

Bakalářská práce



České
vysoké
učení technické
v Praze

F3

Fakulta elektrotechnická
Katedra Systémů a řízení

Návrh a implementace řídicího systému brusky kulových ploch

Ondřej Šrámek
Kybernetika a robotika

2018

Vedoucí práce: doc. Ing. Přemysl Šůcha, Ph.D.

Poděkování / Prohlášení

Rád bych poděkoval vedoucímu práce doc. Ing. Přemyslu Šůchovi, Ph.D. za odborné rady a pomoc při zpracování práce. Také děkuji Bc. Rudolfu Princovi za možnost konzultace při návrhu bezpečnostních prvků a Ing. Romanu Valáškovvi za rady související s návrhem pohonů modernizovaného stroje.

Prohlašuji, že jsem předloženou práci vypracoval samostatně a že jsem uvedl veškeré použité informační zdroje v souladu s Metodickým pokynem o dodržování etických principů při přípravě vysokoškolských závěrečných prací.

V Praze dne 24. 5. 2018

.....

Abstrakt / Abstract

Tato práce se zabývá návrhem a implementací řídicího systému brusky kulových ploch. V úvodní části je nastíněna problematika obrábění a podoba stávajícího stroje. Na tu navazuje návrh elektronického vybavení splňující potřeby modernizované brusky, včetně výběru vhodných prvků snižující zbytková rizika. Součástí práce je nastavení parametrů měničů řízených os a samotná implementace řídicího systému. V závěru práce jsou diskutovány možnosti energetických úspor.

Klíčová slova: Obráběcí stroj, broušení, řídicí systém, bezpečnost strojních zařízení, servomotor, bezpečnostní prvky, PCL, HMI, energetické úspory.

This bachelor thesis deals with design and implementation of a control system for a ball valve grinding machine. Machine technology and the behavior of old machine is introduced in the first part. This part is followed by the design of electronic equipment that meets the requirements of the modernized grinder, including the selection of suitable elements to reduce residual safety risks. In the following part of this thesis parameters of controlled axis are set and the control system is implemented. At the end of the thesis are discussed possibilities of energy savings.

Keywords: Machine tool, grinding, control system, safety of machinery, servo drive, safety features, PLC, HMI, energy savings

Title translation: Design and implementation of a control system for a ball valve grinding machine.

Obsah /

1 Úvod	1
1.1 Obsahově související práce	1
1.2 Obráběcí technologie	1
1.2.1 Typy brousicích strojů.....	2
1.2.2 Proces broušení na modernizovaném obráběcím stroji	3
1.2.3 Původní elektromechanické vybavení stroje	3
2 Cíl bakalářské práce	4
2.1 Požadavky na modernizovaný stroj	4
3 Návrh elektronického vybavení	5
3.1 Pohon brusného vřetene	5
3.1.1 Princip synchronního motoru s permanentními magnety	6
3.1.2 Princip funkce frekvenčního měniče	6
3.1.3 Výběr frekvenčního měniče	7
3.2 Pohon unášecího vřetene	7
3.2.1 Princip asynchronního motoru s kotvou na krátko	7
3.2.2 Výběr frekvenčního měniče	8
3.3 Pohon lineární osy X	8
3.3.1 Vyžadované vlastnosti řízené osy.....	8
3.3.2 Určení parametrů pohonu	8
3.3.3 Výběr vhodného aktuátoru.....	9
3.3.4 Volba výkonového řídicího prvku.....	9
3.3.5 Zajištění přesnosti	9
3.4 Pohon lineární osy Y	10
3.4.1 Požadované vlastnosti řízené osy.....	10
3.4.2 Výběr vhodného aktuátoru.....	10
3.4.3 Volba výkonového řídicího prvku.....	11
3.5 Výběr PLC	11
3.5.1 Programovatelný logický automat.....	11
3.5.2 Programovací jazyky.....	11
3.5.3 Rozdělení PLC	12
3.5.4 Automaty nabízené společnostmi SE.....	12
3.5.5 Výběr řídicího automatu	13
3.6 Volba uživatelského rozhraní ..	13
3.6.1 Představení HMI	14
3.6.2 Výběr HMI panelu.....	14
3.7 Návrh distribuovaných vstupů a výstupů	14
3.7.1 Volba vhodných distribuovaných ostrovů	14
3.8 Kompletní řídicí systém	14
3.8.1 Modbus.....	15
3.8.2 CANopen.....	16
3.9 Výsledný návrh řízení.....	18
4 Bezpečnostní rizika	19
4.1 Postup posuzování a snižování rizik	19
4.2 Požadavky na bezpečnost elektrických pohonů.....	20
4.3 Určení bezpečnostní funkce	21
4.3.1 Posouzení bezpečnostních rizik	21
4.3.2 Stanovení PL_R	21
4.3.3 Navržení komponent bezpečnostní funkce	22
4.3.4 Kontrola dosažené úrovně PL	23
4.3.5 Návrh bezpečnostních funkcí.....	23
5 Návrh řídicího systému	24
5.1 Proces manuálně řízeného obrábění	24
5.2 Proces automaticky řízeného výrobního cyklu.....	24
5.3 Nastavení parametrů	26
5.3.1 Hodnoty brousicího programu	26
5.3.2 Nastavení výchozí polohy	26
5.3.3 Provádění korekcí	27
6 Nastavení řídicích prvků os	28

6.1	Frekvenční měnič brusného vřetene	28	8.1	Ekodesign elektromotorů	47
6.2	Frekvenční měnič unášecího vřetene	28	8.1.1	Důvody přijetí	47
6.3	Servo-měnič lineární osy X	28	8.1.2	Předmět působnosti	48
6.3.1	Parametry	28	8.1.3	Porovnání nařízení a navrženého řešení	48
6.3.2	Regulační obvod Lexi- um 32.....	29	9	Závěr	51
6.3.3	Nastavení regulačního obvodu	31		Literatura	52
6.4	Servo-měnič lineární osy Y	34	A	Zadání práce	55
6.4.1	Parametry	34	B	Zkratky	57
6.4.2	Nastavení regulačního obvodu	34	C	Příložené soubory	58
7	Implementace	37			
7.1	Logic builder	37			
7.1.1	Konfigurace a komuni- kace.....	37			
7.1.2	Ovládání bezpečnost- ních funkcí	37			
7.1.3	Zpracování vstupních a výstupních signálů	37			
7.1.4	Řízení osy X	38			
7.1.5	Řízení osy Y	38			
7.1.6	Řízení vřeten	38			
7.1.7	Mazání stroje	39			
7.1.8	Správa času a zabezpe- čení aplikace	39			
7.2	SoMachine Basic	39			
7.2.1	Nastavení komunikace ...	39			
7.2.2	Programování	40			
7.3	XPSMCWin.....	40			
7.3.1	Aktivace napájení a de- aktivace STO LXM32 ...	40			
7.3.2	Uvolnění funkce STO unášecího vřetene	40			
7.3.3	Uvolnění funkce SLS a STO	41			
7.3.4	Odemčení zámku.....	41			
7.4	Vijeo Designer	41			
7.4.1	Ergonomie.....	41			
7.4.2	Vývoj rozhraní	44			
7.5	Testování	45			
7.5.1	Simulace.....	46			
7.5.2	Zkušební provoz.....	46			
8	Energetická náročnost stroje	47			

Tabulky / Obrázky

3.1. Srovnání aktuátorů pro osu X...9	1.1. 3D model obráběného výrobku...3
3.2. Srovnání aktuátorů pro osu Y . 10	3.1. Struktura navrhovaného systému5
3.3. Přehled nejčastěji používaných Modbus kódů..... 16	3.2. Průběh kroutícího momentu synchronního motoru6
4.1. Průměrné pravděpodobnosti nebezpečné poruchy pro jednotlivé úrovně PL 19	3.3. Popis řídicí smyčky PLC..... 11
4.2. Kategorie zastavení definované normou ČSN EN 60204-1... 20	3.4. Přehled architektury typů PLC..... 12
4.3. Rizika a požadavky na PL..... 21	3.5. Struktura zprávy protokolu Modbus 15
5.1. Přehled funkcí manuálního režimu 24	3.6. Přehled členění kódů funkcí protokolu Modbus..... 15
6.1. Seznam nastavovaných parametrů osy X 29	4.1. Postup určení požadované úrovně PL_R 20
6.2. Postup nastavení regulačního obvodu rychlosti..... 31	4.2. Bezpečnostní spínače otevření a zajištění krytů 22
6.3. Postup nastavení regulačního obvodu polohy..... 31	4.3. Kontrolní software SISTEMA . 23
6.4. Seznam nastavovaných parametrů osy Y 34	5.1. Vývojový diagram řídicího systému 25
8.1. Třídy účinnosti asynchronních elektromotorů 47	5.2. Proces automatického obrábění 26
8.2. Přehled účinností jednotlivých tříd elektromotorů pro příkon 2,2 kW 48	6.1. Blokové schéma regulačního obvodu LXM32 29
8.3. Srovnání spotřeby elektrické energie dle účinnostních tříd pro motory o příkonu 2,2 kW.. 48	6.2. Struktura regulačního obvodu proudu LXM32 30
8.4. Přehled účinností čtyřpólových elektromotorů Siemens s příkonem 3 kW 50	6.3. Struktura regulačního obvodu rychlosti LXM32..... 30
	6.4. Struktura regulačního obvodu polohy LXM32..... 31
	6.5. Skoková odezva rychlosti osy X s automaticky nastaveným regulátorem..... 32
	6.6. Skoková odezva polohy osy X s manuálně nastaveným regulátorem..... 32
	6.7. Skoková odezva rychlosti osy X s automaticky nastaveným regulátorem..... 32
	6.8. Skoková odezva polohy osy X s manuálně nastaveným regulátorem..... 33
	6.9. Skoková odezva polohy osy X s manuálně nastaveným regulátorem..... 33
	6.10. Skoková odezva polohy osy X s velikostí $1\mu m$ 33

6.11.	Skoková odezva polohy osy X s velikostí 10 μm	33
6.12.	Skoková odezva automaticky nastaveného regulátoru	34
6.13.	Skoková odezva manuálně nastaveného regulátoru	35
6.14.	Skoková odezva automaticky nastaveného regulátoru	35
6.15.	Skoková odezva manuálně nastaveného regulátoru	35
6.16.	Odezva na skokovou změnu polohy	36
6.17.	Odezva na skokovou změnu polohy	36
7.1.	Struktura aktivace bezpeč- nostních obvodů I	40
7.2.	Struktura aktivace pohonu rotačních os.....	41
7.3.	Struktura bezpečného ode- mknutí krytu obráběcího prostoru	41
7.4.	Konfigurace bezpečnostního kontroléru	42
7.5.	Určení správné velikosti zob- razovače.....	43
7.6.	Vizualizace hlavní obrazovky grafického rozhraní	44
7.7.	Vizualizace správce receptur...	45
8.1.	Předpokládané úspory ener- gie pohonu unášecího vřetene..	49
8.2.	Srovnání účinností synchron- ních motorů BMP a asyn- chronních motorů v třídách IE2 a IE3	49
8.3.	Předpokládané úspory ener- gie pohonu brusného vřetene ..	50

Kapitola 1

Úvod

Tato bakalářská práce se zabývá návrhem a implementací řídicího systému pro brusku kulových ploch obrábějící kulové uzávěry ventilů určených pro teplovody nebo parovody.

Důvodem návrhu nového elektronického vybavení a kompletního řídicího systému stroje je zvýšení kvality a efektivity procesu obrábění, snížení fyzické náročnosti broušení a v neposlední řadě také zvýšení bezpečnosti strojního zařízení. Při volbě pohonů, je však kromě žádaných vlastností navíc dbáno i na jejich požadované energetické vlastnosti v souladu s nařízeními Evropské komise.

V části 1.1 je uvedena související tvorba, na kterou navazuje v 1.2 krátké představení obráběcí technologie, členění obráběcích strojů a popis uspořádání modernizovaného stroje. Poté jsou v kapitole 2 stanoveny cíle práce, na které v 3. části naváže volba prvků řídicího systému, minimalizace zbytkových rizik uvedená v kapitole 4. Po dokončení výběru automatizačních komponent je v kapitole 5 představen návrh systému, který pokračuje nastavením parametrů regulace pohonů popsané kapitolou 6 a implementací provedenou v 7. V 8. kapitole jsou pak uvedeny možnosti energetických úspor obráběcího stroje.

1.1 Obsahově související práce

První související tvorbou je bakalářská práce Jakuba Sládka [1] zabývající se návrhem ovládacího panelu pro obráběcí stroje. V této práci je provedena rešerše možného provedení a upevnění uživatelského rozhraní i samotný návrh panelu v souladu s ergonomickými požadavky.

Druhou uvedenou je diplomová práce Jaroslava Plocka [2], která se zabývá návrhem řídicího systému jednoúčelového obráběcího stroje. Řídicí systém je založen na komponentech společnosti Siemens. Součástí práce je návrh pohonů a prvků řízení i rozsáhlá analýza bezpečnostních rizik a jejich opatření.

Další související prací je pak diplomová práce Filipa Mněšťánka [3] zpracovávající rešerši existujících řídicích systémů CNC (Computer Numeric Controll) strojů, na kterou navazuje návrhem řídicího systému řezacího stroje včetně grafického uživatelského rozhraní.

Poslední uvedenou tvorbou je bakalářská práce Guomundur Arnar Grétarsson [4] zabývající se implementací řídicího systému navrženého pro zpracovatelskou společnost Háteigur. Řídicí systém je tvořen komponenty společnosti SE (Schneider Electric). Jednotlivé sekce návrhu jsou testovány na zmenšeném modelu dopravního pásu.

1.2 Obráběcí technologie

Broušení patří mezi třískové obráběcí technologie. Žádaného tvaru výrobku je zde dosahováno pomocí úběru přebytečného materiálu brusivem, ve kterém je nahodile orientováno vysoké množství břitů odebírajících třísku. Pro fungování broušení, je nutné,

aby se výrazně lišily rychlosti brusiva a broušeného materiálu. K broušení kovů se nejčastěji používají následující nástroje:

- **Brusný kotouč** tvořený ostrými zrny tvrdého materiálu spojenými pojivem. Plnivem brusných kotoučů jsou materiály jako karbid křemíku a nebo přírodní či syntetizovaný korund. Plnivo brusného kotouče je pak v požadovaném tvaru drženo keramickým pojivem. Díky tomu je možné použít vyšší řeznou sílu než v případě brusného pásu.
- **Brusný pás** obsahuje brusný materiál nalepený na plátnu nebo jiné průmyslové tkanině. Ostré břity zrn nanesených na brusném plátnu pak při nuceném pohybu obrušují obráběnou plochu. V dnešní době je brusný pás hojně využíván pro broušení dřeva. Velmi zřídka proniká i do kovoobrábění, většinou pouze pro poslední úpravy povrchu.

Při broušení však dochází k otupování břitů brusiva a vydrolování tupých zrn. Ostrost zrn kotouče je nutné během obrábění obnovovat. K tomu slouží orovnávací hrot nejčastěji tvořený syntetickým diamantem, který zajistí odrolení přebytečných zrn a také provede naostření nově obnažených brusných zrn. Díky tomu, že jsou břity při obrábění ulamovány a orovnány, dochází ke zmenšování brusného nástroje. V případě brusného pásu však takováto renovace broušícího nástroje není možná, jelikož ohebnost pásu je zapříčiněna tenkou vrstvou brusiva, a proto je nutné jej po opotřebení nahradit novým.

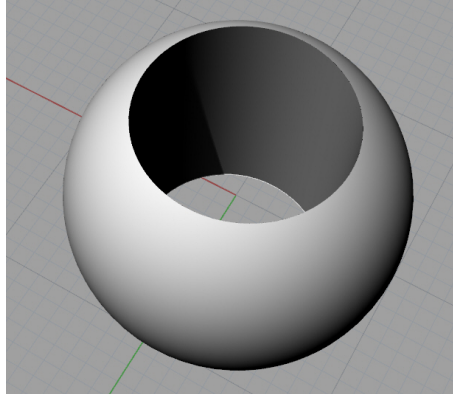
1.2.1 Typy broušících strojů

V této části bude představeno základní členění broušících strojů podle možností obráběného tvaru a také podle technologického uspořádání obrobku a brusiva.

- **Brusky rovinné**, které slouží k obrábění rovinných ploch. Broušený materiál je upnut na stole, jenž koná přímočarý vratný pohyb, a obráběn pomocí brusného kotouče. Obvodová rychlost brusiva je násobně vyšší než rychlost přímočarého pohybu stolu.
- **Brusky hrotové** slouží k přesnému obrábění rotačních ploch. Rotující obrobek je upnut mezi dva hroty, na kterých rotuje podél hlavní osy, poháněné motorem. I při tomto typu broušení je rychlost brusného vřetene násobně větší než rychlost otáčení obráběného materiálu. Obrobek se také pohybuje přímočarým vratným pohybem v ose otáčení, která je kolmá na osu broušení.
- U **bezhratých brusek** je obrábění rotačních ploch způsobeno roztočením materiálu mezi dvěma vřeteny. Jedno z vřeten je označováno jako brusné, to má větší průměr a také násobně vyšší otáčky, druhé se nazývá podávací. Na tomto typu brusek je možné broušit ve dvou režimech. Prvním je režim průběžný, umožňující pouze obrábění tvaru válce s konstantním průměrem, protože dochází k průchodu broušeného materiálu mezi brusným a podávacím kotoučem. Takovéto obrábění je však rychlé a přesné. Používá se například pro obrábění vnějších průměrů ložiskových kroužků. V druhém režimu provádí stroj zápichové broušení, při kterém je mezi brusné kotouče vždy vložen pouze jeden obrobek udržovaný šablonou ve stejné poloze. Díky tomu je možné pomocí tvarovaného brusného kotouče snadno vytvářet rozmanité rotační tvary. Pokud je použit skládaný brusný kotouč, je takto možné obrábět i složitější rotační výrobky, například klikové nebo vačkové hřídele.
- **Brusky speciální**. Do této skupiny patří stroje, které jsou většinou určeny pro broušení jednoho konkrétního tvaru obrobku. Do této kategorie tedy spadají ostatní broušící stroje. Například ty, které jsou určeny pro broušení děr. Stroj, u kterého je v rámci této práce prováděna modernizace spadá taktéž mezi tyto stroje, jelikož slouží pouze k obrábění kulových uzávěrů.

■ 1.2.2 Proces broušení na modernizovaném obráběcím stroji

Modernizovaný stroj dovede díky speciálnímu uspořádání obráběcích částí a také tvaru brusného nástroje obrábět kulové plochy. Počítačový 3D model obráběné součástky je vidět na obrázku 1.1.



Obrázek 1.1. Počítačový model obrobku

Tento obrobek je při broušení unášen pomocí trnu, na kterém je kulový pás usazen. Celý trn je pak upnut ve sklíčidle unášecího vřetene. O tvorbu třísky se stará speciálně tvarovaný brusný kotouč poháněný motorem brusného vřetene. Rychlost řezného nástroje je i zde násobně vyšší než u obráběného materiálu.

■ 1.2.3 Původní elektromechanické vybavení stroje

Původní verze stroje byla osazena pouze dvěma asynchronními motory s kotvou na krátko pohánějící brusné a unášecí vřeteno. Pro nastavení nižší a variabilní rychlosti byl pohon unášecího vřetene vybaven zubovým převodem. Mazání ozubených kol unášecího vřetene zajišťoval rozstříkovaný olej v převodové skříni. Druhé vřeteno mělo ložiska naplněná stálou tukovou náplní. Nastavení polohy obrobku bylo nutné provádět ručně pomocí ovládacího kola spřaženého s trapézovým šroubem polohujícím suportem, na kterém je umístěno brusné vřeteno. Dále bude tato osa v textu označována **Y**. Přísun brusného nástroje do broušeného materiálu byl opět realizován manuálně ovládaným trapézovým šroubem. Tuto osu si pro přehlednost v následujících kapitolách označíme jako **X**. Ani jedna pohyblivá osa nebyla v původní verzi vybavena elektronickým měřicím systémem, proto bylo nutné často provádět manuální kontrolu rozměrů, což značně prodlužovalo délku obrábění. Čas broušení jednoho obrobku se pohyboval kolem 120 minut, při kterých musela obsluha stroje pravidelně ověřovat obráběné rozměry. Tato skutečnost měla za následek poměrně vysoké výrobní náklady i požadavky na znalosti operátorů. Strojní části také nebyly osazeny žádnými kryty chránící obsluhu proti nebezpečí úrazu dle ČSN EN ISO 12100[18]. Vybavení původního stroje bylo tedy pro dnešní nároky na bezpečnost i přesnost a rychlost obrábění naprosto nedostačující.

Kapitola 2

Cíl bakalářské práce

Cílem této bakalářské práce je navrhnout elektronické komponenty a implementovat řídicí systém obráběcího stroje, který bude schopný přesného a automatického obrábění, podle obsluhou nastavených parametrů. Při výběru elektronických komponent je kladen důraz také na cenově přijatelné řešení s dobrým poměrem ceny a výkonu. Výsledkem návrhu je úplný systém, který po jeho implementaci bude řídit plně funkční stroj nasazený do výroby.

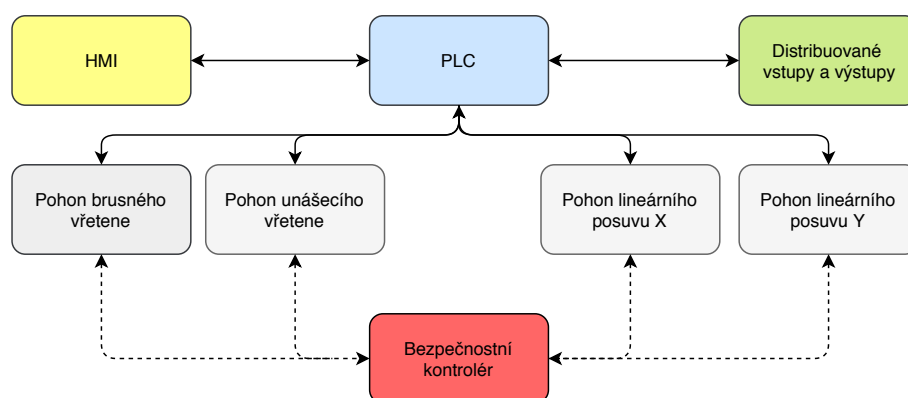
2.1 Požadavky na modernizovaný stroj

Po modernizaci strojního zařízení, které bylo z velké části ovládáno manuálně, by měl být stroj schopný plně automatického obrobení předem založeného kusu. Musí také ale umožnit i obrábění v ručním režimu, pro případ broušení v malosériové výrobě. Pro zefektivnění obrábění a vylepšení výsledného broušeného povrchu je nutné mít možnost plynulé regulace otáček unášecího i brusného vřetene. Mělo by také dojít ke zlepšení přesnosti polohování v ose **X**. Jelikož se jedná o modernizaci stroje, musí samozřejmě splňovat současné standardy bezpečnosti strojů dle ČSN EN ISO 12100[18].

