



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

ÚSTAV AUTOMATIZACE A MĚŘICÍ TECHNIKY

DEPARTMENT OF CONTROL AND INSTRUMENTATION

ŘÍDICÍ SYSTÉM SCARA ROBOTU

SCARA CONTROL SYSTEM

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Pavel Cviček

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Tomáš Beneš

BRNO 2024



Diplomová práce

magisterský navazující studijní program **Kybernetika, automatizace a měření**

Ústav automatizace a měřicí techniky

Student: Bc. Pavel Cviček

ID: 220967

Ročník: 2

Akademický rok: 2023/24

NÁZEV TÉMATU:

Řídicí systém SCARA robotu

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Cílem práce je rozšířit funkcionalitu SCARA robotu s řídicím systémem Beckhoff.

1. Seznamte se s aktuálním stavem robotického manipulátoru.
2. Navrhněte demonstrační příklad využití SCARA robotu s alternativním řídicím systémem.
3. Testujte funkcionalitu a limity SCARA robotu.
4. Implementujte novou funkcionalitu a ovládací rozhraní.
5. Zhodnoťte dosažené výsledky a zdokumentujte řešení.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

JAZAR, Reza N., c2010. Theory of applied robotics: kinematics, dynamics, and control. 2nd ed. New York: Springer. ISBN 14-419-1749-7

Termín zadání: 5.2.2024

Termín odevzdání: 15.5.2024

Vedoucí práce: Ing. Tomáš Beneš

doc. Ing. Petr Fiedler, Ph.D.
předseda rady studijního programu

UPOZORNĚNÍ:

Autor diplomové práce nesmí při vytváření diplomové práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č.40/2009 Sb.

Abstrakt

Tato diplomová práce se zaměřuje na možnost využití SCARA robotu s alternativním řídicím systémem od společnosti Beckhoff pro 3D tisk. Budou popsány implementované funkcionality a řešení bude řádně zdokumentováno. Dále budou řešeny aktuálně vyskytující se problémy a bude pro ně navrženo řešení. Pro navrženou možnost využití budou popsána možná řešení včetně detailního návrhu a řídicího programu pro vykonávání dané funkcionality. Součástí bude návod, který provede uživatele nastavením sliceru a ovládáním vizualizace.

Klíčová slova

SCARA, 3D tisk, Beckhoff, Manipulátory

Abstract

This thesis focuses on the possibility of using a SCARA robot with an alternative control system from Beckhoff for 3D printing. The implemented functionalities will be described and the solution will be properly documented. Furthermore, currently occurring problems will be addressed and solutions will be proposed for them. For the proposed application, possible solutions will be described including a detailed design and control program for the implementation of the functionality. A tutorial will be included to guide the user through setting up the slicer and controlling the visualization.

Keywords

SCARA, 3D printing, Beckhoff, Manipulators

Bibliografická citace

CVIČEK, Pavel. *Řídicí systém SCARA robotu* [online]. Brno, 2024 [cit. 2024-02-27]. Dostupné z: <https://www.vut.cz/studenti/zav-prace/detail/159418>. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav automatizace a měřicí techniky. Vedoucí práce Tomáš Benešl.

Prohlášení autora o původnosti díla

Jméno a příjmení studenta:	<i>Bc. Pavel Cviček</i>
VUT ID studenta:	<i>220967</i>
Typ práce:	<i>Diplomová práce</i>
Akademický rok:	<i>2023/24</i>
Téma závěrečné práce:	<i>Řídicí systém SCARA robotu</i>

Prohlašuji, že svou závěrečnou práci jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucí/ho závěrečné práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedené závěrečné práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této závěrečné práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

V Brně dne: 13. května 2024

podpis autora

Poděkování

Děkuji vedoucímu mé diplomové práce Ing. Tomáši Benešovi, který mi při zpracování poskytl metodickou a odbornou pomoc. Dále děkuji Bc. Radce Gistingerové za jazykovou konzultaci a mé rodině, která mi byla po celou dobu studia oporou.

V Brně dne: 13. května 2024

podpis autora

OBSAH

SEZNAM OBRÁZKŮ	9
SEZNAM TABULEK.....	11
ÚVOD	12
1. ROBOTICKÉ MANIPULÁTORY	13
1.1 POPIS JEDNOTLIVÝCH TYPŮ MANIPULÁTORŮ.....	14
1.1.1 Kartézský a portálový.....	14
1.1.2 Válcový a sférický.....	15
1.1.3 Antropomorfní.....	15
1.1.4 SCARA	15
1.2 KINEMATIKA ROBOTŮ	15
1.2.1 Přímá úloha kinematiky.....	15
1.2.2 Inverzní úloha kinematiky.....	16
1.2.3 Singularita	16
2. UPLATNĚNÍ SCARA MANIPULÁTORŮ	17
2.1 PICK & PLACE	17
2.2 PRŮMYSLOVÁ MONTÁŽ	18
2.3 3D TISK	18
2.3.1 FDM a FGF technologie 3D tisku.....	19
2.3.2 G-kód	20
3. SCARA MANIPULÁTOR A ŘÍDICÍ SYSTÉM	22
3.1 MANIPULÁTOR EPSON.....	22
3.2 ŘÍDICÍ SYSTÉM BECKHOFF	25
3.2.1 Průmyslový počítač.....	25
3.2.2 IO karty.....	25
3.2.3 Servoměniče	27
3.2.4 EtherCAT	27
3.3 DOSAVADNÍ ŘEŠENÍ A IMPLEMENTOVANÉ FUNKCIONALITY	28
3.3.1 Interpolace a funkce SCARA.....	29
3.3.2 Homing.....	30
3.3.3 Elektromagnetické rušení.....	31
3.4 LIMITY	32
4. POTENCIÁLNÍ MOŽNOSTI ROZVOJE.....	34
4.1 KOMPONENTY PRO 3D TISK.....	34
4.1.1 Krokový motor a jeho řízení.....	35
4.1.2 Proces tavení materiálů	37
4.1.3 Snímání teploty.....	37
4.1.4 Regulace teploty.....	39
5. PŘESTAVBA MANIPULÁTORU PRO 3D TISK.....	42
5.1 VÝBĚR KOMPONENT	42
5.2 UCHYCENÍ TISKOVÉ HLAVY.....	42
5.3 INSTALACE KOMPONENT	44

5.4	ŘEŠENÍ POTÍŽÍ S ELEKTROMAGNETICKÝM RUŠENÍM	45
5.5	SCHÉMA ZAPOJENÍ.....	46
6.	IMPLEMENTACE SW	48
6.1	STRUKTURA PROGRAMU.....	48
6.1.1	<i>Main</i>	48
6.1.2	<i>Axis_n_Control</i>	48
6.1.3	<i>Axis_control</i>	48
6.1.1	<i>Homing</i>	48
6.1.1	<i>Kinematic_transformation</i>	49
6.1.2	<i>Interpolation</i>	49
6.1.3	<i>F_CheckReqPosition</i>	49
6.1.1	<i>F_ControlPosition</i>	49
6.1.2	<i>G_Code_Interpreter</i>	50
6.1.3	<i>CM_AI a CM_AO</i>	50
6.1.4	<i>Extruder</i>	50
6.1.1	<i>Error_reset</i>	50
6.2	OPRAVA CHYB V PŘEVZATÉM KÓDU.....	50
6.2.1	<i>Režimy kinematické transformace</i>	50
6.2.2	<i>Oprava MC povelů pro motory</i>	51
6.2.3	<i>Úprava homing procedury</i>	51
6.3	HW KONFIGURACE.....	51
6.3.1	<i>Přidání terminálů</i>	51
6.3.2	<i>Nastavení parametrů a linkování proměnných</i>	52
6.4	STANDARDIZACE A DESTANDARDIZACE	53
6.5	NASTAVENÍ EXTRUDERU	54
6.6	ŘÍZENÍ VENTILÁTORŮ.....	55
6.7	REGULACE TEPLoty TISKOVÉ TRYSKY.....	56
6.8	IMPLEMENTACE G-KÓD INTERPRETERU.....	58
6.9	ODSTRANĚNÍ CHYB VZNIKLÝCH V PRŮBĚHU	63
6.10	OŠETŘENÍ NEŽÁDOUCÍCH SITUACÍ	63
6.11	PŘÍPRAVA G-KÓDU PRO MANIPULÁTOR	64
6.11.1	<i>Ladění parametrů tisku</i>	67
6.12	VIZUALIZACE	69
7.	ZÁVĚR.....	73
	LITERATURA.....	74
	SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK	79
	SEZNAM PŘÍLOH.....	80

SEZNAM OBRÁZKŮ

1.1	Symbolické 2D a 3D znázornění kloubů robota [2]	13
1.2	Typy manipulátorů a jejich pracovní oblast: a) Kartézský b) Portálový c) Válcový d) Sférický e) SCARA f) Antropomorfní [3][4]	14
2.1	Směry pohybu SCARA manipulátoru [7]	17
2.2	FDM proces 3D tisku [13]	20
2.3	Rozbor ukázky G-kódu	20
3.1	Pracovní prostor manipulátoru Epson H55BN [17]	22
3.2	Pohyb první osy manipulátoru [17]	23
3.3	Pohyb druhé osy manipulátoru [17]	23
3.4	Pohyb třetí osy manipulátoru [17]	24
3.5	Pohyb čtvrté osy manipulátoru [17]	24
3.6	Průmyslový počítač C6015-0010 [18]	25
3.7	Coupler EK1100 vlevo a vstupně výstupní karty (2 × EL1008, 2 × EL2008) [21]	26
3.8	Servoměnič AX5201 [22]	27
3.9	Manipulátor	28
3.10	Rozvaděč	29
3.11	Deska se senzory pro druhou osu [27]	30
3.12	Level shifter deska [27]	31
3.13	Průběh kanálu zpětné vazby [26]	32
3.14	Pracovní plocha manipulátoru pro omezený pohyb	33
4.1	Extruder pelet Mahor V4 [29]	35
4.2	Řídicí jednotka krokového motoru TB6600 [32]	36
4.3	Ukázka umístění tepelného bloku a s ní související závislost intenzity průtoku [29]	37
4.4	Srovnání citlivosti změny výstupu snímačů teploty [35]	38
4.5	Relé SSR-40DA [41]	40
4.6	PWM MOSFET modul HA210N06 25 A [42]	40
4.7	Ventilátor topného tělesa vlevo a materiálu vpravo [43]	41
5.1	Efektor pro peletkový extruder	43
5.2	Vytištěný model efektoru	43
5.3	Upravený rozvaděč	44
5.4	Krytka stolu	45
5.5	Ochranný oplet [44]	45
5.6	Použití opletu v rozvaděči a těle manipulátoru	46
5.7	Popisky ovládacích signálů na konektoru DB25	47
6.1	Přidání nových terminálů do hardwarové konfigurace	52
6.2	Nastavení CoE – Online parametrů pro terminál EL2502	53
6.3	Nově vytvořená osa pro extruder	54
6.4	Charakteristika zahřívání topného tělesa	58
6.5	Definování M-Funkcí	61
6.6	Stavový automat G-kód interpreteru	62
6.7	Vyhrazená tisková plocha v PrusaSliceru	64
6.8	Ladění extruze a parametrů pro 3D tisk	67
6.9	Ladění extruze a parametrů pro 3D tisk	68
6.10	Výsledná testovací souprava	69
6.11	Obrazovka pro základní ovládání os (AxisControl)	70
6.12	Obrazovka pro manuální režim (ManualMode)	70

6.13	Obrazovka pro automatický režim (AutomaticMode).....	71
6.14	Nastavení cesty ke složce s uloženými G-kódy pro prohlížeč souborů.....	71
6.15	Obrazovka pro ovládání G-kód interpreteru (G-Code)	72

SEZNAM TABULEK

2.1	Běžně používané G-kódy	21
2.2	Běžně používané M-funkce.....	21
3.1	Rozměry pracovního prostoru [17]	22
5.1	Možná opatření proti EMC rušení.....	46
6.1	CoE parametry terminálu EL7031.....	55
6.2	Důležité CoE parametry terminálu EL2502	56
6.3	Implementované a použité G-kódy	59
6.4	Použité M-funkce	61
6.5	Parametry nastavení tiskárny.....	65
6.6	Parametry nastavení filamentu	66
6.7	Parametry nastavení tisku.....	66

ÚVOD

Cílem diplomové práce je rozšířit funkcionalitu SCARA robotu s novým řídicím systémem Beckhoff, kterým je nahrazen původní systém manipulátoru a navrhnout demonstrační úlohu na základě zjištěných vlastností.

Práce bude členěna do šesti kapitol, ve kterých bude nejprve popsána potřebná teorie, která se zaměří na jednotlivé typy manipulátorů a blíže pak na SCARA manipulátory a jejich možnosti využití. Bude popsáno řešení, které bude demonstrovat netradiční využití SCARA robotu, a to pro 3D tisk. Budou zkoumány limity a funkcionality robotu a na základě těchto informací bude navržena nová demonstrativní úloha. Cílem je dokázat, že pro manipulátor s novým systémem je možné implementovat řešení, které umožní aditivní výrobu a nebude sloužit pouze například pro Pick & Place aplikace, pro kterou byly původně SCARA roboti pro svou dobrou přesnost a rychlost vytvořeny.

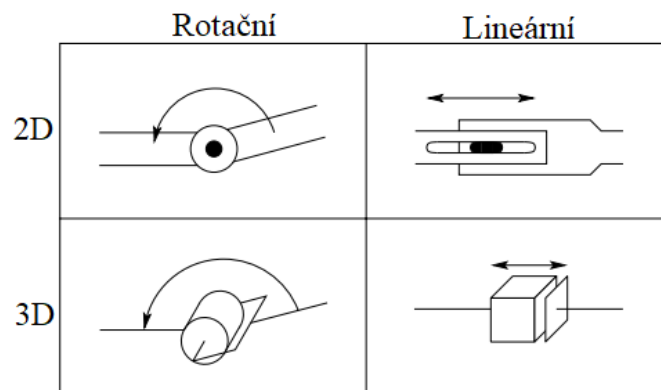
Celé řešení bude pro lepší přehlednost zdokumentováno a budou instalovány nové komponenty, včetně nového koncového efektoru s nastavitelným úchytem. Budou řešeny problémy s elektromagnetickým rušením a budou provedeny další úpravy na manipulátoru.

V posledních dvou částech bude popsán projekt ve vývojovém prostředí TwinCat3 a budou opraveny chyby v programu. Dále bude popsán G-kód interpreter, který umožní systému vykonávat požadovanou funkcionalitu po vzoru běžných 3D tiskáren. Nakonec bude popsáno finální ovládací prostředí, pomocí kterého bude možné manipulátor a novou funkcionalitu ovládat.

1. ROBOTICKÉ MANIPULÁTORY

Roboti a robotické manipulátory všeobecně zlepšují přesnost montáže, zkracují celkový čas výroby, snižují náklady a mají výrazně menší chybovost než lidé, proto začali být hojně využíváni v průmyslu.

Mechanická struktura robotických manipulátorů se skládá z článků spojených pomocí kloubů do kinematického řetězce. Klouby jsou typicky rotační nebo lineární. Rotační kloub umožňuje relativní rotaci mezi dvěma články a slouží tak jako závěs. Lineární kloub umožňuje posuvný pohyb mezi dvěma články [1][2].



Obrázek 1.1 Symbolické 2D a 3D znázornění kloubů robota [2]

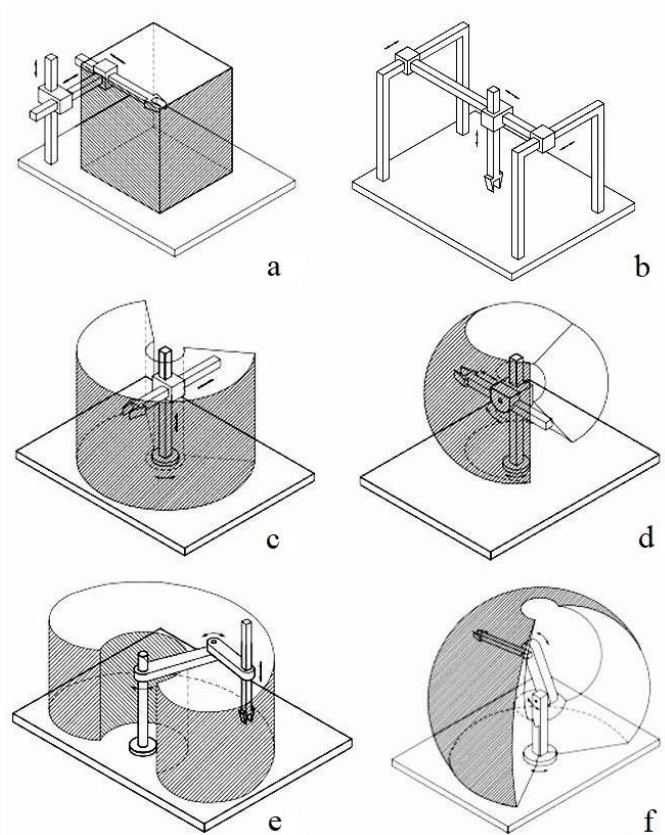
Manipulátor se vyznačuje svou paží, která zajišťuje pohyblivost, dále zápěstím, které propůjčuje obratnost a efektořem, který vykonává požadovaný úkon [3]. Robotické manipulátory lze klasifikovat podle několika různých kritérií, například pomocí počtu stupňů volnosti, způsobu řízení, použitých pohonů, způsobu programování nebo kinematické struktury [1][2].

Podle toho, zda jsou jednotlivé členy robotu připojeny k rámu, se kinematické řetězce, které sestávají z těchto jednotlivých členů, dělí na otevřené, uzavřené a smíšené. Otevřené jsou takové, kde existuje pouze jedna sekvence článků spojující dva konce řetězce. Uzavřený kinematický řetězec vzniká, když sekvence článků tvoří smyčku [1][3].

Podle kloubů lze určit počet stupňů volnosti, které udávají počet nezávislých pohybů, které má daný systém. Pro každý směr existuje jeden stupeň volnosti, což znamená, že například těleso pohybující se v 3D prostoru po vzájemně kolmých osách (x, y, z) má tři stupně volnosti. Pokud těleso vykonává nejen relativní pohyb translační, ale i rotační, otáčí se tedy kolem tří os, má dohromady šest stupňů volnosti. Většina moderních průmyslových manipulátorů má šest nebo méně stupňů volnosti a zařazují se do jednoho ze šesti geometrických typů.

Pracovní prostor manipulátoru je definován jako část prostředí, ke kterému má koncový efektor manipulátoru přístup. Takto vymezený prostor bude mít pokaždé jiný

tvár a velikost. Tyto velikosti se budou lišit u každého manipulátoru z důvodu zvolené struktury manipulátoru a mechanických limitů [2][3].



Obrázek 1.2 Typy manipulátorů a jejich pracovní oblast: a) Kartézský b) Portálový c) Válcový d) Sférický e) SCARA f) Antropomorfní [3][4]

1.1 Popis jednotlivých typů manipulátorů

V následující části budou detailněji popsány všechny výše vyobrazené typy manipulátorů, které mají otevřený kinematický řetězec.

1.1.1 Kartézský a portálový

Kartézská geometrie je realizována pomocí tří kloubů, které vykonávají translační pohyb v osách x , y a z . Osy jsou typicky vzájemně ortogonální a jejich geometrie je tedy jednoduchá. Toto provedení nabízí velice dobrou mechanickou tuhost a konstantní přesnost polohování v pracovním prostoru. Nevýhodou může být špatná obratnost z důvodu hranolových spojů. Rovněž může být problematický směr přiblížení k objektu, který je ze strany, což může být v mnoha ohledech nepraktické.

Z těchto důvodů lze využít portálový manipulátor, který je rovněž založen na třech translačních kloubech, jeho uchopovací mechanismus je však shora. Díky této konstrukci je možné manipulovat s předměty větších rozměrů a hmotností [3].

1.1.2 Válcový a sférický

Válcová geometrie má první (spodní) translační kloub nahrazený kloubem rotačním a manipulátor má tak možnost otáčet se kolem své vlastní osy. Stále se však jedná o manipulátor se třemi stupni volnosti. Tato konstrukce má dobrou mechanickou tuhost, ale jeho přesnost polohování klesá s rostoucím horizontálním zdvihem. Je vhodný především pro přenášení předmětů.

Sférický manipulátor nahrazuje nejen první, ale i druhý translační kloub rotačním. Díky této záměně má manipulátor možnost pohybovat se v pracovním prostoru tvaru duté koule. U této konstrukce klesá oproti předešlým řešením mechanická tuhost a přesnost polohování se snižuje s narůstajícím radiálním zdvihem. Tyto manipulátory se používají například pro obrábění [3].

1.1.3 Antropomorfní

Tento typ manipulátorů pracuje pouze s rotačními členy. Takto zvolená konfigurace poskytuje relativně velkou volnost pohybu v kompaktním prostoru. Robot tímto uspořádáním získává obrovskou výhodu při vyhýbání se překážkám a je schopen se přiblížit i do míst hůře přístupných. Zvolená konstrukce je vysoce obratná a její využití je velice široké. Z tohoto důvodu je tento typ nejvíce zastoupen v průmyslu [3].

1.1.4 SCARA

SCARA robot může být realizován za pomoci dvou až tří rotačních kloubů a jednoho translačního. Dle počtu kloubů se odvíjí i počet stupňů volnosti. Ten bývá u SCARA robotů 3 nebo 4. Translační pohyb se nachází v posledním kloubu a řídí pohyb ve směru osy z. Z důvodu pohybu okolo vertikálních os, je možné dosahovat velkých rychlostí s vysokou přesností. Jejich použití je rovněž velice široké a bude blíže rozebráno v kap. 2 [3].

1.2 Kinematika robotů

K řízení a analýze robotických pohybů se využívá přímé a inverzní kinematiky. Pro jejich řešení je nutné znát reálné rozměry kostí robotického manipulátoru [5].

1.2.1 Přímá úloha kinematiky

Pro řešení přímé úlohy kinematiky je nutné znát úhly natočení nebo vysunutí jednotlivých kloubů, díky kterým je získána koncová pozice. Řešení této úlohy je jednoznačné a existuje pouze jeden koncový bod. K výpočtu se nejčastěji využívá transformační matice. Ta je určena pro každý kloub a umožňuje spočítat celkovou transformační matici, která udává orientaci a polohu koncového bodu. K popisu kinematické struktury lze použít metodu Denavit-Hatzenberg [5].

1.2.2 Inverzní úloha kinematiky

Inverzní úloha řeší, jak nastavit úhly kloubů, aby se manipulátor dostal do konkrétního požadovaného koncového bodu. Inverzní úloha je (na rozdíl od přímé) nejednoznačná. To znamená, že do koncového bodu se lze dostat různými způsoby. Z tohoto důvodu může být její výpočet náročnější. Řešení se často odvíjí od konkrétních podmínek a určených omezení. K výpočtu neexistuje žádná standardní a obecně použitelná metoda, existuje však několik analytických a numerických metod. Mezi nejpoužívanější patří Newtonova metoda [5].

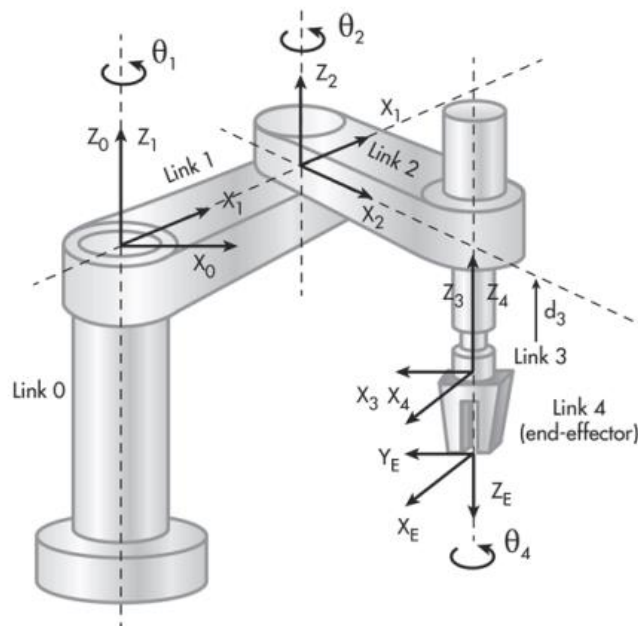
1.2.3 Singularita

Singularita je popsána jako stav, kdy robot dosáhne konkrétního bodu v jeho pracovním prostoru, která mu omezuje jeden nebo více stupňů volnosti. V této situaci dochází k jeho zastavení nebo k jeho nepředvídatelnému pohybu. Robot dále není schopen vykonávat pohyby, jelikož je omezen v určitých směrech a jeden nebo více kloubů je prakticky nepoužitelný. Singularita může být způsobena různými faktory, jako například kinematikou (struktura a uspořádání kloubů a článků). Singularitám je třeba se při návrhu a programování vyhýbat a pohyb optimalizovat [6].

2. UPLATNĚNÍ SCARA MANIPULÁTORŮ

Pohyb manipulátoru SCARA je ekvivalentní pohybu lidské paže a většinou je jejich základna pevně spojena na nepohyblivém podstavci. Byly vyvinuty za účelem zrychlení úloh přenášení předmětu (takzvaně Pick&Place) a zlepšení kroků spojených s montáží. Jsou schopné znásobit svou rychlost v kloubech [7].

Elektrické motory, které přeměňují elektrickou energii na mechanickou, jsou převážně typu servopohon. Velkou výhodou je možnost zpětnovazebního řízení – lze je regulovat na požadovanou hodnotu [1].



Obrázek 2.1 Směry pohybu SCARA manipulátoru [7]

2.1 Pick & Place

Jedná se o postup, který přesune vybraný prvek z první pozice na pozici druhou. Robot nejprve musí lokalizovat prvek. Toho je možné docílit za použití různých snímačů nebo kamer s počítačovým viděním. Na základě informací z kamer dostává instrukce pro pohyb, uchopení a manipulaci s předmětem. Pro uchycení je možné na konečný efektor připevnit různé uchopovací nástroje, které se přizpůsobí prvku, se kterým manipulátor pracuje. Tyto nástroje mohou být různých typů, například pneumatické nebo mechanické. Manipulátor poté přesune prvek na cílovou pozici a celý proces se znova opakuje.

