



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV AUTOMATIZACE A INFORMATIKY

INSTITUTE OF AUTOMATION AND COMPUTER SCIENCE

**NÁVRH A IMPLEMENTACE ŘÍDÍCÍHO
PROGRAMU PRO CNC OBRÁBĚCÍ STROJ
PROSTŘEDNICTVÍM B&R AUTOMATION**

DESIGN AND IMPLEMENTATION OF CONTROL PROGRAM FOR CNC MACHINE VIA B&R
AUTOMATION

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Michal Vavřík

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Roman Parák

BRNO 2020

Zadání diplomové práce

Ústav:	Ústav automatizace a informatiky
Student:	Bc. Michal Vavřík
Studijní program:	Strojní inženýrství
Studijní obor:	Aplikovaná informatika a řízení
Vedoucí práce:	Ing. Roman Parák
Akademický rok:	2019/20

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

Návrh a implementace řídicího programu pro CNC obráběcí stroj prostřednictvím B&R Automation

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Práce bude zahrnovat rešerši problematiky v oblasti obráběcích strojů, Průmyslu 4.0 a seznámení se s řídicími prostředky společnosti B&R Automation a vývojovým prostředím Automation Studio. Teoretická část práce bude také zahrnovat rešerši současného stavu Vrtačko–frézky od společnosti Optimum.

Predmět práce bude úprava současného řešení robotizací (výběr HW komponent, návrh uchycení motorů, elektrická/mechanická úprava, atd.) a návrh řídicího programu pro vybranou laboratorní úlohu. Praktická část práce bude také zahrnovat návrh a implementaci webové vizualizace HMI (Human Machine Interface) pomocí technologie mappView. Závěr práce bude věnován implementaci návrhu řídicího programu a ověření funkčnosti vytvořeného řešení.

Práce předpokládá aktivní přístup studenta, nutnost práce v laboratoři a absolvování školení ve firmě B+R Automatizace, spol. s.r.o se sídlem v Brně.

Cíle diplomové práce:

- Nastudujte problematiku obráběcích strojů. Zpracujte přehled aktuálního stavu v dané oblasti.
- Nastudujte řídicí prostředky společnosti B&R Automation a vývojové prostředí Automation Studio.
- Provedte stručnou rešerši současného stavu Vrtačko–frézky od společnosti Optimum.
- Navrhněte a provedte robotizaci současného řešení.
- Navrhněte řídicí program pro vybranou laboratorní úlohu.
- Implementujte návrh řídicího programu.
- Navrhněte a implementujte webovou vizualizaci HMI pomocí technologie mappView.
- Ověřte funkčnost vytvořeného řešení pomocí simulace a na reálném robotu.

Seznam doporučené literatury:

Bernecker&Rainer. Perfection in Automation. <http://www.br-automation.com/>

ABB Robotics: Manufacturer & Supplier of Industrial Robots. <https://new.abb.com/products/robotics>

MAREK, J. a kol., MM Průmyslové spektrum: Konstrukce CNC obráběcích strojů IV. 2018.

Speciální vydání. Dostupný z WWW: . ISBN 978-80-906310-8-3.

KOLÍBAL, Z. Roboty a robotizované výrobní technologie. Brno: Vysoké učení technické v Brně - nakladatelství VUTIUM, 2016. ISBN 978-80-214-4828-5.

CUBERO, S.: Industrial robotics: theory, modelling and control. Mammendorf: Pro-Literatur-Verl.

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2019/20

V Brně, dne

L. S.

doc. Ing. Radomil Matoušek, Ph.D.
ředitel ústavu

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

ABSTRAKT

Cílem diplomové práce je robotizace konvenční frézky na CNC frézku s použitím programovatelného logického automatu. V teoretické části diplomové práce je uveden popis obráběcích strojů a průmyslu 4.0, přehled společností Optimum Maschinen a B&R Automation včetně produktů a popis programovacího jazyku G-kód. Na začátku praktické části je popsán vybraný hardware, jeho zapojení a odladění motorů. Dále je v praktické části vysvětlen způsob ovládání motorů a zpracování CNC programů v G-kódu. Následující kapitoly pojednávají o vytvoření průmyslové vizualizace pro ovládání stroje a digitálního dvojčete pro testovací účely. Závěr práce popisuje zhodnocení výsledků a udává možnosti pro budoucí rozšiřování stroje a jeho implementaci do automatizované buňky ve smyslu průmyslu 4.0.

ABSTRACT

The aim of the diploma thesis is the robotization of a conventional milling machine to a CNC milling machine using a programmable logic controller. The theoretical part of the thesis contains a description of machine tools and industry 4.0, an overview of Optimum Maschinen and B&R Automation companies, including products, and a description of the G code programming language. At the beginning of the practical part, the selected hardware, its connection and tuning of motors are described. Furthermore, the practical part explains the method of motor control and processing of CNC programs in G code. The following chapters discuss the creation of industrial visualizations for machine control and digital twin for testing purposes. The conclusion describes the evaluation of the results and indicates the possibilities for future expansion of the machine and its implementation in an automated cell in the sense of industry 4.0.

KLÍČOVÁ SLOVA

Robotizace frézky, CNC frézka, B+R Automatizace, Automation Studio, Scene Viewer, mappView, krokové motory, průmyslová vizualizace, digitální dvojče, dekodér G-kódu, interpret G-kódu

KEYWORDS

Milling machine robotization, CNC milling machine, B&R Automation, Automation Studio, Scene Viewer, mappView, stepper motors, industrial visualization, digital twin, G-code decoder, G-code interpreter

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

VAVRÍK, Michal. *Návrh a implementace řídicího programu pro CNC obráběcí stroj prostřednictvím B&R Automation*, Brno, 2020, 136 s. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav automatizace a informatiky. Vedoucí diplomové práce Ing. Roman Parák.

PODĚKOVÁNÍ

Děkuji vedoucímu diplomové práce Ing. Romanu Parákovi za odborné a profesionální vedení práce a také za cenné a užitečné rady, přátelský přístup a spolehlivost při řešení jakýchkoliv problémů. Dále děkuji Ing. Zdeňkovi Cejpkovi za pomoc a asistenci při řešení elektrotechnických úkonů.

ČESTNÉ PROHLÁŠENÍ

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

V Brně dne 18. 06. 2020

.....

Bc. Michal Vavřík

OBSAH

1	ÚVOD.....	17
2	PŘEHLED OBRÁBĚCÍCH STROJŮ	19
2.1	Rozdělení	19
2.2	Soustruhy	19
2.3	Frézky	20
2.3.1	Konzolové frézky	20
2.3.2	Stolové frézky.....	20
2.3.3	Rovinné frézky	21
2.3.4	Speciální frézky	21
2.3.5	Frézy	22
2.4	Vrtáčky a vyvrtávačky	23
2.5	Hoblovky a obrážky	23
2.6	Brusky	23
2.7	Stroje na výrobu ozubení, závitů a vaček	24
3	PRŮMYSL 4.0	25
3.1	Datová centra.....	25
3.2	Internet věcí.....	26
3.3	Cloud computing	26
4	OPTIMUM MASCHINEN.....	27
4.1	O společnosti	27
4.2	Přehled produktů	27
4.2.1	Třískové kovoobráběcí stroje	27
4.2.2	Beztrískové kovoobráběcí stroje	28
4.2.3	Lisy	28
4.2.4	Měřicí přístroje	29
4.2.5	Příslušenství	29
4.3	OPTIMUM OPTImill BF 20 L Vario.....	30
4.3.1	Popis.....	30
4.3.2	Technické specifikace	31
5	B&R AUTOMATION	33
5.1	O společnosti	33
5.2	Přehled produktů	35
5.2.1	Průmyslové počítače	35
5.2.2	Human machine interface (HMI)	35
5.2.3	PLC systémy	36
5.2.4	Řízení pohybu.....	37
5.2.5	Vision systémy	38
5.2.6	Dopravníkové technologie	39
5.2.7	Mobilní automatizace	39
5.2.8	Bezpečnostní technologie	40
5.2.9	Ethernet POWERLINK	42
5.2.10	reACTION technologie.....	42
5.2.11	mapp technologie.....	43
5.2.12	Automation Studio 4.....	43
5.2.13	Scene Viewer.....	46

5.3	Průmyslová komunikace	47
5.3.1	PROFINET	47
5.3.2	PROFIBUS	47
5.3.3	DeviceNet	47
5.3.4	Ethernet IP	47
5.3.5	EtherCAT	48
5.3.6	ModbusTCP	48
5.3.7	CAN bus	48
5.3.8	CANopen	48
5.3.9	X2X Link	48
5.3.10	OPC UA	49
5.3.11	OPC UA přes TSN	50
6	G-KÓD	51
6.1	Historie	51
6.2	Syntaxe	51
6.3	G funkce	52
6.4	M funkce	52
7	HARDWARE	53
7.1	Řídící hardware	53
7.1.1	Napájecí zdroje	53
7.1.2	Programovatelný automat	55
7.1.3	Moduly krokových motorů	56
7.1.4	Modul pro komunikaci se systémem X67	58
7.1.5	Motory	59
7.1.6	Vizualizační panel	61
7.1.7	Schéma zapojení	62
7.2	Úchyty os	64
7.2.1	Úchyt osy X	64
7.2.2	Úchyt osy Y	65
7.2.3	Úchyt osy Z	66
7.3	Protizávaží osy Z	66
7.4	Ovládací panel	68
7.5	Ostatní hardware	70
8	SOFTWARE	75
8.1	Založení projektu	75
8.2	Přidání a konfigurace hardwarových komponent	78
8.2.1	Přidání hardwaru	78
8.2.2	Testování správného zapojení	82
8.2.3	Konfigurace CPU	87
8.2.4	Konfigurace a ladění motorů	89
8.2.5	Konfigurace vizualizačního panelu	93
8.3	Organizace projektu	94
8.4	Funkční blok pro ovládání jednoho motoru	95
8.4.1	Řízení motoru	96
8.4.2	Vůle os	97
8.4.3	Referování	98
8.5	Ovládání motorů	99
8.6	Dekódování G kódu	100
8.6.1	Způsob dekodování	100

8.6.2	Podporované funkce	101
8.7	Zpracování G kódu (interpret).....	102
8.7.1	Způsob zpracování jednotlivých funkcí.....	102
8.8	Ovládání funkcí frézky	121
8.9	Správa souborů	121
8.10	Vizualizace	122
8.10.1	Obecně o mapView	122
8.10.2	Popis jednotlivých stran	123
8.11	Digitální dvojče	125
9	PROBLÉMY PŘI ZPRACOVÁNÍ	127
9.1	Změna úchytu osy X	127
9.2	Chyba při návrhu úchytu osy Z	127
9.3	Protizávaží v ose Z	128
9.4	Chyba při výpočtu kruhové interpolace	128
9.5	Problém při zpracování kruhové interpolace	128
10	ZÁVĚR.....	129
11	SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY	131
12	SEZNAM PŘÍLOH	135

1 ÚVOD

Cílem diplomové práce je navrhnout a provést robotizaci konvenční vrtačko-frézky od společnosti Optimum, navrhnout a implementovat řídicí program, vytvořit webovou vizualizaci HMI pomocí technologie mappView a ověřit funkčnost realizovaného řešení prostřednictvím simulace a na reálném stroji. Výsledné řešení by mělo sloužit Ústavu Automatizace a Informatiky pro obrábění materiálů v případě potřeby a možná i jako pomůcka či reprezentace řízení ve výuce.

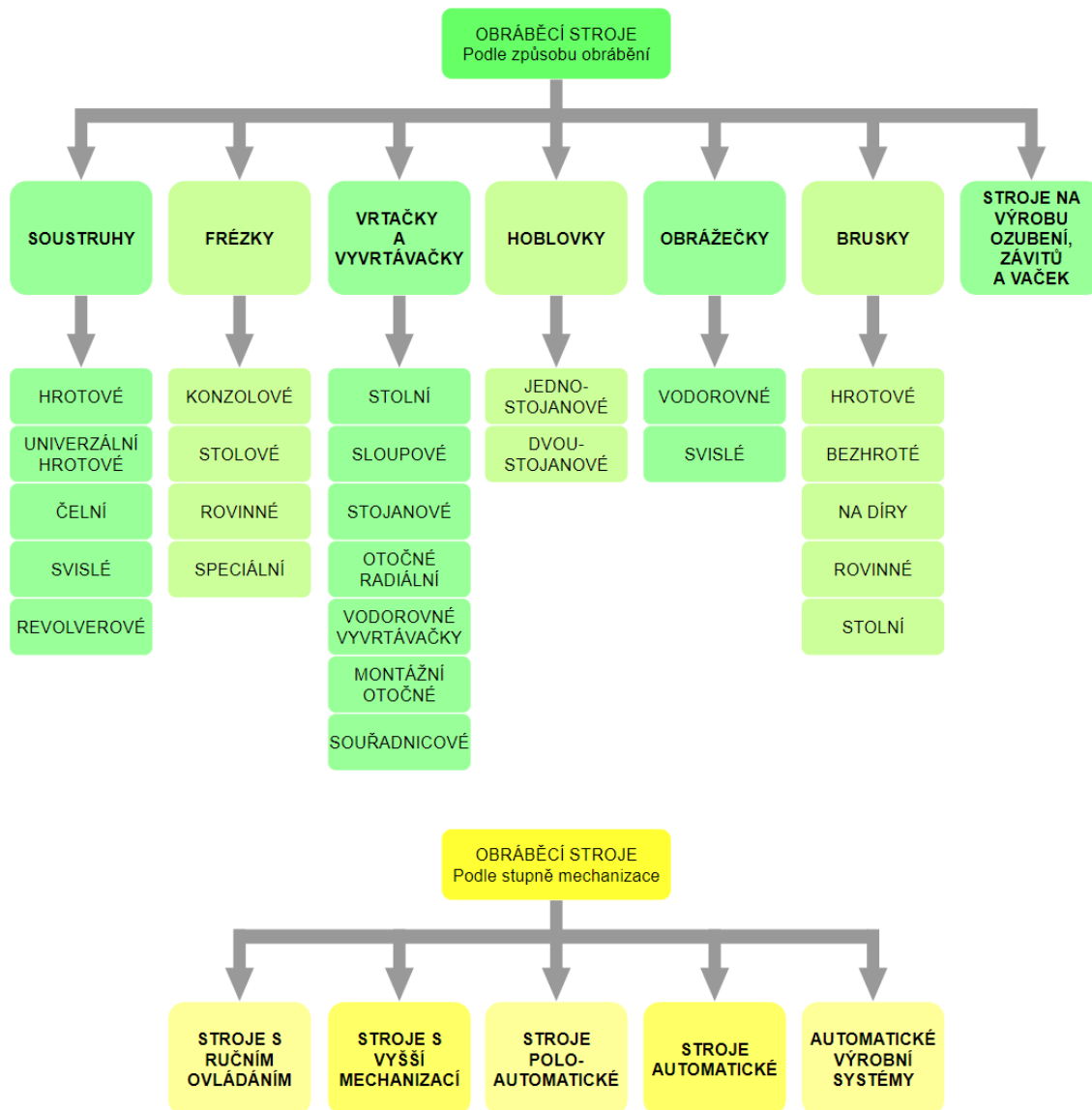
Úvodní část je zaměřena na rešerši obráběcích strojů, především frézek, a průmyslu 4.0. Dále je uveden přehled společnosti Optimum Maschinen včetně produktů, s největším důrazem na použitou vrtačko-frézku OPTImill BF 20 L Vario. Teoretická část se také věnuje společnosti B&R Industrial Automation a především řídicím prostředkům této firmy. Na závěr teorie je stručně popsán a vysvětlen programovací jazyk G-kód, jenž se užívá pro řízení numericky ovládaných strojů.

Praktická část začíná výběrem hardwaru pro robotizaci frézky, hardwarovým zapojením a otestováním správného zapojení. Následuje ladění motorů, které zahrnuje určení hodnot proudů, regulátorů a inkrementů na otáčku motoru. Po správném zapojení a odladění motorů začíná vývoj řídicího softwaru. Ten se zpočátku věnuje ovládání jednotlivých motorů pomocí funkčního bloku, poté jejich synchronizaci a kooperaci. Dalším krokem v praktické části je zpracování CNC programů v jazyce G-kód. Pro zpracování programů je v této práci napsán vlastní dekodér a interpret G-kódu. Při vykonávání G-kódu se vybraný soubor nejdříve dekoduje dekodérem a potom je procesorem (interpretem) zpracovávána jedna instrukce za druhou. Pro robotizaci celého procesu je vytvořena řídicí deska s relátky a diodami pro ovládání vřetena frézky použitím digitálních výstupů řídicího PLC. Kromě řídicího softwaru se praktická část zabývá také vytvořením webových vizualizací pomocí technologie mappView pro jednoduchou a spolehlivou obsluhu stroje. Konec praktické části je věnován popisu a způsobu vývoje digitálního dvojčete. To je vytvořené v programu Scene Viewer a slouží k testování programů v simulaci.

Na závěr jsou uvedeny reprezentativní úlohy a jejich výsledky, které posloužily pro otestování správné funkčnosti stroje.

2 PŘEHLED OBRÁBĚCÍCH STROJŮ

2.1 Rozdělení



Obr. 1: Rozdělení obráběcích strojů

2.2 Soustruhy

Jedny ze základních strojů pro třískové obrábění. Materiál je upnutý pomocí sklíčidla na rotujícím vřetení. Obrobek vykonává hlavní, rotační řezný pohyb, nástroj vykonává vedlejší řezný pohyb. Při obrábění získává materiál osově souměrný tvar. Nástroj, nejčastěji soustružnický nůž, může být buď držen v ruce nebo pevně uchycen v saních stroje. Saně se pohybují po lineárním vedení pomocí ručního posuvu nebo je jejich pohyb odvozen od otáčení vřetene. Při obrábění vznikají třísky a velká část mechanické energie

je transformována na teplo. Pro odvod tepla je třeba chladit proces vhodnou chladicí kapalinou. [6]

2.3 Frézky

Jelikož se tato práce zabývá robotizací frézky, budou popsány frézky podrobněji než ostatní obráběcí stroje v uvedeném rozdělení.

Frézování je proces třískového obrábění užívající rotační řezné nástroje pro odebrání materiálu z obrobku. Vícebřitý nástroj, jenž se nazývá fréza, vykonává hlavní, rotační pohyb, zatímco obrobek vykonává podružný, posuvný pohyb. Základně jsou frézky tříosé, mohou však být i víceosé.

2.3.1 Konzolové frézky

Nejrozšířenější typ frézek v kusové a malosériové výrobě. Jméno této skupiny je odvozeno od konzole, která se posouvá po stojanu. Obrobek se upíná na stůl, který se může pohybovat ve dvou osách, podélné a příčné. [1] Stůl se otáčením závitových tyčí posouvá po rybinovém vedení. Na stojanu je připevněna konzole s vřetenem, jež se pohybuje obdobným způsobem jako stůl. Tím je docíleno pohybu ve třetí, svislé ose. Rozdělují se na vodorovné, svislé, univerzální, nástrojářské a kopírovací. [2]



Obr. 2: Konzolová frézka [28]

2.3.2 Stolové frézky

Užívají se k obrábění větších součástí. Rozdělují se vodorovné, svislé a s revolverovou hlavou. [1] Mají tužší uložení pro dosažení vysoké přesnosti při frézování. Místo pohybu konzole je pohyb ve svislé ose dosažen posouváním vřetene. [2]



Obr. 3: Stolové frézky [27]

2.3.3 Rovinné frézky

Především pro obrábění rozměrově velkých součástí. Hlavním rozdílem oproti přechozím kategoriím je stůl pohybující se pouze v jedné ose a to vodorovné. Vřeteník se posouvá ve svislé ose a pro posuv v příčném směru je stroj opatřen výsuvnou pinolou. [1] Mohou mít jeden nebo dva vřeteníky, z nichž každý má svůj motor a převodovku a jsou na sobě nezávislé. Mají velký výkon a velmi dobrou geometrickou přesnost. Klasifikují se na vodorovné, s výložníkem a portálové. [2]



Obr. 4: Rovinná vodorovná frézka se dvěma vřeteníky [29]

2.3.4 Speciální frézky

Do této skupiny spadají frézky určené pro speciální operace. [1] Jsou to například frézky na závity, na ozubení, na drážky, na vačky, pantografické frézky, karuselové, bubnové a pro rotační frézování. [2]

2.3.5 Frézy

Při frézování se používají vícebřité rotační řezné nástroje zvané frézy. Frézy svými břity odebírají kov, popřípadě i jiné materiály. Proto musí být kladeny vysoké požadavky na materiál fréz.

Dělení fréz podle materiálu:

- Rychlořezná ocel (HSS)
- Tvrdokov
- Břity ze slinutých karbidů (SK)
- Polykrystalický diamant (PKD)
- Vyměnitelné břitové destičky (VBD)

Ze zmíněných materiálů se frézy vyrábějí pomocí odlévání, frézování a podsoustružování. Dále se dají dělit podle tvaru činné plochy na:

- Kulové
- Válcové
- Toroidní
- Kotoučové
- Kuželové
- Tvarové
- Odvalovací

Velice důležitým aspektem při výběru frézy je kromě materiálu a činné plochy taky způsob upínání frézy. Aby se dala fréza upnout do frézky, musí mít stejný typ upínání. Pokud není typ upínání stejný, lze použít redukce.

Rozdělení fréz podle způsobu upínání:

- Stopkové
 - S válcovou stopkou
 - S válcovou stopkou s ploškou pro upínací šroub kolmo k ose vřetena
 - S válcovou stopkou s ploškou pro upínací šroub pod úhlem 2° od kolmice k ose vřetena
 - S kuželovou stopkou
 - S kuželovou dutou stopkou
 - S polygonální stopkou
- Nástrčné



Obr. 5: Přehled typů fréz na kov [31]

Dále existují frézy pro speciální obráběcí úkony jako např. pro vrtání, pro řezání drážek nebo pro řezání závitů. [30]

2.4 Vrtačky a vyvrtávačky

Vrtačky jsou obráběcí stroje pro tvoření děr do plného materiálu. Hlavní rezný pohyb je rotační a vykonává jej nástroj. Vedlejší pohyb je posuvný a také konaný nástrojem. Nástroj, nejčastěji dvojbřitý vrták, se za rotace tlačí do materiálu. Různé obvodové rychlosti nástroje v různých vzdálenostech od osy nástroje způsobují technologické problémy. V ose nástroje je rychlost nulová a hrot nástroje je tedy pouze tlačěn do materiálu, bez otáčení. Pro zmírnění tohoto problému se díry často předvrtávají. Vyvrtávání je proces zvětšování předlitých, předkovaných nebo předvrtaných děr. [7]

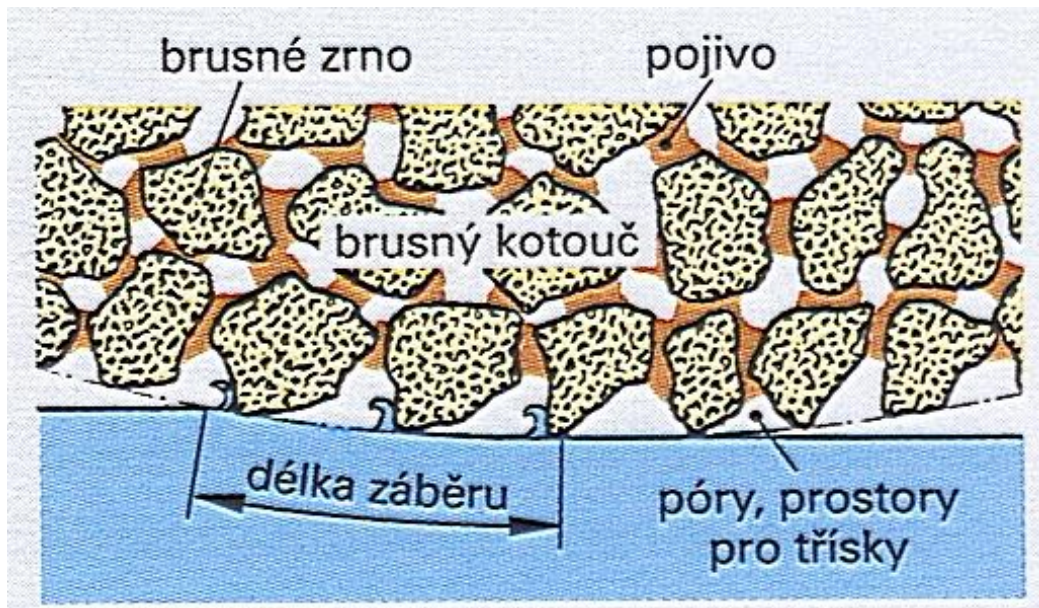
2.5 Hoblovky a obrážečky

Třískové obráběcí stroje pro úpravu velkých rovinných ploch, profilů a drážek. Nástroj, upínaný v nožové hlavě, je jednobřitý a vykonává hlavní, lineární rezný pohyb. Zpětný pohyb nástroje je naprázdno, bez odebírání třísky, a vykonává se 1,5x – 4x rychleji. Při zpětném pohybu nástroje se nožová hlava odklápí, aby nůž neničil obrobenou plochu a aby nedošlo k si poškození břitu. [8]

2.6 Brusky

Stroje určené k broušení. Užívají se pro dokončovací metody, k ostření nástrojů a k dělení materiálu. Lze jimi docílit velmi vysoké přesnosti, lepší než jakou lze udělat na frézkách a soustruhách. Je možné obrábět velmi tvrdé materiály a dosáhnout malé drsnosti

povrchu. Nástroj je brousící kotouč s mnoha břity, jenž vykonává rotační pohyb. Skládá se z brusiva a pojiva. [9]



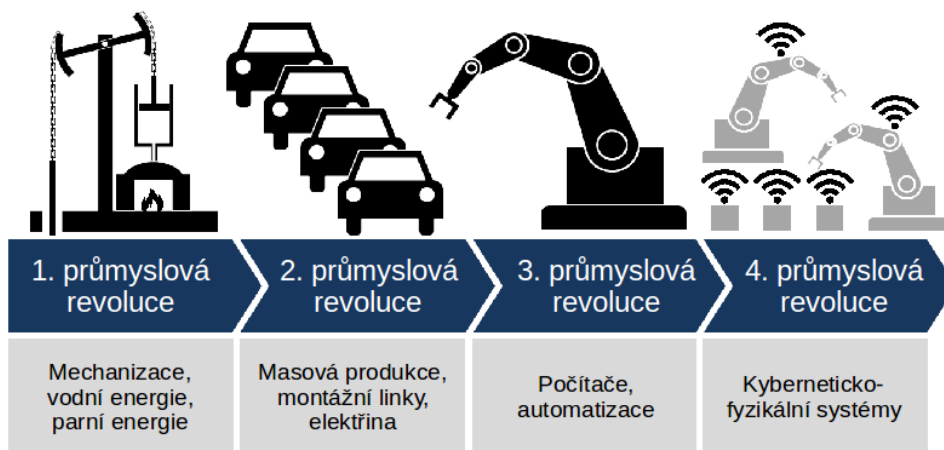
Obr. 6: Brousící kotouč [9]

2.7 Stroje na výrobu ozubení, závitů a vaček

Stroje zaměřené na výrobu konkrétních složitých tvarů. K výrobě ozubených kol se užívají například odvalovací frézky a odvalovací obrážky. Pro vytváření vaček jsou určeny speciální frézky. Závitů mohou být tvořeny na strojích jako jsou vrtačky a frézky pomocí nástrojů pro výrobu závitů (závitníků) nebo na speciální strojích.

3 PRŮMYSL 4.0

Průmysl 4.0 označuje čtvrtou průmyslovou revoluci, jejíž vize se prvně objevila v roce 2011. Dále byl v roce 2013 představen na veletrhu v Hannoveru dokument popisující koncept průmyslu 4.0. Snahou je vyvinout kyberneticko-fyzikální systémy a využívat je v chytrých továrnách. Tyto plně autonomní továrny by využívaly datová centra, internet věcí, 3D tiskárny, cloud computing, chytrou sensoriku, autokonfiguraci, autodiagnostiku, umělou inteligenci a další technologicky vyspělé systémy. Došlo by k úspoře peněz a času, rychlejší a flexibilnější výrobě a tím i ke zlepšení životního standardu. Čtvrtá průmyslová revoluce by měla mít za následek změnu pracovního trhu. Pracovníky s nižší kvalifikací s jednoduchou a opakující se pracovní náplní nahradí plně automatizované výrobní linky a centra. Na druhou stranu vzniknou nová pracovní místa pro vývoj a údržbu chytrých továren. Na ty však budou třeba kvalifikovanější pracovníci. Jelikož by bylo vše automatizované a řízené internetem a výpočetními systémy, vzniklo by riziko hackerských útoků a zneužití dat. Proto je třeba při postupu v této oblasti dbát co možná nejvyššího zabezpečení. [3]



Obr. 7: Přehled průmyslových revolucí [3]

3.1 Datová centra

Nazývaná také serverovny. Jedná se o specifický prostor, většinou samostatnou budovu, speciálně navrženou pro uchovávání počítačových systémů. Tyto prostory musí mít stabilní teplotní podmínky a nesmí být narušovány vlivy okolí, aby mohli servery pracovat spolehlivě a v nepřetržitém provozu. Hlavními aspekty těchto center jsou fyzická i požární bezpečnost, maximální dostupnost, spolehlivost, nepřetržitý dohled nad provozem a nepřetržitě zajištění provozu. [10]

4 OPTIMUM MASCHINEN

4.1 O společnosti

Optimum Maschinen je německá společnost se sídlem v Hallstadtu. Na trhu je více než 25 let a zabývá se vývojem, konstrukcí a výrobou jejich produktů. Spolupracuje s obdobně zaměřenými zahraničními partnery, a tak dosahuje vysoké dostupnosti po celé Evropě. Dále má pobočky v Jižní Americe, Saúdské Arábii a v Indonésii. Od roku 2003 vyrábí velkou část jejich obráběcích strojů ve vlastní továrně v Číně v Yangzhou. Vývoj, design a řízení kvality probíhá v Německu. [11]



Obr. 10: Továrna Optimum v Yangzhou [11]

4.2 Přehled produktů

Motto společnosti Optimum Maschinen je dosahovat vysokého standardu kvality jejich strojů. Kromě jejich vlastních výrobních zařízení jsou stroje vyráběny také jinými výrobci, kteří musí splňovat vysoké standardy kvality společnosti Optimum. Sortiment této německé značky nabízí širokou škálu strojů a nástrojů. Podstatnou část jejich produktů tvoří kovoobráběcí stroje, prodávají však i stroje pro lisování, 3D tiskárny, měřicí přístroje a různé příslušenství. [12]

4.2.1 Třískové kovoobráběcí stroje

- Vrtačky – stolní, sloupové
- Brusky a leštící stroje – univerzální brusky, kombinované brusky, dvojité brusky, leštící stroje
- Kovové okružní pily – ruční kotoučové
- Pily na kovové pásy – ruční, na ozubení, pokosové, dvojité pokosové,
- Konvenční frézky – klasické, nástrojové, univerzální
- Konvenční soustruhy
- CNC frézky, CNC soustruhy, CNC tréninkové balíčky



Obr. 11: Frézka OPTImill MH 25SV [12]

4.2.2 Beztržkové kovoobráběcí stroje

- Nůžky – pákové
- Ohýbací stroje – zakružovačky, kombinované ohýbací a řezací, skládací



Obr. 12: Kombinovaný ohýbací a řezací stroj SAR 1000 [12]

4.2.3 Lisy

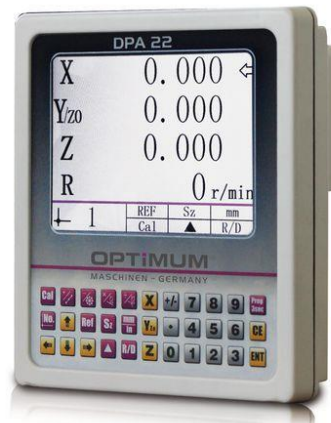
- Ruční dílenské
- Elektrické dílenské



Obr. 13: Ruční lis DDP 20 [12]

4.2.4 Měřicí přístroje

- Digitální senzory polohy
- Magnetické měřicí stojany
- Měřicí a zkušební desky
- Vodováhy
- Měřicí tyče



Obr. 14: Digitální senzor polohy DPA 22 [12]

4.2.5 Příslušenství

- Potřeby pro 3D tisk
- LED lampy
- Lupy
- Chladicí zařízení
- Náhradní díly pro prodávané stroje [12]



Obr. 15: LED dílenské světlo MWG 6-100 [12]

4.3 OPTIMUM OPTImill BF 20 L Vario

4.3.1 Popis

Stabilní stolní vrtačko-frézka pro přesnou, rychlou a bezpečnou práci. Disponuje elektronicky plynule regulovatelným pohonem, digitálním ukazatelem zdvihu pinoly a displejem s aktuálními otáčkami. Zobrazení zdvihu pinoly lze přepínat mezi metrickými a imperiálními jednotkami. Varianta L má oproti standardní verzi větší křížový stůl. Dále tato frézka nabízí možnost změny směru otáčení vřetene a dvojestupňovou převodovku, jež dovoluje dosahovat rychlosti až 3000 ot/min na rychlejším převodu. Frézovací hlava lze naklápět v úhlu -90° až 90° , to umožňuje obrábět a vrtat v různých úhlech. Upínání vřetene MK2/M10. Bezpečnostní vypínač má krytí IP 54 s nulovým spouštěčem.

Společnost Optimum tuto frézku přímo ve svém katalogu produktů na prodej nenabízí, ale je k dostání od celé řady prostředníků. Cena se pohybuje od 48 300 CZK do 54 300 CZK. V porovnání s cenami ostatních produktů podobného typu a funkcionality od značky Optimum se jedná o jednu z levnějších frézek. [13]



Obr. 16: OPTIMUM OPTImill BF 20 L Vario [13]

4.3.2 Technické specifikace

Tab. 1: Technické specifikace OPTIMUM OPTImill BF 20 L Vario [13]

Motor	230 V / 50 Hz / 850 W
Výkon vrtání	Ø max. 16 mm
Výkon frézování, stopková frézka	Ø max. 20 mm
Výkon frézování, nožová hlava	Ø max. 63 mm
Vyložení	185 mm
Kužel vřetene	MK2 / M10
Zdvih pinoly	50 mm
Úhel naklopení	+ / - 90°
Převodové stupně	2
Pracovní stůl: Délka / Šířka	700 mm / 180 mm
Rozsah posuvu v ose X	480 mm
Rozsah posuvu v ose Y	175 mm
Rozsah posuvu v ose Z	370 mm
T drážka: Velikost / Rozteč	12 mm / 35 mm
Rozměry: Výška / Hloubka / Šířka	860 mm / 670 mm / 550 mm
Celková hmotnost	103 kg
Otáčky na převodový stupeň „pomalu“	50 ot/min – 1400 ot/min
Otáčky na převodový stupeň „rychle“	100 ot/min – 3000 ot/min
Hluk (emise)	méně než 78 dB (A)

5 B&R AUTOMATION

5.1 O společnosti

Společnost specializující se na průmyslovou automatizaci B&R Industrial Automation GmbH byla založena Erwinem Berneckerem a Josefem Rainerem v rakouském Eggelsbergu roku 1979. [18] Hlavní sídlo se nachází ve zmíněném Eggelsbergu ve státě Horní Rakousko a od jeho založení se několikrát rozšiřovalo. Poprvé tomu bylo roku 1987 na 7 000 m², dále roku 2000 na 17 000 m² a v roce 2008 začalo další rozšíření. [14]



Obr. 17: Sídl společnosti B&R Eggelsberg rok 2000 [15]

Slogan „Perfection in automation“ inspiruje a vede společnost více jak 35 let. Během té doby se dostala mezi přední celosvětové hráče v průmyslové automatizaci. Zásadově si stojí za vývojem nejlepších možných řešení v oboru. [17] V roce 1980 společnost vytvořila první volně programovatelný logický řadič. Dále bylo na trh roku 1989 uvedeno průmyslové PC 2000. První modulární ovládací panely byly vydány roku 1991. V roce 1997 vyšlo vývojové prostředí Automation Studio. Roku 1999 první servomotory. Okolo roku 2001 vynalezla komunikační protokol Ethernet Powerlink, který pak začala využívat ve svých produktech. Roku 2005 B&R uvedla modulární řídicí systém X20, dále pak v roce 2012 vícedotykové panely HMI a roku 2013 ACOPOSmotor. V současnosti B&R nabízí velmi široký sortiment produktů v oblasti průmyslové automatizace. [19]



Obr. 18: Produkty společnosti B&R [16]

Do České republiky a Slovenska se firma dostala roku 1997 a nyní se v Česku nachází 7 poboček. [14] Hlavní pobočka se nachází v Brně, další jsou v Praze, Liberci, Ostravě, Plzni, Zábřehu a v Českých Budějovicích. B&R zaměstnává přes 3000 lidí ve více než 190 pobočkách ve více než 70 zemích. [19]

V dubnu roku 2017 se B&R stala dceřinou společností ABB. Toto spojení je zajímavé, protože to z ABB udělalo jedinou firmu na trhu, která nabízí své služby v celém spektru automatizace a nabízí tak komplexní portfolio automatizace pro zákazníky po celém světě. [20]

	Sensing & analytics	DCS	PLC / IPC servo motion	Industrial motion ¹	Robotics	Digital platform	Electrification ²
B&R							
ABB							
B&R + ABB							
Siemens							
Emerson							
GE							
Schneider							
Fanuc							
Honeywell							
Rockwell							
Yaskawa							
Yokogawa							
KUKA							

Obr. 19: Sloučení služeb ABB a B&R [20]

5.2 Přehled produktů

5.2.1 Průmyslové počítače

Jedná se o průmyslové počítače určené pro řízení automatizačních procesů. B&R rozděluje svoje průmyslové počítače na Automation PC a Panel PC. Ty se od sebe liší především tím, že Panel PC je pevně spojen s monitorem pro průmyslovou HMI. Průmyslové počítače od firmy B&R jsou navrženy a vyráběny tak, aby splnily požadavky průmyslových zákazníků na maximální robustnost, spolehlivost a dlouhodobou dostupnost. Automation PC a Panel PC skrývají spoustu výkonu. Používají nejnovější technologie, včetně poslední generace Intel Core i-série procesorů. Vyznačují se výhodami jako jsou výkon, energetická úspornost, odolnost, spolehlivost, přizpůsobivost a životnost. Spousta variant B&R průmyslových počítačů nabízí možnost provozu bez ventilátorů. Celý systém je navržený tak, aby byla optimalizována cirkulace vzduchu a stroje se nepřehřívali. Když je varianta bez ventilátorů zkombinována s CFAST kartou a SSD diskem, tak jsou tyto zařízení zcela bez rotujících součástí, což je velká výhoda pro bezúdržbový provoz. [19]



Obr. 20: Průmyslové počítače B&R [19]

5.2.2 Human machine interface (HMI)

Do této kategorie spadají průmyslové monitory, mobilní panely, ovládací panely a terminály.

Průmyslové monitory jsou jako automatizační panely ideálním vizualizačním zařízením pro průmyslové PC. Jsou k dostání v široké škále rozměrů displeje s dotykovou obrazovkou nebo více dotykovým displejem, případně s klávesnicí. Pro použití ve zvláště drsných prostředích jsou opatřeny krytím IP65.

Mobilní panely jsou ergonomické, lehké a extrémně odolné vůči nárazům. Tyto vlastnosti musí splňovat všechny mobilní panely. Umožňují monitorování na místě a bezpečný a jednoduchý provoz. Prodávají se ve velikostech displeje 7.0 palců a 10.1 palců.

Ovládací panely umožňují provozovat ovládání, řízení pohybu a HMI v jednom zařízení. Tím se tyto panely liší od terminálů. Díky škálovatelnému rozsahu výkonu jsou vhodné pro jednoduché systémy pásových dopravníků nebo pro robotické a CNC aplikace. Spadají sem produkty řady Power Panel C-Series. K dispozici je spousta velikostí displeje s analogovými odporovými dotykovými obrazovkami.

Terminály jsou kompaktní vzdálená zařízení HMI bez ovládání. Za terminály se označují produkty řady Power Panel T-Series. Lze je použít buď s integrovaným webovým prohlížečem, nebo jako klient VNC. Režim lze jednoduše nastavit v Automation studiu nebo pomocí interní konfigurace zařízení. [19]



Obr. 21: B&R terminály [19]

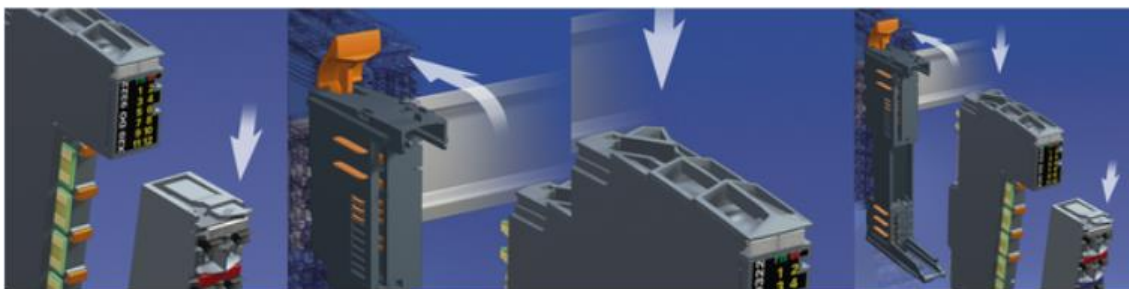
5.2.3 PLC systémy

S procesory Intel Atom pokrývá systém X20 celou škálu výkonu. Tento systém je mimořádně kompaktní a vysoce modulární díky své jedinečné konstrukci systému „slice“. Dokonale integrované připojení průmyslové sběrnice poskytuje nejvyšší stupeň volnosti pro decentralizované koncepce strojů a systémů. Existuje mnoho různých I/O karet. Systém X20, který je založen na zkušenostech získaných z aplikací po celém světě, četných rozhovorech se zákazníky a snaze o snazší, hospodárnější a bezpečnější použití, je novým univerzálním řešením pro jakýkoli automatizovaný úkol ve výrobě strojů a systémů. K dispozici jsou systémy X20 i ve verzi „coated“, které mají speciální lakování. Ty jsou schopny provozu v extrémních podmínkách a zvládají odolávat kondenzaci vody, žíravým plynům a teplotám -25 °C až 60 °C.



Obr. 22: Systém X20 [19]

System X20 byl navržen pro lištovou montáž v ovládacím rozváděči a díky tomu umožňuje připojit až 250 X20 I/O modulů (3000 kanálů). [19] Základním modulem systému X20 je CPU. To obsahuje procesor, RAM, FRAM, kompaktní flash paměť nebo flash paměť a rozhraní pro X20 moduly, RS232, ethernet, powerlink pro real time komunikaci a USB. Napájení tohoto modulu je 24 VDC. K základnímu modulu se dají přidávat I/O karty (slices), kterých je celá řada. Jsou karty pro digitální I/O, analogové I/O, měření teploty, řízení pohonů atd. Každý rozšiřující X20 modul se skládá ze 3 částí a to svorkovnice, elektronického modulu a sběrnice. Tyto převážně plastové části se do sebe zaklapnou a připojí k X20 CPU viz obr. 23. [17]



Obr. 23: Montáž rozšiřující X20 karty [19]

5.2.4 Řízení pohybu

Ve spojitosti s řízením pohybu B&R nabízí servopohony, frekvenční měniče, motory a převodovky.

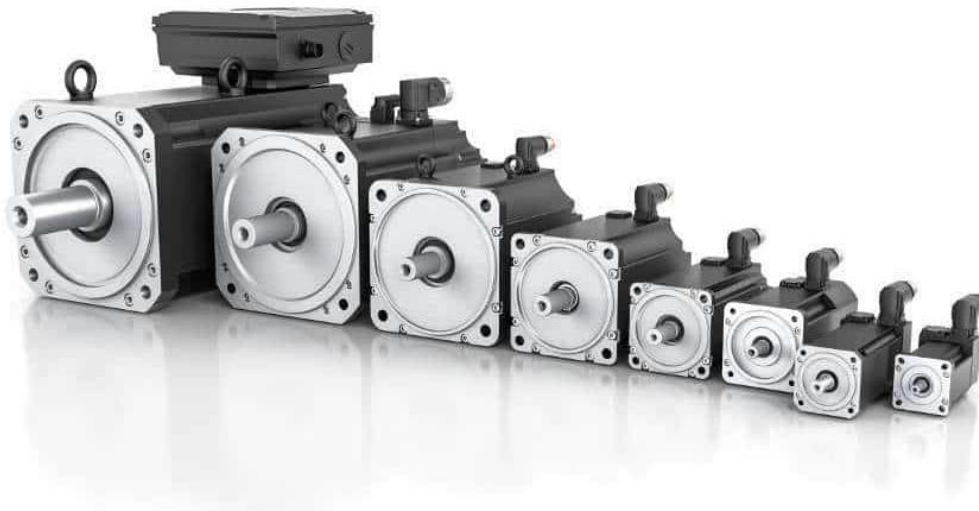
Servopohony této firmy se nazývají ACOPOS a jsou významnou součástí automatizačních řešení poskytovaných společnostmi B&R. Jsou kvalitní, robustné a bezpečné, o čemž přesvědčují výsledky četných zkoušek těchto řídicích prostředků. V průmyslové automatizaci jsou důležitým kritériem rychlé a přesné reakce na události nebo na okamžité změny ve výrobním procesu, proto servopohony ACOPOS pracují s velmi krátkými časy skenování a komunikačními cykly 400 μ s, což v regulační smyčce činí pouze 50 μ s.



Obr. 24: ACOPOS 1022 [19]

Frekvenční měniče ACOPOSinverter zahrnuje výkonový rozsah od 180 W do 75 kW. Instalační šířka činí pouze 45 mm nebo 60 mm, což představuje obrovský potenciál pro úsporu místa rozváděči. Měníče ACOPOSinverter jsou dokonalá varianta prořízení dopravních pásů, paletizátorů, balicích strojů, průmyslových myček, frézovacích strojů, míchaček, textilních strojů, čerpadel, ventilátorů, kompresorů a dalších.

Motory společnosti B&R lze aplikovat v široké oblasti použití. Nabízejí přímé pohony pro nejvyšší nároky na dynamiku a přesnost, dynamické motory pro vysoce moderní stroje, motory s vysokým momentem setrvačnosti, kompaktní servomotory pro kompaktní, úsporné řešení a krokové motory.