Kapitola 3

Návrh elektronického vybavení

V této kapitole je proveden návrh komponent řídicího systému. Jako první je zpracována volba řídicích prvků jednotlivých os. Poté je vybrán adekvátní řídicí kontrolér zaručující požadovanou kvalitu řízení.



Z obrázku 3.1 vidíme, že řídicí PLC (Programovatelný logický kontrolér) zajišťuje řízení os, se kterými komunikuje po navržené sběrnici. Všechny řízené pohony jsou z bezpečnostních důvodů monitorovány a uvolňovány bezpečnostním kontrolérem. Další interakci s okolím zprostředkovává HMI (Uživatelské rozhraní člověk–stroj) panel a blok distribuovaných vstupů a výstupů. V jednotlivých sekcích této kapitoly dochází k nahrazení obecných bloků reálnými prvky tvořící řídicí systém. Navrhované elektronické vybavení stroje je vybíráno z širokého portfolia společnosti SE.

3.1 Pohon brusného vřetene

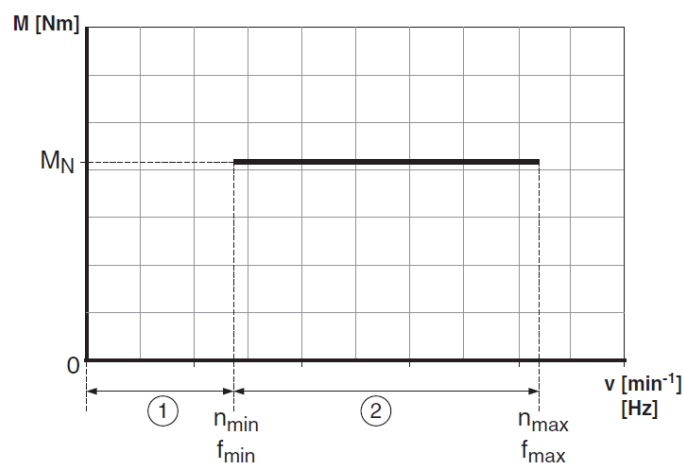
Na původním stroji bylo brusné vřeteno poháněno asynchronním motorem s kotvou nakrátko a dvěma pól páry. Příkon tohoto motoru byl 3 kW. Na štítku byl také uveden jmenovitý výkon s hodnotou 2,2 kW, hodnota nominálních otáček 1450 ot.min^{-1} , a nominální krouticí moment 15 Nm. Vřeteno bylo vybaveno řemenovým převodem s poměrem 2:1. Výstupní rychlost vřetene byla 2900 ot.min^{-1} , krouticí moment maximálně 7,5 Nm.

Hlavním požadavkem kvalitního výsledku broušeného povrchu je umožnění nastavení řezné rychlosti dle průměru obráběného ventilu. Po modernizaci musí vřeteno umožnit rozsah pracovních otáček v rozsahu $800 - 3000 \text{ ot.min}^{-1}$, se stejným krouticím momentem. Výhodou je použití motoru bez nutnosti přídavného převodu. Z tohoto důvodu je pro pohon brusného vřetene použit nový synchronní motor, který umožní provoz v širokém rozmezí otáček s dostatečným krouticím momentem a zajistí energeticky zajímavou alternativu asynchronnímu motoru. Toto a další srovnání energetických vlastností je uvedeno v části 8.

■ 3.1.1 Princip synchronního motoru s permanentními magnety

Synchronní motor s permanentními magnety je točivý stroj složený ze dvou částí. Rotoru, tvořeného permanentními magnety, a statoru, na kterém jsou navinuty budící cívky. Ty jsou nejčastěji napájeny z třífázové sítě. Magnety vytvoří stacionární magnetické pole, které následně interaguje s rotujícím magnetickým polem tvořeným budícími cívkami. Tento typ motoru funguje pouze v synchronních otáčkách, díky čemuž nedochází ke skluzu jako v případě asynchronního motoru, jehož princip je nastíněn v sekci 3.2.1. Při různé úrovni zatížení nedochází ke změně synchronních otáček, ale ke změně magnetického pole uvnitř motoru. Fázový posun magnetických polí se nazývá zátěžný úhel. Při provozu je však nutné kontrolovat teplotu motoru, která nesmí přesáhnout Curieovu teplotu způsobující odmagnetování rotoru.

Na obrázku 3.2 je možné vidět graf výstupního momentu synchronního motoru. Jeho pracovní oblast je označena číslem 2. Motor je tedy nutné provozovat ve stanoveném frekvenčním rozsahu.



Obrázek 3.2. Graf průběhu kroutícího momentu synchronního motoru BMP

■ 3.1.2 Princip funkce frekvenčního měniče

Frekvenční měniče umožňují změnu frekvence výstupního napětí při zachování frekvence napájecí. V dnešní době jsou v drtivé většině používány nepřímé měniče složené z vstupního usměrňovače, stejnosměrného meziobvodu, řídicí logiky a výstupního střídače.

- **Vstupní usměrňovač** usměrňuje napájecí napětí, které je následně přivedeno do stejnosměrného meziobvodu. Jako usměrňovací část měniče se používá neřízený diodový usměrňovač, ve kterém jsou diody zapojeny do můstku. Tento typ je výhodný především z důvodu jednoduchosti a spolehlivosti řešení. Druhým typem je řízený usměrňovač, který náročnost řízení kompenzuje možností rekuperace energie do sítě v případě, že se motor nachází v režimu generátoru.
- **Stejnoseměrný meziobvod** funguje jako dělicí část umožňující díky své impedanci změnu frekvence výstupní energie. Bývá tvořen tlumivkou a vysokokapacitním kondenzátorem, který vyhlazuje usměrněné napětí.
- **Řídicí logika** je jádrem celého frekvenčního měniče. Obvody řízení zajišťují správné spínání výstupních tranzistorů, monitorují bezpečnostní vstupy a stavy vnitřních součástí i motoru a v neposlední řadě umožňují také vzdálenou kontrolu měniče.

- **Výstupní střídač** vytváří výstupní střídavé napětí požadované frekvence. Výkonovými spínacími prvky jsou IGBT tranzistory řízené pulzní šířkovou modulací. Jako zátěž je tedy možné připojit synchronní i asynchronní točivé stroje i zařízení pracující na principu indukčního ohřevu.

■ 3.1.3 Výběr frekvenčního měniče

Společnost SE nabízí dvě produktové řady měničů určených pro strojní zařízení, kterými jsou Altivar **ATV320** a **ATV340**. První zmíněný frekvenční měnič je vhodný pro méně náročné aplikace, u kterých není nutné použití externího enkodéru. Tento řídicí prvek pak umožňuje bez-senzorové vektorové řízení rychlosti. Zpětná vazba je založena na výpočtech z okamžitého výstupního napětí. Další typ řízení je optimalizován s ohledem na úsporu energie. Tento režim má však podle technické dokumentace [6] za následek zhoršení dynamických vlastností regulace rychlosti. Druhým typem frekvenčního měniče určeného pro řízení strojích pohonů je **ATV340**. Měnič nabízí kromě zmíněných typů regulace ještě možnost plně vektorového řízení, se zpětnou vazbou pomocí enkodéru, vhodného pro velmi náročné aplikace vyžadující vysoce kvalitní řízení v nízkých pracovních otáčkách asynchronního motoru. Naše aplikace výhody plně vektorového řízení nevyužije, jelikož jsou otáčky motoru přesně dány synchronními otáčkami vřetene závislými pouze na budícím kmitočtu.

Z nabídky SE byl vybrán synchronní motor **BMP1402F** s maximální rychlostí 3000 ot.min^{-1} a jmenovitým kroutícím momentem 9,55 Nm, pro který je stanoven frekvenční měnič **ATV320U40N4B**. [8]

■ 3.2 Pohon unášecího vřetene

Pro pohon unášecího vřetene byl v původní verzi použit také asynchronní motor s kotvou na krátko, dvěma pól páry a výkonem 2,2 kW. Změna rychlosti otáček unášecí byla umožněna pomocí zubové mechanické převodovky.

Při modernizaci je provedeno nahrazení převodové skříně pevným převodem. Součástí je také výměna asynchronního motoru za nový, se stejnými vlastnostmi a vyšší účinností, uvedenou v sekci 8.1. Jelikož společnost SE nenabízí vlastní asynchronní elektromotory, je vybrán motor z nabídky společnosti Siemens. Otáčky motoru jsou opět řízeny frekvenčním měničem. Hlavním důvodem náhrady mechanických převodů je umožnění plynulé regulace otáček motoru.

■ 3.2.1 Princip asynchronního motoru s kotvou na krátko

Asynchronní motor s klecovou kotvou je tvořen statorem, ve kterém jsou umístěny tři rovnoměrně uložené budící cívky, a rotorem, jenž je tvořen vodivými tyčemi spojenými zkratovacími kroužky. Pokud jsou budící cívky napájeny z třífázové symetrické sítě vytvářejí rotující magnetické pole uvnitř statoru. Díky rotujícímu magnetickému poli dochází k indukovaní napětí na kotvě motoru. Jelikož je odpor kotvy velmi malý, indukované napětí způsobí vznik značného proudu, který vyvolá sekundární magnetické pole generované protékajícím proudem v rotoru. Působení obou magnetických polí vyvolá točivý moment umožňující roztočení rotoru. Indukování napětí do kotvy je podmíněno změnou magnetického pole vyvolanou rozdílem synchronních a rotorových otáček. Díky této skutečnosti pracují motory v režimu skluzu, kdy jsou skutečné otáčky nižší než synchronní otáčky magnetického pole. Velikost rychlosti synchronního magnetického pole je možné určit ze vztahu [5]

$$n_s = \frac{60f}{p} \quad (1)$$

, kde n_s jsou synchronní otáčky, n jsou skutečné otáčky, f je frekvence napájecího napětí a p je počet pólových dvojic motoru. Jak bylo uvedeno výše, asynchronní motory pracují v režimu skluzu označeným s , který je určen jako

$$s = \frac{n_s - n}{n_s} \quad (2)$$

Z hodnoty skluzu a synchronní rychlosti je možné určit výstupní otáčky rotoru

$$n = n_s(1 - s) \quad (3)$$

pro řízení otáček rotoru je nutné měnit rychlost rotace budícího pole, k čemuž slouží frekvenční měnič.

■ 3.2.2 Výběr frekvenčního měniče

Pro řízení tohoto motoru byl zvolen stejný typ měniče frekvence, tedy **ATV320** s označením **ATV320U30N4B**. Tento měnič umožňuje dodat stálý výkon 3 kW. I zde je tedy volena varianta nabízející výkonovou rezervu.

■ 3.3 Pohon lineární osy X

Translační pohyb obráběcí osy **X** je na modernizovaném stroji zajištěn pomocí kuličkového šroubu s předepnutou maticí. V požadavcích na dynamické vlastnosti pohonu je určen požadovaný krouticí moment a také minimální rychlost rychloposuvu zajišťující dostatečně rychlý přesun řezného nástroje. Stanoven je i minimální proveditelný krok a rychlost pracovního posuvu.

■ 3.3.1 Vyžadované vlastnosti řízené osy

Požadovaný krouticí moment motoru má velikost 1,9 Nm, minimální žádaná translační rychlost dosahuje hodnoty 50 mm s^{-1} . Řídicí systém musí umožnit přesné řízení rychlosti a polohy. Nejmenší požadovaný krok má velikost $1 \mu\text{m}$. Systém také musí umožnit pohyb pracovní rychlostí o velikosti nejvíce $200 \mu\text{m s}^{-1}$. Jelikož bude pohon umístěn uvnitř obráběcího prostoru, je nutné, aby stupeň krytí motoru dosahoval úrovně alespoň IP63 dle ČSN EN 60529. Zvolený kuličkový šroub má stoupání 10 mm. Navrhovaný motor však bude připojen přes úhlovou planetovou převodovku s převodovým poměrem 10:1, která umožní vhodnou konstrukční polohu připojeného motoru.

■ 3.3.2 Určení parametrů pohonu

Výběr bude zahájen výpočtem zbývajících parametrů nutných pro správnou volbu pohonu. Připojení planetové převodovky mezi motor a šroub zajistí zvýšení počtu otáček aktuátoru při zachování translační rychlosti. Nově vypočtené stoupání tedy odpovídá hodnotě 1 mm. Při minimálním požadovaném kroku $1 \mu\text{m}$ je nutné, aby byl pohon umožnil přesné nastavení alespoň tisíce poloh na jednu otáčku. Musí být také schopný dosáhnout rotační rychlosti $3000 \text{ ot. min}^{-1}$, aby byl splněn požadavek na rychlostní nároky pro pohyb rychloposuvem. Z důvodu splnění maximální rychlosti v režimu pracovního posuvu musí řídicí člen motoru umožnit regulaci rychlosti nejhůře na 10 ot. min^{-1} . Z výše uvedených požadavků je zřejmé, že jsou zde kladeny poměrně vysoké nároky na přesnost i dynamiku řízení osy.

■ 3.3.3 Výběr vhodného aktuátoru

Z nabídky společnosti SE je vybráno několik možných variant. Jako první se nabízí krokový motor, který bývá velmi často používaným pohonem, jelikož kromě vysokého momentu nabízí při nízkém zatížení i možnost řízení otevřenou smyčkou. Další možností je použití střídavého synchronního servomotoru s permanentními magnety. Ty nabízí široké rozmezí pracovních otáček bez znatelného poklesu krouticího momentu a také kvalitní řízení polohy i rychlosti díky vestavěnému motorovému enkodéru. Nyní budou oba typy pohonů podrobeny srovnání, kterým bude možné prověřit splnění podmínek zadání.

Označení	Typ motoru	Moment	Otáčky	krytí
BSH0703T31A2A	AC servomotor	2,6 Nm	4000 $ot.min^{-1}$	IP65
BMH0703T31A2A	AC servomotor	3,4 Nm	3000 $ot.min^{-1}$	IP65
BRS2852A600	Krokový motor	4,5 Nm	1800 $ot.min^{-1}$	IP20

Tabulka 3.1. Srovnání možných typů motorů

V uvedené tabulce 3.1 je možné vidět, že požadavky stanovené zadáním jsou schopny splnit pouze servomotory. Oba vybrané servomotory mají stejné rozměry, motorové enkodéry i výkonový řídicí prvek. Liší se však mimo jiné jmenovitými otáčkami a setrvačnostmi rotorů. Oba zvolené servomotory splňují díky vestavěným motorovým enkodérům požadavek na minimální regulovanou rychlost 1 $ot.min^{-1}$ [9]. Pro požadavky dynamického polohování s ohledem na maximální otáčky bude pro tuto lineární osu zvolen servomotor BSH, který s jistotou splňuje požadavky na krouticí moment i otáčky a je výrobcem určen pro dynamicky náročné aplikace.

■ 3.3.4 Volba výkonového řídicího prvku

Výkonový řídicí prvek je přímo svázán s tímto motorem a není zde tedy možnost výběru.¹ Podle doporučení byl zvolen **LXM32** (Servo-měnič Lexium 32M), konkrétně typ **LXM32D18M2**, umožňující připojení široké škály vstupně-výstupních, bezpečnostních, komunikačních i enkodérových karet.

■ 3.3.5 Zajištění přesnosti

Jelikož je u této osy kladen vysoký důraz na lineární přesnost polohování je zde žádoucí použití dodatečného lineárního enkodéru, který umožní zpětnou vazbu polohy. Přesné měření je nutné z důvodu nenulových mechanických vůlí mechanického ústrojí. Enkodéry se dělí na dva hlavní typy:

- **Absolutní** umožňující určení přesné polohy po zapnutí díky jednoznačně kódované poloze.
- **Inkrementální**, které určují polohu podle obsahu čítače pulzů a je nutné osu referencovat. Nutnost referencování znamená, že všechny osy stroje vybavené inkrementálními enkodéry musí po zapnutí najet do výchozí pozice sloužící pro nastavení nulové značky měřidel.

Kvůli této skutečnosti byla zvolena varianta absolutního odměřování, která je sice nákladnější, nicméně není nutné pravidelné referencování polohy. Toto řešení vyžaduje

¹ <https://www.schneider-electric.com/en/product/BSH0703T31A2A/ac-servo-motor-bsh---2.83-n.m---6000-rpm---keyed-shaft---without-brake---ip65/>

připojení digitální enkodérové karty **VW3M3402**. Ta je schopna komunikace s absolutními lineárními enkodéry pomocí protokolů SSI a EnDat 2.2. Jelikož se v portfoliu společnosti SE nenachází žádné enkodéry splňující požadavky na rozlišení a přesnost, byly poptány společnosti Heidenhain a FAGOR Automation, jež se specializují na vývoj a výrobu enkodérů. První uvedený výrobce umožňuje komunikovat s měřidlem pomocí protokolu EnDat 2.2, který byl touto společností vyvinut. Druhá společnost dodává mimo jiné i enkodéry komunikující pomocí protokolu SSI. Oba nabídnuté enkodéry měly totožné měřicí parametry, lišily se pouze typem komunikačního protokolu, jelikož jejich přesnost je $\pm 5\mu m$ a rozlišení 100 nm . Z důvodu poměrně vysokého rozdílu cen nabídnutých řešení je zvolen enkodér společnosti **FAGOR Automation**.

3.4 Pohon lineární osy Y

Posun suportu lineární osy Y byl také řešen kuličkovým šroubem. V požadavcích na pohon byl uveden požadovaný krouticí moment a také minimální rychlosti posuvu. Šroub je na servomotor připojen přímým mechanickým spojením.

3.4.1 Požadované vlastnosti řízené osy

Požadovaný krouticí moment je stanoven na hodnotu $7,5\text{ Nm}$, minimální rychlost posuvu je stejně jako u předchozí lineární osy stanovena na 50 mm s^{-1} . I pohon suportu bude umístěn uvnitř obráběcího prostoru, a proto je nutné aby měl krytí alespoň IP63 dle ČSN EN 60529. Na přesnost polohování zde není kladen tak vysoký důraz, jelikož je nutné založit každý nově obráběný kus ručně. Z tohoto důvodu provede případnou korekci polohy obsluha před spuštěním cyklu.

3.4.2 Výběr vhodného aktuátoru

Volbu vhodných motorů můžeme omezit na dva typy servomotorů splňující požadavky dané zadáním.

Označení	Typ motoru	Moment	Otáčky	krytí
BSH1004P11A2A	AC servomotor	9,31 Nm	3000 $ot.min^{-1}$	IP65
BMH1003P01A1A	AC servomotor	8,4 Nm	3000 $ot.min^{-1}$	IP65

Tabulka 3.2. Srovnání možných typů servomotorů

Z tabulky 3.2 je zřejmé, že oba pohony splňují požadavky uvedené v zadání. Uvedené motory však mají velmi odlišné momenty setrvačnosti rotorů. Velikost momentu setrvačnosti rotoru uvedeného servomotoru BMH je $9,37\text{ kg.cm}^2$ ¹. Rotor aktuátoru BSH má moment setrvačnosti $4,22\text{ kg.cm}^2$ ². Jelikož je i u této osy kladen důraz na dynamiku polohování bude zvolen motor s nižším momentem setrvačnosti. Vlastnosti systému sice degraduje kuličkový šroub a také setrvačnost suportu, nicméně použitím druhého servomotoru nedojde k dalšímu zhoršení dynamiky. Druhým důvodem volby je také vyšší momentová rezerva.

¹ <https://www.schneider-electric.us/en/product/BMH1003P01A1A/servo-motor-bmh---8.4-nm---6000-rpm---untapped-shaft---without-brake---ip54/?range=2302-lexium-32-servo-drives-%26-motors&node=166536635-servo-motors>

² <https://www.schneider-electric.com/en/product/BSH1004P11A2A/ac-servo-motor-bsh---9.31-n.m---1500-rpm---keyed-shaft---without-brake---ip50/>

■ 3.4.3 Volba výkonového řídicího prvku

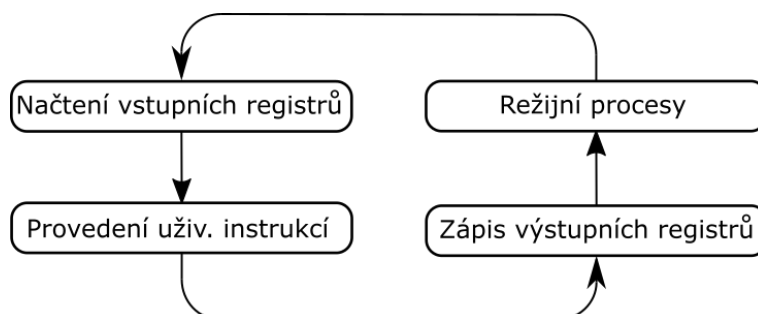
I pro tento servomotor je doporučen konkrétní typ servo-měniče. Zvolen je opět **LXM32** splňující požadavky na výkon dodávaný motoru. Přesné označení je **LXM32MD30N4**. Tento typ umožňuje připojení velkého množství doplňkových karet. Pro řízenou osu **Y** však bude nutné použít pouze kartu podporující komunikační protokol, který je zvolen při návrhu kontroléru, jelikož nejsou u osy **Y** kladeny vysoké nároky na přesnost polohy. Servomotor je vybaven jednotáčkovým enkodérem. Absolutní poloha osy je simulována pomocí vnitřních čítačů měniče, které jsou schopny virtualizovat absolutní polohu v případě, že nedojde ke změně polohy rotoru o více než čtvrt otáčky, pokud má servo-měnič vypnuté napájení řídicích obvodů. Jelikož je otočení možné pouze při demontáži motoru, bude případně nutné obnovit simulaci absolutní hodnoty opětovným spuštěním reference osy.

■ 3.5 Výběr PLC

V této části je možné přistoupit k návrhu řídicího automatu, jelikož už jsou známy požadavky na složitost a rychlost řízení díky úplné volbě řídicích prvků os. Nejprve však bude v krátkosti představen PLC.

■ 3.5.1 Programovatelný logický automat

Programovatelné logické kontroléry jsou určeny pro diskrétní řízení všech odvětví průmyslu. Hlavním důvodem vývoje a nasazování PLC je možnost masového použití stejného hardwarového řešení, díky kterému výrobní náklady klesají, pro širokou škálu průmyslových problémů. Variabilita řešení je umožněna díky možnosti programovat řídicí funkci každého kontroléru, která je pak cyklicky vykonávána.



