

**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ**

**KATEDRA APLIKOVANÉ ELEKTROTECHNIKY
A TELEKOMUNIKACÍ**

DIPLOMOVÁ PRÁCE

**Návrh řízení 3-osého manipulátoru pro
automatizované testování řídicích jednotek**

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI

Fakulta elektrotechnická

Akademický rok: 2017/2018

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Bc. Josef VANĚK**

Osobní číslo: **E15N0079P**

Studijní program: **N2612 Elektrotechnika a informatika**

Studijní obor: **Dopravní elektroinženýrství a autoelektronika**

Název tématu: **Návrh řízení 3-osého manipulátoru pro automatizované testování řídicích jednotek**

Zadávací katedra: **Katedra aplikované elektroniky a telekomunikací**

Z á s a d y p r o v y p r a c o v á n í :

1. Na základě mechanické konstrukce zvolte vhodný způsob řízení pohonů 3-osého manipulátoru.
2. Vytvořte rozhraní pro manuální obsluhu uživatelem i pro možnost ovládání z nástrojů pro automatizaci testování.
3. Zhodnoťte dosažené vlastnosti manipulátoru.
4. Porovnejte možnosti testování 3-osého manipulátoru s testovacím stavem na bázi robota UR5.

Rozsah grafických prací: **podle doporučení vedoucího**

Rozsah kvalifikační práce: **40 - 60 stran**

Forma zpracování diplomové práce: **tištěná/elektronická**

Seznam odborné literatury:

Student si vhodnou literaturu vyhledá v dostupných pramenech podle doporučení vedoucího práce.

Vedoucí diplomové práce:

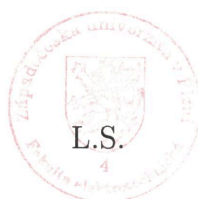
Ing. Michal Kubík, Ph.D.

Katedra aplikované elektroniky a telekomunikací

Datum zadání diplomové práce: **10. října 2017**

Termín odevzdání diplomové práce: **24. května 2018**

Doc. Ing. Jiří Hammerbauer, Ph.D.
děkan



Doc. Dr. Ing. Vjačeslav Georgiev
vedoucí katedry

V Plzni dne 10. října 2017

Anotace

Cílem této práce je na základě mechanické konstrukce zmapovat způsoby řízení pohonů pro manipulátor určený k testování řídicích jednotek a vybraný způsob řízení zrealizovat. Pro dané řízení dále vytvořit rozhraní pro manuální obsluhu i pro možnost ovládání z nástrojů pro automatizaci testování. Porovnat možnosti testování manipulátorem s testovacím stavem na bázi robotického stavu s průmyslovým robotem UR5 a zhodnotit dosažené vlastnosti manipulátoru.

Na základě mechanické konstrukce byly zvoleny vhodné komponenty a řízení s ohledem na to, že se jednalo o nízkonákladové řešení pro automatizované testování a prezentaci zákazníkům. Ve vývojovém prostředí LabVIEW byla vytvořena aplikace, která slouží jako uživatelské rozhraní a také k zpracování pokynů z nástrojů pro automatizované testování.

Klíčová slova

Průmyslový robot, elektronická řídicí jednotka, testovací stav, automatizované testování, krokový motor, budič motoru, bezpečnost robotů, LabVIEW, HMI, HiL, ECU, PLC, NI, CNC, EMC

Abstract

The objectives of this thesis are to survey components and controllers for the drives control of a manipulator and to choose the best drive control solution for the given mechanical construction of a manipulator designed for the front panel stimulation of an electronic control unit.

For this control solution an interface for manual operation as well as for remote control from test automation tools. The manipulator features and performance has to be evaluated and compared to the test bench based on the industrial robot UR5.

Based on the mechanical design components and control system were chosen. The fact that it is a low cost solution for automated testing and for presentation to customers was kept in mind. The control application including user interface and also interface to process instructions from automated testing tools was developed in the LabVIEW development environment.

Key words

Industrial robot, electronic control unit, test bench, automated testing, stepper motor, motor driver, robot safety, LabVIEW, HMI, HiL, ECU, PLC, NI, CNC, EMC

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou práci na téma „Návrh řízení 3-osého manipulátoru pro automatizované testování řídicích jednotek“ vypracoval samostatně, s použitím odborné literatury a pramenů uvedených v seznamu, který je součástí této diplomové práce.

Dále prohlašuji, že veškerý software, použitý při řešení této diplomové práce, je legální.

.....