Obr. 25: B&R motory [21]

V nabídce této společnosti jsou také převodovky, konkrétně planetové. Standardní jsou jednostupňové s převodovým poměrem 3, 4, 5, 7, 8 nebo 10 a mají vůli $\leq 8 - \leq 15$ arcmin. Mimo ty jsou nabízeny i ve dvou nebo třístupňovém provedení. Prémiová řada těchto převodovek poskytuje vůli ≤ 1 arcmin. [19]

5.2.5 Vision systémy

B&R posouvá integrované strojové vidění na zcela jinou úroveň se svými novými vision systémy. Jde o první řešení strojového vidění, které lze bez problémů včlenit do automatizačního procesu. Tyto inteligentní kamery oplývají spoustou v průmyslu užitečných funkcí jako je detekce objektů, kontrola rozměrů, čtení čárových i QR kódu a tak podobně. Inteligentní kamerová technologie se neobejde bez inteligentního osvětlení, které je také v nabídce firmy. Světelné prvky jsou k dostání buď v integrované formě v kameře nebo jako externí zařízení a jsou synchronizovány se snímáním obrazu. Světla mají integrované ovládání a není k jejich řízení potřebný žádný další hardware. [19]



Obr. 26: B&R inteligentní kamera [19]

5.2.6 Dopravníkové technologie

Tato nová technologie s variantami ACOPOStrak a SuperTrak od B&R nabízí nezávislé, rychle se pohybující vozíky pomocí permanentního magnetu podél lineární motorové dráhy s dlouhým statorem. Pohyb vozíků lze individuálně konfigurovat, včetně proměnné rychlosti a zrychlení, jakož i seskupování a rozdělování várek. Díky velkému zvýšení provozní rychlosti se zvyšuje produktivita, efektivita i kvalita. Segmenty kolejnic jsou modulární, stačí si z nabízeného sortimentu vybrat různě zakřivené segmenty, které se následně spojí a vytvoří trať požadovaného tvaru. [19]



Obr. 27: B&R ACOPOStrak [19]

5.2.7 Mobilní automatizace

Další novinkou této společnosti jsou programovatelné automaty systém X90 navržené tak, aby odolávaly venkovním vlivům, extrémním teplotám, vibracím a tak dále. Tyto mobilní automaty jsou určeny pro zemědělství, lesnictví, konstrukční stroje a komunální vozidla. Jádrem mobilního ovládacího systému X90 jsou výkonné procesory ARM a multifunkční I/O kanály. Mezi základní rozhraní patří CAN, Ethernet a POWERLINK.

Pouzdro je z litého hliníku a nachází se v něm prostor až pro čtyři volitelné desky. Všechny produkty řady X90 zvládají provozní teploty $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ až $85\text{ }^{\circ}\text{C}$ a jsou odolné vůči vibracím, nárazům, soli, UV záření a oleji. [19]



Obr. 28: Systém X90 mobile [19]

5.2.8 Bezpečnostní technologie

Bezpečnostní technologie slouží k rychlé a bezpečné reakci na neočekávané situace. Jiné společnosti používají pevnou bezpečnostní logiku, která často vedla k poškození, úplnému vypnutí a delším prostojům. B&R přišlo s vlastní decentralizovanou a integrovanou bezpečnostní technologií, která je velice rychlá, inteligentní, bezpečná a nevyžaduje vždy vypnutí celého stroje, ale pouze pokud je to nutné. Využívá filozofii programování namísto pevného zapojení. Komunikace se uskutečňuje pomocí protokolu openSAFETY, což je první, zcela nezávislý komunikační protokol použitelný pro všechna řešení průmyslového ethernetu.

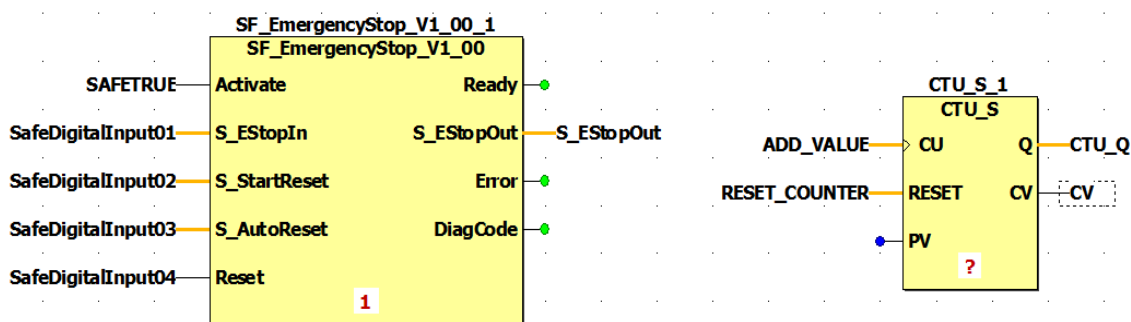
Protokol openSAFETY jako jediný protokol na světě umí přenášet zabezpečená data po libovolné sběrnici při použití principu Black Channel. Jeho základní vlastností je zajištění přijetí a zpracování zpráv všemi příjemci ve stejnou dobu. Používá se v kombinaci se sběrnici POWERLINK pro podstatné snížení odpovědních časů a zpracování v reálném čase.

Hardwarové bezpečnostní prvky se vyznačují žlutým zbarvením a nazývají se SafeLOGIC. Bezpečnostní programovatelný automaty SafeLOGIC jsou zodpovědní za zpracování veškerých základních bezpečnostních úloh. Kromě spuštění bezpečnostní aplikace mají také na starost správu konfigurací a parametrů. S dobou cyklu pouhých $800\text{ }\mu\text{s}$ představuje SafeLOGIC nejrychlejší bezpečnostní řešení na trhu.



Obr. 29: SafeLOGIC automat a I/O [19]

Aby byl proces programování bezpečnostní aplikace spolehlivý a jednoduchý, byl vyvinut speciální editor v Automation Studiu zvaný SafeDESIGNER. Pro splnění zmíněných požadavků není v tomto editoru příliš mnoho programování. Více než psaní kódu se zde užívají certifikované funkční bloky, které se virtuálně mezi sebou propojují.



Obr. 30: Automation Studio SafeDESIGNER

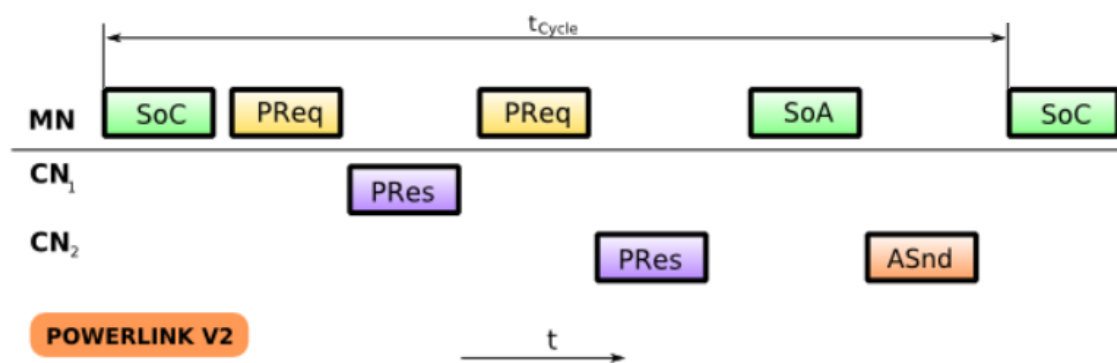
Hlavní výhody B&R bezpečnostní technologie:

- Individuální konfigurace – Možnost přizpůsobení specifickým bezpečnostní požadavkům bez ovlivnění úrovně zabezpečení.
- Zapojení bezpečné linky – Koordinovaně vyvolávané bezpečné události i při propojení strojů různých výrobců.
- Maximální škálovatelnost – Díky bezpečnostním jednotkám SafeLOGIC je B&R řešení škálovatelné a nákladově optimální.
- Maximální produktivita – Předcházení prostojům a výpadkům výroby.
- Globální instalace – Možnost implementace kdekoliv na světě díky mezinárodní certifikaci. [19]

5.2.9 Ethernet POWERLINK

Ethernet POWERLINK je otevřený ethernetový protokol pro propojení automatizačních komponent v reálném čase. Je založený na standardu Fast Ethernet, a proto dosahuje přenosové rychlosti 100 Mbit/s a přesnosti synchronizace ± 100 ns. Jelikož vychází ze standardu Ethernet, standardní komponenty (např. rozbočovače) a standardní nástroje (např. Wireshark, OmniPeek) mohou být normálně používány. Je podporován časově izochronní přenos cyklických I/O a pohybových dat spolu s asynchronní komunikací mezi síťovými uzly, část síťové šířky pásma je vyhrazena pro toto. První verze vyšla v roce 2001 a roku 2003 přišlo rozšíření na druhou verzi, kde byla k POWERLINK V1 přidána aplikační vrstva. Dá se to také zapsat jako POWERLINK V2 = POWERLINK V1 + CANopen. Z tohoto důvodu může být nazýván i „CANopen over Ethernet“.

Komunikace je kontinuálně opakována v konstantních intervalech (t_{Cycle}). Na začátku POWERLINK cyklu řídicí uzel (MN) pošle zprávu „Začátek Cyklu“ (SoC). Zpráva „Začátek Cyklu“ (SoC) je vyslána vícesměrově a může být přijata a zpracována všemi POWERLINK stanicemi v síti. V této zprávě nejsou posílány žádné aplikační data, je používána pouze pro synchronizaci. Dále řídicí uzel (MN) vysílá žádosti o hlášení (PReq) a podřízené uzly (CN1, CN2) odesílají odpověď na hlášení (PRes). Na konci časového intervalu (t_{Cycle}) je vyhrazena část pro asynchronní komunikaci mezi uzly. Ta začíná zprávou „Začátek asynchronní komunikace“ (SoA). V zobrazeném příkladu podřízený uzel CN2 přijímá přenosová práva pro asynchronní odeslání (ASnd) v asynchronní komunikaci. [19]



Obr. 31: Základní princip komunikace přes POWERLINK [19]

5.2.10 reACTION technologie

Produkt umožňující spouštění aplikačních programů přímo v I/O modulech řady X20 a X67. Data se již nepřenášejí do řídicího systému a tím se zkrátí reakční doba až na 1 μ s. Nalézá využití v časově extrémně náročných úlohách, kde konvenční způsob nestačí. Program se spouští lokálně, zatímco správa softwaru zůstává centrální. Programují se stejně jako běžné řešení. [19]

5.2.11 mapp technologie

Technologie mapp (modulární aplikační technologie) jsou přednaprogramované bloky, které slouží jako podpora pro vývojáře strojních a systémových aplikací. Často se opakující funkce jako správa alarmů, uvedení motorů do provozu, snímání obrazu, vizualizace stroje a podobně jsou efektivně naprogramovány a zabaleny v balících mapp komponent. Místo psaní složitých algoritmů si vývojář vloží do projektu mapp komponenty pro požadované funkce, nakonfiguruje je a může se věnovat vývoji strojového procesu. Důraz je kladen na flexibilitu, škálovatelnost, kvalitu a snadno pochopitelné rozhraní.

Je celkem 7 mapp balíků, které obsahují různé funkce:

- mappServices – Správa receptů, alarmový systém, OEE analýza, uživatelský systém, monitorování energie, databázový systém a další.
- mappControl – Ovládání jeřábů, hydrauliky, konstrukce filtru, konstrukce uzavřené smyčky a další.
- mappView – HMI aplikace pracující nezávisle na platformě a operačním systému.
- mappSafety – Správa bezpečnostních technologií.
- mappMotion – Pro řízení motorů od jednotlivých os po komplexní robotické a CNC aplikace.
- mappVision – Slouží pro ovládání inteligentních kamer a světel.
- mappCockpit – Určen pro diagnostiku a uvádění do provozu.

Výhody mapp technologií:

- Až 3x rychlejší vývoj aplikací. Mapp komponenty komunikují mezi sebou automaticky a tím šetří čas i peníze.
- Nižší náklady na životní cyklus. Nové a již existující mapp komponenty jsou zcela interoperabilní. Nižší potřeba softwarové údržby.
- Více času pro inovaci a optimalizaci procesů stroje.
- Možnost užití nejnovějších technologií. Mapp komponenty se neustále vyvíjí a nabízí nejnovější řešení pro ovládání složitých technologií. [19]

5.2.12 Automation Studio 4

Automation Studio je vývojové prostředí firmy B&R vydané roku 1997. Hlavním cílem tohoto nástroje je vytvořit jednotnou aplikaci pro programování všech produktů firmy, aby se minimalizovali náklady na školení, upevnila celková integrace a eliminovaly problémy s komunikací mezi inženýrskými disciplínami. Automation Studio umožňuje vývojářům programovat, zkoušet i optimalizovat procesy a algoritmy řízení, pohybové sekvence a vizualizační rozhraní, to vše v jediném vývojovém prostředí. Mohou tak být vytvářeny jakékoliv automatizační řešení od pohonů, přes vizualizaci až k integrované bezpečnostní technice.



Obr. 32: Aspekty vývojového prostředí Automation Studio 4 [19]

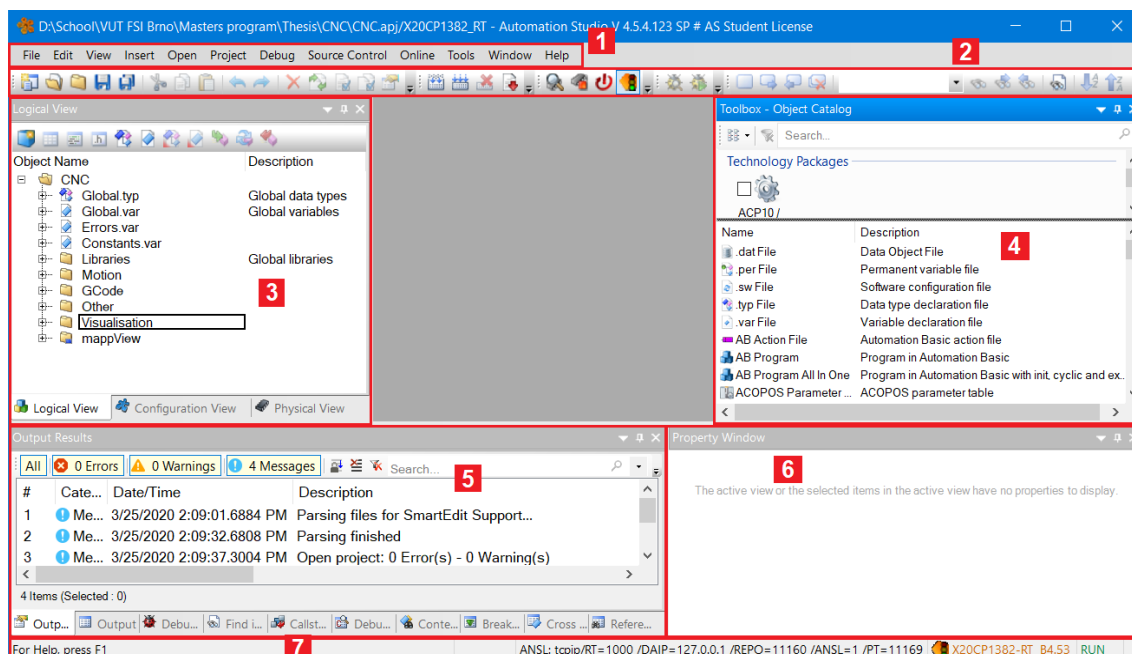
Čtvrtá generace tohoto nástroje je obzvláště přizpůsobena pro efektivnější a účinnější práci uživatelů. V tomto vývojovém prostředí je velké množství integrovaných nástrojů, modulů, knihoven a funkcí, které urychlují proces vývoje softwaru. Jednou z největších skupin podpůrných přednaprogramovaných modulů urychlujících práci jsou mapp komponenty, viz výše. [19] Celý prostředí je modulární, což ulehčuje orientaci v projektu a aktualizaci jednotlivých částí. Kde je to výhodné, je grafické zobrazení s funkcemi „grab and drag“ pro jednoduchou a rychlou práci. Příkladem je vytváření hardwarové konfigurace a tvorba vizualizace ať už pomocí mapView nebo pomocí Visual Components. V celé stromové struktuře projektu je možnost užívat metodu „copy and paste“, kterou ocení každý dobrý programátor. Jelikož je v dnešní době zapotřebí velmi rychlého vývoje softwaru, obsahuje Automation Studio realistické simulátory všech řídicích produktů společnosti. Tím je otevřena možnost paralelně pracovat na programování softwaru a na sestavování stroje a zapojování hardwaru, což velmi výrazně urychluje vývoj automatizačních řešení oproti starší metodě, kdy se nejdříve musel sestavit hardware a až pak se mohlo pracovat na softwaru. Aplikace Automation Studio nabízí programování ve všech jazycích IEC 61131-3 (IL, LD, SFC, ST, FBD, CFC) a také objektově orientované programování v jazyce C++. Tím je programátorům dána možnost pracovat v jejich preferovaném jazyce, ale také se tím usnadňuje integrace stávajících kódů. S možností přímé integrace všech sběrniceových systémů se otevírá celé spektrum dostupných periférií a poskytuje se optimální podpora pro integraci systémů třetích stran. [17]



Obr. 33: Podporované systémy třetích stran [19]

Stiskem klávesy F1 lze otevřít B&R Help Explorer, kde je mnoho užitečných rad a informací. Tento help obsahuje návody a příklady skoro ke všem funkcím a součástem vývojového prostředí. Je velmi přehledný, uživatelsky přívětivý a schopný připravit programátora, který nikdy Automation Studio ani neotevřel, k práci s tímto vývojovým prostředím na základní úrovni již během pár týdnů.

Základní orientace ve vývojovém prostředí Automation Studio 4:



Obr. 34: Orientace v Automation Studiu 4

1. Hlavní menu, ve kterém se nachází základní funkce pro práci s projektem, uživatelským přizpůsobením a dále funkce pro nahrávání a kompilaci projektu,

diagnostiku, připojení k hardwaru, stahování aktualizací a další. V závislosti na kontextu jsou různé funkce buď zakázané (šedé) nebo povolené.

2. Panely nástrojů poskytující rychlý a snadný přístup k často používaným funkcím v aplikaci Automation Studio. Lze je ovládat pouze myší. Stejně jako položky v záhlaví hlavní nabídky jsou ikony panelu nástrojů povoleny nebo zakázány v závislosti na aktuálním kontextu.
3. Okno Průzkumník projektu, jež obsahuje tři různé karty, z nichž každá poskytuje jiný pohled na projekt, který umožňuje jeho strukturování podle potřeby. Logical View představuje hardwarově nezávislé zobrazení aplikace, Configuration View je hardwarově závislé zobrazení aplikace a Physical View zobrazuje konfigurovaný hardware v hierarchickém nebo grafickém zobrazení.
4. Katalog objektů. Používá se pro rychlé a jednoduché vkládání programů, datových objektů a souborů do Logical View a Configuration View. Jeho obsah je závislý na aktuálním kontextu. Je v něm možné filtrovat podle typů položek nebo vyhledávat pomocí vyhledávacího pole.
5. Okno výstupu, obsahuje karty pro zobrazení různých zpráv (zprávy o kompilaci, hledání v souborech, ...) a ladící konzoli, kterou je také možné použít jako vstup.
6. Okno vlastností, které obsahuje vlastnosti vybraného objektu a nabízí možnost tyto vlastnosti upravovat.
7. Stavový řádek umístěný na spodním okraji aplikace Automation Studio uvádí všechny druhy stavových informací o projektu. Nejdůležitější v něm zobrazované informace jsou IP adresa a typ cílového systému, používaný Automation Runtime a status cílového systému.

Při tvorbě nového projektu jsou základními kroky nejdříve vybrat použité CPU. Dále v hlavním menu v záložce Project => Change Runtime Versions navolit požadované moduly, přidat hardware a virtuálně jej prodrátovat v Physical View, nakonfigurovat hardware, vložit program v požadovaném programovacím jazyce v Logical View, napsat řídicí kód a poslat projekt do cílového systému.

5.2.13 Scene Viewer

B&R Scene Viewer je 3D vizualizační software pro vytváření digitálních dvojčat kompatibilní s OpenGL. Je navržen pro podporu vývoje aplikací, především pro robotiku a CNC. Software poskytuje hotové modely, ale také umožňuje vytvářet vlastní objekty či importovat již vytvořené modely v CAD formátu. Pozice vložených objektů se mapují přes OPC UA na procesní proměnné v používaném řídicím hardwaru. Jakmile se hodnoty poloh změní, pošlou se do aplikace Scene Viewer a po jejich obdržení se objekt v zobrazované scéně pohne. Jde o nezávislý nástroj, který lze stáhnout z webových stránek B&R. [19]



Obr. 35: B&R Scene Viewer [19]

5.3 Průmyslová komunikace

5.3.1 PROFINET

Průmyslová komunikační sběrnice určená pro automatizační průmysl. Je založena na principu průmyslového Ethernetu. Využívá protokolu TCP/IP (Transmission Control Protocol/Internet Protocol), ten obsahuje řadu protokolů pro komunikaci v počítačových sítích. Je základním protokolem celosvětové sítě Internet. [19]

5.3.2 PROFIBUS

PROFIBUS začal jako německý projekt, který byl zahájen v roce 1987. Stal se jednou z nejdůležitějších průmyslových sběrnic na světě. S podílem více než 90 % všech zařízení se sběrnici PROFIBUS má protokol PROFIBUS DP. Jedná se o vysokorychlostní (12 Mb/s) a jednoduchý protokol pro klasické automatizační úkoly v oblasti výrobního inženýrství. PROFIBUS PA se vyznačuje tím, že poskytuje možnost implementovat jiskrově bezpečný provoz a podporovat zařízení prostřednictvím sběrnice procesního inženýrství. [19]

5.3.3 DeviceNet

DeviceNet je otevřený standard založený na protokolu CAN a standardizovaný v IEC 62026 a také v EN 50325. Na specifikaci protokolu a údržbu standardu DeviceNet dohlíží nezávislá a otevřená organizace uživatelů ODVA (Open DeviceNet Vendor Association). DeviceNet používá specifikaci CAN na spodních vrstvách modelu ISO/OSI (vrstvy 1-4) s několika omezeními. V horních vrstvách (5-7) používá DeviceNet Common Industrial Protocol (CIP) definovaný ODVA. [19]

5.3.4 Ethernet IP

Ethernet IP (Industrial Protocol) byl poprvé představen v roce 2001 a byl standardizován jako IEC 62413 v roce 2005. Je to široce používaný standard průmyslového Ethernetu a byl vyvinut pro automatizační průmysl. Díky úplné kompatibilitě s Ethernetem TCP/IP přináší jako hlavní výhodu možnost používat standardní programové a technické prostředky Ethernetu. [23]

5.3.5 EtherCAT

Celosvětově rozšířený protokol pro komunikaci v reálném čase typu „Master-Slave“. Velkou výhodou jsou cykly o krátkých časových intervalech a vysoká přesnost synchronizace. Je určen pro real-time komunikaci mezi řídicím zařízením a proměnným počtem vzdálených zařízení. Podporuje dobu cyklu až v desítkách μs díky maximálně efektivně využití šířce pásma. [24]

5.3.6 ModbusTCP

Jde o variantu z řady Modbus protokolů, což jsou komunikační protokoly určené pro dohled a řízení automatizačních zařízení. Modbus byl původně vyvinut společností Modicon a dnes je spravován organizací uživatelů Modbus-IDA. Modbus je otevřený aplikační protokol „Master Slave“, který lze použít na několika různých fyzických vrstvách. Je to protokol pro zasílání zpráv na aplikační vrstvě, umístěný v sedmé vrstvě modelu OSI. Poskytuje klient/server komunikaci mezi zařízeními připojenými na různé typy sběrnic nebo sítí. ModbusTCP znamená, že se protokol Modbus používá nad Ethernet TCP/IP. ModbusTCP je otevřená průmyslová síť Ethernet, kterou organizace Modbus-IDA ve spolupráci s internetovou inženýrskou pracovní skupinou (IETF) určila jako standard RFC pro internet. [25]

5.3.7 CAN bus

Sběrnice CAN zaznamenala velký úspěch, zejména ve výrobě strojů, a získává stále na významu. Vysoká odolnost proti rušení, vysokorychlostní přenos dat, snadné použití a deterministické chování v reálném čase patří mezi důvody tohoto úspěchu. CAN je ideální průmyslová sběrnice pro aplikace s normálním počtem vzdálených vstupů/výstupů a několika osami. CAN jako sběrnice dosahuje své limity, když pracuje s většími a složitějšími stroji. [19]

5.3.8 CANopen

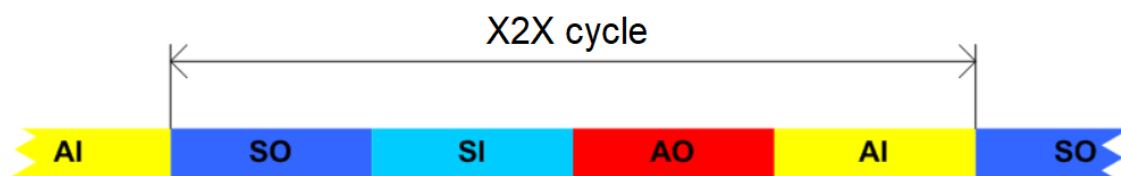
CANopen je komunikační protokol pro vrstvu 7 (uživatelská vrstva v modelu ISO/OSI), který se vyznačuje vysokou mírou flexibility při konfiguraci a používá CAN jako transportní médium vrstvy 2. Původně vyvinutý pro pohybové aplikace, je nyní zavedeným protokolem v celé řadě oblastí použití, jako je lékařské inženýrství, námořní navigace a dokonce automatizace budov. [19]

5.3.9 X2X Link

Všechny moduly systému X20 jsou propojeny jednotnou a ekonomickou základní deskou X2X link. Moduly jsou buď přímo vedle sebe nebo do vzdálenosti až 100 m od rozváděče. X2X Link garantuje nejvyšší odolnost proti rušení bez speciálních nástrojů díky krouceným měděným kabelům. Hlavní ideou X2X Linku je decentralizace stojanového systému základní desky. To poskytuje nejen univerzální vzdálenou základní desku, která zajišťuje komunikaci mezi moduly sběrnice a kabelem X2X Link, ale umožňuje to také

tuto komunikaci bez převodníků nebo jakékoliv ztráty výkonu. Všechny moduly X2X jsou spojeny mezi sebou přímým spojením typu point to point. Každý modul má X2X vysílač a X2X přijímač. Všechny data přijímána přijímačem jsou okamžitě předávána vysílači. Signál je poté kompletně přepracován.

X2X protokol definuje cyklus s pevnou délkou. Tento cyklus obsahuje čtyři části (frames), které jsou opakovaně posílány. Nejkratší doba cyklu je 100 μ s a může být vybrána jakákoliv doba cyklu s krokem 1 μ s. První část cyklu je vymezena pro synchronní výstupní data, která jsou komunikována z masteru do modulů (SO). Druhá část zodpovídá za synchronní vstupní data, posílaná z modulů do masteru (SI). Třetí úsek patří asynchronní komunikaci výstupních dat, jež probíhá sporadicky z masteru do modulů (AO). Poslední, čtvrtá část cyklu je určena pro sporadické odesílání asynchronních vstupních dat z modulů do masteru (AI). Celý tento proces řídí Automation Runtime, což je operační systém řídicích produktů firmy B&R. [19]



Obr. 36: Cyklus X2X protokolu [19]

5.3.10 OPC UA

Open Platform Communications Unified Architecture (OPC UA) je mezinárodní standard pro bezpečnou, spolehlivou, na výrobci a platformě nezávislou výměnu informací v průmyslové komunikaci. Byl vydaný v roce 2008 a je standardizovaný společností OPC Foundation v normě IEC 62541. Založeno na server klient principu, OPC UA dovoluje kompletní komunikaci z ERP (Enterprise Resource Planning) systémů k individuálním pohonům a sensorům a zároveň přináší sémantickou interoperabilitu do kybernetických systémů. OPC UA je flexibilní, zcela nezávislý a významným způsobem přispívá k úspěchu čtvrté průmyslové revoluce. [19]

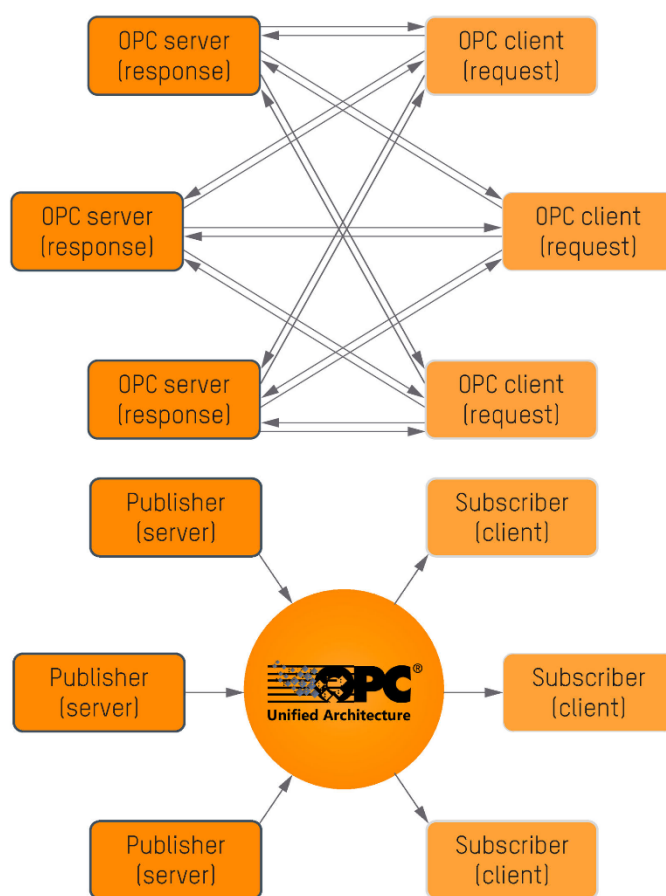
Služby OPC UA:

- Objevovací služby – Slouží klientům pro zjištění, jaké objekty, druh a typ dat a jaká metadata jsou k dispozici a jak jsou propojeny objekty mezi sebou.
- Služby sledování – Služby pro klienty k identifikaci, jaký druh dat je k dispozici pro oznámení. Klienti mohou rozhodovat, jak velké změny chtějí sledovat a jak často.
- Dotazovací služby – Služby pro doručování hromadných dat klientovy.
- Služby uzlů – Služby, které mohou klienti použít k vytváření, mazání a úpravě struktury dat udržovaných serverem.
- Metodické služby – Používány k volání funkcí spojených s objekty. [26]

5.3.11 OPC UA přes TSN

OPC UA se stalo populárním řešením pro širokou škálu průmyslových aplikací, ale když přijde na komplexní aplikace jako ovládání pohybu, bezpečnostní aplikace a komunikace v reálném čase, OPC UA má své limity. Proto vznikla iniciativa k vytvoření OPC UA over TSN, které rozšiřuje klasické OPC UA o „publish subscribe“ model a „Time Sensitive Networking“ (TSN) standard Ethernetu.

Doteď bylo OPC UA založeno na principu klient server, kde klient zažádal o informaci a obdržel odpověď od serveru. V případě velkého množství uzlů v síti má tento princip limity, proto byla přidána architektura publikovat odebírat (publish subscribe). Tato architektura umožňuje komunikaci mezi jedním/mnoha a mnoha/mnoha uzly. Server pošle data síti (publish) a každý klient může tyto data přijmout (subscribe).



Obr. 37: Model server-klient (nahore), rozšířený model publikovat-odebírat (dole) [19]

Model publikovat odebírat sám o sobě nedává OPC UA schopnost komunikace v reálném čase. Z tohoto důvodu se OPC UA Foundation přiklonila k časově senzitivnímu síťování (Time Sensitive Networking), které přidává množství funkcí reálného času Ethernetovému standardu IEEE 802. Mezi nimi je schopnost garantovat přesné časové okno, během kterého mají být data doručena. [19]

6 G-KÓD

G kód je nejpoužívanější programovací jazyk pro počítačem číslicově řízeních (CNC – Computer Numerical Control) obráběcích strojů. Tento programovací jazyk je definován normou ISO, ale vzniklo z něj mnoho různých variant, které si výrobci přizpůsobují svým zařízením a účelům. Kromě obráběcích strojů jako například soustruhů, frézek, strojů pro řezání laserem, vodním paprskem a podobně je tento programovací jazyk taky užíván pro 3D tiskárny. G-kód říká stroji jakým způsobem a kam se má pohnout v kartézském souřadnicovém systému.

6.1 Historie

První verze numericky řízeného programovacího jazyka byla vydána MIT v 50. letech 20. století. V dalších dekádách bylo různými organizacemi vyvinuto mnoho dalších implementací využívajících G-kód. Hlavní standardizovaná verze byla ustanovena organizací Electronic Industries Alliance na začátku 60. let 20. století. Finální revize byla schválena v únoru roku 1980 s názvem RS-274-D. Tato implementace si napříč státy získala i jiné názvy jako ISO 6983, DIN 66025, PN-73M-55256 a další.

```
G90*
G01*
X000000Y000000D02*
X003920Y006991D02*
X004304Y006832D01*
X005005Y006631D01*
X005315Y006391D01*
X005591Y006115D01*
X005831Y005805D01*
```

Obr. 38: Ukázka G-kódu verze RS-274-D [33]

G-kód začínal jako prostý programovací jazyk bez smyček, názvu proměnných, podmíněných operátorů a podobně. Dnešní implementace obsahují jazykové funkce a makra blížíci se vyšším programovacím jazykům. Navíc všichni hlavní výrobci umožňují přístup k PLC datům jako jsou informace o pozicích a nástrojích pomocí proměnných. Tato možnost zjednodušuje vývoj automatizačních aplikací. [32]

6.2 Syntaxe

Každý řádek kódu představuje jednu instrukci. Instrukce jsou vykonávány postupně jak jdou za sebou. Na začátku každého řádku s instrukcí bývá označení čísla instrukce písmenem N a potom většinou násobky čísla 10, není to však podmínkou. Po číslu instrukce se píše mezera a pak G nebo M funkce s jejich parametry. G funkce jsou užívány pro pohyb nástroje v souřadnicovém systému, zatímco M funkce se uplatňují například při zapínání otáček vřetene, spouštění chlazení a podobně.

Tab. 2: Nejčastěji používané parametry funkcí G-kódu

Absolutní nebo inkrementální natočení A, B, C	A, B, C
Průměr nástroje	D
Rychlost posuvu nástroje po dráze	F
Úhlová délka kružnice ve stupních	H
Pozice X, Y, Z středu kružnice	I, J, K
Číslo instrukce	N
Poloměr kružnice při kruhové interpolaci	R
Rychlost otáček	S
Číslo nástroje	T
Absolutní nebo inkrementální pozice X, Y, Z	X, Y, Z

6.3 G funkce

Tab. 3: Nejběžnější G funkce

Rychloposuv s lineární interpolací	G00
Pracovní posuv s lineární interpolací	G01
Kruhová interpolace ve směru hodinových ručiček	G02
Kruhová interpolace proti směru hodinových ručiček	G03
Čekací doba	G04
Výběr pracovní roviny X-Y	G17
Výběr pracovní roviny Z-X	G18
Výběr pracovní roviny Y-Z	G19
Deaktivace kompenzace průměru nástroje	G40
Kompenzace průměru nástroje zleva	G41
Kompenzace průměru nástroje zprava	G42
Absolutní souřadnicový systém	G90
Relativní souřadnicový systém	G91

6.4 M funkce

Tab. 4: Nejběžnější M funkce

Programové zastavení	M00
Otáčky vřetene ve směru hodinových ručiček	M03
Otáčky vřetene proti směru hodinových ručiček	M04
Výměna nástroje	M06
Konec hlavního programu	M30

7 HARDWARE

Tato kapitola je zaměřená na popis veškerého hardwaru, který byl zapotřebí pro robotizaci frézky OPTIMUM OPTImill BF 20 L Vario z konvenční varianty na počítačem numericky řízenou neboli CNC variantu. V dalších podkapitolách je sepsaný všechny hardware pro dosažení tohoto cíle. Tento hardware je dělený na řídicí, úchyty os, protizávaží osy Z, ovládací panel a ostatní hardware.

7.1 Řídicí hardware

Řídicí hardware má za úkol ovládat nejdůležitější funkce stroje. Základním prvkem je programovatelný automat (PLC), v němž se odehrává řídicí program. PLC pohybuje s motory pomocí modulů pro krokové motory a zároveň získává informace o polohách, rychlostech a dalších parametrech z jejich enkodérů. Tím umožňuje řídicí hardware stroji pohyb v kartézském souřadnicovém systému. Dále PLC zastává funkci zapínání a vypínání vřetene a světla frézky pomocí modulu výstupní karty, která je základní částí tohoto programovatelného automatu. V neposlední řadě počítá a řídí dekodování G-kódu, zpracování G-kódu, práci se soubory, mappView server pro komunikaci s vizualizací a jiné. Všechny řídicí hardware kromě motorů je napájen 24 V zdrojem EA-PS 3032-10 B od společnosti Elektroautomatik, motory jsou napájeny 24 V zdrojem OPS110.1 od firmy B&R. V tab. 5 je vypsán souhrn řídicího hardwaru. Všechny komponenty, vyjma napájecího zdroje 24 V, byly zakoupeny od společnosti B&R.

Tab. 5: Souhrn řídicího hardwaru

Typ prvku	Označení	Počet
Napájecí zdroj 24 V (B&R)	OPS110.1	1 ks
Napájecí zdroj 24 V (Elektroautomatik)	EA-PS 3032-10 B	1 ks
Programovatelný automat	X20CP1382-RT	1 ks
Modul krokových motorů (X67)	X67SM2436	1 ks
Modul krokových motorů (X20)	X20SM1426	1 ks
Modul krokových motorů (ACOPOSmicro)	80SD100XD.C044-01	1 ks
Modul pro komunikaci se systémem X67	X20BT9400	1 ks
Krokový motor	80MPF5.250S114-01	2 ks
Krokový motor	80MPF3.250S114-01	1 ks
Vizualizační panel	6PPT30.0702-20B	1 ks

7.1.1 Napájecí zdroje

Pro napájení řídicí techniky byly do hardwarové konfigurace zakomponovány 2 napájecí zdroje. První z nich je programovatelný, laboratorní napájecí zdroj od společnosti

Elektroautomatik s označením EA-PS 3032-10 B, který napájí vizualizační panel, enkodéry modulu ACOPOSmicro, programovatelný automat a z něj dále rozšiřující karty a modul X67. Je nastaven na výstupní napětí 24 V a proud 0.06 A.



Obr. 39: Napájecí zdroj 24 V EA-PS 3032-10 B [35]

Tab. 6: Parametry napájecího zdroje EA-PS 3032-10 B [35]

Vstupní napětí	115 V / 230 V AC
Vstupní frekvence	50 Hz / 60 Hz
Výstupní napětí	0 až 32 V DC
Výstupní proud	0 až 10 A
Výstupní výkon	320 W
Počet výstupů	1
Pracovní teploty	0 °C až 40 °C
Rozměry	(240 x 120 x 300) mm
Hmotnost	10 kg

Druhý napájecí zdroj s označením OPS110.1 je od firmy B&R a napájí motory připojené na modul pro krokové motory ACOPOSmicro 80SD100XD.C044-01 a motor zapojený na modulu X67SM2436. Jeho výstup není programovatelný a je pevně nastaven na napětí 24.5 V a proud 10 A.



Obr. 40: Napájecí zdroj 24 V OPS110.1 [19]

Tab. 7: Parametry napájecího zdroje OPS110.1 [19]

Vstupní napětí	115 V / 230 V AC
Vstupní frekvence	47 Hz až 63 Hz
Výstupní napětí	24 až 28 V DC (výchozí 24.5 V \pm 0.5 %)
Výstupní proud	8.6 A až 10 A / 10.3 A až 12 A
Výstupní výkon	240 W / 288 W
Počet výstupů	2
Pracovní teploty	0 °C až 70 °C
Rozměry	(120 x 124 x 102) mm
Hmotnost	0.98 kg

7.1.2 Programovatelný automat

V programovatelném automatu se vykonává hlavní, řídicí program pro ovládání celého stroje. Byl vybrán automat X20CP1382-RT, který disponuje dostatečnými parametry pro splnění cílů tohoto projektu a navíc je i dostačující pro budoucí plánované rozšiřování projektu. Parametry PLC jsou uvedené v tab. 8.



Obr. 41: Programovatelný automat X20CP1382-RT [19]

Tab. 8: Parametry automatu X20CP1382-RT [19]

CPU	Intel x86 400 MHz
Napájení	24 V
Rozhraní	Ethernet, POWERLINK, 2 x USB
Digitální vstupy	14 standardních, 4 vysokorychlostní
Digitální výstupy	4 standardní, 4 vysokorychlostní
Digitální vstupy/výstupy (měnitelné)	4
Analogové vstupy	2
Flash paměť	2 GB, integrovaná
SDRAM	256 MB DDR3
reACTION technologie	Ano
Bezvětrákový	Ano
Baterie	Ne
Hodiny reálného času zálohované baterií	Ano

7.1.3 Moduly krokových motorů

Pro řízení motorů byly do konfigurace nainstalovány 3 typy modulů pro krokové motory, které dovolují řídit dohromady až 5 krokových motorů. K tomuto rozhodnutí bylo dospěno s ohledem na budoucí rozšiřování projektu a implementaci frézky do buňky ve smyslu průmyslu 4.0.

První modul pro řízení krokového motoru je připevněn přímo na PLC jako rozšiřující karta. Tento modul je systémem X20 a konkrétně jde o typ X20SM1426. Ten slouží k řízení jednoho krokového motoru a obsahuje rozhraní pro zapojení inkrementálního enkodéru. Komunikaci s PLC řeší komunikačním protokolem X2X link. Na tomto modulu není v současné době připojený žádný motor.



Obr. 42: Modul pro krokové motory X20SM1426 [19]

Tab. 9: Parametry modulu pro krokové motory X20SM1426 [19]

Maximální počet řízených motorů	1
Napájení modulu	24 V
Nominální napětí	24 V - 15 % / + 20 %
Nominální proud	Až 1 A (1.2 A špička)
Frekvence PWM	38.5 kHz
Počet mikrokroků	256
ABR inkrementální enkodéry	1
Integrovaná detekce motoru	Ano
Digitální vstupy	4

Osa X je řízena modulem pro krokové motory X67SM2436. Ten slouží k řízení až 2 krokových motorů, obsahuje 2 inkrementální enkodéry a pro komunikaci s PLC využívá komunikační protokol X2X link.



Obr. 43: Modul pro krokové motory X67SM2436 [19]

Tab. 10: Parametry modulu pro krokové motory X67SM2436 [19]

Maximální počet řízených motorů	2
Napájení modulu	24 V
Nominální napětí	Od 24 V do 38.5 V \pm 25 %
Nominální proud	Až 3 A (5 A špička)
Frekvence PWM	38.5 kHz
Počet mikrokroků	256
ABR inkrementální enkodéry	2
Integrovaná detekce motoru	Ano

Strojní osy Y a Z jsou ovládány modulem ACOPOSmicro pro řízení krokových motorů, konkrétně typem 80SD100XD.C044-01. Ten také slouží k řízení až 2 krokových motorů, obsahuje 2 inkrementální enkodéry a pro komunikaci s PLC využívá komunikační protokol X2X link.



Obr. 44: Modul pro krokové motory 80SD100XD.C044-01 [19]

Tab. 11: Parametry modulu pro krokové motory 80SD100XD.C044-01 [19]

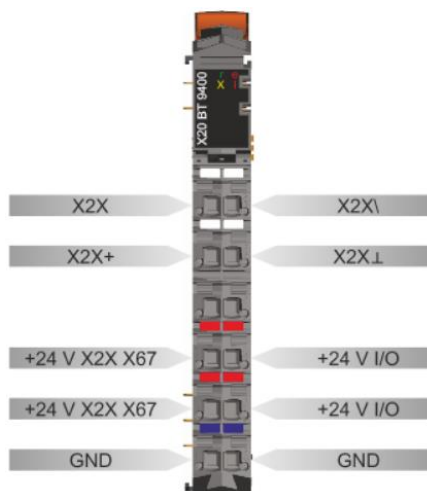
Maximální počet řízených motorů	2
Napájení modulu	24 V
Nominální napětí	Od 24 V do 64 V \pm 25 %
Nominální proud	Až 10 A (15 A špička)
Frekvence PWM	38.5 kHz
Počet mikrokroků	256
ABR inkrementální enkodéry	2
Integrovaná detekce motoru	Ano

Při porovnání těchto 3 typů modulů pro řízení krokových motorů zjistíme, že se liší především nominálním napětím a proudem. Z toho můžeme usoudit, že modul ACOPOSmicro 80SD100XD.C044-01 je schopný ovládat motory s nejvyšším kroutícím momentem z těchto modulů, jelikož má nejvyšší nominální napětí a proud na motorech. Proto bylo rozhodnuto o použití tohoto modulu pro strojní osy Y a Z, které vykazují při pohybu větší odpor než strojní osa X.

7.1.4 Modul pro komunikaci se systémem X67

Pro připojení a komunikaci systému X20 se systémem X67 je jednoduše přidána rozšiřující karta X20BT9400 na konec bloku X20. Ta umožňuje délky segmentů až

100 m. Tento převodník také poskytuje napájecí napětí X2X link pro systém X67. Je nezbytně nutné, aby byla tato karta zapojena na slotu PLC nejvíce vpravo. [19]



Obr. 45: Modul X20BT9400 [19]

7.1.5 Motory

Motory slouží k ovládní pohybu jednotlivých os stroje. Jsou spojeny se závitovými tyčemi pomocí pružných spojek a ke stroji připevněny plastovými úchyty, vytisknutými na 3D tiskárně. Pružné spojky mají vnitřní průměr díry u motoru 8 mm, zatímco na straně závitové tyče stroje průměr 10 mm. Z každé strany spojky jsou 2 šrouby. Šroub s válcovou hlavou a vnitřním šestihranem M4, po jehož dotažení se svírá díra příslušné strany a stavěcí šroub s vnitřním šestihranem (červík) M3, který tlačí na hřídel v díře. Spojky nemají drážky pro pera, proto jde čistě o spojení silové pomocí tření, nikoliv o tvarový spoj.



Obr. 46: Pružná spojka vnitřní průměr z 8 mm na 10 mm [34]

K pohybu s horizontální osou stroje X byl vybrán motor 80MPF3.250S114-01, zatímco horizontální osa stroje Y a vertikální osa stroje Z jsou ovládné motory 80MPF5.250S114-01.