Obrázek 3.3. Řídicí smyčka PLC

■ 3.5.2 Programovací jazyky

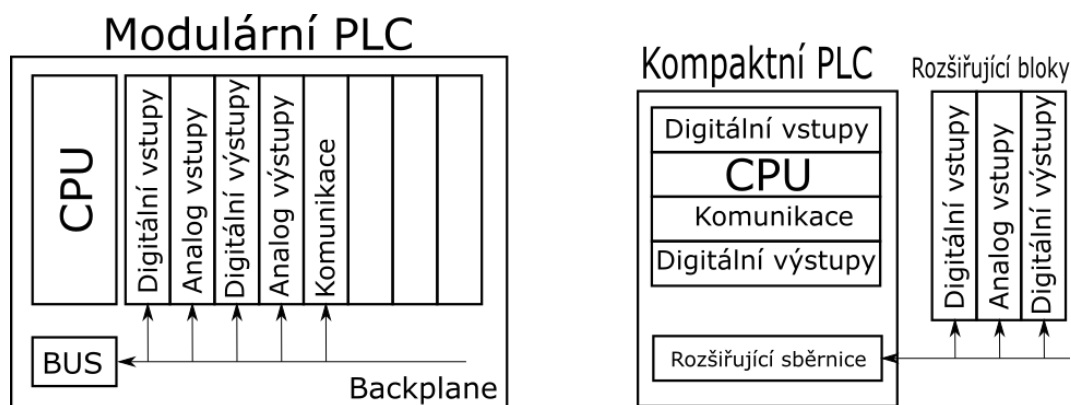
Drtivá většina průmyslových logických kontrolérů je programována jazyky doporučenými normou IEC 61131-3, kterými jsou:

- **IL** - První textový programovací jazyk doporučený výše uvedenou normou, který je tvořen seznamem instrukcí. Vzdáleně se podobá assembleru. POU (Programová jednotka - třída) je tvořena posloupností instrukcí umístěných na samostatných řádcích.
- **LD** - Grafický programovací jazyk vycházející z reléové logiky. Na levé i pravé straně se vždy nacházejí svislé napájecí sběrnice, které napájí prvky připojované do prostoru mezi napájením. Připojovanými prvky jsou spínací a rozpínací kontakty, cívky nebo funkce a funkční bloky.

- **FBD** - Grafický programovací jazyk vyjadřující chování programu pomocí propojených funkčních bloků. Programování je velmi podobné jako zapojování elektronických blokových diagramů. Každý výrobce doplňuje nabízené bloky dle svých preferencí s ohledem na oblast nasazení.
- **CFC** - Grafický programovací jazyk, který je velmi podobný FBD. Na rozdíl od něj však umožňuje volné rozložení funkčních bloků.
- **SFC** - Grafický programovací umožňující snadné definování chování programů. Je velice vhodný také pro vytváření sekvenčních částí programu, ze kterých jsou volány podprogramy tvořené v ostatních jazycích.
- **ST** - Textový programovací jazyk, který má své kořeny v jazyku Pascal a C. Díky široké škále příkazů je vhodný pro vytváření složitějších bloků a také pro snadnou práci s daty.

3.5.3 Rozdělení PLC

Programovatelné automaty se uspořádáním dělí na dva základní typy. Prvním je modulární, který se ve své podstatě sestává pouze z procesorové části a vestavěné komunikační sběrnice využívané pro připojení dalších modulů. Ostatní prvky jako vstupní a výstupní obvody nebo prostředky komunikace se připojí volitelně do backplanu, který slouží k napájení a zprostředkování komunikace modulů s procesorem. Tento styl architektury je převážně používán pro procesní automatizaci. Druhým typem uspořádání je kompaktní. Takto sestavené PLC v sobě obsahuje kompletní vybavení nutné pro fungování. Je tedy kromě procesorové jednotky osazeno vstupy, výstupy i komunikací. Při potřebě rozšíření počtu vstupních a výstupních signálů je možné připojení rozšiřujících bloků nebo ostrovů.



Obrázek 3.4. Architektura průmyslových PLC

3.5.4 Automaty nabízené společností SE

V portfoliu společnosti SE se v segmentu určeného pro řízení strojů nachází tři výkonové úrovně kompaktních kontrolérů, které se liší výpočetním výkonem, programovou i komunikační výbavou.

Kontrolér nacházející se v nejnižším nabízeném segmentu je **Modicon M221**. Tento typ je určen především pro méně náročné aplikace. Program je vytvářen v prostředí SoMachine Basic umožňujícího používání jazyků IL, LD a SFC. Tyto automaty obsahují vestavěné analogové a digitální vstupy, digitální výstupy, konektor pro připojení sériové linky RS-232 nebo RS-485 nabízející Modbus RTU/ASCII. Jako druhý obsahují určité

verze ethernetový port podporující Ethernet/IP device a Modbus TCP client/server. Nevýhodou je, že vývojové prostředí SoMachine basic nenabízí žádné knihovny sloužící pro snadné a úplné ovládání řídicích prvků.

Druhou výkonnější řadou je **Modicon M241** sloužící pro řízení náročnějších aplikací. Implementace řídicího programu probíhá v prostředí SoMachine vycházejícího z CoDeSysu. CoDeSys je mezipatformový vývojový nástroj vyvinutý společností 3S-Smart Software Solutions GmbH vycházející z normy IEC 61131-3. Tento typ kompaktního logického kontroléru je osazen pouze digitálními vstupy a výstupy, komunikační výbava obsahuje 2 sériové linky podporující RS232 a RS485 s protokolem Modbus RTU/ASCII. Dále je osazen ethernetový port podporující Ethernet/IP, Modbus TCP, FTP client/server a SoMachine protokol. Poslední možností komunikace s ostatními systémy je sběrnice CAN, na které tento automat umožňuje použití protokolu CANopen. Programovací prostředí SoMachine také nabízí širokou škálu funkčních bloků sloužících k ovládání a správě ostatních zařízení využívajících CANopen.

Třetím kontrolérem je **Modicon M251**, který je modulární verzí předchozího automatu. pro připojování dalších vstupně výstupních modulů nevyužívá backplane jako PLC určená pro procesní řízení, ale používá vstupní, výstupní a komunikační karty sloužící pro rozšíření počtu vstupně výstupních signálů.

Poslední a zároveň nejvýkonnější řadou je **Modicon LMC0****. I tato výkonová řada je také programována v prostředí SoMachine. Hlavním rozdílem je možnost synchronizovaného řízení servopohonů v reálném čase, což znamená, že PLC samo generuje profily poloh, rychlostí a zrychlení se stanovenou časovou periodou, pro všechny takto řízené osy. Pro tento typ řízení jsou využity protokoly CANmotion v případě LMC058 a Sercos III při použití LMC078. Díky tomu je možné umožnit souběžný pohyb až 24 os (v případě LMC078).

■ 3.5.5 Výběr řídicího automatu

Obrábění na modernizované brusce nevyžaduje synchronizovaný pohyb servomotorů řízených os, protože během obráběcího cyklu je osa **Y** zastavena a pohybuje se pouze osa **X** zajišťující posun obráběcích nástrojů. Díky tomu není nutné využít nejvýkonnější řadu automatů, které tuto možnost umožňují. Dalším kritériem je přítomnost digitálních vstupů a výstupů, jelikož je kontrolér umístěn uvnitř elektrického rozvaděče a musí umožnit detekovat správné podmínky i ovládat jednoduché binární akční členy. Proto je zde zbytečné použít modulární **Modicon M251** v ceně kompaktního PLC a doplňovat systém o vstupní i výstupní karty. Díky tomu je výběr zúžen pouze na dva automaty. Jak již bylo uvedeno výše **Modicon M221** je určen pro nenáročné aplikace, umožňuje programování pouze v IL, LD nebo SFC, což není vhodné pro práci s daty obráběcího programu, a v neposlední řadě také neumožňuje snadné řízení servo-měničů pomocí funkčních bloků. Proto bude pro modernizovaný řídicí systém zvolen **M241**, s přesným označením **TM241CEC24T** umožňující uživatelsky příjemné řízení servo a frekvenčních měničů pomocí funkčních bloků i snadné operace s daty obráběcího programu v jazyce ST. Jeho výbava obsahuje 14 digitálních vstupů, 10 digitálních tranzistorových výstupů, CANopen master, 2 sériové linky a ethernetový port.

■ 3.6 Volba uživatelského rozhraní

V této části proběhne představení pojmu HMI a výběr vhodného uživatelského rozhraní určeného pro ovládání modernizovaného stroje.

■ 3.6.1 Představení HMI

Pod pojmem HMI se rozumí rozhraní umožňující stroji komunikovat se svou obsluhou. Tímto rozhraním však nejsou myšleny tlačítka a signálky, jenž funkci komunikace zastanou, ale hlavně ovládací panely obsahující textový nebo grafický výstup. V dnešní době se nejčastěji používají kombinované grafické panely s mechanickými klávesami a barevnou obrazovkou nebo pouze verze vybavené barevnou dotykovou obrazovkou. Díky tomu jsou stroje schopné velmi kvalitní interakce s člověkem. Vybavení automaticky řízeného stroje HMI panelem je dnes už samozřejmostí umožňující stroj obsluhovat, kontrolovat nebo programovat pomocí příjemného uživatelského prostředí z ovládacího panelu nebo pohodlí domova přes vzdálené připojení. Ovládací panely kromě grafické vizualizace nabízí také širokou škálu nástrojů určených například pro monitorování stroje, uživatelů či správu receptur.

■ 3.6.2 Výběr HMI panelu

Pro modernizovaný stroj byl zvolen dotykový HMI panel Magelis **HMIGTO4310** který nabízí dotykovou plochu velikosti 7,5 palce s rozlišením VGA tedy 640x480 pixelů. Tento terminál disponuje komunikačními porty umožňující komunikaci s okolím pomocí většiny průmyslových protokolů využívajících Ethernet IEEE 802.3, RS485 nebo RS232. Pro připojení vstupně-výstupních periférií je vybaven USB 2.0 podporující kromě standardních zařízení jako jsou klávesnice, myš nebo velkokapacitní paměťové zařízení, také čtečky otisků, RFID čipů nebo čárových kódů. Projekt je vytvářen v prostředí Vijeo Designer, který je vestavěn ve vývojovém prostředí SoMachine.

■ 3.7 Návrh distribuovaných vstupů a výstupů

Distribuované ostrovy sloužící pro připojení vstupních a výstupních signálů jsou určeny především pro úsporu pracnosti při přípravě elektroinstalace stroje, jelikož je mnohem snazší rozmístit po stroji nebo celém řízeném procesu samostatné vstupně výstupní moduly komunikující s hlavním PLC, aniž by bylo nutné dovést kompletní kabeláž od všech senzorů až do řídicí části. Proto jsou používaným řešením distribuované vstupní a výstupní moduly šetřící čas nutný pro montáž a také náklady na elektroinstalaci zařízení.

■ 3.7.1 Volba vhodných distribuovaných ostrovů

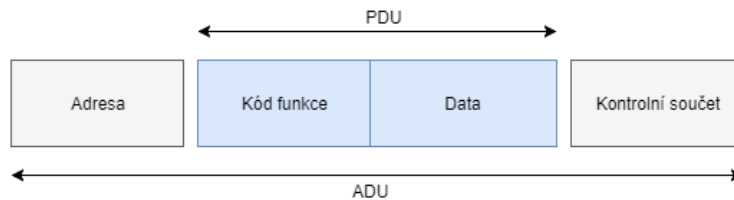
Z nabídky distribuovaných vstupně výstupních prvků společnosti SE určených pro segment kompaktních PLC na úrovni M241 je možné vybrat modul Advantys OTB. Tyto moduly nabízejí připojení do systému pomocí sběrnic CAN, Ethernet nebo RS485. Základní verze obsahuje 12 digitálních vstupů a 8 digitálních výstupů. Další vstupní nebo výstupní karty je možné připojit pomocí vlastní sběrnice. Tato varianta je však poměrně nákladná, jelikož cena modulu vybaveného přidanými kartami s počtem vstupů odpovídajících kompaktnímu PLC je přibližně trojnásobná. Proto je druhou možností použití druhého logického automatu, který bude sloužit jako distribuovaný ostrov. Tato varianta je zajímavá nejen cenou, ale hlavně také možností úpravy a zpracování vstupních hodnot už při čtení. Z tohoto důvodu byl použit jako vzdálený prvek logický automat **Modicon M221** umožňující připojení do společné sítě pomocí sběrnice Ethernet.

■ 3.8 Kompletní řídicí systém

V předchozí části byl proveden návrh jednotlivých komponent, což umožňuje přestavení zvolených komunikačních protokolů.

3.8.1 Modbus

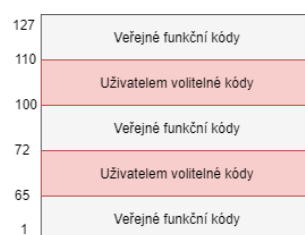
Modbus je komunikační protokol využívající aplikační vrstvu OSI modelu. Tento protokol byl navržen v roce 1979 firmou MODICON. Modbus podporuje komunikaci typu server/client zařízení připojených k široké škále sběrnic, mezi které v dnešní době patří RS-232, RS-422, RS-485, optické i rádiové sítě nebo Ethernet využívající protokol TCP/IP. Komunikace je tvořena žádostí a odpovědí.



Obrázek 3.5. Struktura datové zprávy protokolu Modbus [15]

Struktura zprávy na úrovni protokolu je definována nezávisle na typu používané sběrnice. V závislosti na použité síti je datová část rozšířena a tvoří aplikační zprávu. Maximální délka PDU (Protocol data unit) byla v první implementaci využívající sériovou komunikaci stanovena na 256 bytu. Z toho byl 1 byte využit pro adresování, 253 pro data a zbývající 2 byty pro kontrolní součet. Další verze zdědily maximální délku datového bloku. Díky tomu je maximální délka dat u Modbus TCP stanovena jako 260 bytů, kde 253 je rezervováno pro data, zbývajících 7 je použito pro hlavičku. Zasláné objekty je možné rozdělit na čtyři části, které jsou:

- 1) **Adresa** umožňující adresování připojených zařízení. V závislosti na použité sběrnici obsahuje adresní blok potřebné informace. Komunikace je vždy zahájena zařízením master/client. V případě sériové verze je řídicím členem master, pro ethernetový Modbus je pak arbitrem client. Každé připojené zařízení musí mít unikátní adresu v rámci konkrétní sítě. Tyto zásady jsou platné pro všechny implementace. Mezi dva nejpoužívanější typy patří:
 - Modbus využívající TCP/IP, u kterého je adresa rozšířena na MBAP (Modbus application protocol header) hlavičku. Pro přenos paketů má Modbus registrovaný port 502. Každé zařízení komunikující pomocí tohoto protokolu má definovanou IP adresu a také identifikační číslo v rozsahu 1–255, které umožní určit, zda se jedná o koncové zařízení, hodnota ID je v tomto případě 255, nebo o gateway na jiný typ sběrnice, kde ID určuje slave adresu za bránou.
 - Modbus na sériové lince využívá pro adresování 1 byte. Hodnoty 1–247 náleží připojeným slave zařízením. Pro broadcastové vysílání je rezervována adresa 0.
- 2) **Kód funkce** umožňuje řízení datového toku na sběrnici, který umožní arbitru vyžádat správná data, detekovat chybu nebo provést diagnostiku zařízení.



Obrázek 3.6. Členění kódů funkcí protokolu Modbus [15]

Kódu funkce je vyhrazeno 8 bitů. Prvních 7 bitů je určeno pro kód operace, nejvyšší bit umožňuje detekovat chybu. V části kódu funkce je při odpovědi zaslán tvar *kód funkce*, v případě úspěšné žádosti, a *kód funkce + 80h*, pro případ neúspěchu. Diagnostické kódy uvedené v tabulce 3.3 je možné používat pouze pro Modbus na sériové lince.

Kód	Funkce	Počet prvků	Typ
01	Čtení cívky	1–2000	bit
02	Čtení diskretních vstupů	1–2000	bit
03	Čtení uchovávacích registů	1–125	16 bit
04	Čtení vstupních registů	1–125	16 bit
24	Čtení fronty registrů	1–32	16 bit
05	Zápis jednotlivé cívky	1	bit
06	Zápis jednotlivého registu	1	16 bit
15	Zápis několika cívek	1–1968	bit
16	Zápis několika registů	1–123	16 bit
23	Zápis/čtení několika registů	1–121 / 1–125	16 bit
07	Čtení stavu výjimky	-	Diagnostika
08	Diagnostická zpráva	-	Diagnostika
11	Čtení obsahu čítače událostí	-	Diagnostika
12	Čtení logů událostí	-	Diagnostika

Tabulka 3.3. Přehled nejpoužívanějších Modbus kódů

- 3) **Data** slouží k přístupu do paměti slave zařízení. Modbus využívá datový model skládající se ze čtyř typů, kterými jsou:
- Cívky reprezentující jeden paměťový bit, který může být editován aplikací slave zařízení. Z tohoto důvodu nabízí tento typ oblasti možnost čtení i zápisu. Adresa cívek začíná od 1.
 - Diskrétní vstupy jsou paměťové bity reprezentující hodnotu vstupních pinů zařízení, proto tyto hodnoty není možné měnit v programu slave zařízení a jsou určeny pouze ke čtení. Počátek adres byl Modiconem stanoven na 10001.
 - Vstupní registry jsou stejně jako diskretní vstupy naplněny hodnotami vstupních proměnných. Tyto registry obsahují 16-ti bitovou informaci. Vstupní registry je možné pouze číst. Počátek adresace je 30001.
 - Holding registry slouží k ukládání 16 bitové hodnoty. Tyto hodnoty je možné modifikovat aplikací, a proto umožňují režim čtení i zápis. Blok holding registrů začíná adresou 40001.
- 4) **Kontrolní součet** je využíván jako zabezpečující mechanismus detekce chyb způsobených přenosovým kanálem. Tento blok dlouhý dva byty implementuje zabezpečení komunikace na sériové lince. V případě Modbusu TCP/IP není použit, jelikož jsou využívány zabezpečující mechanismy TCP.

■ 3.8.2 CANopen

CANopen byl navržen jako vyšší snadno konfigurovatelný protokol využívající sériovou sběrnici CAN patřící mezi průmyslové komunikační sítě označované jako provozní

sběrnice s teoretickou maximální rychlostí přenosu 1 Mb/s. V roce 1995 byl protokol, vyvíjený společností Bosch, předán organizaci CiA (CAN in Automation). CANopen má kořeny v protokolu CAL (CAN application layer). Verze 4.01 byla přijata jako norma EN 50325-4. Specifikace CANopen zahrnuje aplikační vrstvu, rámcový předpis pro zařízení i požadavky na propojovací prvky, proto je rozprostřen na 3–7 vrstvách OSI modelu. Na fyzické a datové vrstvě OSI modelu využívá CANopen sběrnici CAN, která je realizována řadiči splňující ISO 11898-1 a budiči podle ISO 11898-2. Takto sestavená sběrnice bývá označována jako vysokorychlostní.

Protokol využívá komunikační objekty definované slovníkem objektů umožňující vývoji vyhnout se řešení problémům specifických pro CAN. Ve slovníku objektů jsou uloženy informace o všech parametrech zařízení připojených v síti. Objekty jsou definovány unikátním 16-ti bitovým indexem a 8-mi bitovým sub-indexem. Parametr, jakým je například typ zařízení, musí být povinně definován, jiné jsou volitelné výrobem zařízení. Slovník objektů umožňuje používat datové typy, mezi které patří boolean, char, znaménkový i neznaménkový int, float a void. Objekty protokolu jsou zasílány v datové části CANopen zprávy a je možné rozčlenit do následujících částí

- Objekt **PDO** slouží pro přenos technologických dat. Každá zpráva obsahuje 8 bajtový blok dat. Každý objekt musí mít unikátní identifikátor, přičemž je vyslán vždy pouze jedním uzlem označovaným jako původce. Ostatní uzly sběrnice mohou tuto zprávu přijmout a jsou označovány jako spotřebitelé. Vysílání objektů je podmíněno vznikem události. Ty mohou být generovány vnitřním časovačem nebo událostí zařízení, požadavkem jiného uzlu sítě nebo přijetím synchronizační zprávy. Poslední možnost generování slouží například pro synchronizaci vstupních dat zařízení. Pro zajištění krátké odezvy jsou zprávy PDO označeny identifikátorem s vysokou prioritou. Objekty tohoto typu také nejsou potvrzovány, jelikož CAN zaručuje, že je zařízení nepřijme chybně [16].
- Objekt servisních dat **SDO** umožňuje čtení i zápis do jednotlivých položek slovníku. Proto slouží ke konfiguraci vlastností připojených zařízení, mezi které patří například konstanty regulátorů, rozsah vstupních veličin a pod. Tento typ objektů je také možné použít pro zasílání delších zpráv, jelikož mohou být neomezeně dlouhé. Mají však malou prioritu, tudíž nejsou určeny pro přenos časově kritických údajů.
- Objekty správy sítě **NMO** slouží pro údržbu a ovládání CAN sítě. Ve slovníku se nachází několik typů těchto zpráv, mezi které patří:
 - Síťový manažer NMT provádí nastavení všech zařízení v síti do požadovaného stavu. Těmito stavy jsou inicializace, předprovozní stav, běh a zastavení sběrnice. Zpráva tohoto objektu obsahuje 2 bajty dat. V prvním je přenášen požadovaný stav, ve druhém je určena adresa zařízení, které se příkaz týká. V případě nulové adresy je zpráva určena všem slave zařízením. Tato data jsou označena nulovým identifikátorem označujícím nejvyšší prioritu.
 - Node/life guarding provádí periodickou kontrolu přítomnosti zařízení v síti. To se děje pomocí cyklického dotazování na stav zařízení. Kontrolovaný uzel odpovídá svým stavem a doplňkovým bitem, který je každou zprávou negován, umožňujícím detekovat platnost zprávy. Kontrola je však oboustranná, jelikož v případě, že master nevyšle dotaz na stav, může uzel zareagovat předáním informace o neaktivitě arbitra sběrnice.
 - Heartbeat Object je jistou obdobou předchozího objektu, protože provádí periodické zasílání informace o přítomnosti konkrétního zařízení v síti. V případě, že master neobdrží tuto zprávu ve stanoveném čase, může opět zareagovat.

