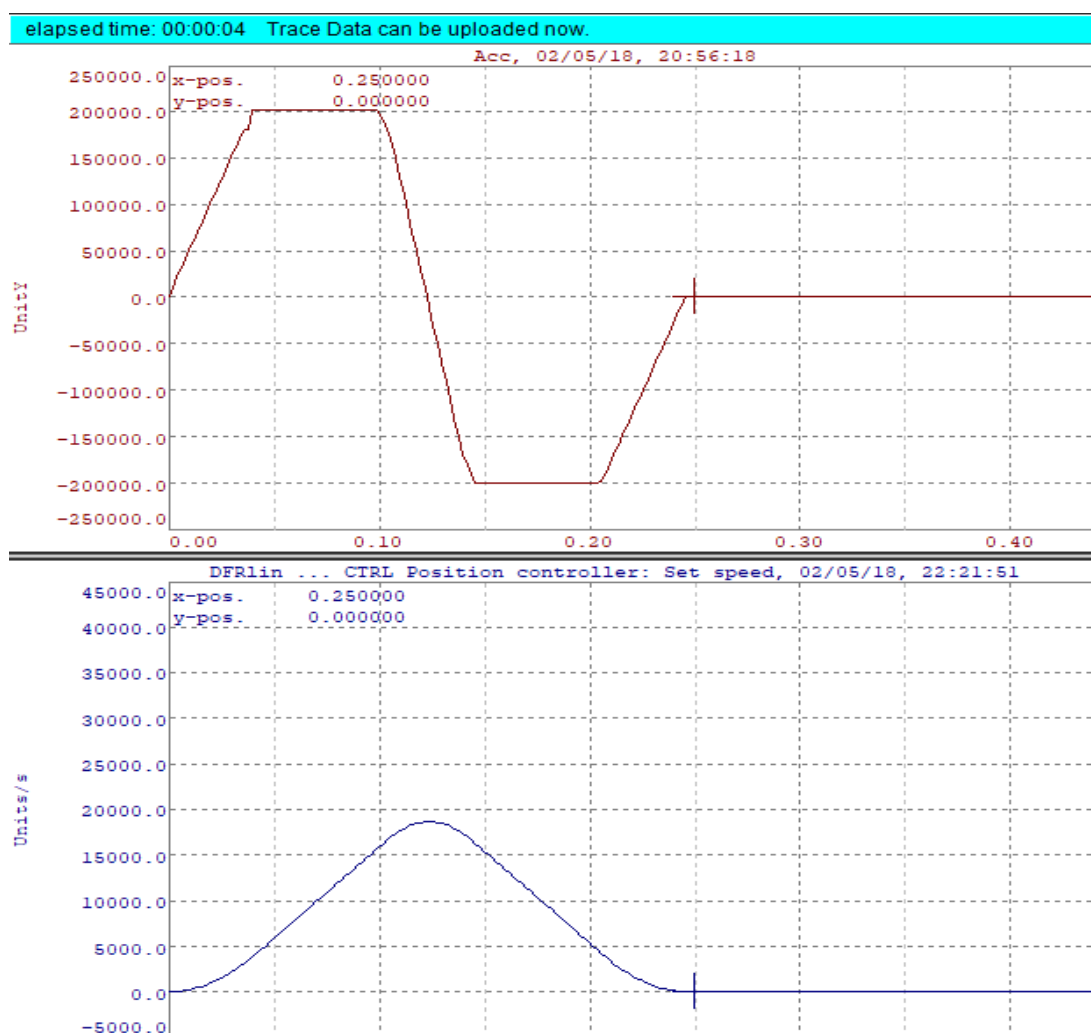
Obr. 1 : Schéma uspořádání servomotorů [1]	17
Obr. 2 : Plastová šneková násada určená pro detekci polohy os protihráče. [5]	18
Obr. 3 : Detail struktury počítačem ovládané tyče. [6].....	19
Obr. 4 : Pohled na vnitřek stolu odhalující řídicí jednotky a stojan infračervené kamery se zrcadlem. [6].....	19
Obr. 5 : Optická brána zajišťující bezpečný zásah do hrací plochy i při aktivní hře. [8]	20
Obr. 6 : Pohled shora na herní plochu RSF od firmy PILZ [8]	20
Obr. 7 : Princip zapojení a uspořádání infračervených LED diod a tranzistorů [9] .	21
Obr. 8 : Umístění kamery RSF studentů z univerzity Brigham Younga [11].....	22
Obr. 9 : Logo společnosti B&R Automation [14]	23
Obr. 10 : Volně programovatelný PLC Unicontrol z roku 1980 [15].....	23
Obr. 11 : Znázornění doplňujícího se sortimentu společností B&R a ABB [16]	24
Obr. 12 : Detail magnetického dopravníku v systému ACOPOStrak [18].....	24
Obr. 13 : Náhled na uživatelské rozhraní Automation Studio V4 [19].....	25
Obr. 14 : Znázornění architektury EPL [21].....	26
Obr. 15 : ACOPOS Micro (vlevo) a synchronní motor 8JSA (vpravo) nabízený firmou B&R [23]	27
Obr. 16 : Rozdělení modulu systému X20 na svorku, modul s elektronikou a sběrnice modul [25]	28
Obr. 17 : Výkonnostní panel PC 2100 multi-touch nabízený firmou B&R [28].....	28
Obr. 18 : Schéma základních komponentů mechatronické soustavy pro řízení pohonů	29
Obr. 19 : Zjednodušená konstrukce stejnosměrného motoru s komutátorem [31]...	30
Obr. 20 : Schéma rotujícího magnetického pole statoru asynchronního motoru protínající tyče rotorové klece [34].....	31
Obr. 21 : Schéma synchronního motoru s budícím vinutím a vystouplými póly. [35]	32
Obr. 22 : Schéma synchronního lineárního motoru s permanentními magnety [36]	32
Obr. 23 : Zapojení výkonové elektroniky ve frekvenčním měniči [37]	33
Obr. 24 : Princip pulsně šířkové modulace [37]	34
Obr. 25 : Schéma řídicí struktury servoměniče.	34
Obr. 26 : Návrh pojízdného kabinetu s umístěním prvků od Ing. Petra Marečka [39]	35
Obr. 27 : Nosná konstrukce pro osvětlení navržená Bc. Lubomírem Bubeníkem ...	36
Obr. 28 : Schéma uložení pohonů navržené Ing. Petrem Marečkem [39].....	36
Obr. 29 : Řešení detekce polohy protihráče [40]	37
Obr. 30 : Schéma upevnění fotoelektrického snímače s odrazovými zrcadly [41] ..	37
Obr. 31 : Vizualizace vytvořená pomocí technologie MappView Ing. Romanem Parákem [42].....	38
Obr. 32 : Moduly X20 systému	39
Obr. 33 : Uživatelský panel PC 5AP933.156B-00 [42].....	39
Obr. 34 : Optická brána umístěná nad hrací plochou RSF [42].....	40
Obr. 35 : Bezpečnostní E-stop tlačítko s vypínačem na přední desce [42]	40
Obr. 36 : Schéma rozdělení softwarového řešení na moduly	41
Obr. 37 : Aktuální seznam využívaných runtime verzí	43
Obr. 38 : Hardwarová konfigurace RSF	43