Obr. 47: Motor 80MPF3.250S114-01 [19]

Tab. 12: Parametry motoru 80MPF3.250S114-01 [19]

Nominální proud	2.5 A
Odpor	1.52 Ω
Induktance	5.6 mH
Moment setrvačnosti rotoru	440 gcm ²
Blokovací moment	1.2 Nm
Přidržovací moment	1.7 Nm
Krokový úhel	1.8 °
Maximální teplota povrchu	95 °C
Typ hřídele	D-cut
Enkodér	Inkrementální ABR
Stupeň ochrany	IP65
Maximální radiální náklad	75 N
Maximální axiální náklad	Menší než hmotnost motoru
Hmotnost	1 kg
Rozměr opěrné plochy	60x60 mm
Délka	107.3 mm



Obr. 48: Motor 80MPF5.250S114-01 [19]

Tab. 13: Parametry motoru 80MPF5.250S114-01 [19]

Nominální proud	2.5 A
Odpor	2.4 Ω
Induktance	11.2 mH
Moment setrvačnosti rotoru	920 gcm ²
Blokovací moment	2.5 Nm
Přidržovací moment	3.5 Nm
Krokový úhel	1.8 °
Maximální teplota povrchu	95 °C
Typ hřídele	D-cut
Enkodér	Inkrementální ABR
Stupeň ochrany	IP65
Maximální radiální náklad	75 N
Maximální axiální náklad	Menší než hmotnost motoru
Hmotnost	1.5 kg
Rozměr opěrné plochy	60x60 mm
Délka	138.6 mm

7.1.6 Vizualizační panel

K ovládání stroje je zapotřebí vytvořit rozhraní mezi člověkem a strojem neboli HMI. Pro tento účel byl do hardwarové konfigurace zapojen power panel 6PPT30.0702-20B, na kterém běží servisní vizualizace. Vyvinutá vizualizace je tzv. mappView, jejíž konceptem je, že se spousta věcí zpracovává i na straně klienta, tedy zobrazovacího panelu. Panel 6PPT30.0702-20B je panel z výkonnostní řady, která zvládá jen nejjednodušší objekty tohoto typu vizualizace a navíc jen malý počet těchto objektů. Proto byly vytvořeny 2 vizualizace. Jedna byla co nejvíce zjednodušená a optimalizovaná a slouží jako servisní vizualizace zobrazovaná na panelu 6PPT30.0702-20B. Druhá vizualizace je mnohem komplexnější a náročnější, ta se zobrazuje na jakémkoliv zařízení, které disponuje wifi připojením a má webový prohlížeč. Mezi tyto případy patří počítače, mobily, tablety a podobně. Power panel je k PLC připojený ethernetovým kabelem, na kterém běží OPC UA protokol.



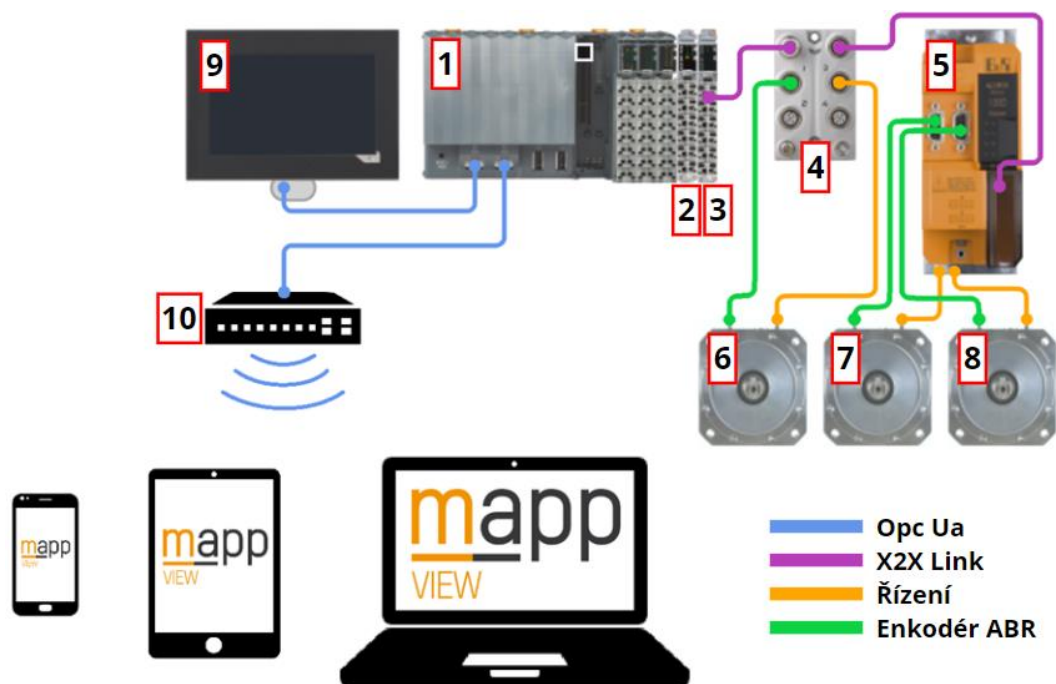
Obr. 49: Power panel 6PPT30.0702-20B

Tab. 14: Parametry power panelu 6PPT30.0702-20B [19]

Operační systém	PPT30 systém
Procesor	ARM Cortex A8
Frekvence procesoru	1 GHz
Flash paměť	512 MB
DRAM	256 MB
Typ displeje	Color TFT
Uhlopříčka	7.0 "
Rozlišení	WVGA, 800 x 480 px
Počet barev	16.7 milionu
Typ dotykového displeje	AMT
Technologie dotykového displeje	Analogový odporový
Rozhraní	Ethernet, 2 x USB
Nominální napětí	24 V

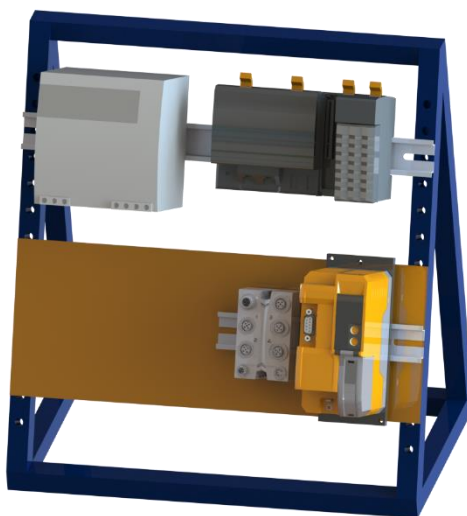
7.1.7 Schéma zapojení

Na obrázku níže můžete vidět schéma zapojení s označením jednotlivých komponent a s barevným rozlišením komunikační sběrnic, kterými jsou mezi sebou navzájem propojeny. Zařízení pod komponentou „10“ představují jakákoliv zařízení, které mají wifi připojení a webový prohlížeč.



Obr. 50: Schéma zapojení řídicího hardwaru

1. Programovatelný automat X20CP1382-RT
2. Modul pro ovládání 1 krokového motoru X20SM1426
3. Modul pro komunikaci s modulem X67 X20BT9400
4. Modul pro ovládání 2 krokových motorů X67SM2436
5. Modul ACOPOSmicro 80SD100XD.C044-01 pro ovládání 2 krokových motorů
6. Motor 80MPF3.250S114-01
7. Motor 80MPF5.250S114-01
8. Motor 80MPF5.250S114-01
9. Power panel 6PPT30.0702-20B
10. Router AirLive N.Mini



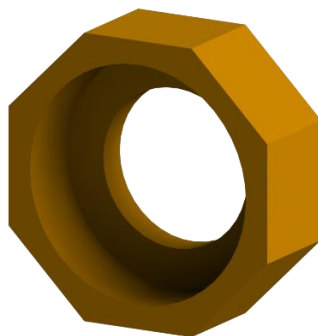
Obr. 51: Rozložení hardwaru na rozváděči

7.2 Úchyty os

Kromě spojení hřídelí motorů se závitovými tyčemi jednotlivých os stroje musely být také motory stabilně připevněny ke konstrukci frézky. K tomu byly odmontovány ruční madla pro otáčení se závitovými tyčemi a vymodelovány a vytisknuty na 3D tiskárně plastové úchyty. Tyto úchyty byly navrženy individuálně pro každou osu zvlášť kvůli vždy jiným možnostem přišroubování úchytu ke konstrukci stroje. Motory jsou k úchytům přišroubovány vždy čtyřmi metrickými šrouby M4 x 35 s válcovou hlavou a vnitřním šestihranem a šestihrannými maticemi M4 s podložkou. Způsob přišroubování úchytů ke stroji je individuální a bude popsán v následujících podkapitolách.

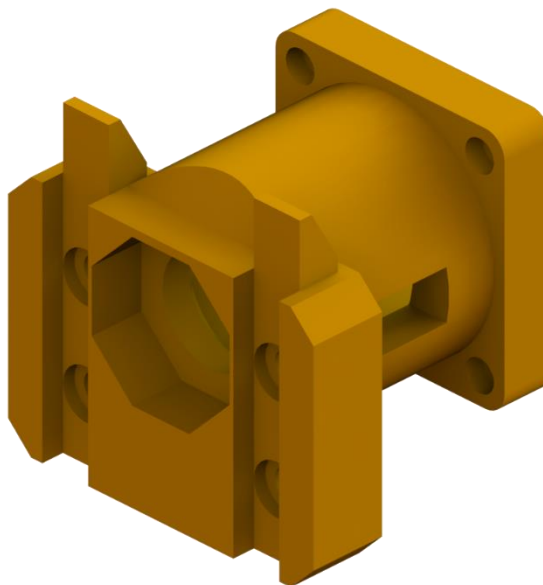
7.2.1 Úchyt osy X

Jako první byl navržený úchyt pro strojní osu X. Tento úchyt jako jediný zastává i funkci uložení ložiska pro uložení závitové tyče. Ložisko je nalisováno do plastového osmihranného uložení, a to je potom vloženo do úchytu, kde zabraňuje protočení svým tvarem. Bylo použito ložisko kuličkové jednořadé, oboustranně kryté pryžovým těsněním s označením 6200-2RS. Vnější průměr ložiska je 30 mm, vnitřní průměr 10 mm a šířka 9 mm.



Obr. 52: Osmihranné uložení ložiska 6200-2RS v úchytu osy X

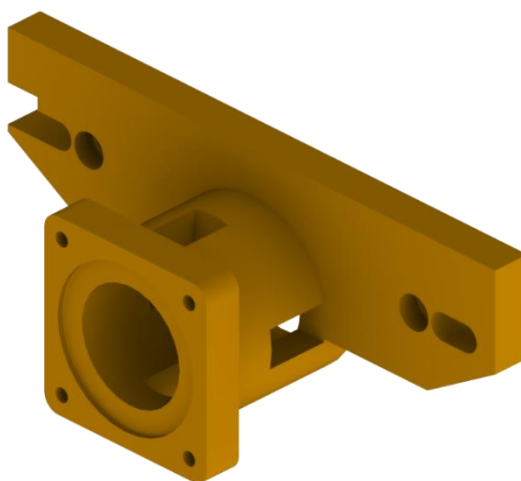
Kromě uložení ložiska je úchyt pro osu X jedinečný i speciálními výřezy pro ocelové plošky s rozměry (75 x 10 x 5) mm. Ty slouží jako detekční plocha pro jeden ze způsobů referování stroje. Mezi ocelovými ploškami a plastovým úchytem se ještě nachází šestihranné matice M6, které zabraňují přenosu sil na plastové části úchytu při kolizi pojezdu X s tímto úchytem. Ostatní úchyty výřezy pro ocelové plošky nemají, protože v žádném případě nehrozí jejich kolize s pohybujícími se částmi stroje. Rozměry modelu byly navrženy s ohledem na šířku ložiska, délku válcových konců hřídelí, délku a průměr pružné spojky a na rozmístění šroubů pro připevnění k motoru a ke stroji. Pro upnutí úchytu ke stroji jsou použity 4 šrouby M6 s válcovou hlavou a vnitřním šestihranem. Pro vložení a dotažení šroubů pro upnutí ke stroji a pro spojení pružné spojky s hřídelí závitové tyče disponuje úchyt dvěma horizontálními výřezy po 180°. Výkres úchytu X viz příloha A, výkres 1A-20-1.



Obr. 53: Úchyt osy X verze 2

7.2.2 Úchyt osy Y

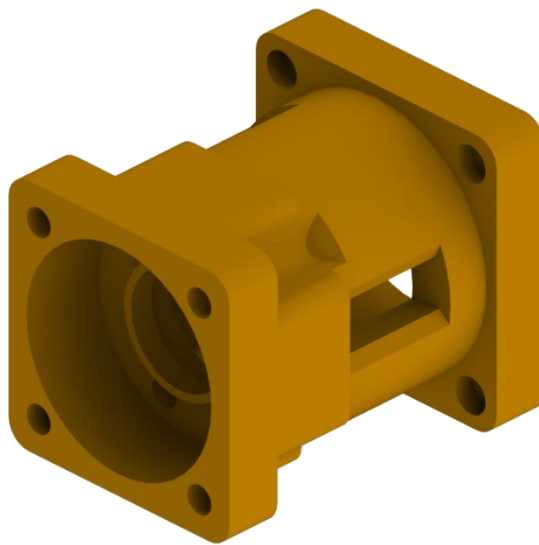
Další byl navržený model pro uchycení osy Y. Rozměry návrhu byly vypočteny s ohledem na délku válcových konců hřídelí, délku a průměr pružné spojky a na rozmístění šroubů pro připevnění k motoru a ke stroji. Pro upnutí úchytu ke stroji jsou použity 2 šrouby M6 s válcovou hlavou a vnitřním šestihranem. Pro vložení a dotažení šroubů pro upnutí ke stroji a pro spojení pružné spojky s hřídelí závitové tyče disponuje úchyt dvěma horizontálními výřezy po 180°. Také jsou zde 2 výřezy po 180° pro jednodušší dotažení šroubů pružné spojky na straně motoru. Je zde ještě jeden výřez, jenž umožňuje vyjímání manuálního nastavení konce posuvu pro osu Y. Výkres úchytu Y viz příloha A, výkres 2A-20-1.



Obr. 54: Úchyt osy Y

7.2.3 Úchyt osy Z

Poslední úchyt motoru v současném řešení je pro uchycení osy Z. Rozměry modelu byly navrženy s ohledem na délku válcových konců hřídelí, délku a průměr pružné spojky a na rozmístění šroubů pro připevnění k motoru a ke stroji. Pro upnutí úchytu ke stroji jsou použity 4 šrouby M5 s válcovou hlavou a vnitřním šestihranem s rozložením do obdélníku a dále 3 šrouby M5 také s válcovou hlavou a vnitřním šestihranem, jež jsou odsazeny od hlavní přiléhající plochy o 18 mm a rozloženy po roztečné kružnici o průměru 35.5 mm po 120°. Pro vložení a dotažení šroubů pro upnutí ke stroji a pro spojení pružné spojky s hřídelí ozubeného převodu disponuje úchyt celkem sedmi horizontálními výřezy. Výkres úchytu Z viz příloha A, výkres 3A-20-1.



Obr. 55: Úchyt osy Z

7.3 Protizávaží osy Z

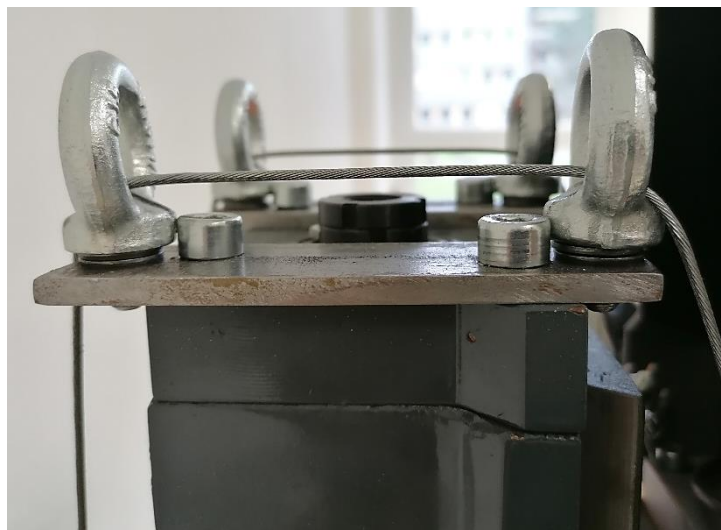
Protože motor 80MPF5.250S114-01 přimontovaný k vertikální ose Z nebyl schopný utáhnout váhu konzole, bylo rozhodnuto zavěsit za konzoli protizávaží přes rám frézky, aby se z větší části vyrovnala váha konzole.

Protizávažím jsou dvě k sobě svázané desetakilové cementové činky s plastovým obalem. Ty jsou k sobě svázané dvěma lanky DIN 3053 (EN 12385-4) s průměrem 1 mm pomocí tří lanových svorek 2 mm DIN 741 na každém lanku. Lanika dále vedou přes vertikální rám frézky, kde prochází každý dvěma závěsnými šrouby C15 M8 DIN 580. Tyto závěsné šrouby jsou zašroubované do ocelových destiček o rozměrech (110 x 30 x 5) mm a ocelové destičky jsou k rámu připevněny dvěma metrickými šrouby M8 s válcovou hlavou a vnitřním šestihranem. Na druhé straně rámu jsou lanika přichycena ke konzoli frézky metrickým šroubem M5 s válcovou hlavou a vnitřním šestihranem a dvěma lanovými svorkami 2 mm DIN 741.

Pro lepší pohyb protizávaží s menším odporem, bez smýkání a bez naklonění protizávaží, bylo navrženo a vytisknuto vedení protizávaží a ložisková hřídel. Plastové vedení protizávaží kopíruje část tvaru činky, aby se do něj dala činka posadit a na druhém konci má zhloubení určené pro zasazení ložiskové hřídele o průměru 10 mm s ložisky. Po jeho instalaci se již protizávaží nesmýká po rámu frézky, nýbrž je uloženo ve vedení, které se odvaluje po rámu pomocí čtyř ložisek SNH 61800ZZ.



Obr. 56: Protizávaží složené z 2 činek, vedení protizávaží, ložiskové hřídele a 4 ložisek

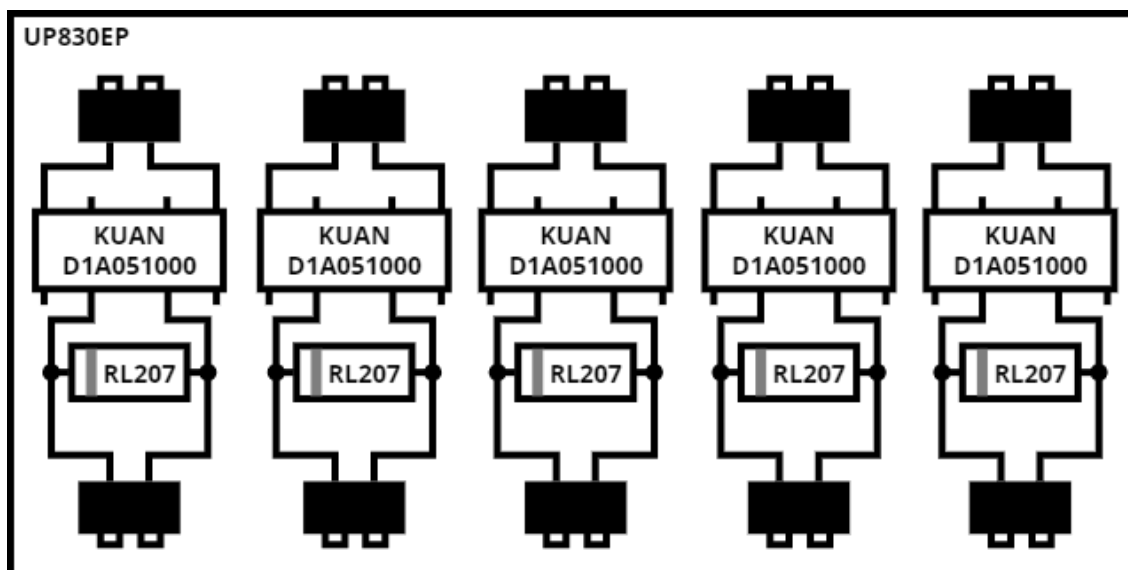


Obr. 57: Provláčení lanek závěsnými šrouby přes rám frézky a upevnění ocelových plošek

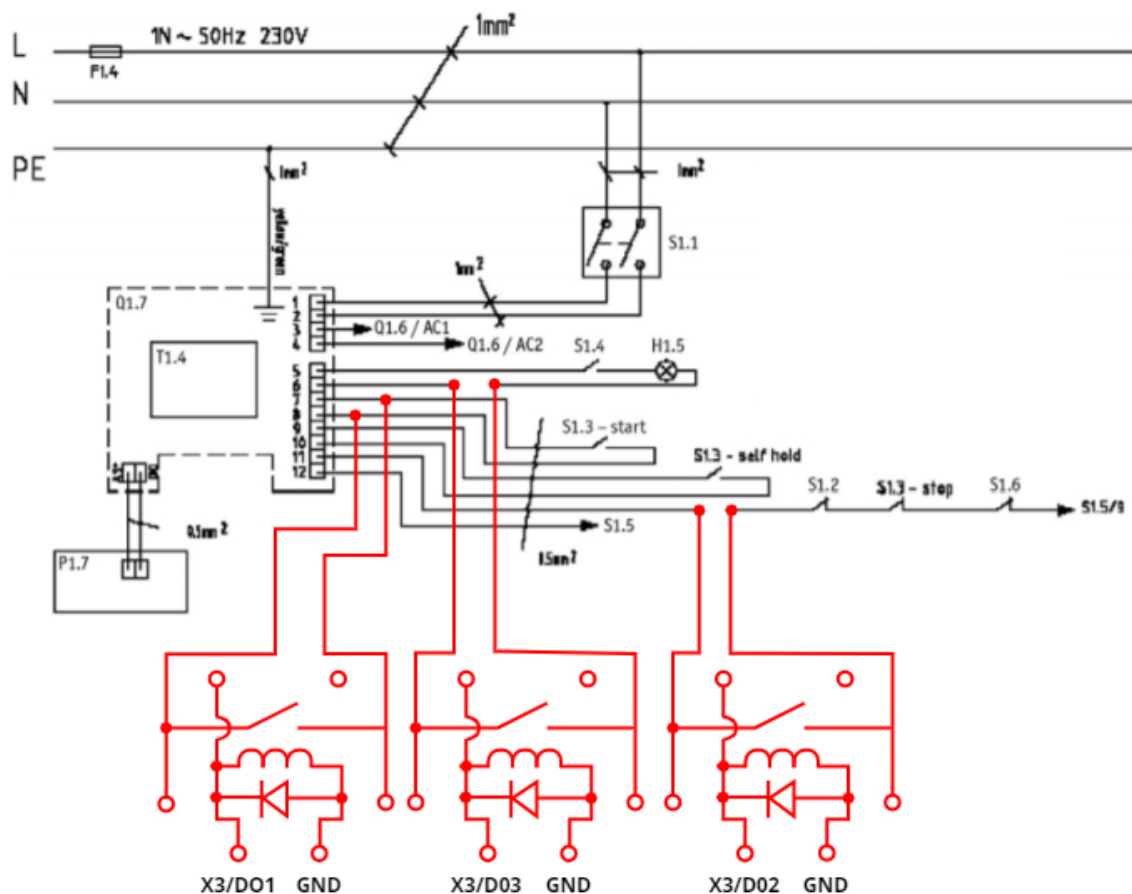
7.4 Ovládací panel

Další částí projektu bylo zpřístupnit zapínání a vypínání vřetene frézky programovatelnému automatu. K tomu bylo zapotřebí rozšířit ovládací panel frézky jak velikostně, tak elektronicky.

Nejdříve se testovalo podle schématu v manuálu frézky OPTIMUM OPTImill BF 20 L Vario propojení kontaktů, kterými by se dalo řídit zapínání a vypínání vřetene a také zapínání a vypínání světla frézky. Po úspěšném otestování bylo napájeno na elektronickou destičku UP830EP pět relátek D1A051000 s pěti diodami RL207 a svorkovnicemi. Relátka jsou ze vstupní strany připojená na digitální výstupy karty X3 programovatelného automatu X20CP1382-RT, kterými jsou ovládána. Na výstupní straně je první relé zapojeno tak, aby ovládalo zapínání vřetene a zároveň aby zůstala zachována i funkčnost samotného ovládacího panelu. Výstup druhého relé je zapojený do série s tlačítkem pro vypnutí vřetene, hříbovým tlačítkem pro nouzový zastavení stroje a s bezpečnostním snímačem krytu vřetene. Díky sériovému zapojení stačí, aby se rozepnul jakýkoliv z těchto čtyř spínačů a vřeteno stroje se zastaví. Poslední zapojené relátka ovládá zapínání a vypínání světla. Zbylá dvě relátka nemají v současném řešení žádnou funkci a byly přidány pro budoucí rozšiřování stroje, například pro ovládání směru otáčení vřetene nebo rychlosti otáček vřetene.



Obr. 58: Schéma součástí napájených na desce UP830EP



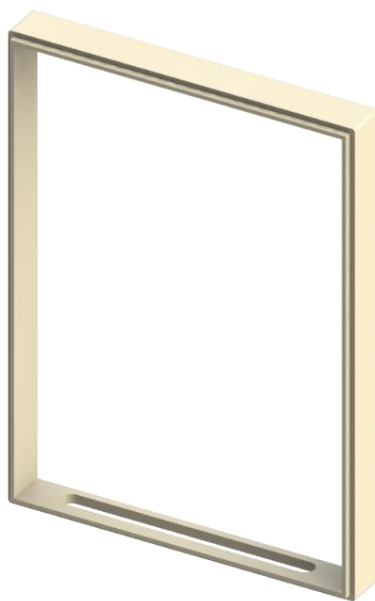
Obr. 59: Elektrické schéma ovládacího panelu (černě) s provedeným rozšířením (červeně) [13]

Tab. 15: Popis prvků elektrického schématu ovládacího panelu frézky

Původní prvky		
Označení	Popis	Logika
S1.1	Hlavní vypínač	Dvoustavový
S1.2	Nouzový vypínač	Rozpínací
S1.3-start	Zapnutí vřetene	Spínací
S1.3-stop	Vypnutí vřetene	Rozpínací
S1.4	Vypínač světla	Dvoustavový
S1.5	Přepínač směru otáček	Třístavový
S1.6	Koncový spínač krytu vřetene	Rozpínací
Q1.6	Řídicí deska	
Q1.7	Deska relé	
H1.5	Světlo	
T1.4	Transformátor	
P1.7	Digitální displej rychlosti	
F1.4	Pojistka	

Rozšiřující prvky		
Označení	Popis	Logika
X3/DO1	Zapnutí vřetene	Spínací
X3/DO2	Vypnutí vřetene	Rozpínací
X3/DO3	Vypínač světla	Dvoustavový

Z důvodu malého volného prostoru uvnitř ovládacího panelu a nemožnosti vyvedení kabelů vedoucích na kartu X3 programovatelného automatu se vytisklo rozšíření ovládacího panelu. Ten rozšiřuje panel frézky o 13 mm a zároveň umožňuje vyvést kabely pro ovládání relátek spodní částí rozšíření díky výrezu drážkového tvaru.

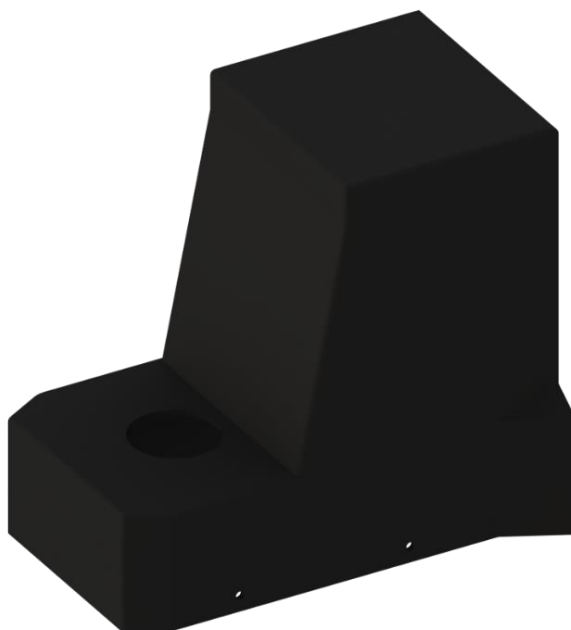


Obr. 60: Rozšíření ovládacího panelu

7.5 Ostatní hardware

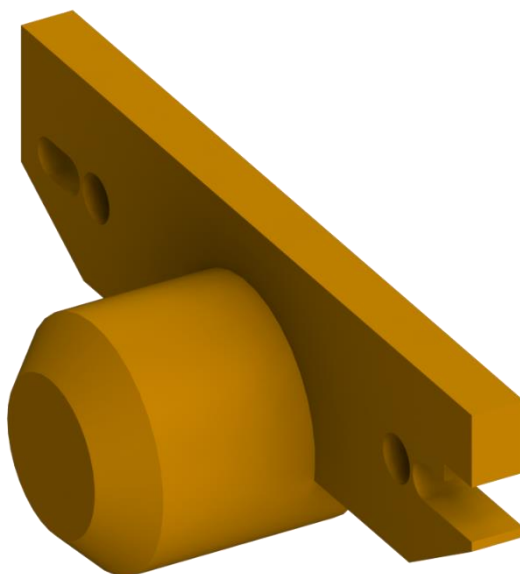
V této kapitole je popis ostatního hardwaru, který byl použitý pro robotizaci frézky, ale nemá žádný funkční účel, pouze bezpečnostní či estetický.

Kvůli lankům protizávaží vedoucích ke konzoli nebylo možné dále používat původní kryt motoru vřetene. K motoru vede síťové napětí na odkryté šrouby, což je pro obsluhu nebezpečné. Bezpečnost a estetické hledisko byly hlavní argumenty k vymodelování a vytisknutí černého, plastového krytu motoru vřetene. Tento kryt byl moc velký na tisk v jednom kuse, takže byl rozdělen na 3 části, které se vytiskly zvlášť a následně slepily modelářským lepidlem. Kryt je připevněn ke konzoli čtyřmi šrouby M4 s válcovou hlavou a vnitřním šestihranem.



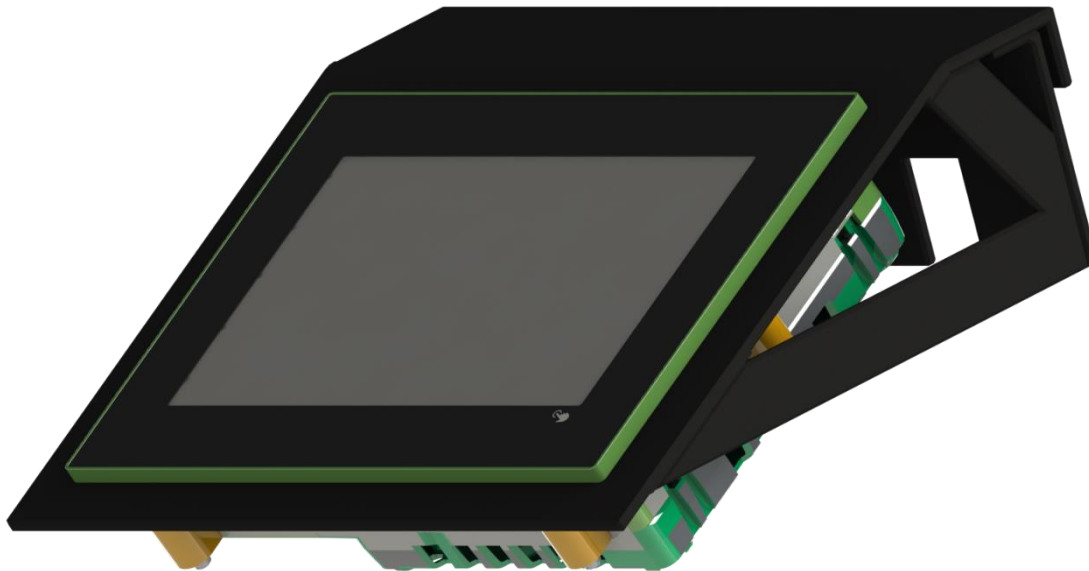
Obr. 61: Kryt motoru vřetene

Na pracovním stole byly z obou stran ruční madla pro otáčení s osou. Obě byly odmontovány a na jedné straně bylo madlo nahrazeno úchytem a motorem. Na druhé straně však zůstal odkrytý válcový konec hřídele s drážkou pro pero. Tato hřídel se otáčí při pohybu s osou a hrany drážky pro pero jsou ostré. Z bezpečnostního důvodu byl navržen kryt pro tuto hřídel. Kryt je velmi podobný jako úchyt motoru pro osy Y, akorát místo plochy pro přišroubování k motoru je z této strany zakrytý. Stejně jako úchyt motoru pro osu Y má tento kryt výřez umožňující vyjmutí manuálního nastavení konce pracovního prostoru.



Obr. 62: Kryt válcového konce hřídele osy Y

Posledním vytisknutým komponentem byl držák vizualizačního power panelu 6PPT30.0702-20B pro jednoduché ovládání vizualizace a vhodné umístění vizualizačního panelu. Držák se kvůli své složitosti skládá z 6 částí. Rozložením na více částí se ušetřil materiál potřebný na podpory i čas, který byl třeba na tisk. Všechny části byly po tisku slepeny modelářským lepidlem. Držák se skládá z drážky pro ukotvení za vanu pod frézku, plochou s otvorem pro vložení vizualizačního panelu a podpor pro lepší stabilitu a výdrž konstrukce.



Obr. 63: Držák vizualizačního panelu 6PPT30.0702-20B

Velkou výhodou vizualizace mappView je jeho multi-klientový systém nezávislý na platformě. Stačí, když platforma umožňuje přístup na wifi a spuštění webového prohlížeče. V rámci jednoduchého připojení k vizualizaci jakýmkoliv přístrojem byla potřeba vytvořit na stroji vlastní wifi síť. K tomu slouží router AirLive N.Mini. S rozměry (75 x 54) mm se jedná o nejmenší 300 Mbps router na světě, který i přes malé rozměry zvládá pokrýt svým signálem velkou oblast. Po připojení na zaheslovanou wifi síť má uživatel přístup k internetu a také k servisní (t30CNC) a hlavní (fhdCNC) vizualizaci pomocí webových adres <http://147.229.132.253:81/index.html?visuId=t30CNC> a <http://147.229.132.253:81/index.html?visuId=fhdCNC>. Číslo 147.229.132.253 je IP adresa PLC, která je přijímána od DHCP serveru. Může se tedy měnit.



Obr. 64: Router AirLive N.Mini [36]

Tab. 16: Parametry routeru AirLive N.Mini [36]

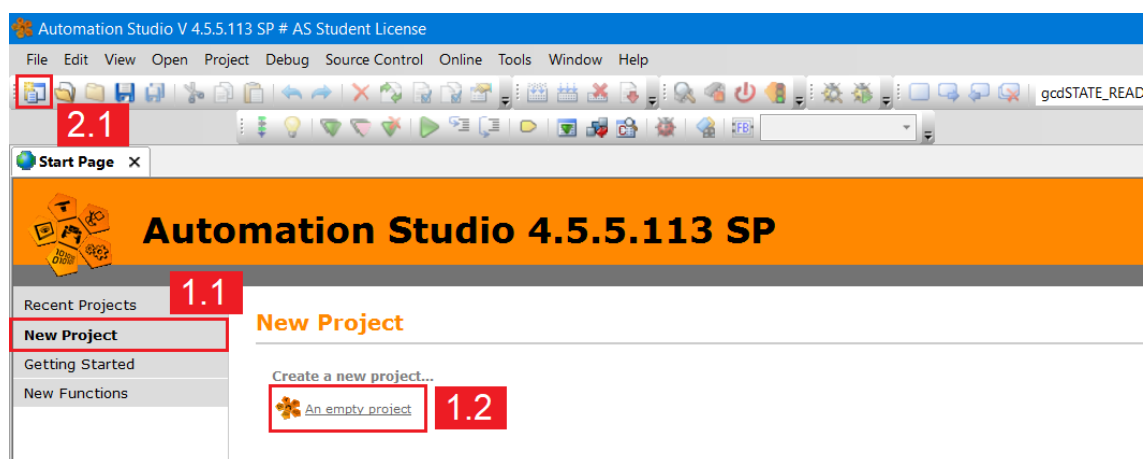
CPU frekvence	400 MHz
Ethernet port	1
Datový tok	300 Mbps
Frekvenční pásmo	2.4 GHz
Režimy	AP, Client, Router
Spotřeba	Méně než 1 W
Napájecí adaptér	5 V, 1 A
Rozměry	(75 x 54 x 18) mm

8 SOFTWARE

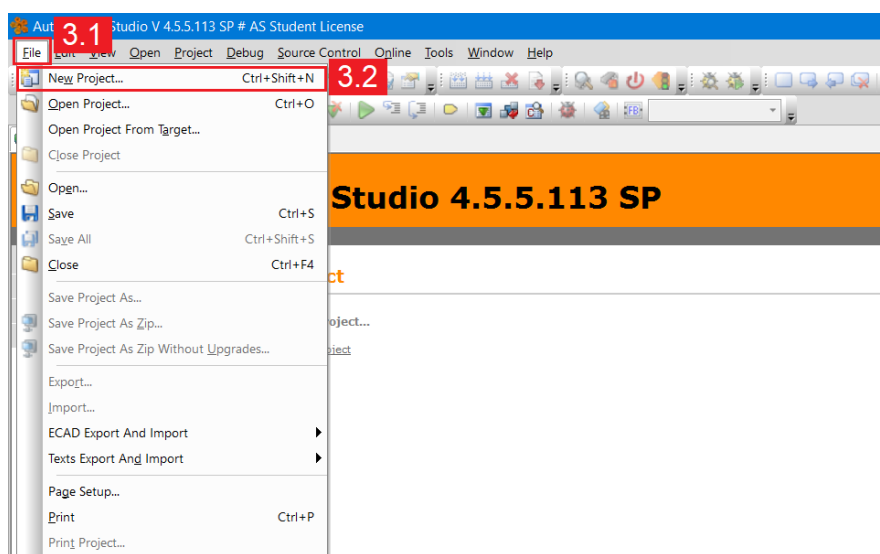
Celý řídicí software je napsaný ve vývojovém prostředí Automation Studio verzi 4.5.5 pomocí programovacího jazyka Strukturovaný text (ST), který je standardizován normou IEC 61131-3.

8.1 Založení projektu

Po spuštění vývojového prostředí existují pro založení nového projektu 4 možnosti. První možností je kliknout vlevo na záložku „New Project“ a dále na nápis „An empty project“. Druhou možností je stisknout ikonku pro vytvoření nového projektu viz obr. 65 (2.1). Třetí variantou je otevřít záložku „File“ a vybrat tlačítko „New Project...“. Poslední možností, jak založit nový projekt je zadáním klávesové zkratky Ctrl + Shift + N.

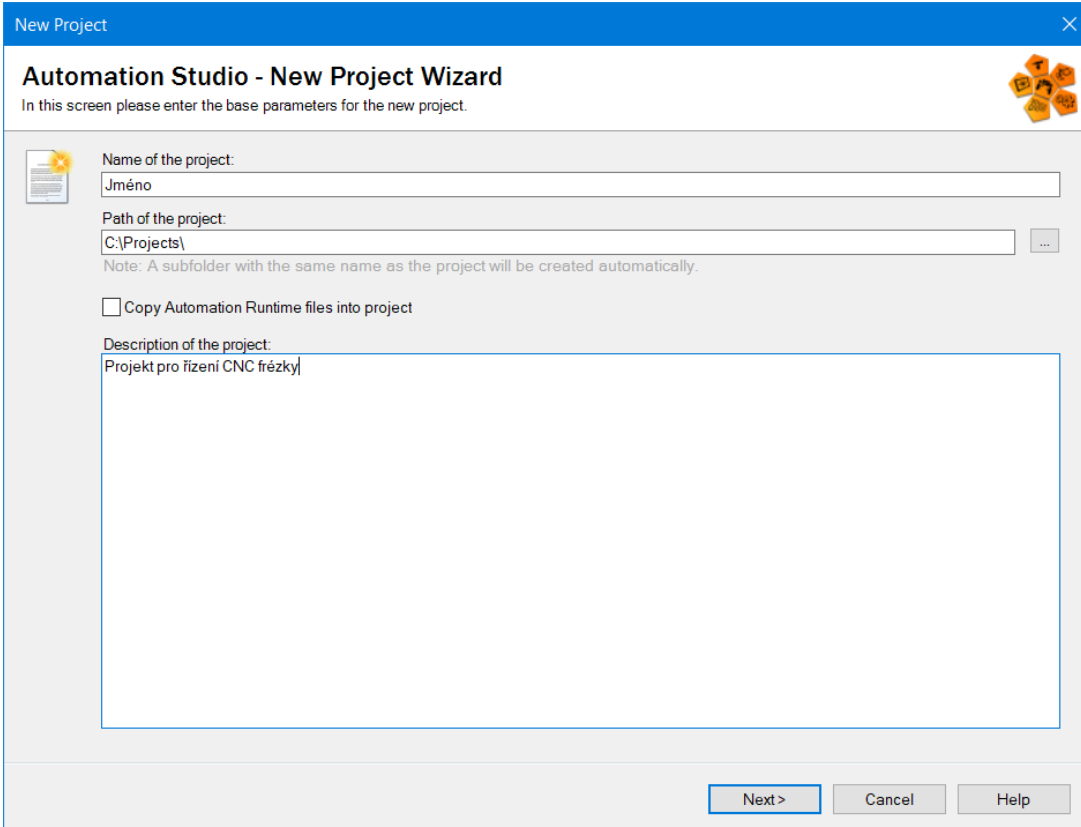


Obr. 65: První a druhý postup pro založení nového projektu



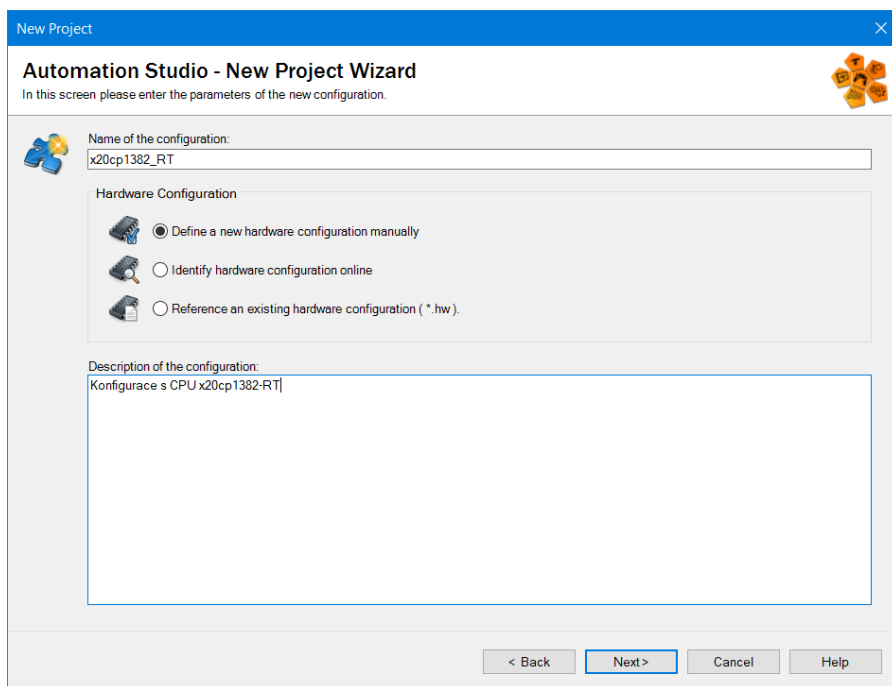
Obr. 66: Třetí postup pro založení nového projektu

Všechny výše zmíněné postupy spustí průvodce založením nového projektu, který se skládá z několika stran. Na první straně se zadává jméno projektu, cesta do složky, kde bude projekt vytvořen a popis projektu. Je zde také možnost rozhodnout se, zda budou soubory Automation Runtime (AR) zkopírovány do projektu. Výhodou této možnosti je, že součástí projektu je vždy vhodná verze AR, což může být důležité při předávání projektu kolegovi. To umožňuje druhé osobě zkompileovat projekt, i když lokální verze AR nebyla nainstalována. Nevýhodou je větší velikost projektu. Po vyplnění těchto informací se stiskne tlačítko „Next >“, které průvodce dostane na další stranu.



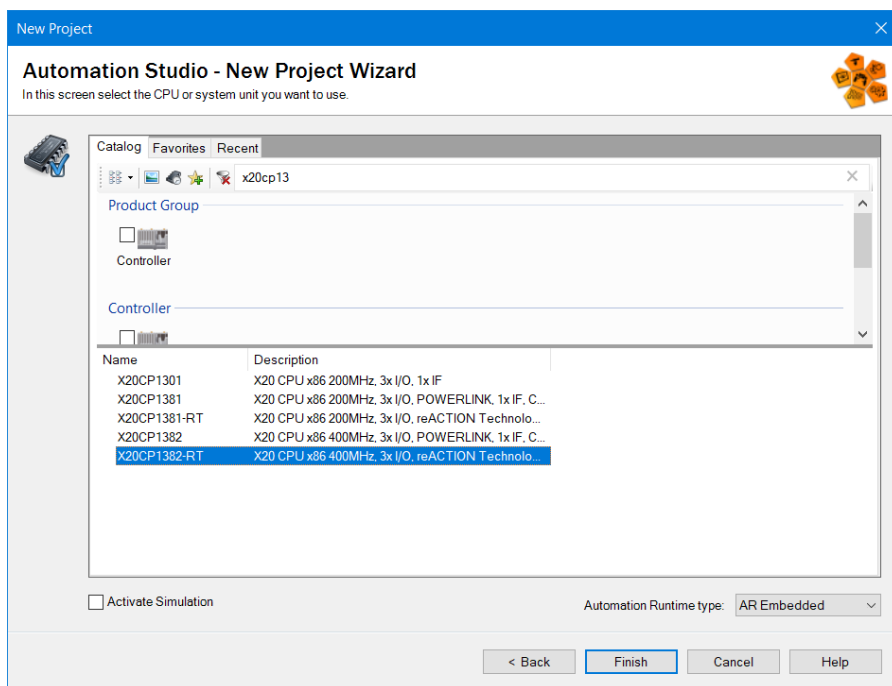
Obr. 67: První strana průvodce založením nového projektu

Další strana průvodce se zabývá volbou konfigurace. Nejdříve se zapíše jméno konfigurace a dále se vybere možnost definování hardwarové konfigurace. Hardwarovou konfiguraci lze definovat manuálně, automaticky online, pokud je vývojové prostředí připojené k požadovanému hardwaru nebo referováním na existující hardwarový soubor s příponou hw. Je zde taky možné napsat popis konfigurace. Po vyplnění údajů se opět stiskne tlačítko „Next >“.