- Time stamp nese informaci o aktuálním čase. Takto zasílaná data jsou označována jako časové značky. Tato zpráva je produkována vždy pouze jedním zařízením sítě.
- Emergency object je vysílán v případě závažné chyby připojeného zařízení. Je odesílán s nejvyšší prioritou a nese informaci o typu chyby a identifikačním čísle zařízení, na kterém chyba vznikla.

3.9 Výsledný návrh řízení

Ke komunikaci hlavního PLC, distribuovaného ostrova a HMI panelu byl zvolen protokol Modbus TCP. Propojení těchto prvků pomocí Ethernetu je nutné pro udržení možnosti vzdálené správy přes internet. Proto je volba protokolu podporovaného existující sběrnici logická. Pro komunikaci s měniči ovládající aktuátory řízených os je využíván protokol CANOpen. Ten byl zvolen z několika důvodů, mezi které patří například prověřená funkčnost všech používaných prvků a také nemožnost vzdáleného narušení komunikace mezi PLC a ostatními zařízeními v síti CANOpen. Další výhodou je možnost řízení, ovládání nebo konfigurace pomocí knihovnic funkcí vestavěných v prostředí SoMachine. V neposlední řadě je také možné vzdáleného nastavení všech parametrů měničů z prostředí SoMachine využívající řídicí protokol CANOpen.

Proto bude nutné vybavit oba typy měničů komunikační kartou **VW3A3608** umožňující připojení na sběrnici CAN pomocí dvou konektorů RJ45 s funkcí Daisy chain zajišťující průchod dat posílaných po sběrnici i v případě neaktivního uzlu.

Kapitola 4

Bezpečnostní rizika

V této části práce bude provedeno posouzení zbytkových rizik, určení požadované úrovně bezpečnosti dle postupů uvedených v ČSN EN ISO 12100[18], návržení vhodných elektromechanických prostředků pro jejich zajištění v souladu s ČSN ISO 13849-1[19], kontrola splnění požadované úrovně bezpečnosti a realizace konkrétními prvky.

Postup snižování rizika uvedený v normě ČSN EN ISO 12100[18] je rozdělen do tří částí. První je integrace bezpečnostních prvků přímo do konstrukce stroje, kterou však tato práce nezpracovává. Náplní této práce je pouze volba bezpečnostní a doplňkové ochrany, která je druhou částí postupu snižování rizik. Nebezpečné místo, jehož rizika není možné eliminovat vhodným konstrukčním opatřením (např. obráběcí prostor s možností vstupu), musí být chráněno bezpečnostní funkcí vykonávanou bezpečnostním systémem. Ten obsahuje část detekce (snímače polohy, detekční rohože a pod), část vykonávající bezpečnostní funkci a bezpečně ovládané výstupní signály aktivující nebezpečné činnosti strojního zařízení.

Poslední částí postupu je pak souhrn varování před zbytkovými riziky, jež nebylo možné odstranit v rámci dokončení opatření v předchozích krocích.

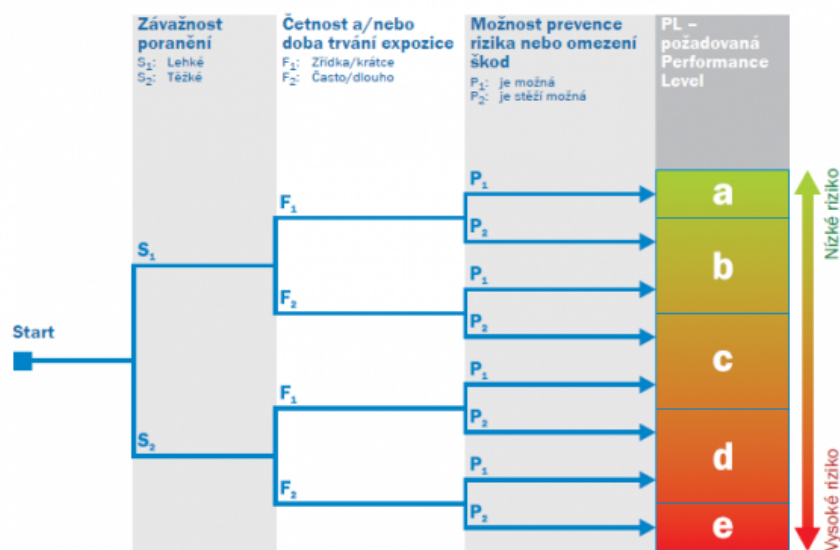
4.1 Postup posuzování a snižování rizik

Při návrhu bezpečnostní funkce je vhodné dodržovat systematický postup zahrnující:

- **Stanovení rizik**, jejichž výskyt musí být eliminován.
- **Stanovení požadované bezpečnostní úrovně PL_R** (Performance level required) určující bezpečnostní požadavky na základě pravděpodobnosti vzniku nebezpečné poruchy za jednu hodinu provozu. Jednotlivé rozsahy pravděpodobností jsou uvedeny v tabulce 4.1. Postup určení správné hodnoty PL je zobrazen na obrázku 4.1.
- **Navržení komponent bezpečnostní funkce**, které zajistí správné vykonání funkce, rozdělených do pěti kategorií, dle schopnosti odolávat poruchovému stavu, uvedené v normě ČSN EN ISO 13849[19].
- **Kontrola dosažené úrovně PL** (Performance level) je tomto případě provedena nástrojem SISTEMA (2.0.7. Build 2)[25], vyvinutým německou institucí IFA, umožňujícím namodelovat a vyhodnotit úroveň bezpečnosti dle normy ČSN EN ISO 13849[19].
- **Sestavení a konfigurace** ze zvolených komponent.

PL	Průměrná pravděpodobnost nebezpečné poruchy PFH_D
a	$\geq 10^{-5}$ až $< 10^{-4}$
b	$\geq 3 \cdot 10^{-6}$ až $< 10^{-5}$
c	$\geq 10^{-6}$ až $< 3 \cdot 10^{-6}$
d	$\geq 10^{-7}$ až $< 10^{-6}$
e	$\geq 10^{-8}$ až $< 10^{-7}$

Tabulka 4.1. Průměrné pravděpodobnosti nebezpečné poruchy pro jednotlivé úrovně PL

Obrázek 4.1. Postup určení požadované úrovně PL_R [24]

4.2 Požadavky na bezpečnost elektrických pohonů

V případě, že se vyskytují v bezpečnostních funkcích pohony s řízenou rychlostí, musí splňovat bezpečnostní požadavky definované normou ČSN EN 61800-5-2[20], která specifikuje vlastnosti a uvádí doporučení pro návrh, vývoj i integraci a následnou validaci takovýchto systémů.

Kategorie	Vlastnosti zastavení
0	Neřízené zastavení volným doběhem způsobené okamžitým odpojením přívodu energie.
1	Řízené zastavení, které je po dosažení klidového režimu následováno odpojením přívodu energie.
2	Řízené zastavení, které ani po dosažení klidového režimu neprovede odpojení energie.

Tabulka 4.2. Kategorie zastavení definované normou ČSN EN 60204-1

Norma ČSN EN 61800-5-2[20] popisuje základní bezpečnostní funkce, mezi které patří:

- **STO** (Safe Torque Off – Bezpečné odepnutí kroučícího momentu) – aktivace této funkce způsobí okamžité zastavení v kategorii 0 popsaném v tabulce 4.2. Pohon tedy okamžitě odpojí motor od energie, což způsobí volný doběh. Tato funkce se využívá především při požadavku na vypnutí nebo zajištění proti neočekávanému spuštění.
- **SS1** (Safe stop 1 – Bezpečné zastavení 1) – umožní pohonem řízené nebo monitorované zastavení, po kterém zahájí funkci STO. V případě, že brzdění není řízeno ani monitorováno přechází zastavení do režimu STO po uplynutí doby nutné pro jisté zabrzdění. Tato funkce tedy provádí zastavení v kategorii 1 uvedeném v tabulce 4.2.
- **SS2** (Safe stop 2 – Bezpečné zastavení 2) – provede řízené, monitorované nebo časem kontrolované zastavení, stejně jako v případě SS1. Při dosažení klidu však přechází do režimu SOS. Tato funkce odpovídá zastavení v kategorii 2 popsaném tabulkou 4.2.
- **SOS** (Safe operating stop – Bezpečné provozní zastavení) – je funkce zabraňující motoru odchýlení od zastavené polohy. Jelikož je tato funkce druhou částí zastavení kategorie 2 představeného v tabulce 4.2, nevyužívá motorovou brzdu.

- **SLS** (Safely limited speed – Bezpečně omezená rychlost) – zabraňuje kontrolovanému motoru, aby překročil nastavenou mez bezpečné rychlosti.
- **SSM** (Safe speed monitor – Monitor bezpečné rychlosti) – umožňuje bezpečně indikovat stav, kdy se motor pohybuje rychlostí nižší než je stanovená.

4.3 Určení bezpečnostní funkcí

V této části bude proveden kompletní proces uvedený v sekci 4.1.

4.3.1 Posouzení bezpečnostních rizik

Prvním krokem je návrh bezpečnostní a doplňkové ochrany, která by měla zajistit snížení nebezpečí na únosnou mez. Ve stručnosti zde ještě jsou uvedeny důležité informace, které budou využity pro návrh bezpečnostních funkcí stroje, uvedené v posudku bezpečnosti strojních zařízení, který je proveden expertem v oboru posuzování bezpečnosti. Na tuto část pak navazuje praktické určení doplňkové ochrany.

V obráběcím prostoru stroje jsou umístěna dvě vřetena, která upínají brousicí nástroj a broušený kulový ventil. Nebezpečí zde vzniká od pohyblivých mechanických částí. Pracovníci jsou také ohroženi hlukem. Proto zde byl navržen kompletní kryt obráběcího prostoru. Z důvodu umožnění přístupu do oblasti broušení je kryt vybaven pohyblivou částí. Dále se u obou vřeten vyskytuje nebezpečný prostor v podobě řemenového převodu. Zde je nebezpečí vzniklé pohyblivými mechanickými částmi. Opatřením je demontovatelný kryt řemenového převodu.

4.3.2 Stanovení PL_R

Proces určení úrovně PL_R pro obráběcí prostor využívá grafického postupu uvedeného na obrázku 4.1. Při práci v tomto prostoru hrozí obsluze poranění závažnosti S_2 způsobené neočekávaným rozběhem jednoho z vřeten, jelikož při neočekávaném spuštění obráběcích nástrojů může dojít k amputaci nebo vážnému poškození zdraví vtažením nebo vymrštěním nesprávně upnutého materiálu. Četnost vystavení riziku je nízké, jelikož bude docházet k nepravidelné výměně materiálu během pracovní směny a také obsluha nebude trvale přítomna u procesu obrábění, což je podle používané normy možné klasifikovat kategorií F_1 . Posledním kritériem pro určení požadované úrovně PL_R je ověření možnosti prevence rizika, která je v tomto případě stěží možná, jelikož na stroji mohou pracovat jak osoby s dostatečnými bezpečnostními zkušenostmi výrobního procesu tak i osoby sice proškolené, ale bez těchto zkušeností. Z tohoto důvodu je dle postupu z obrázku 4.1 zvolena požadovaná hodnota PL_R d.

Jelikož je postup odhadu rizik pro ostatní zmiňované prostory analogický, budou v tabulce 4.3 uvedeny hodnoty určené totožným postupem.

Rizikový prostor	PL
Nouzové zastavení	e
Posuvný kryt obráběcího prostoru	d
Kryty pohonů a vřeten	d

Tabulka 4.3. Přehled rizik a posouzená úroveň vlastností

4.3.3 Navržení komponent bezpečnostní funkce

V předchozí sekci bylo provedeno posouzení úrovně rizik pro jednotlivé rizikové části stroje a určeny hodnoty PL_R , pomocí kterých je možné sestavit bezpečnostní funkce. Ty se na stroji vyskytují tři a budou v této části práce představeny i doplněny komponenty, které je vykonávají.

- Nouzové zastavení** je aktivováno červenými hřibovitými tlačítky snadno dostupnými obsluze stroje. Aktivace této funkce vyvolá zastavení zařízení kategorie 0. Díky tomu jsou veškeré silové obvody stroje deaktivovány. Vyhodnocování stavu tlačítek nouzového vypnutí je provedeno dvoukanálově, což zajistí dostatečnou úroveň bezpečnostní funkce. Přívod energie je zachován pouze pro řídicí a bezpečnostní systém. Pro deaktivaci této funkce je nutné opětovné spuštění potvrzené obsluhou, po kterém dochází k aktivaci napájení silových částí stroje a také deaktivaci funkce STO pohonům lineárních os.
- Monitorování krytů obráběcího prostoru** je funkce zajišťující bezpečný vstup do obráběcího prostoru. Při požadavku o vstup do tohoto prostoru je provedena kontrola bezpečného stavu vřeten, kterou vykonává modul pro potvrzení nulových otáček stroje fungující na principu měření zbytkového magnetického pole generovaného elektromotorem, po které je umožněno otevření krytů. Použitím modulů **XPSVNE** je tak možné detekovat nulové otáčky přímo na výstupu frekvenčního měniče, pokud je zajištěno nerozpojitelné spojení motoru a snímače¹. Pokud by nebyla využita tato varianta, musely by být oba motory vybaveny vhodnými enkodéry, což by zvyšovalo náklady a vyžadovalo mechanické úpravy stroje. Při otevřeném krytu obráběcího prostoru je na pohonu brusného vřetene aktivovaná funkce STO. Pro možnost nastavení polohy obrobku je možné provozovat unášecí vřeteno bezpečnou rychlostí omezenou funkcí SLS. Po uzavření krytů jsou kryty zajištěny elektromagnetickým zámekem a bezpečnostní funkce povolí pohyb obou vřeten. Jelikož je možné poměrně snadno obstarat zamykací zobáček zámku, jsou navíc kryty vybaveny bezpečnostním kontrolním snímačem polohy, který pracuje synchronně s elektromagnetickým zámekem vybaveným druhým kontrolním snímačem polohy krytů. Tato konfigurace je schopna odhalit potenciální pokus o vyřazení bezpečnostní funkce obsluhou stroje.
- Monitorování krytů pohonů vřeten** zajišťuje bezpečný provoz obou vřeten. Oba kryty jsou monitorovány dvoukanálovým bezpečnostním spínačem vyhodnocujícím polohu krytů. Tyto snímače jsou pro úsporu vstupních svorek zapojeny sériově. V případě, že jsou nasazeny kryty, je provedena deaktivace funkce STO pro unášecí vřeteno. Umožnění pohybu brusného vřetene je blokováno po dobu otevřených krytů obráběcího prostoru.



Obrázek 4.2. Bezpečnostní spínače otevření a zajištění krytů

¹ http://download.schneider-electric.com/files?p_Reference=S1A28775&p_EnDocType=Instruction%20sheet&p_File_Id=687328368&p_File_Name=S1A28775_00.pdf

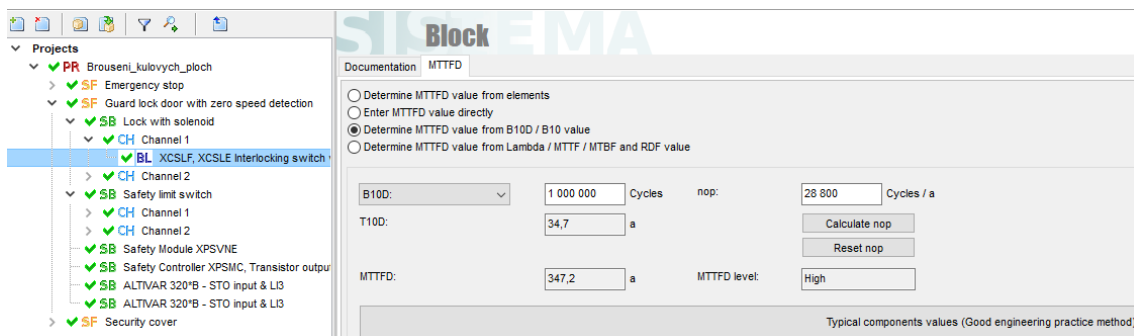
Ke kontrole většího množství komplexnějších bezpečnostních funkcí byl zvolen konfigurovatelný bezpečnostní kontrolér **Preventa XPS MC** disponujícím 16 digitálními vstupy, 6 tranzistorovými a 2 reléovými výstupy.

4.3.4 Kontrola dosažené úrovně PL

Pro výpočet a kontrolu splnění hodnot úrovně vlastností bezpečnostních funkcí je použit volně stažitelný nástroj SISTEMA (2.0.7. Build 2)[25]. Umožňuje namodelovat a vyhodnotit úroveň bezpečnosti dle normy ČSN EN ISO 13849[19]. Kontrola splnění dostatečné úrovně bezpečnostní funkce PL probíhá přidáváním všech bloků použitých v bezpečnostní funkci do řetězce, u kterého je okamžitě zhodnoceno dosažení minimální úrovně nastavené při vytváření bezpečnostní funkce.

Velkou výhodou takové kontroly je obrovské množství elektromechanických senzorů, řídicích členů a výstupních prvků dostupných v knihovnách tvořených výrobcí bezpečnostních prvků¹. Protože jsou všechny důležité vlastnosti jako $MTTF_D$ nebo B_{10D} stanoveny výrobcem, je návrh rychlejší a přesnější než v případě použití tabulek uvedených v ČSN ISO 13849[19]. Výstupním dokladem hodnocení je protokol dokládající úroveň zvolených bezpečnostních funkcí.

Při porovnání hodnot požadované úrovně bezpečnosti PL_R a dosažené úrovně PL je možné konstatovat, že navržené bezpečnostní funkce minimalizují rizika na únosnou hranici.



Obrázek 4.3. Nástroj ověření bezpečnostních funkcí SISTEMA

4.3.5 Návrh bezpečnostních funkcí

Procedura umožnění bezpečného vstupu či spuštění obrábění je prováděna bezpečnostním kontrolérem navrženým v předchozí části. Jeho funkce budou programovány v části 7.3 zabývající se samotnou implementací řídicího systému.

¹ <http://www.dguv.de/ifa/praxishilfen/practical-solutions-machine-safety/software-systema/systema-bibliotheken/index.jsp>

Kapitola 5

Návrh řídicího systému

V této kapitole je představen řídicí systém modernizovaného stroje popsany diagramem uvedeným na obrázku 5.1 sestaveným ze základních bloků, mezi které patří :

- Proces manuálního obrábění představený v sekci 5.1.
- Proces automatického obrábění popsany sekci 5.2.
- Nastavování parametrů stroje popsané v sekci 5.3.

Každé z operací je v následující části věnován prostor pro detailnější popis funkčnosti.

5.1 Proces manuálně řízeného obrábění

Tato část řídicího systému umožňuje obsluze provést manuálně řízený obráběcí cyklus. Tato volba je vhodná především pro kusovou výrobu a také kontrolu nových technologických postupů. V manuálním režimu je samozřejmostí možnost změny otáček obou vřeten. Všechny funkce stroje mohou být samostatně ovládány, pokud jsou splněny všechny bezpečnostní či technické podmínky nutné pro jejich spuštění. Poloha obráběcích částí je v tomto režimu zobrazována pouze v absolutním souřadném systému.

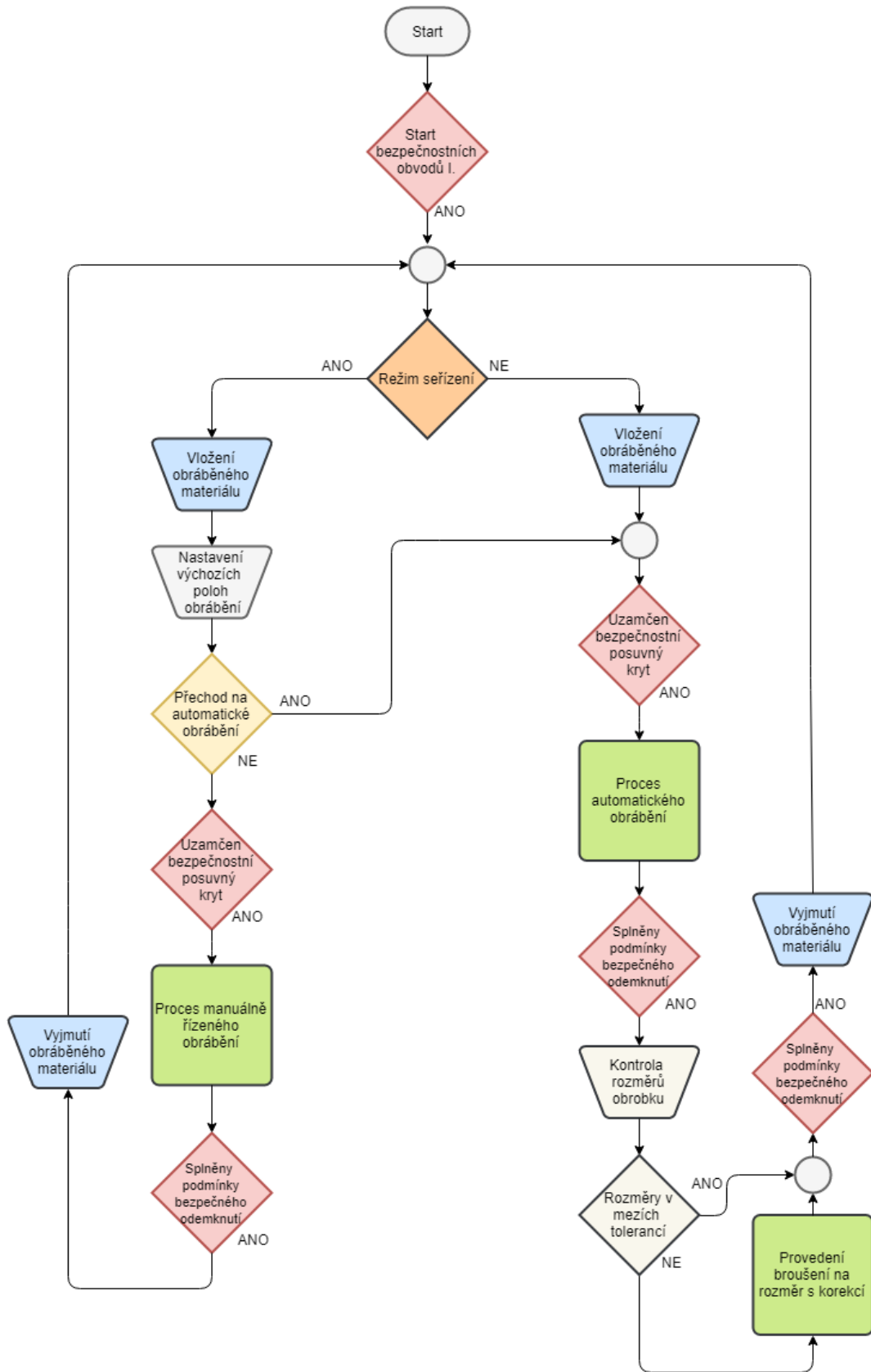
Funkce	Podmínky bezpečnostní	Podmínky technologické
Start brus. vřetene	Nasazeny kryty řemenu	-
Start unáš. vřetene	Nasazeny kryty řemenu	Dostatečný tlak mazání
Start chladicí kap.	-	Brusné vřeteno rozběhnuto
Start odsávání	-	-
Pohyb osy X	Bezpečnost I + potvrzení tlačítkem	-
Pohyb osy Y	Bezpečnost I + potvrzení tlačítkem	-

Tabulka 5.1. Přehled funkcí manuálně řízeného obrábění a podmínky jejich spuštění

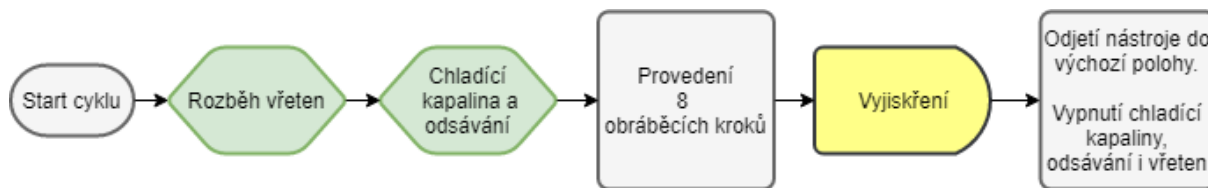
5.2 Proces automaticky řízeného výrobního cyklu

Automatický obráběcí cyklus je určen pro sériovou výrobu. Pokud uživatel provede nastavení obráběcí receptury uvedené v sekci 5.3.1, a nastavením počátku dle postupu popsáném v sekci 5.3.2 stroj provede kompletní výrobní cyklus, který zakončí obsluha ověřením rozměrů a výměnou obráběného materiálu. Pro zjednodušení kontroly cyklu řadovým operátorům, je poloha obráběcích částí v automatickém cyklu zobrazována nejen v absolutním, ale i v relativním souřadném systému s nulou nacházející se v poloze žádaného rozměru obrobku. Automatický cyklus je popsán na obrázku 5.2.