2.2 Průmyslová montáž

Vzhledem k jednoduše zaměnitelnosti nástroje na efektoru je použití SCARA manipulátoru velice široké. Jak již bylo zmíněno v kap. 1.1.4, jsou velice přesné. Proto je možné je použít při výrobě elektroniky pro osazování desek plošných spojů, dále při montáži a spojování komponent nebo lakování.

2.3 3D tisk

Ve srovnání s kartézskými roboty, které jsou běžně pro 3D tisk využívány, má SCARA mnohem větší přesnost, a to platí i pro všechny úlohy s malým zatížením na koncovém efektoru [7].

3D tisk, nebo také aditivní výroba, je proces výroby trojrozměrných předmětů z digitálních souborů. Pomocí aditivních procesů lze dosáhnout vytvoření 3D objektu, který je vytvořen postupným pokládáním vrstev materiálu. Tyto vrstvy mohou mít různé rozměry na základě použité technologie a nastavení tisku.

Nejprve je vytvořen virtuální návrh objektu v CAD programu 3D modelováním nebo použitím 3D skeneru, kde se využívá reverzního inženýrství. Na digitálním objektu je poté provedena konverze do souboru typu STL, který vytváří trojúhelníky (polygony) pro popis povrchu objektu a zjednodušuje původní model. Pomocí softwaru, takzvaného „slicer“, je dále konečný model ve formátu STL rozdělen na jednotlivé vodorovné vrstvy a pro tiskárnu vytvořen G-kód.

Program pro úpravu objektu k tisku umožňuje nastavit i další parametry, například tisk podpurných částí, rychlost tisku nebo intenzitu a tvar výplně. Po nahrání souboru do 3D tiskárny je po vrstvách tištěn trojrozměrný objekt [8][9].

Zhotovený výrobek není nutné po vytištění většinou nijak upravovat. Jsou však situace, kdy je jejich povrchová úprava nutná, a to ať už z důvodu potřeby hladšího povrchu, větší přesnosti nebo oprav chyb vzniklých při tisku. Na základě použitého materiálu lze zvolit vhodnou metodu úpravy. Při použití polymerních materiálů se často při tisku tvoří „stringy“, tedy zbytky materiálu, které za sebou při přejíždění zanechává tisková hlava. Těchto nedokonalostí se lze zbavit foukáním horkého vzduchu na produkt. Pokud je potřeba upravit povrch tak, aby byl dokonale hladký, lze využít různá rozpouštědla, například na bázi acetonu. Pokud by byly použity jiné než polymerní materiály, lze výsledek zlepšit subtraktivními metodami [10].

Nejrozšířenějším materiálem pro tisk se staly polymery, jelikož vynikají svými vlastnostmi a jsou jednoduše tisknutelné. Nejčastěji se využívají PLA, PETG a ABS.

PLA je založen na organické bázi a je biologicky rozložitelný, jeho největší výhodou je jednoduše tisk, díky nízké tepelné roztažnosti a opracovatelnosti. Výtisky bývají pevné, ale křehké. Jednou z největších nevýhod je nízká tepelná odolnost, kdy již při teplotách okolo 60 °C se začnou výrobky deformovat. Nehodí se tedy pro

použití venku nebo v aplikacích, kde by mohly být mechanicky namáhané. Často jsou tedy použity pro výrobu prototypů.

PETG vyniká svou pevností a lepší mechanickou odolností v tahu. Je vhodný také pro použití ve venkovních prostorech z důvodu lepší UV stability.

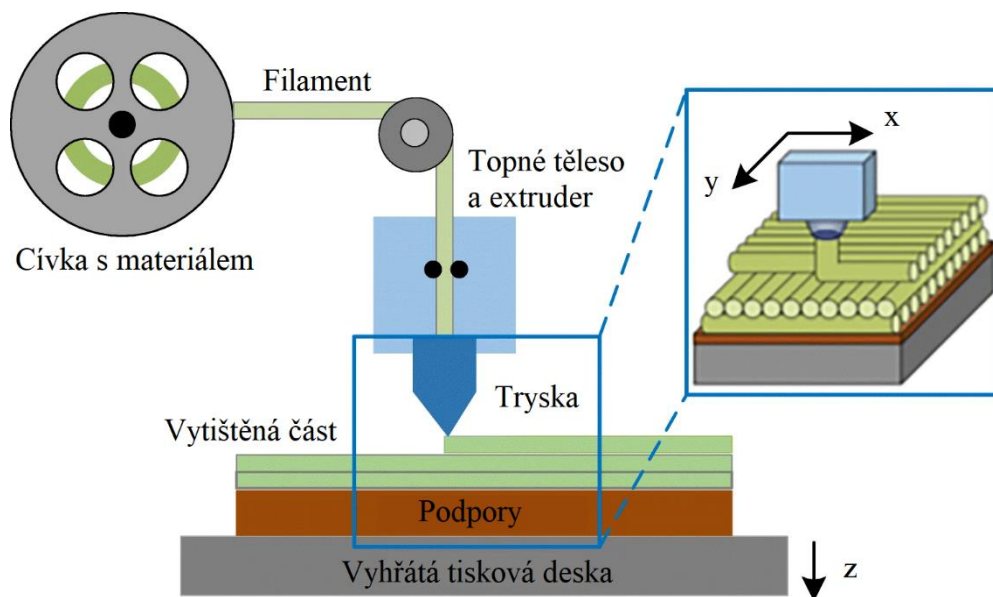
ABS kombinuje vlastnosti PETG a PLA materiálů – je velice pevný a houževnatý. Výhodou je jeho odolnost vůči kyselinám, a tak lze jeho povrch jednoduše vyhladit například pomocí acetonu. Jeho tisk je však velice náročný, potřebuje vyšší teploty při tisku, také je náchylný na změnu teploty v okolí a průvan. Tudíž je nutné jej tisknout v uzavřeném prostoru. Při tisku také dochází k uvolňování zápachu. Poslední dobou se začal tento materiál nahrazovat materiálem ASA, jelikož je na rozdíl od původního ABS UV stabilní a odolný vůči vlhkosti. Kombinací těchto vlastností tak dostáváme materiál, který je velice univerzální a lze jej uplatnit v mnoha odvětvích [11].

Využívány jsou také další materiály – keramika, kovy... Výrobky z těchto materiálů jsou v dnešní době používány pro průmyslové prototypy nebo výrobní aplikace. V případě že s jedná pouze o malou sérii výrobků, je 3D tisk jednou z nejlevnějších variant výroby.

Každá 3D tiskárna je uzpůsobena na tisk materiálů pouze té kategorie, která odpovídá zvolené technologii tisku. Zatím neexistuje žádná 3D tiskárna, která by umožňovala tuto všestrannost.

2.3.1 FDM a FGF technologie 3D tisku

V dnešní době je FDM nejběžnější technologie 3D tisku a umožňuje tisk z velkého množství druhů tiskových materiálů. Tiskárna využívá technologie tavení materiálu, který je do tiskárny dodáván pomocí extruderu, přes který prochází polymerní struna, takzvaný filament, který je namotán na cívce. V tiskové hlavici je umístěno topné těleso, kde se struna se taví a přes trysku je vytlačována ven na tiskovou desku, kde materiál po ochlazení ztuhne. Z tohoto důvodu bývá k hlavě připojen ventilátor, který proces tuhnutí zrychluje. Tisková hlava skládá výsledný produkt vrstvu po vrstvě po předem určené dráze. Díky připojení k tříosému systému, má možnost se pohybovat v osách X, Y a Z. Materiál může být dodáván také pomocí šneku v podobě granulátu, který lze v průběhu doplňovat do násypky. Tato metoda se nazývá FGF. Díky jednoduššímu skladování a výrobě jsou granuláty v porovnání s klasickými strunovými filamenti výrazně levnější [12].



Obrázek 2.2 FDM proces 3D tisku [13]

2.3.2 G-kód

G-kód je programovací jazyk pro numerické řízení a používá se k řízení automatizovaných strojů. Instrukce, které G-kód obsahuje jsou využívány řídicí jednotkou, která dává povely motorům, kam se mají pohybovat, s jakou rychlostí a po jaké trajektorii [14]. Zápis je obvykle prováděn pomocí textových souborů a řídicí jednotka vykonává jednotlivé instrukce po řádcích.

Existuje mnoho druhů G-kódů, kdy každý může používat stejné instrukce pro jiný účel. Většinou jsou základní příkazy pro pohyb a nastavení stejné, je proto nutné brát tento fakt v potaz a při navrhování řešení si vybrat ten, který je nejvíce kompatibilní. Některé typy například vynechávají některé příkazy a nahrazují je jiným řešením.

Součástí G-kódu bývají také M-funkce, které se používají jako pomocné a přípravné příkazy řídicí různé funkce stroje. Mezi typické příkazy patří zapnutí/vypnutí chlazení, změna nástroje nebo nastavení teploty tisku. Tyto funkce bývají často odlišené a záleží na výrobcu nebo uživateli, jak a na jaký účel tyto funkce nastaví [15].

```

N0 M104 S200
Pomocná Hodnota
funkce parametru
N1 G1 X10 Y20 Z100 E2 F2400
Číslo Geometrické Pohyb Rychlost
řádku funkce Extruderu [mm/min]

```

Obrázek 2.3 Rozbor ukázky G-kódu

Ukázka na obr. 2.3 zobrazuje, jak mohou vypadat dva řádky G-kódu. Jakmile se program dostane na první řádek, který implementuje M-funkci, vykoná přednastavený

úkon a nastaví jeho parametr na hodnotu 200. Poté program přechází na druhý řádek a provede pohyb po přímce na souřadnici X10, Y20, Z100 a při tom vytlačí E2 milimetrů materiálu. Při tom se rychlost pro všechny motory nastaví na 2400 mm/min. To vše za předpokladu, že je pohyb stroje nastaven do absolutního režimu.

Aby bylo možné použít příkazy G2 a G3 pro kruhový pohyb, je zapotřebí mít alespoň dvě osy. První způsob použití těchto příkazů používá adresu I, J a K k umístění středu oblouku, vzhledem k počátečnímu bodu. Příkazy X, Y a Z poté udávají počáteční a koncový bod oblouku. Pokud není souřadnice X, Y a Z součástí příkazu a počáteční bod je stejný jako konečný, bude výsledkem kružnice. Pro druhý způsob použití se definuje hodnota R, která udává vzdálenost od počátečního bodu ke středu kruhu. Pro poloměry do 180° je R kladné a nad 180° záporné [16].

Tabulka 2.1 Běžně používané G-kódy

Název	Popis
G1	Posuv po přímce
G2	Pohyb po oblouku ve směru hodinových ručiček
G3	Pohyb po oblouku proti směru hodinových ručiček
G28	Pohyb do výchozí pozice
G54 – G59	Volba souřadného systému
G90	Pohyb v absolutních souřadnicích
G91	Pohyb v relativních souřadnicích
G92	Nastavit aktuální pozici

Tabulka 2.2 Běžně používané M-funkce

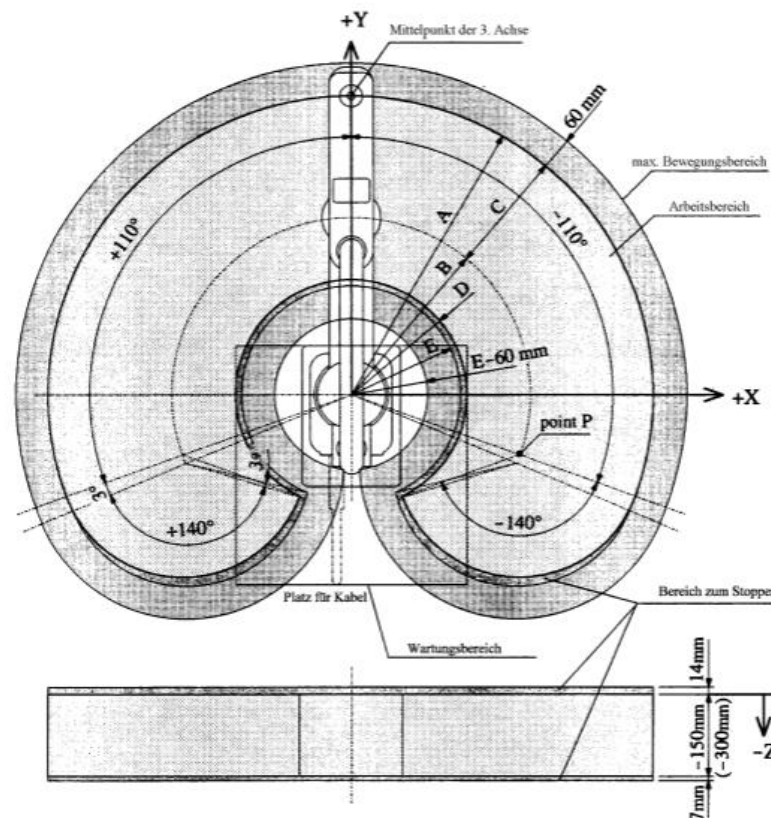
Název	Popis
M104	Spustit nebo vypnout nahřívání trysky a nastavit požadovanou hodnotu
M106	Spustit nebo vypnout ventilátor a natavit požadovaný výkon
M109	Nahřát trysku na konečnou teplotu a počkat na její dosažení
M140	Spustit nebo vypnout nahřívání podložky a nastavit požadovanou hodnotu
M190	Nahřát podložku na konečnou teplotu a počkat na její dosažení

3. SCARA MANIPULÁTOR A ŘÍDICÍ SYSTÉM

V této kapitole bude popsáno původní manipulátor, důvod záměny původního řídicího systému za nový a jeho popis dosavadní implementace.

3.1 Manipulátor EPSON

Původní manipulátor měl označení H554BN, jedná se o čtyřosý SCARA manipulátor. Již ze zmíněného typu lze vyčíst konstrukční a limitní parametry robotu. Robot je navržen pro horizontální umístění a konstrukce manipulátoru umožňuje pracovat v prostoru kružnice do vzdálenosti 550 mm od středu jeho ukotvení. Další rozsahy manipulátoru lze vyčíst z obr. 3.1, kde jsou vyznačeny také vzdálenosti jednotlivých ramen. Pracovní prostor je také omezen limitními senzory, které nedovolí jednotlivým ramenům dostat se mimo vytyčený pracovní prostor.



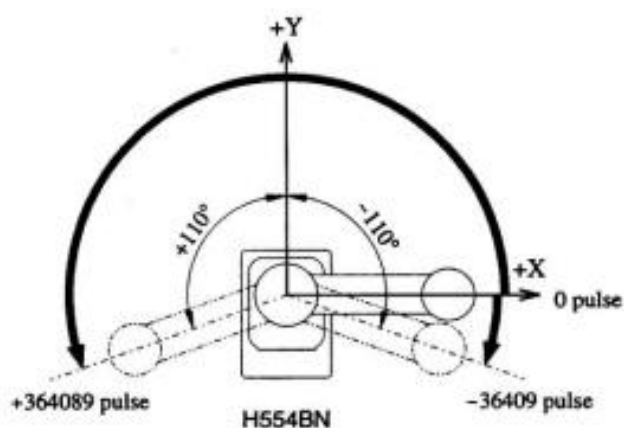
Obrázek 3.1 Pracovní prostor manipulátoru Epson H55BN [17]

Tabulka 3.1 Rozměry pracovního prostoru [17]

A	B	C	D	E
550 mm	325 mm	225 mm	211 mm	198 mm

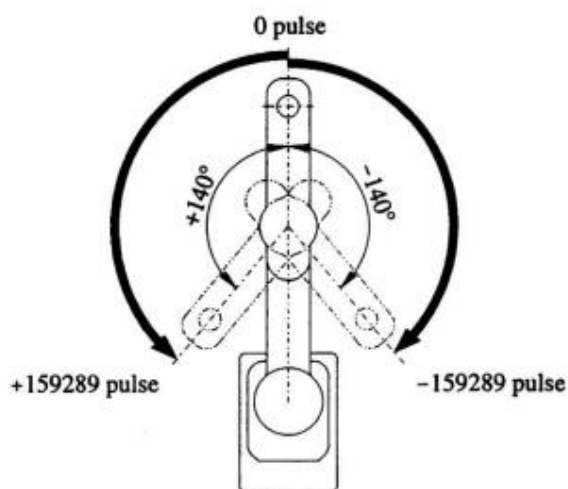
Vzhledem k možnému pohybu ve čtyřech různých směrech, jsou zde použity čtyři střídavé servomotory, které jsou od jednoho výrobce a liší zejména ve svých výkonech. Pracovní rozsah, ve kterém může manipulátor pracovat je vymezen maximálním počtem pulzů každé osy. Tyto pulsy jsou generovány pomocí enkodéru servomotoru.

První a druhá osa manipulátoru zajišťují pohyb v souřadnicích X a Y. Výchozí poloha prvního kloubu (hodnota z enkodéru nabývá nulové hodnoty) nastává v případě, že je rameno kloubu v rovnoběžném kladném směru osy X. Výkon tohoto servomotoru je 200 W. Hodnota pulzů nabývá kladných hodnot, pokud se rameno bude pohybovat rotačním pohybem proti směru hodinových ručiček od nulové polohy pulzů. Hodnota pulzů se pohybuje v rozsahu od -36409 do $+364089$.



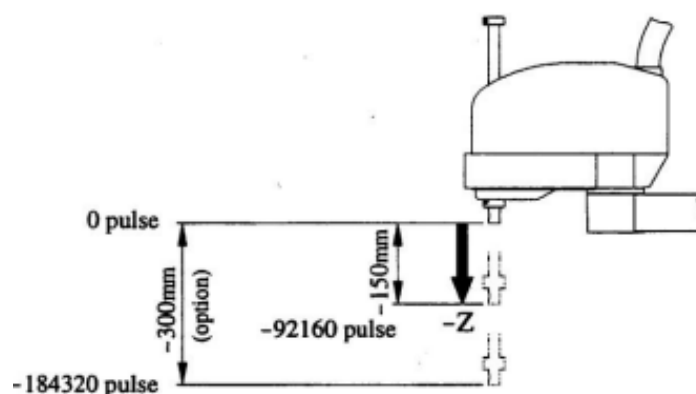
Obrázek 3.2 Pohyb první osy manipulátoru [17]

Druhá osa má výchozí pozici a hodnotu pulzů 0 v případě, že klouby jsou narovnané a kolmo k ose X, dohromady tedy tvoří přímku. Hodnota pulzů se pak pohybuje v rozmezí ± 159289 a výkon motoru je 100 W, tento výkon je totožný i pro třetí osu.



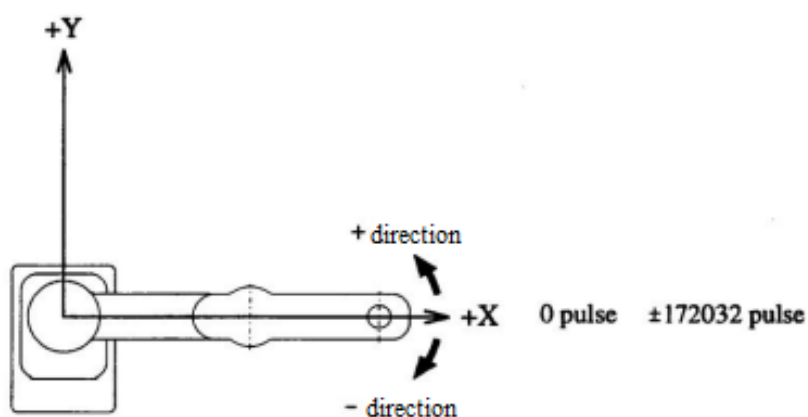
Obrázek 3.3 Pohyb druhé osy manipulátoru [17]

Třetí osa v souřadnici Z určuje výšku zdvihu manipulátoru a její pohyb je oproti ostatním kloubům lineární. Výchozí poloha se nachází v horní části, kde nabývá nulové hodnoty a při pohybu směrem dolů klesá hodnota z enkodéru do minusových hodnot. Výsledný rozsah pulzů, který se vrací z enkodéru nabývá hodnot od 0 do -184320 za předpokladu, že osa klesá až do výšky -300 mm. Tato osa má servomotor vybaven také brzdou, která je v případě klidového stavu zabržděná.



Obrázek 3.4 Pohyb třetí osy manipulátoru [17]

Čtvrtá a poslední osa vykonává pohyb okolo osy Z. Výkon tohoto servopohonu je pouze 50 W a je tedy nejmenší ze všech servopohonů. Nulová poloha této osy je definována pro případ, kdy jsou klouby první a druhé osy a jejich ramena zarovnána se souřadnicí X v kladném směru. Hodnota pulzů nabývá hodnot ± 172032 . Pozitivní hodnoty pulzů se přičítají v případě pohybu proti směru hodinových ručiček jako u první a druhé osy [17].



Obrázek 3.5 Pohyb čtvrté osy manipulátoru [17]

3.2 Řídicí systém Beckhoff

Původní řídicí systém dodávaný s manipulátorem byl poškozen a jako byly zvoleny komponenty od firmy Beckhoff. Firma disponuje širokým sortimentem pro automatizaci a lze najít téměř veškeré komponenty pro potřeby měření a řízení. Původní řídicí systém byl nahrazen komponentami, které jsou popsány v další části.

3.2.1 Průmyslový počítač

Celý systém je řízen pomocí průmyslového počítače C6015-0010 s procesorem Intel Atom a integrovanou grafikou. Tyto průmyslové počítače vynikají svým vysokým výkonem a jsou tak stavěny pro náročné a mnoha signálové aplikace.

Počítač dále obsahuje M.2-SSD slot pro disk, paměti 2× DRAM SODIMM a rozhraní 1× USB 3.0, 1× USB 2.0 a 1× DisplayPort, které slouží pro připojení ovládacích a zobrazovacích zařízení. K dalším zařízením je připojen pomocí dvou ethernetových konektorů se standardem 100/1000BASE-T. Industriální počítač (IPC) je plně kompatibilní s vývojovým prostředím TwinCAT a protokolem EtherCAT. Požadované jmenovité napětí pro napájení tohoto IPC je 24 V s tím, že výrobce uvádí, že by toto napětí nemělo být nižší než 22 V. Tím je zaručeno, že při kolísání napětí nebude docházet k nežádoucímu resetování [18].



Obrázek 3.6 Průmyslový počítač C6015-0010 [18]

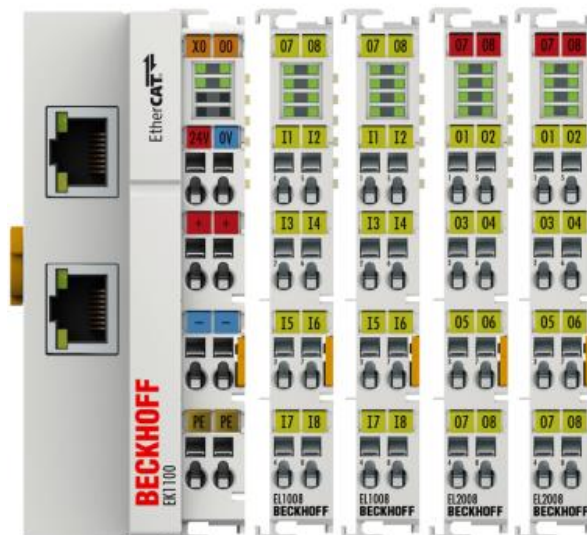
3.2.2 IO karty

Všechny vstupně výstupní karty jsou připojeny ke coupleru EK1100. Ten se stará o to, aby telegramy přicházející po Ethernet protokolu 100BASE-TX převedl na sběrnici E-bus. Tyto telegramy jsou přeposílány do podružných EtherCAT terminálů, jejichž

počet je v celém systému omezen na 65535. Coupler je schopen automaticky detekovat jednotlivé karty a zobrazit je ve vývojovém prostředí. Obsahuje dva konektory RJ45, kde by maximální délka připojeného vedení neměla přesáhnout 100 metrů, aby bylo zaručeno, že budou všechna data doručena a přijata korektně. Na horní rozhraní Ethernet lze připojit jakýkoliv další coupler. Spodní konektor pak slouží pro připojení jakéhokoliv dalšího EtherCAT zařízení. Topologie propojení sítě EtherCAT může být různá, například lineární, hvězdicová nebo kruhová. Po připojení napájecího napětí 24 V coupler zajišťuje také napájení po sběrnici E-BUS. Maximálně je však schopen dodávat 5 V a 2 A. V případě nutnosti je možné na sběrnici mezi ostatní karty integrovat napájecí kartu EL9410 [19].

Terminál EL1008 přijímá binární řídicí signály z procesu a předává je do nadřazeného systému. Jedná se tedy o kartu s digitálními vstupy. Tento terminál je osmikanálový a každý kanál je vybaven LED, která indikuje aktuální stav. Rozpoznávací úrovně jsou -3 až $+5$ V pro logickou nulu a 11 až 30 V pro logickou jedničku. Vstup je vybaven 3ms filtrem, který odstraňuje nežádoucí šum, který nastává při použití tlačítek nebo přepínačů. Bez tohoto filtru by mohlo docházet ke špatné indikaci počtu aktivací [20].

Karta EL2008 naopak odesílá binární řídicí signály z nadřazeného řídicího systému do připojených akčních členů na digitálních výstupech. Karta disponuje osmi výstupními kanály s indikací stavu. Na výstup karty je možné připojit různé zátěže, není však možné dosáhnout většího proudu, než 0,5 A na kanál. Výstupy jsou odolné proti zkratu a přepólování [21].



Obrázek 3.7 Coupler EK1100 vlevo a vstupně výstupní karty (2 × EL1008, 2 × EL2008) [21]

3.2.3 Servoměniče

Pro ovládání motorů manipulátoru se v systému nacházejí dva servoměniče AX5201 a AX5203. Oba tyto servoměniče jsou dvoukanálové a liší se od sebe pouze maximálními hodnotami jmenovitého proudu na svém výstupu. Servoměnič s označením AX5201 disponuje výstupním jmenovitým proudem na jeden kanál 1,5 A; servoměnič s označením AX5203 má tento proud 3 A na kanál. Výstupní proud kanálu lze přizpůsobit a přerozdělit mezi připojené motory. Díky tomu lze například k servoměniči s jmenovitým proudem 3 A na kanál připojit dva motory, kdy jeden z nich bude mít jmenovitý proud 1 A a druhý 4 A. Motory nesmí překročit maximální hodnotu jmenovitého proudu kanálů v součtu, tedy 6 A. Servoměniče mají za úkol napájet připojené motory a detekovat jejich zpětnou vazbu, kterou následně předají prostřednictvím EtherCAT komunikace nadřazenému systému. Ten přijatou zprávu o zpětné vazbě vyhodnotí a odešle zpět řídicí signál [22][23].