Obr. 39 : Seznam objektů všech nakonfigurovaných os	44
Obr. 40 : Limitních hodnoty pro lineární motor v inicializační tabulce parametrů ..	44
Obr. 41 : Funkční bloky MpAxisBasic a MpAxisCyclicSet	45
Obr. 42 : Globální proměnné mapp komponentů útočné a prostřední osy	45
Obr. 43 : Schéma komunikační struktury <i>Motion</i>	46
Obr. 44 : Schéma interní struktury <i>Internal</i>	47
Obr. 45 : Schéma struktury <i>Mp</i>	47
Obr. 46 : Zjednodušený vývojový diagram modulu pro řízení os	48
Obr. 47 : Vývojový diagram inicializačního algoritmu	49
Obr. 48 : Inicializace lineárního motoru	50
Obr. 49 : Schéma principu absolutního inicializování rotační osy	50
Obr. 50 : Vývojový diagram pro modul safety	51
Obr. 51 : Zjednodušený vývojový diagram modulu pro dynamickou optimalizaci..	53
Obr. 52 : Graf závislosti chyby doby pohybu na rychlosti.....	54
Obr. 53 : Graf závislosti překmitu lineárního motoru na rychlosti	55
Obr. 54 : Graf závislosti koeficientu Q na času pohybu a vzdálenosti k žádané poloze	56
Obr. 55 : Průběh rychlosti při sledování míče a) bez optimalizace b) s optimalizací	57
Obr. 56 : Hodnoty rozsahu snímání os protihráče.....	59
Obr. 57 : Průběh ideální polohy (zelená), naměřené polohy (červená) a filtrované polohy (modrá) pro 1. návrh filtrace	60
Obr. 58 : Průběh ideální polohy (zelená), naměřené polohy (červená) a filtrované polohy (modrá) pro 2. návrh filtrace	61
Obr. 59 : Průběh ideální polohy (zelená), naměřené polohy (červená) a filtrované polohy (modrá) pro 3. návrh filtrace	62