Podpis

Poděkování

Tímto bych rád poděkoval vedoucímu diplomové práce Ing. Michalu Kubíkovi, Ph.D. za odborné vedení práce, věcné připomínky, profesionální rady, metodické vedení práce a vstřícnost při konzultacích diplomové práce. Dále bych poděkoval společnosti MBtech Bohemia s.r.o. za poskytnutí příležitosti vypracovat tuto diplomovou práci.

Obsah

OBSAH	8
SEZNAM ZKRATEK	10
SEZNAM SYMBOLŮ	11
ÚVOD.....	12
1 AUTOMATIZOVANÉ TESTOVÁNÍ ŘÍDICÍCH JEDNOTEK	13
1.1 CÍL TESTOVÁNÍ.....	13
1.2 NÁSTROJE AUTOMATIZOVANÉHO TESTOVÁNÍ.....	14
1.3 ZOBECNĚNÝ PRACOVNÍ POSTUP TESTOVÁNÍ	14
1.3.1 Testování v otevřené smyčce	15
1.3.2 Testování v uzavřené smyčce	16
1.4 VÝHODY AUTOMATIZOVANÉHO TESTOVÁNÍ.....	16
1.5 HMI TESTOVÁNÍ.....	16
2 ROBOTICKÝ MANIPULÁTOR PRO TESTOVÁNÍ.....	17
2.1 POHON MANIPULÁTORU.....	17
2.1.1 Krokový motor.....	17
2.1.2 AC servo pohon	20
2.1.3 Volba pohonu.....	20
2.2 ŘÍZENÍ MOTORŮ.....	23
2.2.1 Unipolární řízení	23
2.2.2 Bipolární řízení	23
2.2.3 Jednofázové a dvoufázové řízení	23
2.2.4 Drivery pro řízení.....	24
2.3 ELEKTRONICKÉ CHAPADLO	25
2.4 ŘÍDICÍ SYSTÉM MANIPULÁTORU	26
2.4.1 Požadavky na řídicí systém.....	27
2.4.2 PLC	27
2.4.3 NI Hardware	29
2.4.4 CNC řídicí deska.....	32
2.5 MECHANICKÁ KONSTRUKCE.....	35
2.6 ELEKTRICKÁ KONSTRUKCE.....	38
3 OCHRANNÁ OPATŘENÍ	40
3.1 MECHANICKÁ KONSTRUKCE.....	40
3.1.1 Přenos síly.....	40
3.1.2 Ztráta energie	40
3.1.3 Selhání součástí.....	40
3.1.4 Zdroj energie.....	41
3.2 ELEKTROMAGNETICKÁ KOMPATIBILITA – EMISIVITA.....	41
3.2.1 Rozdělení zařízení.....	41
3.2.2 Mezní hodnoty svorkového rušivého napětí	42
3.2.3 Mezní hodnoty elektromagnetického rušení šířeného zářením	43

3.2.4	Požadavky měření	43
3.2.5	Zatěžovací podmínky	44
3.2.6	Záznam výsledků	44
3.2.7	Posouzení vyhovění	45
3.3	ELEKTROMAGNETICKÁ KOMPATIBILITA – ODOLNOST	45
3.3.1	Funkční kritéria	46
3.3.2	Zkušební podmínky	47
3.3.3	Požadavky na měření	47
3.4	OVLÁDÁNÍ	47
3.4.1	Požadavky na ovládání	48
3.4.2	Ovládač spuštění	48
3.4.3	Zastavení robotu	49
4	ŘÍDÍCÍ SOFTWARE	50
4.1	CNC USB CONTROLLER	50
4.2	VÝVOJOVÉ ROZHRAŇÍ LABVIEW	50
4.2.1	Uživatelské rozhraní	50
4.2.2	Zdrojový kód	54
5	PARAMETRY MANIPULÁTORU	59
5.1	PŘESNOST	59
5.2	RYCHLOST POSUVU A ROZLIŠENÍ	65
5.3	PRACOVNÍ PROSTOR	67
5.4	POROVNÁNÍ MANIPULÁTORU S ROBOTEM UR5	67
ZÁVĚR	70	
SEZNAM LITERATURY A INFORMAČNÍCH ZDROJŮ	72	
PŘÍLOHY	74	
PŘÍLOHA A – ELEKTRICKÉ SCHÉMA ZAPOJENÍ MANIPULÁTORU	74	
PŘÍLOHA B – MĚŘENÍ PŘESNOSTI V OSE X	83	
PŘÍLOHA C – MĚŘENÍ PŘESNOSTI V OSE Y	84	
PŘÍLOHA D – MĚŘENÍ PŘESNOSTI V OSE Z	85	
PŘÍLOHA E – MĚŘENÍ PŘESNOSTI PŘI POSUVU VE VŠECH OSÁCH	86	
PŘÍLOHA F – UKÁZKA G-KÓDU	87	