Obrázek 3.8 Servoměnič AX5201 [22]

3.2.4 EtherCAT

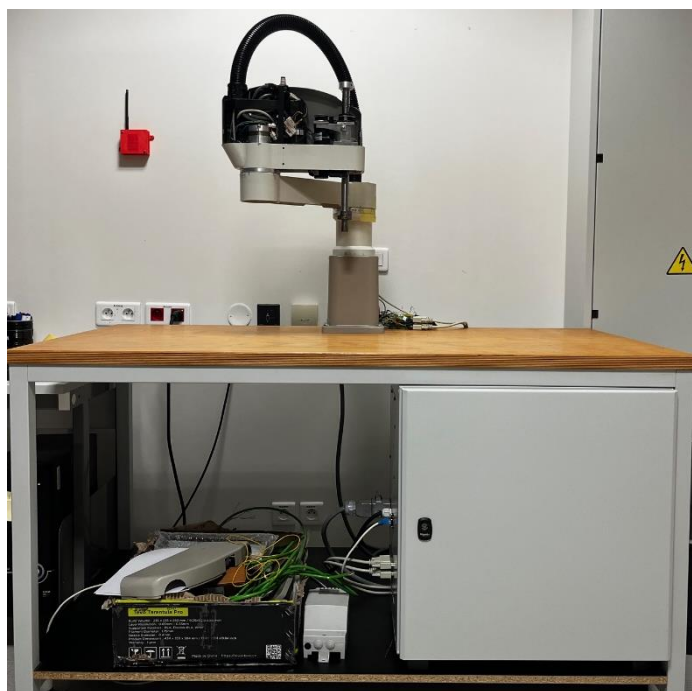
Jedná se o sběrnici založenou na principu „on the fly“, díky které je možné zpracovávat data za chodu. Tímto se liší od standardního protokolu IEEE 802.3, kde je rámec přijat, interpretován a kopírován v každém uzlu. Namísto toho, datový rámec postupně prochází sítí a podřízená zařízení EtherCat čtou pouze data, která jsou adresována právě jim. Real-time data jsou tímto zpracovávána přednostně. Do rámce se při průchodu zapisují data s minimálním zpožděním, jelikož zpracování dat začne dříve, než je rámec zcela přijat. Celou síť je možné adresovat pouze pomocí jednoho rámce a adresování

jednotlivých uzlů může být v libovolném pořadí. Pro její použití je potřeba použít síťový stíněný kabel alespoň Cat. 5.

EtherCAT komunikace vždy navazuje na PLC task. Frame je vyslaný do celé topologie masteru a tím je zajištěno efektivní využití sítě. Na každý segment sítě je možné připojit až 65535 zařízení, tyto zařízení lze po připojení do sítě rychle oživit, jelikož zde neprobíhá adresace pomocí IP adres. Snadná je také diagnostika poruchy, kterou je možné odhalit na úrovni slavů. Probíhá zde například analýza kontrolního součtu CRC a analýza umožňuje také přesně lokalizovat kritický segment sítě. Topologie této sítě je volitelná, jednotlivá zařízení lze připojit různými způsoby, například do hvězdy, stromu nebo kruhu. Zapojením do kruhu získáme výhody redundantního zapojení, tedy eliminace poruchy mezi slavy na vedení. Ethernetový rámec se na posledním portu díky EtherCat řadičům vrátí v případě, že není detekováno další zařízení [24][25].

3.3 Dosavadní řešení a implementované funkcionality

Manipulátor je připevněn ke stolu, který je dostatečně velký na to, aby byl rozsah manipulátoru zcela využit. Kabeláž je vedena konstrukcí manipulátoru, ve spodní části je ale vyvedena ven a není vyřešen její úchopový systém. Dále pod hranou stolu pokračuje do rozvaděčové skříně.



Obrázek 3.9 Manipulátor



Obrázek 3.10 Rozvaděč

Předchozí realizace kolegů, na které tato práce navazuje, již vyřešila spoustu problémů a implementovala funkce, které umožňují pohyb a identifikaci polohy systému.

3.3.1 Interpolace a funkce SCARA

Práce Ing. Štípka realizovala funkce pro spouštění motorů, interpolaci a kinematiku, díky kterým lze manipulátorem pohybovat. Tomu předcházelo řešení chybových stavů. V systému bylo opraveno nastavení regulátorů, kdy pomocí metody Ziegler-Nichols byly zjištěny a dopočítány potřebné parametry. Výsledná momentová charakteristika je velice podobná původnímu řešení a systém je schopný se pohybovat, i když rychlosti jednotlivých os nejsou optimální.

Systém je schopný se pohybovat i po složitějších strukturách, než je pouze pohyb Bod-Bod. Díky částečně implementované funkci pro čtení G-kódu je možné použít manipulátor jako ploter.

Robot má také implementované funkcionality pro ošetření pohybu, aby při výpočtu trajektorie nezvolil nevhodnou cestu a nenarazil tak do svých kostí. V tomto případě dojde k přepočtu, který zajistí, že manipulátor bude pokračovat správným směrem. Dále funkce pro ošetření najetí do bodu singularity. V případě manuálního režimu, kdy zadáváme nové požadované souřadnice, by mohlo dojít k překročení mezí pracovního prostoru. Pokud se bod nachází mimo tuto oblast, bude požadovaný bod přepočítán a doporučen nový, nejbližší možný, do kterého je manipulátor schopen dojet.

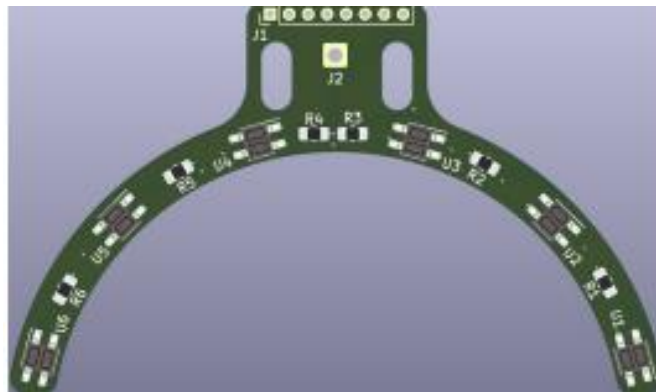
K manipulátoru je také vytvořena webová vizualizace, která komunikuje skrze server, jenž je spuštěný na IPC. Díky ní je možné manipulátor ovládat manuálně a jednodušeji spouštět implementované funkce [26].

3.3.2 Homing

Mezi další funkcionality patří návrh nové home procedury od Bc. Marčonka. Ve své práci se věnoval návrhu senzorů, pomocí kterých je možné zjistit hrubou polohu robotu a na základě těchto hodnot, jej dostat do předem známé výchozí pozice. Zde dojde k nastavení nulové absolutní polohy a enkodéry jsou inicializovány. Tuto úlohu je nutné provést po každém odpojení od síťového napájení, protože enkodéry nemají záložní zdroj, který by udržoval informaci o aktuální pozici. Každá z os je vybavena magnetickým enkodérem ER90C-2048. Jedná se o inkrementální enkodér, který má signály A a B, ale také referenční signál Z.

Původní řešení homingu bylo pro první a druhou osu nahrazeno novým enkodérem, který je na hřídeli osy umístěn v podobě disku a je v podobě jednostopového Grayova kódu.

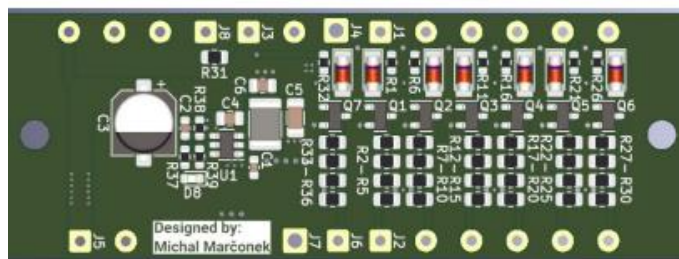
Vytvořený absolutní enkodér je nutné snímat. Pro tento účel byly navrženy senzorické desky, které jsou osazeny miniaturními snímači reflexních objektů. Data ze senzoru se zpracovávají pomocí look up tabulky.



Obrázek 3.11 Deska se senzory pro druhou osu [27]

Proces homing je u zbývajících třetí a čtvrté osy řešen pomocí známého referenčního bodu. Manipulátor tedy najede při této úloze na zmíněný referenční bod a tím zjistí svou polohu. U čtvrté osy jsou tyto body dva.

Infračervené diody na desce jsou napájeny napětím 5 V z důvodu zmenšení ztrátového výkonu. Tím však vzniká problém s připojením desky do 24 V řídicího systému. Z tohoto důvodu jsou do systému přidány dvě level shifter desky, které zajišťují změnu napěťové úrovně z 5 V na 24 V. Ty rovněž snižují napájecí napětí na 5 V pomocí buck měniče a napájejí senzory čtvrté osy. První deska se nachází v základně manipulátoru a druhá v jeho vrchní části [27].



Obrázek 3.12 Level shifter deska [27]

3.3.3 Elektromagnetické rušení

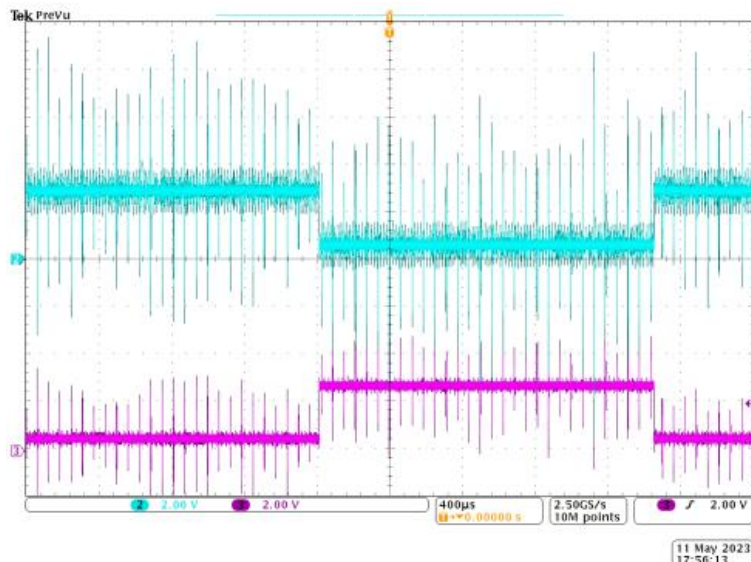
V přechodících pracích se hovoří také o znatelném elektromagnetickém rušení, které ovlivňuje správný chod systému a generuje nežádoucí chybové hlášky v programu [26]. Elektromagnetické rušení je vedlejším produktem přeměny elektrické energie a dalších činností.

Rušení je rozdělováno nejčastěji z hlediska kmitočtu na nízkofrekvenční do 9 kHz a vysokofrekvenční nad 9 kHz. Na základě tohoto rozdělení volíme vhodnou ochranu před nežádoucími vlivy. Šíření rušivých signálů může probíhat různými způsoby. Prvním způsobem šíření je po elektrických vodičích. Ty totiž při průchodu proudem generují okolo své osy magnetické pole, které může ovlivňovat blízké vodiče. Z tohoto důvodu je například nevhodné vést silové vodiče společně se signálovými, a to i když jsou stíněné. Druhým způsobem je šíření elektromagnetických vln vzduchem.

Způsobů, jak odstínit nežádoucí elektromagnetické rušení je mnoho. Mezi možná opatření řadíme například použití kroucené dvoulinky, ta dokáže zlepšit elektrické vlastnosti kabelu. Je založena na principu elektromagnetické indukce a omezuje možnost přeslechu, a je tedy schopna snížit ovlivnění okolím. Dále se standardně používají stínicí oplety a fólie, které je nutné vhodně přizemnit. Oplety jsou vhodné zejména při nízkých frekvencích. Také mají větší tloušťku a tím lepší vodivost než fólie a jsou tak schopné odvést rušení lépe. Fólie je vhodná pro vysoké frekvence, tedy krátké vlnové délky, které by opletem jednodušeji pronikly. V praxi se využívá buď samostatný oplet nebo fólie, ale je také možné použít jejich kombinaci. Záleží totiž v jakém prostředí rušení bude a jaké budou požadavky na odrušení. Existují také různé typy provedení komunikací, které jsou proti určitým rušením odolnější [28].

Hlavním problémem v používaném systému je nedokonalé provedení instalace jednotlivých obvodů. Silové a signálové vodiče jsou vedeny ve stíněných kabelech, avšak ne všechny jsou dokonale přizemněné. V rozvaděči se dále nachází konektor pro přechod signálových vodičů na konektor DB25, který sjednocuje vodiče do jednoho vnějšího kabelu. Tento konektor se nachází přímo pod servodrivery, které spínají jednotlivé motory na frekvenci až 16 kHz. Tímto se do zpětné vazby pohonů vnáší nemalá chyba, kterou lze vidět na obr. 3.13.

Dalším velkým problémem je rozdělení silových vodičů v základně manipulátorů do jednotlivých motorů. Toto rozdělení je realizováno pomocí Wago svorek, a může zde vznikat také značené rušení, jelikož v tomto místě se také nachází konektor DB25, který rozvádí signálové vodiče do jednotlivých částí manipulátoru.



Obrázek 3.13 Průběh kanálu zpětné vazby [26]

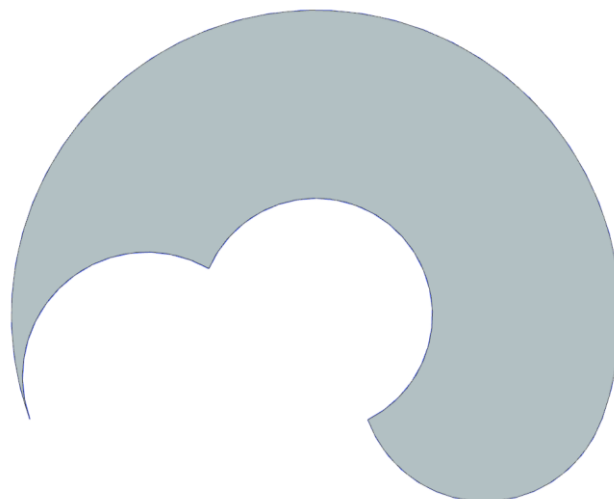
3.4 Limity

Přechozí práce Ing. Štípka se zabývala mimo jiné přenastavením motorů a nastavením jejich regulátorů. Jednotlivé parametry byly voleny dle původní dokumentace k motorům Yasakawa a byly doplňovány do nového pokročilejšího uživatelského prostředí „Drive Manager 2“. Podrobný postup nastavení je popsán v této práci.

Vzhledem k faktu, že byly motory odladěny na optimální momentovou charakteristiku, která je velice podobná originálnímu řešení, nebude do nastavování motorů v této práci nijak zasahováno, a to i přes to, že výsledné rychlosti jsou menší, než jaké jsou umožněny. Pohyby a regulační odchylky jsou natolik přesné, že pro nadcházející řešení jsou více než dostatečné [26].

Mezi limity se řadí omezená možnost pohybu z důvodu singularity. Tento stav nastává, když je první a druhý rotační kloub manipulátoru v takové pozici, kdy se přímka vedoucí z prvního a procházející druhým kloubem stane kolmou k třetímu kloubu. Jinak řečeno, rameno první a druhé osy bude rovnoběžné – budou vytvářet jednu osu. Pokud je manipulátorem pohybováno v kartézských souřadnicích, není umožněn pohyb z důvodu nejasnosti, kterým kloubem je třeba pohnout pro dosažení koncové polohy. V takovýchto případech je nutné manipulátor odstavit z automatického režimu, provést pohyb druhým kloubem manuálně a poté se opět přepnout do automatického režimu. Této funkcionality je obtížné dosáhnout a je potřeba se těmto

singulárním bodům vyhýbat u všech typů manipulátorů. Z tohoto důvodu je pro pohyb v kartézských souřadnicích přednastaveno zalomení ramene vlevo. To ovšem vede k omezení pracovního prostoru. Pro lepší pochopení, kde se nachází limitní hranice pracovní plochy, byl vytvořen přesný model v CAD programu viz obr. 3.14, který přesně definuje pracovní plochu manipulátoru. Tento model vychází z reálných parametrů, viz obr. 3.1.



Obrázek 3.14 Pracovní plocha manipulátoru pro omezený pohyb

4. POTENCIÁLNÍ MOŽNOSTI ROZVOJE

Jak již bylo uvedeno v kap. 2, robot SCARA lze využít v několika aplikacích; většinou záleží na volbě koncového efektoru. K efektoru je možné připojit různá řešení, ale je potřeba myslet na konstrukční limity a vhodnost či nevhodnost některých metod.

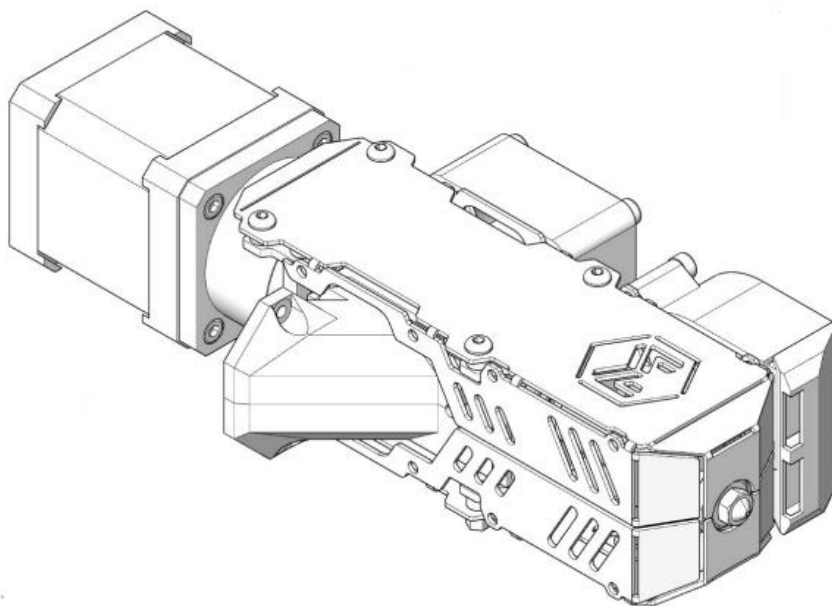
Manipulátor s řídicím systémem od firmy Beckhoff a konstrukčními vlastnostmi, které byly popsány v předchozích kapitolách, disponuje velkou přesností, dobrými rychlostmi a rychlou odezvou. Konstrukce dovoluje hned několik možností rozvoje. Pro demonstrační účely se nabízí Pick & Place aplikace s použitím kamer pro rozpoznávání obrazu a řízení například zatřizování výrobků. Díky přesnosti a ostatním vlastnostem je možné také uspořádání pro již zmíněný 3D tisk, u kterého by se rovněž využily implementované funkcionality, manipulátor totiž částečně dokáže pracovat s G-kódem.

4.1 Komponenty pro 3D tisk

V případě rozvoje cestou aditivní výroby by byl manipulátor schopen s technologií FDM vytvářet z polymerních materiálů reálné 3D modely podle předlohy. Pro tento typ tiskáren se obvykle používá tisková struna, která je přes extruder vtahována a tavena pomocí topného tělesa. Tento způsob 3D tisku by se na manipulátoru dal uplatnit, ale při pohybu manipulátoru by mohlo docházet k zamotávání struny, a to by mohlo vést k chybám na výrobku. Umístění cívky s filamentem na robot by rovněž bylo komplikované. Z tohoto důvodu se jeví jako praktičtější zvolit technologii s peletkovým granulátem. Tento způsob nejen že nijak nebrání pohybu manipulátoru, ale je také významně ekonomičtější. Použitý granulát nemusí mít požadované parametry jako je například přesná tloušťka struny u FDM technologie. Je možné si jej také vyrobit pomocí recyklace nepovedených vytištěných dílů nebo drcením např. PET lahví. Granulát je zahříván topným tělesem a posouván pomocí krokového motoru s převodovkou a šneku přímo do tiskové trysky. Jeho skladování je také výrazně jednodušší. Nevýhoda tohoto řešení spočívá v doplňování granulátu, které je problematické, protože zásobník materiálu je pevně umístěn na těle extruderu. Z téhož důvodu může zásobník nabývat pouze omezených rozměrů. Proto by bylo žádoucí do budoucna vyřešit systém monitorování stavu zásobníku a přidavnou technologii, která bude schopna granulát automaticky doplňovat.

V dnešní době existuje několik typů peletkových extruderů, které jsou už dopředu částečně sestaveny z jednotlivých komponent a téměř připraveny k připojení. Pro tento systém lze zvolit extruder pelet Mahor V4 od značky MAHOR XYZ. Tento extruder umožňuje tisk přímo z plastového granulátu, který může být různého typu. Díky bipolárnímu krokovému motoru Nema 17 a převodovkou s převodovým poměrem 5,18:1 je extruder velice výkonný. Je schopen vytisknout až 200 g plastu za hodinu

s maximální rychlostí tisku 60 mm/s. Díky topnému tělesu může dosáhnout teplot až 300 °C. Tiskové trysky, které lze použít s tímto modelem, nesmí být menší než 0,4 mm a větší než 2 mm. Pro tento extrudér neexistuje speciální doplňkový systém a lze tedy použít standartní software pro slicování 3D modelů s běžným nastavením parametrů pro konvenční filamenty, jelikož samotná tisková hlava nevyžaduje speciální nastavení. Zařízení je možné použít v konfiguraci 24 V/70 W, a proto jej lze bez problémů napájet pomocí napěťového zdroje, který je součástí systému [29].



Obrázek 4.1 Extruder pelet Mahor V4 [29]

4.1.1 Krokový motor a jeho řízení

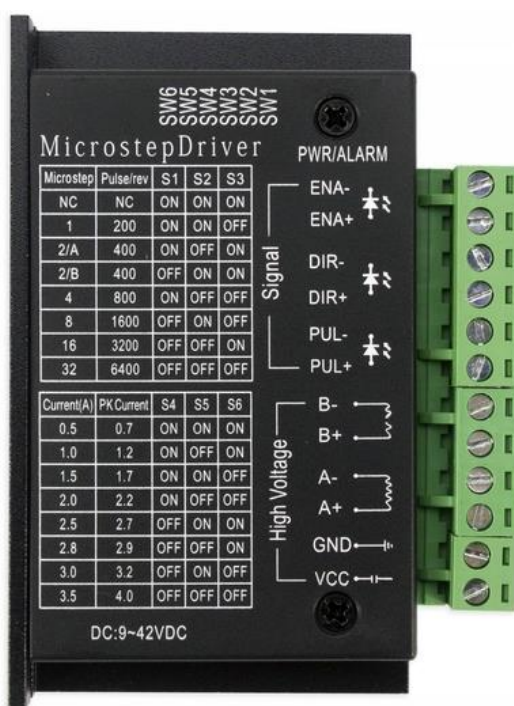
Jak již bylo zmíněno v kap. 4.1, extruder je poháněn bipolárním krokovým motorem s vysokým točivým momentem a jak označení udává, motor má čtyři vývody.

Krokový motor je bezkomutátorový stejnosměrný motor, který umožňuje pohyb v krocích a držet rotor v klidu. Většinou bývá napájen impulsy stejnosměrného proudu. Pohyb v krocích umožňuje určit přesnou úhlovou polohu hřídele, aniž by byl zapotřebí použít další senzor.

Jak rotor, tak i stator může mít několik konstrukčních řešení, které mohou mít vliv na výkon motoru. Pro stator je například důležitá charakteristika, která udává, kolik má obvod fází a pólových páru. Nejčastější jsou motory, které mají dvoufázové vinutí statoru a tedy 4 přívodní vodiče. Počet pólových párů cívek na fázi pak udává, jak jsou jednotlivé zuby statoru obsazeny jednotlivými fázemi. U rotoru je rozlišován zejména materiál, ze kterého je vyroben. Může se jednat například o železné jádro nebo permanentní magnety.

Aby bylo možné motor ovládat, je třeba měnit napájení cívek statoru ve specifické sekvenci, aby bylo vytvořeno magnetické pole, díky kterému se rotor správně natočí.

Pro řízení je možné použít H-můstek na každou fázi, který umožňuje přepínat směr toku proudu a generovat tak magnetické pole v obou směrech. Další možností, jak řídit krokový motor, je pomocí speciálního driveru, který pracuje pomocí signálů pro určení směru, povolení řízení a přivedení PWM na řídicí svorky, kterými je možné ovládat počet kroků motoru, které má vykonat. Driver je ovládán nadřazeným systémem [30]. Je možné použít také terminál EL7031, který je určen pro přímé připojení krokového motoru do 1,5 A. Díky možnosti parametrizace terminálu, lze přizpůsobit nastavení použitému motoru a aplikaci. Díky 64násobnému mikrokrokování je chod motoru velice přesný. Terminál neumožňuje připojení enkodéru [31].



Obrázek 4.2 Řídicí jednotka krokového motoru TB6600 [32]

Podle typu uspořádání cívek rozlišujeme motory na unipolární a bipolární. U bipolárních krokových motorů má každá cívka pouze dva vodiče. Mezi jejich výhody patří větší přesnost, vyšší moment a efektivita. Každou cívku lze ovládat nezávisle.