Obr. 68: Druhá strana průvodce založením nového projektu

Na poslední straně průvodce založením projektu je zapotřebí vybrat použité CPU (*Central Processing Unit*). Je možné filtrovat v seznamu pomocí výběru kategorií v katalogu nebo zadáním textu do vyhledávacího pole. Po výběru požadovaného CPU už stačí jen kliknout na tlačítko „*Finish*“ a projekt bude založen. Na této straně je ještě možnost okamžitě po založení projektu aktivovat simulaci.

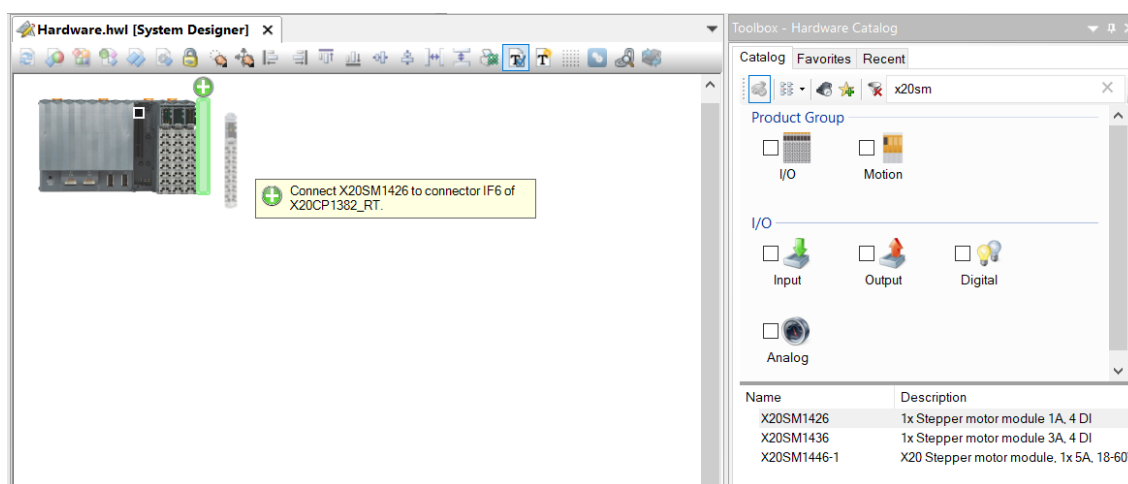


Obr. 69: Třetí strana průvodce založením nového projektu

8.2 Přidání a konfigurace hardwarových komponent

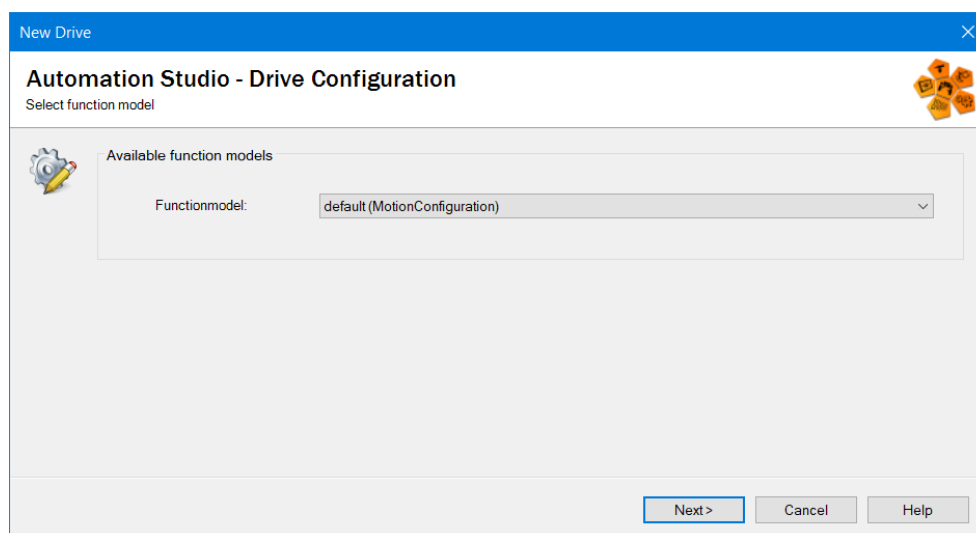
8.2.1 Přidání hardwaru

Po založení projektu je dalším krokem vložení řídicího hardwaru. Pro tuto operaci je vhodné se v průzkumníku projektu přepnout na záložku „Physical View“, kde je výpis hardwaru. Přidání hardwarových komponent je možné jednoduchým přetažením vybraného hardwaru z listu „Toolbox“ do systém designeru. V okně „Toolbox – Hardware Catalog“ se dá filtrovat výběrem kategorie v katalogu nebo zadáním textu do vyhledávacího pole. V tomto projektu se jako první komponenta vloží rozšiřující karta pro ovládání jednoho krokového motoru X20SM1426.



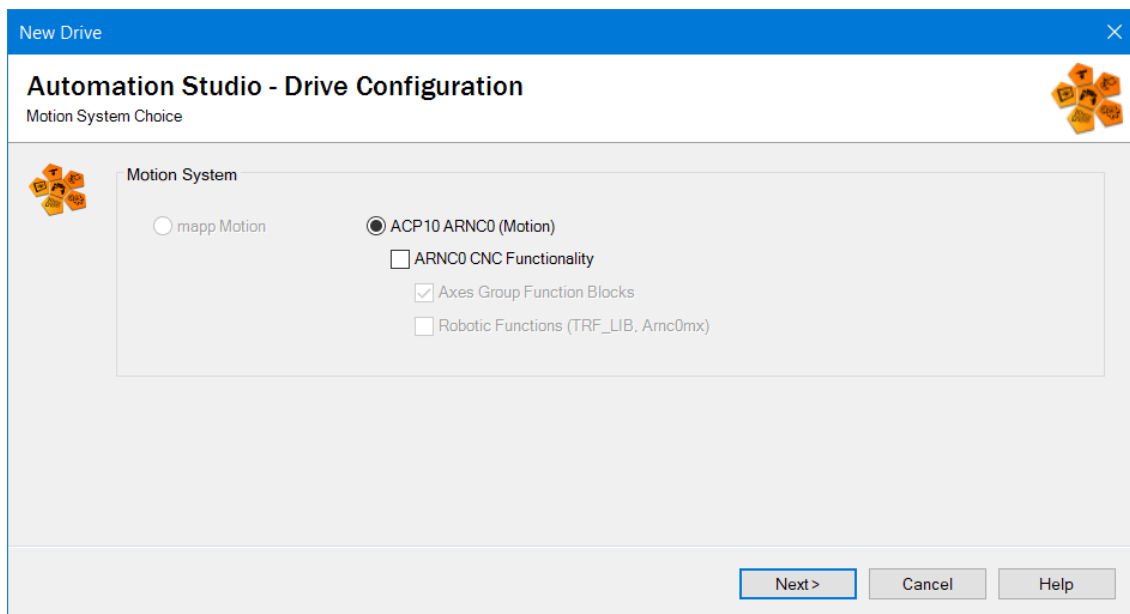
Obr. 70: Vložení rozšiřující karty X20SM1426

Vložení této komponenty do hardwarové konfigurace se spustí průvodce konfigurací přidaného motoru. Na první straně tohoto průvodce se vybere „Functionmodel“ default.



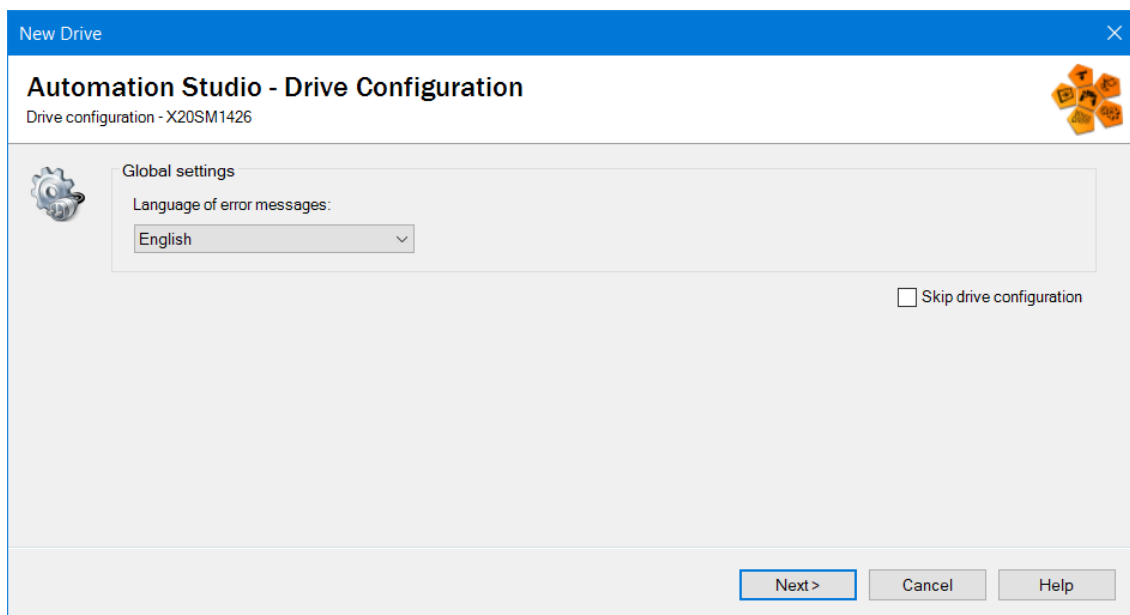
Obr. 71: Průvodce konfigurací přidaného motoru – strana 1

Na další straně se nic nemění, měla by být vybrána možnost „ACP10 ARNC0 (Motion)“.



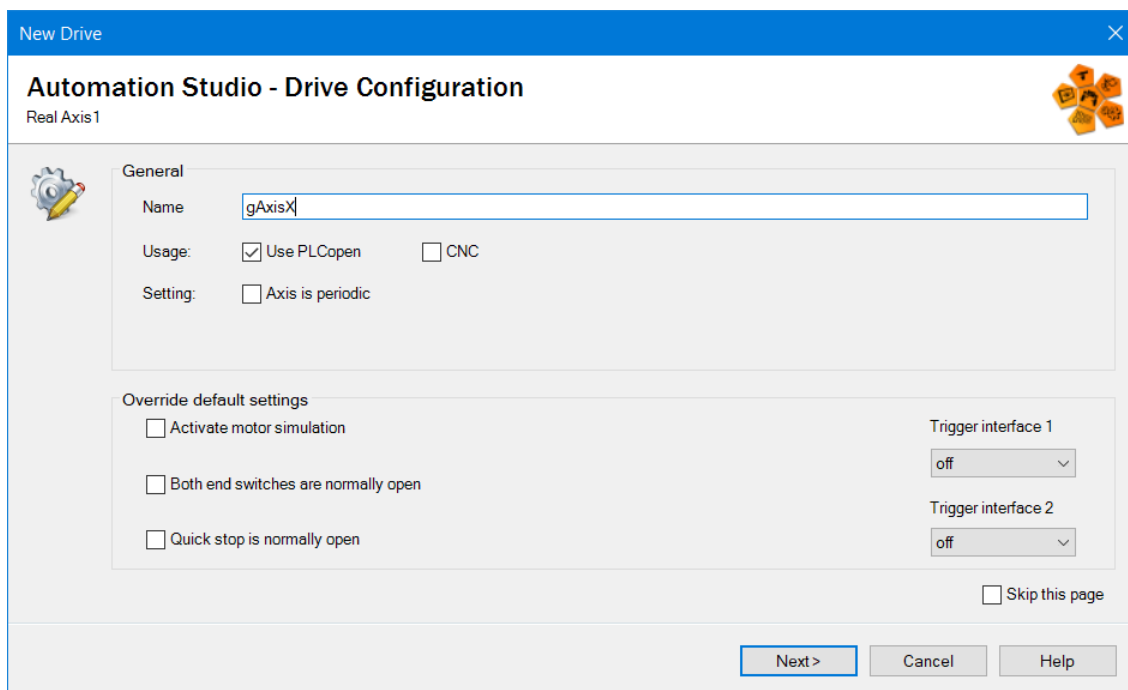
Obr. 72: Průvodce konfigurací přidaného motoru – strana 2

Další strana průvodce zahrnuje výběr jazyka chybových hlášek.



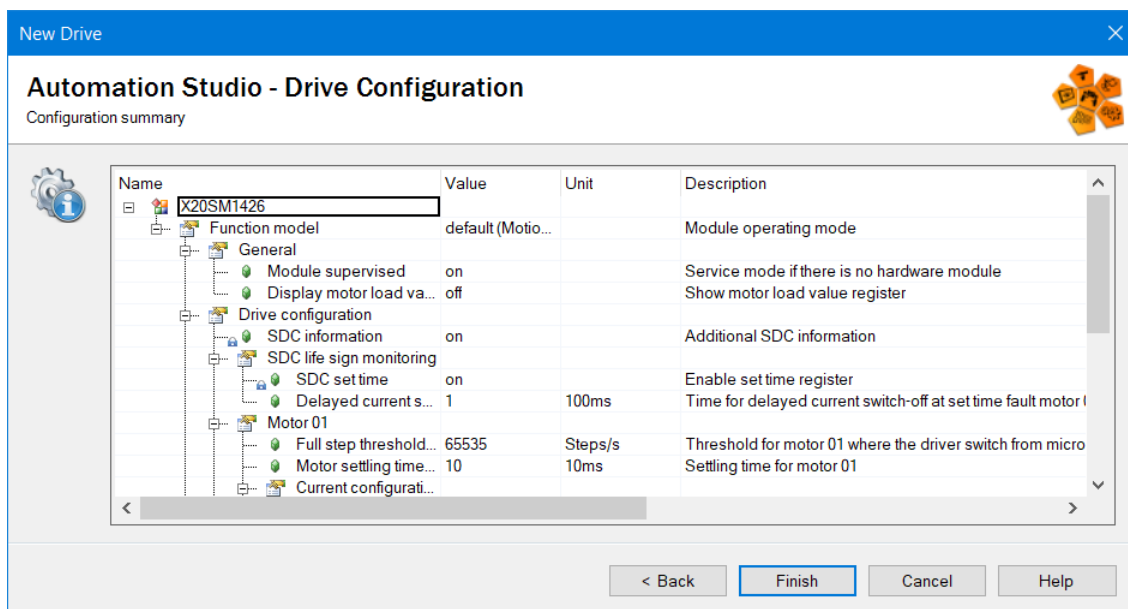
Obr. 73: Průvodce konfigurací přidaného motoru – strana 3

Na předposlední straně se vyplní jen jméno osy, ostatní zůstává stejné.



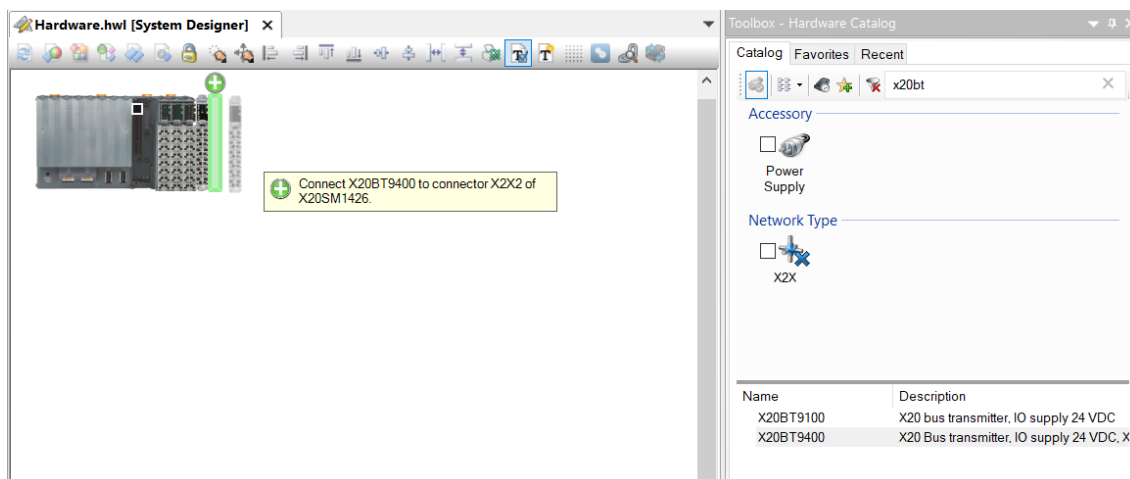
Obr. 74: Průvodce konfigurací přidaného motoru – strana 4

Na čtvrté a poslední straně průvodce není třeba nic vyplňovat, protože tyto parametry se budou vyplňovat později při ladění motorů. Klepnutím na tlačítko „Finish“ se dokončí vkládání nového motoru.



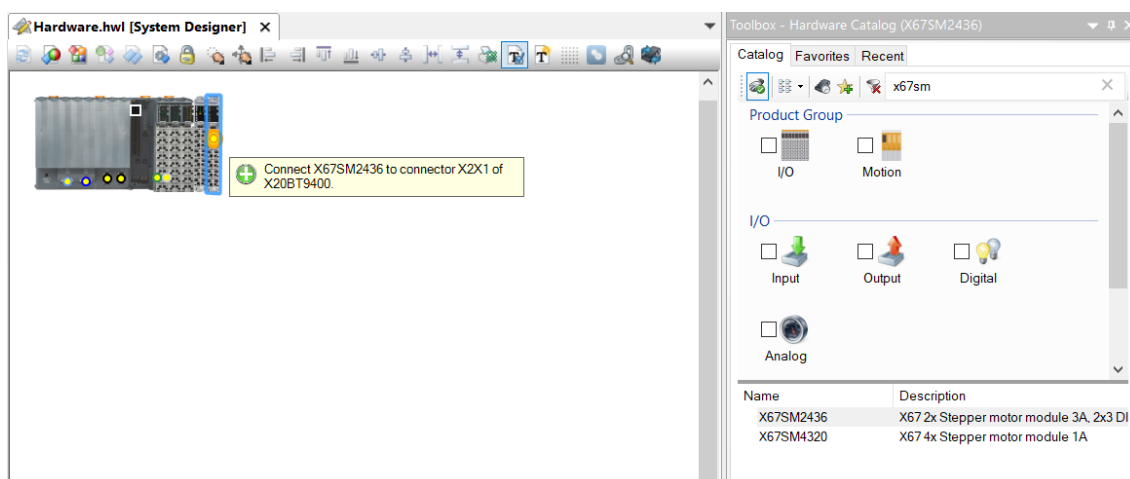
Obr. 75: Průvodce konfigurací přidaného motoru – strana 5

Nyní lze v „Physical View“ vidět, že pod sběrnici X2X Link je již vložená rozšiřující karta X20SM1426. Jako další komponenta je potřeba vložit rozšiřující karta X20BT9400 pro komunikaci se systémem X67. Vložení této karty neotevře žádného průvodce, jde o jednoduché vložení.



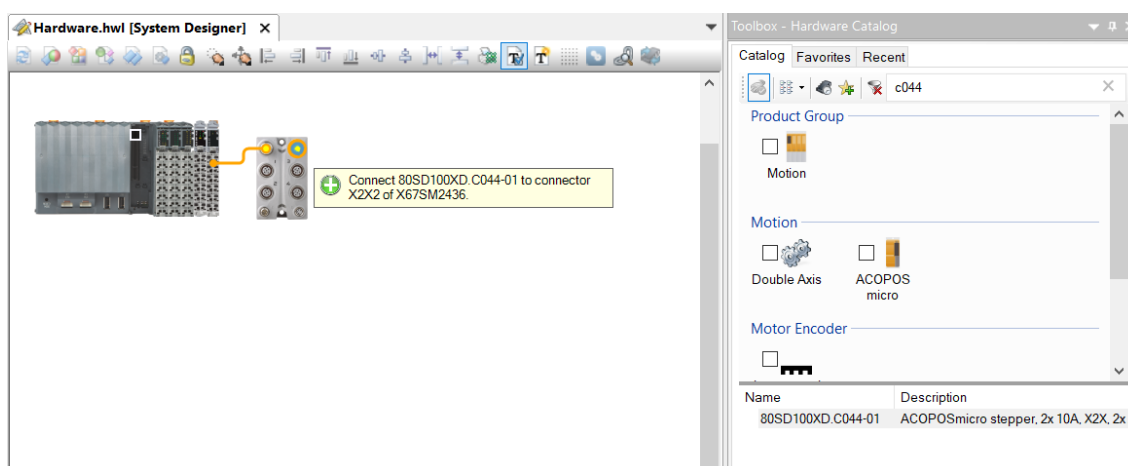
Obr. 76: Vložení rozšiřující karty X20BT9400

Nyní lze na naposledy přidanou kartu vložit modul X67SM2436 pro ovládání dvou krokových motorů. Po jeho přesunutí se spustí průvodce pro konfiguraci dvou motorů. Ten se vyplní analogicky podle karty X20SM1426.



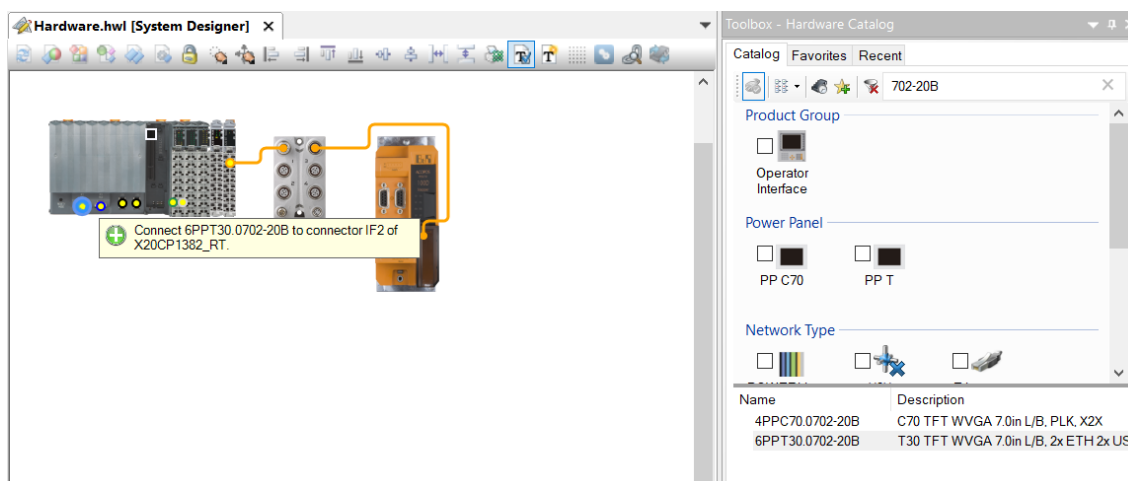
Obr. 77: Vložení modulu X67SM2436

Na modul X67SM2436 se přidá poslední modul pro ovládání motorů 80SD100XD.C044-01. Ten stejně jako modul X67SM2436 spustí průvodce pro konfiguraci dvou motorů, který se vyplní analogicky podle karty X20SM1426.



Obr. 78: Vložení modulu 80SD100XD.C044-01

Poslední hardwarový prvek, který je třeba přidat, je vizualizační panel 6PPT30.0702-20B. Ten se přidá na ethernetový port PLC. Jde o jednoduché vložení.

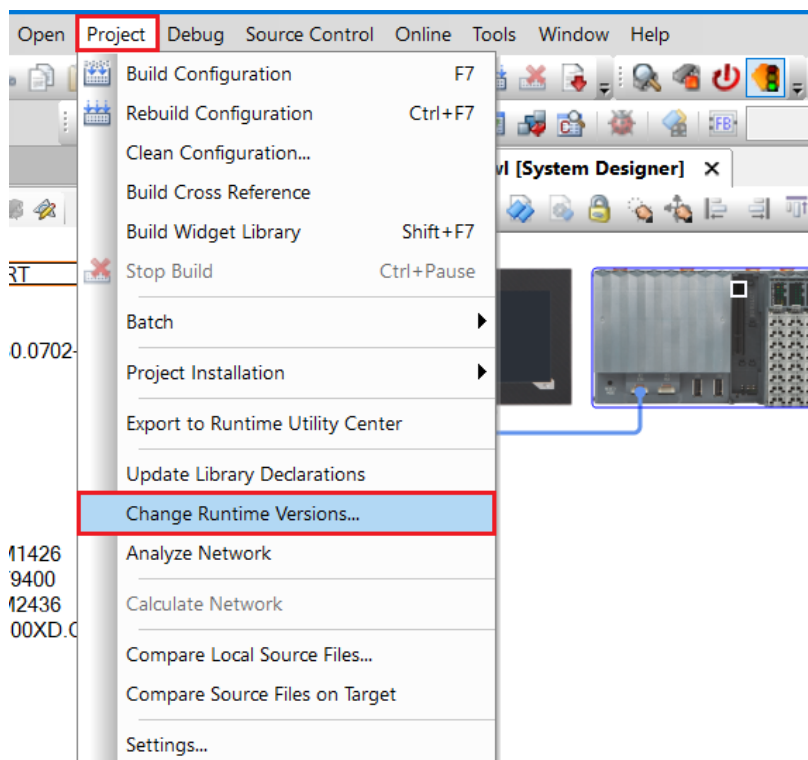


Obr. 79: Vložení vizualizačního panelu 6PPT30.0702-20B

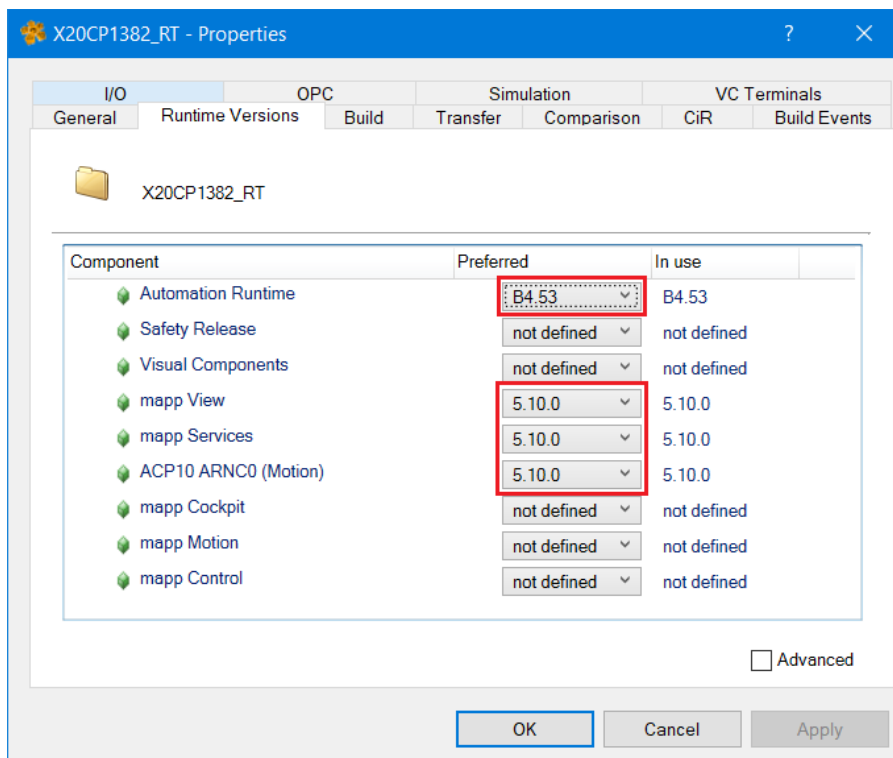
Nyní jsou v hardwarové konfiguraci pro tento projekt vloženy všechny požadované komponenty.

8.2.2 Testování správného zapojení

Po fyzickém zapojení veškerého hardwaru je zapotřebí ověřit, zda je vše propojené správně. Projekt je téměř připraven pro toto ověření, ještě se musí vybrat použité mapp komponenty a Automation Runtime. V záložce „Project“ se stiskne tlačítko „Change Runtime Versions...“. Otevře se dialogové okno, ve kterém se z kombo tlačítek vybere Automation Runtime B4.53, mappView 5.10.0, mapp Services 5.10.0 a ACP10 ARNC0 (Motion) 5.10.0. Pokud některé verze v kombo tlačítkách nejsou, lze je instalovat v záložce „Tools“ pod tlačítkem „Upgrades...“.

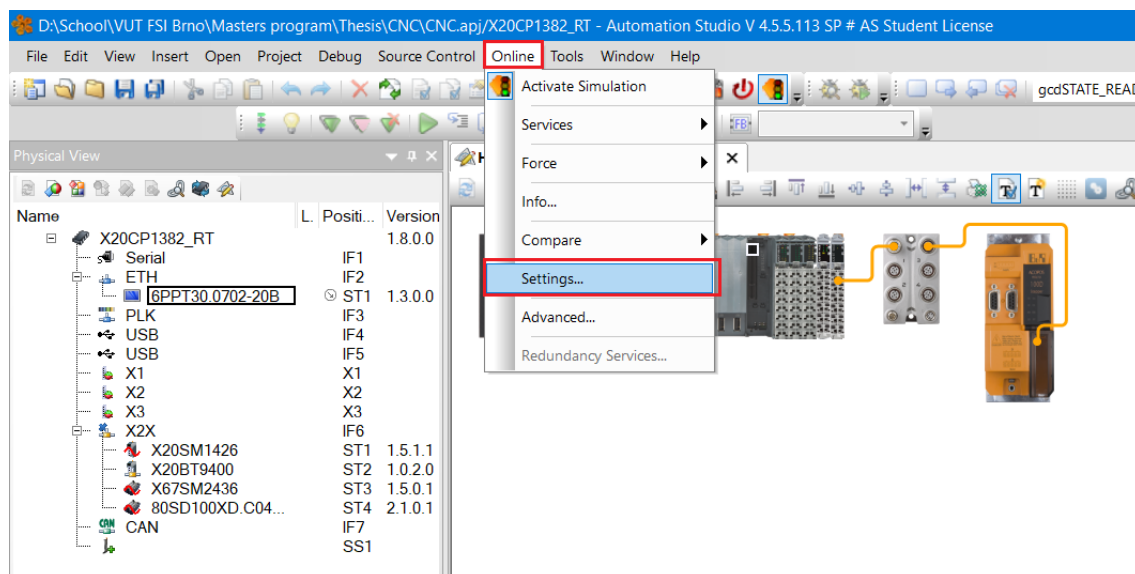


Obr. 80: Výběr použitých mapp komponent a Automation Runtimeu – krok 1



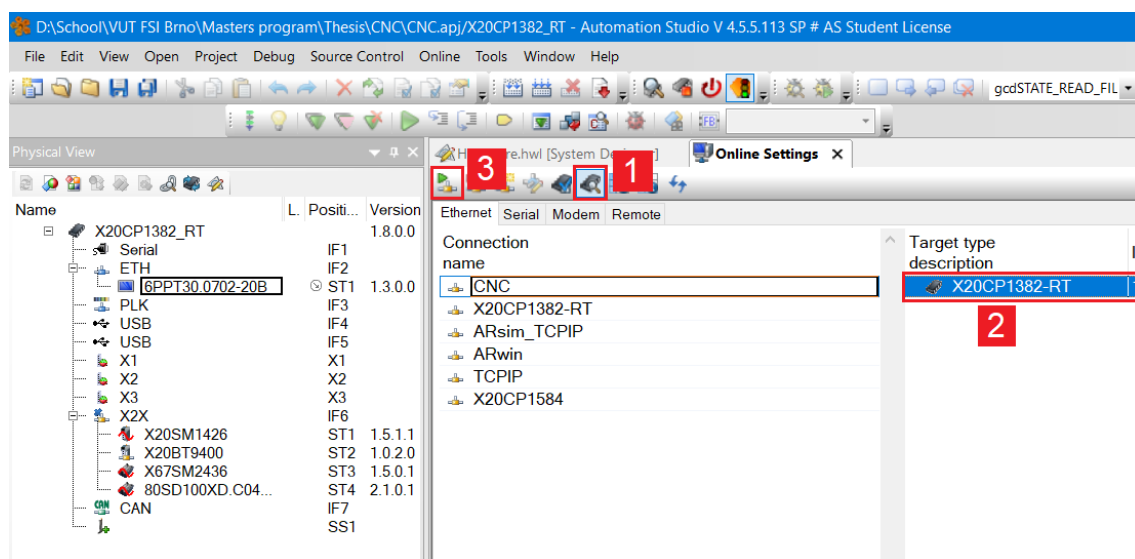
Obr. 81: Výběr použitých mapp komponent a Automation Runtimeu – krok 2

Nyní je projekt připraven pro ověření správného zapojení. Pro nahrání projektu do PLC je prvním krokem připojení k PLC. Připojení se provádí v záložce „Online“ pod tlačítkem „Settings...“.



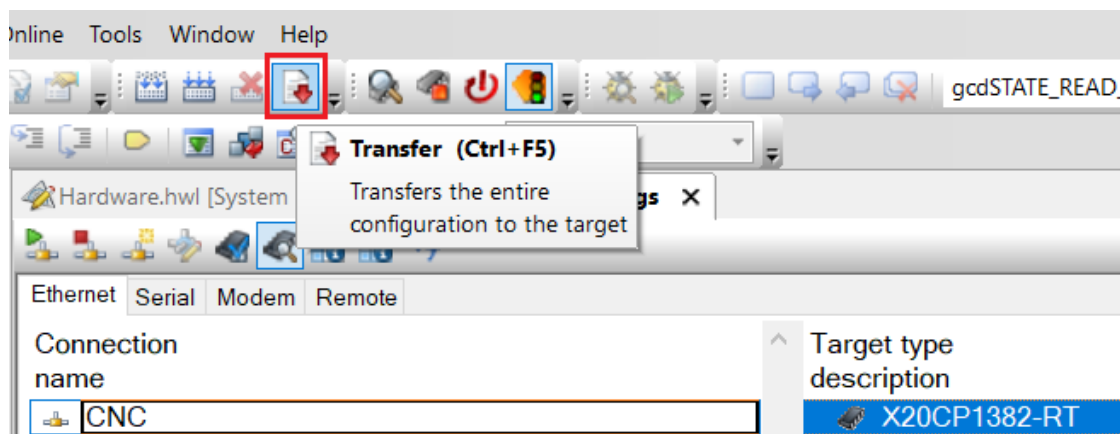
Obr. 82: Připojení k PLC – krok 1

V okně „Online Settings“ se zaklikne tlačítko „Browse“, pro vyhledávání všech připojených PLC v místní síti. Potom se vybere požadované PLC a stiskne se tlačítko „Connect“, které připojí vývojové prostředí k vybranému PLC.

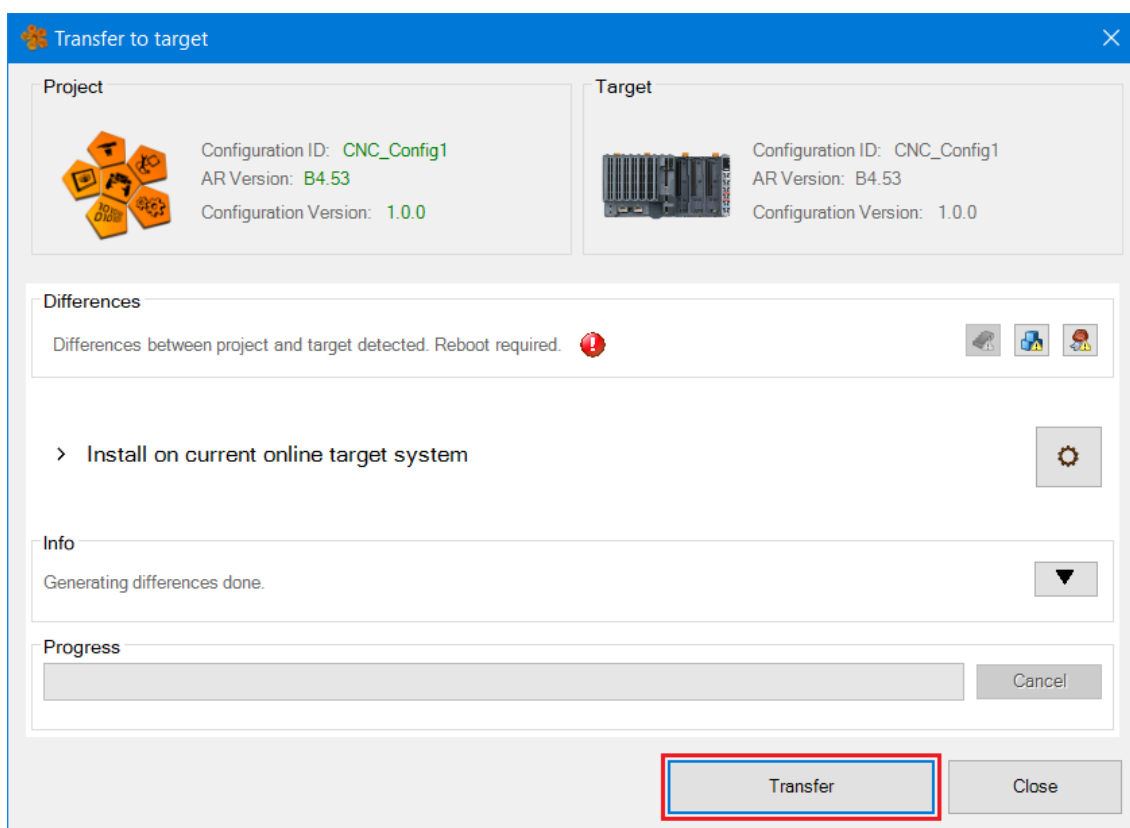


Obr. 83: Připojení k PLC – krok 2

Když je vývojové prostředí připojeno k PLC, může být projekt nahrán stiskem tlačítka „Transfer“ nebo zadáním zkratky Ctrl + F5. Po úspěšné kompilaci projektu se zobrazí dialogové okno, ve kterém stačí stisknout tlačítko „Transfer“ a po nahrání projektu tlačítko „Close“.

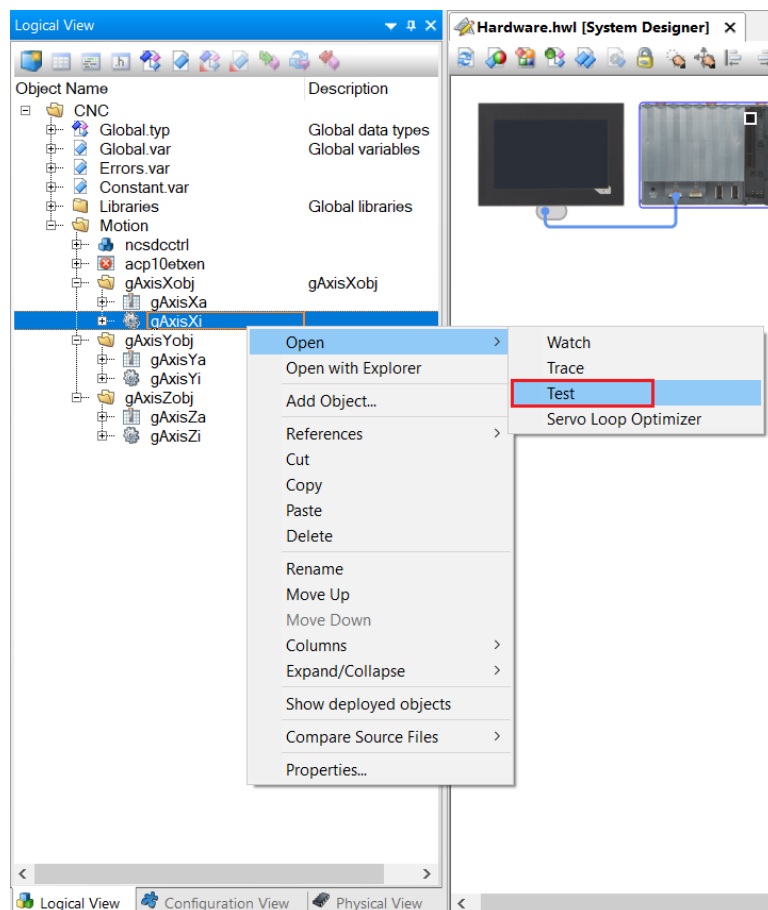


Obr. 84: Nahrání projektu do PLC – krok 1



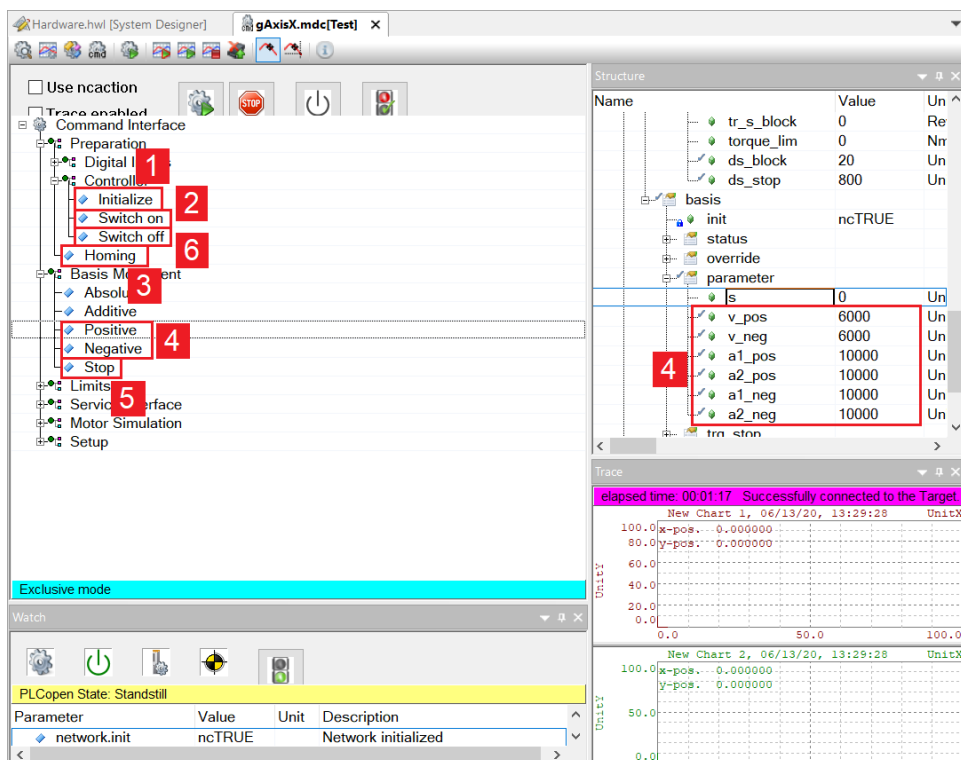
Obr. 85: Nahrání projektu do PLC – krok 2

V PLC je nahrán aktuální projekt a může být ověřeno správné zapojení hardwaru. Při vkládání modulů pro ovládání krokových motorů se do „*Logical View*“ přidaly soubory pro jednotlivé motory pod jménem, jaké bylo zapsáno v průvodci konfigurace motorů. K otestování správného zapojení motorů slouží „*Test*“ okno, do kterého se lze dostat kliknutím pravým tlačítkem na soubor motoru s příponou „i“ a následným výběrem „*Open*“ a „*Test*“.



Obr. 86: Otevření okna „Test“

Po otevření okna „Test“ se motor zapne dvojitým stisknutím „Initialize“ a „Switch on“. Potom je třeba dvakrát kliknout na „Homing“ a dále v záložce „Basis Movement“ na „Positive“ nebo „Negative“ podle toho, kam se má motor otáčet. Parametry pohybu jako rychlosti a zrychlení je možné upravit v tabulce vpravo. Pro zastavení motoru stačí dvakrát stisknout tlačítko „Stop“ a pro vypnutí motoru tlačítko „Switch off“. Pokud se motor otáčel, je hardwarové zapojení pro tento motor provedeno správně. Stejným způsobem se otestují i ostatní motory. Pokud se některý neotáčí, je zapotřebí zkontrolovat fyzické zapojení motoru.



Obr. 87: Test zapojení motoru

8.2.3 Konfigurace CPU

Konfigurace se otevře pravým klikem myši na X20CP1382_RT v „Physical View“ a výběrem tlačítka „Configuration“. Konfigurace CPU viz obr. 88. Popis jednotlivých parametrů je možné najít v souboru *Help* po zadání cesty *Programming* → *Editors* → *Configuration editors* → *Hardware configuration* → *CPU configuration* → *SG4*.

Name	Value	Unit
X20CP1382_RT		
Configuration ID	X20CP1382_RT	
Configuration version	1.0.0	
Module system on target		
Minimum user partition size	20	MIB
Automatic transfer of userfiles	off	
Module system on target	SAFE	
Simulation		
Memory configuration		
UserRAM		
RemMem		
Device for memory RemMem	OnBoard	
RemMem memory size	10000	Byte
PV memory		
Used		
Permanent PVs	2000	Byte
Remanent global PVs	2000	Byte
Remanent local PVs	6000	Byte
Volatile global PVs	400000	Byte
Clear non volatile memory after change of system mass storage	off	
System		
Reboot		
Communication		
Timing		
System timer	EPLX2X Interface	
Interface	X20CP1382_RT.IF6	
Cycle time of interface	2000	µs
Multiply cycle time by	1	
System tick	2000	µs
Idle time		
Idle task class	Cyclic #2	
Task class idle time	2000	µs
Inter network cross link task		
Resources		
Number of cyclic resources	8	
Activate exception task class	off	
Cyclic task classes		
Cyclic #1		
Duration	2000	µs
Tolerance	0	µs
Stack	8192	Byte
Used as output cycle trigger	off	
I/O input delay	no delay	
I/O output delay	delay to end of cycle	
Cyclic #2		
Duration	10000	µs
Tolerance	10000	µs
Stack	8192	Byte
Used as output cycle trigger	off	
I/O input delay	no delay	
I/O output delay	no delay	
Cyclic #3		
Duration	20000	µs
Tolerance	20000	µs
Stack	8192	Byte
Used as output cycle trigger	off	
I/O input delay	no delay	
I/O output delay	no delay	
Cyclic #4		
Duration	50000	µs
Tolerance	50000	µs
Stack	8192	Byte
Used as output cycle trigger	off	
I/O input delay	no delay	
I/O output delay	no delay	
Cyclic #5		
Cyclic #6		
Cyclic #7		
Cyclic #8		
File devices		
File device 1		
Name	USERDISK	
Path	F:\Programs	
File device 2		
Name	USERDISK_SIM	
Path	C:\Temp\CNC\ICF	
File device 3		
Name	USB	
Path	/bd0	
File device 4		
Name	USB_SIM	
Path	C:\Temp\CNC\USB	
File device 5		
Time synchronization		
Internet file system		
Ethernet parameters		
DNS parameters		
Online parameters		
FTP Server		
Activate FTP Server	on	
Protocol	FTP	
Users		
User 1		
Username	michal	
Password	Vob8D+sXxy4hVWvgB6BY...	
Access rights	read/write	
Shared Device	System Mass Storage	
User 2		
Additionally supported hardware		
Web Server		
System diagnostics		
DTM Server		
OPC-UA System		
Activate OPC-UA System	on	

Obr. 88: Konfigurace CPU

8.2.4 Konfigurace a ladění motorů

U motorů se nejdříve musí nastavit na modulu pro řízení krokových motorů držící proud, jmenovitý proud, maximální proud a počet inkrementů enkodéru na jednu otáčku motoru. Poté v souboru motorů s příponou „i“ se musí zadat limity a parametry regulátoru.

a) Motor pro osu X

Jedná se o motor 80MPF3.250S114-01 se jmenovitým proudem 2.5 A, který je připojen na modul X67SM2436, jenž má jmenovitý proud 3 A. Vhodné nastavení proudů pro tento motor je 0.3 A držící proud, 2.1 A jmenovitý proud a 2.5 A maximální proud. Tyto proudy se nastavují jako procentuální hodnota z jmenovitého proudu modulu, tedy držící proud se nastaví na 10 %, jmenovitý proud na 70 % a maximální proud na 83 %.