Seznam zkratek

API	Application Programming Interface – rozhraní pro programování aplikací
CAN	Controller Area Network - sběrnice
CD	Compact Disc - kompaktní disk
CPU	Central Processing Unit – procesor
ECU	Electronic Control Unit - elektronická řídicí jednotka
HiL	Hardware in the Loop – hardware ve smyčce
HMI	Human Machine Interface – uživatelské rozhraní
HW	Hardware – fyzicky existující technické vybavení
IEC	International Electrotechnical Commission - Mezinárodní elektrotechnická komise
IP	Ingress Protection – stupeň krytí
IR	Infrared – infračervené záření
ISO	International Organization for Standardization - Mezinárodní organizace pro normalizaci
LPT	Line Printer Terminal – paralelní port
MPEe	Maximum Permissible Error for length measurement– maximální přípustná chyba pro měření délky
MPG	Manual pulse generator – manuální generátor pulsů
PCI	Peripheral Component Interconnect – sběrnice k připojení periférií
PLC	Programmable Logic Controller – programovatelný logický automat
RAM	Random Access Memory – typ elektronické paměti s náhodným přístupem
ROM	Read only Memory – typ elektronické paměti jen pro čtení
SD	Secure Digital – paměťová karta
SW	Software – programové vybavení
USB	Universal serial bus – univerzální sériová sběrnice

Seznam Symbolů

A	Ampér [proud]
Hz	Hertz [frekvence]
kg	Kilogram [hmotnost]
mm	Milimetr [délka]
m/s	Metr za sekundu [rychlost]
m/s²	Sekunda na minus druhou [zrychlení]
VA	Voltampér [zdánlivý výkon]
W	Watt [činný výkon]
V	Volt [napětí]
o	Obvod
R	Rozlišení systému
v	Rychlost

Úvod

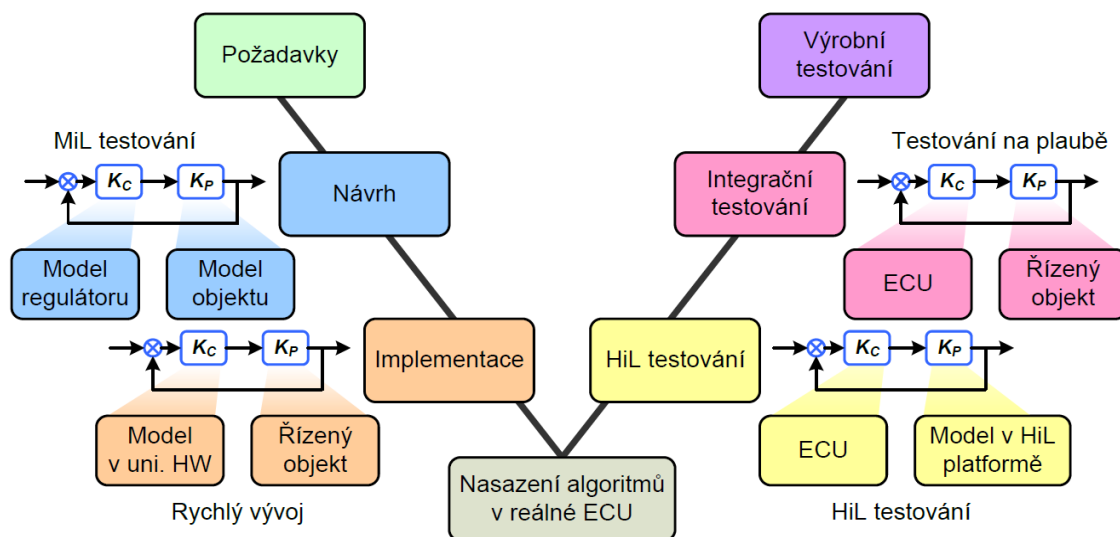
V současné době jde vývoj elektronických systémů velmi rychle dopředu, stejně tak ale musí jít s vývojem ruku v ruce testování těchto systémů z důvodu zefektivnění jednotlivých fází vývoje od počátku až po předání koncovému zákazníkovi. Proto je potřeba co nejvíce automatizovat toto testování, aby se ověřila funkčnost zařízení dle požadavků zákazníka a dle norem. Automatizované testování je rychlejší, přesnější a především odstraňuje chyby způsobené lidským faktorem. Je zde také možnost opakování testů za naprosto stejných podmínek.