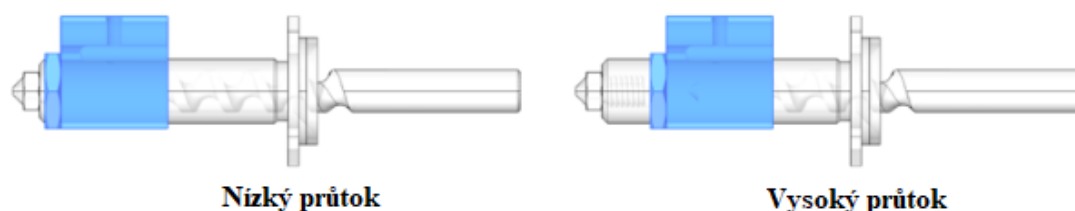
Unipolární krokové motory se budí jednodušeji, jelikož je potřeba spínat pouze jednotlivá vinutí. Každá cívka obsahuje ještě střední společný vodič, přes který teče vždy proud jedné poloviny vinutí. Aby bylo možné krokovat, je nutné střídát fáze cívky. Cívka má vyvedené tři vodiče a většina krokových motorů obsahuje dvě cívky – tedy šest vodičů. Tyto motory lze zapojit i jako bipolární. Toho lze dosáhnout vytažením středního bodu každé cívky a vytvořit tak dvě bipolární vinutí. Tento přístup poskytuje flexibilitu při řízení a možnost využití obou konfigurací podle potřeby.

Existují také různé techniky řízení krokových motorů, mezi které se řadí vlnový režim, při kterém je napájena vždy jen jedna fáze. Dále režim s plným nebo polovičním

krokem, kde je třeba dvoufázového řízení. A nakonec mikrokrokování – tato technika umožňuje pomocí řízení intenzity proudu rozdělit jednotlivé kroky na více menších. Touto metodou je možné dosáhnout vyšší přesnosti [30].

4.1.2 Proces tavení materiálů

Aby bylo možné tavit materiál a dopravovat jej do trysky tiskové hlavy, je zapotřebí šnekového dopravníku a tepelného bloku, který v sobě obsahuje topné těleso a snímač teploty. Díky nastavitelné vzdálenosti tepelného bloku od trysky je možné regulovat intenzitu vytlačování roztaveného materiálu. Posunutím bloku směrem od trysky lze dosáhnout menšího průtoku a naopak [29].



Obrázek 4.3 Ukázka umístění tepelného bloku a s ní související závislost intenzity průtoku [29]

4.1.3 Snímání teploty

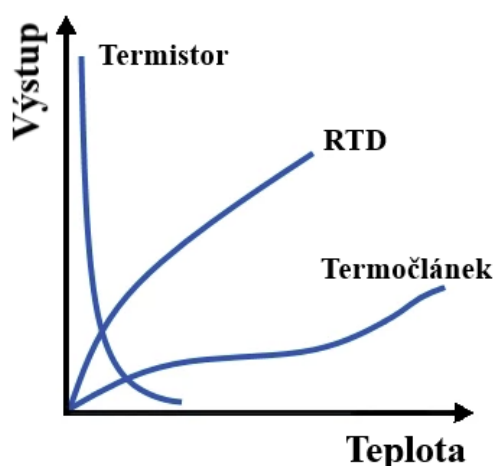
Existuje několik typu snímačů teploty, které lze pro měření topného tělesa použít. Teplotní snímače hrají velký vliv při zajišťování přesného řízení teploty. Mezi nejčastěji používané patří v případě 3D tisku termočláanky, termistory a odporové teploměry (RTD). Každý z těchto senzorů má specifické parametry, jako například požadovaný teplotní rozsah nebo přesnost.

Termočláanky se skládají z bimetalového přechodu, který mění svou vodivost v závislosti na teplotě. Na základě měření hodnoty napětí na tomto přechodu pak dostáváme po přepočtu výslednou hodnotu teploty. Termočláanky mohou být různého typu – K, J, T, E atd. – ty jsou pojmenovány podle používaných materiálů. U 3D tisku se používá nejčastěji termočláanek typu K, který je vyroben z chromelu a alumelu a vyniká svým širokým teplotním rozsahem (-200 až 1400 °C) a je tedy schopen odolat velice vysokým teplotám. Mezi negativa se řadí jejich nižší přesnost oproti ostatním teplotním snímačům, náchylnost na chyby v kabeláži a náchylnost na elektromagnetické rušení. Jejich závislost bývá většinou v daném úseku teplot lineární, avšak mimo stanovený rozsah může senzor vykazovat nelinearitu.

Princip termistoru spočívá ve změně odporu na základě měnící se teploty. Existují dva druhy, které se od sebe liší způsobem, jakým se mění právě odpor s teplotou. První typ je NTC, který má tuto změnu negativní, to znamená že při zvyšování teploty odpor termistoru klesá. U druhého typu PTC probíhá tato změna obráceně. Závislost těchto

snímačů je nelineární. U 3D tiskáren převažuje použití NTC termistorů. Jsou vyrobeny z polovodičů, převážně křemíku a germania. Typické hodnoty těchto termistorů jsou 100 k Ω a 10 k Ω . Hodnota 100 k Ω u NTC termistoru znamená, že termistor nabývá právě této hodnoty při pokojové teplotě 25 °C a při zvyšující se teplotě se může dostat řádově až na stovky ohmů. Jedná se o nejpoužívanější senzor pro měření teploty u 3D tiskáren. Je však nutné brát ohled na jejich maximální rozsah měření; tyto senzory nejsou vhodné pro aplikace, kde teplota přesahuje 300 °C. Mají však vyšší přesnost v definovaných teplotních rozsazích a jsou velice levné.

Odporové teploměry jsou vyrobeny z kovu a jejich elektrický odpor se rovněž mění s teplotou. Elektrický odpor u RTD teploměrů narůstá se zvyšující se teplotou. Většinou jsou tyto snímače vyrobeny z platiny, niklu, mědi nebo molybdenu. Nejčastěji používaný materiál je platina, která má také nejnižší součinitel odporu, který vyjadřuje závislost odporu vodiče na teplotě. Oproti NTC je zde velkou výhodou, že tento nárůst je téměř lineární. Jejich teplotní rozsah bývá široký a lze tak měřit teploty do 650 °C. Vynikají také svou vysokou přesností a dobrou opakovatelností měření. Vyrábí se pro různé typy připojení od dvou vodičového až pro čtyřvodičový. Při měření je nutné brát v potaz zvolený způsob zapojení, jelikož v případě dvou vodičového zapojení se může projevit vliv odporu přívodních kabelů či vliv měřicího proudu. Toto platí hlavně v případě, že používáme snímače s hodnotou odporu 100 Ω při 100 °C, pokud je zvolen snímač s větší hodnotou odporu, například 1000 Ω , je možné odpor přívodních vodičů zanedbat. Další možností je použití vícevodičového zapojení, které eliminuje zmíněné nežádoucí vlivy. Nevýhodou je také jejich větší pořizovací cena oproti termistorům a termočláncům [33][34].



Obrázek 4.4 Srovnání citlivosti změny výstupu snímačů teploty [35]

Pro snímání teploty v PLC má společnost Beckhoff několik druhů analogových vstupních karet, které si liší svým rozlišením, počtem kanálů, typem snímaného signálu a připojeného prvku.

Jednou z možností je použití analogové vstupní karty EL3201-0200 se čtyřmi kanály, na kterou lze připojit snímače typu RTD a NTC až do hodnot 240 k Ω . Snímače lze ke kartě připojit dvouvodičově a jejich hodnota bude zaznamenána s rozlišením 16 bitů. Měřená hodnota může být přímo v ohmech anebo okamžitě převedena na teplotu ve svorce. K těmto účelům jsou přednastavené charakteristiky křivek a převodní vzorce se specifickými parametry [36].

V případě použití termočlánku, je výhodné zvolit vstupní terminál EL3312, který umožňuje jejich přímé připojení. Tento terminál disponuje mikroprocesorem, který provádí linearizaci v celém rozsahu teplot, tento rozsah lze libovolně měnit. Tuto kartu lze využít pro různé typy termočlánku, kdy je výchozím typem K. Rozlišení této karty je 16 bitů a lze k ní připojit dva snímače [37].

Další variantou je osmi kanálová analogová vstupní karta EL3068, která na jednotlivých kanálech dokáže zpracovávat signály v rozsahu od 0 do 10 V. Měřené napětí je digitalizováno s rozlišením 12 bitů. Tato karta není přímo určena k použití s popsány typy snímačů a velmi záleží na provedení snímače. Ten musí být uzpůsoben tak, aby měl na svém výstupu 0 až 10 V a bylo tak možné zaznamenávat jeho hodnotu na vstupních svorkách. Tuto skutečnost je tedy nutné brát při koupi teplotního senzoru v potaz a případně společně se snímačem dokoupit i potřebný převodník signálu. Tato karta je však oproti ostatním dostupná, na jiné jsou objednáci lhůty až několik měsíců [38].

4.1.4 Regulace teploty

Aby bylo možné regulovat teplotu na žádanou hodnotu, je zapotřebí zpětné vazby. K tomu bude použit již zmíněný teplotní senzor, na základě jehož vyhodnocení teploty bude spínáno topné těleso. Regulaci teploty a řízení prvků je možné provádět pomocí pulzně šířkové modulace. Z tohoto důvodu je vhodné použít výstupní terminál, který bude tuto funkcionalitu zajišťovat.

Nabízí se použít PWM výstupní terminál EL2502, který dokáže spínat na frekvencích až 125 kHz a je dvoukanálový. Maximální zátěž, kterou je možné připojit je 0,5 A na kanál. Výstup terminálu je chráněn proti přetížení a zkratu [39].

Vzhledem k faktu, že není potřeba spínat výstup vysokými frekvencemi, je další možností zvolit již dostupnou a nevyužitou kartu EL2008 pro spínání výstupu a řízení teploty hot endu na extruderu. Tato karta sice není přímo určena k práci s PWM, ale vzhledem k časovým konstantám pro její sepnutí a vypnutí výstupu ji lze pro tento případ využít. Je však omezena frekvencí spínání na 1kHz. Tato hodnota vychází z minimální doby trvání PLC tasku.

Důvod, proč k těmto kartám nelze přímo připojit hot end, je jejich limit na maximální zátěž na kanál, která nesmí přesáhnout 0,5 A. Z tohoto důvodu je nutné zařadit mezi zátěž a výstupní kartu spínací zařízení, které umožní spínat vyšší proudy, až desítky ampér. Nabízí se dvě řešení, a to použít SSR relé nebo MOSFET.

Pro spínání elektrického proudu používá SSR relé polovodičové prvky, které jsou opticky oddělené například triaky. Na rozdíl od elektromagnetického relé nemá žádné pohyblivé součásti, díky tomu je zajištěna jeho dlouhá životnost a absence hluku při spínání. Nevýhodou je však delší doba spínání a vypínání, což může být kritické u některých aplikací, kde je požadována rychlá odezva [40].



Obrázek 4.5 Relé SSR-40DA [41]

Při použití obvodu s MOSFET tranzistorem je možné dosáhnout rychlejší odezvy a kratších časů spínání a vypínání než u SSR relé. Životnost MOSFET je také dlouhá, ale může být náchylnější na nadměrné proudy. Jejich cena je nižší než u SSR.



Obrázek 4.6 PWM MOSFET modul HA210N06 25 A [42]

Pro regulaci teploty bývají dále používány dva ventilátory, které jsou zodpovědné za chlazení. První z nich je axiální a má za úkol ochlazovat tiskovou hlavu. Aby bylo možné dosáhnout vyšších teplot, je pro tento typ extruderu doporučeno udržovat výkon ventilátoru kolem 50 %. Nižší výkon způsobí také rychlejší zahřátí tiskové hlavy. Je ovšem třeba dát pozor, aby nedocházelo k přehřívání. Pomocí druhého odstředivého

ventilátoru je pak možné regulovat ochlazování vytištěných vrstev. Různé typy plastu totiž vyžadují různý výkon chlazení a v potaz je nutné brát také rychlost tisku, jelikož při vyšších rychlostech bude požadován vyšší výkon. Ventilátory lze ovládat stejně jako SSR relé nebo MOSFET pomocí pulzně šířkové modulace, a to buď pomocí připojení k digitálnímu výstupnímu terminálu nebo k PWM terminálu. Zde by bylo lepší použít PWM terminál, jelikož při nižším požadovaném výkonu na ventilátoru, a tedy kratší DutyCycle, by mohlo docházet na této frekvenci tasku k trhání ventilátoru nebo by nebylo vůbec možné jej spustit na menší výkon [29].



Obrázek 4.7 Ventilátor topného tělesa vlevo a materiálu vpravo [43]

5. PŘESTAVBA MANIPULÁTORU PRO 3D TISK

5.1 Výběr komponent

Jako extrudér byl zvolen preferovaný Mahor V4, který pracuje s peletkovým materiálem. Jeho popis a parametry byly rozebrány v kap. 4.1. Jelikož se jedná o předpřipravený výrobek a obsahuje téměř všechny potřebné části, je třeba jej pouze doplnit a není nutné zabývat se volbou všech komponent.

Pro řízení teploty hot endu byl vybrán modul s MOSFET HA210N06, který zvládá na svůj výstup připojit zátěž až 25 A. Ovládán bude skrz digitální výstup karty EL2008, pomocí PWM. Aby bylo možné teplotu na výstupu regulovat, byl do topného tělesa vložen snímač PT100 a do rozvaděče přidán převodník signálů, který převádí signál z RTD snímače na 4 až 20 mA. Převodník má pracovní rozsah v rozmezí od 0 °C do 300 °C a jeho chyba měření je 0,2 % z rozsahu. Tímto snímačem byl nahrazen původní senzor NTC 100k dodávaný s extrudérem. Aby bylo možné teplotu zaznamenávat pomocí vybrané osmi kanálové vstupní karty EL3068, převádí se tento proud na napětí. Toho docílíme tak, že do okruhu přidáme rezistor 500 Ω. Na něm budeme měřit napětí s offsetem od 2 do 10 V [42].

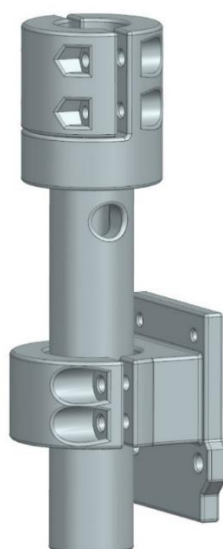
Krokový motor extruderu bude řízen pomocí terminálu EL7031, který umožní narozdíl například od externího driveru TB6600 jednoduché ovládání v prostředí TwinCat3. Tím se usnadní zpracování povelů, které budou přicházet při zpracovávání G-kódu.

Pro ventilátory byl zvolen terminál EL2502, který umožňuje účinně řídit potřebný výkon ventilátorů.

5.2 Uchycení tiskové hlavy

Extrudér má na svém těle konstrukci, ke které je možné jednoduše přichytit držák, který bude sloužit jako koncový efektor pro manipulátor.

Navržený model efektoru se skládá celkem ze čtyř částí. Jedná se o dutý válec, který se přichytí pomocí nastavitelné svorky k paži třetí a čtvrté osy. Tento válec je dutý, aby jím bylo možné protažení kabeláže. Ta nemůže být instalována jinudy, jelikož by mohlo dojít při pohybu manipulátoru k jejímu zničení. Další částí je deska, ke které se přichytí samotný peletkový extruder. Tato část má na sobě úchopový mechanismus, který je možné pomocí nastavitelné svorky přichytit k dutému válci efektoru. Délka válce byla zvolena tak, aby bylo možné s tiskovou hlavou tisknout až na úroveň samotného stolu, ke kterému je manipulátor připevněn. Tímto způsobem je možné využít celou výšku tisku. Zároveň je úchyt navržen tak, aby v případě, že je deska s extruderem na dutý válec upevněna do nejvyšší možné výšky, nedošlo ke kolizi pohybu s jinou osou manipulátoru.



Obrázek 5.1 Efektor pro peletkový extruder

Testovací model byl vytištěn pomocí jiné 3D tiskárny z plastového filamentu. Takto vyrobený efektor je vhodný pouze jako prototyp. Největší nevýhodou je totiž jeho chvění při větších rychlostech pohybu manipulátoru. Toto chvění by při tisku zanášelo velkou chybovost a výsledný produkt by mohl mít několik tiskových vad. Z tohoto důvodu byly vytvořeny technické výkresy jednotlivých částí, modely byly vyexportovány do formátu „STEP“ a externí firmou se nechal efektor vyrobit z kovového materiálu.

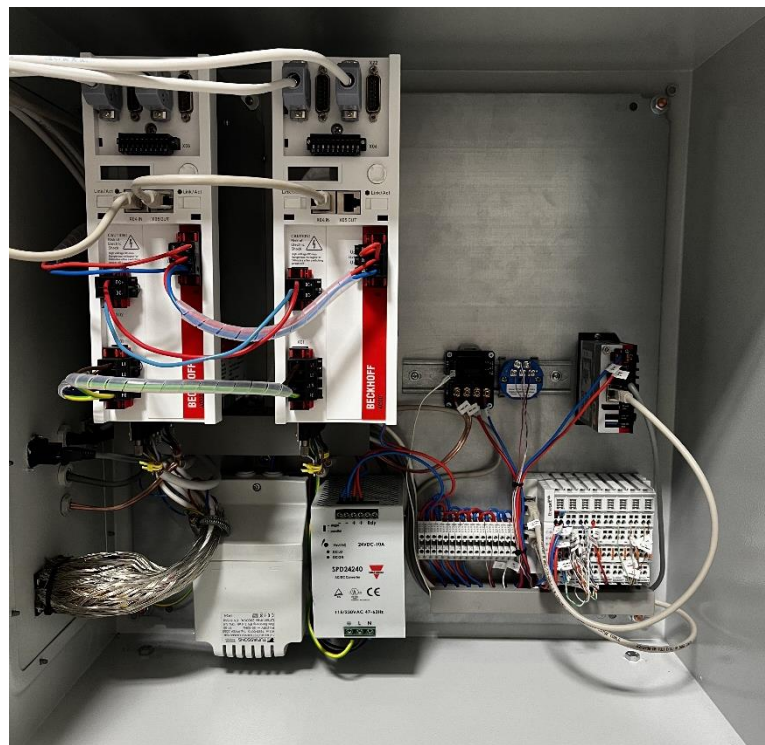


Obrázek 5.2 Vytištěný model efektoru

5.3 Instalace komponent

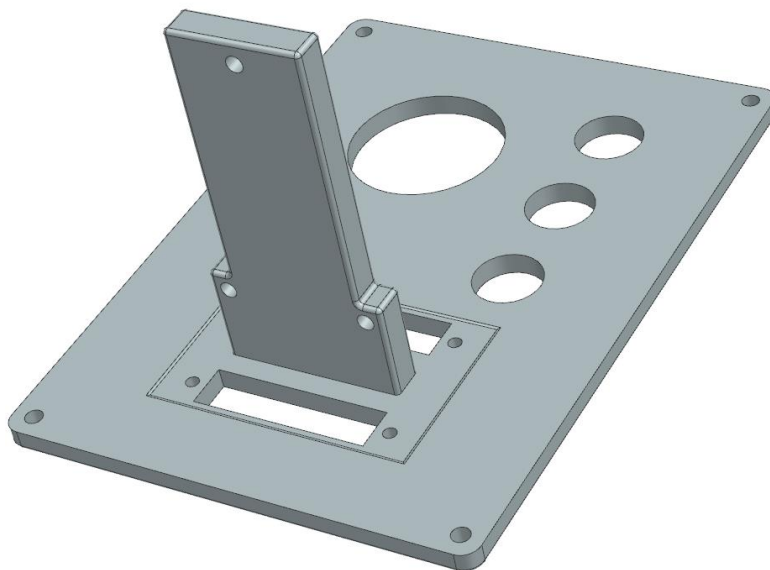
Do těla extruderu byl vložen teplotní snímač společně s topným tělesem. Tělo bylo osazeno dvěma ventilátory a svorkovnicí pro lehčí propojení kabeláže. Dále byl úchytem tiskové hlavy protažen stíněný šestnáctižilový kabel s konektorem DB15 na svém konci, díky kterému byl jednoduše propojen peletkový extruder s konektorem na těle manipulátoru (viz obr. 5.2). Na cestě do rozvaděče byl ještě použit jeden konektor, aby se prodloužilo vedení. Mimo tento vodič byl stejnou cestou veden nepřetržitě dvoužilový kabel pro napájení hot endu. Pro napájení 70W topného tělesa bylo nutné použít vodič s větším průřezem kvůli ztrátám na vedení. Z tohoto důvodu má vodič průměr 1,5 mm a je veden samostatně přímo do řídicího modulu bez přerušení.

Dovnitř rozvaděče byla nainstalována DIN lišta, ke které byl uchycen modul pro regulaci teploty hot endu a převodník pro teplotní snímač. Byly přidány svorky pro zdroj 24 V. Terminály EL3068, EL2502 a EL7031 byly přidány na sběrnici k EtherCAT coupleru EK1100. K příslušným terminálům byly připojeny nové signálové vodiče.



Obrázek 5.3 Upravený rozvaděč

Aby vodiče vstupující do manipulátoru přes stůl nevisely ve vzduchu a bylo možné je schovat mezi stůl a základnu manipulátoru, byla navržena krytka stolu, která obsahuje dostatek průchodek pro jednotlivé vodiče i s rezervou pro případná rozšíření. V krytce je také okénko, do kterého je možné zatavit závitovou vložku a umožnit tak jednoduché upevnění konektorů DB25.



Obrázek 5.4 Krytka stolu

5.4 Řešení potíží s elektromagnetickým rušením

U všech stíněných vodičů byla provedena kontrola, zda jsou správně přizemněny. Pokud tomu tak nebylo, došlo k následné opravě.

Konektory DB25 a veškeré nestíněné přechody, ať už silové nebo ovládací části, byly následně oblepeny kaptonovou tepelně odolnou páskou a byl na ně nasazen ochranný oplet z cínované mědi, který by měl být schopen částečně odrušit nežádoucí vlivy elektromagnetického rušení. Oplet byl také vždy řádně přizemněn.

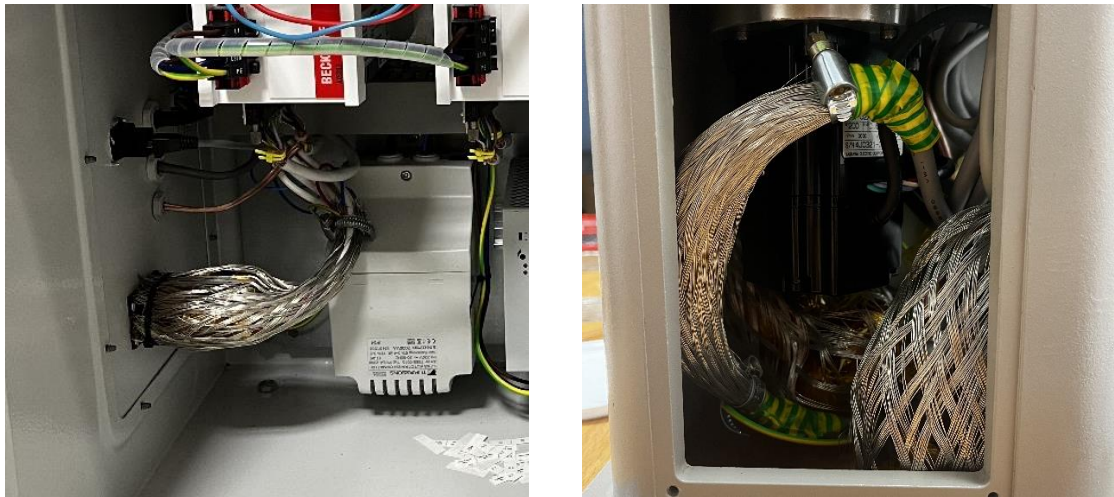


Obrázek 5.5 Ochranný oplet [44]

Ani takto provedené úpravy však nebyly schopné eliminovat vyskytující se rušení. Z těchto důvodů byla vytvořena tabulka tab. 5.1, která upřesňuje, které opatření již byly implementovány a které by do budoucna mohly dovést systém k bezproblémovému chodu.

Tabulka 5.1 Možná opatření proti EMC rušení

Opatření	Implementováno
Použití stíněných kabelů	Ano
Kontrola správného přizemnění	Ano
Stínicí oplet pro nestíněná místa	Ano
Použití kroucených vodičů	Ano
Oddělení signálových vodičů od silových	Částečně
Stínicí průchodky	Ne
Použití filtračních kondenzátorů	Ne
Použití kabeláže bez přerušení (nahrazení konektorů DB25 a Wago svorek)	Ne
Změna rozmístění komponent v rozvaděči (Posunout servodrivery tak, aby nebyly tyto zdroje rušení přímo u konektoru DB25 se signálovými vodiči)	Ne



Obrázek 5.6 Použití opletu v rozvaděči a těle manipulátoru

5.5 Schéma zapojení

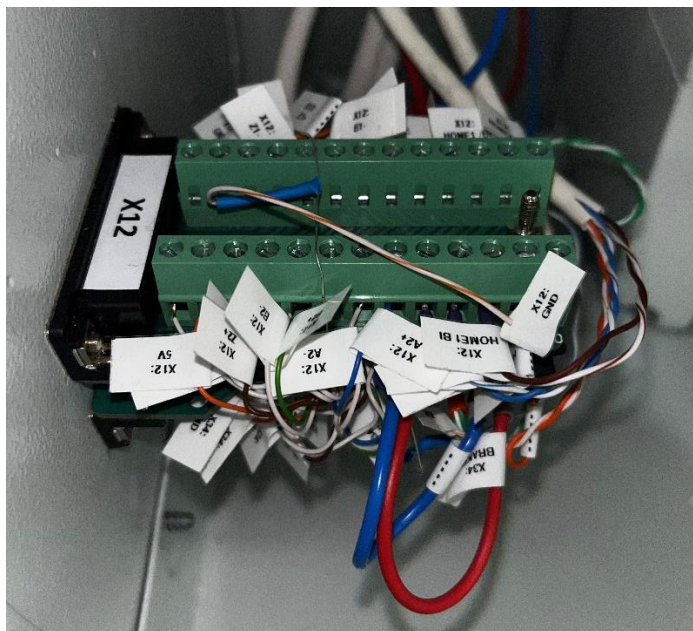
Pro lepší přehlednost a pochopení propojení jednotlivých komponent se využívá elektrotechnických schémat. K dosavadnímu řešení nebylo prozatím vytvořeno kompletní schéma a předchozí realizace, na které tato práce navazuje, vždy řešily pouze část, která se týkala jejich tématu. Z tohoto důvodu je dostupná dokumentace chaotická a neaktuální.

Celý systém je napájen síťovým napětím 230 V. Přimo ze sítě bez jakýchkoliv přídatných jisticích prvků v rozvaděči je napájen zdroj 24 V a transformátor napětí.