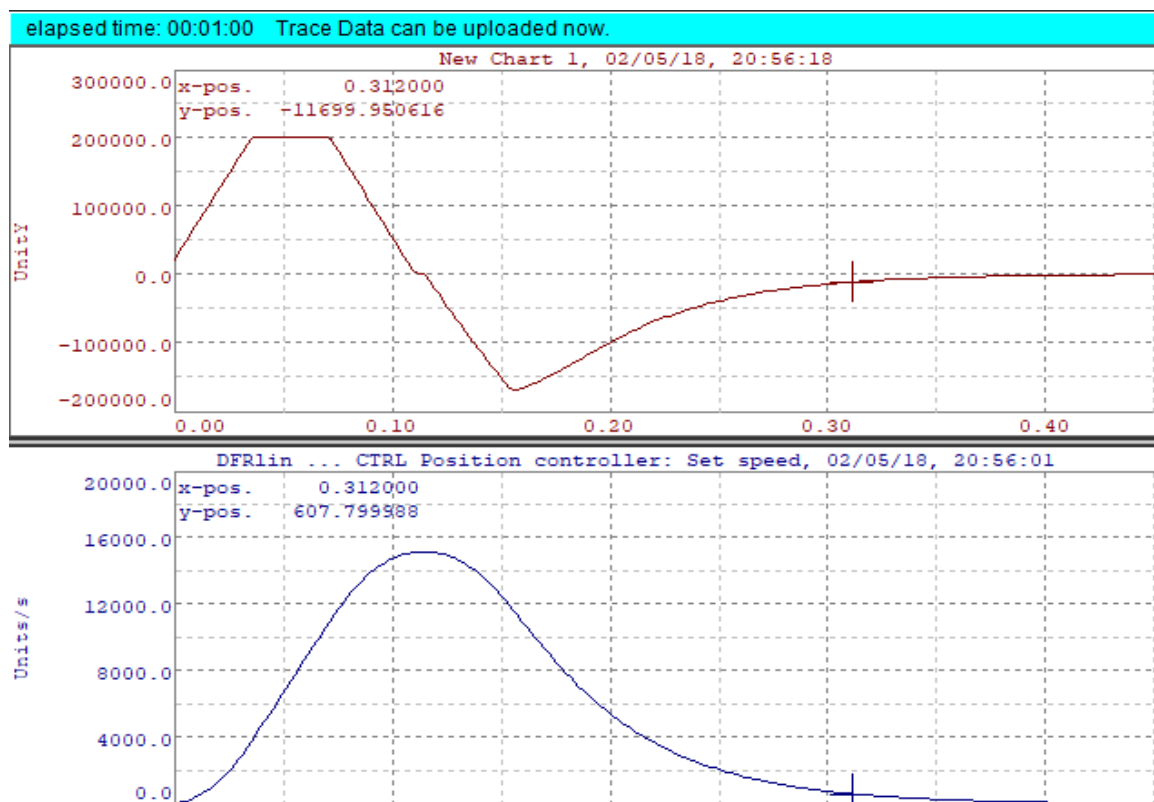
14 SEZNAM PŘÍLOH

- Příloha A. Průběhy zrychlení a rychlosti pro různé typy dynamické optimalizace
- Příloha B. Průběhy zrychlení a rychlosti při sledování polohy míčku
- Příloha C. Fotografie konstrukčních prvků
- Příloha D. Flash-disk

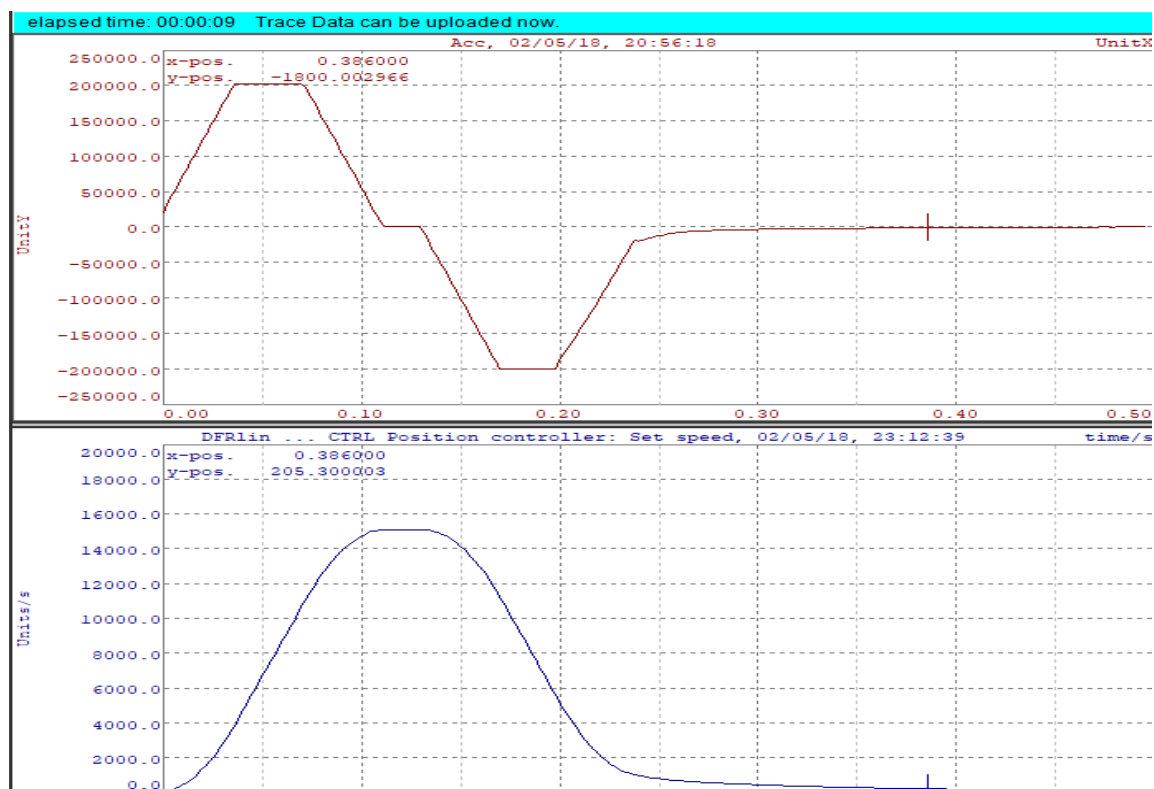
A. PRŮBĚHY ZRYCHLENÍ A RYCHLOSTI PRO RŮZNÉ TYPY DYNAMICKÉ OPTIMALIZACE



Obr. 1: Průběh zrychlení a rychlosti při posuvu do maximální vzdálenosti bez dynamické optimalizace