Motor 01			
Full step threshold 01	65535	Steps/s	Threshold for motor 01 where the driver switch from microstep to full step mode
Motor settling time 01	10	10ms	Setting time for motor 01
Current configuration 01			
Holding current	10	%	Current in % (0-167) of module rated current (3A)
Rated current	70	%	Current in % (0-167) of module rated current (3A)
Maximum current	83	%	Current in % (0-167) of module rated current (3A)

Obr. 89: Nastavení proudů na motoru osy X

Pro intuitivní ovládání motorů jsou inkrementy (jednotky) enkodéru na jednu otáčku motoru spočítány tak, že 1 jednotka představuje 1 μ m posuvu pracovního stolu frézky, 1000 jednotek je tedy 1 mm. Pro tento výpočet se nejdříve musel v „Test“ okně experimentálně zjistit počet jednotek, který je potřeba pro posunutí o 1 mm. Zjištěná hodnota pro posuv o 1 mm byla 502 jednotek s původními 1000 jednotkami na jednu otáčku motoru. Počet jednotek na otáčku se spočítá trojčlenkou.

$$\begin{array}{l}
 502 \text{ jednotek na 1 mm posuvu} \dots\dots\dots 1000 \text{ jednotek / otáčku} \\
 1000 \text{ jednotek na 1 mm posuvu} \dots\dots\dots x \text{ jednotek / otáčku} \\
 \hline
 \frac{1000 \text{ jednotek}}{502 \text{ jednotek}} * 1000 \frac{\text{jednotek}}{\text{otáčku}} = 1992 \frac{\text{jednotek}}{\text{otáčku}}
 \end{array}$$

Dalším testováním se tato hodnota upřesnila na 1994 jednotek na otáčku a ta byla nastavena do konfigurace modulu X67SM2436 pro motor X.

Real axis 1		
Number of full steps per motor rev	200	Steps
Units at the load	1994	Units
Motor revs per units at the load	1	
Encoder increments per rev	1024	

Obr. 90: Nastavení počtu inkrementů na jednu otáčku motoru X

V souboru motoru X v „Logical View“ s příponou „i“ se vyplní limity. Tyto limity ohraničují pracovní prostor v dané ose, limitují maximální rychlosti a zrychlení a definují maximální dovolený počet ztracených kroků.

limit		Limit value	
parameter		Parameters	
v_pos	6000.0	Unit...	Speed in positive direction
v_neg	6000.0	Unit...	Speed in negative direction
a1_pos	50000.0	Unit...	Acceleration in positive direction
a2_pos	50000.0	Unit...	Deceleration in positive direction
a1_neg	50000.0	Unit...	Acceleration in negative direction
a2_neg	50000.0	Unit...	Deceleration in negative direction
t_jolt	0.0	s	Jolt time
t_in_pos	0.0	s	Settling time before message 'In Position'
pos_sw_end	55000	Units	Positive SW end
neg_sw_end	-55000	Units	Negative SW end
ds_warning	3000.0	Units	Lag error limit for display of a warning
ds_stop	3000.0	Units	Lag error limit for stop of a movement
a_stop	1.0E+30	Unit...	Acceleration limit for stop of a movement
dv_stop	0.0	1/s	Speed error limit for stop of a movement
dv_stop_mode	ncOFF		Mode for speed error monitoring

Obr. 91: Limity osy X

Parametry regulátoru byly zjištěny experimentálně tak, aby motor pracoval co nejplynuleji.

controller		Controller	
mode	ncPOSITION	Mode	
position		Position Controller	
kv	50.0	1/s	Proportional amplification
tn	0.0	s	Integral action time
t_predict	0.01	s	Prediction time
t_total	0.01	s	Total time
p_max	1.0E+30	Unit...	Maximum proportional action
i_max	1.0E+30	Unit...	Maximum integral action

Obr. 92: Parametry regulátoru osy X

b) Motor pro osu Y

Motor pro osu Y je 80MPF5.250S114-01 se jmenovitým proudem 2.5 A, který je připojen na první pozici modulu 80SD100XD.C044-01, jenž má jmenovitý proud 10 A. Vhodné nastavení proudů pro tento motor je opět 0.3 A, 2.1 A a 2.5 A. V procentuálních hodnotách modulu to je 3 %, 21 % a 25 %.

Motor 01			
Full step threshold 01	65535	Steps/s	Threshold for motor 01 where the driver switch from microstep
Motor settling time 01	10	10ms	Settling time for motor 01
Current configuration 01			
Holding current	3	%	Current in % (0-150) of module rated current (10A)
Rated current	21	%	Current in % (0-150) of module rated current (10A)
Maximum current	25	%	Current in % (0-150) of module rated current (10A)

Obr. 93: Nastavení proudů na motoru osy Y

Počet inkrementů na jednu otáčku motoru se opět spočítá tak, aby 1000 jednotek odpovídalo 1 mm. Zjištěná hodnota pro posuv o 1 mm byla opět 502 jednotek s původními 1000 jednotkami na jednu otáčku motoru. Počet jednotek na otáčku se spočítá ekvivalentní trojčlenkou jako u motoru X.

$$\begin{array}{l} 502 \text{ jednotek na 1 mm posuvu} \dots\dots\dots 1000 \text{ jednotek / otáčku} \\ 1000 \text{ jednotek na 1 mm posuvu} \dots\dots\dots x \text{ jednotek / otáčku} \\ \hline \frac{1000 \text{ jednotek}}{502 \text{ jednotek}} * 1000 \frac{\text{jednotek}}{\text{otáčku}} = 1992 \frac{\text{jednotek}}{\text{otáčku}} \end{array}$$

Dalším testováním se tato hodnota opět upřesnila na 1994 jednotek na otáčku a ta byla nastavena do konfigurace modulu 80SD100XD.C044-01 pro motor Y.

Real axis 1		
Number of full steps per motor rev	200	Steps
Units at the load	1994	Units
Motor revs per units at the load	1	
Encoder increments per rev	1024	

Obr. 94: Nastavení počtu inkrementů na jednu otáčku motoru Y

V souboru motoru Y v „Logical View“ s příponou „i“ se vyplní limity. Tyto limity ohraničují pracovní prostor v dané ose, limitují maximální rychlosti a zrychlení a definují maximální dovolený počet ztracených kroků.

limit			Limit value	Parameters
v_pos	6000.0	Units/s	Speed in positive direction	
v_neg	6000.0	Units/s	Speed in negative direction	
a1_pos	50000.0	Units/s ²	Acceleration in positive direction	
a2_pos	50000.0	Units/s ²	Deceleration in positive direction	
a1_neg	50000.0	Units/s ²	Acceleration in negative direction	
a2_neg	50000.0	Units/s ²	Deceleration in negative direction	
t_jolt	0.1	s	Jolt time	
t_in_pos	0.0	s	Settling time before message 'In Position'	
pos_sw_end	105000	Units	Positive SW end	
neg_sw_end	-105000	Units	Negative SW end	
ds_warning	3000.0	Units	Lag error limit for display of a warning	
ds_stop	3000.0	Units	Lag error limit for stop of a movement	
a_stop	1.0E+30	Units/s ²	Acceleration limit for stop of a movement	
dv_stop	0.0	1/s	Speed error limit for stop of a movement	
dv_stop_mode	ncOFF		Mode for speed error monitoring	

Obr. 95: Limity osy Y

controller			Controller
mode	ncPOSITION		Mode
position			
kv	50.0	1/s	Proportional amplification
tn	0.0	s	Integral action time
t_predict	0.01	s	Prediction time
t_total	0.01	s	Total time
p_max	1.0E+30	Units/s	Maximum proportional action
i_max	1.0E+30	Units/s	Maximum integral action

Obr. 96: Parametry regulátoru osy Y

c) Motor pro osu Z

Motor pro osu Z má označení 80MPF5.250S114-01 a jmenovitý proud 2.5 A. Je připojen na druhou pozici modulu 80SD100XD.C044-01, jenž má jmenovitý proud 10 A.

Vhodné nastavení proudů pro tento motor je opět 0.3 A, 2.1 A a 2.5 A. V procentuálních hodnotách modulu to je 3 %, 21 % a 25 %.

Motor 02			
Full step threshold 02	65535	Steps/s	Threshold for motor 02 where the driver switch from microstep to full step mode
Motor settling time 02	10	10ms	Settling time for motor 02
Current configuration 02			
Holding current	3	%	Current in % (0-150) of module rated current (10A)
Rated current	21	%	Current in % (0-150) of module rated current (10A)
Maximum current	25	%	Current in % (0-150) of module rated current (10A)

Obr. 97: Nastavení proudů na motoru osy Z

Počet inkrementů na jednu otáčku motoru se spočítá tak, aby 1000 jednotek odpovídalo 1 mm. Zjištěná hodnota pro posuv o 1 mm byla 250 jednotek s původními 1000 jednotkami na jednu otáčku motoru. Počet jednotek na otáčku se spočítá trojčlenkou.

$$\begin{array}{l}
 250 \text{ jednotek na 1 mm posuvu} \dots\dots\dots 1000 \text{ jednotek / otáčku} \\
 1000 \text{ jednotek na 1 mm posuvu} \dots\dots\dots x \text{ jednotek / otáčku} \\
 \hline
 \frac{1000 \text{ jednotek}}{250 \text{ jednotek}} * 1000 \frac{\text{jednotek}}{\text{otáčku}} = 4000 \frac{\text{jednotek}}{\text{otáčku}}
 \end{array}$$

Dalším testováním se tato hodnota opět upřesnila na 3996 jednotek na otáčku a ta byla nastavena do konfigurace modulu 80SD100XD.C044-01 pro motor Z.

Real axis 2			
Number of full steps per motor rev	200	Steps	
Units at the load	3996	Units	
Motor revs per units at the load	1		
Encoder increments per rev	1024		

Obr. 98: Nastavení počtu inkrementů na jednu otáčku motoru Z

V souboru motoru Z v „Logical View“ s příponou „i“ se vyplní limity. Tyto limity ohraničují pracovní prostor v dané ose, limitují maximální rychlosti a zrychlení a definují maximální dovolený počet ztracených kroků.

limit			
parameter			Limit value
Parameters			
v_pos	6000.0	Units/s	Speed in positive direction
v_neg	6000.0	Units/s	Speed in negative direction
a1_pos	50000.0	Units/s ²	Acceleration in positive direction
a2_pos	50000.0	Units/s ²	Deceleration in positive direction
a1_neg	50000.0	Units/s ²	Acceleration in negative direction
a2_neg	50000.0	Units/s ²	Deceleration in negative direction
t_jolt	0.1	s	Jolt time
t_in_pos	0.0	s	Settling time before message 'In Position'
pos_sw_end	150000	Units	Positive SW end
neg_sw_end	-75000	Units	Negative SW end
ds_warning	1000.0	Units	Lag error limit for display of a warning
ds_stop	3000.0	Units	Lag error limit for stop of a movement
a_stop	1.0E+30	Units/s ²	Acceleration limit for stop of a movement
dv_stop	0.0	1/s	Speed error limit for stop of a movement
dv_stop_mode	ncOFF		Mode for speed error monitoring

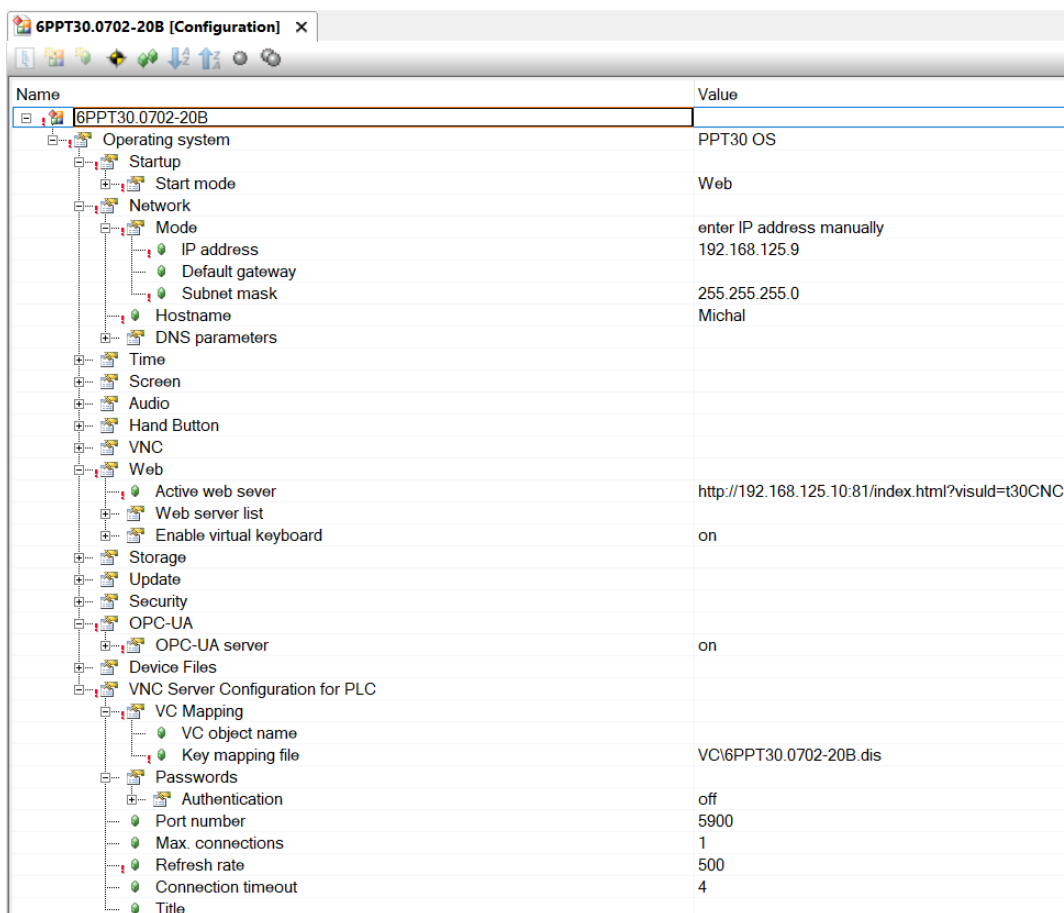
Obr. 99: Limity osy Z

controller				Controller
mode	ncPOSITION			Mode
position				Position Controller
kv	50.0	1/s		Proportional amplification
tn	0.0	s		Integral action time
t_predict	0.01	s		Prediction time
t_total	0.01	s		Total time
p_max	1.0E+30	Units/s		Maximum proportional action
i_max	0.0	Units/s		Maximum integral action

Obr. 100: Parametry regulátoru osy Z

8.2.5 Konfigurace vizualizačního panelu

Konfigurace vizualizačního panelu se otevře pravým kliknutím na 6PPT30.0702-20B v „Physical View“ a výběrem „Configuration“. V této konfiguraci je potřeba vybrat „Start mode“ jako webový prohlížeč, v „Network“ zadat IP adresu panelu, v záložce „Web“ napsat webovou adresu, na které běží vizualizace, zapnout OPC-UA server pro komunikaci dat a snížit „Refresh rate“ z 1000 ms na 500 ms na rychlejší obnovování displeje.

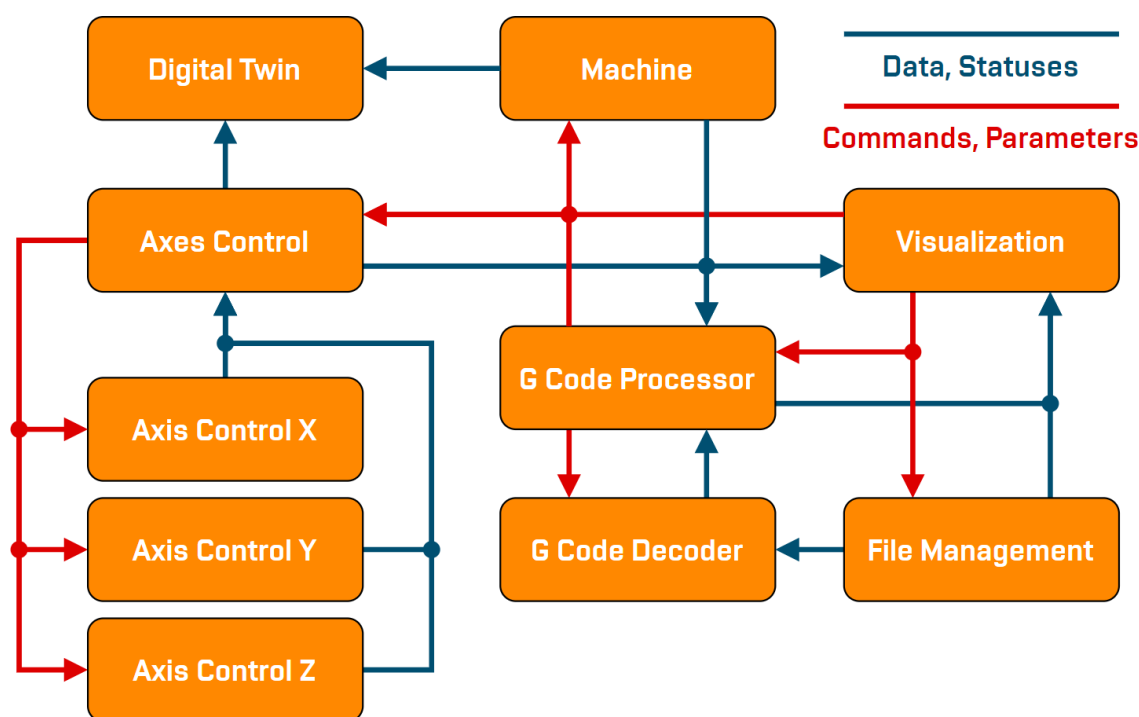


Name	Value
6PPT30.0702-20B	
Operating system	PPT30 OS
Startup	
Start mode	Web
Network	
Mode	enter IP address manually
IP address	192.168.125.9
Default gateway	
Subnet mask	255.255.255.0
Hostname	Michal
DNS parameters	
Time	
Screen	
Audio	
Hand Button	
VNC	
Web	
Active web sever	http://192.168.125.10:81/index.html?visuld=t30CNC
Web server list	
Enable virtual keyboard	on
Storage	
Update	
Security	
OPC-UA	
OPC-UA server	on
Device Files	
VNC Server Configuration for PLC	
VC Mapping	
VC object name	
Key mapping file	VC\6PPT30.0702-20B.dis
Passwords	
Authentication	off
Port number	5900
Max. connections	1
Refresh rate	500
Connection timeout	4
Title	

Obr. 101: Konfigurace vizualizačního panelu

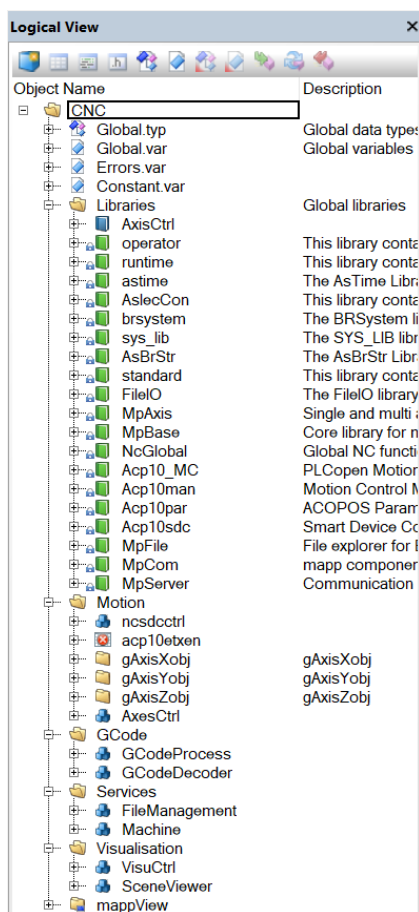
8.3 Organizace projektu

Projekt je organizován do programů, které spolu navzájem komunikují. Každý program plní určitou komplexní funkci. Pro ovládání motoru byl vytvořen funkční blok „Axis Control“, který představuje univerzální řízení jedné osy s řešením napájení, referování, kompenzace vůle, alarmů a zpracování příkazů. Program „Axes control“ pak řídí koordinaci a synchronizaci tří instancí tohoto funkčního bloku pro osu X, Y a Z a posílá informace o aktuálních polohách digitálnímu dvojčeti, které je vytvořeno v prostředí Scene Viewer. Procesor G-kódu zpracovává G-kód, nejdříve pošle příkaz dekodéru, jenž G-kód dekóduje a pošle informace o přečtených instrukcích procesoru. Pak zpracovává jednotlivé instrukce a posílá příkazy s parametry programu „Axes control“ a „Machine“. Program „Machine“ ovládá funkce ovládacího panelu frézky jako vypínání a zapínání vřetene a světla frézky. Dekodéru poskytuje informaci a přístup k souborům program „File management“. Vše je možné ovládat z vizualizace.



Obr. 102: Organizace projektu

Do stromové struktury projektu v „Logical View“ se postupně vloží funkční blok „AxisCtrl“, všechny výše zmíněné programy v jazyce strukturovaný text (ST) a knihovny, potřebné pro tento projekt. Finální verze stromové struktury projektu viz obrázek 103.



Obr. 103: Finální stromová struktura projektu

8.4 Funkční blok pro ovládání jednoho motoru

V programovací části projektu byl jako první napsán funkční blok „AxisCtrl“ pro ovládání jednoho motoru, který se nachází v knihovně též zvané „AxisCtrl“. Tento funkční blok umožňuje řídit jeden motor i s řešením kompenzace vůle v převodech, možností dvou způsobů referování osy a zpracováním alarmů. Pro funkci řízení jednoho motoru byl vybrán funkční blok místo klasického programu z důvodu vytvoření více instancí řízení jednoho motoru. Díky tomu se pak pro každou novou přidanou osu pouze deklaruje další instance funkčního bloku „AxisCtrl“.

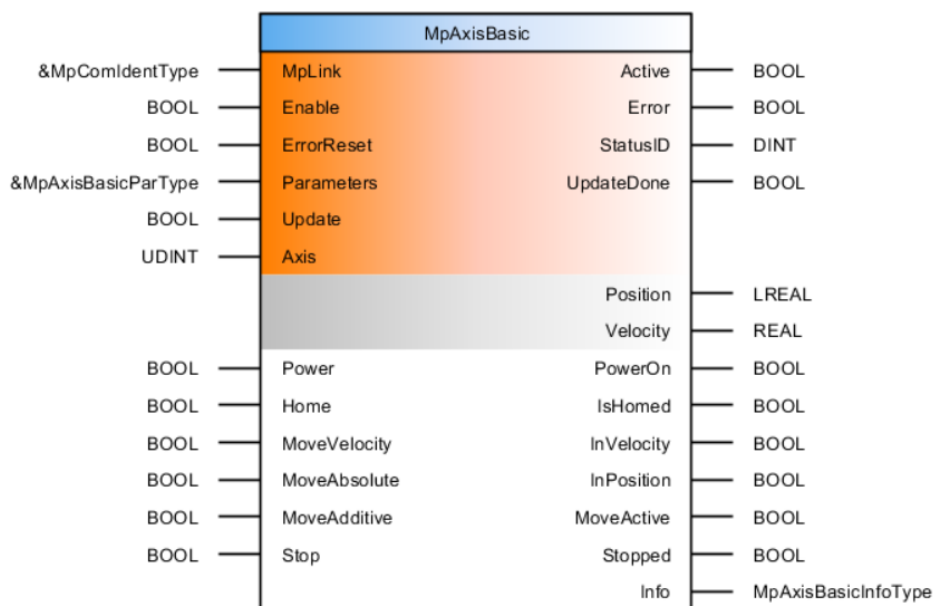
Struktura „AxisCtrl“ je tvořena stavovým automatem, ve strukturovaném textu se jedná o funkci „CASE“. Ten funguje tak, že se program nachází v určitém stavu a v něm setrvává až do doby, kdy jsou splněny podmínky pro přechod do jiného ze stavů. První stav, ve kterém je funkční blok po spuštění PLC, je stav „ENABLE“. V něm se čeká až budou zapnuty funkční bloky „MpAxisBasic“ a „MpAxisCyclicSet“. Když jsou oba funkční bloky aktivní, přejde stavový automat do dalšího stavu, kde čeká až přijde z vizualizace příkaz pro zapnutí motorů. Po zapnutí motoru se čeká na příkaz pro referování. Jakmile je vykonáno požadované referování, nastane stav „READY“ a motor je připraven pro vykonávání pohybových příkazů. Pokud přijde příkaz pro pohyb, funkční

blok přejde přes stav, v němž si spočítá parametry pohybu, do stavu, kde čeká na dokončení požadovaného příkazu. Ve chvíli dokončení pohybu se program vrátí do stavu „READY“. Při zadání příkazu pro vypnutí motorů se motor vypne a funkční blok se vrátí do bodu, kde čeká na zapnutí motoru. Kdykoliv nastane nějaká z chybových podmínek, přejde se do chybového stavu. Z něj se lze dostat pouze po potvrzení alarmu. Kromě stavového automatu se v „AxisCtrl“ nachází také tvorba dat a statusů jako výstup funkčního bloku, podmínky pro alarmový stav a vynucené příkazy. Podmínky pro alarmový stav sledují hodnoty důležitých proměnných a pokud se někde vyskytne chyba, nuceně nastaví stavový automat do chybového stavu. Vynucené příkazy kontrolují, zda nepřišel nějaký příkaz. Když se tak stane, vynucené příkazy jsou schopné zvenku měnit stav hlavního stavového automatu.

8.4.1 Řízení motoru

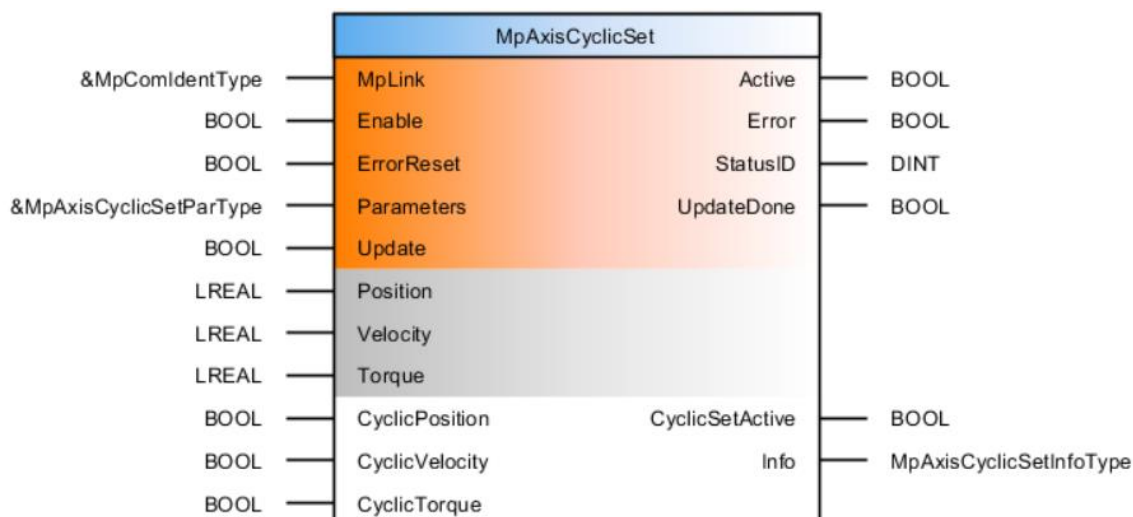
Řízení je řešené mapp komponentou „MpAxis“, která poskytuje standardní funkce pro řízení os. To zahrnuje inicializaci, standardní pohyb a zpracování chyb. Podporovány jsou také víceosé funkce a generování cyklických žádaných hodnot.

Z „MpAxis“ byl použit funkční „MpAxisBasic“ pro zapínání a vypínání motoru, jeden způsob referování a zpracování všech pohybových příkazů kromě kruhové interpolace.



Obr. 104: Funkční blok MpAxisBasic [19]

Pohybové příkazy při vykonávání kruhové interpolace vyžadují cyklickou změnu vstupního parametru rychlosti. Na takové zadávání parametru není funkční blok MpAxisBasic vhodný, to bylo důvodem pro přidání dalšího funkčního bloku MpAxisCyclicSet, jenž je schopný cyklicky zpracovávat žádané vstupní parametry. Vykonává pouze příkazy kruhové interpolace.

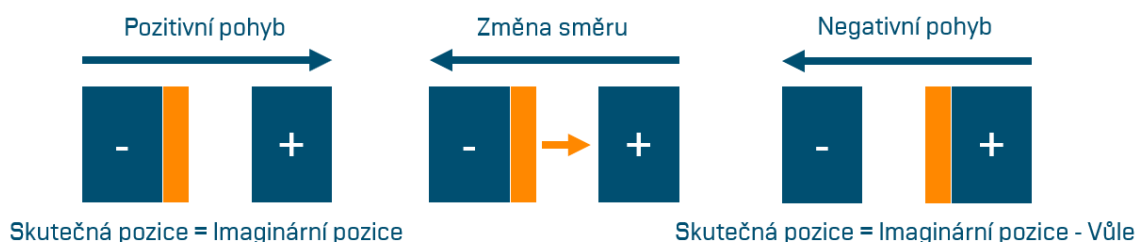


Obr. 105: Funkční blok MpAxisCyclicSet [19]

8.4.2 Vůle os

U všech třech hlavních pracovních os je převod rotačního pohybu od motoru na posuvný pohyb v jednotlivých osách řešen pomocí závitových tyčí se závitovou maticí. Výstupní hřídele motorů jsou s válcovým koncem hřídele závitových tyčí spojeny pružnými spojkami. Vůle os vznikají v šroubových převodech a u pružných spojek. V ose Z je navíc i kuželové ozubené soukolí pro změnu orientace otáčení o 90°, které také tvoří vůli.

Mechanická vůle je kompenzována softwarově. Funkční blok si udržuje informaci o předchozím a aktuální směru pohybu. Když přijde příkaz pro pohyb se zadanou polohou, nejdříve se zjistí, zda se změnil směr pohybu nebo ne. Pokud ano, bude probíhat reverzace vůle a status „*Reversing*“ se nastaví do logické jedničky. Jestliže se směr nezměnil, tak reverzace vůle neprobíhá, pouze se spočítá skutečná poloha. Je vybrán základní směr, v něm skutečná pozice odpovídá imaginární pozici. Když se potom směr změní, tak je skutečná pozice spočítána jako imaginární s odečtenou nebo přičtenou vůlí v závislosti na volbě základního směru. Pro lepší vizuální představu viz obr. níže.



Obr. 106: Způsob softwarové kompenzace vůle

```
IF (Parameter.Position < Internal.FB.MpAxisBasic_0.Position)
  AND (Internal.Parameter.OldDirection = axsPOSITIVE_DIRECTION) THEN
  MpAxisBasicPar.Position      := Parameter.Position - AxisClearance;
  Internal.Parameter.Direction := axsNEGATIVE_DIRECTION;
  Internal.Parameter.OldPosition := Internal.FB.MpAxisBasic_0.Position;
  Status.Reversing := TRUE;
ELSIF ((Parameter.Position - AxisClearance) < Internal.FB.MpAxisBasic_0.Position)
  AND (Internal.Parameter.OldDirection = axsNEGATIVE_DIRECTION) THEN
  MpAxisBasicPar.Position      := Parameter.Position - AxisClearance;
  Internal.Parameter.Direction := axsNEGATIVE_DIRECTION;
ELSIF ((Parameter.Position - AxisClearance) > Internal.FB.MpAxisBasic_0.Position)
  AND (Internal.Parameter.OldDirection = axsNEGATIVE_DIRECTION) THEN
  MpAxisBasicPar.Position      := Parameter.Position;
  Internal.Parameter.Direction := axsPOSITIVE_DIRECTION;
  Internal.Parameter.OldPosition := Internal.FB.MpAxisBasic_0.Position;
  Status.Reversing := TRUE;
ELSIF (Parameter.Position > Internal.FB.MpAxisBasic_0.Position)
  AND (Internal.Parameter.OldDirection = axsPOSITIVE_DIRECTION) THEN
  MpAxisBasicPar.Position      := Parameter.Position;
  Internal.Parameter.Direction := axsPOSITIVE_DIRECTION;
ELSIF (Internal.Parameter.OldDirection = axsPOSITIVE_DIRECTION) THEN
  MpAxisBasicPar.Position      := Parameter.Position;
  Internal.Parameter.Direction := axsPOSITIVE_DIRECTION;
ELSIF (Internal.Parameter.OldDirection = axsNEGATIVE_DIRECTION) THEN
  MpAxisBasicPar.Position      := Parameter.Position - AxisClearance;
  Internal.Parameter.Direction := axsNEGATIVE_DIRECTION;
END_IF;
```

Obr. 107: Ukázka výpočtu kompenzace vůle pro pozitivní základní směr

8.4.3 Referování

Referování je potřebné, aby stroj věděl, v jakých polohách se nachází. Pokud by měly použité motory konstrukčně složitější absolutní enkodér, bylo by referování jednoduché, protože generují pro každou pozici natočení konkrétní číselnou hodnotu, tedy v každém momentě je přesně definováno, v jakém úhlu natočení se enkodér nachází. Motory pro tento projekt však mají pouze jednodušší inkrementální enkodér, který informuje o pohybu, ne však o vlastní přesné pozici. Referování tedy musí být řešeno s použitím PLC. Pro tento případ byly naprogramovány dva způsoby referování.

První způsob je referování s detekcí ztráty kroků. Ztráta kroků je rozdíl mezi vypočtenou pozicí a pozicí enkodéru. V Automation Studiu se ztráta kroků nazývá „Lag error“. Hodnota ztracených kroků při běžném pohybu osciluje kolem určité hodnoty, podle odporu při posuvu. Když však motor narazí na překážku, hodnota ztracených kroků lineárně roste. Krokový motor se pohybuje v definovaném směru a s definovanou rychlostí, dokud nenarazí na překážku. Když se tak stane, začne ztrácet kroky a v tu chvíli zastaví. Nyní ví, jakou má polohu a dojede zpět na referenční pozici. Po najetí do referenční polohy je motor zreferovaný. Tato operace se provádí na všech motorech simultánně.



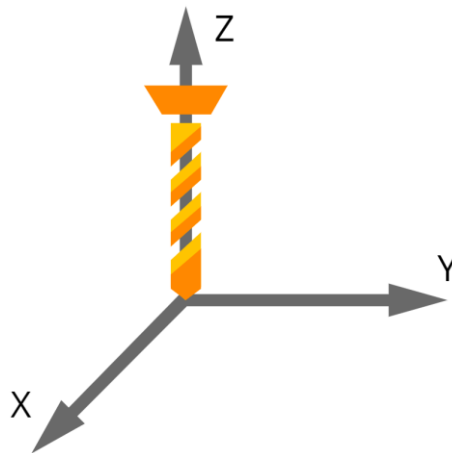
Obr. 108: Referování s detekcí ztráty kroku

Druhým způsobem referování je obnovením pozic z permanentní paměti. V permanentní paměti se uchovávají hodnoty proměnných i po vypnutí PLC. Když se pak znovu zapne, pozice a směry všech os se jednoduše zapíší z permanentní paměti na motory. Pro vykonání tohoto typu referování však musí být splněné určité podmínky. Byla založena pomocná proměnná „RestoreHomingPossible“ pro sledování, zda je možné vykonat referování z permanentní paměti. Aby bylo možné provést toto referování, musí být před ním provedeno referování s detekcí ztráty kroků. Vždy při započetí referování s detekcí ztráty kroků je proměnná „RestoreHomingPossible“ nastavena na „FALSE“ a při jeho dokončení zase na „TRUE“. To znamená, že pokud se referování s detekcí ztráty kroků nedokončí nebo ještě nebylo vykonáno, není možné referovat z permanentní paměti. Dále existují dvě podmínky při zapnutí PLC pro možnost referování obnovením. Při spuštění PLC se kontroluje, zda je permanentní paměť v pořádku tak, že proměnná „IsPermanentMemoryOk“ je ve stavu „TRUE“. Pokud tomu tak není, permanentní paměť byla smazána a není možné referovat obnovením z permanentní paměti. Druhou podmínkou při zapnutí PLC je nehybnost motorů před vypnutím PLC. V proměnné „MovementActive“ je zaznamenáváno, zda se některý z motorů pohybuje. Pokud bylo PLC vypnuto při pohybu motorů, zůstane tato proměnná ve stavu „TRUE“ a po opětovném zapnutí není referování z permanentní paměti možné, protože hodnota pozic zapsaná v permanentní paměti neodpovídá skutečným pozicím motorů.

8.5 Ovládání motorů

Pro řízení koordinace a synchronizace tří instancí funkčního bloku „AxisCtrl“ byl založen program „AxesCtrl“. Strukturou je tento program velice podobný struktuře funkčního bloku „AxisCtrl“. Obsahuje oblast pro detekci alarmů, vynucené příkazy, hlavní stavový automat a tvorbu dat a statusů. Navíc jsou zde deklarovány instance funkčního bloku „AxisCtrl“ a zapisovány všechny potřebná vstupní data pro tyto bloky. Stavový automat je obdobný jako v „AxisCtrl“, akorát přechod mezi stavy neřeší splnění podmínek jednoho motoru, ale splnění podmínek všech funkčních bloků pro přechod do dalšího stavu. Tento program přijímá příkazy pro pohyb z programu „GCodeProcess“ a z vizualizace.

Soustava tří základních pracovních os vytváří kartézský souřadnicový systém, v němž se vykonávají manuální pohyby a programy v G-kódu.



Obr. 109: Kartézský souřadnicový systém stroje z pohledu nástroje

8.6 Dekódování G kódu

Před zpracováním programu v G-kódu se musí vždy nejdříve dekodovat vybraný soubor. Program „GCodeDecoder“ dekoduje požadovaný soubor a naplní strukturu pro instrukce zjištěnými hodnotami. Dále kontroluje správnou syntaxi všech instrukcí, globální syntaxi a zda nějaká pozice nepřekračuje softwarové limity poloh.

8.6.1 Způsob dekodování

Nejdříve program čeká na příkaz pro dekodování. Když přijde příkaz s požadovaným souborem pro přečtení, otevře se a přečte se prvních 100 znaků souboru (množství znaků lze měnit konstantou „LENGTH_OF_READ_DATA“). Následuje prohledávání znak po znaku od začátku přečteného textového řetězce a hledá se ascii reprezentace konce řádku (10). Jakmile je nalezen konec řádku, odstříhne se vše za ním a tím je separována první instrukce. Také se запиše poloha konce řádku jako offset pro další čtení. V odseparované instrukci se hledají písmena funkcí (G, M, D) nebo parametrů (X, Y, Z, R, F, S, I, J, K, H) v ascii reprezentaci, od začátku instrukce po konec. Pokud je nalezeno nějaké písmeno funkce nebo parametru, запиše se platnost tohoto písmena v aktuální instrukci a následuje hledání hodnoty funkce či parametru. To probíhá tak, že se prohledávají znaky od pozice, kde bylo nalezeno písmeno, a hledá se ascii reprezentace čísel 0 až 9 nebo znaménka mínus. Pokud je nalezeno číslo nebo znaménko mínus, zaznamená se poloha začátku hodnoty a dále se hledá znak, který není číslo 0 až 9 nebo tečka. Když je i to nalezeno, je část textu od první nalezené pozice po druhou vyjmuta z instrukce a funkcí „brsatoi“ nebo „brsatoi“ (podle datového typu funkce či parametru) z knihovny „AsBrStr“ se vyjmutá část textu konvertuje na číslo a запиše do aktuální instrukce k příslušnému parametru. Potom se opět hledají písmena parametrů nebo funkcí a postup se opakuje až po konec instrukce. Jestliže je nalezen znak komentáře (středník nebo levá závorka), zbytek instrukce už není dále prohledáván. Po projití celé instrukce, se stavový automat vrátí do stavu čtení souboru, ale tentokrát už má zapsaný offset a čte soubor od další instrukce dál. Celý proces se takto opakuje pro všechny řádky (instrukce) souboru.

Dekódované instrukce musí být zkontrolovány. Nejdříve jsou na všechny instrukce, které mají platné některé pozice a nemají platnou G funkci, zapsány nejbližší předchozí G funkce (vlastnost G-kódu: při užívání totožné G funkce mezi bezprostředně sousedícími řádky není nutné psát číslo funkce vícekrát). Následuje kontrola syntaxe individuálních instrukcí. Jedná se o soubor podmínek kombinací platností funkcí a parametrů jednotlivých instrukcí. Každá instrukce má zkontrolováno, zda obsahuje všechny potřebné parametry a jestli neobsahuje parametry, které mít nesmí. Například funkce G01 nesmí mít platnou M nebo D funkci, některý z parametrů S, I, J, K, H, R či Time, a naopak musí mít alespoň jeden z parametrů X, Y, Z. Parametr F je volitelný.

Další je kontrolována globální syntaxe. V této části se zjišťuje, zda je v celém programu vybrán mód, ve kterém se program vykonává (G90, G91) a zda je program ukončen funkcí M30.

Poslední kontrola se zabývá limity. Pozice v G-kódu nesmí přesahovat za pracovní prostor stroje. Proto jsou všechny pozice zkontrolovány, jestli jsou v přípustných limitech os. Tato kontrola počítá i s posunutím nulového bodu souřadnicového systému (G54), vybráním průměru nástroje (DX) a inkrementálním módem. Kromě poloh jsou zkontrolovány i časy funkcí G04, které nesmí být menší jak 0 sekund a větší jak 600 sekund (konstanta „MAX_G4_WAIT_TIME“).

Po úspěšném dekodování souboru se otevřený soubor zavře a stavový automat se vrátí do stavu čekání na příkaz.

8.6.2 Podporované funkce

Funkce jsou zpracovány standardně a odpovídají funkcím CNC G-kódu ARNC0 od společnosti B&R. Podporované funkce viz Tab. 17.

Tab. 17: Podporované funkce

G00	Lineární interpolace rychloposuvem
G01	Lineární interpolace pracovním posuvem
G02	Kruhová interpolace po směru hodinových ručiček
G03	Kruhová interpolace proti směru hodinových ručiček
G04	Čekání v sekundách
G17	Výběr roviny XY
G18	Výběr roviny ZX
G19	Výběr roviny YZ
G40	Deaktivace kompenzace průměru nástroje (CDC)
G41	Kompenzace průměru nástroje vlevo (CDC left)
G42	Kompenzace průměru nástroje vpravo (CDC right)
G53	Deaktivace posunutí nulového bodu
G54	Posunutí nulového bodu

G90	Mód absolutních souřadnic
G91	Mód inkrementálních souřadnic
M00	Programový stop
M03	Zapnutí otáček vřetene po směru hodinových ručiček
M04	Zapnutí otáček vřetene proti směru hodinových ručiček
M05	Vypnutí otáček vřetene
M06	Zapnutí světla frézky
M07	Vypnutí světla frézky
M30	Ukončení programu

8.7 Zpracování G kódu (interpret)

Program „GCodeProsess“ zpracovává jednotlivé instrukce G-kódu. Jeho strukturu tvoří oblast alarmových podmínek, vynucené příkazy, hlavní stavový automat a tvorba dat a statusů.

Výchozí stav tohoto programu je čekání na příkaz pro zpracování G-kódu. Jakmile přijde rozkaz pro zpracování souboru, vyšle se příkaz programu „GCodeDecoder“, aby dekódoval požadovaný soubor. Po úspěšném dekódování má procesor k dispozici strukturu jednotlivých instrukcí a může započít vykonávání jedné po druhé. Program zjistí, jakou funkci má aktuální instrukce a následně jaké je číslo funkce. Poté se vykoná daná instrukce, ať už jde o pohyb, čekání nebo jinou funkci.

8.7.1 Způsob zpracování jednotlivých funkcí

G00, G01

Jedná se o lineární interpolaci jen s různými rychlosti posuvu. Prvně se spočítá pozice následující polohy s ohledem na právě používaný mód. Při absolutním zadávání souřadnic je následující pozice rovna parametrům v instrukci, zatímco při inkrementálním zadávání je následující pozice spočítána jako součet aktuální pozice s parametrem pozice v instrukci. Druhým krokem se vypočítá vzdálenost v jednotlivých osách rozdílem aktuální pozice od následující. Určí se nominální rychlost v závislosti na čísle funkce. Procesor zjistí, zda byl zadán parametr F. Pokud ano a zadaná hodnota parametru F je v přípustných limitech pro danou funkci, zapíše se tato hodnota do nominální rychlosti. Jestliže není parametr F v limitech pro danou funkci nebo pokud nebyl tento parametr zadán, pak se do nominální rychlosti zapíše „normální“ rychlost funkce. Ty jsou dány konstantami „G0_NORMAL_VELOCITY“ a „G1_TO_G3_NORMAL_VELOCITY“. Nominální rychlost představuje celkovou rychlost posuvu v prostoru a ta musí být rozpočítána do jednotlivých os pomocí Pythagorovy věty. Pokud by rychlosti nebyly úměrné vzdálenostem podle Pythagorovy věty, posuv v některých osách by se dokončil dříve než v jiných a nešlo by o lineární interpolaci.

$$v^2 = v_x^2 + v_y^2 + v_z^2$$

$$v = \sqrt{v_x^2 + v_y^2 + v_z^2}$$

$$v = v * \frac{D_x}{\sqrt{D_x^2 + D_y^2 + D_z^2}} + v * \frac{D_y}{\sqrt{D_x^2 + D_y^2 + D_z^2}} + v * \frac{D_z}{\sqrt{D_x^2 + D_y^2 + D_z^2}}$$

$$v_x = v * \frac{D_x}{\sqrt{D_x^2 + D_y^2 + D_z^2}} \quad (8.1)$$

$$v_y = v * \frac{D_y}{\sqrt{D_x^2 + D_y^2 + D_z^2}} \quad (8.2)$$

$$v_z = v * \frac{D_z}{\sqrt{D_x^2 + D_y^2 + D_z^2}} \quad (8.3)$$

, kde

v	Nominální (celková) rychlost posuvu [mm/min]
v_x	Rychlost posuvu v ose X [mm/min]
v_y	Rychlost posuvu v ose Y [mm/min]
v_z	Rychlost posuvu v ose Z [mm/min]
D_x	Vzdálenost posuvu v ose X [mm]
D_y	Vzdálenost posuvu v ose Y [mm]
D_z	Vzdálenost posuvu v ose Z [mm]

Obdobným způsobem jako rychlosti jsou spočítána i zrychlení.

$$a_x = d_x = a * \frac{D_x}{\sqrt{D_x^2 + D_y^2 + D_z^2}} \quad (8.4)$$

$$a_y = d_y = a * \frac{D_y}{\sqrt{D_x^2 + D_y^2 + D_z^2}} \quad (8.5)$$

$$a_z = d_z = a * \frac{D_z}{\sqrt{D_x^2 + D_y^2 + D_z^2}} \quad (8.6)$$

, kde

a	Nominální (celkové) zrychlení posuvu [mm/min]
a_x	Zrychlení posuvu v ose X [mm/min]
a_y	Zrychlení posuvu v ose Y [mm/min]
a_z	Zrychlení posuvu v ose Z [mm/min]
d_x	Zpomalení posuvu v ose X [mm/min]
d_y	Zpomalení posuvu v ose Y [mm/min]
d_z	Zpomalení posuvu v ose Z [mm/min]

Spočítané hodnoty rychlostí, zrychlení, zpomalení a poloh jsou posílány společně s příkazem pro pohyb programu „AxesCtrl“.