Transformátor PVEA2000, který převádí síťové napětí 230 V na 200 až 215 V je zde umístěn z důvodu nutnosti napájení servomotorů manipulátoru 200 V. Toto napětí je dále přivedeno na vstupní svorky servoměníčů. Ke zdroji 24 V jsou připojeny ovládací prvky systému. Signálové vodiče, které vystupují z měničů nebo vstupně výstupních terminálů, jsou buď přímo vedeny stíněným kabelem, nebo sdruženy do 25vodičového kabelu přes konektor DB25. Konektor je využit zejména pro signály z enkodéru a koncových snímačů manipulátorů. Silové kabely motorů jsou vedeny jedním kabelem přes konektor HARTING, čímž je oddělena silová část od ovládací.

V základně samotného manipulátoru se nachází deska plošných spojů, která slouží jako level shifter napěťových úrovní signálů a další konektor DB25, který distribuuje jednotlivé signály do příslušných komponent robotu. Ve vrchní části těla manipulátoru se nachází druhá level shift deska, kde jsou všechny vodiče přes svorky propojeny s příslušnými zařízeními. Způsob připojení nových komponent, byl popsán v kap. 5.3. Detailní schéma zapojení lze najít v příloze A.

Dosavadní kabeláž nebyla prozatím fyzicky označena. Z tohoto důvodu by při potřebném rozpojení a opětovném zapojení mohlo dojít k záměně vodičů, a tím k nežádoucím chybám. Vzhledem k velkému počtu signálových vodičů bylo dosavadní zapojení velice chaotické. Pomocí štítků byly vytvořeny popisky, které korespondují s označením ve vytvořené dokumentaci. V případě např. závady bude orientace v systému usnadněna.



Obrázek 5.7 Popisky ovládacích signálů na konektoru DB25

6. IMPLEMENTACE SW

Tato práce vychází z kódu, který je napsán v prostředí TwinCat3 od společnosti Beckhoff. V programu se již nachází funkce vyjmenované v kap. 3.3. Tyto funkce tvoří základní kámen pro práci s manipulátorem. Vzhledem k rozsáhlosti kódu, je nejprve nutné pochopit jeho fungování jako celku a až poté začít dělat změny.

Propojení funkcí není dokonalé a dochází i k nežádoucím stavům. Samotné funkce nejsou vždy korektně implementovány, takže se následující podkapitoly budou zabývat nejprve řešením těchto problémů a až poté implementaci 3D tisku do opraveného kódu.

6.1 Struktura programu

6.1.1 Main

Jedná se o hlavní rutinu, ve které se volají ostatní funkce a programy. Je zde také použita funkce „ItpSetOverridePercent“, která nastavuje „override“ neboli výkon kanálu v procentech. Pro tuto rutinu byl vytvořen task s intervalem cyklu 10 ms.

6.1.2 Axis_n_Control

Tento funkční blok v sobě implementuje stavový automat, který využívá funkce z knihovny „Tc2_MC2“ pro ovládání přiřazeného motoru. Součástí jsou základní programové MC funkce, které jsou implementovány dle standardu PLCopen. Tento blok je volán pro všechny osy manipulátoru. Součástí je funkce pro restartování servodriveru, ke kterému je motor připojen. Blok je volán pro každý motor z programu „Axis_Control“.

6.1.3 Axis_control

Program obstarávající nadřazenou logiku pro jednotlivé motory. Pracuje hlavně se strukturou „stAxisControlSignals“ jednotlivých os, ve kterých se nachází řídicí instrukce. V další části je možné měnit rychlosti jednotlivých strojních os v procentech pomocí dvou bitů pro zesílení a zeslabení. Dále ošetřuje chybový stav motoru pro extruder tím, že zabráňuje jeho pohyb v případě, že topné těleso není dostatečně nahřáto pro pohyb. Nakonec programu je vloženo volání funkčního bloku „Axis_n_Control“ pro každou osu, která zajistí možnost řízení.

6.1.1 Homing

Homing funkce zajišťuje obnovení pozice enkodéru v případě její ztráty. Pro každou osu manipulátoru je provedena identifikace pozice zvlášť. Uvnitř funkce lze najít čtyři stavové automaty, které postupně pomocí implementovaného postupu identifikují aktuální pozici a najedou do pozice výchozí, kde je první a druhé rameno zarovnáno rovnoběžně s osou X. Třetí osa má výchozí pozici v nejvyšší možné bodě pod

limitním snímačem. Pozice čtvrté osy je zjištěna pomocí najetí na indukčnostní snímač, který je umístěn u převodovky.

6.1.1 Kinematic_transformation

Program obstarává funkcionality, které se týkají kinematické transformace. Řešení je rozděleno na dva režimy – manuální a automatický.

V manuálním režimu je prováděna inverzní úloha kinematiky, která požadované souřadnice v kartézské soustavě zadané uživatelem přepočte na úhly natočení a lineární posun pro jednotlivé motory. Je zde implementován učící algoritmus, který je schopen zapamatovat si až pět aktuálních pozic.

Automatický mód převede systém do interpolačního režimu a provádí strojní osy robotu, které jsou povolené pomocí „MC_Power“ s virtuálními osami, které reprezentují jednotlivé souřadnice kartézského systému. V tento moment není možné ovládat strojní osy jednotlivě, lze pouze využívat ovládání přes kartézské souřadnice. Aby

Mimo tyto dva režimy je v programu průběžně počítána přímá kinematická úloha pro zjištění aktuální pozice.

6.1.2 Interpolation

Program, který sestaví interpolační skupinu z virtuálních os a umožňuje interpolovat naučené body nebo předem definované souřadnice v programu. Tato práce se této části nevěnuje a podrobněji je popsána v práci Ing. Štípka [26].

6.1.3 F_CheckReqPosition

Jedná se o funkci, která provádí kontrolu nově požadovaných souřadnic manipulátoru v manuálním režimu kinematiky pro inverzní úlohu. Funkce zkontroluje, zda se požadované souřadnice nacházejí v pracovním prostoru. Pokud ano, je provedena inverzní úloha kinematiky. V opačném případě je vypočítána nová doporučená pozice, která je od požadovaného bodu co nejbližší limitní hranici pracovního prostoru. Tato operace se provádí pro první a druhou osu manipulátoru. Pro třetí translační osu Z jsou nastaveny limitní meze a v případě překročení je požadovaná pozice jimi přepsána. Čtvrtá osa, která zajišťuje rotační pohyb okolo osy Z není kontrolována. Pro takto upravené pozice je po odsouhlasení rovněž provedena inverzní úloha.

6.1.1 F_ControlPosition

Tato funkce navazuje na předchozí a provádí druhou kontrolu v manuálním režimu kinematiky. Je kontrolováno, zda se úhlová natočení nachází v pracovním prostoru a jestli je možné fyzicky provést daný pohyb. V pozitivním případě je manipulátor přesunut na tyto nové pozice. V negativním je úhlové natočení přepočteno tak, aby poloha byla fyzicky dostupná a robot tak nenajel na limitní pozice.

6.1.2 G_Code_Interpreter

Program implementující interpreter pro G-kód včetně úprav pro možnost 3D tisku. Pro aktivaci funkce je třeba být v automatickém režimu a mít sestavenou kinematickou skupinu.

6.1.3 CM_AI a CM_AO

Funkční bloky, které vykonávají převody mezi inženýrskými hodnotami a hodnotami z analogových terminálů. „CM_AI“ obsahuje funkci pro standardizaci a softwarový filtr hodnot z A/D převodníku. „CM_AO“ obstarává destandardizaci, tedy převod inženýrské hodnoty na analogový výstup.

6.1.4 Extruder

Program implementující logiku pro komponenty, které jsou součástí peletkového extruderu. Jedná se o zápis výkonu ventilátorů na výstup, automatické spínání ventilátoru těla extruderu, vyčítání teploty a regulaci topného tělesa. Program je volán ve svém vlastním tasku, který má interval cyklu 1 ms z důvodu použití funkce pro generování PWM signálu.

6.1.1 Error_reset

Program, který pomocí jednoho příkazu odstraní všechny případné chyby, které během běhu programu mohly nastat a uvede systém do opětovného startuschopného stavu.

6.2 Oprava chyb v převzatém kódu

Převzatý kód, který má tato práce dále upravovat a rozšiřovat obsahovala nemálo chyb a bylo tak nutné tyto nedostatky odstranit, aby při navazující práci nevznikaly chyby prohlubující problémy.

6.2.1 Režimy kinematické transformace

Na začátku programu „Kinematic_transformation“ dochází k přepínání mezi automatickým a manuálním režimem. Tato funkcionalita byla upravena tak, aby bylo zajištěno korektní přepínání mezi režimy s ošetřením, že systém se nemůže nacházet v obou režimech zároveň.

Ani jeden z těchto režimů však neplnil správně svou funkci. V případě manuálního režimu nedocházelo po požadavku na změnu pozice k žádné činnosti. Problémem bylo nekorektní rozpoznání ukončení procedury „Homing“, byly zde proto přidány podmínky, které rozpoznají konec programu a umožní tak uvést manuální režim do provozuschopného stavu. Automatický režim byl upraven tak, aby bylo možné při požadavku přejít do manuálního režimu a předtím tedy zničit vytvořenou interpolační skupinu. Z tohoto důvodu byl celý režim upraven a pomocí bitu „bKinGroup“ lze nyní měnit, zda má být v automatickém režimu vytvořena kinematická skupina pro

interpolaci a je tak umožněno bez potíží se přepínat v průběhu mezi režimy. Na konec programu byla přidána funkce „FB_KinResetGroup“, která umožní restartování kinematické skupiny v případě, že se při vykonávání pohybu v automatickém interpolačním režimu vyskytne chyba.

6.2.2 Oprava MC povelů pro motory

Ve funkčním bloku „Axis_n_Control“ bylo třeba upravit podmínky pro přechody mezi jednotlivými stavy ve stavovém automatu. Z tohoto důvodu docházelo k situacím, že nebylo možné korektně ovládat dle požadavků. Po úpravě je možné přecházet mezi stavy dle požadavků. Dále bylo potřeba upravit správné ukončení požadavků pro vykonání MC povelů, aby nedocházelo k případům, že manipulátor bude mít například neustále požadavek na vykonání absolutního pohybu a tím mu bude znemožněno zpracovávat další požadavky.

6.2.3 Úprava homing procedury

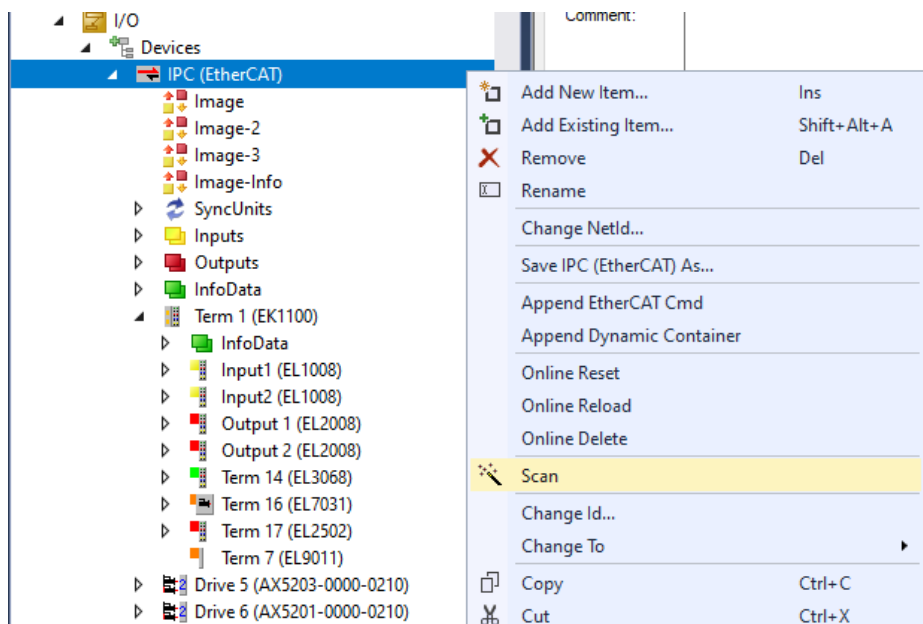
Funkce pro homing neměla možnost po prvním inicializačním vykonání provést znova tuto proceduru v případě potřeby. Program byl upraven tak, aby bylo možné provést proceduru vždy, kdy se systém nenachází v automatickém režimu a je zbaven všech chybových hlášek viz kap. 6.9.

Do programu byla přidána operace, která zajistí, že manipulátor před spuštěním procedury nejprve pohne třetí osou (Z) o dva centimetry nahoru. Toto řešení bylo přidáno pro případ, kdy je nutné provést proceduru po zastavení 3D tisku a mohlo by dojít ke střetu s výtiskem.

6.3 HW konfigurace

6.3.1 Přidání terminálů

Pokud je potřeba provádět hardwarovou konfiguraci a přidávat nové terminály, je zapotřebí v projektovém stromu jít do záložky I/O – Devices – EtherCAT – EK1100 a provést zde scan nových zařízení na sběrnici. Tato funkce je dostupná pouze v konfiguračním módu. Tímto způsobem byly do projektu přidány tři terminály.



Obrázek 6.1 Přidání nových terminálů do hardwarové konfigurace

6.3.2 Nastavení parametrů a linkování proměnných

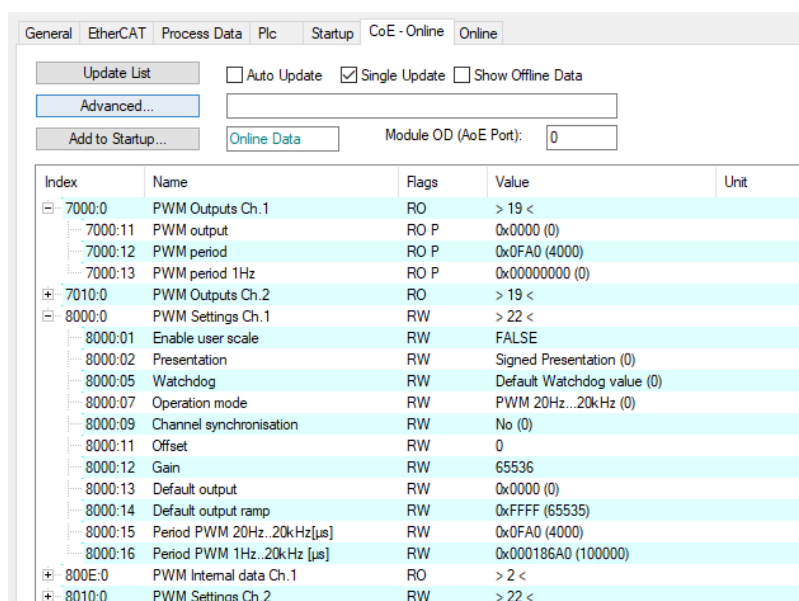
Pro získání dat ze vstupů nebo pro jejich zápis na výstupy terminálů, je nutné každému přiřadit patřičné proměnné, které budou mít požadovaná datový typ. Proměnné se definují do „Global Variable List“ a je potřeba dodržet požadovaný předpis:

$$\langle \text{Variable} \rangle \text{ AT } \% \langle \text{X} \rangle * : \langle \text{Data Type} \rangle ;$$

kde *Variable* určuje název proměnné, *X* je nahrazeno písmenem *I* v případě, že se jedná o vstupní proměnnou nebo *Q*, pokud se jedná o výstupní proměnnou. Místo *Data Type* je zvolen datový typ proměnné, např.: „BOOL“.

Po rozkliknutí některého z terminálů lze nalinkovat vytvořenou proměnnou na požadovaný parametr. V případě, že nelze příslušnou proměnnou nalézt, je nutné provést „Build“ projektu nebo aktivovat konfiguraci. Po těchto krocích by měl být projekt aktualizován a proměnná dostupná. Například analogová vstupní karta EL3068 a její první kanál je přiřazen proměnné, do které se ukládá analogová hodnota z teplotního snímače, která je poté přepočítána na inženýrskou hodnotu.

V případě, že je třeba nastavit parametry terminálu, je nutné, aby bylo zařízení připojené k napájení. Po rozkliknutí terminálu se zobrazí záložka „CoE(online)“. Zde je zapotřebí nastavit požadované parametry, dle druhu aplikace a připojených zařízení. Tyto parametry jsou přiřazeny pouze pro aktuální kartu. Pokud by bylo požadováno, aby zůstaly parametry uložené i v případě, že bude nutné vyměnit terminál za jiný, je vhodné definovat a nastavit parametry v záložce „Startup“. Zde lze parametry nastavovat i v případě, že je zařízení odpojené.



Obrázek 6.2 Nastavení CoE – Online parametrů pro terminál EL2502

6.4 Standardizace a destandardizace

Pro převod hodnot z A/D převodníku terminálu na inženýrské jednotky se používá procedura standardizace, která se řídí rovnicí

$$y = (MAX - MIN) \cdot \frac{x - k_1}{k_2 - k_1} + MIN, \quad (6.1)$$

kde MAX a MIN vyjadřují meze inženýrské hodnoty, na kterou chceme výstup z A/D převodníku převést. Veličiny k_1 a k_2 udávají rozsah A/D převodníku; x vyjadřuje aktuální hodnotu z převodníku a do veličiny y je ukládán převedený výsledek.

Po lehké úpravě této rovnice dostaneme obrácený proces, tedy rovnici pro destandardizaci (6.2), která umožní převést inženýrskou hodnotu na D/A převodník terminálu. Tímto způsobem je možné řídit regulační akční členy.

$$y = (k_2 - k_1) \cdot \frac{x - MIN}{MAX - MIN} + k_1 \quad (6.2)$$

Pro standardizaci i destandardizaci byly vytvořeny funkční bloky a je možné je volat v programu dle potřeby pro různá připojená zařízení.

Funkce pro standardizaci obsahuje kromě samotného převodu také filtr výstupní hodnoty, která ošetří lepší věrohodnost finální hodnoty. Tímto je systém bráněn před případnými nežádoucími zákmity. Tento filtr je implementován pomocí rovnice:

$$y = x_1 \cdot F + x_2, \quad (6.3)$$

kde x_1 je aktuální vypočtená inženýrská hodnota, F je filtr v rozsahu $<0;1>$ a x_2 je přechodná hodnota výstupu, která se přepisuje na konci funkce pro standardizaci.

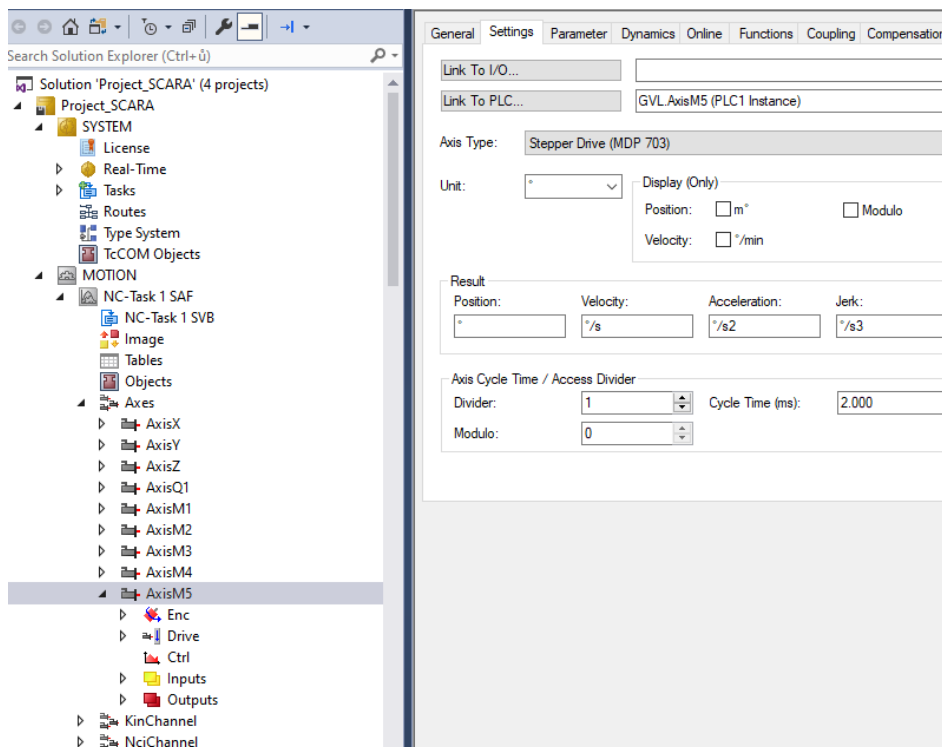
V obou funkcích je implementována funkcionalita, která v případě překročení maximálních limitních hodnot přepíše výstup na maximální nebo minimální povolenou hodnotu.

Následující kód zobrazuje způsob volání funkce pro destandardizaci.

```
//Vent1 - Body
PWM1 (
  AO_real_value:= GVL.Fan_Body_DC,
  AO_Max:= 32767,
  AO_Min:= 0,
  Scale_Max:= 100,
  Scale_Min:= 0,
  AO_raw_value=> GVL.PWM_FanBody);
```

6.5 Nastavení extruderu

Práce s motory vyžaduje vytvoření proměnné, která bude mít strukturu „AXIS_REF“. Dále je potřeba přidat novou osu do kategorie „Motion“ a nalinkovat na ni v záložce „Settings“ nově vytvořenou referenci na motor pro extruder. Na stejném místě je možné definovat, v jakých jednotkách má být pohyb os prezentován. Pro nastavení extruderu byl zachován výchozí úhel ve stupních.



Obrázek 6.3 Nově vytvořená osa pro extruder

V nastavení terminálu EL7031 bylo potřeba změnit parametry podle typu motoru, jak je uvedeno v tab. 6.1.

Tabulka 6.1 CoE parametry terminálu EL7031

Index	Název	Hodnota
8010:04	Motor coil resistance	180 [Ω]
8010:06	Motor fullsteps	200 [-]
8012:05	Speed range	16000 [Fullsteps/sec]

Dále byl přiřazen terminál k ose extrudéru. V části „Drive“ v dané ose byl pro linkování v záložce „NC-Drive“ přiřazen terminál. V části „Enc“ a záložce „NC-Encoder“ byl z důvodu absence enkodéru změněn typ na „Simulation encoder“. Pro nastavení dalších parametrů byly provedeny výpočty z nastavených CoE parametrů terminálu. Maximální rychlost byla vypočítána ze základní frekvence a frekvence motoru, pomocí vztahu:

$$\text{Maximum Velocity} = \frac{\text{base frequency}}{\text{motor frequency}} = \frac{16000}{200} = 80 \text{ rev/s} \quad (6.4)$$

Referenční rychlost je počítána pomocí maximální rychlosti a vzdálenosti, kterou je třeba urazit za jednu otáčku (360°).

$$\text{Ref. Vel.} = \text{max. vel.} \cdot \text{dist. per rev.} = 80 \cdot 360 = 28800 \text{ }^\circ/\text{s} \quad (6.5)$$

Tuto hodnotu bylo ale nutné upravit, protože použitý extruder obsahuje za krokovým motorem převodovku s převodovým poměrem 1:5,18.

$$\text{Reference Velocity} = \frac{\text{Ref. Vel.}}{\text{gear ratio}} = \frac{28800}{5,18} = 5559,84556 \text{ }^\circ/\text{s} \quad (6.6)$$

Další dva parametry byly nastaveny v záložce „Enc“. „Scaling Factor Denominator“ byl vypočten z potřebné vzdálenosti na jednu otáčku, počtu mikrokroků na jednu otáčku (vyhází z nastavení driveru - 64) a úhlu na jednu otáčku – $1,8^\circ$.

$$\text{Scal. Factor Denominator} = \frac{\text{dist. per rev.} \cdot \text{microsteps}}{\text{step angle}} = \frac{360 \cdot 64}{1,18} = 12800 \text{ INC./ot.} \quad (6.7)$$

„Scaling Factor Numerator“ je vypočten ze vzdálenosti na jednu otáčku a převodového poměru.

$$\text{Scal. Factor Numerator} = \frac{\text{dist. per rev.}}{\text{gear ration}} = \frac{360}{5,18} = 64,498 \text{ }^\circ/\text{ot.} \quad (6.8)$$

6.6 Řízení ventilátorů

Pro řízení ventilátorů byly nastaveny parametry terminálu EL2502. Rozsah výstupu je určen 16bitovým bez znaménkovým integerem. Z tohoto důvodu je 100 % duty cycle reprezentován hodnotou 0xFFFF. Tento rozsah byl zadán do rovnice pro destandardizaci a v programu je již dále měněn pouze výkon (duty cycle) v procentech.

Perioda signálu je 250 Hz, tato hodnota byla zvolena experimentálně a funguje spolehlivě pro oba typy ventilátorů. Při vyšších frekvencích a nižším výkonu nebyly ventilátory schopny se samovolně roztočit.

Podrobná konfigurace použité karty EL2502 pro oba kanály je zobrazena v tab. 6.2. Na první kanál byl připojen ventilátor pro tiskovou hlavu a na druhý ventilátor vrstev.

Tabulka 6.2 Důležité CoE parametry terminálu EL2502

Index	Název	Hodnota
8000:02 (Ch.1)	Presentation	Unsigned Presentation
8000:07 (Ch.1)	Operation mode	PWM 20Hz...20kHz
8000:15 (Ch.1)	PWM period	4000 [μs]
8010:02 (Ch.2)	Presentation	Unsigned Presentation
8010:07 (Ch.2)	Operation mode	PWM 20Hz...20kHz
8010:15 (Ch.2)	PWM period	4000 [μs]

6.7 Regulace teploty tiskové trysky

Z důvodu použití kombinace digitálního výstupního terminálu EL2008 a Mosfet modulu HA210N06 byla softwarově vytvořena PWM funkce, která do modulu posílá řídicí signály pro regulaci topného tělesa.