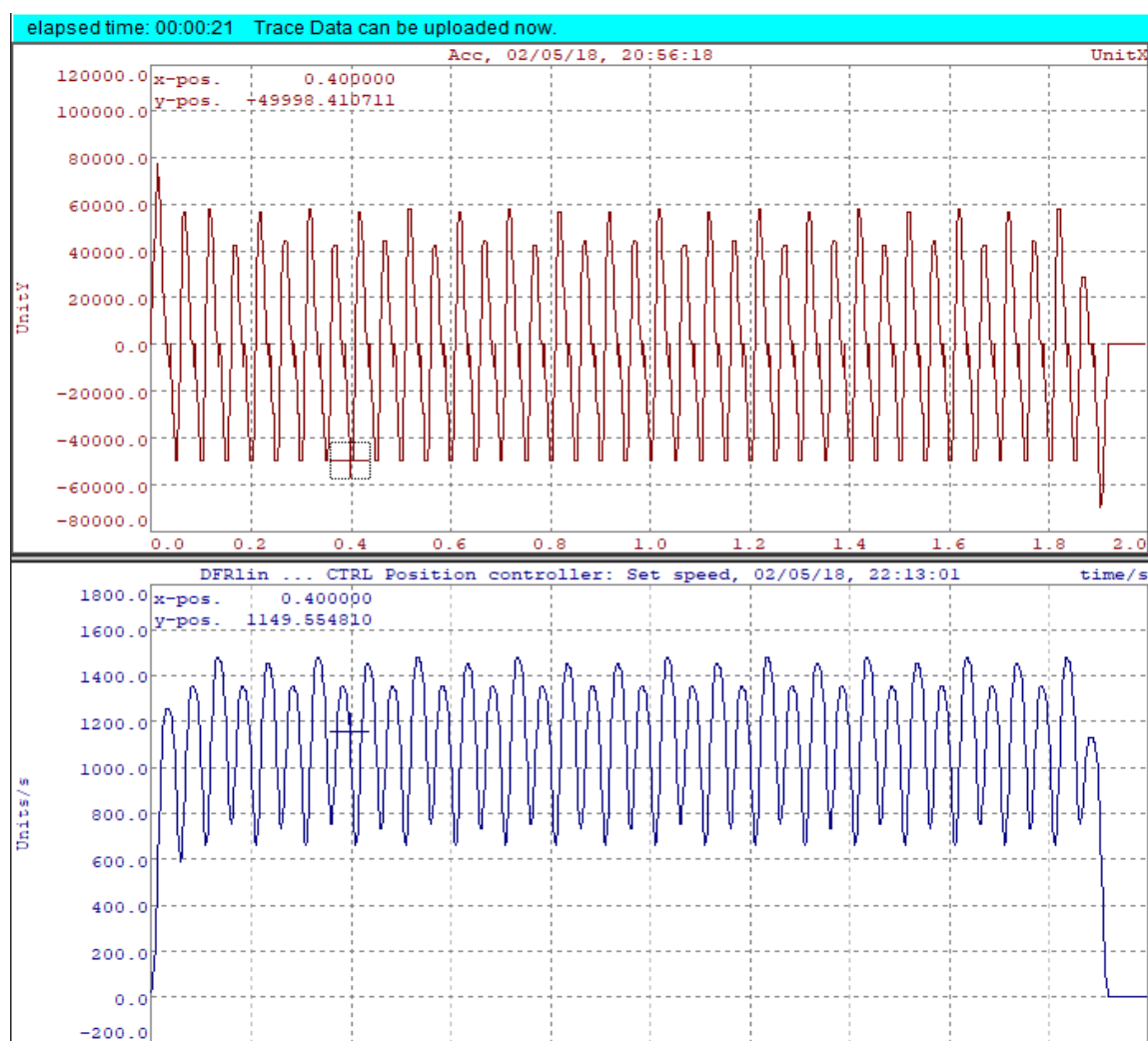


Obr. 2: Průběh zrychlení a rychlosti při posuvu do maximální vzdálenosti zpětnovazební regulací a při maximálním koeficientu Q