Obr. 110: Ukázka lineární interpolace v rovině XY

G02, G03

Tyto 2 funkce představují kruhovou interpolaci. Funkce G2 slouží pro vykonání kruhové interpolace po směru hodinových ručiček a G3 zase proti směru hodinových ručiček. Pro zpracování této interpolace je využíván funkční blok „MpAxisCyclicSet“ kvůli možnosti cyklické změny vstupního parametru rychlosti. Princip zpracování je v zjištění pozice středu kružnice, rozdělení kružnice na více malých úseček a dále měnění velikosti rychlostí v různých osách pro dosažení pohybu v požadovaném směru. Jedná se o rychlostní řízení.

Nejdříve se spočítá následující pozice s ohledem na právě používaný mód. Při absolutním zadávání souřadnic je následující pozice rovna parametrům v instrukci, zatímco při inkrementálním zadávání je následující pozice spočítána jako součet aktuální pozice s parametrem pozice v instrukci. Určí se úhlový krok úměrně k rádiusu kružnice, který slouží pro rozdělení kružnice na úsečky. Dále se vypočítají čtyři potenciální středy kružnice z kvadratické rovnice kruhu.

$$(x - x_c)^2 + (y - y_c)^2 = R^2 \quad (8.7)$$

, kde	x	X-ová souřadnice bodu na kružnici [mm]
	y	Y-ová souřadnice bodu na kružnici [mm]
	x_c	X-ová souřadnice středu kružnice [mm]
	y_c	Y-ová souřadnice středu kružnice [mm]
	R	Poloměr kružnice [mm]

Do této rovnice se dosadí souřadnice začátku a konce kruhu a dostaneme dvě kvadratické rovnice o dvou neznámých.

$$\begin{aligned} x_s^2 - 2x_s x_c + x_c^2 + y_s^2 - 2y_s y_c + y_c^2 &= R^2 \\ x_e^2 - 2x_e x_c + x_c^2 + y_e^2 - 2y_e y_c + y_c^2 &= R^2 \end{aligned}$$

$$x_s^2 - x_e^2 - 2x_s x_c + 2x_e x_c + y_s^2 - y_e^2 - 2y_s y_c + 2y_e y_c = 0$$

$$y_c = \frac{-x_s^2 + x_e^2 - y_s^2 + y_e^2 + 2x_s x_c - 2x_e x_c}{2(y_e - y_s)}$$

$$y_c = \frac{-x_s^2 + x_e^2 - y_s^2 + y_e^2}{2(y_e - y_s)} + x_c \frac{x_s - x_e}{y_e - y_s}$$

Rovnice y_c se dosadí do první rovnice ze soustavy rovnic a vyjádří se x_c .

$$x_s^2 - 2x_s x_c + x_c^2 + y_s^2 - 2y_s \left(\frac{-x_s^2 + x_e^2 - y_s^2 + y_e^2}{2(y_e - y_s)} + x_c \frac{x_s - x_e}{y_e - y_s} \right) + \left(\frac{-x_s^2 + x_e^2 - y_s^2 + y_e^2}{2(y_e - y_s)} + x_c \frac{x_s - x_e}{y_e - y_s} \right)^2 = R^2$$

$$x_s^2 - 2x_s x_c + x_c^2 + y_s^2 - y_s \frac{-x_s^2 + x_e^2 - y_s^2 + y_e^2}{y_e - y_s} - 2y_s x_c \frac{x_s - x_e}{y_e - y_s} + \frac{1}{4} \frac{(-x_s^2 + x_e^2 - y_s^2 + y_e^2)^2}{(y_e - y_s)^2} + x_c \frac{(-x_s^2 + x_e^2 - y_s^2 + y_e^2)(x_s - x_e)}{(y_e - y_s)^2} + x_c^2 \frac{(x_s - x_e)^2}{(y_e - y_s)^2} - R^2 = 0$$

$$(x_s^2 + y_s^2 - R^2)(y_e - y_s)^2 - 2x_s x_c (y_e - y_s)^2 + x_c^2 (y_e - y_s)^2 - y_s (-x_s^2 + x_e^2 - y_s^2 + y_e^2)(y_e - y_s) - 2y_s x_c (x_s - x_e)(y_e - y_s) + \frac{1}{4} (-x_s^2 + x_e^2 - y_s^2 + y_e^2)^2 + x_c (-x_s^2 + x_e^2 - y_s^2 + y_e^2)(x_s - x_e) + x_c^2 (x_s - x_e)^2 = 0$$

$$x_c^2 ((y_e - y_s)^2 + (x_s - x_e)^2) + x_c (-2x_s (y_e - y_s)^2 - 2y_s (x_s - x_e)(y_e - y_s) + (-x_s^2 + x_e^2 - y_s^2 + y_e^2)(x_s - x_e)) + (x_s^2 + y_s^2 - R^2)(y_e - y_s)^2 - y_s (-x_s^2 + x_e^2 - y_s^2 + y_e^2)(y_e - y_s) + \frac{1}{4} (-x_s^2 + x_e^2 - y_s^2 + y_e^2)^2 = 0$$

$$x_c^2 + x_c \frac{-2x_s (y_e - y_s)^2 - 2y_s (x_s - x_e)(y_e - y_s) + (-x_s^2 + x_e^2 - y_s^2 + y_e^2)(x_s - x_e)}{(y_e - y_s)^2 + (x_s - x_e)^2} + \frac{(x_s^2 + y_s^2 - R^2)(y_e - y_s)^2 - y_s (-x_s^2 + x_e^2 - y_s^2 + y_e^2)(y_e - y_s) + \frac{1}{4} (-x_s^2 + x_e^2 - y_s^2 + y_e^2)^2}{(y_e - y_s)^2 + (x_s - x_e)^2} = 0$$

Rovnice byla dopočítána a upravena do formy kvadratického trojčlenu. Nyní se vyjádří kořeny trojčlenu a tím budou zjištěny dvě potenciální souřadnice X středu kružnice.

$$a = 1$$

$$b = \frac{-2x_s(y_e - y_s)^2 - 2y_s(x_s - x_e)(y_e - y_s) + (-x_s^2 + x_e^2 - y_s^2 + y_e^2)(x_s - x_e)}{(y_e - y_s)^2 + (x_s - x_e)^2}$$

$$c = \frac{(x_s^2 + y_s^2 - R^2)(y_e - y_s)^2 - y_s(-x_s^2 + x_e^2 - y_s^2 + y_e^2)(y_e - y_s) + \frac{1}{4}(-x_s^2 + x_e^2 - y_s^2 + y_e^2)^2}{(y_e - y_s)^2 + (x_s - x_e)^2}$$

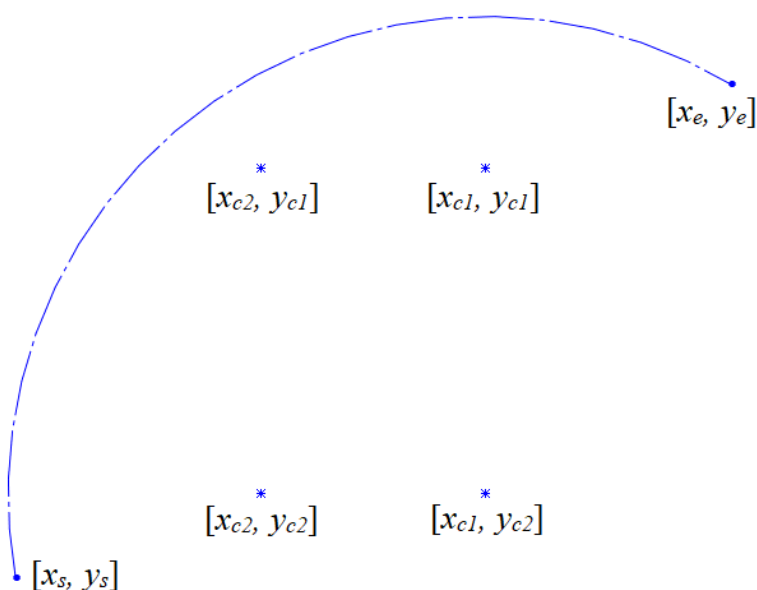
$$D = b^2 - 4ac$$

$$x_{c1} = \frac{-b + \sqrt{D}}{2a}$$

$$x_{c2} = \frac{-b - \sqrt{D}}{2a}$$

, kde	x_s	X-ová souřadnice počátečního bodu kružnice [mm]
	y_s	Y-ová souřadnice počátečního bodu kružnice [mm]
	x_e	X-ová souřadnice koncového bodu kružnice [mm]
	y_e	Y-ová souřadnice koncového bodu kružnice [mm]
	x_c	X-ová souřadnice středu kružnice [mm]
	y_c	Y-ová souřadnice středu kružnice [mm]
	R	Poloměr kružnice [mm]
	a	Koeficient kvadratického členu [-]
	b	Koeficient lineárního členu [-]
	c	Koeficient absolutního členu [-]
	D	Diskriminant kvadratického trojčlenu [mm ²]

Stejným způsobem se spočítají dvě souřadnice v ose Y. Vzniknou čtyři teoretické souřadnice středu, přičemž je pro danou funkci správný jen jeden z těchto čtyř bodů.



Obr. 111: Příklad vzniklých teoretických bodů středu kružnice

Volba souřadnic středu kružnice se provádí na základě směru vektoru mezi počátečním a koncovým bodem a dle zvolené funkce.

$$(x_u, y_u) = [x_e, y_e] - [x_s, y_s] \quad (8.8)$$

, kde (x_u, y_u) Souřadnice směrového vektoru [mm, mm]
 $[x_s, y_s]$ Souřadnice počátečního bodu kružnice [mm, mm]
 $[x_e, y_e]$ Souřadnice koncového bodu kružnice [mm, mm]

Podle kvadrantu, do kterého míří směrový vektor, a v závislosti na zvolené funkci se určí správný středový bod kružnice následujícím způsobem.

Tab. 18: Výběr souřadnic středu kružnice

Znaménka souřadnic směrového vektoru	Funkce: Správný středový bod
(+ , +)	G2: [x _{e1} , y _{e2}], G3: [x _{e2} , y _{e1}]
(- , +)	G2: [x _{e1} , y _{e1}], G3: [x _{e2} , y _{e2}]
(- , -)	G2: [x _{e2} , y _{e1}], G3: [x _{e1} , y _{e2}]
(+ , -)	G2: [x _{e2} , y _{e2}], G3: [x _{e1} , y _{e1}]
(+ , 0)	G2: [x _{e2} , y _{e2}], G3: [x _{e1} , y _{e1}]
(- , 0)	G2: [x _{e1} , y _{e1}], G3: [x _{e2} , y _{e2}]
(0 , +)	G2: [x _{e1} , y _{e1}], G3: [x _{e2} , y _{e2}]
(0 , -)	G2: [x _{e1} , y _{e1}], G3: [x _{e1} , y _{e1}]
(0 , 0)	Chyba

Když je určený střed kružnice, vypočítá se počáteční a koncový úhel. Počáteční úhel je úhel mezi kladnou poloosou X a vektorem mezi středem kružnice a počátečním bodem. Koncový úhel se nachází mezi kladnou poloosou X a vektorem mezi středem kružnice a koncovým bodem. Na vyřešení konkrétního problému byl použit výpočet směrnice přímky. Úhel mezi kladnou poloosou X a přímkou byl spočten ze směrnice pomocí goniometrické funkce. K zjištěnému úhlu se přičítají násobky π v závislosti na směru vektoru pro dosažení rozmezí počátečního a koncového úhlu mezi 0° a 360°.

$$(x_v, y_v) = [x_s, y_s] - [x_c, y_c] \quad (8.9)$$

, kde (x_v, y_v) Souřadnice vektoru mezi středem a počátečním bodem [mm, mm]
 $[x_s, y_s]$ Souřadnice počátečního bodu kružnice [mm, mm]
 $[x_c, y_c]$ Souřadnice správného středu kružnice [mm, mm]

$$k = \frac{y_v}{x_v} = \tan \alpha$$

$$\alpha_s = \operatorname{atan} \frac{y_v}{x_v} \quad (8.10)$$

, kde k Směrnice vektoru ze středu k počátečnímu bodu [-]
 α_s Počáteční úhel kružnice [°]

Výsledná hodnota počátečního úhlu je dána podle tabulky 19.

Tab. 19: Výsledný výpočet počátečního úhlu

Znaménka souřadnic vektoru	Výsledný výpočet úhlu
(+, +)	$\alpha_s = \operatorname{atan} \frac{y_v}{x_v}$
(-, +)	$\alpha_s = \pi + \operatorname{atan} \frac{y_v}{x_v}$
(-, -)	$\alpha_s = \pi + \operatorname{atan} \frac{y_v}{x_v}$
(+, -)	$\alpha_s = 2\pi + \operatorname{atan} \frac{y_v}{x_v}$
(+, 0)	$\alpha_s = 0$
(-, 0)	$\alpha_s = \pi$
(0, +)	$\alpha_s = \frac{\pi}{2}$
(0, -)	$\alpha_s = \frac{3}{2}\pi$
(0, 0)	Chyba

Koncový úhel α_e má totožný výpočet jako počáteční úhel, ale počáteční bod pro výpočet vektoru je nahrazen koncovým bodem kružnice. Dalším krokem se vypočítá vzdálenost v jednotlivých osách rozdílem aktuální pozice od následující. Určí se nominální rychlost stejně jako u funkce G0 a G1. Procesor zjistí, zda byl zadán parametr F. Pokud ano a zadaná hodnota parametru F je v přípustných limitech pro danou funkci, zapíše se tato hodnota do nominální rychlosti. Jestliže není parametr F v limitech pro danou funkci nebo pokud nebyl tento parametr zadán, pak se do nominální rychlosti zapíše „normální“ rychlost funkce. Ta je dána konstantou „G1_TO_G3_NORMAL_VELOCITY“.

Inicializační výpočty jsou spočteny a následují cyklické výpočty kruhové interpolace. To probíhá tak, že se vždy nejdříve spočítá následující souřadnice o úhlový krok, získá se malá úsečka. Potom se motory pošlou takovým poměrem rychlostí, aby byl

výsledný směr pohybu ve směru této úsečky a zjistí se čas, za který by měl stroj být na konci této malé úsečky. Když vypočtený čas uběhne, určí se souřadnice další malé úsečky a postup se opakuje, dokud se nedojde až na konec kružnice.

Souřadnice první malé úsečky se vypočítají přičtením úhlového kroku k počátečnímu úhlu a potom se tato hodnota vždy inkrementuje o úhlový krok. Z tohoto úhlu se pak spočítají souřadnice malé úsečky.

$$x = x_c + R * \cos \alpha \quad (8.11)$$

$$y = y_c + R * \sin \alpha \quad (8.12)$$

, kde	x	X-ová souřadnice následující malé úsečky [mm]
	y	Y-ová souřadnice následující malé úsečky [mm]
	x_c	X-ová souřadnice středu kružnice [mm]
	y_c	Y-ová souřadnice středu kružnice [mm]
	R	Poloměr kružnice [mm]
	α	Úhel následující malé úsečky [°]

Prvotní výpočet vzdáleností, rychlostí, zrychlení a časů se liší od všech následujících výpočtů, protože se zrychluje z nulové rychlosti a bez zakřivení dráhy. Délky první úsečky v jednotlivých osách (s_x , s_y) se zjistí z rovnic 8.11 a 8.12.

$$s^I = \sqrt{s_x^I{}^2 + s_y^I{}^2} \quad (8.13)$$

$$v_x^I = v \frac{s_x^I}{s^I} \quad v_y^I = v \frac{s_y^I}{s^I} \quad (8.14)$$

$$a_x^I = a \frac{s_x^I}{s^I} \quad a_y^I = a \frac{s_y^I}{s^I} \quad (8.15)$$

$$v_{0xa1}^I = 0 \quad v_{0ya1}^I = 0 \quad (8.16)$$

$$t_{xa1}^I = \frac{v_x^I - v_{0xa1}^I}{a_x^I} \quad t_{ya1}^I = \frac{v_y^I - v_{0ya1}^I}{a_y^I} \quad t_{xa1}^I = t_{ya1}^I \quad (8.17)$$

$$s_{xa1}^I = v_{0xa1}^I * t_{xa1}^I + \frac{1}{2} a_x^I * t_{xa1}^I{}^2 \quad (8.18)$$

$$s_{ya1}^I = v_{0ya1}^I * t_{ya1}^I + \frac{1}{2} a_y^I * t_{ya1}^I{}^2 \quad (8.19)$$

$$s^{II} = \sqrt{s_x^{II}{}^2 + s_y^{II}{}^2} \quad (8.20)$$

$$v_x^{II} = v \frac{s_x^{II}}{s^{II}} \quad v_y^{II} = v \frac{s_y^{II}}{s^{II}} \quad (8.21)$$

$$\Delta v_x^{l-II} = v_x^{II} - v_x^I \quad \Delta v_y^{l-II} = v_y^{II} - v_y^I \quad (8.22)$$

$$a_x^{l-II} = a \frac{\Delta v_x^{l-II}}{\sqrt{\Delta v_x^{l-II^2} + \Delta v_y^{l-II^2}}} \quad a_y^{l-II} = a \frac{\Delta v_y^{l-II}}{\sqrt{\Delta v_x^{l-II^2} + \Delta v_y^{l-II^2}}} \quad (8.23)$$

$$v_{0xa2}^I = v_x^I \quad v_{0ya2}^I = v_y^I \quad (8.24)$$

$$t_x^{l-II} = \frac{v_x^{II} - v_{0xa2}^I}{a_x^{l-II}} \quad t_y^{l-II} = \frac{v_y^{II} - v_{0ya2}^I}{a_y^{l-II}} \quad t_x^{l-II} = t_y^{l-II} \quad (8.25)$$

$$s_x^{l-II} = v_{0xa2}^I * t_x^{l-II} + \frac{1}{2} a_x^{l-II} * t_x^{l-II^2} \quad (8.26)$$

$$s_y^{l-II} = v_{0ya2}^I * t_y^{l-II} + \frac{1}{2} a_y^{l-II} * t_y^{l-II^2} \quad (8.27)$$

$$t_{xa2}^I = \frac{\frac{2 * v_{0xa2}^I}{a_x^{l-II}} - \sqrt{\left(\frac{2 * v_{0xa2}^I}{a_x^{l-II}}\right)^2 - \frac{4 * s_x^{l-II}}{a_x^{l-II}}}}{2} \quad (8.28)$$

$$t_{ya2}^I = \frac{\frac{2 * v_{0ya2}^I}{a_y^{l-II}} - \sqrt{\left(\frac{2 * v_{0ya2}^I}{a_y^{l-II}}\right)^2 - \frac{4 * s_y^{l-II}}{a_y^{l-II}}}}{2} \quad (8.29)$$

$$t_{xa2}^I = t_{ya2}^I \quad (8.30)$$

$$s_{xa2}^I = v_{0xa2}^I * t_{xa2}^I + \frac{1}{2} a_x^{l-II} * t_{xa2}^I{}^2 \quad (8.31)$$

$$s_{ya2}^I = v_{0ya2}^I * t_{ya2}^I + \frac{1}{2} a_y^{l-II} * t_{ya2}^I{}^2 \quad (8.32)$$

$$s_{xa2}^I = s_{xa1}^{II} \quad s_{ya2}^I = s_{ya1}^{II} \quad (8.33)$$

$$s_{a1}^I = \sqrt{s_{xa1}^I{}^2 + s_{ya1}^I{}^2} \quad s_{a2}^I = \sqrt{s_{xa2}^I{}^2 + s_{ya2}^I{}^2} \quad (8.34)$$

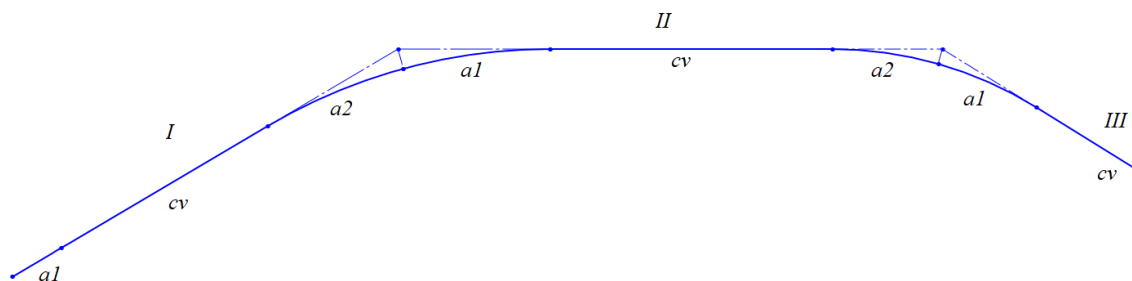
$$s_{cv}^I = s^I - s_{a1}^I - s_{a2}^I \quad (8.35)$$

$$t_{cv}^I = \frac{s_{cv}^I}{v} \quad (8.36)$$

$$t^I = t_{xa1}^I + t_{cv}^I + t_{xa2}^I \quad (8.37)$$

- , kde Římské číslice představují číslo úsečky
 Přechod mezi římskými číslicemi udává společný parametr pro sousedící úsečky (parametr přechodu mezi úsečkami)
 Index $a1$ označuje první část úsečky, kde se mění rychlost
 Index cv označuje střední část úsečky s konstantní rychlostí
 Index $a2$ označuje třetí část úsečky, kde se mění rychlost
 Index x označuje, že se jedná o parametr v ose X
 Index y označuje, že se jedná o parametr v ose Y
 s Dráha [mm]
 v Bez indexů nominální rychlost, s indexy rychlost příslušná indexům [mm/s]
 a Bez indexů nominální zrychlení, s indexy zrychlení příslušné indexům [mm/s²]
 t Čas [s]
 v_o Nulová rychlost [mm/s]
 Δv Změna rychlosti [mm/s]

Ze spočítaných parametrů se v_x^I , v_y^I , a_x^I , a_y^I zapíše na funkční blok „MpAxisCyclicSet“ pro motory v příslušných osách a započne vykonávání první úsečky. Parametr t^I představuje čas, jak dlouho se bude vykonávat první úsečka. Po uplynutí tohoto času následuje kalkulace parametrů pro druhou úsečku.



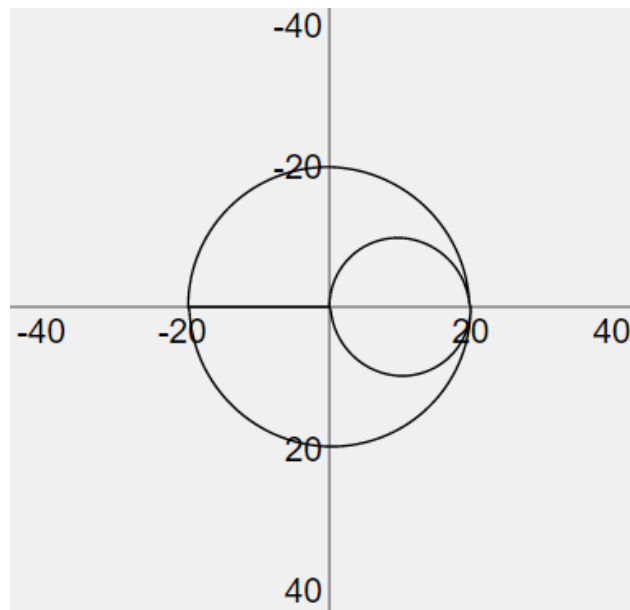
Obr. 112: Označení úseček a jejich částí při kruhové interpolaci

Parametry $II.$ a všech dalších úseček se počítají trochu odlišně od $I.$, protože nezrychlují z nulové rychlosti, nýbrž zpomalují nebo zrychlují jen o změnu rychlosti mezi konstantními rychlostmi sousedících úseček. Pro všechny další úsečky se vždy jen inkrementuje římské číslo (číslo úsečky) a v uvedeném postupu se mění rovnice 8.16 a 8.17 na rovnice:

$$t_{xa1}^{II} = t_x^{I-II} - t_{xa2}^I \quad t_{ya1}^{II} = t_y^{I-II} - t_{ya2}^I \quad t_{xa1}^{II} = t_{ya1}^{II} \quad (8.38)$$

A rovnice 8.18 a 8.19 jsou nahrazeny rovnicemi:

$$s_{xa1}^{II} = s_{xa2}^I \quad s_{ya1}^{II} = s_{ya2}^I \quad (8.39)$$



Obr. 113: Výsledek vykonání příkladu pro kruhovou interpolaci

Výpočty byly demonstrovány na kružnici v rovině XY. V ostatních rovinách se problém řeší ekvivalentně. Jsou 3 základní typy zadávání funkcí G02 a G03. Příklad výše ukazuje nejsložitější případ, kdy je zadána cílová pozice (X, Y, Z) a poloměr (R). Druhou možností je zadat cílovou pozici (X, Y, Z) a souřadnice středu (I, J, K). V tomto případě se spočítá rádius kruhové interpolace výpočtem velikosti vektoru ze středu kružnice k počátečnímu nebo cílovému bodu a dále se pokračuje stejným postupem od rovnice 8.9. Třetí možností je zápis s pozicí středu kruhu (I, J, K) a úhlem otočení (H). Pro výpočet cílového bodu se nejdříve spočítá úhel mezi vektorem ze středu k počáteční pozici a kladnou poloosou X dle rovnice 8.10. Následně se přičte nebo odečte (podle funkce) úhel otočení H od vypočítaného úhlu a použitím rovnic 8.11 a 8.12 se zjistí poloha cílového bodu. Další postup pokračuje od rovnice 8.9.

G04

Funkce pro časovou prodlevu G-kódu zadávaná v sekundách. Procesor při zpracování této funkce spustí časovač se zpožděným zapnutím (TON) s požadovaným časem a čeká do sepnutí jeho výstupu. Potom pokračuje dalšími instrukcemi.

G17, G18, G19

Funkce pro výběr pracovní roviny XY, ZX nebo YZ. G17 nastaví proměnnou „SelectedPlane“ na konstantu „PLANE_XY“, G18 na konstantu „PLANE_ZX“ a G19 na konstantu „PLANE_YZ“. Podle vybrané roviny se určuje pohyb v kruhové interpolaci G02 a G03.

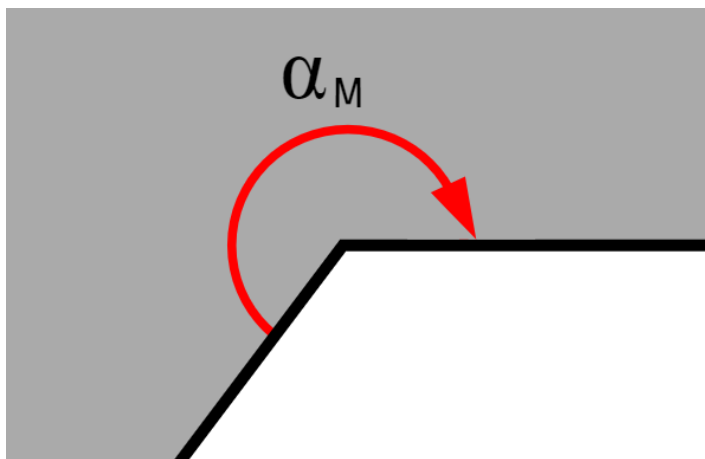
G40

Deaktivace kompenzace průměru nástroje. Resetuje logické hodnoty proměnných „CDCLeft“ a „CDCRight“.

G41, G42

Zapnutí kompenzace průměru nástroje zleva nebo zprava. G41 nastaví proměnnou „CDCLeft“ do logické jedničky a „CDCRight“ do logické nuly. G42 nastaví proměnné přesně naopak.

Způsob kompenzace nástroje se dělí na 3 typy podle velikosti úhlu materiálu. Nejdříve je nezbytné spočítat úhel materiálu α_M .



Obr. 114: Označení úhlu materiálu

Úhel materiálu se spočítá ze směru vektoru aktuálního pohybu u_{ACT} a ze směru vektoru následujícího pohybu u_{NEXT} . Souřadnice cílového bodu aktuálního i následujícího pohybu jsou známé z G-kódu. Vektory se získají jejich odečtením. Potom se použitím rovnice 8.10 určí úhel aktuálního pohybu α_{ACT} a úhel následujícího pohybu α_{NEXT} . Podle orientace aktuálního a následujícího vektoru se vypočítá úhel materiálu α_M dle tabulky 20.

Tab. 20: Výpočet úhlu materiálu

Vektor u_{ACT}	Vektor u_{NEXT}	Výpočet úhlu materiálu
(+, +)	(+, +)	$\alpha_M = \alpha_{ACT} - \alpha_{NEXT} + \pi$
	(-, +)	$\alpha_M = \alpha_{ACT} - \alpha_{NEXT}$
	(-, -)	IF $\alpha_{ACT} \geq \alpha_{NEXT}$ THEN $\alpha_M = \alpha_{ACT} - \alpha_{NEXT}$ ELSE $\alpha_M = \alpha_{ACT} - \alpha_{NEXT} + 2\pi$
	(+, -)	$\alpha_M = \alpha_{ACT} - \alpha_{NEXT} + \pi$
(-, +)	(+, +)	$\alpha_M = \alpha_{ACT} - \alpha_{NEXT} + 2\pi$
	(-, +)	$\alpha_M = \alpha_{ACT} - \alpha_{NEXT} + \pi$
	(-, -)	$\alpha_M = \alpha_{ACT} - \alpha_{NEXT} + \pi$
	(+, -)	IF $\alpha_{ACT} \geq \alpha_{NEXT}$ THEN $\alpha_M = \alpha_{ACT} - \alpha_{NEXT}$ ELSE $\alpha_M = \alpha_{ACT} - \alpha_{NEXT} + 2\pi$

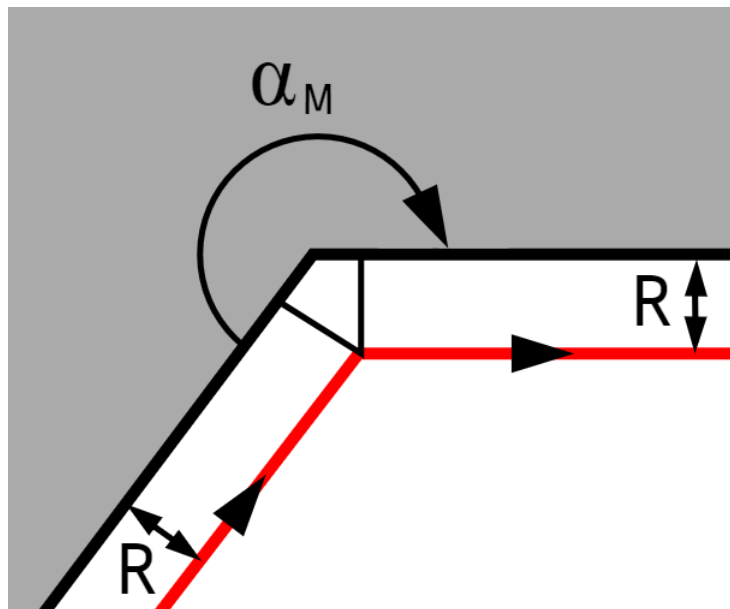
(-, -)	(+, +)	IF $\alpha_{ACT} \geq \alpha_{NEXT}$ THEN $\alpha_M = \alpha_{ACT} - \alpha_{NEXT}$ ELSE $\alpha_M = \alpha_{ACT} - \alpha_{NEXT} + 2\pi$
	(-, +)	$\alpha_M = \alpha_{ACT} - \alpha_{NEXT} + \pi$
	(-, -)	$\alpha_M = \alpha_{ACT} - \alpha_{NEXT} + \pi$
	(+, -)	$\alpha_M = \alpha_{ACT} - \alpha_{NEXT}$
(+, -)	(+, +)	$\alpha_M = \alpha_{ACT} - \alpha_{NEXT} + \pi$
	(-, +)	IF $\alpha_{ACT} \geq \alpha_{NEXT}$ THEN $\alpha_M = \alpha_{ACT} - \alpha_{NEXT}$ ELSE $\alpha_M = \alpha_{ACT} - \alpha_{NEXT} + 2\pi$
	(-, -)	$\alpha_M = \alpha_{ACT} - \alpha_{NEXT} + 2\pi$
	(+, -)	$\alpha_M = \alpha_{ACT} - \alpha_{NEXT} + \pi$

Výsledný úhel materiálu je pro případ kompenzace průměru nástroje zprava. Pokud se jedná o kompenzaci zleva, stačí úhel materiálu otočit.

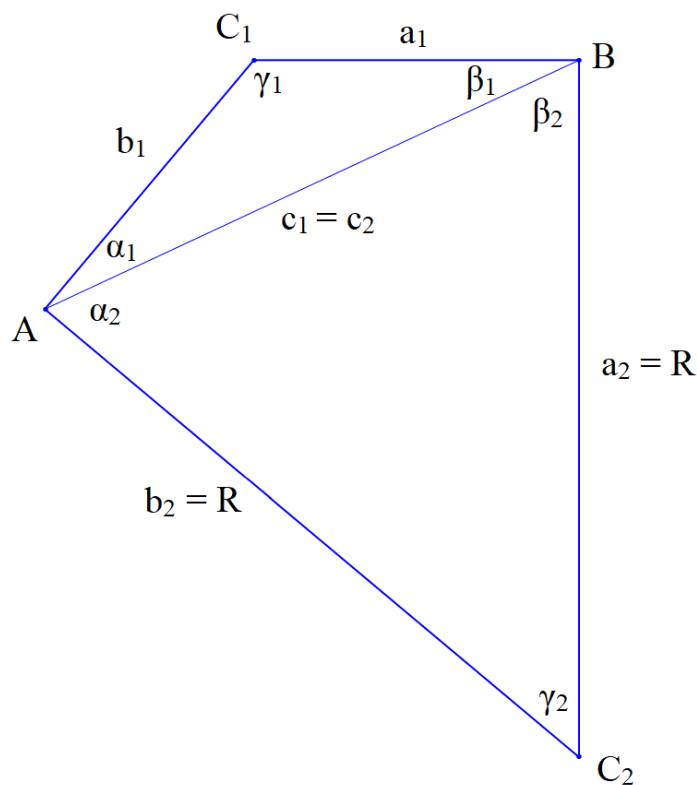
$$\alpha_M = 2 * \pi - \alpha_M \quad (8.40)$$

Dále se výpočty rozdělují podle velikosti úhlu materiálu. Vždy je třeba spočítat posunutí v souřadnici X i Y pro aktuální pohyb.

a) $\alpha_M > \pi$



Obr. 115: Ukázka kompenzace nástroje zprava, když úhel materiálu je větší než π



Obr. 116: Popis lichoběžníku pro kompenzaci zprava

Z výše vyobrazeného lichoběžníku se pro další výpočty musí zjistit velikosti a_1 a b_1 , přičemž platí, že $a_1 = b_1$. Známy je pouze rádius nástroje R a úhel materiálu α_M .

$$\gamma_1 = 2\pi - \alpha_M \quad (8.41)$$

$$\beta_2 = \alpha_2 = \frac{\gamma_1}{2} \quad (8.42)$$

$$c_1 = c_2 = \sqrt{2 * R^2 (1 - \cos(\pi - 2 * \beta_2))} \quad (8.43)$$

$$b_1 = a_1 = \frac{c_1 * \sin\left(\frac{\alpha_M - \pi}{2}\right)}{\sin \gamma_1} \quad (8.44)$$

, kde	α_M	Úhel materiálu [°]
	R	Rádius nástroje [mm]
	$\alpha_2, \beta_2, \gamma_1$	Úhly lichoběžníku z obrázku 116 [°]
	a_1, b_1, c_1, c_2	Strany lichoběžníku z obrázku 116 [mm]

Z vypočítané délky strany b_1 a rádiusu nástroje R se spočítá posunutí kompenzace pro osu X i Y, které se nakonec přičte k souřadnici aktuálního cílového bodu pohybu. Posunutí v jednotlivých osách záleží na směru aktuálního vektoru viz tabulka 21 pro kompenzaci zprava a tabulka 22 pro kompenzaci zleva.

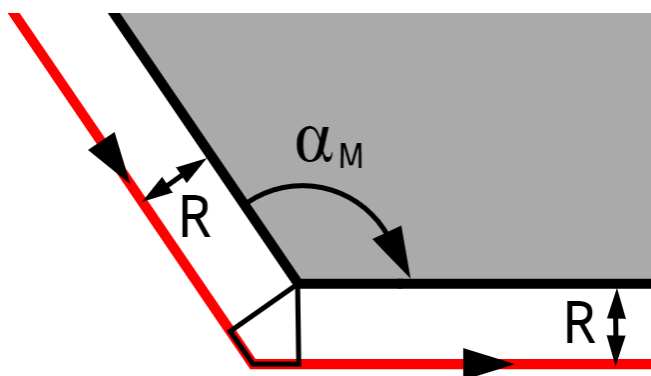
Tab. 21: Výpočet posunutí pro kompenzaci zprava při $\alpha_M > \pi$

Vektor u_{ACT}	Posunutí X	Posunutí Y
(+, +)	$-b_1 * \cos(\alpha_{ACT}) + R * \sin(\alpha_{ACT})$	$-b_1 * \sin(\alpha_{ACT}) - R * \cos(\alpha_{ACT})$
(-, +)	$b_1 * \cos(-\alpha_{ACT}) + R * \sin(-\alpha_{ACT})$	$-b_1 * \sin(-\alpha_{ACT}) + R * \cos(-\alpha_{ACT})$
(-, -)	$b_1 * \cos(\alpha_{ACT}) - R * \sin(\alpha_{ACT})$	$b_1 * \sin(\alpha_{ACT}) + R * \cos(\alpha_{ACT})$
(+, -)	$-b_1 * \cos(-\alpha_{ACT}) - R * \sin(-\alpha_{ACT})$	$b_1 * \sin(-\alpha_{ACT}) - R * \cos(-\alpha_{ACT})$
(+, 0)	$-b_1$	$-R$
(-, 0)	b_1	R
(0, +)	R	$-b_1$
(0, -)	$-R$	b_1

Tab. 22: Výpočet posunutí pro kompenzaci zleva při $\alpha_M > \pi$

Vektor u_{ACT}	Posunutí X	Posunutí Y
(+, +)	$-b_1 * \cos(\alpha_{ACT}) - R * \sin(\alpha_{ACT})$	$-b_1 * \sin(\alpha_{ACT}) + R * \cos(\alpha_{ACT})$
(-, +)	$b_1 * \cos(-\alpha_{ACT}) - R * \sin(-\alpha_{ACT})$	$-b_1 * \sin(-\alpha_{ACT}) - R * \cos(-\alpha_{ACT})$
(-, -)	$b_1 * \cos(\alpha_{ACT}) + R * \sin(\alpha_{ACT})$	$b_1 * \sin(\alpha_{ACT}) - R * \cos(\alpha_{ACT})$
(+, -)	$-b_1 * \cos(-\alpha_{ACT}) + R * \sin(-\alpha_{ACT})$	$b_1 * \sin(-\alpha_{ACT}) + R * \cos(-\alpha_{ACT})$
(+, 0)	$-b_1$	R
(-, 0)	b_1	$-R$
(0, +)	$-R$	$-b_1$
(0, -)	R	b_1

b) $\frac{\pi}{2} \leq \alpha_M \leq \pi$

Obr. 117: Ukázka kompenzace nástroje zprava, když úhel materiálu je mezi $\pi/2$ a π

Výpočtový lichoběžník je totožný jako při variantě úhlu materiálu větší než π . Výpočet úseček a_l a b_l zůstává neměnný, úhel γ_l se spočítá odlišně.

$$\gamma_l = \alpha_M \quad (8.45)$$

, kde α_M Úhel materiálu [°]
 γ_l Úhel lichoběžníku z obrázku 116 [°]

Z vypočítané délky strany b_l a rádiusu nástroje R se spočítá posunutí kompenzace pro osu X i Y, které se nakonec přičte k souřadnici aktuálního cílového bodu pohybu. Posunutí v jednotlivých osách záleží na směru aktuálního vektoru viz tabulka 23 pro kompenzaci zprava a tabulka 24 pro kompenzaci zleva.

Tab. 23: Výpočet posunutí pro kompenzaci zprava při $\pi/2 \leq \alpha_M \leq \pi$

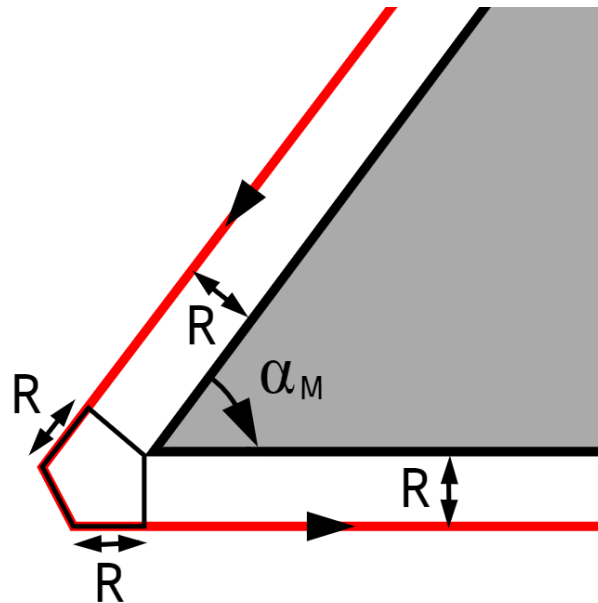
Vektor u_{ACT}	Posunutí X	Posunutí Y
(+, +)	$b_1 * \cos(\alpha_{ACT}) + R * \sin(\alpha_{ACT})$	$b_1 * \sin(\alpha_{ACT}) - R * \cos(\alpha_{ACT})$
(-, +)	$-b_1 * \cos(-\alpha_{ACT}) + R * \sin(-\alpha_{ACT})$	$b_1 * \sin(-\alpha_{ACT}) + R * \cos(-\alpha_{ACT})$
(-, -)	$-b_1 * \cos(\alpha_{ACT}) - R * \sin(\alpha_{ACT})$	$-b_1 * \sin(\alpha_{ACT}) + R * \cos(\alpha_{ACT})$
(+, -)	$b_1 * \cos(-\alpha_{ACT}) - R * \sin(-\alpha_{ACT})$	$-b_1 * \sin(-\alpha_{ACT}) - R * \cos(-\alpha_{ACT})$
(+, 0)	b_1	$-R$
(-, 0)	$-b_1$	R
(0, +)	R	b_1
(0, -)	$-R$	$-b_1$

Tab. 24: Výpočet posunutí pro kompenzaci zleva při $\pi/2 \leq \alpha_M \leq \pi$

Vektor u_{ACT}	Posunutí X	Posunutí Y
(+, +)	$b_1 * \cos(\alpha_{ACT}) - R * \sin(\alpha_{ACT})$	$b_1 * \sin(\alpha_{ACT}) + R * \cos(\alpha_{ACT})$
(-, +)	$-b_1 * \cos(-\alpha_{ACT}) - R * \sin(-\alpha_{ACT})$	$b_1 * \sin(-\alpha_{ACT}) - R * \cos(-\alpha_{ACT})$
(-, -)	$-b_1 * \cos(\alpha_{ACT}) + R * \sin(\alpha_{ACT})$	$-b_1 * \sin(\alpha_{ACT}) - R * \cos(\alpha_{ACT})$
(+, -)	$b_1 * \cos(-\alpha_{ACT}) + R * \sin(-\alpha_{ACT})$	$-b_1 * \sin(-\alpha_{ACT}) + R * \cos(-\alpha_{ACT})$
(+, 0)	b_1	R
(-, 0)	$-b_1$	$-R$
(0, +)	$-R$	b_1
(0, -)	R	$-b_1$

$$c) \alpha_M < \frac{\pi}{2}$$

Kompensace tohoto úhlu se liší vloženým pohybovým krokem. Není zde potřeba počítat úsečky lichoběžníku, jelikož jsou všechna posunutí dána rádiusem nástroje.