Pro takovéto řízení byl vytvořen nový milisekundový task a k němu přiřazen program „Extruder“, ve kterém je volána funkce „FB_CTRL_PWM_OUT“. Funkce má periodu 100 ms a je možné nastavovat duty cycle. To znamená, že pomocí hodnoty v proměnné „PWM_Value_Hotend“ lze nastavit v procentech, jak dlouho má být výstup sepnut a jak dlouho vypnut.

```
//Mosfet - HotEnd
stParams_Hotend.tPWMPeriod := T#100MS;
stParams_Hotend.tTaskCycleTime := T#1MS;
eMode_Hotend := eCTRL_MODE_ACTIVE;

PWM_Hotend(
  fPwmInput := GVL.PWM_Value_Hotend,
  eMode := eMode_Hotend,
  bPwmOutBitPos => GVL.OutputCard[2],
  eErrorId => ErrID_Hotend,
  bError => berror_Hotend,
  stParams := stParams_Hotend);
```

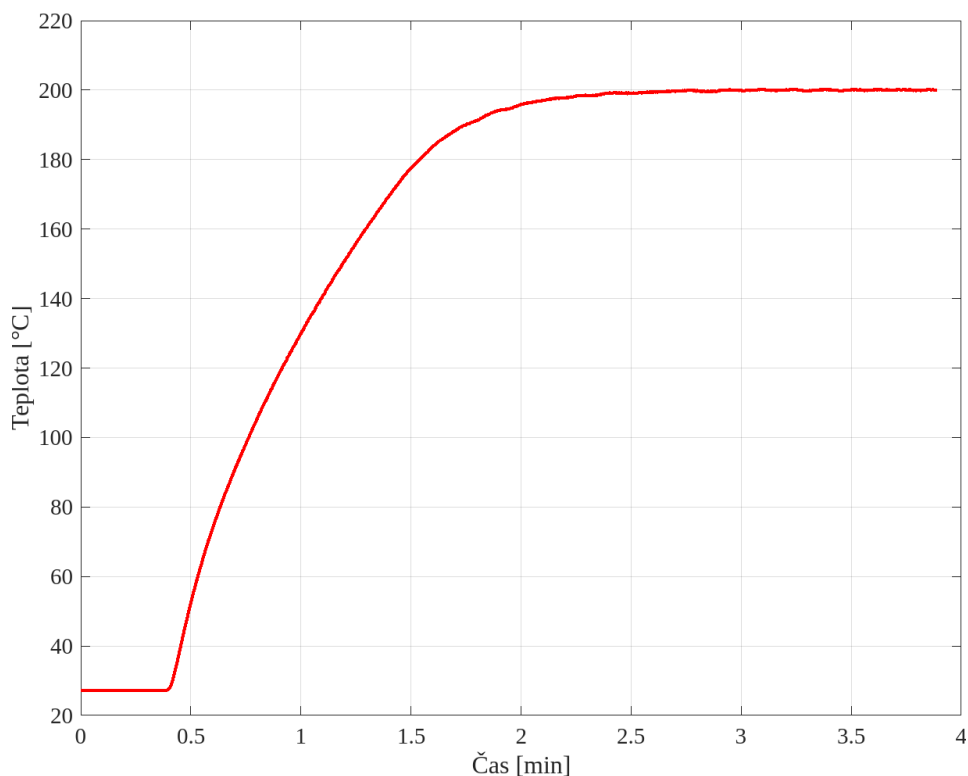
Pro regulaci výkonu ohřevu byl použit PID regulátor, pro který byly jednotlivé složky nastaveny experimentálně tak, aby co nejlépe dokázaly regulovat na požadovanou hodnotu bez kmitání. Nastavené parametry lze vidět v následující části kódu. Pro uživatele je podstatná pouze proměnná „Hotend_SP“, do které se nastavuje buď ručně, nebo automaticky v případě G-kód interpreteru požadovaná teplota. Funkce

vrací hodnotu výkonu v procentech, která je čtena výše zmíněnou funkcí pro řízení PWM signálu.

```
//Parameters for PID
stParams_Hotend_PID.tCtrlCycleTime := T#1MS;
stParams_Hotend_PID.tTaskCycleTime := T#1MS;
stParams_Hotend_PID.fKp := 20.0;
stParams_Hotend_PID.tTn := T#20S;
stParams_Hotend_PID.tTv := T#2S;
stParams_Hotend_PID.tTd := T#500MS;
stParams_Hotend_PID.fOutMaxLimit := 100;
stParams_Hotend_PID.fOutMinLimit := 0;
stParams_Hotend_PID.bPInTheFeedbackPath := TRUE;
stParams_Hotend_PID.bDInTheFeedbackPath := TRUE;

PID_Hotend(
    fSetpointValue:= GVL.Hotend_SP,
    fActualValue:= GVL.Temp_hotend,
    fManSyncValue:= 0,
    bSync:= FALSE,
    eMode:= eCTRL_MODE_ACTIVE,
    bHold:= FALSE,
    fOut=> GVL.PWM_Value_Hotend,
    bARWactive=> ,
    eState=> ,
    eErrorId=> ,
    bError=> ,
    stParams:= stParams_Hotend_PID);
```

Na obr. 6.4 je zobrazena závislost teploty topného tělesa na čase pro požadovanou hodnotu 200 °C. Regulátor této hodnoty dosáhl bez překmitů a při běhu programu je schopen se pohybovat na ustálené úrovni bez viditelného kmitání.



Obrázek 6.4 Charakteristika zahřívání topného tělesa

6.8 Implementace G-kód interpreteru

K implementaci interpreteru jsou zapotřebí funkční bloky z knihovny „Tc2_NCI“. Ty umožňují konfiguraci interpolační skupiny a ovládání interpreteru. Pomocí této knihovny je možné například vytvořit 3D skupinu nebo načíst a spustit NC úlohu. G-kód interpreter je implementován dle normy DIN 66025, která udává strukturu a obsah.

Nejprve je třeba nahrát vytvořený „.nc“ soubor obsahující G-kód do správné složky, odkud se při vykonávání vyčte. Ta se nachází na IPC a cesta k ní je přes „C:\TwinCAT\MC\Nci“. Pro jednoduchost ovládání byla vytvořena vizualizace, ve které je možné jednoduše nový G-kód nahrát nebo načíst. Podrobnější popis se nachází v kap. 6.12.

Před spuštěním interpreteru je nutné povolit automatický mód a sestavit kinematickou skupinu pro kartézský souřadnicový systém. Vytvoření skupiny je signalizováno bitem „bInterpolationEnabled“.

Samotný interpreter je povolen v případě, že přijde požadavek na spuštění a je povolena interpolace. V tento moment je spuštěn stavový automat viz obr. 6.6, je vynulována pozice extruderu a je sestavena interpolační skupina pomocí funkce „CfgBuildExt3DGroup“. Skupina je vytvořena ze tří virtuálních os X, Y, Z a extruderu, který je přiřazen do pomocné osy s indexem Q2. Následuje načtení G-kód souboru ze

zvoleného adresáře pomocí funkce „ItpLoadProgEx“. Dále je provedena kontrola, je-li interpreter ve stavu „Ready“, tedy připraven. Toho je dosaženo pomocí funkce „ItpGetStateInterpreter“, která vyčítá stav z reference „stNCI_NCTOPLC_NCICHANNEL_REF“. V této proměnné se nachází informace z interpolační skupiny, které se přenáší do PLC programu. Tímto se povolení spuštění programu a je zavolána funkce „ItpStartStopEx“. Je provedena další kontrola stavu interpreteru, která hlídá, že se alespoň na chvíli se nenachází ve stavu „Ready“ a posunuje se dál ve stavovém automatu. Tímto je zajištěno, že program neskončí dřív, než začne, jelikož následující podmínka v dalším stavu, která hlídá konec programu, také sleduje, je-li interpreter připraven. Po skončení vykonávání G-kódu je zničena interpolační skupina, vypnut ventilátor vrstev, nastavena teplota trysky na nulu a je program dokončen.

Během vykonávání programu je možné aktuálně vykonávaný G-kód pozastavit nebo úplně vypnout pomocí funkce „ItpEStopEx“. Funkce je pro oba režimy stejná, avšak po vyvolání příkazu pro pauzu je možné znova program spustit pomocí funkce pro pokračování „ItpStepOnAfterEStopEx“. Při vyvolání požadavku na předčasné ukončení, je program přerušen a převeden do stavu, který zajistí korektní ukončení, jako při běžném dokončení.

Pokud se v průběhu programu vyskytne chyba, je interpreter pozastaven a dojde k vypnutí topného tělesa a ventilátoru vrstev. Pro odstranění chyby je buď možné resetovat interpreter pomocí funkce „ItpResetEx2“, nebo dát příkaz k zastavení vykonávání G-kódu.

V tabulce 6.3 jsou vyjmenovány implementované a vyzkoušené příkazy pro interpreter. Pokud není některá z funkcí implementována, je zapotřebí následně v požadovaném G-kódu tyto instrukce nahradit nebo odstranit.

Tabulka 6.3 Implementované a použité G-kódy

G-kód	Popis
G1	Posuv po přímce
G2	Pohyb po oblouku ve směru hodinových ručiček
G3	Pohyb po oblouku proti směru hodinových ručiček

Požadavek na vykonání M-funkce během programu je vyhodnocen na základě stavu proměnné „HskMFuncReq“. Ta je součástí reference na strukturu „stNCI_NCTOPLC_NCICHANNEL_REF“. Ve stejné struktuře se nachází proměnná „HskMFuncNo“, která vyčte konkrétní požadovanou M-funkci. Ve stavovém automatu jsou pak jednotlivé funkce implementovány. Po úspěšném vykonání požadavku je nastaven bit „bConfirmHsk“, který spouští „ItpConfirmHsk“ funkci potvrzující korektní vykonání požadavku a možnost pokračovat ve vykonávání G-kódu. V případě, že společně s M-funkcí přichází požadavek na nastavení určité hodnoty v podobě

„S“ parametru, je nastaven skok ze stavového automatu M-funkcí do stavového automatu pro nastavování „S“ parametru.

Je potřebné vědět, které M-funkce se mohou v generovaném G-kódu vyskytovat. Dále je implementován stav, který ošetřuje případ výskytu neznámé M-funkce a který udává, co se má v tomto případě dít.

Při nastavování teploty trysky je program schopen pokračovat až v moment, kdy je tryska zahřáta na požadovanou teplotu, čímž je zabráněno potenciálnímu poškození extruderu při pokusu o vytlačování materiálu s nízkou teplotou.

```
IF gvl.stNCI_NCTOPLC_NCICHANNEL_REF.HskMFuncReq = 1 OR
(ItpIsHskMFunc(gvl.stNCI_NCTOPLC_NCICHANNEL_REF) AND
NOT fbConfirmHsk.bBusy) THEN
    CASE gvl.stNCI_NCTOPLC_NCICHANNEL_REF.HskMFuncNo OF
        30: ; //Program end with deletion of all fast M functions
            GVL.Fan_Body_DC := 0;
            bConfirmHsk := TRUE;
        104: ; //Set the nozzle temperature
            GVL.M_function_OLD := 104;
        106: ; //Turn ON Fan
            GVL.M_function_OLD := 106;
        107: ; //Turn OFF Fan
            GVL.Fan_Layer_DC := 0;
            bConfirmHsk := TRUE;
    ELSE
        bConfirmHsk := TRUE;
    END_CASE
END_IF

fbConfirmHsk(
bExecute:=bConfirmHsk,
sNciToPlc:=gvl.stNCI_NCTOPLC_NCICHANNEL_REF,
sPlcToNci:=gvl.stNCI_PLCTONC_NCICHANNEL_REF,
bBusy=> ,
bErr=> ,
nErrId=> );
bConfirmHsk := FALSE;

CASE GVL.M_function_OLD OF
    104: ;
        GVL.Hotend_SP:=gvl.stNCI_NCTOPLC_NCICHANNEL_REF.SpindleRpm;
        IF GVL.Hotend_SP = 0 THEN
            GVL.Hotend_SP := 0;
            GVL.M_function_OLD := 0;
        ELSIF GVL.Temp_hotend >= (GVL.Hotend_SP - 5) THEN
            GVL.M_function_OLD := 0;
            bConfirmHsk := TRUE;
        END_IF
    106: ; //Turn ON Fan
        GVL.Fan_Layer_DC:=
(100*UDINT_TO_REAL(gvl.stNCI_NCTOPLC_NCICHANNEL_REF.SpindleRpm))/255;
        GVL.M_function_OLD := 0;
        bConfirmHsk := TRUE;
END_CASE
```

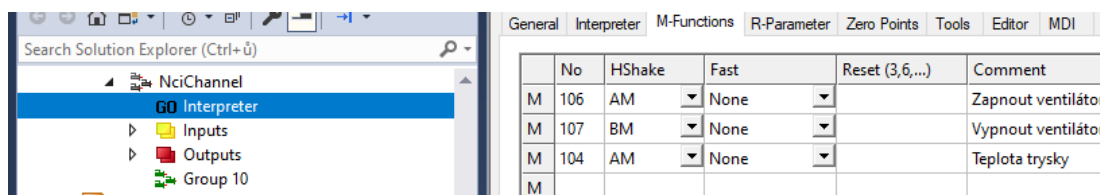
Tabulka 6.4 Použité M-funkce

M-funkce	Popis	S parametr
M30	Konec programu	Ne
M104	Nastaví požadovanou teplotu trysky	Ano
M106	Zapnout ventilátor vrstev s požadovanou rychlostí	Ano
M107	Vypnout ventilátor vrstev	Ne

Jednotlivé M-funkce byly definovány v sekci „Motion“ a záložce „NciChannel“. V tab. 6.4 se nachází seznam používaných M-funkcí. Některé z nich jsou rezervovány systémem a bylo zapotřebí nahlédnout do knihovny, o které se jedná. V tomto případě byla důležitá hlavně M30, která ukončuje program a vypíná všechny M-funkce spuštěné v průběhu. Mimo tyto indexy je možné zvolit libovolné číslo a tím definovat několik M-funkcí (až 157), které jsou potřeba. Při definování M-funkcí bylo důležité správně nastavit parametr „HShake“, který určuje, je-li nutné čekat na potvrzení o vykonání dané funkce. Je možné nastavit tři režimy:

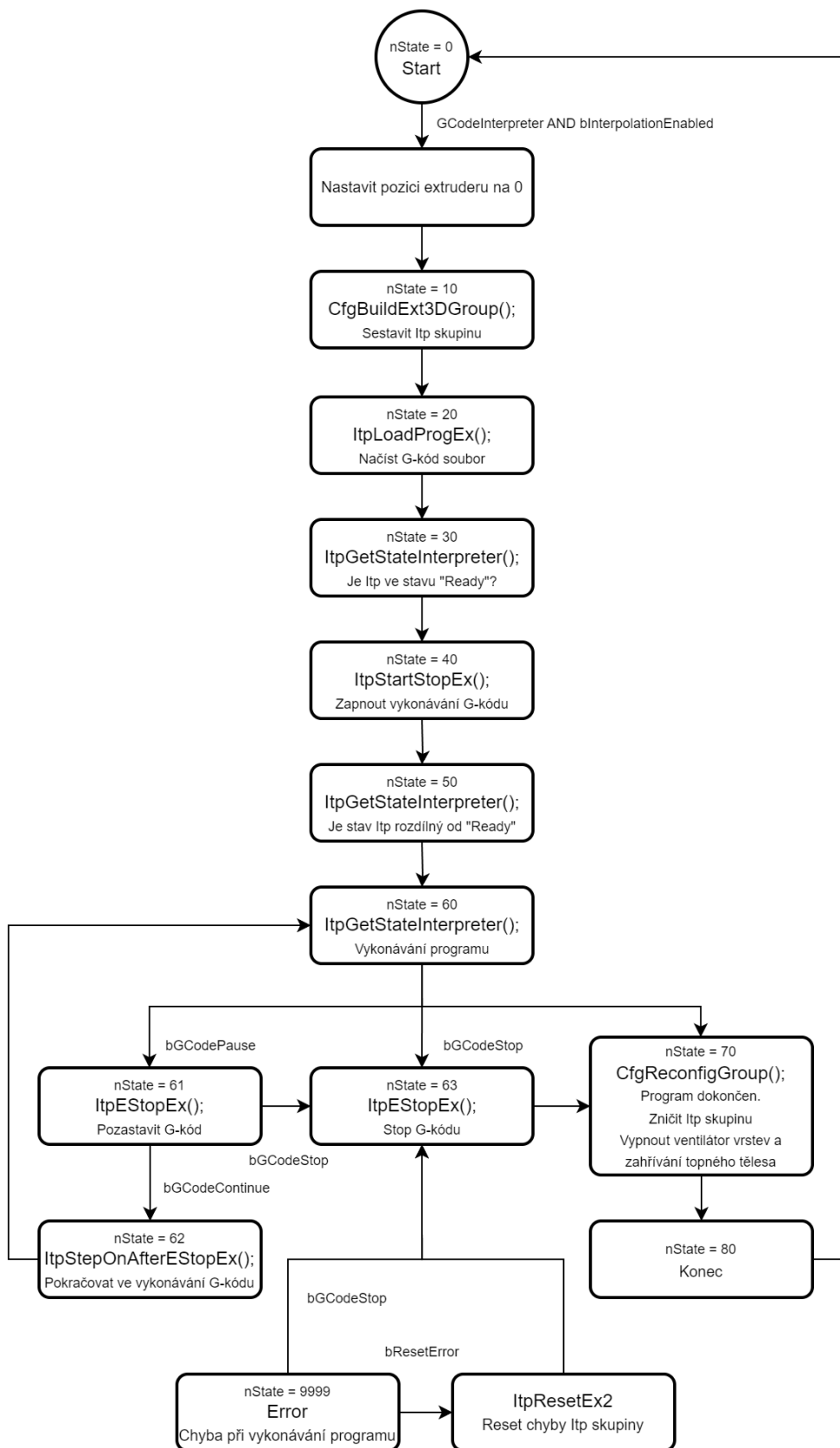
- None: Potvrzení o vykonání není potřeba
- BM: Potvrzení přichází před vykonáním úkonu
- AM: Potvrzení přichází po vykonání úkonu

Pokud daná M-funkce vyžaduje nastavování parametru, je potřeba zvolit mód AM.



Obrázek 6.5 Definování M-Funkcí

Ve stejném programu jsou navíc vyčítány a ukládány aktuální nastavené rychlosti a aktuálně vykonávaný řádek, ten však nabývá hodnoty pouze v případě, že každý řádek je označen za pomocí „Nxx“. Tyto parametry jsou nyní vyčítány pouze pro informativní účely, avšak mohly by být využity v případě potřeby pro pokračování zastaveného kódu, například z důvodu výskytu chyby při tisku, která by znemožňovala další pohyb.



Obrázek 6.6 Stavový automat G-kód interpretu

6.9 Odstranění chyb vzniklých v průběhu

Při běhu manipulátoru může dojít k situaci, která vyvolá chybu na zařízení. Z tohoto důvodu je vhodné, aby program obsahoval funkci, která by umožnila manipulátoru se bez nutnosti celkového restartu zařízení dostat z chybového stavu.

Pokud jednotlivé osy manipulátoru nejsou součástí kinematické nebo interpolační skupiny, je možné použít standardní funkci pro resetování motoru „MC_Reset“ a opětovně jej povolit pomocí „MC_Power“.

Ve většině případů jsou však osy součástí skupin. Pokud se vyskytne chyba, automaticky přechází celá skupina do chybového stavu a je tak potřeba provést reset všech os. Je ale nutné brát v potaz, že dokud je vytvořená skupina aktivní, není možné (z důvodu hierarchie ovládání) používat MC funkce pro správu os. Správný postup je zrušit vytvořené skupiny tak, jak byly vytvořeny a v moment, kdy jsou všechny osy osamocené, provést hromadný reset.

Další překážkou při odstraňování chyb může být chyba, která vyvolá chybový stav přímo na některém ze servodriverů. V takovémto případě není možné použít jakoukoliv MC funkci ani tehdy, kdy byly zrušeny všechny skupiny a osa je osamocená. Jako první je třeba provést restart servodriveru pomocí funkčního bloku „FB_SoEReset“, který byl přidán do programu „Axis_n_Control“ a až poté zavolat funkci pro reset motoru.

Z těchto důvodů byl vytvořen program „Error_reset“, který implementuje logiku, která zajistí postupné zrušení vytvořených skupin na základě zpětných hlášek o aktivním stavu. Automaticky provede reset servodriverů, kinematické skupiny a převede osy do stop stavu. Program je možné spustit pomocí proměnné „Reset_all_errors“ a na uživateli zůstává následné restartování motorů a jejich opětovné spuštění za použití MC funkcí.

6.10 Ošetření nežádoucích situací

Během vykonávání G-kódu (i mimo něj) může nastat několik problému, kvůli kterým by se systém mohl poškodit. Z tohoto důvodu byly do programu vloženy operace, které tyto situace ošetřují.

Aby nedošlo k přehřívání těla extruderu, je ventilátor těla extruderu spínán automaticky na základě aktuální teploty trysky. Spínání je odstupňováno a pro každou úroveň je nastaven jiný výkon. Aby bylo spínání při přechodu mezi stupni plynulé a nedocházelo k neustálému přepínání výkonu na dané mezi, je implementována teplotní hystereze.

Je zapotřebí zablokovat pohyb motoru extruderu v případě, že tryska není dostatečně zahřáta. Dále je detekováno, je-li motor v pohybu – to je možné pomocí funkce „MC_ReadStatus“. Pokud se zobrazí status „Moving“ a teplota trysky je nižší než požadovaná, je motoru zabráněn pohyb. Pro vypnutí pohybu je zjištěno, jestli je motor součástí skupiny aktivního G-kód interpretu. Tím je zabráněno vykonávání G-kódu

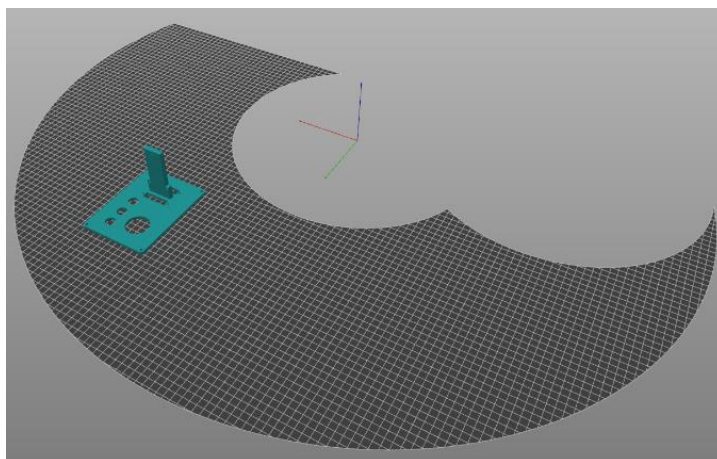
a je nastaven povel pro ukončení interpreteru. Pokud motor není součástí skupiny, je vyslán povel pro zastavení. Stejný postup řešení platí i pro případ, že data z teplotního snímače nejsou validní. To lze zjistit tak, že teplota trysky nevzrostla za posledních 30 sekund nad minimální nastavenou hranici 50 °C.

Pokud dojde ke ztrátě polohy z enkodéru, je při spuštění programu „Homing“ nejdříve provedena akce, která osu Z posune směrem nahoru o 20 mm. Bez tohoto opatření by mohlo dojít ke střetu s výtiskem.

6.11 Příprava G-kódu pro manipulátor

Pro vytvoření G-kódu z STL formátu byl použit PrusaSlicer, ve kterém je možné nadefinovat parametry pro vlastní tiskárnu podle reálné konfigurace. Lze přesně určit pracovní plochu, ve které je možné objekt tisknout. Tato plocha se odvíjí od limitních parametrů robotu viz kap. 3.4 a rozměrů stolu, ke kterému je manipulátor připevněn.

Pro nastavení vlastního tvaru tiskové plochy bylo třeba vytvořit v CAD systému 3D model s definovanými rozměry dle skutečných a limitních hodnot. Model byl vyexportován do formátu STL a vložen v záložce nastavení tiskárny do tvaru tiskové podložky.



Obrázek 6.7 Vyhrazená tisková plocha v PrusaSliceru

Aby výsledný produkt dosahoval co nejlepších výsledků, byly upraveny parametry v jednotlivých sekcích. V tab. 6.5, 6.6 a 6.7 jsou vyjmenovány ty nejdůležitější, které mají na výtisk největší vliv.

V sekci nastavení tiskárny bylo nastaveno odsazení osy Z. To bylo stanoveno experimentálně v manuálním režimu. Manipulátor bylo zapotřebí dostat nad tiskovou plochu a vysunout osu Z do výšky, kdy se koncový efektor s tiskovou hlavou téměř dotýkal tiskové plochy. V tento moment bylo možné odečíst pozici a uložit ji do nastavení.

Ve stejné kategorii bylo třeba zvolit správný druh G-kódu, jedná se o jeden z nejdůležitějších parametrů pro systém. Aby bylo možné vybrat správný druh, bylo

třeba definovat, jaký způsob kódování a syntaxe je pro systém přijatelný. V tomto případě bylo důležité, aby byl pro každou osu definován stejný druh pohybu, a to absolutní. Není totiž možné, aby se například extruder pohyboval v relativních souřadnicích a zbytek systému v absolutních. Dále bylo třeba zamyslet se nad použitelnými G-kódy, jelikož v knihovních funkcích pro interpreter nejsou všechny funkce implementovány. Největší problémem byla funkce G92, která nastavuje pozici dle potřeby. Ve většině druhů se používá pro resetování pozice extruderu na nulu. Tento příkaz však není implementován, a tudíž bylo zapotřebí se této funkce zbavit a pokusit se najít druh G-kódu, který tuto funkci nebude používat a zmíněnou funkcionalitu bude řešit jiným, pro tento systém přijatelnějším způsobem. Z tohoto důvodu bylo zapotřebí změnit výchozí druh „RepRap/Sprinter“. Z dostupných druhů se nabízely tyto tři:

- Sailfish (MakerBot)
- MakerWare (MakerBot)
- Mach3/LinuxCNC

Nejvíce vyhovující a pro systém použitý se stal druh „Sailfish“, který negeneruje příkaz G92 a nastavuje pozici způsobem neustálého zvyšování absolutní pozice, na kterou má extruder dojet.

V podkategorii „Vlastní G-code“ bylo možné upravit výsledný kód dle potřeby. Bylo využito možnosti přidání příkazů na začátek a konec G-kódu. Na začátek i konec byla vložena funkce pro lineární pohyb G1, která dostane manipulátor do výchozí pozice. Na konec byla navíc přidána funkce M104 s parametrem S0, která nastaví požadovanou teplotu topného tělesa na nulu a tím zastaví regulaci.