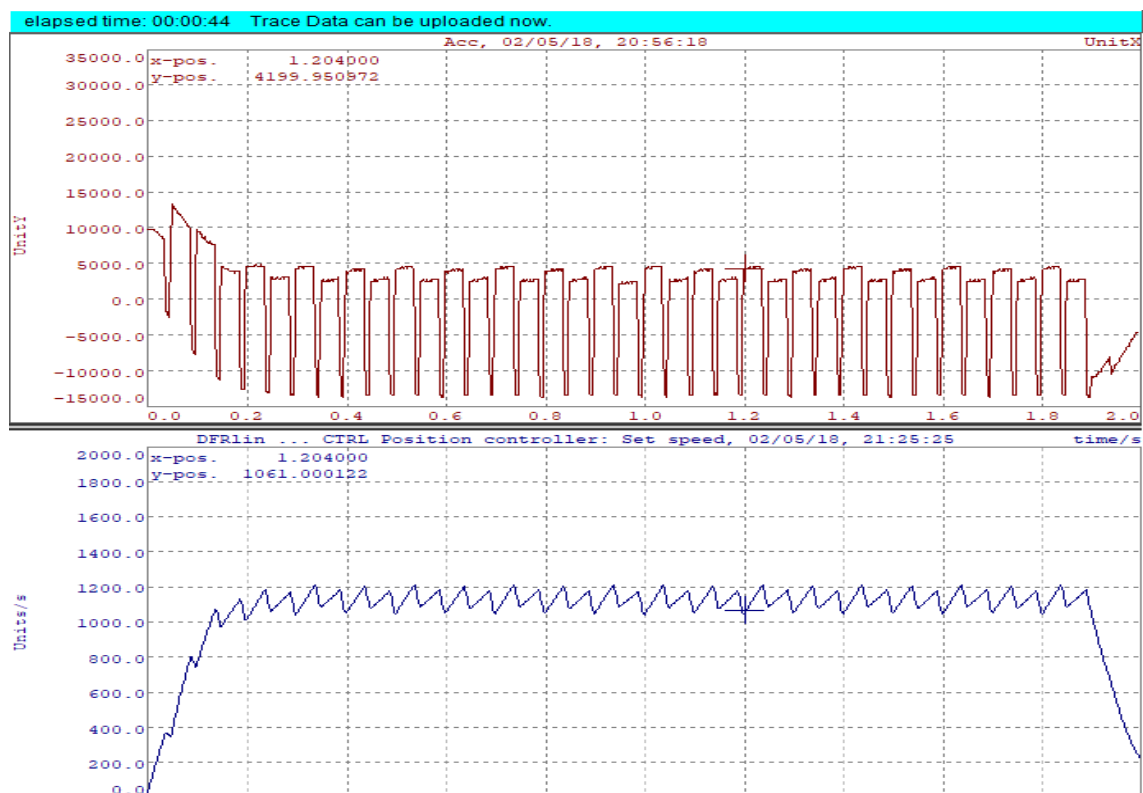


Obr. 3: Průběh zrychlení a rychlosti při posuvu do maximální vzdálenosti rychlostní regulací

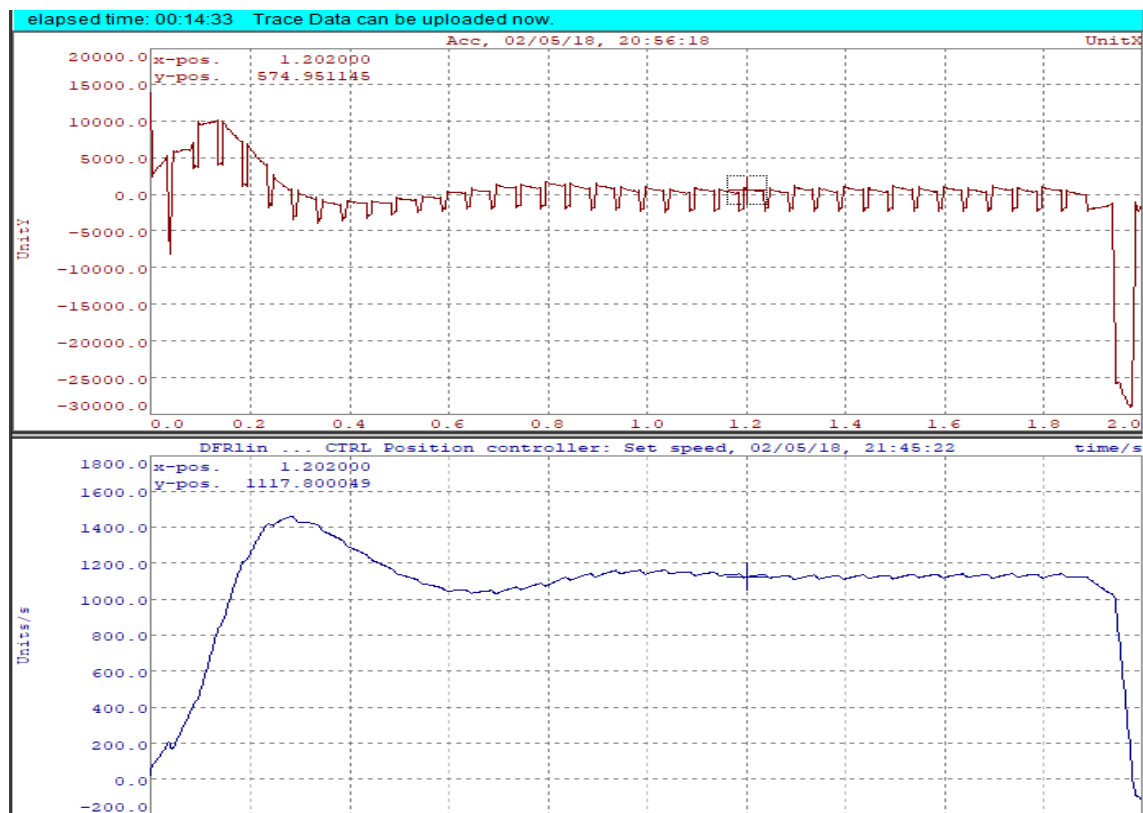
B. PRŮBĚHY ZRYCHLENÍ A RYCHLOSTI PŘI SLEDOVÁNÍ POLOHY MÍČKU



Obr. 1: Průběh zrychlení a rychlosti bez dynamické optimalizace a bez optimalizace sledování míčku (původní průběh)