Obr. 118: Ukázka kompenzace nástroje zprava, když úhel materiálu je menší než $\pi/2$

Tab. 25: Výpočet posunutí pro kompenzaci zprava při $\alpha_M < \pi/2$

Vektor u_{ACT}	Posunutí X	Posunutí Y
(+, +)	$R * \cos(\alpha_{ACT}) + R * \sin(\alpha_{ACT})$	$R * \sin(\alpha_{ACT}) - R * \cos(\alpha_{ACT})$
(-, +)	$-R * \cos(-\alpha_{ACT}) + R * \sin(-\alpha_{ACT})$	$R * \sin(-\alpha_{ACT}) + R * \cos(-\alpha_{ACT})$
(-, -)	$-R * \cos(\alpha_{ACT}) - R * \sin(\alpha_{ACT})$	$-R * \sin(\alpha_{ACT}) + R * \cos(\alpha_{ACT})$
(+, -)	$R * \cos(-\alpha_{ACT}) - R * \sin(-\alpha_{ACT})$	$-R * \sin(-\alpha_{ACT}) - R * \cos(-\alpha_{ACT})$
(+, 0)	R	$-R$
(-, 0)	$-R$	R
(0, +)	R	R
(0, -)	$-R$	$-R$

Tab. 26: Výpočet posunutí pro kompenzaci zprava při $\alpha_M < \pi/2$ (vložený krok)

Vektor u_{NEXT}	Posunutí X	Posunutí Y
(+, +)	$-R * \cos(\alpha_{NEXT}) + R * \sin(\alpha_{NEXT})$	$-R * \sin(\alpha_{NEXT}) - R * \cos(\alpha_{NEXT})$
(-, +)	$R * \cos(-\alpha_{NEXT}) + R * \sin(-\alpha_{NEXT})$	$-R * \sin(-\alpha_{NEXT}) + R * \cos(-\alpha_{NEXT})$
(-, -)	$R * \cos(\alpha_{NEXT}) - R * \sin(\alpha_{NEXT})$	$R * \sin(\alpha_{NEXT}) + R * \cos(\alpha_{NEXT})$

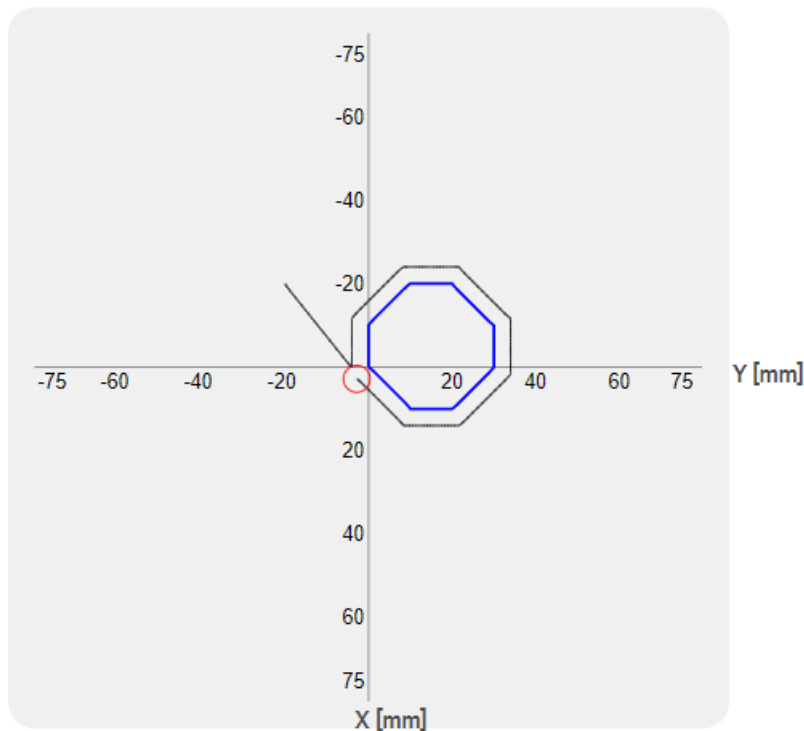
(+, -)	$-R * \cos(-\alpha_{NEXT}) - R * \sin(-\alpha_{NEXT})$	$R * \sin(-\alpha_{NEXT}) - R * \cos(-\alpha_{NEXT})$
(+, 0)	$-R$	$-R$
(-, 0)	R	R
(0, +)	R	$-R$
(0, -)	$-R$	R

Tab. 27: Výpočet posunutí pro kompenzaci zleva při $\alpha_M < \pi/2$

Vektor u_{ACT}	Posunutí X	Posunutí Y
(+, +)	$R * \cos(\alpha_{ACT}) - R * \sin(\alpha_{ACT})$	$R * \sin(\alpha_{ACT}) + R * \cos(\alpha_{ACT})$
(-, +)	$-R * \cos(-\alpha_{ACT}) - R * \sin(-\alpha_{ACT})$	$R * \sin(-\alpha_{ACT}) - R * \cos(-\alpha_{ACT})$
(-, -)	$-R * \cos(\alpha_{ACT}) + R * \sin(\alpha_{ACT})$	$-R * \sin(\alpha_{ACT}) - R * \cos(\alpha_{ACT})$
(+, -)	$R * \cos(-\alpha_{ACT}) + R * \sin(-\alpha_{ACT})$	$-R * \sin(-\alpha_{ACT}) + R * \cos(-\alpha_{ACT})$
(+, 0)	R	R
(-, 0)	$-R$	$-R$
(0, +)	$-R$	R
(0, -)	R	$-R$

Tab. 28: Výpočet posunutí pro kompenzaci zleva při $\alpha_M < \pi/2$ (vložený krok)

Vektor u_{NEXT}	Posunutí X	Posunutí Y
(+, +)	$-R * \cos(\alpha_{NEXT}) - R * \sin(\alpha_{NEXT})$	$R * \sin(\alpha_{NEXT}) - R * \cos(\alpha_{NEXT})$
(-, +)	$R * \cos(-\alpha_{NEXT}) - R * \sin(-\alpha_{NEXT})$	$-R * \sin(-\alpha_{NEXT}) - R * \cos(-\alpha_{NEXT})$
(-, -)	$R * \cos(\alpha_{NEXT}) + R * \sin(\alpha_{NEXT})$	$R * \sin(\alpha_{NEXT}) - R * \cos(\alpha_{NEXT})$
(+, -)	$-R * \cos(-\alpha_{NEXT}) + R * \sin(-\alpha_{NEXT})$	$R * \sin(-\alpha_{NEXT}) + R * \cos(-\alpha_{NEXT})$
(+, 0)	$-R$	R
(-, 0)	R	$-R$
(0, +)	$-R$	$-R$
(0, -)	R	R



Obr. 119: Příklad kompenzace zleva (modře původní trajektorie, černě kompenzovaná trajektorie)

G53

Deaktivace posunutí nulového bodu souřadného systému. Vynulování struktury „ZeroPointOffset“.

G54

Zapnutí posunutí nulového bodu souřadného systému. Hodnoty pozic, zadané u této funkce, se zapíší do struktury „ZeroPointOffset“. Struktura „ZeroPointOffset“ v sobě obsahuje hodnotu posunutí souřadného systému ve všech osách a je přičítána v G00 až G03 k souřadnicím pohybu.

G90, G91

Výběr módu zadávání souřadnic. Funkce G90 naplní proměnnou „SelectedMode“ konstantou „MODE_ABSOLUTE“ a G91 konstantou „MODE_INCREMENTAL“. S ohledem na vybraný mód se počítají souřadnice pohybu viz G0, G1, G2, G3.

M00

Programový stop. Tato funkce v programu procesoru vyvolá příkaz „Pause“, který zastaví vykonávání programu, dokud se z vizualizace nepošle příkaz pro pokračování.

M03

Zapnutí otáček vřetene po směru hodinových ručiček. Procesor pošle příkaz pro otáčení vřetene ve směru hodinových ručiček programu „Machine“ společně s parametrem S pro

velikost otáček v ot/min. Pokud je zadán parametr S a je v přístupných limitech, je poslána hodnota zadaná v G-kódu. Jestliže není parametr S zadán nebo je mimo limity, je poslána hodnota konstanty „SPINDLE_NORMAL_SPEED“.

M04

Zapnutí otáček vřetene proti směru hodinových ručiček. Procesor pošle příkaz pro otáčení vřetene proti směru hodinových ručiček programu „Machine“ společně s parametrem S pro velikost otáček v ot/min. Pokud je zadán parametr S a je v přístupných limitech, je poslána hodnota zadaná v G-kódu. Jestliže není parametr S zadán nebo je mimo limity, je poslána hodnota konstanty „SPINDLE_NORMAL_SPEED“.

M05

Vypnutí otáček vřetene. Procesor vyšle příkaz programu „Machine“ pro vypnutí otáček vřetene.

M06

Zapnutí světla frézka. Programu „Machine“ je poslán příkaz „LightOn“.

M07

Vypnutí světla frézka. Programu „Machine“ je poslán příkaz „LightOff“.

M30

Ukončení programu. Procesor se vrátí do stavu čekání na příkaz a resetuje si všechny příkazy, tím je G-kód ukončen.

8.8 Ovládání funkcí frézky

V kapitole 7.4 Ovládací panel je popsán způsob, jakým jsou funkce frézky připojeny na výstupy karty X3 PLC X20CP1382-RT. V programu „Machine“ je pak naprogramován způsob zpracování příkazů z vizualizace a procesoru pro ovládání těchto funkcí. Jednotlivé příkazy zapínají a vypínají příslušné výstupy PLC. V tomto programu jsou také příkazy pro operaci s tabulkou nástrojů.

8.9 Správa souborů

Správa souborů je řešena v programu „FileManagement“. Ten je tvořen stavovým automatem a oblastí pro tvorbu statusů. Výchozí stav automatu je čekání na příkaz. Program zpracovává příkazy pro čtení, kopírování, mazání a generování souborů na kompaktní flash disk nebo připojené USB. Příkazy jsou přijímány z vizualizace ze strany „CNC“ a „Teaching“.

Čtení souborů slouží pro výpis seznamu souborů do vizualizace, aby si uživatel mohl vybrat soubor pro vykonání. Po výběru se z tohoto seznamu pošlou údaje o souboru procesoru, který je dál předá dekodéru. Kopírování představuje možnost kopírovat souboru mezi kompaktním flash diskem a USB. To představuje praktickou výhodu, protože se dá soubor nahrát na vnitřní paměť PLC jednoduchým vložením USB disku a stisknutím tlačítka. Není třeba se na PLC připojovat přes ftp server pro vložení souborů na interní paměť. Příkaz pro mazání smaže vybraný soubor z vybraného zdroje. Generování souboru je posledním krokem při vytváření G-kódu pomocí implementované metody „teaching“. Vytvoří soubor s požadovaným jménem a pak do něj zapíše informace z naplněné struktury dat, získané metodou „teaching“, ve smyslu syntaxe G-kódu.

Všechny funkce pro správu souborů využívají knihovnu „FileIO“, jednu ze základních B&R knihoven Automation Studia.

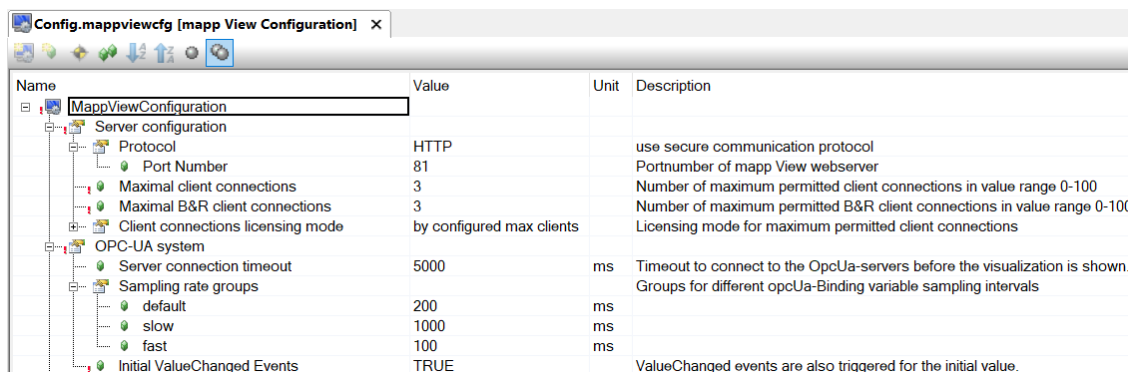
8.10 Vizualizace

Kapitola obsahuje návrh dvou mappView vizualizací pro ovládání stroje. Vizualizace představují rozhraní mezi člověkem a strojem a obsahují všechny funkce nezbytné pro ovládání a obsluhu zařízení. Lokalizace vizualizací je v angličtině, češtině a němčině.

8.10.1 Obecně o mappView

Komponenta Automation Studia mappView představuje jednoduchou cestu, jak vytvořit funkční a graficky pěknou průmyslovou vizualizaci. Tento typ vizualizace běží ve webovém prohlížeči a umožňuje multi-klientové ovládání.

Pro vytvoření vizualizace musí být definována verze mappView v „Change Runtime Versions...“, jak bylo popsáno v kapitole 8.2.2. Dále se v „Logical View“ vloží do složky projektu složka „mappView“ z toolboxu. V této složce je již předdefinovaná struktura, do které stačí vkládat další stránky s kontenty a editovat je. Pro konfiguraci obsahu vizualizace slouží soubor „Visualization.vis“ v „Configuration View“. V něm se definují stránky, které má vizualizace používat a další zdrojové soubory. Konfigurace připojení se upravuje v souboru „Config.mappviewcfg“.



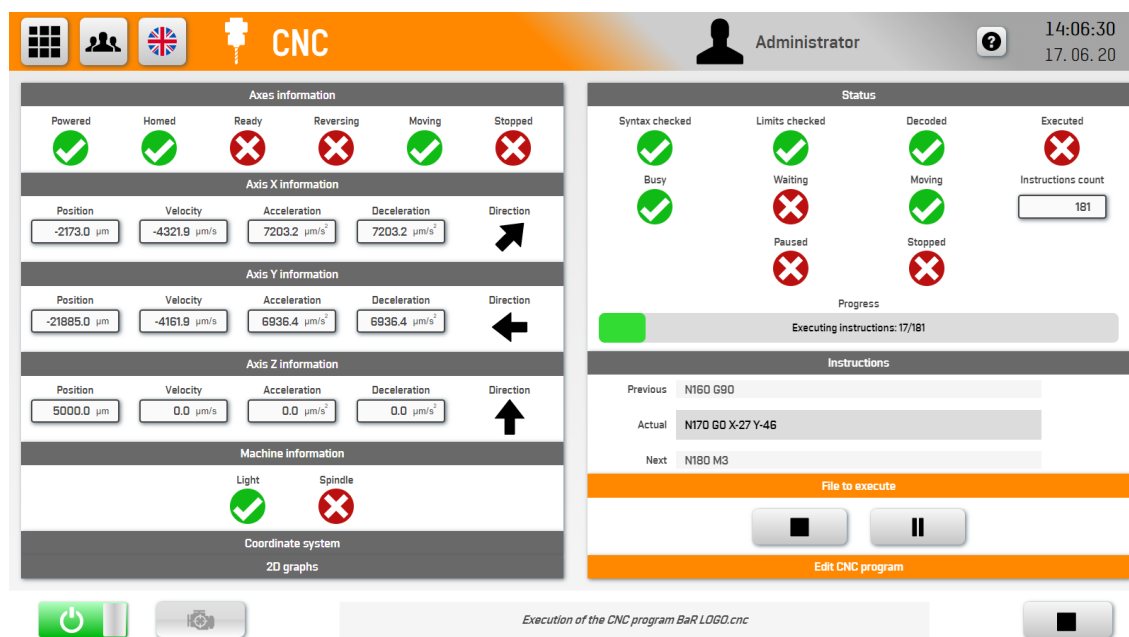
Name	Value	Unit	Description
MappViewConfiguration			
Server configuration			
Protocol	HTTP		use secure communication protocol
Port Number	81		Portnumber of mapp View webservice
Maximal client connections	3		Number of maximum permitted client connections in value range 0-100
Maximal B&R client connections	3		Number of maximum permitted B&R client connections in value range 0-100
Client connections licensing mode	by configured max clients		Licensing mode for maximum permitted client connections
OPC-UA system			
Server connection timeout	5000	ms	Timeout to connect to the OpcUa-servers before the visualization is shown.
Sampling rate groups			Groups for different opcUa-Binding variable sampling intervals
default	200	ms	
slow	1000	ms	
fast	100	ms	
Initial ValueChanged Events	TRUE		ValueChanged events are also triggered for the initial value.

Obr. 120: Konfigurace mappView

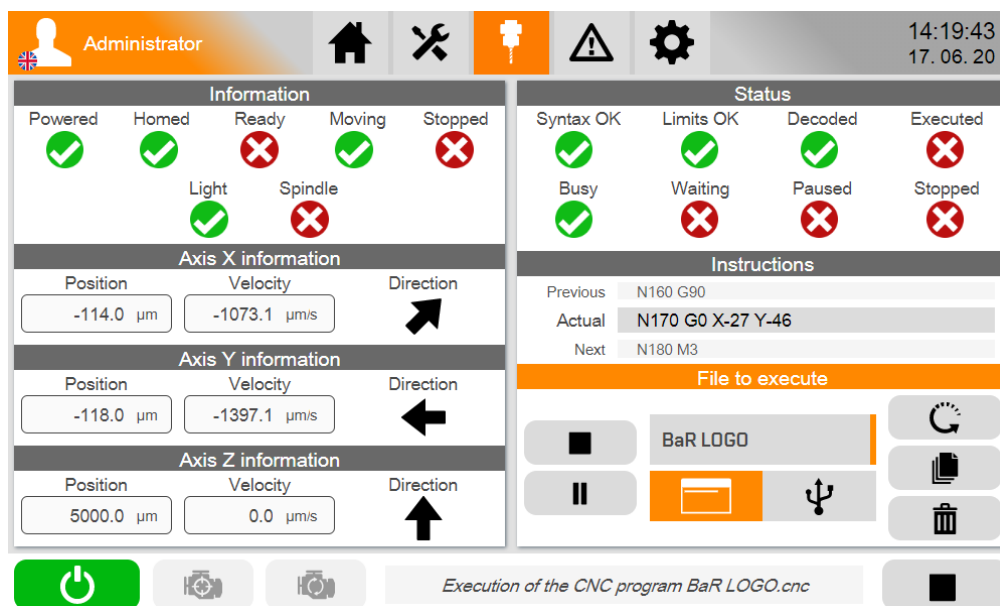
Podrobný popis, jak vytvořit a nakonfigurovat vizualizaci lze najít v souboru Help ve složce Visualization → mappView → Guides.

8.10.2 Popis jednotlivých stran

Jelikož je servisní vizualizace jednodušší a méně náročná verze plnohodnotné vizualizace ve Full HD, budou popsány funkce stran plnohodnotné vizualizace. Tím budou popsány i všechny funkce servisní vizualizace a některé navíc. V této kapitole bude ukázán pouze vzhled jedné strany z obou vizualizací pro příklad grafického rozhraní vizualizace. Všechny strany vizualizací viz příloha B – Snímky stran vizualizací.



Obr. 121: Strana CNC z Full HD vizualizace



Obr. 122: Strana CNC ze servisní vizualizace

Všechny strany obou vizualizací obsahují horní a dolní panel. Horní panel umožňuje výběr strany, přihlášení uživatele, výběr jazyka, zobrazení nápovědy a vypisuje aktuální čas. Dolní panel obsahuje základní funkce ovládání motorů. Zapnutí a vypnutí motorů, spuštění obou typů referování, zastavení motorů, a navíc ukazuje aktuální stav stroje.

První strana se nazývá „Home“. Na této straně nejsou žádné funkce, jen popis projektu, loga firem a vzhled frézky před a po úpravách.

Další vytvořenou stranou je strana „Manual“. Ta se rozděluje na dvě oblasti. Oblast informací a oblast příkazů. V oblasti informací jsou data individuálních motorů (police, rychlost, zrychlení, zpomalení, směr) a data všech os dohromady (napájeno, zreferováno, připraveno, reverzování, pohyb, zastaveno). Dále jsou v této oblasti informace o zapnutí otáček včetně a světla frézky, zobrazení souřadného systému z pohledu nástroje i obrobku a 2D grafy pro zobrazení pohybu v kartézských souřadnicích. V oblasti příkazů se nachází nastavení parametrů rychlosti, zrychlení, zpomalení a poloh a dále příkazy pro pohyb do referenční polohy, pohyb do nastavených poloh, obnovení vstupních polí, manuální posuv v jednotlivých osách a zapínání a vypínání světla a otáček frézky. Také je zde možnost zapnout funkci „Move on change“, se kterou se osy stroje hýbou okamžitě po změně vstupních polí.

Strana „CNC“ má stejné rozvržení jako strana „Manual“. Oblast informací obsahuje stejná data. Oblast příkazů je však zcela jiná. Výchozí stav umožňuje vybírat ze seznamu souborů a spouštět programy G-kódu. Soubory se můžou číst, kopírovat i mazat, ať už z kompaktního flash disku nebo USB disku. Po spuštění nějakého programu se vzhled oblasti změní a je možné sledovat data a statusy vykonávání programu. Poslední funkcí této strany je možnost otevírat soubory do textového editoru, editovat je a pak je zase uložit.

Strana „Tool table“ zobrazuje tabulku nástrojů a umožňuje její editaci. Data z této tabulky se ukládají do permanentní paměti, takže se uchovávají i po restartu PLC.

Nejnáročnější strana je strana „Teaching“. Na ní se vyskytuje tabulka, do které se dají zadávat parametry a funkce jednotlivých instrukcí. Pod tabulkou jsou nástroje tabulky, konkrétně příkaz pro přidání řádku do tabulky, vyčištění řádku, vyčištění celé tabulky a smazání řádku. Tlačítko pro vygenerování programu otevře dialogové okno, kde se zapíše název souboru a vybere zdroj, kam se má soubor vygenerovat. Ve spodní části je oblast manuálního posuvu os s informací o poloze a možnost změny rychlosti. Poslední oblastí je „Add positions to table“, která slouží k vložení aktuálních souřadnic stroje do vybraného řádku tabulky. Je možné vkládat pouze jednu souřadnici nebo všechny najednou, a to na aktuální řádek nebo na nově přidaný řádek.

Strana „Digital twin“ zprostředkovává možnost editace scény digitálního dvojčete. Tato strana komunikuje s programem „SceneViewer“ v Automation Studiu, který posílá data digitálnímu dvojčeti. Na scéně lze skrz vizualizaci měnit bezpečnostní zónu, upravovat velikost obrobku, vybírat nástroj z přednastavené palety a měnit pohled scény, ať už výběrem z předdefinovaných pohledů nebo manuálním nastavením pohledu pomocí sliderů.

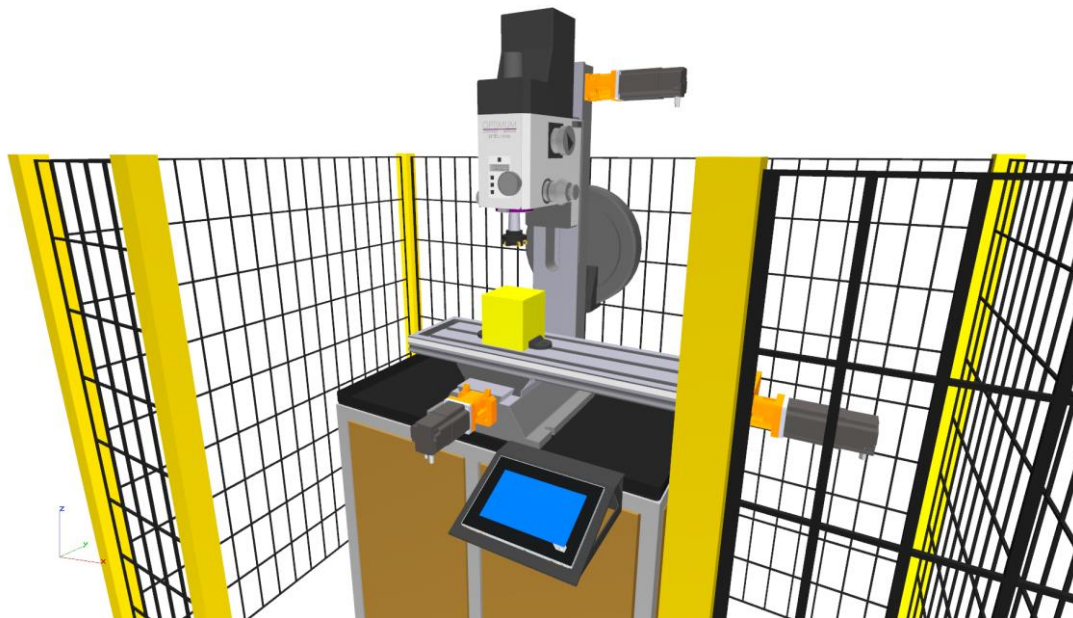
Strana „Alarms“ zobrazuje aktivní alarmy na všech částech vyvinutého softwaru. Pokud se někde vyskytne chyba, zobrazí se popis chyby a také tlačítko pro potvrzení chyby, po jehož stisknutí je stroj opět připraven k používání. Dokud není chyba potvrzena, stroj zůstane zastavený a nelze s ním jakkoliv manipulovat.

Strana „Media“ obsahuje záložky s PDF soubory a webovými stránkami. Mezi PDF se nachází aktuální závěrečná práce, datasheet PLC a návod k obsluze frézky. V dalších záložkách jsou webové strany B&R automation, VUT a Optimum.

Poslední stranou je strana „Settings“. Tato strana slouží především pro nastavení a kontrolu permanentní paměti. Je zde možné definovat vůle v jednotlivých osách a referenční pozici stroje. Kromě permanentní paměti se na této straně může měnit typ navigačního menu mezi „normálním“ a „rychlým“.

8.11 Digitální dvojče

Digitální dvojče bylo vytvořeno v programu Scene Viewer, jenž je popsán v kapitole 5.2.13. Jednotlivé části frézky byly ručně změřeny a poté vymodelovány v CAD programu dle skutečných rozměrů. Vygenerované modely ve formátu .obj byly importovány do programu Scene Viewer a poskládány k sobě. Nakonec byly nadefinovány osy stroje a vytvořeno mapování na proměnné v programu Automation Studio.



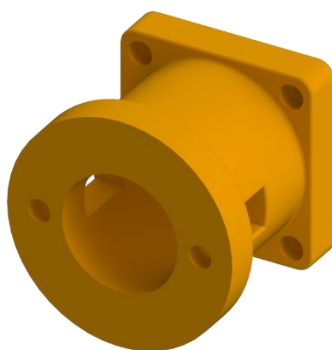
Obr. 123: Digitální dvojče vytvořené v programu Scene Viewer

9 PROBLÉMY PŘI ZPRACOVÁNÍ

Během vývoje a zpracování projektu se vyskytly různé problémy. Ty největší z nich jsou sepsány v této kapitole.

9.1 Změna úchytu osy X

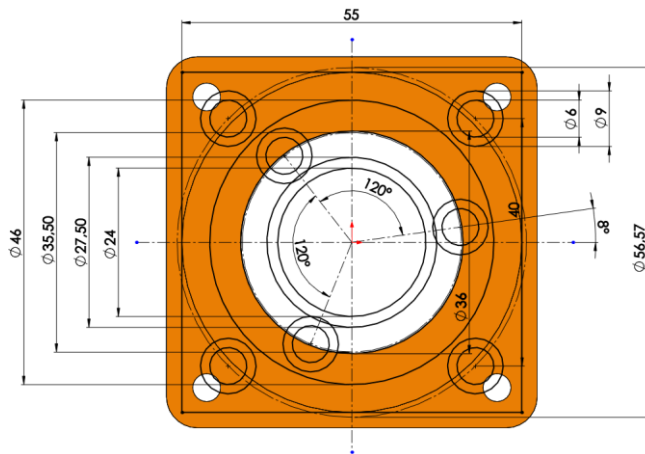
Původní úchyt motoru pro osu X neměl výřezy pro ocelové plošky. Při referování s detekcí ztráty kroků úchyt pro osu X představuje náraznou plochu pro určení polohy. První úchyt praskl a ztratil svoji funkčnost. Proto byla vyvinuta druhá verze úchytu, která již ošetřuje vzniklý problém.



Obr. 124: Úchyt pro osu X verze 1

9.2 Chyba při návrhu úchytu osy Z

Úchyt osy Z je upevněn k rámu frézky pomocí čtyř šroubů a dalších tří odsazených šroubů. V soustavě tří šroubů jsou od sebe každé dva šrouby odsazené o úhel 120° a navíc je celá soustava natočená o 8° . První verze úchytu byla vytisknuta bez celkového posunutí o 8° a díry pro šrouby modelu neseděly na díry pro šrouby rámu frézky.



Obr. 125: Posunutí soustavy šroubů o 8° na úchytu osy Z

9.3 Protizávaží v ose Z

Po instalaci motoru 80MPF5.250S114-01 k vertikální ose Z se zjistilo, že motor má problémy s utáhnutím váhy konzole. Navíc při pohybu s konzolí směrem dolů kuželové ozubené soukolí vydávalo nepříjemné zvuky kvůli vůli v soukolí a předcházení pohybu motoru vlivem váhy konzole. Protizávaží vyřešilo tyto problémy. Jeho parametry a instalace je popsána v kapitole 7.3.

9.4 Chyba při výpočtu kruhové interpolace

Nejdříve se ypsilonové souřadnice středu počítali z již spočítaných x-ových souřadnic. Rovnice získané touto metodou vypadaly takto:

$$y_{c1} = \frac{-y_s^2 + y_e^2 - x_s^2 + x_e^2 + 2x_s x_{c1} - 2x_e x_{c1}}{2(y_e - y_s)} \quad (8.46)$$

$$y_{c2} = \frac{-y_s^2 + y_e^2 - x_s^2 + x_e^2 + 2x_s x_{c2} - 2x_e x_{c2}}{2(y_e - y_s)} \quad (8.47)$$

Tyto rovnice však neumí řešit případ, kdy jsou ypsilonové souřadnice stejné. Proto nemohly být použity a musely být přepočítány celým postupem jako x-ové souřadnice.

9.5 Problém při zpracování kruhové interpolace

Prvotní zpracování kruhové interpolace nebylo rychlostním řízením, nýbrž polohovým řízením. Motory na konci každé malé úsečky zastavovaly a pracovaly cukavě. Následkem toho se kružnice nevykreslily dobře, motory se přehřívaly, a navíc vydávaly velký hluk. K původnímu řešení tedy přibyly rovnice 8.13 až 8.39, které z polohového řízení vytvářejí rychlostí řízení. Motory se již nezastavují na konci každé úsečky a kružnice se vykonává plynule, bez přehřívání motorů.

10 ZÁVĚR

V rámci diplomové práce byla robotizována konvenční vrtačko-frézka od společnosti Optimum na CNC frézku. Robotizace zahrnovala i vytvoření ovládací vizualizace prostřednictvím technologie mappView. Kromě cílů zadání byly také realizovány dvě nepovinné části. První nepovinná část byla zaměřená na vytvoření digitálního dvojčete frézky pro testování CNC programů pomocí simulace. Druhá část zahrnovala vývoj a implementaci druhé vizualizace, která slouží pro servisní účely.

Prvním krokem při robotizaci frézky byl návrh a vytisknutí plastových úchytů motorů. V této části bylo nutné vyřešit problémy s návrhem dvou úchytů, které jsou popsány v kapitole 9. Výkresy finálních verzí úchytů jsou v příloze A. Po úspěšném připevnění motorů ke konstrukci frézky byl vybrán a zapojen řídicí hardware. O veškerém použitém hardwaru, ať už řídicím, funkčním nebo bezpečnostním, pojednává kapitola 7. Když byl vybraný hardware zapojen a instalován, testovalo se správné zapojení. K tomu posloužil nástroj programu Automation Studio zvaný „Test“, ve kterém lze jednoduše zjistit, zda jsou motory správně připojeny. Kromě testování správného zapojení se v tomto nástroji taky experimentálně určila maximální rychlost motorů, hodnoty proudů, nastavení regulátorů, limity jednotlivých os ohraničující pracovní prostor stroje a v neposlední řadě počet inkrementů na jednu otáčku motoru tak, aby 1000 inkrementů představovalo 1 mm posuvu v dané ose stroje. Proces ladění motorů a výsledné hodnoty, zapsané na motory, jsou znázorněny v kapitole 8.2.

Dalším krokem bylo vytvoření řídicího softwaru. Nejdříve byl napsán funkční blok, který umožňuje řídit jeden motor i s řešením kompenzace vůle v převodech, možností dvou způsobů referování osy a zpracováním a hlášením alarmů. Program „AxesCtrl“ pak řídí koordinaci a synchronizaci tří instancí tohoto funkčního bloku. Na dekódování a zpracování G-kódu byl vytvořen vlastní dekodér a interpret. Při žádosti o vykonání CNC programu interpret nejdříve vyše příkaz dekodéru. Po úspěšném dekódování souboru interpret zpracovává jednotlivé instrukce G-kódu způsobem popsaným v kapitole 8.7.

Další důležitá část představovala automatizaci ovládání vřetena frézky, aby bylo možné zpracovávat instrukce M03 až M05 pro zapínání a vypínání vřetene. K tomu byla navržena a napájena elektronická deska s relátkou a diodami. Tato deska byla vestavěna do ovládacího zapojení frézky a její vstupy jsou řízené digitálními výstupy PLC. Pro vložení elektronické desky do ovládacího panelu frézky a vývod kabelů bylo navrženo a vytisknuto rozšíření ovládacího panelu viz kapitola 7.4.

V poslední části byly vytvořeny dvě mappView vizualizace pro ovládání stroje a digitální dvojče v programu Scene Viewer. Vizualizace umožňují manuálně hýbat se strojem, spouštět, editovat i mazat CNC programy, vytvářet CNC programy použitím metody „Teaching“, měnit scénu digitálního dvojčete, spravovat alarmy a nastavovat parametry stroje. Také poskytují kompletní informace o stavu a pohybu stroje a mimo jiné obsahují tuto diplomovou práci, návod k obsluze frézky a dokumentaci k použitému PLC.

Na závěr byla úspěšně otestována funkčnost stroje a vykonány reprezentativní úlohy, které jsou zdokumentovány v příloze C a D.

V budoucnosti by měly pokračovat práce na tomto projektu a řešení by mělo být rozšířeno o další osy pro automatické upnutí nástroje a obrobku a pro jemnější posuv ve vertikální ose Z pomocí pinoly. Dále by měla být CNC frézka zakomponována do automatizované buňky ve smyslu průmyslu 4.0, kde by měla být součástí procesu linky a komunikovat s ostatními zařízeními buňky.

11 SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] Druhy obráběcích strojů. *ELUC* [online]. 2020, [cit. 17.06.2020]. Dostupné z: <https://eluc.kr-olomoucky.cz/verejne/lekce/1818>
- [2] Vysoké učení technické v Brně [online]. Copyright © [cit. 17.06.2020]. Dostupné z: https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=16447
- [3] Průmysl 4.0 – *Wikipedie*. [online]. 2020, [cit. 17.06.2020]. Dostupné z: https://cs.wikipedia.org/wiki/Pr%C5%AFmysl_4.0
- [4] Google Brillo: Nový operační systém pro internet věcí - Mobilizujeme.cz. *Mobilizujeme.cz* [online]. Copyright © 2007 [cit. 17.06.2020]. Dostupné z: <https://mobilizujeme.cz/clanky/google-brillo-novy-operacni-system-pro-internet-veci>
- [5] Cloud computing – *Wikipedie*. [online]. 2020, [cit. 17.06.2020]. Dostupné z: https://cs.wikipedia.org/wiki/Cloud_computing
- [6] Soustruh – *Wikipedie*. [online]. 2020, [cit. 17.06.2020]. Dostupné z: <https://cs.wikipedia.org/wiki/Soustruh>
- [7] Vrtání. *ELUC* [online]. 2020, [cit. 17.06.2020]. Dostupné z: <https://eluc.kr-olomoucky.cz/verejne/lekce/1207>
- [8] Hoblování a obrážení. *ELUC* [online]. 2020, [cit. 17.06.2020]. Dostupné z: <https://eluc.kr-olomoucky.cz/verejne/lekce/1826>
- [9] Broušení. *ELUC* [online]. 2020, [cit. 17.06.2020]. Dostupné z: <https://eluc.kr-olomoucky.cz/verejne/lekce/1825>
- [10] Serverovna – *Wikipedie*. [online]. 2020, [cit. 17.06.2020]. Dostupné z: <https://cs.wikipedia.org/wiki/Serverovna>
- [11] Optimum Maschinen. *Optimum Maschinen* [online]. Copyright © 2020 [cit. 17.06.2020]. Dostupné z: <https://www.optimum-machines.com/>
- [12] Optimum. *Stürmer Maschinen* [online]. Copyright © 2020 [cit. 17.06.2020]. Dostupné z: <https://www.stuermer-machines.com/brands/optimum/>
- [13] Stolní frézka OPTIMUM OPTImill BF 20 L Vario: PEDDY.cz. *Nářadí PEDDY.cz - nejlepší nářadí* [online]. Copyright © 2020 PEDDY.cz [cit. 17.06.2020]. Dostupné z: <https://www.peddy.cz/obrabeni-kovoobrabeci-stroje-frezky-stolni/stolni-frezka-optimum-optimill-bf-20-l-vario>
- [14] B&R – *Wikipedia*. [online]. 2020, [cit. 17.06.2020]. Dostupné z: <https://en.wikipedia.org/wiki/B%26R>
- [15] B&R – Wikiwand. *Wikiwand* [online]. 2020, [cit. 17.06.2020]. Dostupné z: <https://www.wikiwand.com/en/B%26R>
- [16] Parc Científic, *Universitat de Valencia* [online]. 2020, [cit. 17.06.2020]. Dostupné z: <https://www.pcuv.es/en/empresas/industrial-materiales-nanotecnologia/B-R-AUTOMATION>
- [17] Vysoké učení technické v Brně [online]. Copyright © [cit. 17.06.2020]. Dostupné z: https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=149374
- [18] Vysoké učení technické v Brně [online]. Copyright © [cit. 17.06.2020]. Dostupné z: https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=86545
- [19] Industrial automation | Perfection in Automation | B&R Industrial Automation. *Industrial automation | Perfection in Automation | B&R Industrial Automation* [online]. Copyright © 2020 B [cit. 17.06.2020]. Dostupné z: <https://www.br-automation.com/en-gb/>

- [20] ABB Group – Leading digital technologies for industry. *ABB Group – Leading digital technologies for industry* [online]. Copyright © Copyright 2020 ABB [cit. 17.06.2020]. Dostupné z: <https://new.abb.com/>
- [21] B&R is adding two new sizes to its servo motors – WORLD-OF-INDUSTRIES. *WORLD-OF-INDUSTRIES – Covering the 4th industrial revolution in the fields of automation, motion & drives, and logistics* [online]. 2020, [cit. 17.06.2020]. Dostupné z: <https://www.world-of-industries.com/br-adding-two-new-sizes-servo-motors/>
- [22] SLIP – *Wikipedie*. [online]. 2020, [cit. 17.06.2020]. Dostupné z: <https://cs.wikipedia.org/wiki/SLIP>
- [23] Object moved. *Object moved* [online]. 2020, [cit. 17.06.2020]. Dostupné z: https://automa.cz/cz/casopis-clanky/prumyslovy-ethernet-ix-ethernet/ip-ethernet-2008_10_37910_6510/
- [24] EtherCAT Automation Protocol | Automatizace.HW.cz. *Automatizace.HW.cz / Elektronika v automatizaci* [online]. Copyright © 1997 [cit. 17.06.2020]. Dostupné z: <https://automatizace.hw.cz/ethercat-automation-protocol.html>
- [25] Anybus – *Multi-network connectivity within Fieldbus and Industrial Ethernet* [online]. 2020, [cit. 17.06.2020]. Dostupné z: <https://www.anybus.com/fr/technologies/industrial-ethernet/modbus-tcp#jump1>
- [26] OPC UA Overview – Real Time Automation, Inc. *Real Time Automation, Inc.* [online]. Copyright © [cit. 17.06.2020]. Dostupné z: <https://www.rtautomation.com/technologies/opcu/>
- [27] Scheppach HF 50 - stolová fréza – MaM Technika s.r.o. *Zahradní technika a nářadí* [online]. 2020, [cit. 17.06.2020]. Dostupné z: <https://www.naradinazahradu.cz/scheppach-hf-50-stolova-freza/>
- [28] TrueTech 60 Profi DRO robustní konzolová frézka na kov, ISO 40, 3-osy DRO, chlazení, strojní posuv X a Y, 400V-3f - 950 kg | Prima Dilna - e-shop s nářadím, mazivy, soustruhy atd. *Prima Dilna – e-shop s nářadím, mazivy, soustruhy atd.* [online]. 2020, [cit. 17.06.2020]. Dostupné z: <https://www.primadilna.cz/TrueTech-60-Profi-DRO-robustni-konzolova-frezka-na-kov-ISO-40-3-osy-DRO-chlazení-strojní-posuv-X-a-Y-400V-3f-950-kg-d8494.htm>
- [29] Novinky z veletrhu Westec podruhé. *Domů* [online]. Copyright © 2020 firmy.mmspektrum.com [cit. 17.06.2020]. Dostupné z: <http://firmy.mmspektrum.com/clanek/novinky-z-veletrhu-westec-podruhe.html>
- [30] Fréza – *Wikipedie*. [online]. 2020, [cit. 17.06.2020]. Dostupné z: <https://cs.wikipedia.org/wiki/Fr%C3%A9za>
- [31] Frézy na kov — Degas s.r.o. *Prodej nářadí a půjčovna nářadí Kroměříž – Kvalitní ruční a elektrické nářadí pro řemeslníky i kutily. — Degas s.r.o.* [online]. Copyright © 2020 [cit. 17.06.2020]. Dostupné z: <https://www.degas-km.cz/frezy-na-kov/c168.html>
- [32] G-code – *Wikipedia*. [online]. 2020, [cit. 17.06.2020]. Dostupné z: <https://en.wikipedia.org/wiki/G-code>
- [33] The difference between RS274D and RS274X gerber formats. *Turn-key PCB Assembly and Manufacturing* [online]. 2020, [cit. 17.06.2020]. Dostupné z: <https://www.7pcb.com/blog/the-difference-between-rs274d-and-rs274x-gerber.php>
- [34] Flexible Coupler for NEMA 23 Stepper (6.35 to 8 mm) – Lampa Tronics. *Lampa Tronics – Lampa Tronics Store* [online]. Copyright © [cit. 17.06.2020]. Dostupné z: <https://lampatronics.com/shop/3d-printer/flexible-coupler-nema-23-stepper-6-35-8-mm/>

- [35] Pardon Our Interruption. *Pardon Our Interruption* [online]. 2020, [cit. 17.06.2020]. Dostupné z: <https://www.distrelec.cz/cs/laboratorni-napajeci-zdroj-32v-10a-320w-programovatelny-elektro-automatik-ea-ps-3032-10b/p/16985265>
- [36] Router AirLive N.Mini bílý | EURONICS. *Průvodce světem elektro* | EURONICS [online]. Copyright © 2017 HP TRONIC Zlín, spol. s r.o. [cit. 17.06.2020]. Dostupné z: <https://www.euronics.cz/router-airlive-n-mini-bily-arlnmini/p259548/>

12 SEZNAM PŘÍLOH

PŘÍLOHA A. Výkresová dokumentace

PŘÍLOHA B. Snímky stran vizualizací

PŘÍLOHA C. Výsledky reprezentativních úloh

PŘÍLOHA D. Soubor ZIP

A. VÝKRESOVÁ DOKUMENTACE

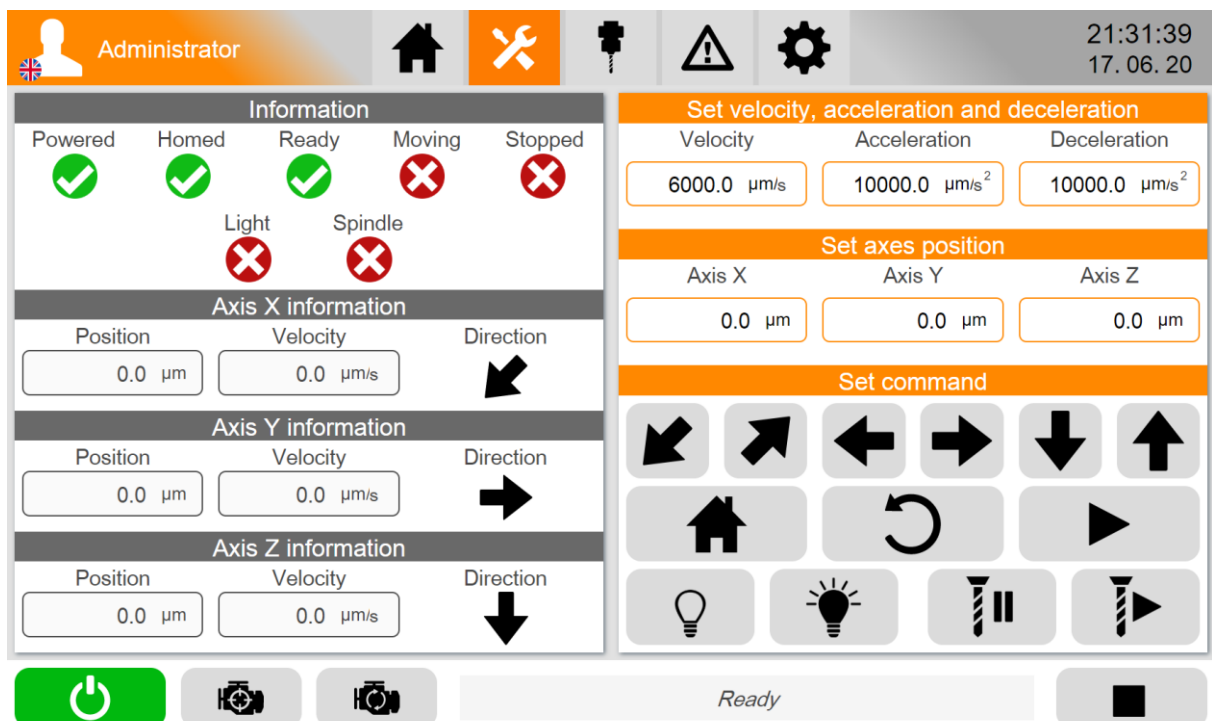
Tab. 1: Seznam výkresů

Číslo	Označení	Název	Popis
1	1A-20-1	UCHYT_OSA_X_v2	Druhá verze úchytu pro osu X
2	2A-20-1	UCHYT_OSA_Y	Výkres úchytu pro osu Y
3	3A-20-1	UCHYT_OSA_Z	Výkres úchytu pro osu Z