Závěrečný brousící krok se nazývá vyjiskření, nebo také leštění. To je charakterizováno setrváním obráběcího nástroje ve stálé nulové pozici po stanovený čas, během kterého dochází k vyhlazení broušené plochy. Poté je provedeno rychlé odjetí od broušeného kusu do výchozí polohy, vypnutí chlazení, odsávání i zastavení vřeten kvůli založení dalšího materiálu. Poté může být z výchozí pozice opět spuštěn automatický cyklus.



Obrázek 5.1. Vývojový diagram řídicího systému stroje



Obrázek 5.2. Detail broušení v automatickém režimu

5.3 Nastavení parametrů

Možnost nastavení automatického obráběcího programu je umožněna změnou parametrů obrábění. Stroj umožňuje obrábění ve dvou režimech, kterými jsou:

- **Kontinuální**, ve kterém dochází k průběžnému úběru materiálu rychlostí nastavenou v jednotlivých krocích programu. U každého kroku lze editovat velikost a rychlost úběru.
- **Krokový** využívající rychlého přidání do materiálu kombinovaného s čekáním v jednotlivých bodech procedury. Velikost kroku i dobu setrvání lze ve výrobní receptuře nastavovat.

5.3.1 Hodnoty brousícího programu

Obráběcí program obsahuje jak parametry týkající se celého průběhu broušení, mezi které patří:

- obvodová rychlost brusného nástroje,
- otáčky unášecího vřetene,
- doba vyjiskření,
- obecná rychlost přísunu (aktivní v krokovém režimu),

tak parametry vztažené k jednotlivým krokům programu. Receptura se skládá z osmi částí, kde každá obsahuje parametry:

- úběr,
- rychlost přísunu (aktivní v kontinuálním režimu),
- čas broušení (aktivní v krokovém režimu).

5.3.2 Nastavení výchozí polohy

Správné nastavení výchozí polohy obráběcího nástroje vůči obrobku je nutné pro možnost opětovného spuštění brousícího cyklu. Nastavení výchozích poloh je operátorovi umožněno pomocí HMI panelu a ručního ovladače polohy obou translačních os stroje. Procedura nastavení polohy obsahuje:

- Vložení prvního broušeného obrobku.
- Nastavení pozice brousícího nástroje v podélném směru (osa **Y**) za použití ručního ovladače.
- Zapsání aktuální polohy podélné osy.
- Nastavení pozice brousícího nástroje ve směru příčné osy (**X**) použitím ručního ovladače. Nulová poloha je pak stanovena jako rozdíl uložené aktuální polohy a celkového úběru, uvedeného v sekci 5.3.1.

- Zapsání aktuální polohy příčné osy.

Po dokončení nastavení výchozích poloh může operátor přejít k automatickému obráběcímu cyklu. Po přepnutí stroje do automatického režimu je aktuální poloha zobrazována i relativně.

■ 5.3.3 Provádění korekcí

Jelikož dochází při broušení k úběru materiálu nejen z broušeného ventilu, ale i z brusného nástroje, je nutné provést korekci nulové polohy v příčné i podélné ose po dokončení kritického počtu automatických cyklů. Pro správné fungování systém umožňuje korekce v obou směrech pro obě lineární osy.

- **Kladná korekce X** způsobí posun nulové polohy broušení kladným směrem (posun vzad od broušeného materiálu). Díky tomu je kulový ventil obráběný v následujícím cyklu ponechán větší, o zadanou korekci, než předchozí obrobek.
- **Záporná korekce X** je určena pro případ, že v průběhu obrábění došlo k velkému úbytku broušícího nástroje. Pokud je po dokončení automatického režimu průměr ventilu větší než požadovaný avšak v toleranci, může provést operátor pomocí záporné korekce posun nulové polohy broušení záporným směrem (posun do broušeného materiálu). Díky tomu je kulový ventil obráběný v následujícím cyklu zmenšen navíc o úbytek brusiva. Pokud jsou rozměry obrobku po dokončení broušícího cyklu větší, než stanovuje toleranční pásmo, má operátor možnost zadání záporné korekce s dobroušením. Pokud obsluha stroje použije tuto možnost, řídicí systém provede posun nulové polohy a spustí obrábění o velikosti zadané korekce. Díky tomu tak stroj dobrousí například pouze 0,05 mm. V případě, že by operátor zadal pouze korekci a spustil by automatický cyklus s cílem obroušení aktuálního kulového ventilu, na korektní rozměr nacházející se v tolerančním pásmu, stroj by obráběl téměř celou výrobní recepturu naprázdno.
- **Kladná korekce Y** provede posun osy brusného nástroje vpravo.
- **Záporná korekce Y** umožní posun osy brusného nástroje vlevo.

Pokud dojde k úspěšnému dokončení broušícího cyklu, je posunutá nulová poloha uložena jako aktuální a zadaná korekce je vynulována.

Kapitola 6

Nastavení řídicích prvků os

V této kapitole je prováděno nastavování regulátorů a jejich parametrů pro všechny řízené osy stroje. Konfigurace je provedena pomocí software SoMove.

6.1 Frekvenční měnič brusného vřetene

Nastavení parametrů ve frekvenčním měniči pro synchronní motor pohánějící brusné vřeteno je velmi snadné, jelikož kombinace synchronního motoru BMP a ATV320 je výrobcem doporučená varianta umožňující již při zvolení připojených zařízení automatickou konfiguraci všech parametrů potřebných pro řízení motoru. Konfigurace obsahuje požadavek na automatické ladění parametrů regulace při prvním spuštění motoru, není nutné parametry nastavovat. Díky vlastnostem motoru uvedeným v sekci 3.1.1 vytváří frekvenční měnič pouze předem známý profil výstupní frekvence, který motor sleduje. Nastavovány tedy jsou pouze parametry komunikace a uvolnění řízení po komunikační sběrnici.

6.2 Frekvenční měnič unášecího vřetene

Konfigurace parametrů frekvenčního měniče řídicího asynchronní motor pohánějící unášecí vřeteno zahrnuje zadání parametrů motoru, mezi které patří nominální výkon, proud, otáčky a frekvence napájecího napětí. Poté je třeba stanovit rozsah kmitočtu výstupního napětí. Posledním krokem je nastavení bezpečnosti funkce SLS umožňující provoz bezpečně omezenou rychlostí při otevřeném krytu.

6.3 Servo-měnič lineární osy X

Konfigurování parametrů měniče servomotoru osy **X** se dělí na dvě části. V první části je provedeno nastavení všech parametrů nutných pro ovládání a bezpečný provoz měniče, v druhé dochází k vlastnímu nastavení regulátorů motoru.

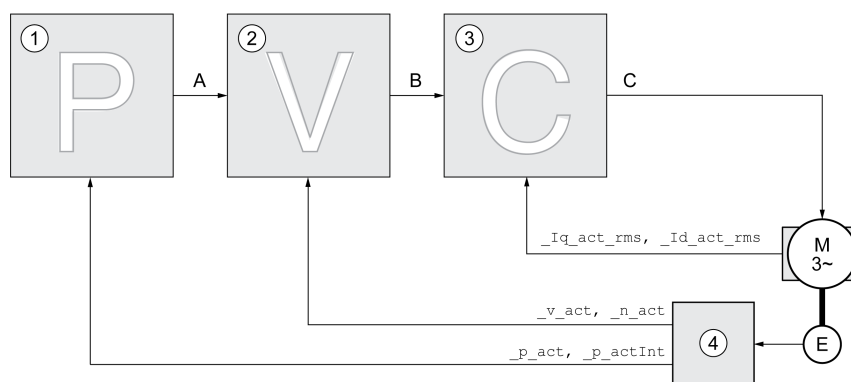
6.3.1 Parametry

Pro správné fungování servo-měniče LXM32 je nutné nastavení všech potřebných parametrů. Přehled nejdůležitějších je uveden v tabulce 6.1.

Součástí konfigurace je i nastavení polohy obou virtuálních koncových spínačů. Jelikož je osa vybavena absolutním odměřováním, odpadá nutnost změny nastavení souvisejících se zpracováním polohy.

Označení	Hodnota	Funkce
CTRL_I_max	8 A	Omezení maximálního proudu
CTRL_v_max	6000 rpm	Omezení maximální rychlosti
MON_SW_Limits	SWLIMP+SWLIMN	Monitorování virtuálních koncových spínačů
ScalePos	10000 poloh/ot	Přepočet rotačního pohybu na translační
IOfunct_DI2/3	LIMP/LIMN	Monitorování mechanických koncových spínačů
ENCDigSSILinRes	24b	Délka zprávy lineárního SSI enkodéru
ENC2_usage	Machine	Použití přídatného enkodéru
ENC_ModeOfMaEnc	Position control	Zpětná vazba polohy z externího enkodéru
CANaddress	4	Nastavení adresy zařízení
CANbaud	250kBaud	Nastavení komunikační rychlosti

Tabulka 6.1. Seznam nastavovaných parametrů



Obrázek 6.1. Struktura regulačního obvodu LXM32[10]

6.3.2 Regulační obvod Lexium 32

Zpětnovazební regulační obvod servo-měníče LXM32 se skládá ze čtyř částí uvedených na obrázku 6.1.

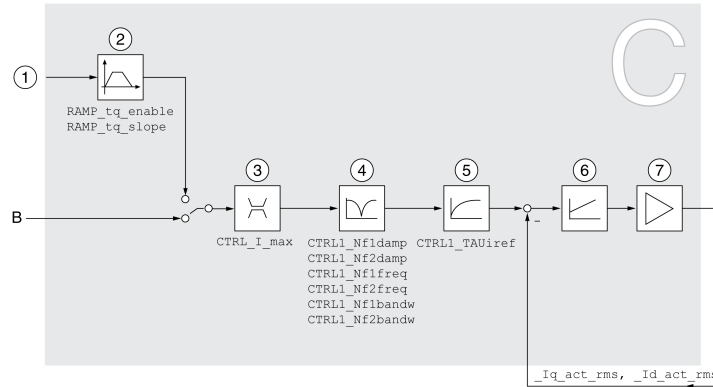
Těmito částmi jsou

- 1) Regulátor polohy na obrázku 6.4.
- 2) Regulátor rychlosti na obrázku 6.3.
- 3) Regulátor proudu na obrázku 6.2.
- 4) Enkodér motoru.

Jednotlivé části regulačního obvodu jsou zapojeny kaskádně. Výstupem nadřazeného regulátoru je pak požadovaná hodnota veličiny. U regulátoru pozice je výstupem žádaná rychlost, pro řízení rychlosti je touto veličinou žádaný proud. Takto kaskádně zapojený regulační obvod umožňuje upravit vlastnosti jednotlivých regulátorů dle konkrétních potřeb aplikace.

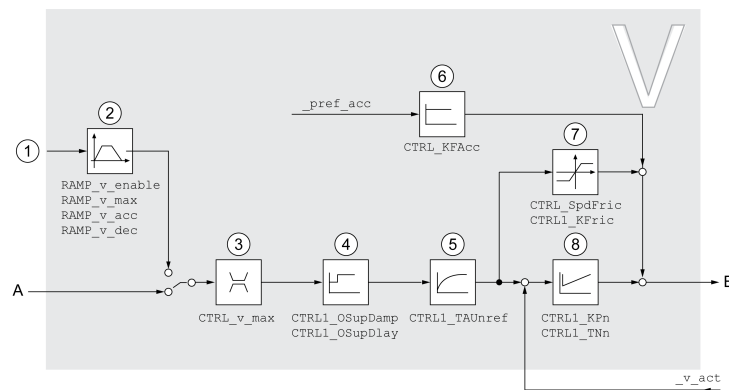
První částí regulačního obvodu je **regulátor proudu** na obrázku 6.2. Ten má vzorkovací periodu $62,5 \mu s$ a pracuje ve dvou režimech. Prvním je přímé řízení krouťícího momentu motoru, jež je označeno vstupem číslo jedna, pod číslem dvě se nachází generátor žádaného momentu. Druhým typem je sledování žádané velikosti proudu - výstupní hodnota rychlostního regulátoru. Pomocí přepínače jsou žádané proudy případně omezeny blokem číslo (3). Filtrování hodnot obstarávají bloky číslo (4) a (5). Samotný

regulátor proudu je označen číslem (6), do kterého již vstupuje regulační odchylka. Poslední součástí tohoto obvodu je výkonová část označená (7). Regulátor proudu je automaticky optimalizován pro konkrétní připojený motor.



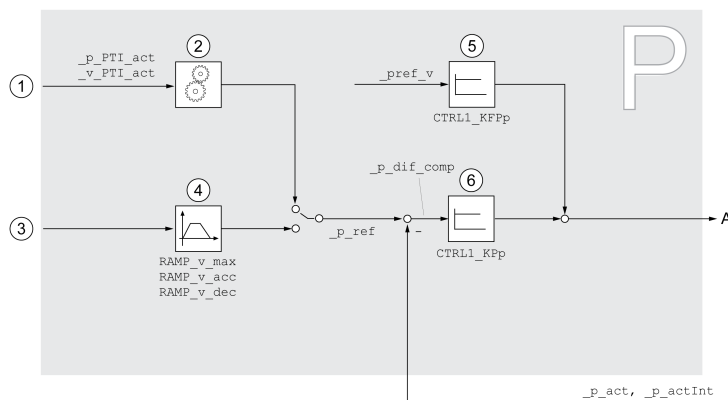
Obrázek 6.2. Schéma regulačního obvodu proudu LXM32[10]

Nadřazený regulační obvod na obrázku 6.3 zajišťuje **řízení rychlosti** a má stejnou vzorkovací periodu jako podřízený stupeň regulace. Ten také umožňuje přímé řízení rychlosti pomocí generátoru profilu rychlosti. Vstupem do generátoru je požadovaná rychlost zadávaná nadřazeným systémem nebo je svázána rychlostní vazbou s dalším systémem funkcí elektronické hřídele. V dalším kroku (3) dochází k případnému omezení velikosti rychlosti. Bloky (4) a (5) slouží jako filtr potlačující překmit a filtr referenční hodnoty. Části označené (6) a (7) slouží pro zavedení dopředné regulace zrychlení a nastavení úrovně kompenzace tření. Poslední částí je (8) zajišťující vlastní rychlostní regulátor.



Obrázek 6.3. Schéma regulačního obvodu rychlosti LXM32[10]

Poslední a nejpomalejší částí regulační smyčky s vzorkovací periodou $250 \mu s$ je **regulátor polohy** na obrázku 6.4. Ten má opět dva druhy žádané polohy. První je možné získat pomocí funkce elektronické hřídele, tentokrát v režimu polohové vazby. Druhým vstupem je požadovaná hodnota zadaná nadřazeným řídicím systémem. V případě určení požadované polohy nadřazeným členem vytvoří generátor profilu (4) průběh žádané



Obrazek 6.4. Schéma regulačního obvodu polohy LXM32[10]

polohy vstupující do vlastního polohového regulátoru (8). Blok (6) umožňuje zavedení dopředné rychlostní smyčky.

Všechny generátory používají pro generování profilu rovnoměrně zrychlený, rovnoměrný a rovnoměrně zpomalený pohyb. Po kompletním rozboru struktury regulačního obvodu je možné v dalším kroku přistoupit k samotnému nastavení jednotlivých parametrů uvedených regulátorů.

6.3.3 Nastavení regulačního obvodu

Pro ladění řídicího obvodu byl použit doporučený postup uvedený v programovacím manuálu [10]. Postup optimalizace regulace pro elastický systém je uveden v tabulce 6.2.

Krok	Úkon
1	Zvýšení sumační časové konstanty na maximální hodnotu (327,67 ms)
2	Spuštění funkce skokové změny žádané rychlosti
3	Kontrola velikosti hodnoty maximálního proudu a rychlosti
4	Pozvolné zvyšování konstanty proporcionální složky, nejrychlejší odezva bez překmitu
5	Určení časové konstanty integrační složky odečtením času kdy dosáhne odezva 63%
6	Dodatečné nastavení proporcionální konstanty - [pomalá - zvýšení][kmitavá - snížení]
7	Pozvolné zvyšování konstanty proporcionální složky, nejrychlejší odezva bez překmitu

Tabulka 6.2. Postup nastavení regulačního obvodu rychlosti [10]

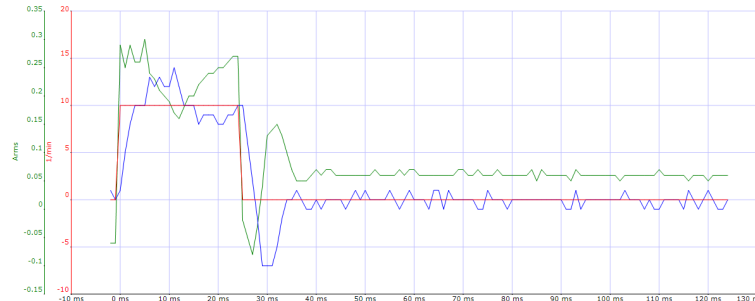
V druhém kroku byl nastaven regulátor polohy. Doporučené kroky jsou uvedeny v tabulce 6.3.

Krok	Úkon
1	Spuštění funkce skokové změny žádané polohy
2	Spuštění funkce skokové změny rychlosti
3	Nastavení vhodné hodnoty proporcionální konstanty, nejrychlejší odezva bez překmitu

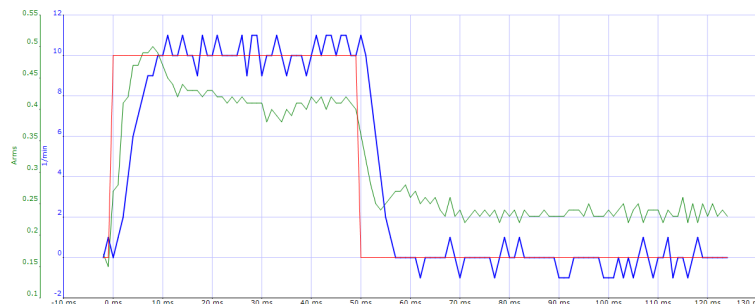
Tabulka 6.3. Postup nastavení regulačního obvodu polohy [10]

V souladu s postupem, uvedeným v tabulce 6.2 byly nastaveny parametry regulačního obvodu rychlosti. Ten využívá pro zpětnou vazbu motorový enkodér. Ručně nastavený má kromě výše uvedených parametrů nastaveny ještě filtry vstupních hodnot a upraveny

hodnoty feed forward rychlosti i zrychlení. Na obrázcích 6.5 a 6.6 jsou vidět odezvy na skokovou změnu žádané rychlosti pro obě nastavení regulátorů. Z grafů je patrné, že automaticky nastavený regulátor má čtyřnásobný překmit a kmitá okolo žádané hodnoty třikrát více než manuálně laděná verze.

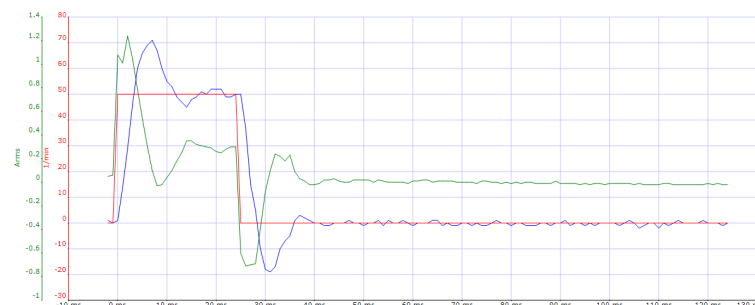


Obrázek 6.5. Skoková odezva automaticky laděného regulátoru rychlosti – žádaná hodnota 10 ot.m^{-1}



Obrázek 6.6. Skoková odezva manuálně laděného regulátoru rychlosti – žádaná hodnota 10 ot.m^{-1}

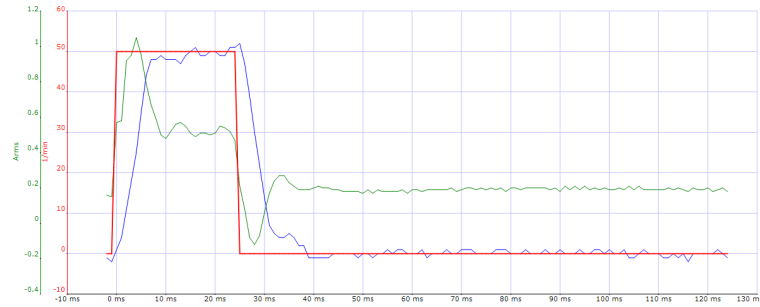
Druhá dvojice skokových odezev rychlosti zachycuje průběh ustálení na vyšší žádané hodnotě. Na obrázcích 6.7 a 6.8 je opět ručně nastavený regulátor lepší. A to z pohledu rychlosti ustálení i překmitu.