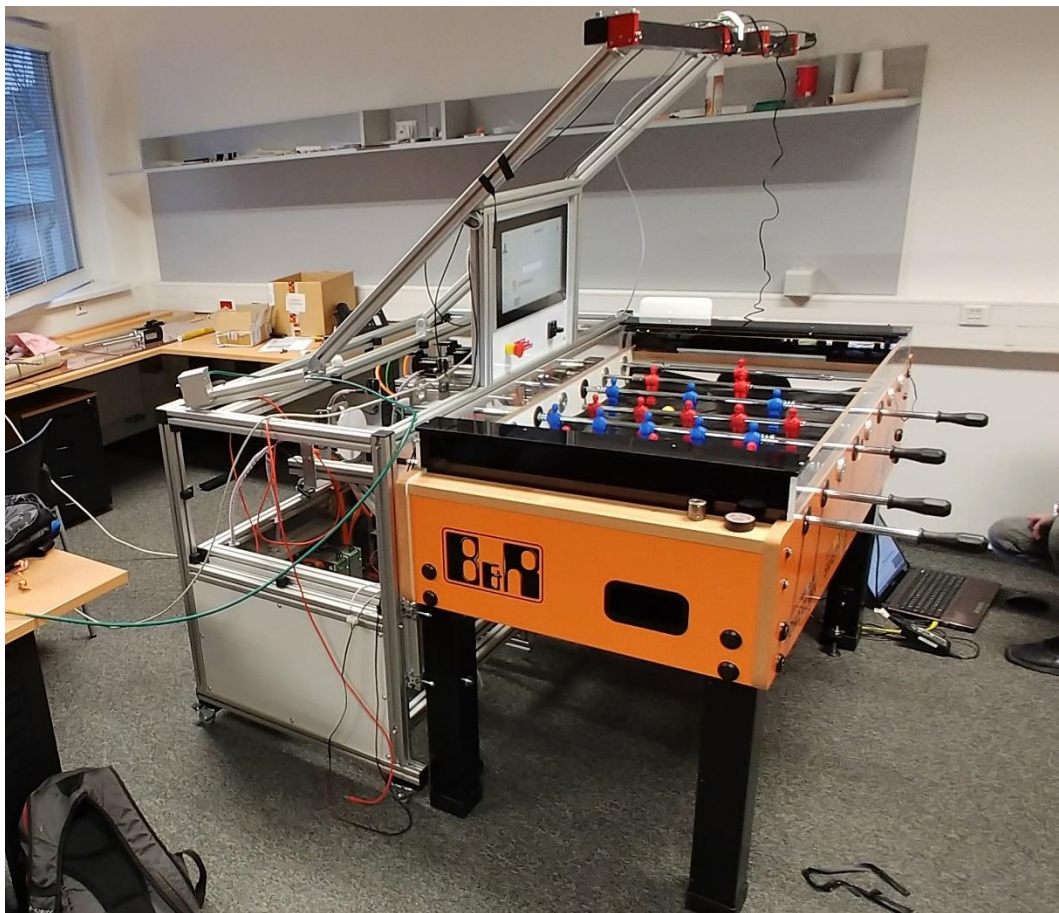


Obr. 1: Průběh zrychlení a rychlosti s dynamickou optimalizací a bez optimalizace sledování míčku