Práce je zaměřena na testování elektronických řídicích jednotek s uživatelským rozhraním při použití robotického zařízení k automatizované stimulaci elektronických řídicích jednotek (ECU). Cílem práce bylo vybrat vhodné komponenty pro robotický manipulátor a implementovat vhodné řízení, aby bylo možné ovládat manipulátor z uživatelského rozhraní nebo z nástrojů pro automatizované testování, následně dosažené parametry robotizovaného testovacího stavu zhodnotit.

1 Automatizované testování řídicích jednotek

Testování řídicích jednotek je soubor činností obsahující simulaci vstupů a sledování výstupů, reakce a vzájemné interakce, simulování a vkládání chybových stavů. To vše musí probíhat automatizovaně, aby se předešlo chybám způsobeným lidským faktorem a zároveň se zkrátil čas testování.

Testování se využívá především při vývoji elektronických řídicích systémů, kdy se vývoj řídí jedním z modelů vývoje. Nejčastěji se při vývoji využívá V-diagram modelu, kde vodorovná osa vyjadřuje časovou osu a svislá osa vyjadřuje, v jaké fázi se vývoj nachází [1, 2]. V-diagram lze vidět na Obr. 1.1



Obr. 1.1 Proces vývoje při použití V-diagram modelu (převzato z [2])

Automatizované testování musí obsahovat systém, který je tvořen řídicím počítačem a jednoho nebo více programovatelných zařízení. Počítač slouží k běhu nástrojů pro automatizované testování, k řízení a vyhodnocení testů (zaznamenává data, tvoří protokoly, ...). Uživatelská obsluha je potřeba pouze k nastavení a naprogramování testovacího stavu.

1.1 Cíl testování

Cílem testování je ověřit funkčnost a bezporuchový chod zařízení ve všech jeho stavech, resp. zjistit, zda je někde problém. Testy musí být specifikovány tak, aby dokázaly odhalit chyby, ze kterých lze následně zjistit jejich příčinu. V případě nalezení chyby musí dojít

k opravě a poté opět k otestování a takto stále dokola až do doby, kdy zařízení testem projde bez zjištěné chyby. K chybě může dojít vlivem špatné testovací sekvence (špatně napsaný nebo specifikovaný test anebo špatné vyhodnocení výsledků), vlivem zmetkové výroby, nebo špatným návrhem zařízení [1, 2].

1.2 Nástroje automatizovaného testování

Řídicí jednotka (ECU) by měla být vždy otestována v simulaci před tím, než dojde k testování přímo v zařízení/na vozidle, jedná se o testování Hardware in the Loop. Během vývoje je toto testování vyžadováno výrobcí, pokud je testována pouze jedna řídicí jednotka, jedná se o komponentní testy. V případě, že výrobce konstruuje složitější systém, kdy spolupracuje několik řídicích jednotek, tak se ověřuje jejich funkce, komunikace i spolupráce a jednotky jsou při testování fyzicky propojeny, tak se jedná o integrační testy. Propojené ECU jsou v tomto případě označeny za device under test (DUT), neboli testované zařízení.

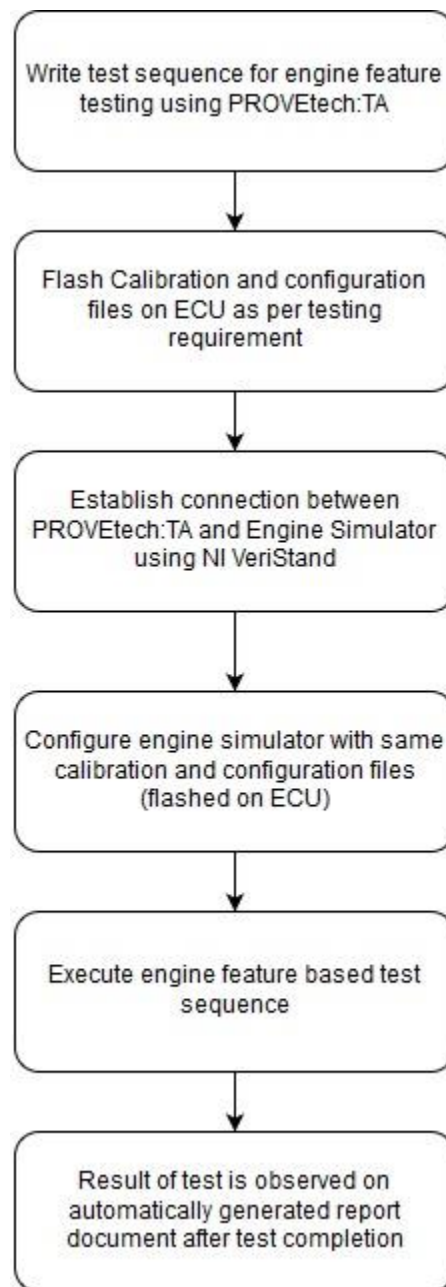
K zprovoznění simulace a tím pádem k testování je nezbytně nutný software pro vytvoření modelu ať už spojitých nebo diskrétních systémů a tím je Matlab, potažmo Simulink, kdy je model popsán programovacím jazykem nebo graficky, jako alternativu lze také použít SciLab-Xcos, což je opensource náhrada Matlabu.