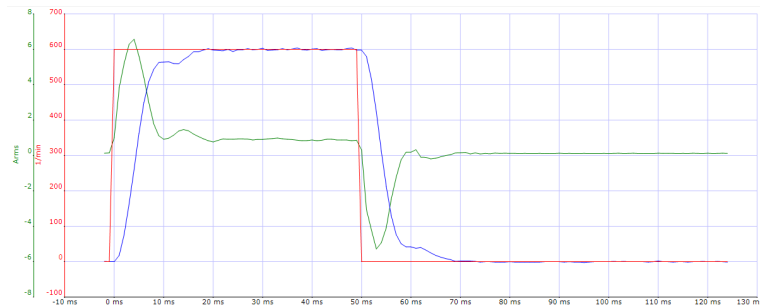
Obrázek 6.7. Skoková odezva automaticky laděného regulátoru rychlosti – žádaná hodnota 50 ot.m^{-1}

Pro úplnost je přehled odezev doplněn o odezvu na skokovou změnu rychlosti s velikostí 600 ot.m^{-1} na obrázku 6.9.

Polohová regulační smyčka byla nastavována podle tabulky 6.3. Skutečná poloha je vyčítána z absolutního lineárního enkodéru připojeného do regulačního obvodu. Díky



Obrázek 6.8. Skoková odezva manuálně laděného regulátoru rychlosti – žádaná hodnota 50 ot.m^{-1}



Obrázek 6.9. Skoková odezva manuálně laděného regulátoru rychlosti – žádaná hodnota 600 ot.m^{-1}



Obrázek 6.10. Skoková odezva polohového regulátoru - žádaná hodnota $+1 \mu\text{m}$



Obrázek 6.11. Skoková odezva polohového regulátoru - žádaná hodnota $+10 \mu\text{m}$

tomu je možné splnit požadavky na minimální velikost kroku, který není zatížen chybou způsobenou mechanickými nedostatky systému.

Na obou skokových odezvách je zřejmé, že manuálně nastavené regulátory mají nejmenší možný překmit, což bylo i cílem regulace, jelikož není při obrábění možné

zabrousit do materiálu a poté se ustálit na větším rozměru obrobku. U velikosti minimálního žádaného kroku na obrázku 6.10 je velikost překmitu sice 10 %, nicméně menšího není možné bez lepšího enkodéru dosáhnout. I přesto je však lineární osa bez problémů schopna provést krok velikosti 1 μm a měřená hodnota v μm nekmitá.

6.4 Servo-měnič lineární osy Y

Postup nastavování parametrů i regulačního obvodu je totožný jako u první lineární osy. Proto budou uvedeny jen speciální parametry nastavované pouze u podélné osy stroje. Sekce nastavování regulátoru bude obsahovat pouze srovnání různých nastavení regulačního obvodu.

6.4.1 Parametry

Jelikož není tato řízená osa vybavena absolutním enkodérem, je nutné pro zachování možnosti provozu bez nutnosti referencování používat funkci simulace absolutní polohy. Toto nastavení je uvedeno 6.4.

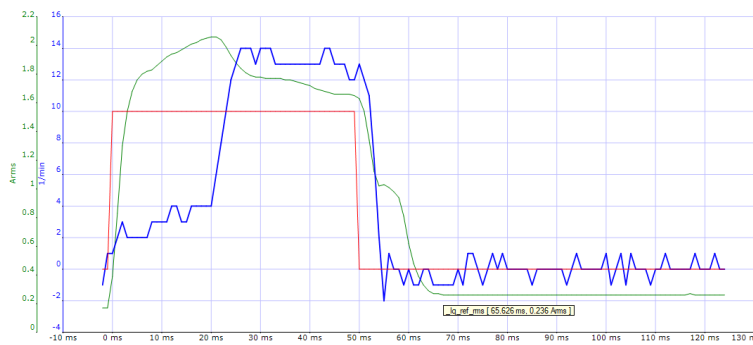
Označení	Hodnota	Funkce
SimAbsolutePos	Simulation on	Aktivace funkce simulace absolutní polohy
AbsHomeRequest	No	Umožní využívání absolutního polohování bez nutnosti reference

Tabulka 6.4. Seznam nastavovaných parametrů

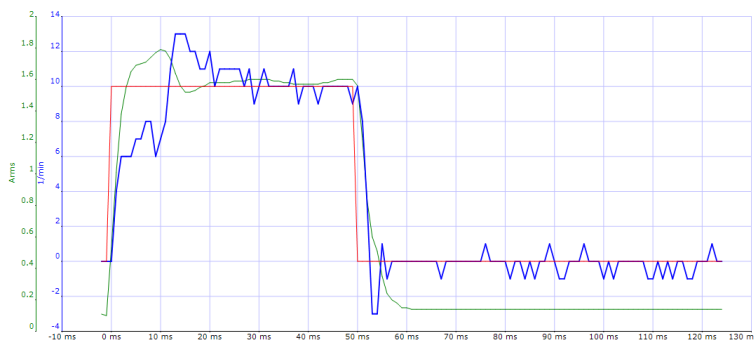
Simulace absolutní polohy má ovšem i jeden nedostatek. V případě, že dojde k otočení rotoru motoru ve vypnutém stavu, je simulace vypnuta. Poté je nutné provést opětovné nastavení nulové polohy enkodéru. Ostatní parametry byly nastaveny v souladu s tabulkovými hodnotami motoru.

6.4.2 Nastavení regulačního obvodu

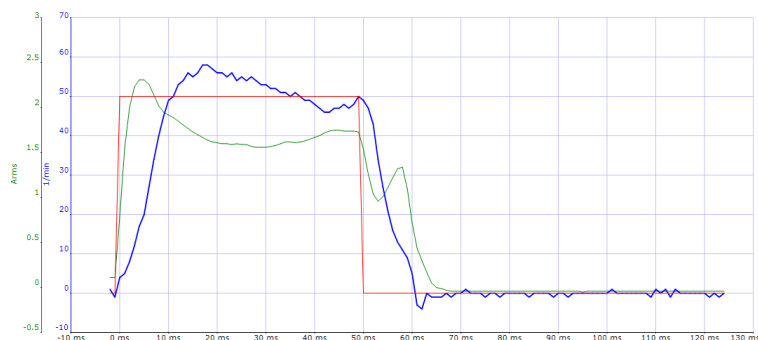
Průběh určení vhodných konstant byl shodný s postupem uvedeným v tabulkách 6.2 a 6.3 prováděným v předchozí části u osy X. Pro srovnání vlastností regulace, je vždy nastavený regulátor konfrontován regulačním obvodem, který byl nastavován automaticky.



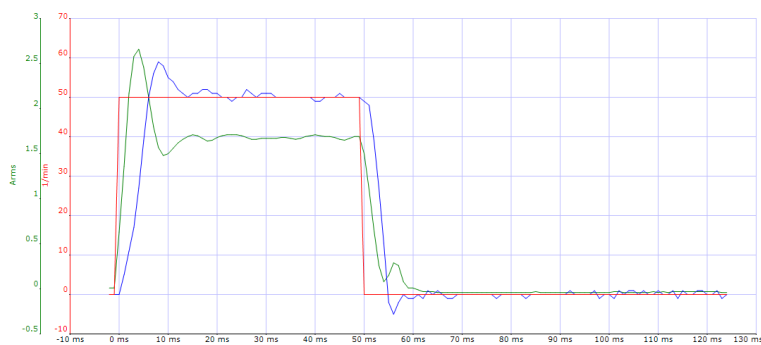
Obrázek 6.12. Skoková odezva automaticky nastaveného regulátoru - žádaná hodnota 10 rpm



Obrázek 6.13. Skoková odezva manuálně nastaveného regulátoru - žádaná hodnota 10 rpm



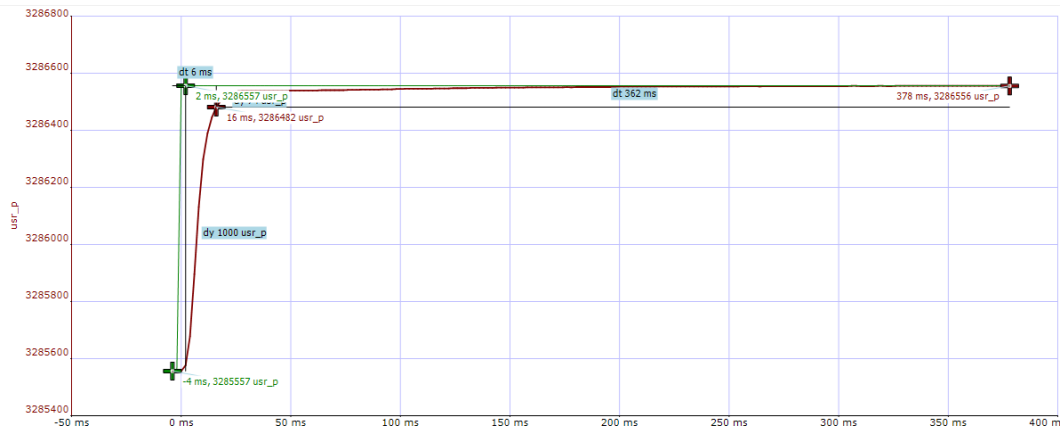
Obrázek 6.14. Skoková odezva automaticky nastaveného regulátoru - žádaná hodnota 50 rpm



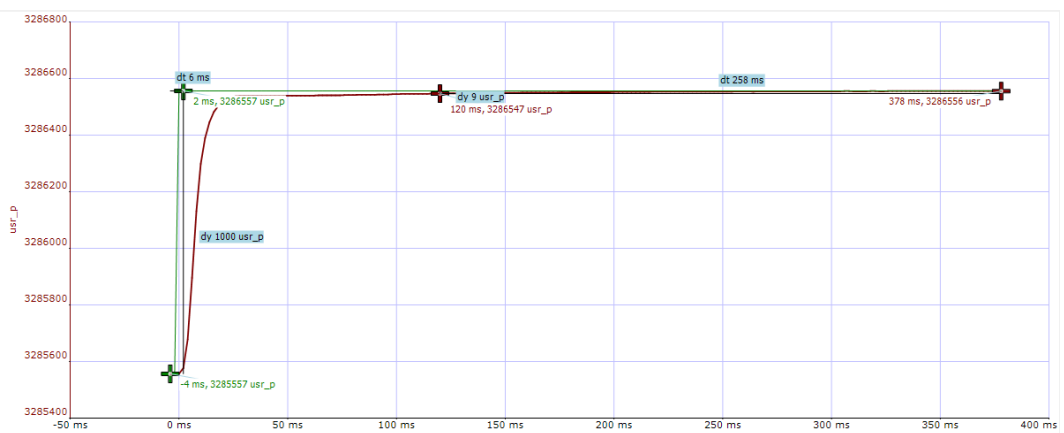
Obrázek 6.15. Skoková odezva manuálně nastaveného regulátoru - žádaná hodnota 50 rpm

Na obrázcích odezev na skok rychlosti je možné vidět, že pro nižší rychlost je manuálně nastavený regulační obvod dvojnásobně rychlejší, a také se do konce skoku ustálí na žádané hodnotě. Pro větší skokovou změnu rychlosti je z obrázků zřejmé, že rychlost manuálně nastaveného regulátoru je také téměř dvojnásobná, ale především dojde k rychlému ustálení v okolí žádané hodnoty. Automaticky optimalizovaný regulátor se za dobu trvání skoku rychlosti ustálit nestihl.

Na obrázcích odezev na skokovou změnu polohy je možné vidět, že nastavený regulátor rychle sníží regulační odchylku pod hodnotu 10% a poté již pomaleji dosahuje žádané hodnoty tak, aby nedošlo k překmitu.



Obrázek 6.16. Odezva na skokovu změnu polohy - dosažení 10% regulační odchylky



Obrázek 6.17. Odezva na skokovu změnu polohy - dosažení 1% regulační odchylky

Kapitola 7

Implementace

Pro programování kontrolérů a komunikačních rozhraní stroje bylo použito vývojové prostředí SoMachine 4.3. Toto prostředí také obsahuje vestavěný nástroj Vijeo Designer 6.2 určený pro programování HMI panelů a prostředí SoMachine Basic určené pro malá PLC M221. Programování bezpečnostního kontroléru bude provedeno pomocí XPSMCWin určeného pro řadu bezpečnostních kontrolérů Preventa.

7.1 Logic builder

Implementace programu hlavního PLC je realizována nástrojem Logic builder, který je součástí vývojového balíku SoMachine. V následujících sekcích jsou detailně představeny komunikační a výkonné části aplikace. Všechny POU jsou programovány v jazyku ST. Přehled dostupných jazyků je uveden v sekci 3.5.2.

7.1.1 Konfigurace a komunikace

Z navrženého řídicího systému popsaného v kapitole 3 vyplývá, že hlavní řídicí PLC obsluhuje dvě komunikační sběrnice. U obou je nutné správné nastavení vlastností i přidání všech komunikovaných zařízení.

Pro správné fungování protokolu Modbus TCP je nutné, aby měla všechna připojená zařízení odlišnou IP adresu. Po správném nastavení adres je nutné konfigurovat Modbus TCP IO scanner, umožňující automatickou a cyklickou komunikaci připojených zařízení. V našem případě je hlavní PLC konfigurováno jako klient (master), který díky použití scanneru automaticky komunikuje obsah nastavených registrů. Díky tomu je sdílení informací mezi automaty velmi snadné a stačí jen správné mapování proměnných do oblasti paměti. Přenos dat s hlavním PLC a HMI panelem je konfigurován v sekci 7.4.

U sběrnice CAN je nutné nejen správné nastavení rychlostí a adres, ale také přidání všech připojených zařízení z knihoven. Díky tomu již objekty měničů obsahují správnou konfiguraci SDO a PDO objektů, jenž umožní řízení pomocí funkčních bloků.

7.1.2 Ovládání bezpečnostních funkcí

Tato třída zpracovává informace poskytované bezpečnostním kontrolérem XPSMC, které využívá pro bezpečné řízení stroje. Díky znalosti stavů bezpečných vstupů a výstupů, lze pak ovládat stroj tak, že nedochází ke kolizím řídicího a bezpečnostního programu. Bezpečnostní část systému tedy slouží jen pro kontrolu a bezpečné uvolnění pohonů a obráběcího prostoru. Sdílení informací je také výhodné z důvodu snadné diagnostiky z pozice obsluhy stroje.

7.1.3 Zpracování vstupních a výstupních signálů

Zpracování vstupně-výstupních signálů je rozděleno do dvou podprogramů. První, sloužící pro čtení vstupů z hlavního i vzdáleného automatu, je volán na začátku hlavní

smyčky. Druhý, který provádí zápis výstupů do registrů obou kontrolérů, je volán na konci smyčky. Tato struktura volání programů je shodná se smyčkou PLC uvedenou na obrázku 3.3. Čtení vstupních registrů také obsahuje kontrolu kvality spojení s druhým kontrolérem a ověření jeho stavu. Proto je možné velmi snadno detekovat výpadek komunikace, zastavení druhého PLC nebo elektrický problém na jeho vstupech. Zápis do výstupních registrů zajišťuje kontrolu stavu bezpečnostních výstupů aktivujících silové napájení a v případě aktivace obvodu nouzového zastavení dojde k deaktivaci všech výstupů řídicího systému.

■ 7.1.4 Řízení osy X

Řízení lineární osy **X** je zajištěno stavovým automatem využívajícím metody monitorování stavu i polohy, vyhodnocení provozních chyb, režim ručního ovládání, nebo režim posuvu v automatickém cyklu. Při přepnutí do automatického režimu je provedena kontrola obráběcích receptur a přítomnost osy ve výchozí poloze obrábění. V případě, že se v ní osa nenachází vyčká povelu obsluhy pro přesun do správného postavení. Tento pohyb musí být potvrzen i v případě provedení korekce počátku obrábění. Při spuštění automatického broušení jsou touto třídou spuštěna obě vřetena a aktivováno externí chlazení a odsávání.

V případě, že je uživatelem pomocí HMI zadána korekce polohy obrábění, jejíž vlastnosti jsou popsány v sekci 5.3.3, provede tato třída posun polohy obrábění a také umožní spuštění automatického dobroušení na nově upravené rozměry obrobku.

Po úspěšném dokončení automatického cyklu nebo dobroušení osa odjede do výchozího postavení, zastaví vřetena, i externí chlazení a odsávání, což umožní odemčení krytů a následnou výměnu obrobku.

Pokud je cyklus obrábění přerušeno tlačítkem zastavení automatického broušení, dojde k výpadku pohonů frekvenčních měničů či jiné chybě, je automatický cyklus okamžitě zastaven. Současně jsou zastavena vřetena, chlazení i odsávání a osa **X** odjíždí nejvyšší rychlostí od obrobku, tak aby nedošlo k jeho poškození.

Zpracování chybových hlášení je řešeno tak, že chyba týkající se virtuální nebo havarijní koncové spínače, je automaticky resetována. V případě detekování jiného typu chyby je aktivováno chybové hlášení na grafickém panelu, které může následně obsluha po odstranění příčin resetovat. Dalším typem chyb jsou výpadky způsobené aktivací obvodů nouzového zastavení. Tento typ je však nutné pro opětovné spuštění resetovat. Je však nutno podotknout, že k výpadkům ostatních typů chyb dochází velmi zřídka a ve většině případů znamenají nutnost dalšího servisního zásahu.

■ 7.1.5 Řízení osy Y

Ovládání lineární osy **Y** obstarává stavový automat, který využívá metody určené pro monitorování stavu a polohy, vyhodnocování chyb a režim ručního ovládání. Aktivace stavového automatu je podmíněna splněním všech podmínek, mezi které patří například aktivované napájení, bezchybný stav centrálního mazání, správný stav komunikačního uzlu nebo přihlášení uživatele. Při přepnutí do automatického režimu je provedena kontrola výchozí polohy. Pokud se osa v počátku obrábění nenachází, vyčká na povel obsluhy pro najetí do správné polohy. Tato třída podporuje také provádění korekcí broušení popsaném v sekci 5.3.3. V případě detekování chyby dojde k jejímu vyhodnocení stejně jako v sekci 7.1.4.

■ 7.1.6 Řízení vřeten

Řízení obou vřeten je založeno na shodném stavovém automatu, který však používá jiné vstupní parametry a ovládá jiné výstupy. Rozdílem je také možnost používání

unašče v režimu SLS. Třídy tedy obsahující metody vyhodnocující chybová hlášení a kontrolu stavu. Díky vstupním proměnným je možné motory zastavit z bezpečností třídy po aktivaci požadavku na odemknutí, nebo v případě jejich aktivace a deaktivace při řízení z automatického režimu.

■ 7.1.7 Mazání stroje

Tato třída zajišťuje kontrolu a ovládání mazání všech potřebných částí stroje, zpracovává údaje o hladinách olejových náplní i stavy tlakových snímač. Obsahuje dvě metody implementující následující funkce:

- Unášecí vřeteno je mazáno trvale a uvolnění otáčení je podmíněno dosažením dostatečného tlaku v obvodu mazání. Čas nutný pro sepnutí čidla tlaku je monitorován pro případ porušení tlakového vedení. V případě, že není vřeteno během stanoveného času namazáno, je mazání ukončeno a obsluha stroje obdrží hlášení o chybě.
- Vodící dráhy stroje jsou mazány cyklicky a perioda závisí na aktuálním zvoleném režimu. V případě automatického je promazání mechanických částí prováděno po uplynutí stanoveného počtu cyklů, v manuálním je mazání opakováno po uplynutí nastaveného časového úseku. I tato část je chráněna proti úniku oleje v případě porušení vedení.

System také vyhodnocuje stáří olejové náplně a doporučí případně naplánovat její výměnu.

■ 7.1.8 Správa času a zabezpečení aplikace

Ovládání bloku reálného času a prostředky ochrany projektu jsou rozděleny do dvou programových jednotek.

- Práci s reálným časem zajišťují knihovní funkční bloky a systémové struktury. Do struktur jsou pro případ aktualizace času uloženy žádané časové hodnoty, které pomocí funkčního bloku přenastaví obvod reálného času PLC.
- Zabezpečení aplikace je víceúrovňové. Pro znemožnění nevyžádaných zásahů slouží možnost správce uživatelů v prostředí SoMachine. Tato funkce zprostředkovává různá práva uživatelům, kteří se do aplikace přihlásí. Navíc je celý systém chráněn proti cílenému kopírování binárních souborů projektu, jelikož obsahuje podprogram, který při každém spuštění PLC kontroluje všechny výrobní údaje a v případě, že je při prvním průchodu hlavní řídicí smyčkou detekována změna hardwaru, je kontrolér přepnut do stavu STOP.

■ 7.2 SoMachine Basic

Část řídicího systému stroje je implementována i v prostředí SoMachine Basic určeném pro kompaktní PLC M221.

■ 7.2.1 Nastavení komunikace

Pro správnou funkci automatu je nutné nejprve nastavit jeho IP adresu, jelikož se bude spolu s hlavním kontrolérem a HMI panelem nacházet ve společné ethernetové síti.

7.2.2 Programování

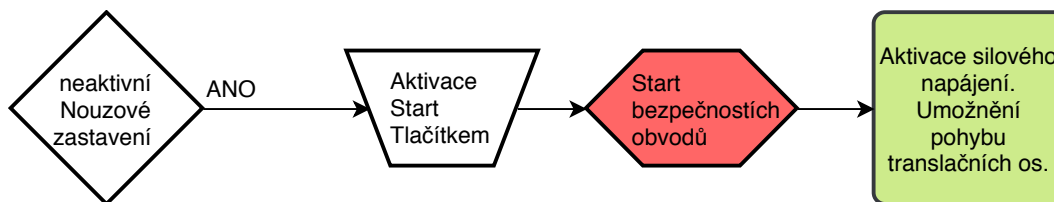
Ovládací panel stroje je osazen nejen HMI terminálem ale i tlačítky, signálkami a ručním inkrementálním rotačním snímačem, jejichž vstupní a výstupní logické stavy jsou zpracovávány PLC umístěným přímo v ovládacím panelu. Tyto informace jsou pak protokolem Modbus TCP přenášeny do hlavního kontroléru. Ten je nakonfigurován jako klient, který periodicky načítá stav paměťových registrů, do kterých je však nutné ukládat aktuální stavy vstupních bitů, jelikož Modbus IO scanner nedovoluje mapování na vstupní registry serveru. Zpracování ručního inkrementálního enkodéru je provedeno pomocí bloku HSC (High speed counter – Rychlý čítač), jehož výstupní hodnota je typu DWORD, tedy 32 bitový neznaménkový INT. Jelikož tento čítač nepodporuje možnost použití znaménkového datového typu, je při spuštění nastaven do poloviny rozsahu tak, aby pokryl čítání v obou směrech a nepodtékal. Aktuální hodnota čítače je pak spolu s ostatními daty přenášena do řídicího kontroléru k dalšímu vyhodnocení. Dále je nutné testovat vykonávání programu automatem, který provádí načítání vstupních signálů a ovládání signálek, umístěným v ovládacím panelu pomocí cyklického resetování příznaku stavu RUN. V případě, že je z jakéhokoliv důvodu přepnut ostrov do stavu STOP, neprovede opětovné nastavení příznaku RUN a hlavní kontrolér tak detekuje chybu.