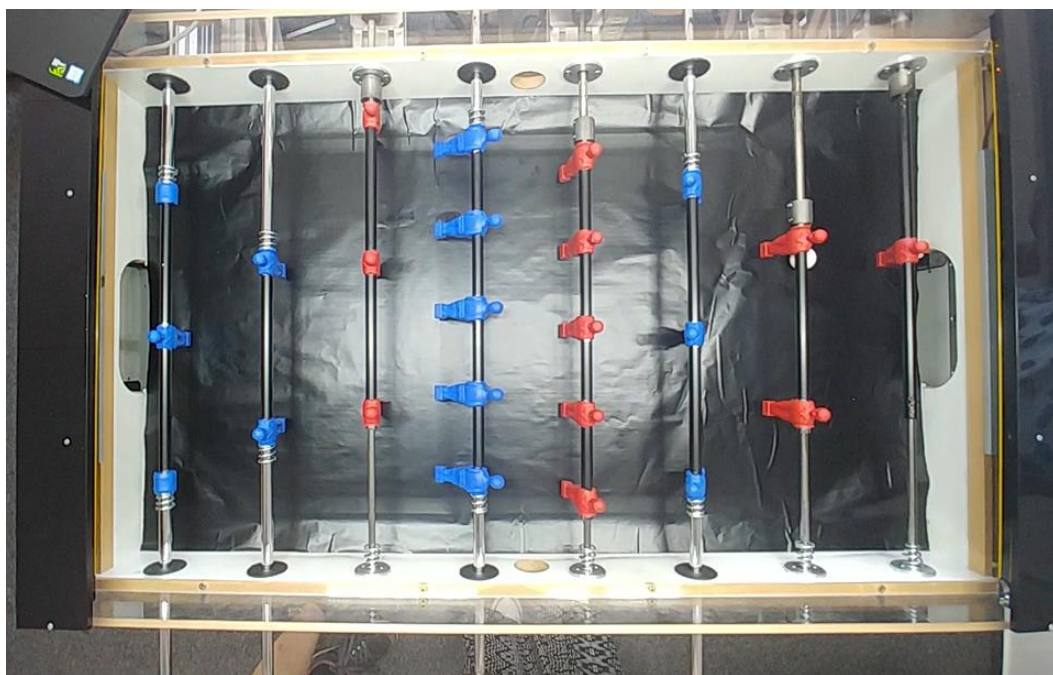


Obr. 2: Průběh zrychlení a rychlosti s dynamickou optimalizací a optimalizací sledování míčku

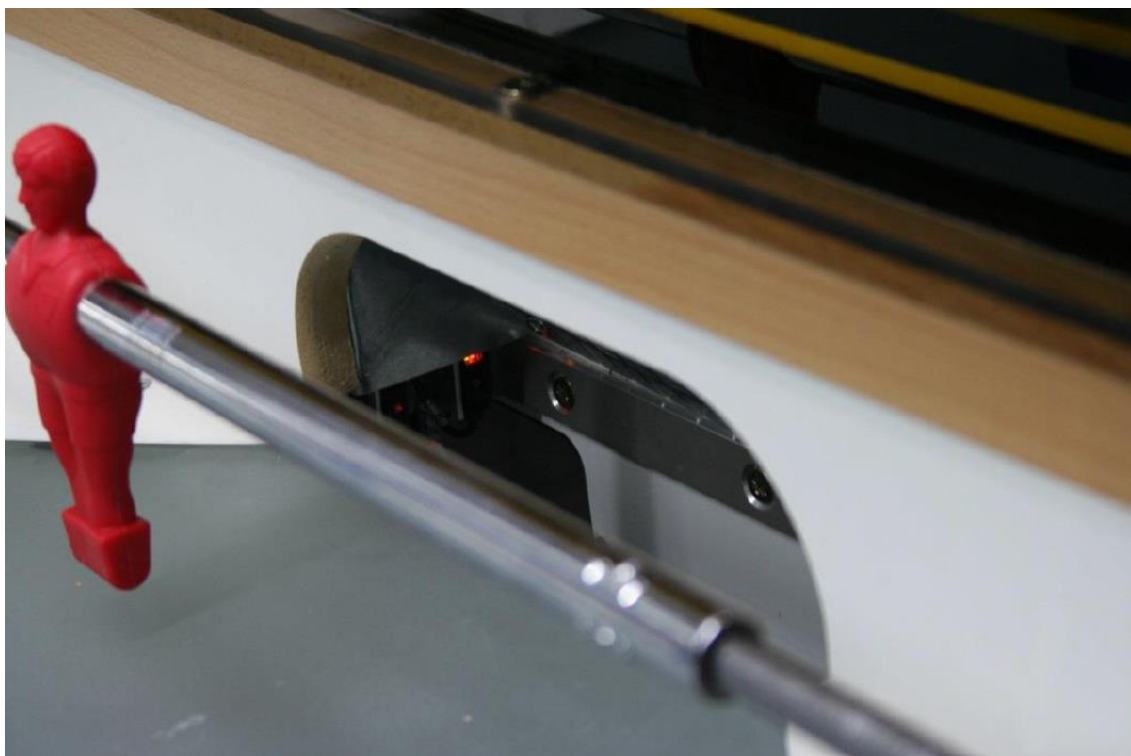
C. FOTOGRAFIE KONSTRUKČNÍCH PRVKŮ



Obr. 1: Celkový pohled na konstrukci robotického stolního fotbalu



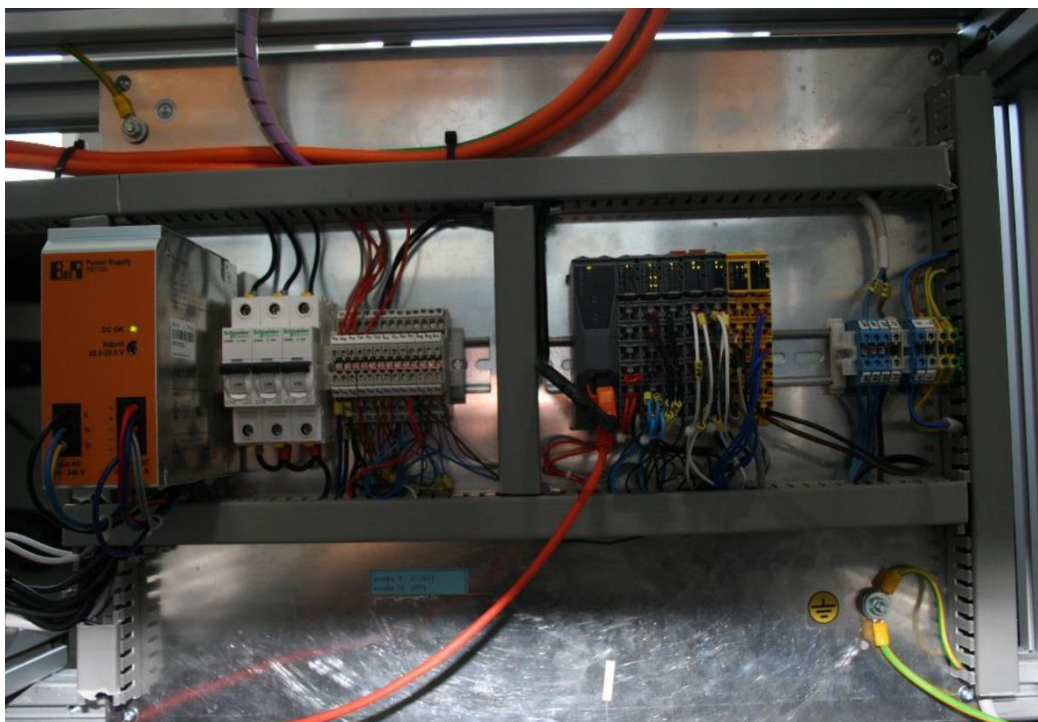
Obr. 2: Pohled na hrací plochu připravenou pro snímání kamerou Cognex umístěnou shora