Pro psaní testových sekvencí slouží nástroj PROVEtech:TA, nebo například NI TestStand, který podporuje propojení s real-time enginem NI VeriStand, případně PROVEtech:RE, skrz které posílá příkazy (např. CAN zprávy s jinou hodnotou signálu) připojené ECU. PROVEtech:TA vyčítá odezvy signálů z jednotky a dokáže je porovnat s nastavenou hodnotou, z tohoto porovnání vyplývá výsledek úspěch - „Pass“ nebo neúspěch - „Fail“, což je vypsáno do výsledkové listiny, tzv. reportu/protokolu. Další z možností je software EXAM od společnosti Micronova, kdy se jedná o graficky orientované prostředí. Tento software je bez knihoven volně ke stažení a použití [3].

1.3 Zobecněný pracovní postup testování

Nástroje automatizovaného testování mohou testovat ve dvou stavech – v otevřené nebo uzavřené smyčce (Open/Closed Loop Testing). Testová sekvence tvoří zkušební prostředí pro řídicí jednotku, např. motoru, která obsahuje otáčky motoru, rychlost vozidla, teplotu chladicí

kapaliny, tlak oleje, výstup lambda sondy, zařazený rychlostní stupeň, polohu plynového pedálu a další [3].



Obr. 1.2 Zobecněný postup automatizovaného testování (upraveno a převzato z [3])

1.3.1 Testování v otevřené smyčce

V otevřené smyčce je prostředí vytvořeno nastavením vstupů jednotce, bez snímání výstupů. Například za normálního stavu u vozidla jsou otáčky motoru závislé na poloze plynového pedálu, při testování v otevřené smyčce tomu ale tak není, protože tam není zpětná vazba [3].

1.3.2 Testování v uzavřené smyčce

V uzavřené smyčce je brána v úvahu zpětná vazba, systém je uzavřený a lze testovat závislost vstupních a výstupních signálů. Např. poloha plynového pedálu ovlivňuje otáčky motoru v simulaci [3].

1.4 Výhody automatizovaného testování

Použití automatizovaného testování šetří čas a zároveň vytváří dokumentaci o testování. Simulace softwarových funkcí, například motoru, dokáže detekovat logické chyby v softwaru v raných fázích vývoje. Zkušební sekvence pro ECU mohou být vytvořeny a použity pro otestování různých platforem jednotek se stejnou logikou [3].

Tab. 1.1 Srovnání testovacích metod pro otestování deaktivace tempomatu (převzato z [3])

Testovací metoda	Požadovaný čas (přibližný)
Manuální testování	8 hodin
Automatizované testování	5 minut

1.5 HMI testování

Některé řídicí jednotky disponují uživatelským rozhraním, které nelze elektricky stimulovat, například u multimediálního systému to může být CD nebo Flash disk, nebo případně bezkontaktní klíč. Tyto ECU mají tzv. Human Machine Interface (HMI), Případně výrobce zařízení chce otestovat řídicí jednotku v opravdu reálné situaci. Takže v těchto případech se tedy testů musí zúčastnit opravdu osoba anebo se využívá testovací stav s robotickým zařízením, který dokáže nasimulovat lidskou interakci. Vložení CD, změna hlasitosti, přiblížení „ruky“ před multimediální systém a další.

Přesně pro toto testování se využívají robotické testovací stavy, vybavené většinou i rozpoznáváním obrazu pro validaci testů.