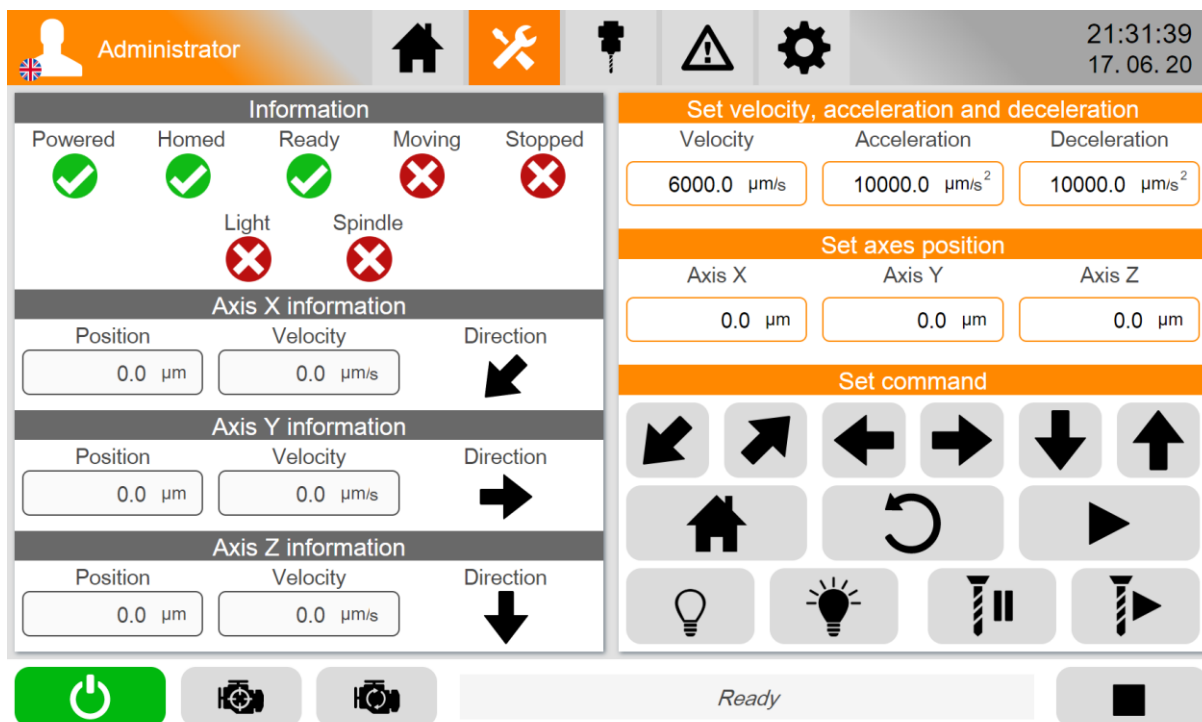
B. SNÍMKY STRAN VIZUALIZACÍ



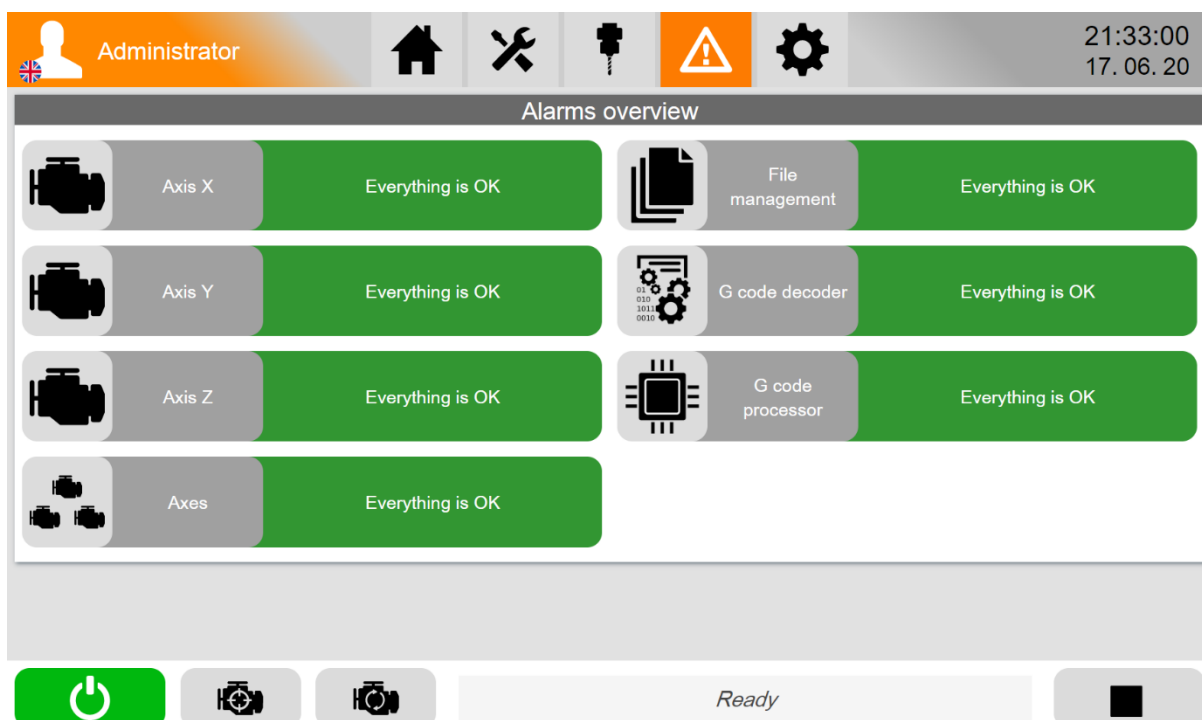
Obr. 1: Servisní vizualizace – Strana „Home“



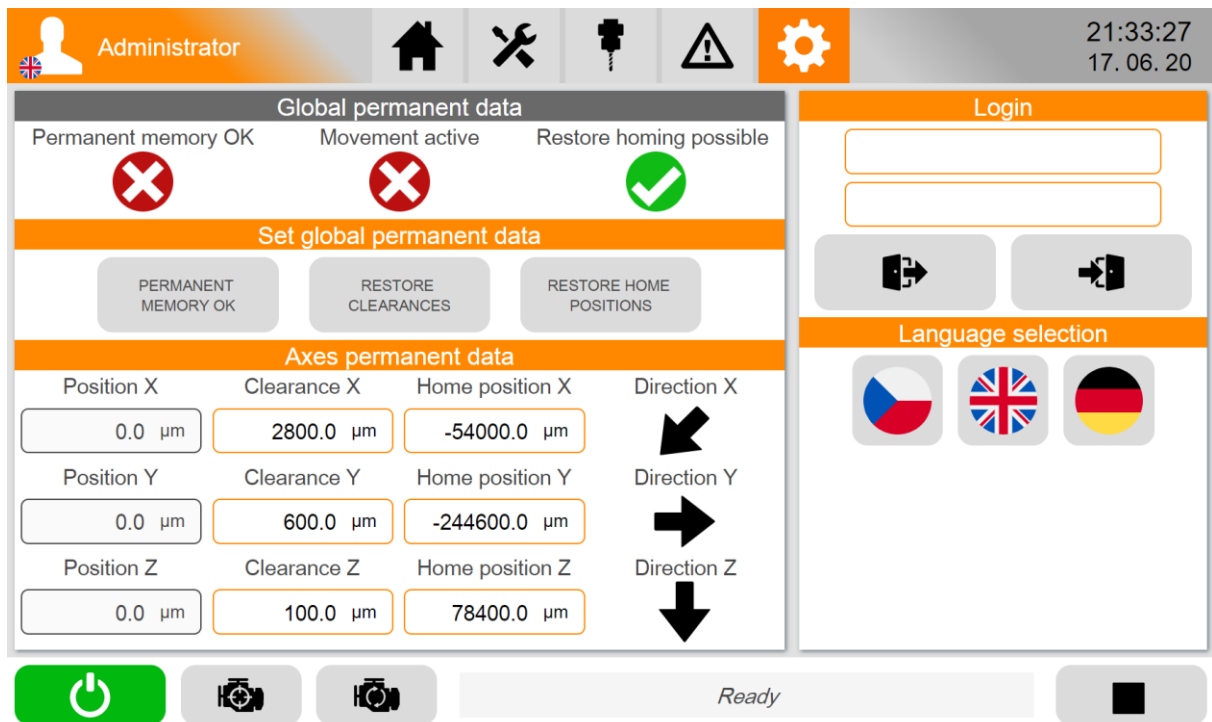
Obr. 2: Servisní vizualizace – Strana „Manual“



Obr. 3: Servisní vizualizace – Strana „CNC“



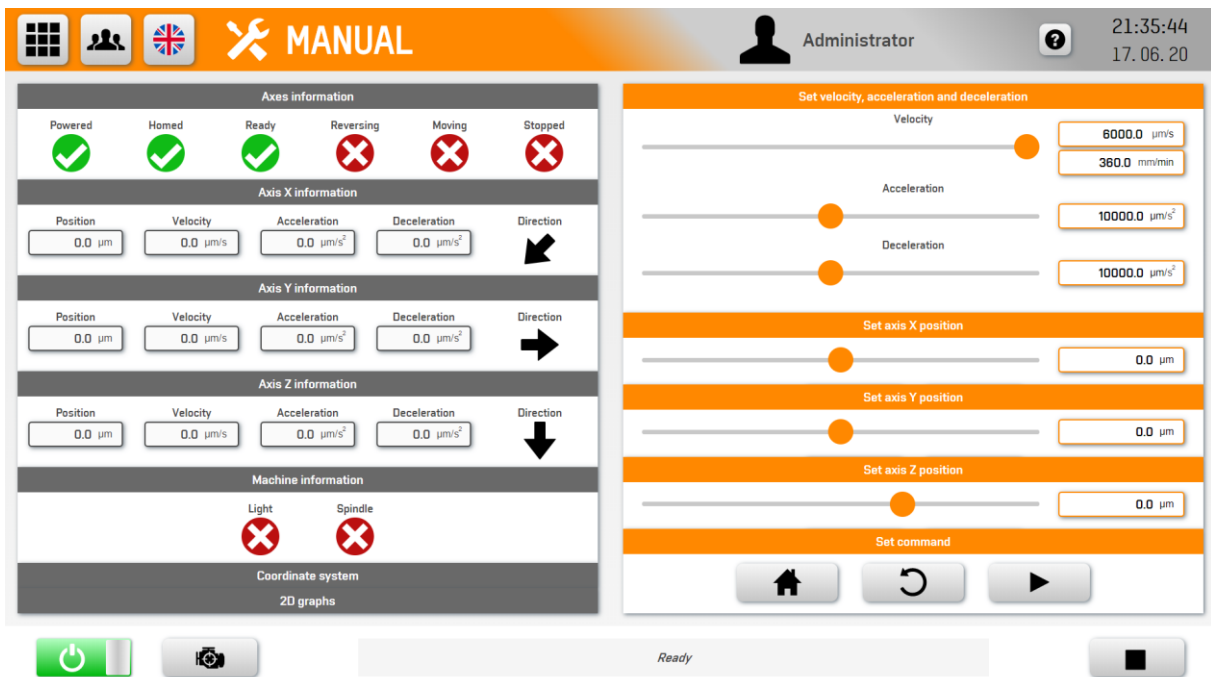
Obr. 4: Servisní vizualizace – Strana „Alarms“



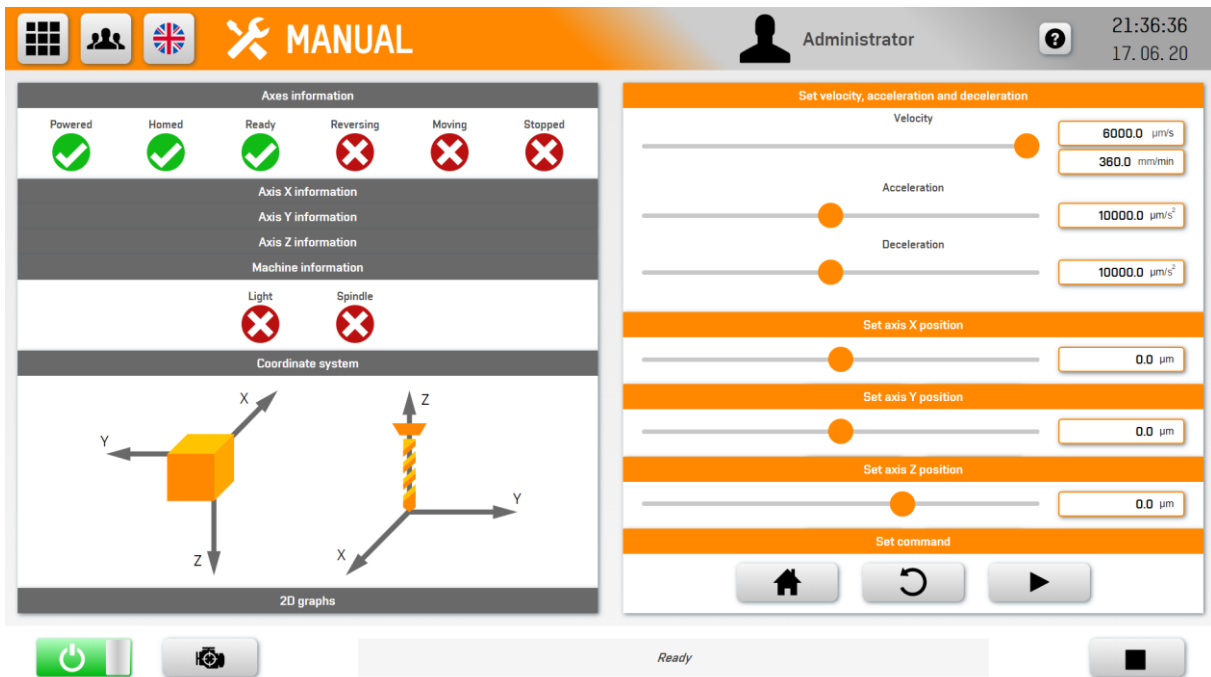
Obr. 5: Servisní vizualizace – Strana „Settings“



Obr. 6: Hlavní vizualizace – Strana „Home“



Obr. 7: Hlavní vizualizace – Strana „Manual“, výchozí stav



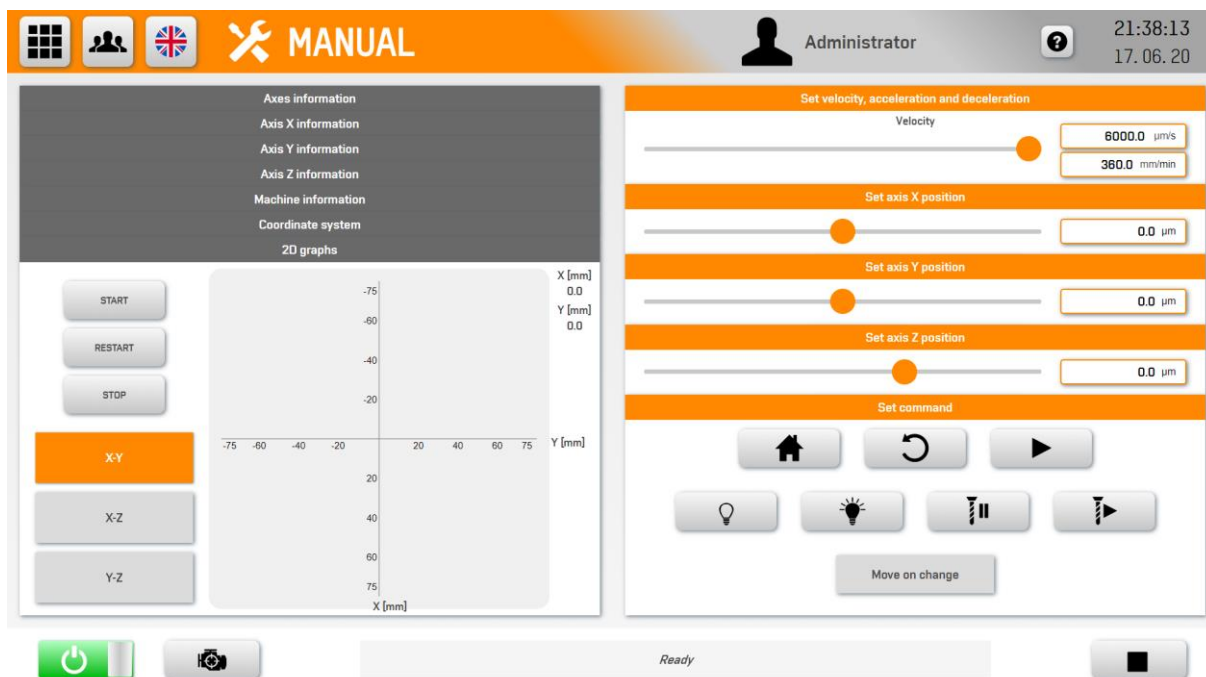
Obr. 8: Hlavní vizualizace – Strana „Manual“, souřadné systémy



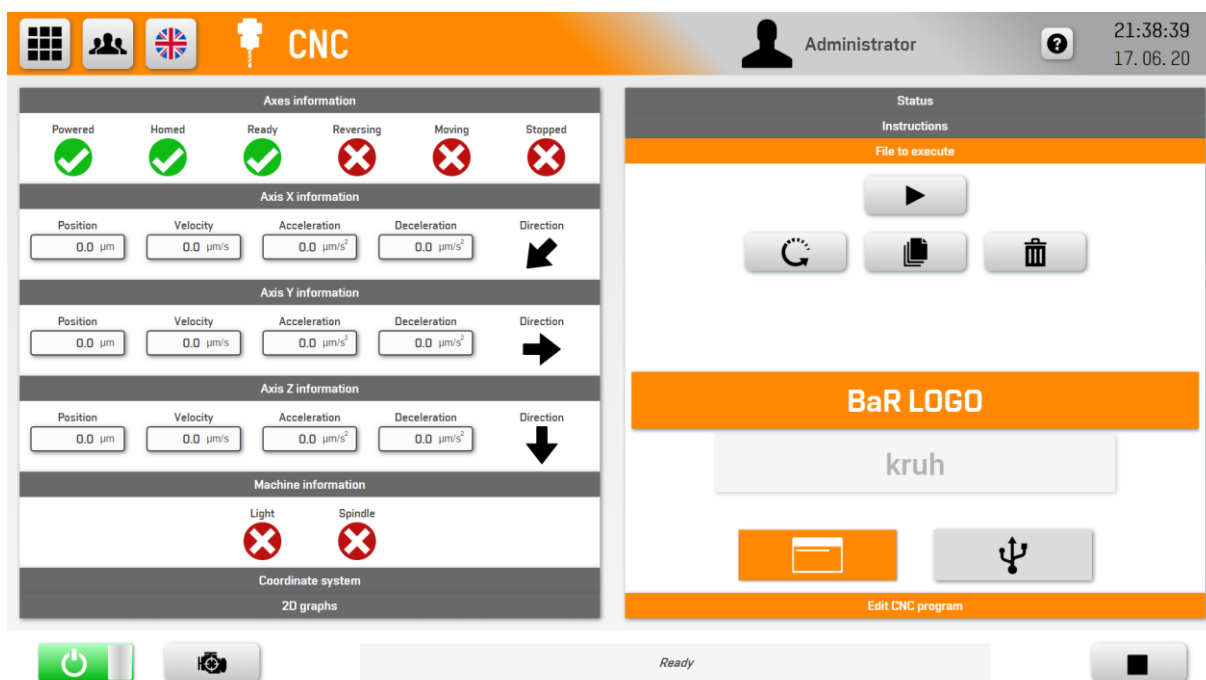
Obr. 9: Hlavní vizualizace – Strana „Manual“, grafy



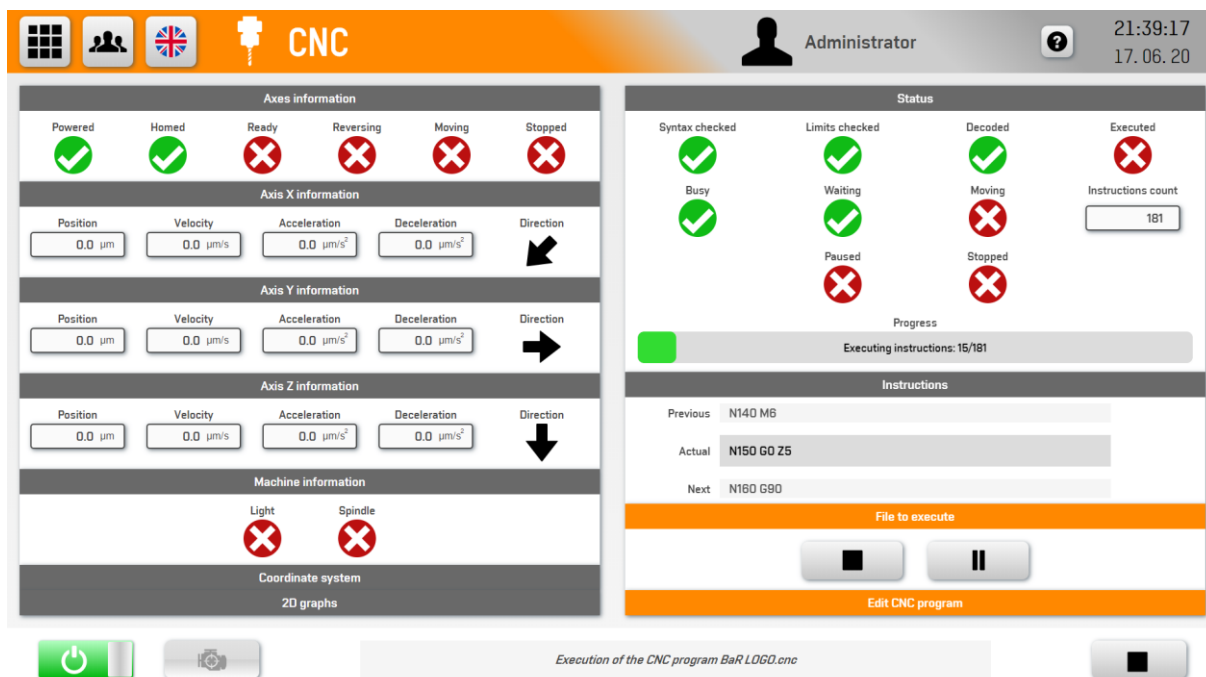
Obr. 10: Hlavní vizualizace – Strana „Manual“, manuální posuvy



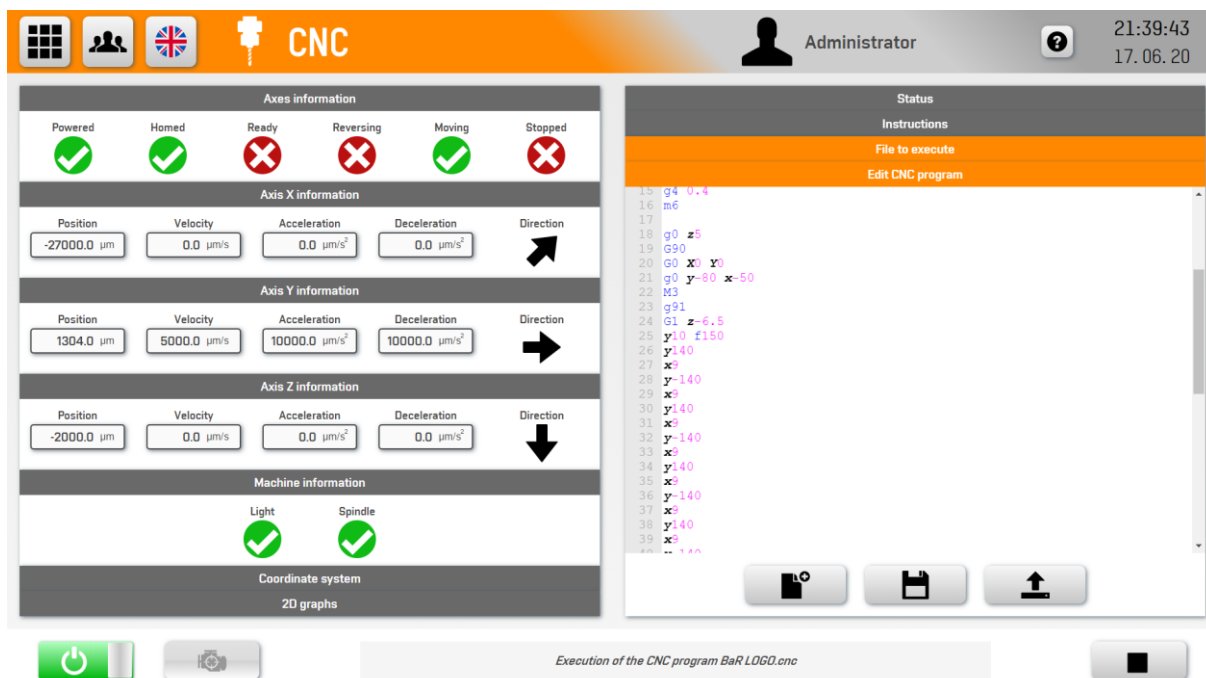
Obr. 11: Hlavní vizualizace – Strana „Manual“, příkazy



Obr. 12: Hlavní vizualizace – Strana „CNC“, výchozí stav



Obr. 13: Hlavní vizualizace – Strana „CNC“, vykonávání programu



Obr. 14: Hlavní vizualizace – Strana „CNC“, editace programu

TOOL TABLE Administrator 21:40:07 17.06.20

Identifier	Name	Radius [mm]	Length [mm]
D0	Deactivation	0.0	0.0
D1		0.0	0.0
D2		0.0	0.0
D3		0.0	0.0
D4		0.0	0.0
D5		0.0	0.0
D6		0.0	0.0
D7		0.0	0.0
D8		0.0	0.0
D9		0.0	0.0

Commands

RESET TOOL TABLE CLEAR TOOL TABLE

Ready

Obr. 15: Hlavní vizualizace – Strana „Tool table“

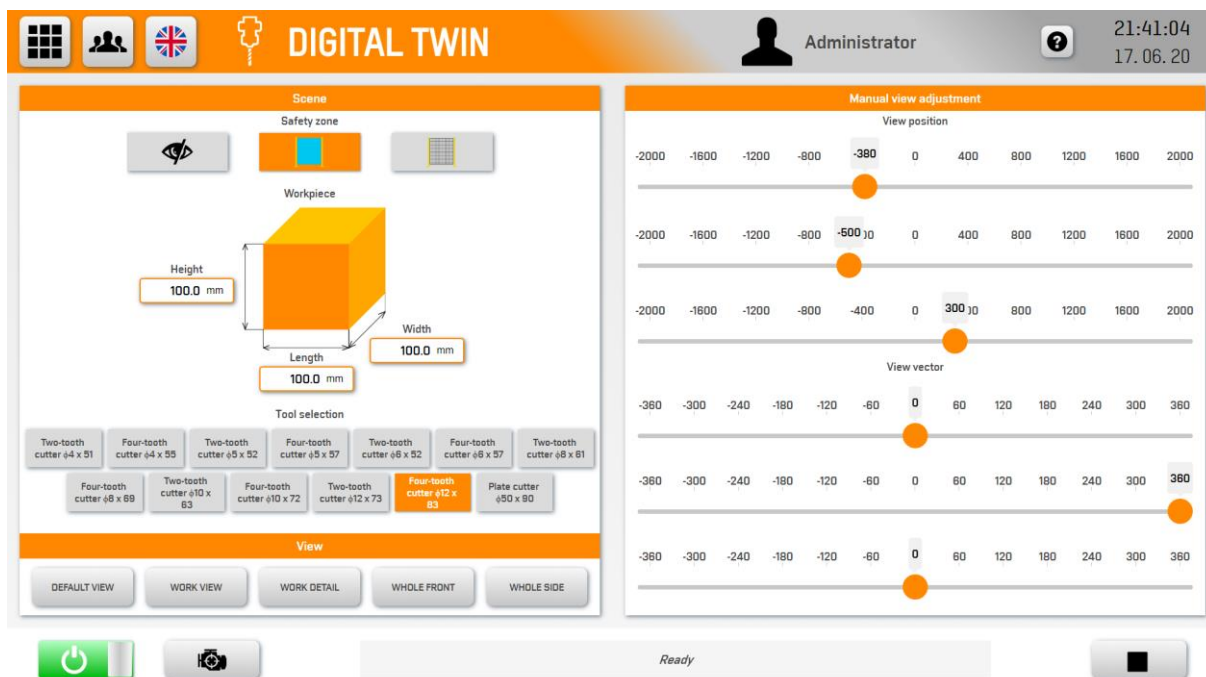
TEACHING Administrator 21:40:39 17.06.20

	Function	Function number	Position X	Position Y	Position Z	Radius	Feed rate	Spindle speed	Time
1									
2									
3									
4									
5									
6									
7									
8									

Position X: 4442.0 μm Position Y: 53000.0 μm Position Z: -2000.0 μm Velocity: 5000.0 $\mu\text{m/s}$ 300.0 mm/min

Ready

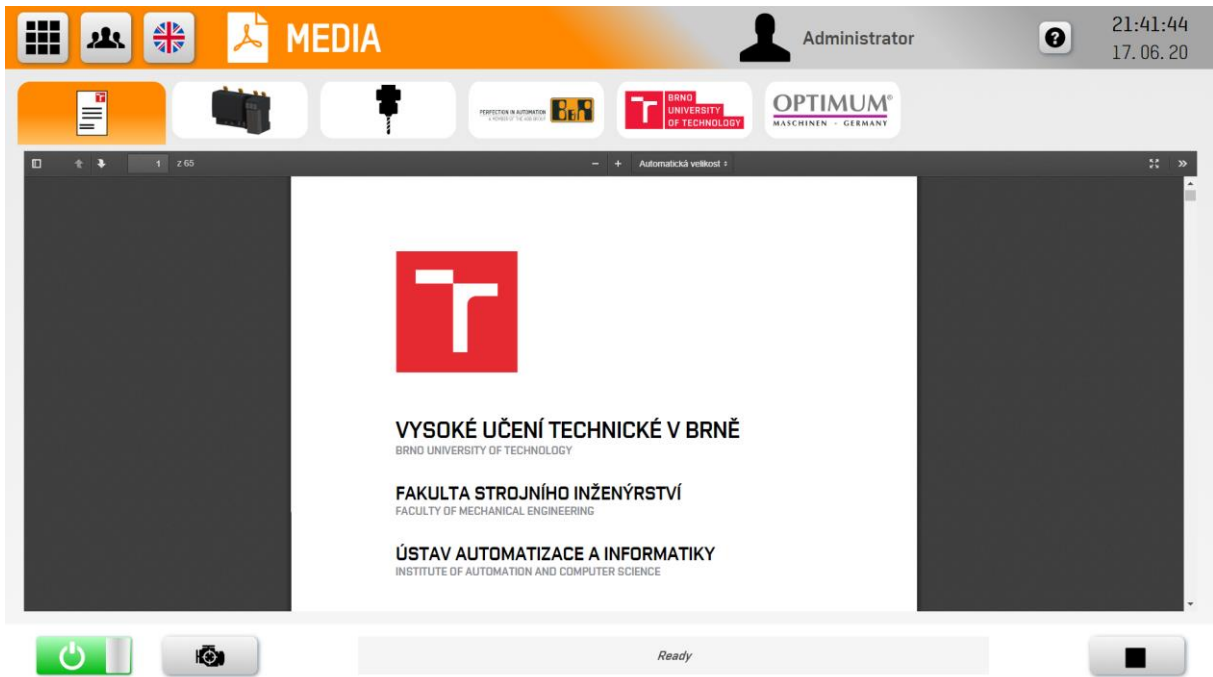
Obr. 16: Hlavní vizualizace – Strana „Teaching“



Obr. 17: Hlavní vizualizace – Strana „Digital twin“



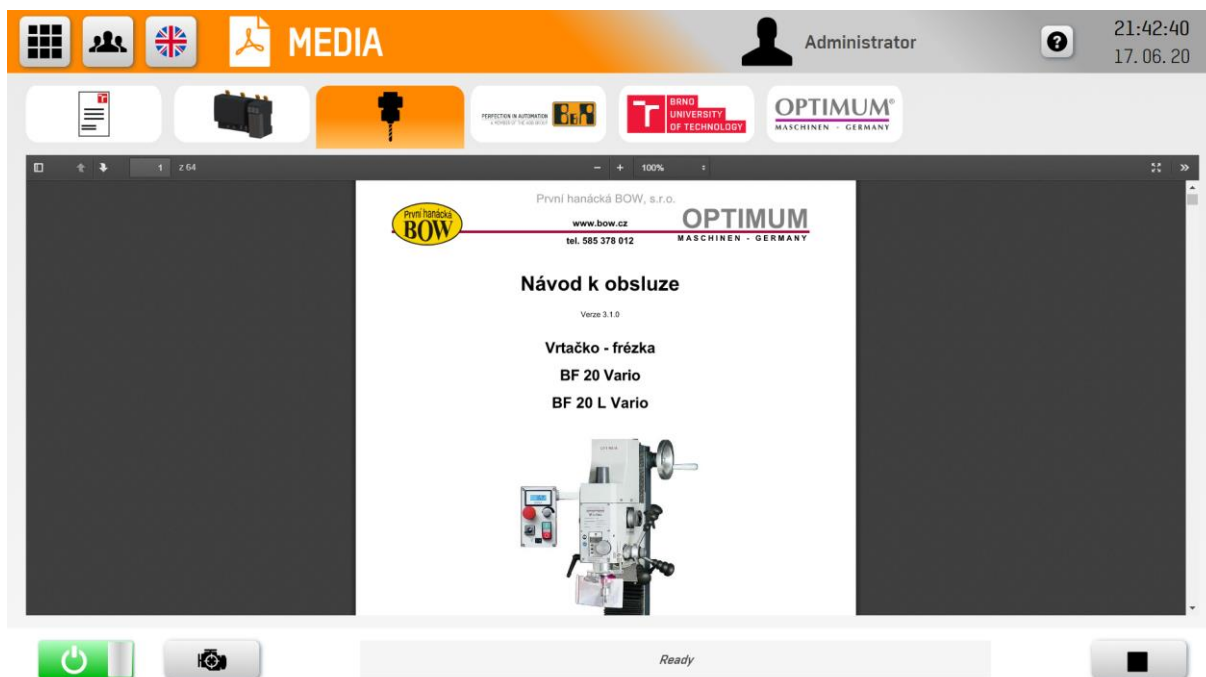
Obr. 18: Hlavní vizualizace – Strana „Alarms“



Obr. 19: Hlavní vizualizace – Strana „Media“, diplomová práce



Obr. 20: Hlavní vizualizace – Strana „Media“, PLC datasheet



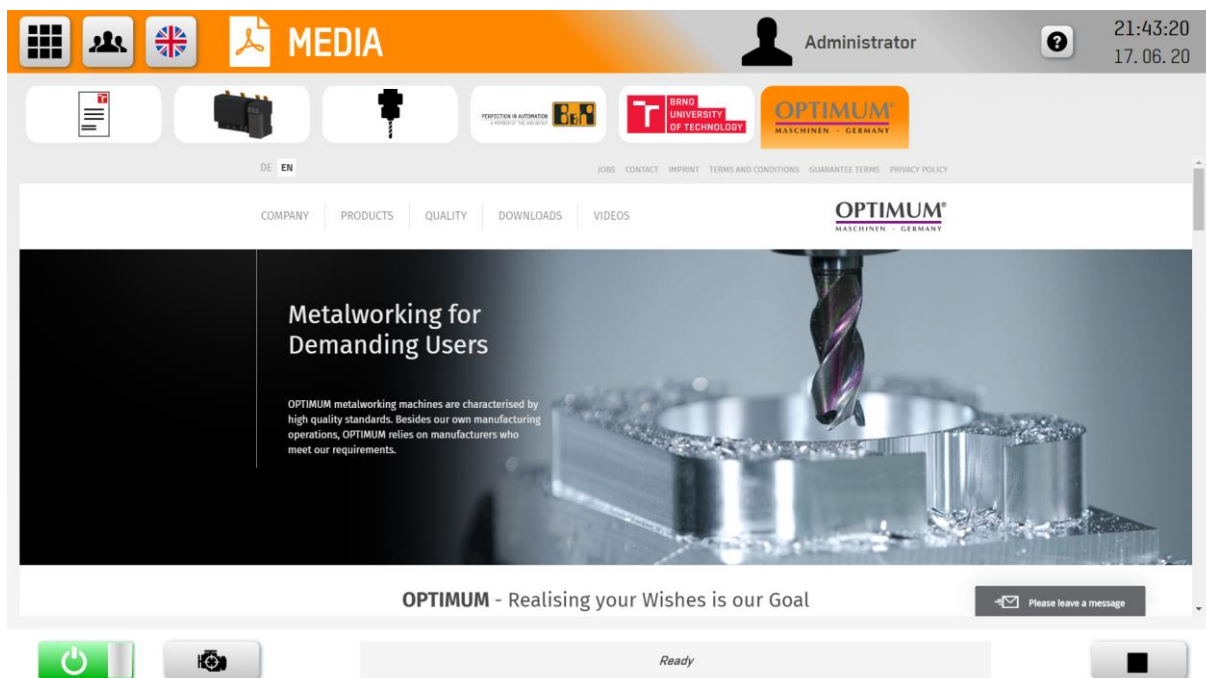
Obr. 21: Hlavní vizualizace – Strana „Media“, návod k obsluze frézky



Obr. 22: Hlavní vizualizace – Strana „Media“, B&R



Obr. 23: Hlavní vizualizace – Strana „Media“, VUT



Obr. 24: Hlavní vizualizace – Strana „Media“, Optimum

SETTINGS Administrator 21:43:39 17.06.20

Global permanent data

Permanent memory OK Movement active Restore homing possible

Set global permanent data

PERMANENT MEMORY OK RESTORE CLEARANCES RESTORE HOME POSITIONS

Axis X permanent data

Position: 4442.0 μm Clearance: 2800.0 μm Home position: -54000.0 μm Direction:

Axis Y permanent data

Position: 53000.0 μm Clearance: 600.0 μm Home position: -244600.0 μm Direction:

Zero point of Y axis

-140 -120 -100 -80 -60 -40 -20 0 mm 20 40 60 80 100 120

Axis Z permanent data

Position: -2000.0 μm Clearance: 100.0 μm Home position: 78400.0 μm Direction:

Other settings

Navigation menu type

Normal Fast

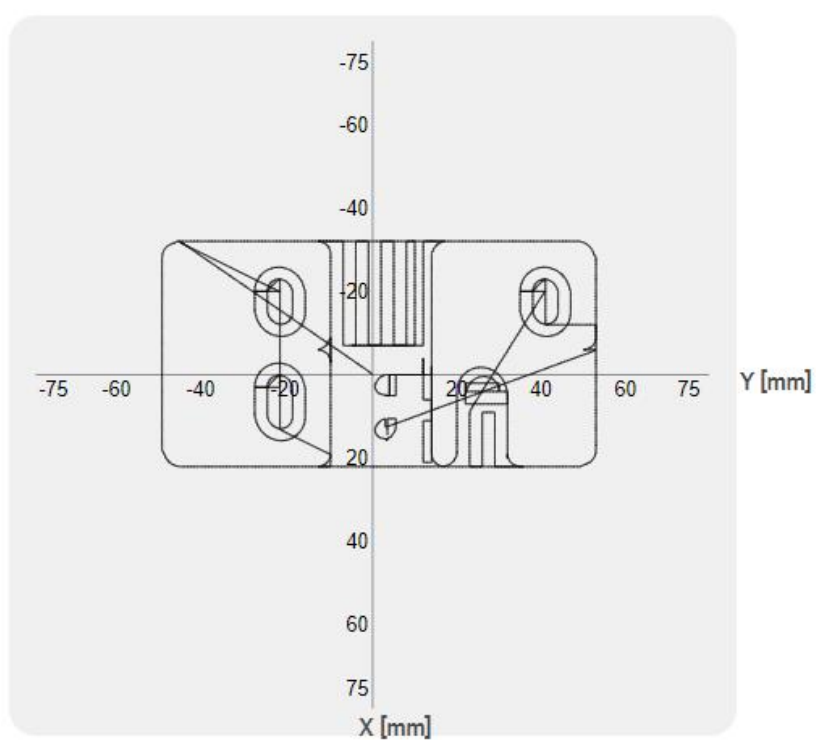
Ready

Obr. 25: Hlavní vizualizace – Strana „Settings“

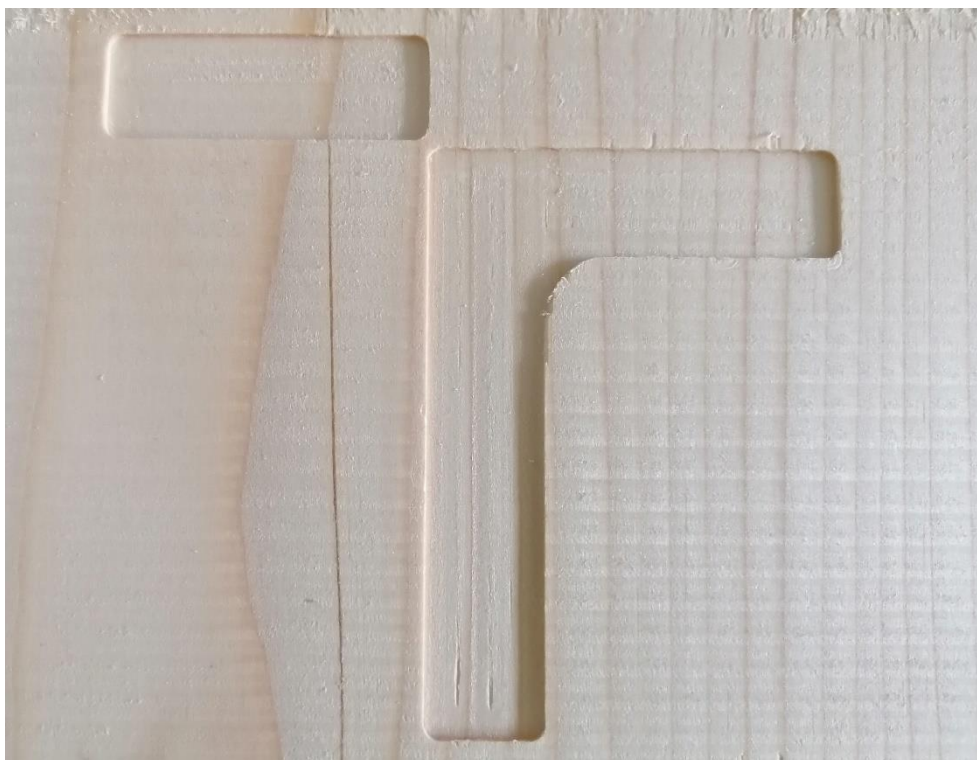
C. VÝSLEDKY REPREZENTATIVNÍCH ÚLOH



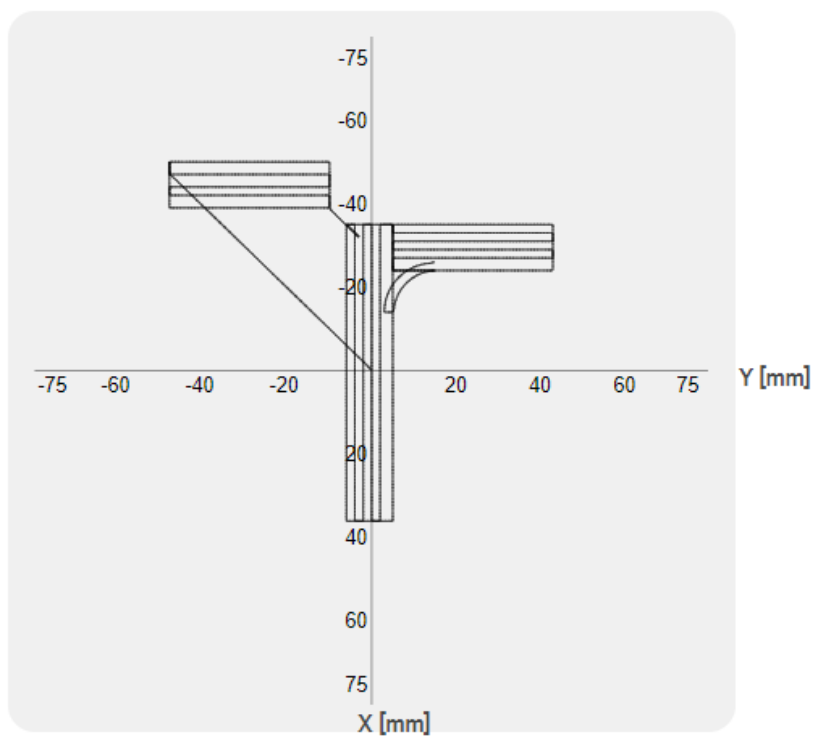
Obr. 1: Výsledek reprezentativní úlohy BuR_LOGO



Obr. 2: Vykreslení dráhy reprezentativní úlohy BuR_LOGO



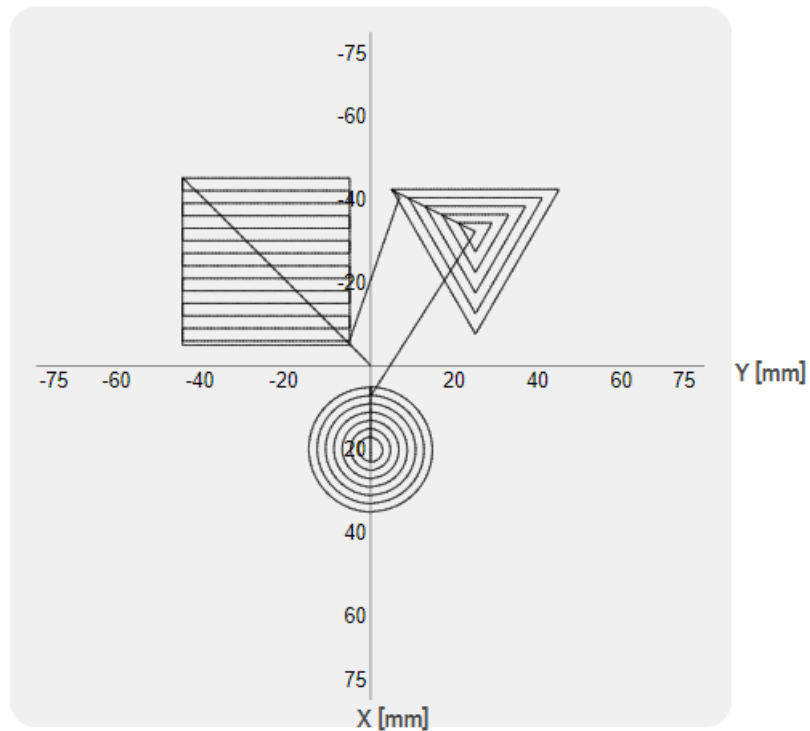
Obr. 3: Výsledek reprezentativní úlohy VUT_LOGO



Obr. 4: Vykreslení dráhy reprezentativní úlohy VUT_LOGO



Obr. 5: Výsledek reprezentativní úlohy GEOMETRIC_SHAPES



Obr. 6: Vykreslení dráhy reprezentativní úlohy GEOMETRIC_SHAPES

D. SOUBOR ZIP

Tab. 1: Obsah souboru ZIP

Adresář	Soubor
	README.txt
Diplomova_prace	2020_DP_Vavrik_Michal_183179.pdf
Hlavni_program	DP_MV_CNC.zip
Reprezentativni_ulohy	BuR_LOGO.cnc
	VUT_LOGO.cnc
	GEOMETRIC_SHAPES.cnc
Prilohy	PRILOHA_A.pdf
	PRILOHA_B.pdf
	PRILOHA_C.pdf
	PRILOHA_D.pdf
Vykresova_dokumentace	UCHYT_OSA_X_v2.SLDDRW
	UCHYT_OSA_X_v2.pdf
	UCHYT_OSA_Y.SLDDRW
	UCHYT_OSA_Y.pdf
	UCHYT_OSA_Z.SLDDRW
	UCHYT_OSA_Z.pdf