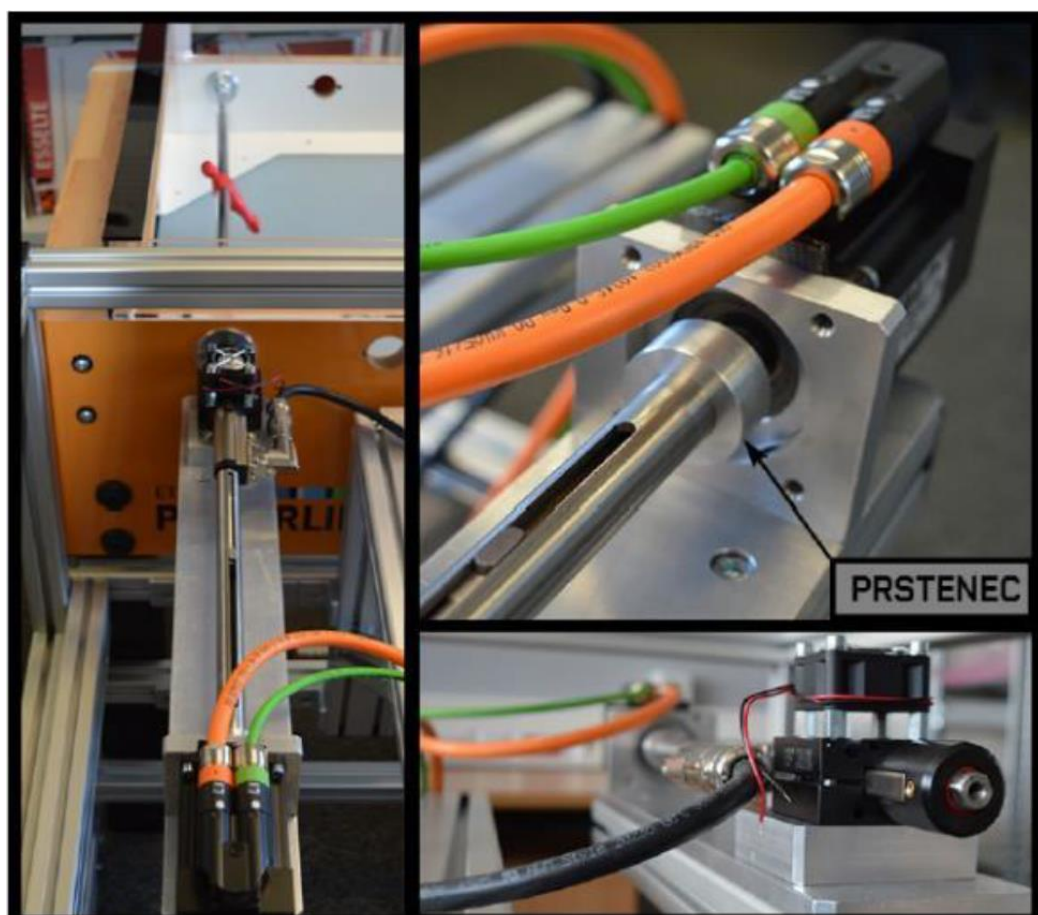
Obr. 3: Umístění snímače pro detekci vstřeleného gólu



Obr. 4: Zapojení servozesilovačů a zdrojů pro napájení 80V



Obr. 5: Zapojení systému X20 a zdroje pro napájení 24V



Obr. 6: Současné řešení uložení motorů herních os

D. FLASH-DISK

Tab. 1: Obsah Flash disku

Adresář	Soubory
\Bakalářská práce\	2018_BP_Ondrej_Slama_182996.pdf
\Přílohy\	PRILOHA_A.pdf PRILOHA_B.pdf PRILOHA_C.pdf PRILOHA_D.pdf
\Program RSF\	BP_OS_program-RSF_AS.zip
\Simulace MATLAB\	BP_OS_filtrace_MATLAB.zip
\Videa\Střely\	Normalni_strela.mp4 Strela_s_otockou.mp4
\Videa\Testovací hra\	Cognex_kamera.mp4 RaspberryPi_kamera.mp4