7.3 XPSMCWin

Bezpečnostní funkce navržené v sekci 4.3.3, jsou konfigurovány nástrojem XPSMCWin. Konfigurace obsahuje 4 vzájemně závislé funkce ovládající bezpečnostní výstupy. Všechny digitální vstupy jsou napájeny speciálními výstupy, které mají na svém výstupu rozdílné průběhy napětí, umožňující kontrolu případného mechanického poškození izolace vodičů.

7.3.1 Aktivace napájení a deaktivace STO LXM32

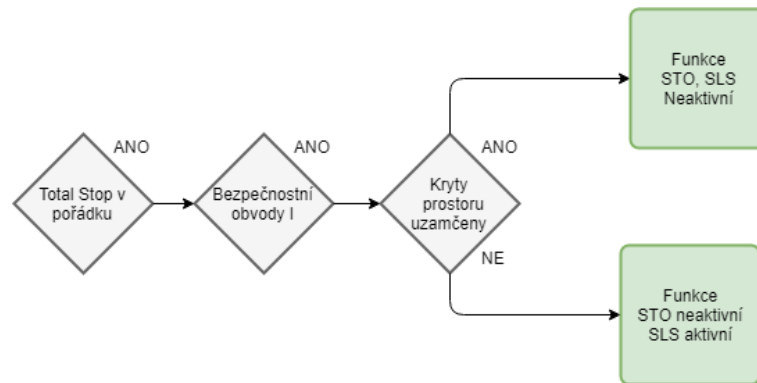
Podmínky aktivace silového napájení stroje a deaktivace funkce jsou popsány na obrázku 7.1 vycházejícím z návrhu bezpečnostních funkcí v sekci 4.3.3. První funkce využívá dvoukanálové zapojení, jež zajišťuje dosažení požadované úrovně PL_R , mapované na třetí a čtvrtý tranzistorový výstup. Přítomnost výstupního napětí na výstupech je signalizována operátorovi signálkou na řídicím panelu.



Obrázek 7.1. Detail vývojového diagramu aktivace bezpečnostních obvodů I

7.3.2 Uvolnění funkce STO unášecího vřetene

Deaktivace bezpečného odpojení napájení motoru je prováděna automaticky, pokud jsou v pořádku kryty řemenů vřetene, je aktivováno napájení a není aktivována funkce a měničích LXM32. Po uvolnění STO je aktivní SLS umožňující provoz motoru bezpečnou rychlostí.



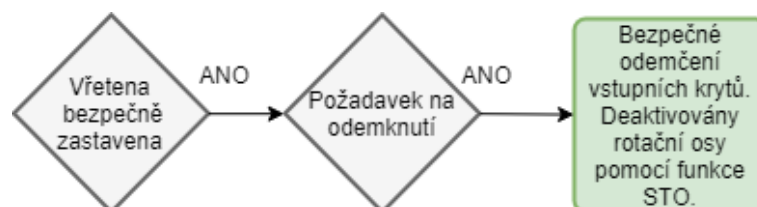
Obrázek 7.2. Detail aktivace pohonu unášecího vřetene

7.3.3 Uvolnění funkce SLS a STO

Při uzamčení krytu obráběcího prostoru dojde k automatickému vypnutí bezpečnostní funkce SLS unášecího vřetene v souladu s obrázkem 7.2, současně je také deaktivována funkce STO pohonu brusného vřetene. Tato funkce využívá bezpečnostní výstupy pět a šest. Konfigurace je uvedena na obrázku 7.4.

7.3.4 Odemčení zámku

Poslední funkcí je bezpečné odemknutí zámku dveří, která v případě detekování nulové rychlosti vřeten a požadavku odemčení na krátký čas odemkne bezpečnostní zámek. V případě, že není kryt do 10 sekund otevřen, je opět automaticky uzamčen. Jelikož tato funkce nepotřebuje dvoukanálový výstupní signál, bylo pro odemknutí zámku použito bezpečný releový výstup umožňující sepnutí vyššího proudu potřebného pro odemykání zámku.



Obrázek 7.3. Detail bezpečného odblokování krytu obráběcího prostoru

Úplné nastavení bezpečnostního kontroléru je zobrazeno na obrázku 7.4.

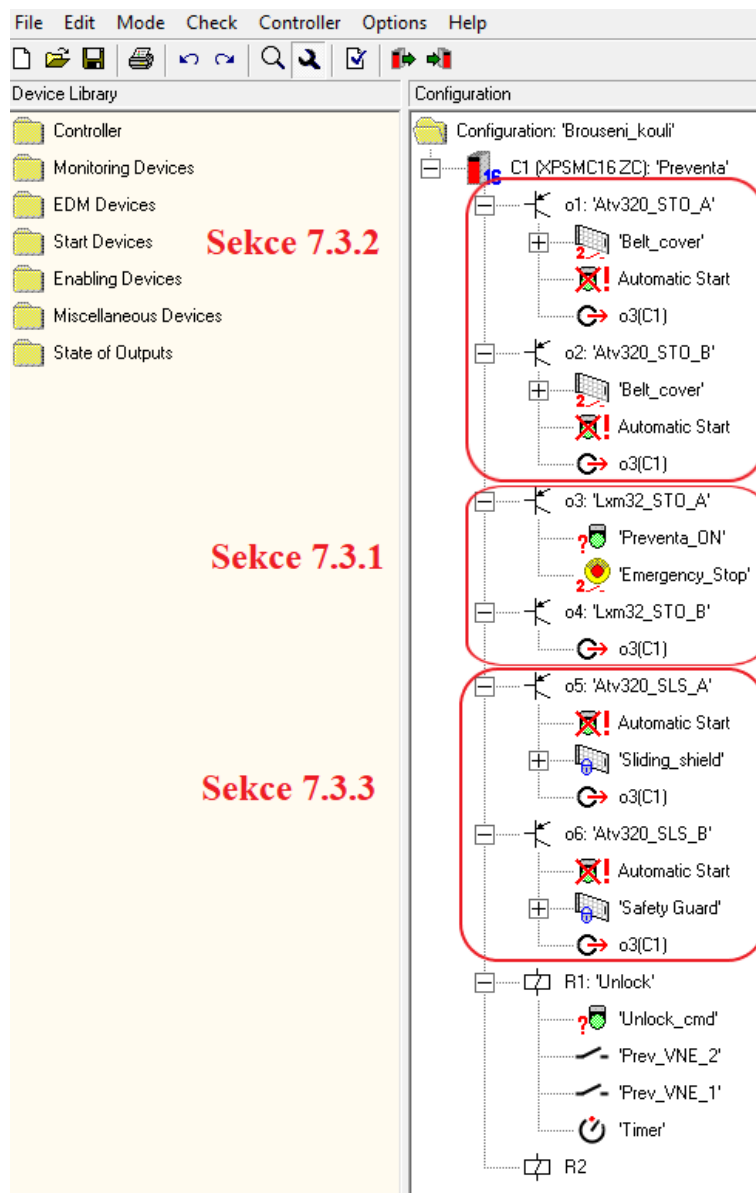
7.4 Vijeo Designer

Grafické rozhraní HMI je vytvořeno pomocí programu Vijeo Designer. Při návrhu jsou použity ergonomické zásady uvedené v sekci 7.4.1.

7.4.1 Ergonomie

Principy a vlastnosti komunikačního rozhraní člověk – stroj jsou stanoveny bezpečnostními ergonomickými normami ČSN EN 894-1[27] obsahující všeobecné zásady interakce zařízení a člověka a ČSN EN 894-2[28] zaměřenou přímo na sdělovací prvky. Přehled nejdůležitějších všeobecných zásad a jejich naplnění je popsán v seznamu uvedeném v normě ČSN EN 894-1[27]

- 1) **Zásada rozložení funkcí** – Neklade přílišné nároky na rychlost a sílu ovládání. Vnímání malých změn je umožněno změnou barev ukazatelů.

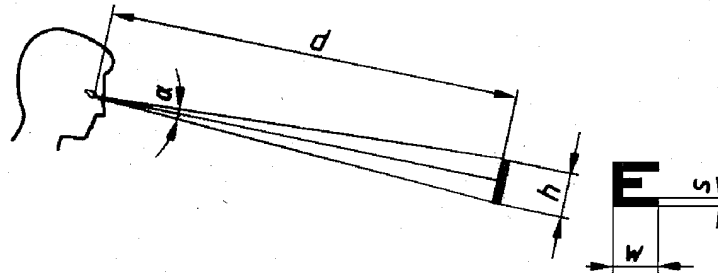


Obrázek 7.4. Konfigurace bezpečnostních funkcí kontroléru XPSMC16CZ

- 2) **Zásada seskupování** – Umístění a pořadí prvků odpovídá pracovnímu postupu.
- 3) **Zásada identifikace** – Všechny ovladače i sdělovače jsou vybaveny textovým popisem nebo odpovídající ikonou.
- 4) **Zásada dostupnosti informací** – Veškeré důležité informace zobrazeny bez nutnosti vstupu do dalších menu.
- 5) **Zásada zdvojení** – Uživatelské operace zadávající důležité údaje obsahují alespoň zdvojený zadávací mechanismus.
- 6) **Zásada přístupnosti** – Informace jsou dostupné vždy na obrazovce zanořené maximálně o jednu úroveň.
- 7) **Zásada shody se znalostí a praxí** – Návrh byl několikrát podroben kontrolám vedoucích výroby i budoucí obsluhy.

- 8) **Zásada opravy chyb** – Všechny systémové chyby jsou zobrazovány v přehledné tabulce, pomocí které je chyby možné resetovat.

Na obrázku 7.5 je zobrazen náčrt sdělovacího kanálu stroj – člověk, podle kterého je možné stanovit doporučenou velikost značek sdělovače.



Legenda

- d – vzdálenost očí od (kritického detailu) znaku
- α – úhel pohledu ke (kritickému detailu) znaku v obloukových minutách
- h – výška (kritického detailu) znaku
- w – šířka (kritického detailu) znaku
- s – tloušťka (kritického detailu) znaku

Obrázek 7.5. Postup určení správné velikosti zobrazovače uvedený v normě ČSN EN 894-2[28]

Stanovenou výšku kritického detailu lze určit ze vztahu (1)

$$\sin\left(\frac{\alpha}{2}\right) = \frac{h}{2d} \quad (1)$$

Po úpravě dostaneme výraz (2)

$$h = 2d \sin\left(\frac{\alpha}{2}\right) \quad (2)$$

Nejmenší doporučené velikosti kritického detailu h je dosaženo, pokud je splněno (3)

$$\alpha \geq 18' \quad (3)$$

Po dosažení minimální velikosti úhlu α do (2) můžeme snadno vypočítat, že minimální velikost detailu při pozorovací vzdálenosti 700 mm, která je komfortní i pro snadné dotykové ovládání, je minimální velikost detailu (4)

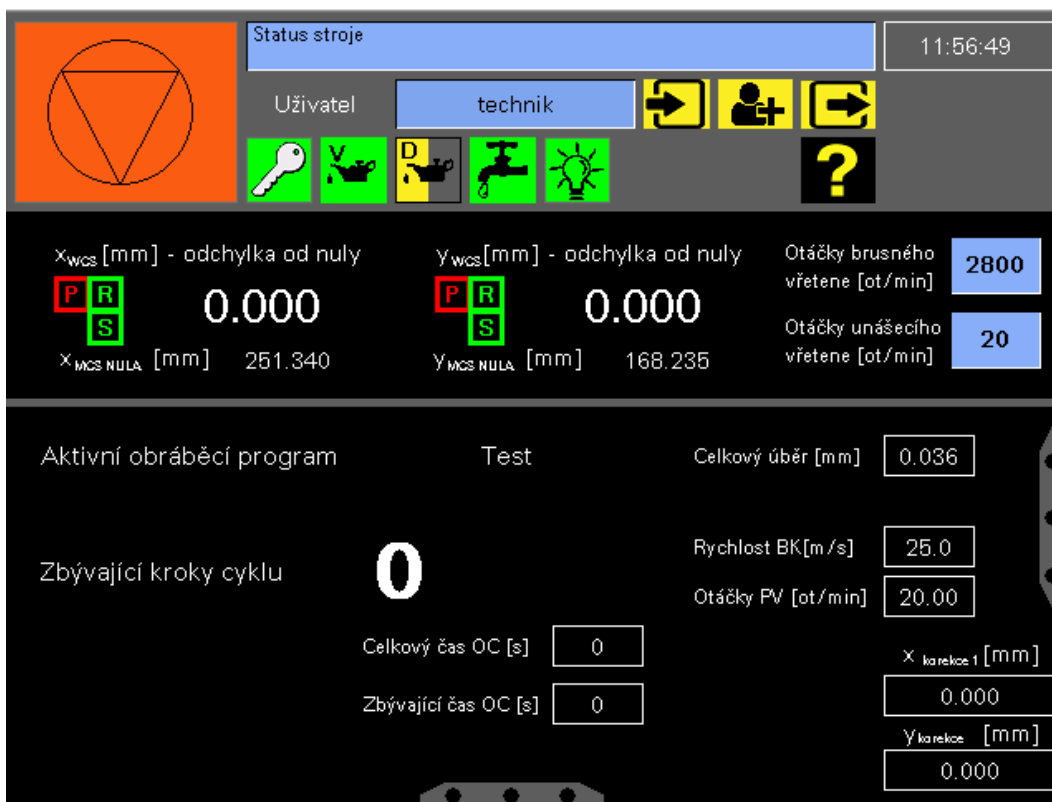
$$h \doteq 7,3 \text{ mm} \quad (4)$$

. Vhodné tloušťky znaků jsou dle normy [28] splněny při použití doporučené velikosti kritického detailu.

7.4.2 Vývoj rozhraní

Další částí tvorby řídicího programu je vývoj grafického komunikačního rozhraní, které umožňuje snadné a intuitivní ovládání stroje. Je navrhováno v souladu s uvedenými zásadami a vlastnostmi v sekci 7.4.1. Grafické rozhraní je sestaveno z obrazovek uvedených v seznamu.

- Domovská stránka na obrázku 7.6 obsahuje veškeré důležité informace o aktuálním stavu stroje. Je rozdělena do několika částí. První je hlavička, ve které jsou umístěny stavy mazání, zámku, displej stavu stroje, možnost přihlášení a kontrolka automatického režimu. Pod hlavičkou jsou ještě umístěny displeje zobrazující stav obou translačních os a jejich relativní i absolutní polohy. V případě seřizovacího režimu tento prostor obsahuje navíc nástroje pro nastavení rychlostí obou vřeten. Ve spodní části jsou pak zobrazeny nejdůležitější informace o automatickém obráběcím cyklu, mezi které patří celkový úběr nebo rychlosti vřeten. Je zde také zobrazen aktuální krok cyklu a zbývající výrobní čas. Na pravém okraji je umístěno vyskakovací okno umožňující změnu rychlosti posuvu v režimu seřízení. Tlačítka pro přechod na další obrazovky jsou umístěny na vyskakovacím panelu ve spodní části stránky.



Obrázek 7.6. Vizualizace hlavní obrazovky grafického rozhraní

- Program obrábění, zobrazený na obrázku 7.6, umožňuje editování a správu obráběcích receptur popsaných v sekci 5.3.1. Podle úrovně přihlášeného uživatele je možné měnit hodnoty receptury, vytvářet nové, měnit stávající nebo je ukládat před spuštěním automatického cyklu do PLC.
- Nastavení výchozí polohy slouží pro zapsání počátku obrábění umožňující aktivaci zobrazování relativního postavení obráběcích nástrojů. Součástí zadávání je také možnost volby tolerance polohy ve směru osy **X**. Zadávání počátku obrábění je dvakrát



Obrázek 7.7. Vizualizace obrazovky správce výrobních receptur

potvrzované z důvodu eliminace možnosti zápisu špatné polohy spojeného s případným vznikem škod způsobených nesprávným nastavením.

- Záznam událostí je obrazovka určená pro servisní techniky a vedoucí pracovníky, kteří tak získají informace o celé historii stroje. Aplikace v grafickém panelu totiž zaznamenává operace se všemi důležitými proměnnými. Díky tomu je například možné kontrolovat změny obráběcích receptur či správné ovládání stroje.
- Hlášení diagnostický panel obsahující přehled všech aktivních chybových zpráv. Některá chybová hlášení lze resetovat. Pro tento účel je vlevo přehledu alarmů umístěno tlačítko umožňující reset chyb.
- Návoděda je série několika stránek obsahující popis všech důležitých prvků a principů grafického rozhraní. To umožňuje snadnější zaškolení a snadnou dostupnost nápovědy pro obsluhu stroje, která může v případě jakékoliv nejistoty ověřit správné nastavení či postup. Velmi často jsou totiž ostatní materiály obsahující potřebné informace pracovníkům nedostupné přímo v průběhu obrábění
- Servisní menu slouží pro diagnostiku všech vstupně výstupních obvodů, ověření doby běhu vřeten, uložení všech chybových hlášení a nastavování parametrů. Přístup je omezen pomocí správce uživatelů.

7.5 Testování

Závěrečnou fází implementace řídicího systému bylo testování správné funkcionality. Vytvořený projekt byl podroben testům ve dvou fázích. Jelikož řídicí systém neobsahuje žádné speciální nástroje pro testování, bylo je nutné provádět manuálně.

■ 7.5.1 Simulace

Díky tomu, že vývojové prostředí obsahuje poměrně propracované simulační nástroje, probíhalo průběžné testování již v průběhu návrhu jednotlivých částí, a proto byla většina chyb detekována a odladěna ještě před celkovou simulací, která předcházela spuštění do zkušebního provozu. Jedinou funkcí, kterou není možné pomocí počítačových simulátorů otestovat, je ovládání servo a frekvenčních měničů. Testování těchto vlastností tedy bylo provedeno až ve zkušebním provozu.

■ 7.5.2 Zkušební provoz

Spuštění stroje ve zkušebním režimu odhalilo chybu v podobě výpadku měničů LXM32 do chyby nemožné aktivace pohonu. To bylo způsobeno okamžitým požadavkem na aktivaci ihned po připojení silového napájení, které není díky nabíjení kondenzátorů v meziobvodu možné. Tato chyba byla odstraněna zpožděnou aktivací. Další testování aplikace neodhalilo žádné chyby řídicího systému.

Kapitola 8

Energetická náročnost stroje

V současnosti zatím neexistují žádná nařízení Evropské komise týkající se strojů jako celků. Proto je prozatím nutné používat pouze nařízení a doporučení týkajících se samostatných spotřebičů, jež se na stroji vyskytují. V následující části tak budou zkoumány elektromotory pohánějící obě vřetena, jelikož se jich Nařízení komise (ES) č. 640/2009[29] přímo dotýká.

8.1 Ekodesign elektromotorů

V první části této sekce je proveden rozbor důvodů přijetí nařízení o ekodesignu elektromotorů, v druhé pak jsou konfrontovány s nařízením obě pohonné jednotky vřeten.

8.1.1 Důvody přijetí

Hlavní důvody přijetí nařízení, které stanovuje požadované účinnosti elektromotorů, uvedené v nařízení [29] jsou následující.

- 1) Jedná se o spotřebiče s velmi významným objemem prodeje i dopadem na životní prostředí a možností významného potenciálu pro zlepšení bez nepřiměřených nákladů.
- 2) Elektromotory jsou ve vyspělých zemích hlavními konzumenty energie spotřebované průmyslovým sektorem. Podle nařízení [29] využívají až 70 % průmyslové spotřeby. Možný potenciál nákladově přijatelného zlepšení účinnosti je přibližně 20–30 %.
- 3) Přípravná studie potvrdila, že elektromotory jsou využívány na trhu ve velkém množství a jejich spotřeba v roce 2005 dosáhla **1067 TWh**, což odpovídá **427 Mt** emisí CO_2 . Pokud by nedošlo k přijetí nařízení, došlo by v roce 2020 k nárůstu spotřebované energie na hodnotu **1252 TWh**. Zlepšení energetické bilance lze částečně dosáhnout i používáním motorů vybavených pohony s proměnnými otáčkami.

Přijaty byly také nové třídy účinnosti asynchronních motorů uvedené v tabulce 8.1 s označením IE (International Efficiency) stanovených normou ČSN EN 60034-30.

Označení	Účinnost
IE1	standardní účinnost (Standard)
IE2	zvýšená účinnost (High)
IE3	vysoká účinnost (Premium)
IE4	velmi vysoká účinnost (Super Premium)

Tabulka 8.1. Třídy účinnosti asynchronních elektromotorů stanovené ČSN EN 60034-30

S platností od **16. 6. 2011** nesmí být na evropské trhy dodávány elektromotory označené třídou účinnosti **IE1**. Od **1. 1. 2017**, navíc musí motory s výkonem **0,75–375 kW** dodržet stanovenou minimální účinnost **IE3**, v opačném případě musí být vybaveny frekvenčním měničem.

8.1.2 Předmět působnosti

Nařízení stanovuje požadavky na účinnosti všech elektromotorů vyjma skupin uvedených v seznamu:

- Motory, které pracují ponořené v kapalině.
- Motory zabudované v jiném výrobku – převodovky, čerpadla, kompresory a další. Zde je účinnost takového výrobku hodnocena odlišně.
- Motory provozované ve specifickém prostředí – kompletní přehled uveden v [29].
- Brzdové motory.

8.1.3 Porovnání nařízení a navrženého řešení

Pro pohon unášecího vřetene je zvolen asynchronní elektromotor se čtyřmi póly, příkonem 2,2 kW v kategorii IE4. Účinnosti motorů uvedených v tabulce 8.2 jsou popsány v katalogu výrobce¹.