Další nastavené parametry v kategorii „Nastavení tiskárny“ jsou vyjmenovány v tab. 6.5.

Tabulka 6.5 Parametry nastavení tiskárny

Nastavení tiskárny	
Obecné	Hodnota
Odsazení Z	-154,85 mm
Druh G-code	Sailfish (MakerBot)
Vlastní G-code	Hodnota
Začátek G-code	G1 X200 Y150 Z-20 F3600 M106 S255
Konec G-code	M104 S0 G1 X200 Y150 Z-20 F3600 M106 S0
Extruder 1	Hodnota
Průměr trysky	0,8 mm
Vzdálenost retrakce	25 mm
Rychlost retrakce	50 mm/s

V nastavení filamentu bylo důležité nastavit parametr násobič extruze. Jedná se o parametr, který dokáže významně změnit kvalitu výtisku. Tento faktor mění množství průtoku taveniny polymeru.

Rovněž bylo důležité zvolit požadovanou teplotu trysky pro první a ostatní vrstvy tisku. Tato teplota se odvíjí od druhu použitého materiálu. Pro PLA byla teplota nastavena na 200 °C, v případě ABS na 240 °C. Tyto dva materiály byly k dispozici pro testování. Tyto teploty jsou většinou udávány výrobcem daného granulátu.

Tabulka 6.6 Parametry nastavení filamentu

Nastavení filamentu	
Filament	Hodnota
Násobič extruze	4,8
Tryska	(dle použitého materiálu) °C

Sekce nastavení tisku byla velice obsáhlá. V tab. 6.7 lze najít ty nejdůležitější parametry, které byly nastaveny. Při nastavování maximální rychlosti tisku bylo nutné brát ohled na limitní vlastnosti celé sestavy. V tomto případě je největším omezením extruder, který je schopen tisknout maximální rychlostí 60 mm/s. Pokud by tato rychlost byla překročena, mohlo by docházet k chybám v tisku, konkrétně k nedostatečnému průtoku taveniny. Díky možnosti zvolit tisk vnějších parametrů přednostně je konečný výtisk esteticky hezčí. Minimální délka extruze filamentu zajistí, že manipulátor vytiskne okolo objektu obrys, díky kterému se připraví na tisk. Tímto způsobem dojde k dotečení filamentu až na konec trysky a tisková hlava je tak po tomto kroku schopna podávat filament okamžitě bez přerušení. Aby byl výtisk hladký i v kruhových trajektoriích bylo nutné povolit příkazy G2/3, bez nich by totiž pohyb byl rozdělen do menších lineárních trajektorií a výsledek by tak nebyl hladký. Také by docházelo ke zpomalení tisku. Mimo tyto parametry lze v této kategorii také najít nastavení pro výplň, límec, podpěry a další.

Tabulka 6.7 Parametry nastavení tisku

Nastavení tisku	
Vrstvy a perimetry	Hodnota
Výška vrstvy	0,45 mm
Nejprve tisknout vnější perimetry	Ano
Obrys a límec	Hodnota
Minimální délka extruze filamentu	250 mm
Rychlost	Hodnota
Maximální rychlost tisku	15 mm/s
Pokročilé	Hodnota

Jak již bylo zmíněno, některé funkce G-kódu není možné implementovat. Ve stejné kategorii bylo umožněno vyhledat ve vygenerovaném kódu potřebný znak a nahradit jej dle potřeby. Jak je patrné z obr. 6.8, příkazy budou nahrazeny pomocí „//“. Takto bude zakomentován daný řádek. To samé platí i pro nepoužité M-funkce.

Mezi nahrazenými znaky je i osa pro extruder „E“. Tento znak se nahradí osou podle toho, k jaké pomocné ose při vytváření interpolační skupiny extrudér přiřazen. Zde se jedná o „Q2=“.

Ostatní

● Nahrazení G-codu: 🔒 ➕ Přidat ✖ Smazat vše

Najít	Nahradit
E <input type="checkbox"/> Regulární výraz <input type="checkbox"/> Nerozlišovat malá a velká písmena <input type="checkbox"/> Celé slovo	Q2=
: <input type="checkbox"/> Regulární výraz <input type="checkbox"/> Nerozlišovat malá a velká písmena <input type="checkbox"/> Celé slovo	//
M73 <input type="checkbox"/> Regulární výraz <input type="checkbox"/> Nerozlišovat malá a velká písmena <input type="checkbox"/> Celé slovo	//
G21 <input type="checkbox"/> Regulární výraz <input type="checkbox"/> Nerozlišovat malá a velká písmena <input type="checkbox"/> Celé slovo	//
G90 <input type="checkbox"/> Regulární výraz <input type="checkbox"/> Nerozlišovat malá a velká písmena <input type="checkbox"/> Celé slovo	//
M127 <input type="checkbox"/> Regulární výraz <input type="checkbox"/> Nerozlišovat malá a velká písmena <input type="checkbox"/> Celé slovo	//

Obrázek 6.8 Ladění extruze a parametrů pro 3D tisk

Po umístění předmětu na tiskovou plochu a nastavení parametrů je potřeba exportovat G-kód. Takto uložený soubor je potřeba ještě upravit. Pomocí libovolného textového editoru je nutné z kódu odstranit vygenerované komentáře, které se nachází pouze na jeho začátku a konci. Tyto komentáře začínají znakem „;“. Poté je nutné převést soubor do formátu „.nc“.

Vzhledem k rozsáhlosti možnosti nastavení parametrů bylo uživatelské nastavení pro SCARA uloženo a přidáno do elektronických příloh.

6.11.1 Ladění parametrů tisku

Ladění parametrů je při tisku velice důležité, pokud je třeba dojít k co nejlepšímu výsledku. Vzhledem k velkému množství parametrů, které lze ve sliceru nastavit, může být z počátku náročné přijít na to, který parametr je třeba upravit. Během tisku může dojít k několika problémům, jako jsou: nedostatečná extruze, špatně nastavené odsazení, díky kterému dojde k nepřilepení materiálu na tiskovou plochu nebo nevhodná výšky vrstev. Problémů, kterou mohou nastat při seřizování tiskárny je nespočet. Velkým problémem je také absence vyhřívané podložky, kvůli čemuž tištěný materiál nepřiléhá úplně dokonale a v průběhu tisku se může začít odlepovat. Z tohoto důvodu byla k tiskové ploše přilepena kaptonová páska, která byla vždy před tiskem zbavena nečistot

a byl na ni nanášen 3D lak, díky kterému se první vrstva výtisku lépe přichytila k povrchu.

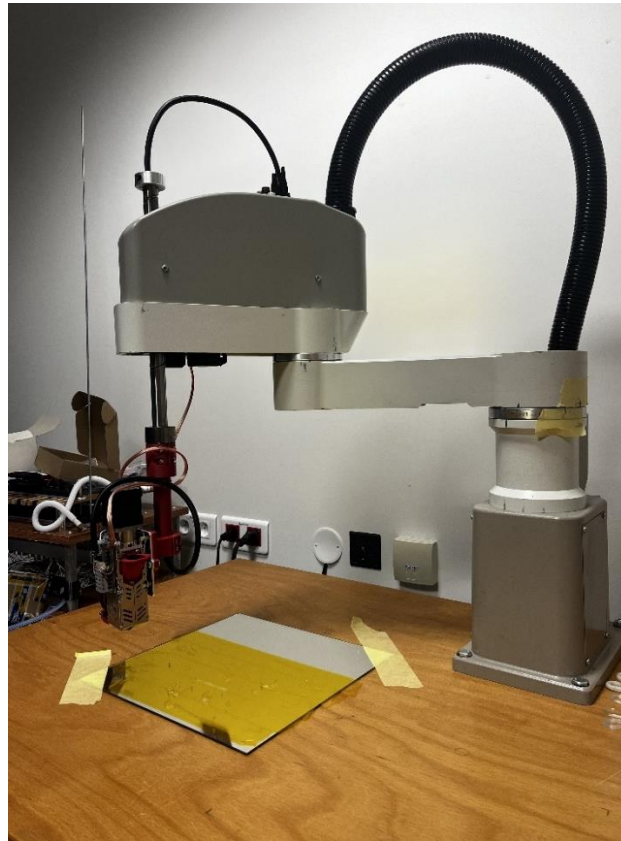
Na obr. 6.9 lze vidět, že výtisk na levé straně byl tištěn s nedostatečným průtokem filamentu, z tohoto důvodu bylo třeba upravit parametr „Násobič extruze“, který po změně na vyšší hodnotu dosahoval lepších výsledků, jak lze vidět na výtisku uprostřed. Dále si lze povšimnout nedokonalostí v podobě přetékaní materiálů přes obvodovou hranu a špatně nastavenou interpolaci v kruhové oblasti na prvních dvou výtiscích. Z tohoto důvodu bylo třeba povolit v „Nastavení tisku“ parametr přizpůsobení obloukem. Dále byl povolen parametr, který upřednostní tisknutí vnějších parametrů a zlepší tak vizuální stránku výtisku. Na posledním (pravém) výtisku je pak vidět výsledek po odladění parametrů tisku. Je důležité poznamenat, že i další parametry, které nebyly zmíněny, mohou být pro finální podobu a kvalitu výtisku klíčové.



Obrázek 6.9 Ladění extruze a parametrů pro 3D tisk

Rychlost tisku (z důvodu neustále trvajícího problému s rušením) bylo nutné omezit. V nižších rychlostech je manipulátor schopen pracovat delší dobu bez výpadku na enkodéru a ztráty pozice. Tento problém je prozatím největším úskalím, který brání v kontinuálním tisku.

Po odladění parametrů se výtisk přibližuje produktům z komerčních 3D tiskáren. Výtisky vynikaly (oproti běžnému tisku z tiskové struny) velice dobrou pevností. Díky konstrukčním vlastnostem manipulátoru bude možné tisknout předměty větších rozměrů.



Obrázek 6.10 Výsledná testovací souprava

6.12 Vizualizace

Pro jednodušší ovládání byla implementována vizualizace, přes kterou je umožněno systém ovládat, bez nutnosti používat vývojové prostředí. Vizualizace byla implementována v předchozích pracích a je tudíž potřebné ji změnit podle upravených a nových funkcionalit.

Vizualizace je možné vytvářet díky rozšíření „TwinCAT HMI Engineering“, které nabízí grafické prostředí pro úpravu. Aby bylo obsluze umožněno používat ovládací rozhraní, je potřeba instalovat na IPC HMI server. I když byl HMI server v předchozích pracích zprovozněn, z neznámých důvodů se na IPC nenacházel. Bylo tedy třeba znova provést instalaci rozšiřujícího balíčku TF2000. Po provedení konfigurace, povolení portů, je umožněno nahrání vizualizace pomocí příkazu „Publish to Server“. K vizualizaci se lze připojit přes webové rozhraní přímo na IPC pomocí IP adresy 127.0.0.1:1010 nebo přes vlastní zařízení, pokud se nachází ve stejné síti přes adresu 10.0.100.50:1010.

Obrazovka (viz obr. 6.11) byla přidána z důvodu absence základního ovládání strojních os a extruderu. V levé sekci se nachází příkazy, pomocí kterých je možné ovládat všechny osy najednou, včetně tlačítka pro provedení procedury „Homing“

a resetování chyb nebo servodriverů. Pravá část implementuje základní operace pro každou z os zvlášť. Pro používání těchto příkazů, je třeba, jak již bylo zmíněno, nacházet se mimo interpolační a automatický režim.



Obrázek 6.11 Obrazovka pro základní ovládání os (AxisControl)

V okně pro manuální režim byly provedeny změny oproti původnímu řešení. Byl odstraněn povel pro homing, který byl přesunut na předchozí obrazovku a byly opraveny povely pro ovládání pohybu jednotlivých os. Po kliknutí na některý z motorů se v okénku nalevo zobrazí jeho aktuální stav a pozice. Dále je umožněno určit relativní a absolutní pozice pro posun anebo využít tlačítek „Jog +“ a „Jog –“ pro okamžitý pohyb. V dolní liště je možné měnit rychlosti os a v pravém horním rohu povolovat automatický kinematický režim.



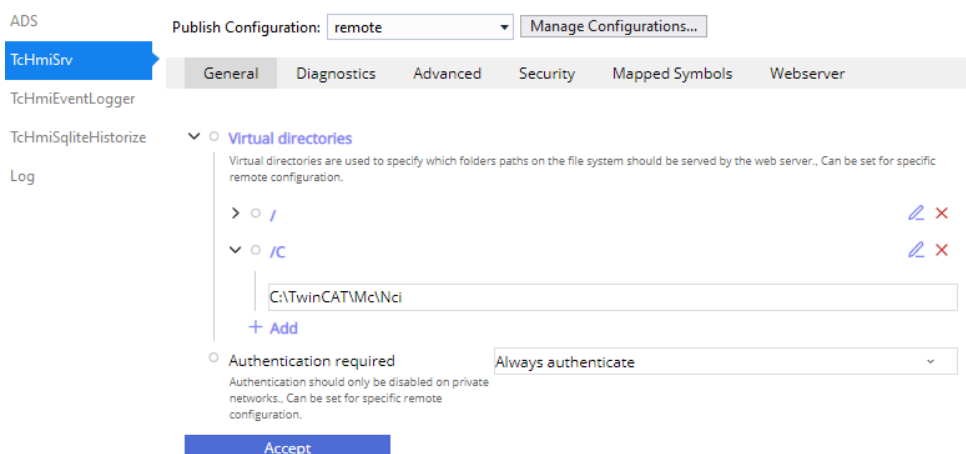
Obrázek 6.12 Obrazovka pro manuální režim (ManualMode)

Obrazovka „AutomaticMode“ byla vytvořena pro povolení automatického režimu, sestavení kinematické skupiny (povolení interpolace) a ovládání manipulátoru v kartézském souřadnicovém systému včetně zobrazení aktuálních pozic. Součástí je tlačítko, které umožní resetování kinematické skupiny.



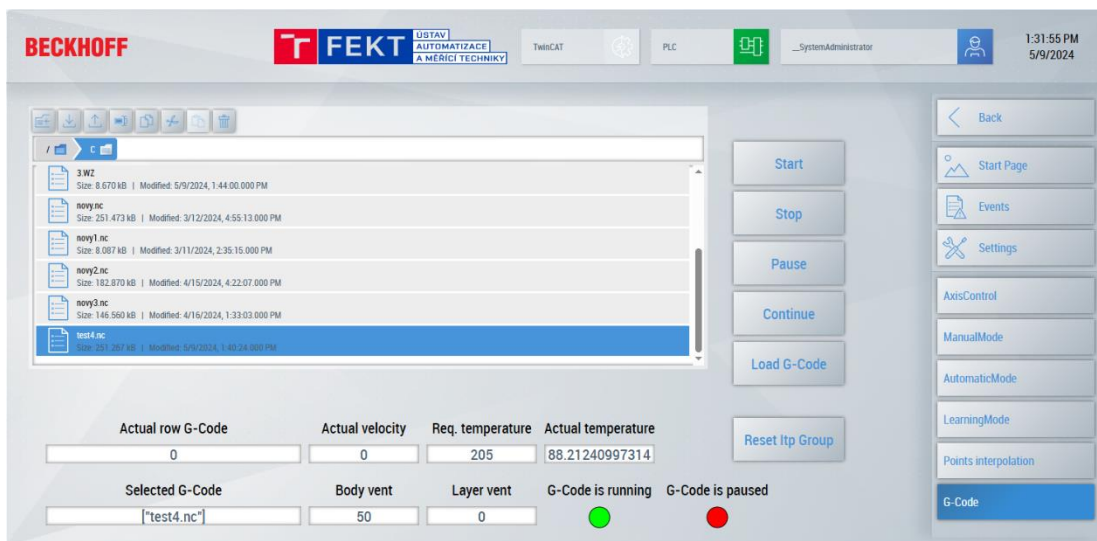
Obrázek 6.13 Obrazovka pro automatický režim (AutomaticMode)

V sekci „G-Code“ (viz obr. 6.15) lze najít prostředí, pomocí kterého je možné ovládat interpreter. Na levé straně se nachází pokročilejší prohlížeč souborů „TcHmiFileExplorer“, díky kterému je umožněno jednoduše nahrát a poté vybrat požadovaný G-kód k interpretaci. Aby bylo možné vyčítat soubor ze správné složky, kde jsou jednotlivé G-kódy uloženy, je třeba v nastavení pro konfiguraci na „remote“ zařízení v záložce „ADS → TcHmiSrv → Virtual directories“ přidat cestu k dané složce viz obr. 6.14.



Obrázek 6.14 Nastavení cesty ke složce s uloženými G-kódy pro prohlížeč souborů

V nastavení prohlížeče souborů byla do parametru „Root“ nastavena zvolená cesta pomocí názvu „/C“. V jeho vrchní části se nachází ovládací příkazy, díky kterým je například možné přímo nahrát soubor do zrovna zvolené složky. Požadovaný G-kód se zvolí tak, že jej obsluha označí a potvrdí tlačítkem „Load G-Code“. Po správném zvolení by se měl název zobrazit v textovém poli „Selected G-Code“. Na pravé straně od prohlížeče se nachází ovládací příkazy pro interpreter. Ve spodní části lze nastavovat parametry jako požadovanou teplotu trysky, nebo výkon ventilátoru materiálu. Další prvky mají pouze informativní účel a nelze jejich obsah měnit.



Obrázek 6.15 Obrazovka pro ovládání G-kód interpreteru (G-Code)

Vizualizace obsahuje i další obrazovky, které sice popsány nebyly, ale jsou součástí projektu. Nebyla v nich provedena žádná změna, a tak zůstaly v původním stavu.

7. ZÁVĚR

Cílem této práce bylo rozšířit SCARA robot s novým řídicím systémem o novou funkcionalitu. Pro řešení byl zvolen 3D tisk a tato funkcionalita byla postupně implementována.

Práce se zpočátku věnuje teoretickému rozboru a obecným informacím, které se týkají robotických manipulátorů a detailněji rozvíjí část se SCARA roboty, pro kterou rozvádí možnosti jejich využití. Byl popsán samotný manipulátor EPSON H554BN s novým řídicím systémem od firmy Beckhoff včetně jeho již implementovaných funkcionalit a zjištěných limitních parametrů.

Pro nově navrženou funkcionalitu byly teoreticky popsány jednotlivé komponenty, které bylo možné k řešení využít. V následující kapitole byly vybrané komponenty vyjmenovány a byl popsán způsob jejich připojení do systému.

Z důvodu nedokonalostí týkajících se provedení kabeláže a výskytu elektromagnetického rušení, byla navržena možná řešení a některá z nich byla implementována: např. použití opletu pro nestíněné vodiče. Kabeláž byla zorganizována a pro vyčnívající části kabeláže z manipulátoru byl navržen úchyt ke stolu. Z důvodu nedokonalé a zastaralé dokumentace, byl vytvořen nový elektro projekt, dle kterého byly pomocí štítků popsány zejména signálové vodiče. Byl vytvořen nastavitelný koncový efektor, díky kterému bylo možné jednoduše přichytit peletkový extruder.

V převzatém projektu byly ve vývojovém prostředí TwinCat3 přepracovány jednotlivé programy tak, aby korektně implementovaly svoji funkcionalitu a nedocházelo k neřešitelným chybám při provozu. Do projektu bylo doplněno řešení pro 3D tisk, včetně všech potřebných náležitostí, řešení chybových stavů a byly provedeny další malé úpravy. G-kód interpreter umožňuje plně vykonávat požadovanou funkci, bez jakýkoliv potíží. Problémy spojené s řešením byly detailně popsány a popsán byl také způsob jejich řešení.

Součástí řešení je také popis, jak nastavit slicer, který převede požadovaný model na geometrický kód, který je systém schopen zpracovat.

Nakonec byla pro obsluhu upravena a zprovozněna vizualizace, pomocí které je možné systém jednoduše ovládat bez nutnosti se připojovat přes vývojové prostředí.

Pro další rozvoj by bylo dobré se zaměřit na problém s elektromagnetickým rušením, které i nadále zůstává největším problémem systému. Nejvhodnější úprava by v ideálním případě zahrnovala přetažení systému novou ucelenou kabeláží, která by byla také řádně přistíněna. Dále by bylo vhodné doplnit řešení o vyhřívanou podložku, která by zajistila kvalitnější výtisky. Nabízí se i možnost vymyslet řešení, díky kterému by systém byl schopen doplňovat si granulátový filament automaticky i během tisku.

LITERATURA

- [1] SKAŘUPA, Jiří. *Průmyslové roboty a manipulátory*. Online. Ediční středisko VŠB – TUO, 2007. ISBN 978-80-248-1522-0. Dostupné z: http://www.elearn.vsb.cz/archivcd/FS/PRM/Text/Skripta_PRaM.pdf. [cit. 2023-10-21].
- [2] SPONG, Mark W.; VIDYASAGAR, M. a HUTCHINSON, Seth. *Robot Dynamics and Control*. Second Edition. Wiley, 2004. ISBN 978-0-471-61243-8.
- [3] SICILIANO, Bruno; SCIAVICCO, Lorenzo; VILLANI, Luigi a ORIOLO, Giuseppe. *Robotics*. Online. Advanced Textbooks in Control and Signal Processing. London: Springer London, 2009. ISBN 978-1-84628-641-4. Dostupné z: <https://doi.org/10.1007/978-1-84628-642-1>. [cit. 2023-10-21].
- [4] TSIROGIANNIS, Evangelos Ch. *Reverse Engineering, Redesign and Topology Optimization for Additive Manufacturing of an Industrial Robot Arm Link*. Master Thesis. Thessaloníki, Greece, Greece: National Technical University of Athens, 2017.
- [5] JAZAR, Reza N. *Theory of Applied Robotics: Kinematics, Dynamics, and Control*. 2. Springer Science & Business Media, 2010. ISBN 978-1-4419-1749-2.
- [6] *Robot Singularities: What Are They and How to Beat Them*. Online. OWEN-HILL, Alex. RoboDK. 2022. Dostupné z: <https://robodk.com/blog/robot-singularities/#:~:text=A%20singularity%20is%20a%20particular,move%20in%20an%20unexpected%20manner.> [cit. 2024-04-26].
- [7] SURI, Sonick; JAIN, Anjali; VERMA, Neelam a PRASERTPOJ, Nopporn. SCARA Industrial Automation Robot. Online. In: *2018 International Conference on Power Energy, Environment and Intelligent Control (PEEIC)*. Greater Noida, India: IEEE, 2018, s. 173-177. ISBN 978-1-5386-2341-1. Dostupné z: <https://doi.org/10.1109/PEEIC.2018.8665440>. [cit. 2023-10-22].
- [8] FAHAD, Jabbar Qasim a QASIM, Alaa Jabbar. The Processes and Technologies of 3D Printing. Online. *International Journal of Advances in Computer Science and Technology*. 2015, roč. 4, č. 10, s. 6. ISSN 2320 - 2602. Dostupné z: <https://pdfcoffee.com/the-processes-and-technologies-of-3d-printing-pdf-free.html>. [cit. 2023-10-22].
- [9] REDWOOD, Ben; SCHÖFFER, Filemon a GARRET, Brian. *The 3D printing handbook: technologies, design and applications*. Amsterdam: 3D Hubs, [2018]. ISBN 978-90-827485-0-5.
- [10] *3D printing*. Online. In: Wikipedia: the free encyclopedia. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2023. Dostupné z:

- https://en.wikipedia.org/wiki/3D_printing. [cit. 2023-11-05].
- [11] *Náplně do 3D tiskárny*. Online. For3Dtisk. 2022. Dostupné z: [https://for3dtisk.cz/naplne-do-3d-tiskarny-blog/#:~:text=N%C3%A1pln%C3%AD%20do%203D%20tisk%C3%A1rny%20\(filament%C5%AF,pro%203D%20tisk%20je%20PLA..](https://for3dtisk.cz/naplne-do-3d-tiskarny-blog/#:~:text=N%C3%A1pln%C3%AD%20do%203D%20tisk%C3%A1rny%20(filament%C5%AF,pro%203D%20tisk%20je%20PLA..) [cit. 2023-11-05].
- [12] *Jak funguje 3D tiskárna: Základní technologie 3D tisku*. Online. Toner partner. 2022. Dostupné z: <https://www.tonerpartner.cz/clanky/jak-funguje-stolni-3d-tiskarna-zakladni-technologie-3d-tisku-24967cz39332/>. [cit. 2023-11-06].
- [13] TAMIR, Tariku Sinshaw; XIONG, Gang; FANG, Qihang; DONG, Xisong; SHEN, Zhen et al. A feedback-based print quality improving strategy for FDM 3D printing: an optimal design approach. Online. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2022, roč. 120, č. 3-4, s. 15. ISSN 0268-3768. Dostupné z: <https://doi.org/10.1007/s00170-021-08332-4>. [cit. 2023-11-05].
- [14] *G-code*. Online. In: Wikipedia: the free encyclopedia. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001-. Dostupné z: <https://en.wikipedia.org/wiki/G-code>. [cit. 2023-11-05].
- [15] *K čemu slouží G kódy a M kódy?* Online. Macmatic. 2016. Dostupné z: [https://www.macmatic.cz/component/content/article/40-technicke-clanky/66-k-cemu-slouzi-g-kody-a-m-kody#:~:text=G%20k%C3%B3d%20\(ISO%20k%C3%B3d\)%20je,specifick%C3%BDch%20p%C5%99%C3%ADkaz%C5%AF%20pro%20jednotliv%C3%A9%20operace..](https://www.macmatic.cz/component/content/article/40-technicke-clanky/66-k-cemu-slouzi-g-kody-a-m-kody#:~:text=G%20k%C3%B3d%20(ISO%20k%C3%B3d)%20je,specifick%C3%BDch%20p%C5%99%C3%ADkaz%C5%AF%20pro%20jednotliv%C3%A9%20operace..) [cit. 2024-04-09].
- [16] *G02 CW / G03 CCW Circular Interpolation Motion (Group 01)*. Online. Hass F1 Team. 2024. Dostupné z: <https://www.haascnc.com/service/codes-settings.type=gcode.machine=mill.value=G02.html>. [cit. 2024-04-09].
- [17] , SEIKO EPSON CORPORATIO. *EPSON SCARA ROBOTER TYP BN: EM967R474F*. Rev. 5. 1998.
- [18] BECKHOFF. *C6015-0010 / Ultra-compact industrial PC*. Online. BECKHOFF. Beckhoff. 2023. Dostupné z: <https://www.beckhoff.com/cs-cz/products/ipc/pcs/c60xx-ultra-compact-industrial-pcs/c6015-0010.html>. [cit. 2023-11-05].
- [19] BECKHOFF. *EK1100 / EtherCAT Coupler*. Online. BECKHOFF. Beckhoff. 2023. Dostupné z: <https://www.beckhoff.com/cs-cz/products/i-o/ethercat-terminals/ek1xxx-bk1xx0-ethercat-coupler/ek1100.html>. [cit. 2023-11-05].
- [20] BECKHOFF. *EL1008 / EtherCAT Terminal, 8-channel digital input, 24 V DC, 3 ms*. Online. BECKHOFF. Beckhoff. 2023. Dostupné z: <https://www.beckhoff.com/en-us/products/i-o/ethercat-terminals/el1xxx-digital->

- [input/el1008.html](#). [cit. 2023-11-05].
- [21] BECKHOFF. *EL2008 / EtherCAT Terminal, 8-channel digital output, 24 V DC, 0.5 A*. Online. BECKHOFF. <https://www.beckhoff.com/en-en/products/i-o/ethercat-terminals/el2xxx-digital-output/el2008.html>. 2023. Dostupné z: <https://www.beckhoff.com/en-en/products/i-o/ethercat-terminals/el2xxx-digital-output/el2008.html>. [cit. 2023-11-05].
- [22] BECKHOFF. *AX5201 / Digital Compact Servo Drives 2-channel*. Online. BECKHOFF. Beckhoff. 2023. Dostupné z: <https://www.beckhoff.com/en-en/products/motion/servo-drives/ax5000-digital-compact-servo-drives/ax5201.html>. [cit. 2023-11-05].
- [23] *AX5203 / Digital Compact Servo Drives 2-channel*. Online. Beckhoff. 2023. Dostupné z: <https://www.beckhoff.com/cs-cz/products/motion/servo-drives/ax5000-digital-compact-servo-drives/ax5203.html>. [cit. 2023-12-11].
- [24] *EtherCAT*. Online. In: Wikipedia: the free encyclopedia. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2023. Dostupné z: <https://en.wikipedia.org/wiki/EtherCAT>. [cit. 2023-12-11].
- [25] *EtherCAT – the Ethernet Fieldbus*. Online. Beckhoff. 2023. Dostupné z: <https://www.beckhoff.com/en-en/products/i-o/ethercat/>. [cit. 2023-12-11].
- [26] ŠTÍPEK, Martin. *Pokročilé programové funkce pro SCARA robot*. Online, Diplomová práce, vedoucí Tomáš Benešl. Brno: Vysoké učení technické v Brně. Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií. Ústav automatizace a měřicí techniky, 2023. Dostupné z: <http://hdl.handle.net/11012/209968>. [cit. 2023-12-19].
- [27] MARČONEK, Michal. *Home procedura SCARA robotu*. Online, Bakalářská práce, vedoucí Tomáš Benešl. Brno: Vysoké učení technické v Brně. Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií. Ústav automatizace a měřicí techniky, 2023. Dostupné z: <http://hdl.handle.net/11012/210948>. [cit. 2023-12-19].
- [28] KÜNZEL, Karel a ŽÁČEK, Jaroslav. EMC v technické praxi II: Rušivé signály, jejich zdroje a šíření. Online. *Automa*. 2006, roč. 12, č. 3, s. 102-105. Dostupné z: https://www.automa.cz/cz/casopis-clanky/emc-v-technicke-praxi-ii-rusive-signaly-jejich-zdroje-a-sireni-2006_03_30991_751/. [cit. 2024-01-03].
- [29] *Mahor V4 pellet extruder*. Online. Filament2Print. 2023. Dostupné z: <https://filament2print.com/gb/extruders/1919-mahor-v4-pellet-extruder.html>. [cit. 2023-12-11].
- [30] Stepper Motors Basics: Types, Uses, and Working Principles. Online. *Monolithic Power Systems*. 2023, roč. 2023, č. 1, s. 9. Dostupné z: <https://www.monolithicpower.com/en/stepper-motors-basics-types-uses>. [cit.

2023-12-13].

- [31] *EL7031 | EtherCAT Terminal, 1-channel motion interface, stepper motor, 24 V DC, 1.5 A*. Online. Beckhoff. 2024. Dostupné z: <https://www.beckhoff.com/en-en/products/i-o/ethercat-terminals/el-elm7xxx-compact-drive-technology/el7031.html>. [cit. 2024-04-10].
- [32] *Řídící jednotka krokového motoru TB6600 CNC 0,5A-4,0A*. Online. Allegro. 2023. Dostupné z: https://allegro.cz/nabidka/ridici-jednotka-krokoveho-motoru-tb6600-cnc-0-5a-4-0a-13670696036?utm_feed=712e6653-4749-4512-b084-b6e297fc9e0b&srsId=AfmBOopGcHyjBA1YoFdrCI2ZFIPNpfHY_K5Eu0q1p83zmOQj4Zv5veL7uI. [cit. 2023-12-11].
- [33] *Thermistors and thermocouples. Types and common problems*. Online. Filament2Print. 2023. Dostupné z: https://filament2print.com/gb/blog/146_types-thermistors-thermocouples-3d-printing.html. [cit. 2023-12-12].
- [34] *Comparison between temperature sensors used in 3D printers – Part 1*. Online. Dyze Design. 2016. Dostupné z: <https://dyzedesign.com/2016/06/temperature-sensors-used-3d-printers-part-1/>. [cit. 2023-12-12].
- [35] *Measuring Temperature with Thermocouples, RTDs, and Thermistors*. Online. National Instruments. 2023. Dostupné z: <https://www.ni.com/en/shop/data-acquisition/sensor-fundamentals/measuring-temperature-with-thermocouples-rtds-and-thermistors.html>. [cit. 2023-12-11].
- [36] *EL3204-0200 | EtherCAT Terminal, 4-channel analog input, temperature, RTD/NTC, 16 bit*. Online. Beckhoff. 2023. Dostupné z: <https://www.beckhoff.com/cs-cz/products/i-o/ethercat-terminals/el3xxx-analog-input/el3204-0200.html?> [cit. 2023-12-13].
- [37] *EL3312 | EtherCAT Terminal, 2-channel analog input, temperature, thermocouple, 16 bit*. Online. Beckhoff. 2023. Dostupné z: <https://www.beckhoff.com/en-en/products/i-o/ethercat-terminals/el3xxx-analog-input/el3312.html>. [cit. 2023-12-13].
- [38] *EL3068 | EtherCAT Terminal, 8-channel analog input, voltage, 0...10 V, 12 bit, single-ended*. Online. Beckhoff. 2023. Dostupné z: <https://www.beckhoff.com/en-en/products/i-o/ethercat-terminals/el3xxx-analog-input/el3068.html>. [cit. 2023-12-11].
- [39] *EL2502 | EtherCAT Terminal, 2-channel PWM output, 24 V DC, 0.5 A*. Online. Beckhoff. 2023. Dostupné z: <https://www.beckhoff.com/en-en/products/i-o/ethercat-terminals/el2xxx-digital-output/el2502.html>. [cit. 2023-12-13].
- [40] *Solid state relé*. Online. In: Wikipedia: the free encyclopedia. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2023. Dostupné z: https://cs.wikipedia.org/wiki/Solid_state_rel%C3%A9. [cit. 2023-12-11].

- [41] *RELÉ SSR-40DA*. Online. 3DJK. 2022. Dostupné z: <https://3djk.eu/sk/domu/457-rele-ssr-40da.html>. [cit. 2023-12-11].
- [42] *PWM MOSFET modul HA210N06(klon) 25A pro vyhřivanou podložku*. Online. LaskaKit. 2023. Dostupné z: https://www.laskakit.cz/pwm-mosfet-modul-ha210n06-25a-pro-vyhrivanou-podlozku/?gad_source=1&gclid=CjwKCAiAvdCrBhBREiwAX6-6UrLfrK5x75jUds-um32mh8S02XXRim-mDRxPOlZ2uNFTgTsY2KIyxoCzYkQAvD_BwE. [cit. 2023-12-11].
- [43] *Ventilátory pro 3D tiskárny*. Online. 3DJAKE. 2010, 2023. Dostupné z: <https://www.3djake.cz/nahradni-dily-a-upgrady/ventilatory>. [cit. 2023-12-11].
- [44] *EFX-EMC-35*. Online. Ochrana kabelů a hadic. 2023. Dostupné z: <https://www.oplet.cz/efx-emc-35.html>. [cit. 2024-01-03].

SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK

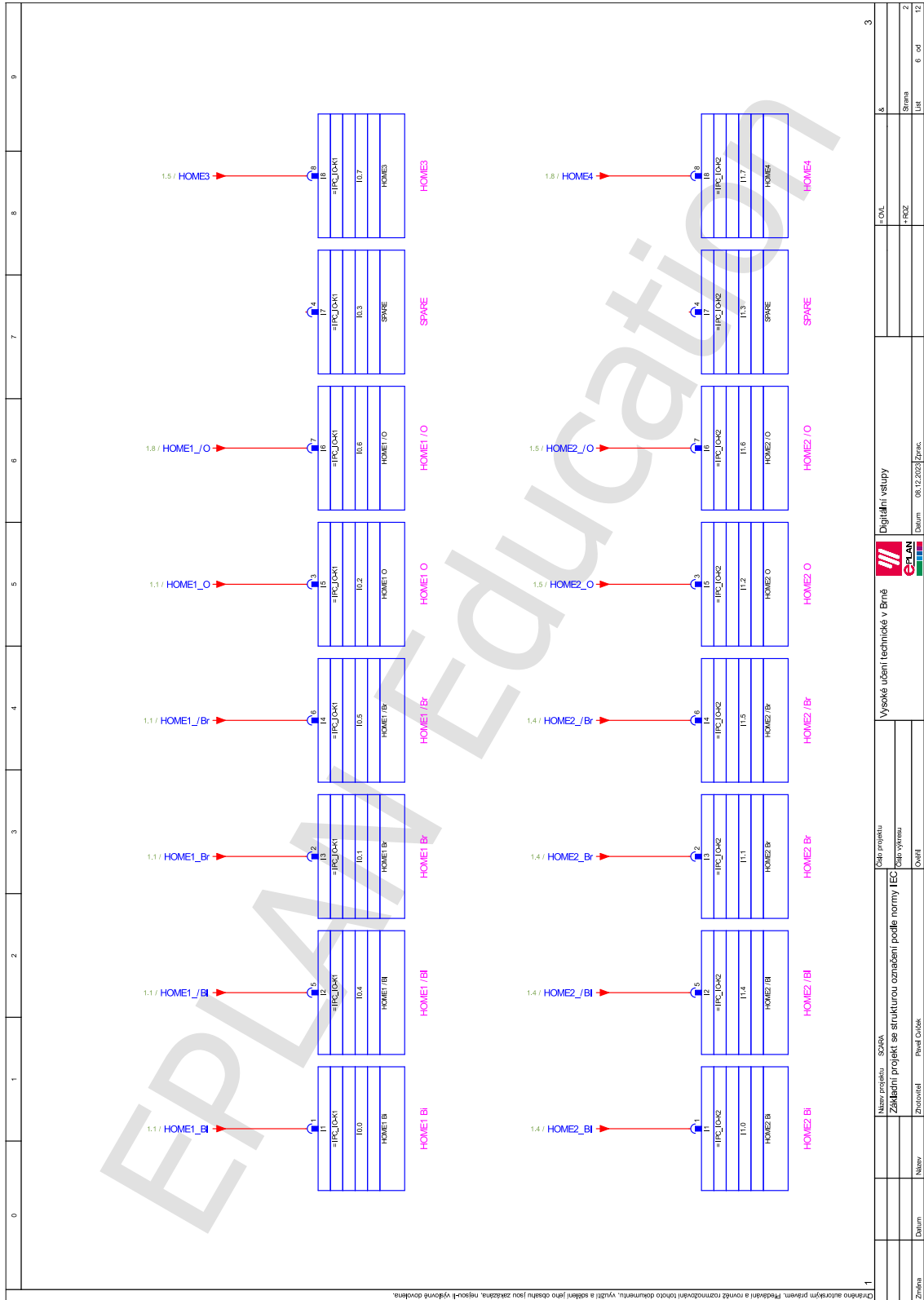
Zkratky:

A/D	Analog to digital
ABS	Akrylobutadienstyren
CAD	Počítačem podporované projektování
D/A	Digital to analog
EMC	Elektromagnetická kompatibilita
FDM	Fused filament fabrication
FGF	Fused granular fabrication
G-kód	Geometrický kód
HMI	Human machine interface
IPC	Průmyslový osobní počítač
LED	Elektroluminiscenční dioda
MC	Motion control
NC	Numeric control
NTC	Negativní teplotní koeficient
PET	Polyetyltereftalát
PETG	Polyetyltereftalát-glykol
PLA	Polylaktid
PLC	Programovatelný logický automat
PTC	Pozitivní teplotní koeficient
PWM	Pulzně šířková modulace
RTD	Odporový teploměr
SCARA	Selective compliance assembly robot arm
SSR	Relé s polovodičovými součástkami
STEP	Standard for the echange of product model data file
STL	Stereolitography

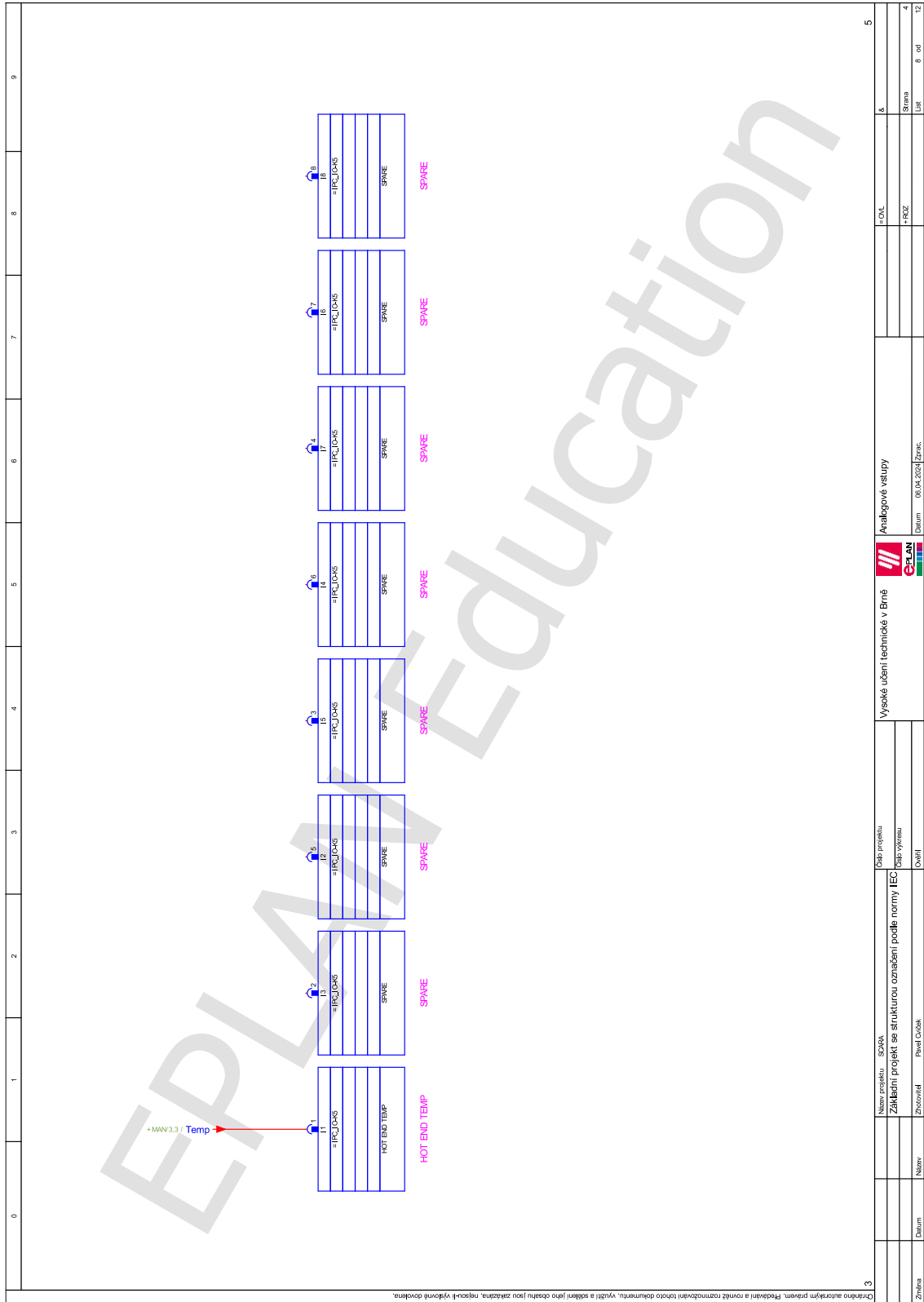
SEZNAM PŘÍLOH

PŘÍLOHA A - ELEKTRICKÉ SCHÉMA ZAPOJENÍ	81
PŘÍLOHA B - ELEKTRONICKÉ PŘÍLOHY	93

A.6 Digitální vstupy

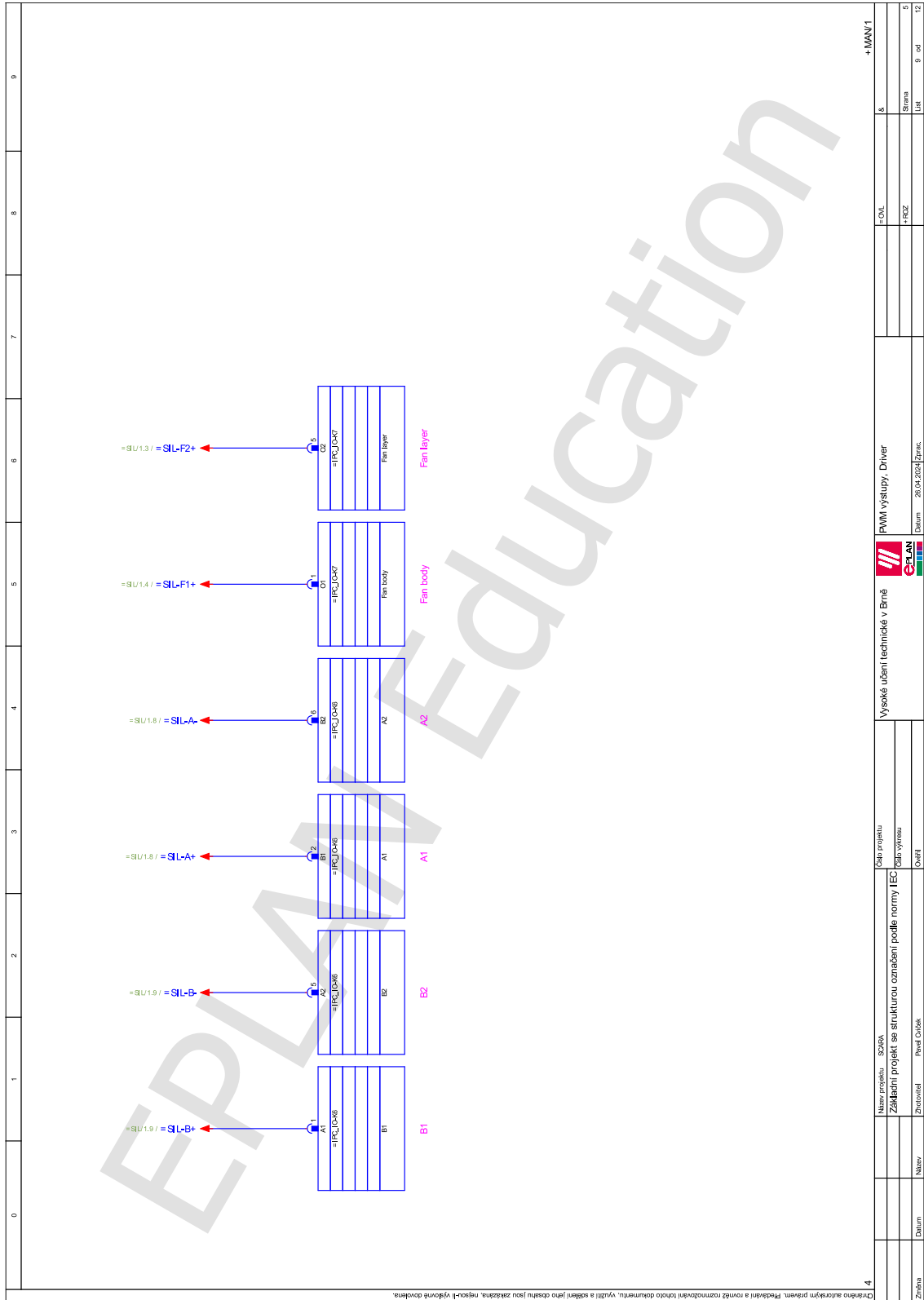


A.8 Analogové výstupy



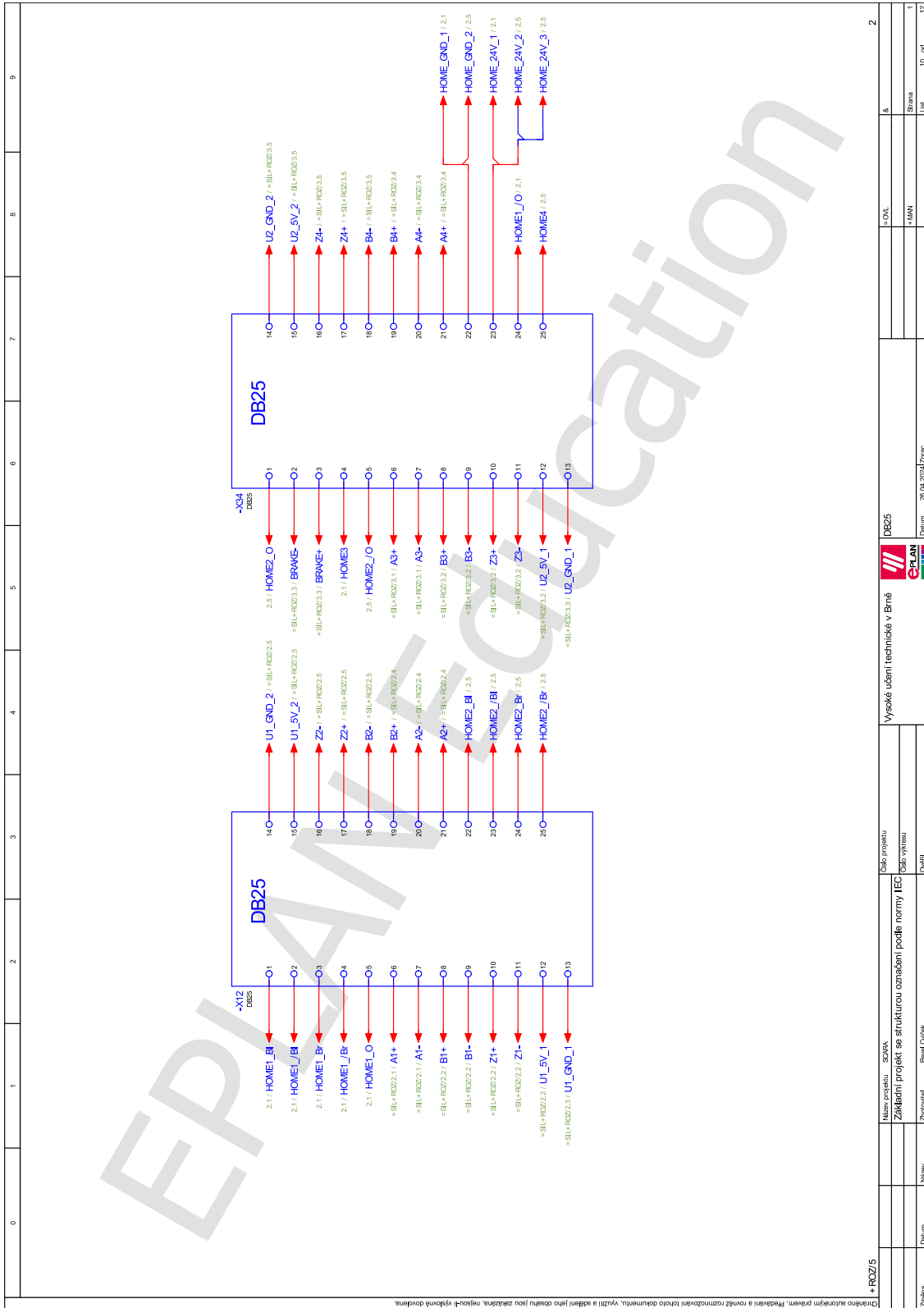
Číslo a obsah stránek: 3
 Název projektu: SZS
 Zákazní projekt se strukturou označení podle normy IEC 61346-2-101
 Datum: 08.04.2024
 Strana: 4
 List: 8 od 12

A.9 PWM výstupy, Driver



4		+ MAN/1	
Cíle projektu		= OKL	
Název projektu: SCA20A		+ RBZ	
Základní projekt se strukturou označení podle normy IEC		Strana	
Zhotovitel: Pavel Čížek		Lut	
Datum:		9 od	
Změna:		12	
Vysoké učení technické v Brně		Datum: 26.04.2024/Zprac.	
EPFLAN			

A.10 DB25 konektor v manipulátoru



+ R02/5		Vysoké učení technické v Brně		DB25		= OK		2	
Název projektu: SZARA		Číslo projektu: 0202/2024		Číslo výzkumu: 0202/2024		= OK			
Základní projekt se strukturou označením podle normy IEC		Datum: 26.04.2024		Pracovník: Pavel Doležal		= OK			
Změna		Datum		Název		Zhotovitel		Strana	
								1	
								10 cel	
								12	

Příloha B - Elektronické přílohy

- Záloha elektrotechnické dokumentace v prostředí EPLAN
- Projekt s programem, drive managerem a vizualizací pro prostředí TwinCat3
- Nastavení programu PrusaSlicer pro generování 3D modelů pro tisk
- Model efektoru a krytu stolu pro program NX
- Vzor stylu popisku pro štítkování
- Testovací G-kód soubor ve formě .nc souboru