Označení	Účinnost motoru
IE2	84,3 %
IE3	86,7 %
IE4	89,5 %

Tabulka 8.2. Přehled účinností čtyřpólových elektromotorů Siemens s příkonem 2,2 kW

Výpočet předpokládaných úspor spočívá ve stanovení čisté dodané energie elektromotorem s třídou účinnosti IE2 a nominálním výkonu za průměrný rok, bez nasazení s frekvenčním měničem. Poté je vypočten příkon motorů v třídách účinnosti IE3 a IE4 při zachování energie dodané motorem. Rozdíl příkonu tříd s vyšší účinností a motoru IE2 poskytuje údaj předpokládané uspořené elektrické energie za průměrný rok provozu při jednosměnném pracovním režimu. Z předpokládané hodnoty uspořené elektrické energie, lze možné snadno vypočítat úsporu emisí CO_2 , protože 1 MWh elektrické energie odpovídá 1,17 t emisí CO_2 ². Vzorové hodnoty stanovené pro jeden rok provozu jsou uvedeny v tabulce 8.3

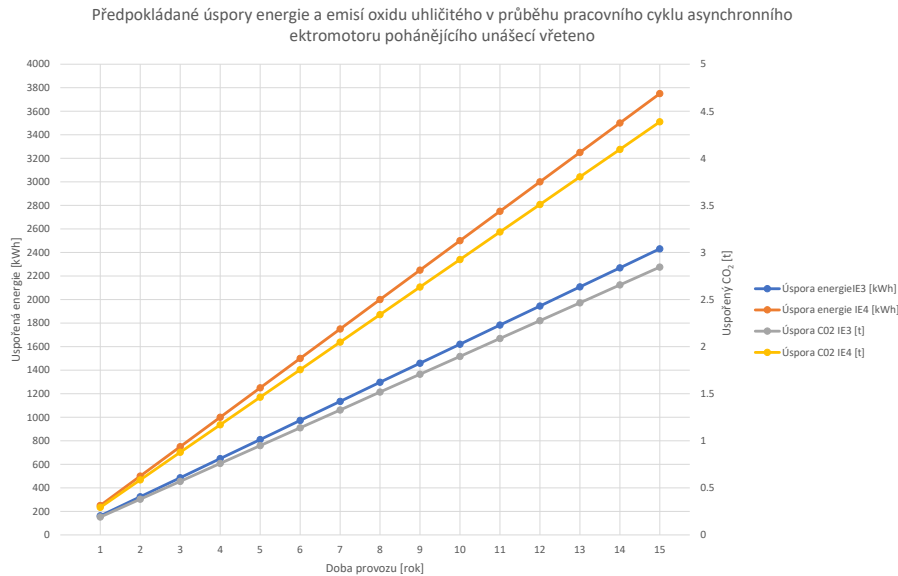
Označení	Dodaná [kWh]	Spotřebovaná [kWh]	Uspořená [kWh]	Úspora CO_2 [kg]
IE2	3627,6	4303,2		
IE3	3627,6	4141,1	162,1	189,7
IE4	3627,6	4053,2	250,0	292,5

Tabulka 8.3. Srovnání spotřeby elektrické energie a její úspory za jeden rok v provozu

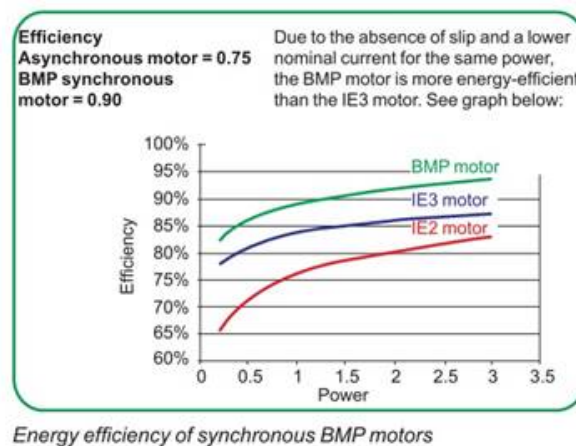
Určení předpokládaných úspor za dobu životnosti stroje, kterou lze odhadnout na 15 let, dosáhnou celkové úspory elektrické energie přibližně **2,4 MWh** pro motor třídy

¹ http://www1.siemens.cz/ad/current/content/data_files/technika_pohonu/motory/nizkonapetove_standardni_motory_D81_1-2016_cz.pdf

² <https://www.mpo.cz/dokument6794.html>



Obrázek 8.1. Graf předpokládaných úspor energie a emisí CO_2 v závislosti na účinnosti elektromotorů pohánějící unášecí vřeteno



Obrázek 8.2. Srovnání účinností synchronních motorů BMP a asynchronních motorů v třídách IE2 a IE3 [7]

IE3 a **3,7** MWh při využití pohonu s třídou IE4. Úsporu emisí CO_2 i průběh úspory elektrické energie je uveden v grafu 8.1.

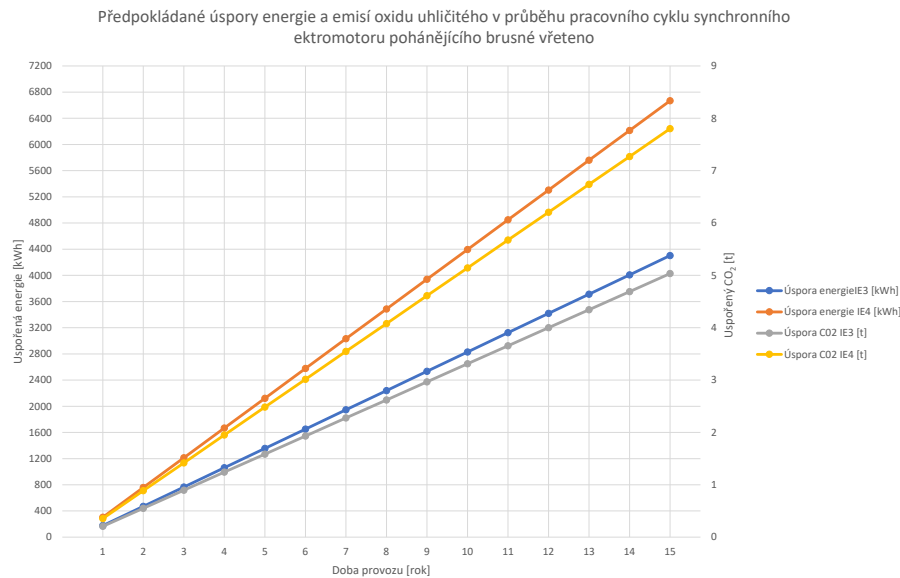
Jako pohon brusného vřetene byl v části 3.1 zvolen synchronní motor s permanentními magnety, jehož účinnost, uvedená v 8.2, by měla dosáhnout hodnot asynchronního motoru s účinností dle IE4. Přesné tabulkové hodnoty bohužel nejsou k dispozici.

Podle stejných pravidel, jako u motoru unášecího vřetene je možné vytvořit graf 8.3 předpokládaných úspor energie.

Díky použití synchronního motoru s permanentními magnety, který by měl dle údajů výrobce dosahovat účinnosti více než 90 %, je možné předpokládat, že celková velikost

Označení	Účinnost motoru
IE2	86,6 %
IE3	88,6 %
IE4	91,1 %

Tabulka 8.4. Přehled účinností dostupných čtyřpólových elektromotorů Siemens s příkonem 3 kW



Obrázek 8.3. Graf předpokládaných úspor energie a emisí CO_2 v závislosti na účinnosti elektromotorů pohánějících brusné vřeteno

úspory elektrické energie při provozu brusného vřetene je rovna **6,7 MWh**, které odpovídá úspora emisí CO_2 o hmotnosti 7,8 tuny.

Z vypočtených hodnot úspor elektrické energie i emisí oxidu uhličitého je zřejmá nutnost používání energeticky úspornějších motorů, které se v zásadní míře vyskytují v každém průmyslovém odvětví.

Kapitola 9

Závěr

Cílem této bakalářské práce bylo navržení a implementace řídicího systému brusky kulových ploch, která bude obrábět kovové i smaltované kulové ventily. Důvodem návrhu nového elektronického vybavení a řídicího systému bylo především zvýšení efektivity a bezpečnosti procesu obrábění.

Návrh obsahoval volbu vhodných komponent, posouzení zbytkových rizik a jejich eliminace i sestavení vývojových diagramů řídicího systému. Všechny zvolené elektronické komponenty splnily požadavky přesnosti i kvality řízení popsané v kapitole 3. Bezpečnostní funkce navržené v sekci 4.3.3 snížily zbytková rizika na únosnou hranici. Po sestavení požadované podoby řídicího systému v kapitole 5, bylo v části 6 provedeno nastavení regulačních obvodů rotačních i translačních os, na které navázala implementace a tvorba uživatelského rozhraní popsaná kapitolou 7. Po implementaci byl systém řádně otestován simulacemi i spuštěním ve zkušebním režimu. Při zkoumání možných energetických úspor bylo v kapitole 8 stanoveno, že v předpokládaném pracovním režimu by měl stroj volbou vhodných komponent ušetřit za dobu své životnosti (15 let) přibližně 10,4 MWh elektrické energie.

Návrh tak zohlednil i energetické vlastnosti elektromotorů pohánějících vřetena. Díky využití zpětnovazebního řízení polohy se podařilo výrazně zkrátit dobu obrábění, jelikož největší kulový ventil s průměrem 400 mm, který může být na tomto stroji obráběn, je vyroben přibližně za 40 minut. Rychlost obrábění je tedy v případě automatického režimu až trojnásobná oproti původnímu stroji.

Mezi zlepšení, která by mohla být provedena v návrhu či implementaci, patří vybavení podélné translační osy lineárním enkodérem, který by umožnil zlepšení komfortu při nastavování obráběcích poloh, vytvoření webového rozhraní, jež umožní vedoucím pracovníkům vzdálené monitorování procesu broušení a dovolí tak přesnější plánování výroby. Tuto funkci řídicí automat podporuje, tudíž by bylo nutné pouze vizualizaci vytvořit. Dalším možným vylepšením je pak rozšíření funkcí plánované údržby na všechny spotřební náhradní díly stroje. Aktuální verze zatím vyhodnocuje pouze staří olejových náplní.

Literatura

- [1] SLÁDEK Jakub. Návrh ovládacího panelu obráběcího stroje. Praha, 2016. Bakalářská práce. České vysoké učení technické v Praze, fakulta strojní, ústav výrobních strojů a zařízení.
- [2] PLOCEK Jaroslav. Řízení jednoúčelového obráběcího stroje. Brno, 2015. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, fakulta strojního inženýrství, ústav automatizace a informatiky. Vedoucí práce Ing. Pavel Houška, Ph.D [cit. 10. 3. 2018] .
- [3] MĚŠŤÁNEK Filip. Control System for CNC Cutting Machine. Praha, 2017. Diplomová práce. České vysoké učení technické v Praze, fakulta elektrotechnická, katedra počítačové grafiky a interakce. Vedoucí práce Ing. Petr Felkel, Ph.D. [cit. 12. 3. 2018].
- [4] GRÉTARSSON Guomundur Arnar. Automated Control System. Reykjanesbær, May 2014. Final thesis for B.Sc. degree. University of Iceland, Keilir Institute of Technology.
- [5] Trojfázový indukční motor – řízení otáček [Online] [cit. 12. 3. 2018]. <https://eluc.kr-olomoucky.cz/verejne/lekce/785>
- [6] Altivar Machine ATV320 — Variable Speed Drives for Asynchronous and Synchronous Motors – Programming Manual, NVE 41295 10/2017.
- [7] Variable speed drives Altivar 32 BMP synchronous motors, V1.0, 60478-EN
- [8] BMP Synchronous motor, Motor manual, V1.3, 01.2017, 0198441113981.
- [9] BSH servomotor manual, 0198441113837-EN 01/2017.
- [10] Lexium 32M Servo Drive —User Guide, 0198441113767-EN 09/2017.
- [11] Modicon M241 Logic Controller — Hardware Guide, EIO0000001456 04/2017.
- [12] Modicon M241 Logic Controller — Programming Guide, EIO0000001432 04/2017.
- [13] Modicon M221 Logic Controller —Hardware Guide, EIO0000001384 12/2016.
- [14] Modicon M221 Logic Controller —Programing Guide, EIO0000001360 12/2016.
- [15] MODBUS APPLICATION PROTOCOL SPECIFICATION [Online] [cit. 16. 3. 2018]. http://www.modbus.org/docs/Modbus_Application_Protocol_V1_1b3.pdf
- [16] VACEK, František, CANopen – vyšší komunikační protokol pro vestavné sítě [Online], [cit. 18. 3. 2018]. http://automa.cz/cz/casopis-clanky/canopen-vyssi-komunikacni-protokol-pro-vestavne-site-2004_04_32279_854/
- [17] The Basic of CANopen [Online], [cit. 21. 3. 2018]. <http://www.ni.com/white-paper/14162/en/>
- [18] ČSN EN ISO 12100. Bezpečnost strojních zařízení, Všeobecné zásady pro konstrukci, Posouzení rizika a snižování rizika. Praha: Výzkumný ústav bezpečnosti práce, 2011.

-
- [19] ČSN EN ISO 13849-1: 2007. Bezpečnost strojních zařízení - Bezpečnostní části ovládacích systémů - Část 1: Všeobecné zásady pro konstrukci. Praha: Český normalizační institut, 2007.
- [20] ČSN EN 61800-5-2: 2008. Systémy elektrických výkonových pohonů s nastavitelnou rychlostí - Část 5-2: Bezpečnostní požadavky – Funkční. Český normalizační institut, 2008.
- [21] ČSN EN 60204-1: 2007. Bezpečnost strojních zařízení - Elektrická zařízení strojů - Část 1: Všeobecné požadavky. Praha: Český normalizační institut, 2007.
- [22] NOVÁK, Lukáš. Bezpečnost elektrických zařízení. V Praze: České vysoké učení technické, 2009. ISBN 978-80-01-04350-9.
- [23] VOJÁČEK, Antonín Bezpečnost strojů - 1. díl - úvod, normy, posouzení rizika [Online] [cit. 23. 3. 2018]. <https://automatizace.hw.cz/bezpecnost-stroju/bezpecnost-stroju-1-dil-normy-rizika.html>
- [24] VOJÁČEK, Antonín Bezpečnost strojů - 2. díl - PL vs. SIL [Online] [cit. 23. 3. 2018]. <https://automatizace.hw.cz/bezpecnost-stroju/bezpecnost-stroju-2-dil-pl-vs-sil.html>
- [25] Software-Assistent SISTEMA: Safety Integrity Software Tool for the Evaluation of Machine Applications 2/2018.
- [26] SOUČEK, Pavel. Servomechanismy ve výrobních strojích. Praha: Vydavatelství ČVUT, 2004. ISBN 80-01-02902-6.
- [27] ČSN EN 894-1. Bezpečnost strojních zařízení, Ergonomické požadavky pro navrhování sdělovačů a ovládačů, Část 1: Všeobecné zásady interakcí člověka se sdělovači a ovládači. Praha: Český normalizační institut, 1997.
- [28] ČSN EN 894-2. Bezpečnost strojních zařízení, Ergonomické požadavky pro navrhování sdělovačů a ovládačů, Část 2: Sdělovače. Praha: Český normalizační institut, 1998.
- [29] Nařízení komise evropských společenství č. 640/2009, 22.6.2009, provádějící směrnici Evropského parlamentu 2005/32/ES, pokud jde o požadavky na ekodesign elektromotorů.

Příloha A

Zadání práce



ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Šrámek** Jméno: **Ondřej** Osobní číslo: **457436**
Fakulta/ústav: **Fakulta elektrotechnická**
Zadávající katedra/ústav: **Katedra řídicí techniky**
Studijní program: **Kybernetika a robotika**
Studijní obor: **Systémy a řízení**

II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce:

Návrh a implementace řídicího systému brusky kulových ploch

Název bakalářské práce anglicky:

Design and implementation of a control system for a ball valve grinding machine

Pokyny pro vypracování:

- Navrhněte a implementujte řízení pro brouscí stroj na broušení kulových ploch dle bodů uvedených níže. Jednotlivé elektronické řídicí prvky vyberte z nabídky na českém trhu dostupných komponent firmy Schneider Electric.
1. S ohledem na požadované momenty síly, rychlosti posuvu i vlastnosti regulace samotné navrhněte pohony a automatizační komponenty pro vybranou aplikaci.
 2. Proveďte posouzení zbytkových bezpečnostních rizik při provozu a navrhněte opatření pro jejich snížení.
 3. Navrhněte řídicí algoritmus.
 4. Implementujte řídicí algoritmus stroje ve vývojovém prostředí SoMachine.
 5. Navrhněte a realizujte grafické uživatelské rozhraní. Dbejte na intuitivní a snadné použití.
 6. Nastavte parametry regulátorů řízených os dle postupů doporučených výrobcem.
 7. Před nasazením stroje do ostrého provozu proveďte testování řídicího algoritmu.
 8. Diskutujte možné úspory energie na tomto typu stroje, pokud existují potřebné poklady vytvářené sdružením CECIMO.

Seznam doporučené literatury:

- [1] ČSN EN ISO 12100. Bezpečnost strojních zařízení - Všeobecné zásady pro konstrukci - Posouzení rizika a snižování rizika. Praha: Výzkumný ústav bezpečnosti práce, 2011
 - [2] ČSN EN 894-1+A1. Bezpečnost strojních zařízení - Ergonomické požadavky pro navrhování sdělovačů a ovládačů - Část 1: Všeobecné zásady interakcí člověka se sdělovači a ovládači. Praha: Český normalizační institut, 1997
 - [3] ČSN EN 894-2+A1. Bezpečnost strojních zařízení - Ergonomické požadavky pro navrhování sdělovačů a ovládačů - Část 2: Sdělovače. Praha: Český normalizační institut, 1998
 - [4] Lexium 32M Servo Drive - User Guide, 0198441113767-EN 09/2017
- Další informace pro nastavení regulátorů je možné čerpat
- [5] SOUČEK, Pavel. Servomechanismy ve výrobních strojích. Praha: Vydavatelství ČVUT, 2004. ISBN 80-01-02902-6

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) bakalářské práce:

doc. Ing. Přemysl Šůcha, Ph.D., optimalizace CIIRC

Jméno a pracoviště druhé(ho) vedoucí(ho) nebo konzultanta(ky) bakalářské práce:

Datum zadání bakalářské práce: **30.01.2018** Termín odevzdání bakalářské práce: **25.05.2018**

Platnost zadání bakalářské práce: **30.09.2019**

doc. Ing. Přemysl Šůcha, Ph.D.
podpis vedoucí(ho) práce

prof. Ing. Michael Šebek, DrSc.
podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry

prof. Ing. Pavel Ripka, CSc.
podpis děkana(ky)

Příloha B

Zkratky

ATV320	■	Frekvenční měniče společnosti SE určené pro méně náročné aplikace
ATV340	■	Frekvenční měniče společnosti SE určené pro náročné aplikace
B_{10D}	■	Počet cyklů do 10% nebezpečného selhání komponentů
BMP	■	Typ synchronního motoru s permanentními magnety
BSH	■	Typ synchronního servomotoru s permanentními magnety
CFC	■	Programovací jazyk Continuous Function Chart doporučený IEC 61131-3
CPU	■	Centrální procesorová jednotka
FBD	■	Programovací jazyk Function Block Diagram doporučený IEC 61131-3
HMI	■	Uživatelské rozhraní člověk–stroj
HSC	■	High speed counter – Rychlý čítač
IL	■	Programovací jazyk Instruction List doporučený IEC 61131-3
LD	■	Programovací jazyk Ladder Diagram doporučený IEC 61131-3
LXM32	■	Produktová řada servoměníčů pracujících se servomotory BMH a BSH
$MTTF_D$	■	Střední doba do nebezpečné poruchy
PDO	■	Proces data object
PDU	■	Protocol data unit
PFH_D	■	Průměrná pravděpodobnost nebezpečné poruchy za hodinu
PL_R	■	Požadovaná úroveň vlastností
PL	■	Úroveň vlastností
PLC	■	Programovatelný logický kontroler
POU	■	Programová jednotka
SDO	■	Servis data object
SE	■	Společnost Schneider Electric
SFC	■	Programovací jazyk Sequential Function Chart doporučený IEC 61131-3
SLS	■	Safely limited speed – Bezpečně omezená rychlost
SOS	■	Safe operating stop – Bezpečné provozní zastavení
SSM	■	Safe speed monitor – Monitor bezpečné rychlosti
SS1	■	Safe stop 1 – Bezpečné zastavení 1
SS2	■	Safe stop 2 – Bezpečné zastavení 2
ST	■	Programovací jazyk Structured Text doporučený IEC 61131-3
STO	■	Safe Torque Off – Bezpečné odepnutí kroutícího momentu

Příloha C

Příložené soubory

Na příloženém CD jsou umístěny tyto soubory:

- Bakalářská práce v elektronické podobě — *BP_Ondrej_Sramek_2018.pdf*
- Kompletní projekt SoMachine — *BallGrinder_Modbus.project*
- Konfigurační soubor osy X — *Konf_X.psx*
- Konfigurační soubor osy Y — *Konf_Y.psx*
- Videonahrávka přípravy a spuštění cyklu — *automaticky_cyklus_HMI.mp4*
- Videonahrávka zkráceného brousíčního cyklu — *automaticky_cyklus.mp4*
- safety/ obsahuje konfigurační a kontrolní soubory
 - Kontrola bezpečnostních funkcí SISTEMA — *ballGrinder_Safety.ssm*
 - Report bezpečnostních funkcí SISTEMA — *sistemaReport.pdf*
 - Konfigurace bezpečnostního kontroléru — *ballGrinder_SAFETY.mcc*
 - Validovaná kopie konfigurace — *ballGrinder_SAFETY.mcv*
- foto/ obsahuje fotogalerii částí stroje
 - Fotografie malého ventilu — *ventil_maly.jpg*
 - Fotografie velkého ventilu — *ventil_velky.jpg*
 - Fotografie servo-měníčů — *servomenice.jpg*
 - Fotografie servomotoru X — *servomotor_X.jpg*
 - Fotografie posuvných krytů — *posuvne_kryty.jpg*
 - Fotografie lineárního enkodéru — *linearni_enkoder.jpg*
 - Fotografie ovládacího panelu — *panel.jpg*
 - Fotografie hlavního PLC a bezpečnostního kontroléru — *ridici_system.jpg*
 - Fotografie bezpečnostního zámku — *bezpecnosti_zamek.jpg*
 - Fotografie obráběcího prostoru — *obrabeci_ustroji_1.jpg*
 - Fotografie obráběcího prostoru — *obrabeci_ustroji_2.jpg*