2 Robotický manipulátor pro testování

Na základě mechanické konstrukce založené na bázi hliníkových profilů, lineárních vedení, kuličkového šroubu a řemenu bylo nutné zvolit vhodný typ motorů a řízení. Konstrukci již i s vizualizací elektrických částí lze vidět na obrázku Obr. 2.15.

2.1 Pohon manipulátoru

Vzhledem ke konstrukci založené na kartézské soustavě – pohyb v osách X, Y, Z bylo nutné zvolit vhodné motory. Standardně se pro menší zařízení jako 3D tiskárny a malé CNC stroje využívá krokových motorů. Pro robustnější systémy, kde je nutné dosahovat větších sil a spolehlivosti, se používá AC servomotorů se zpětnou vazbou, které jsou však násobně dražší.

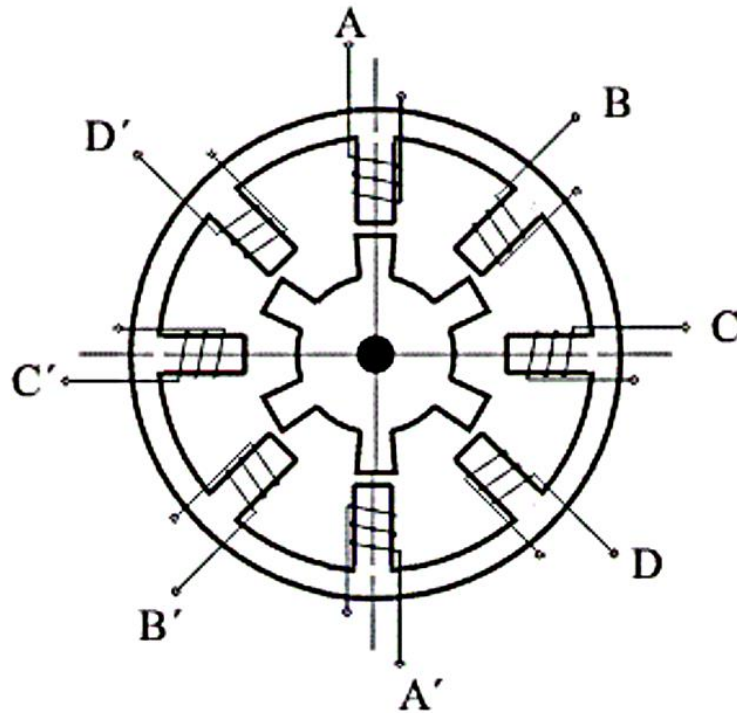
2.1.1 Krokový motor

Jedná se o synchronní točivý stroj, který je relativně jednoduchý na řízení a umí přesně nastavit svoji polohu, čehož se právě využívá u CNC strojů a souřadnicových zapisovačů. V případě, že motor nepřetížíme, není nutné mít na motoru zpětnou vazbu, stačí pouze počítat počet kroků, které jsme do motoru poslali, a podle počtu kroků na otáčku dopočítat o kolik se motor otočil, takže pro precizní řízení rychlosti není potřeba PID regulátor[4–6].

Nevýhodou krokových motorů je, při přetížení a při dynamických změnách, ztráta kroku, při pomalém pohybu nespojitě otáčení a trvalý odběr proudu, i když se motor netočí [4–6].

Ztrátu kroku lze vyřešit dostatečným dimenzováním motoru anebo přidáním rotačního optického enkodéru, který poskytuje driveru zpětnou vazbu tvořenou pulzou z optického čidla a dává informaci driveru o směru otáčení a rychlosti otáčení motoru [4, 5].

Krokové motory jsou standardně osazeny rotorem s vyniklými póly, buzení obstarávají permanentní magnety nebo magneticky měkký materiál. Rotace motoru se řeší pomocí přepínání cívek na statoru, kdy póly rotoru se vždy natočí tak, aby vzduchová mezera mezi cívkou a vyniklým pólem byla co nejmenší. Běžně prodávané krokové motory mají 200 kroků na otáčku, což znamená, že se dokáží s plným krokem otočit na jeden krok o $1,8^\circ$. Tento krok však ve většině aplikací nestačí, takže lze kroky ještě dělit pomocí PWM modulace. Kroky se dělí mocninou dvou (2,4,8,16, ...), toto dělení se nazývá mikro-krokování [4, 5, 7].



Obr. 2.1 Schématické zobrazení uspořádání krokového motoru (převzato z [4])

Na obrázku Obr. 2.1 je vidět, že pro otáčení rotoru ve směru hodinových ručiček se musí napájet cívky v opačném směru [4].

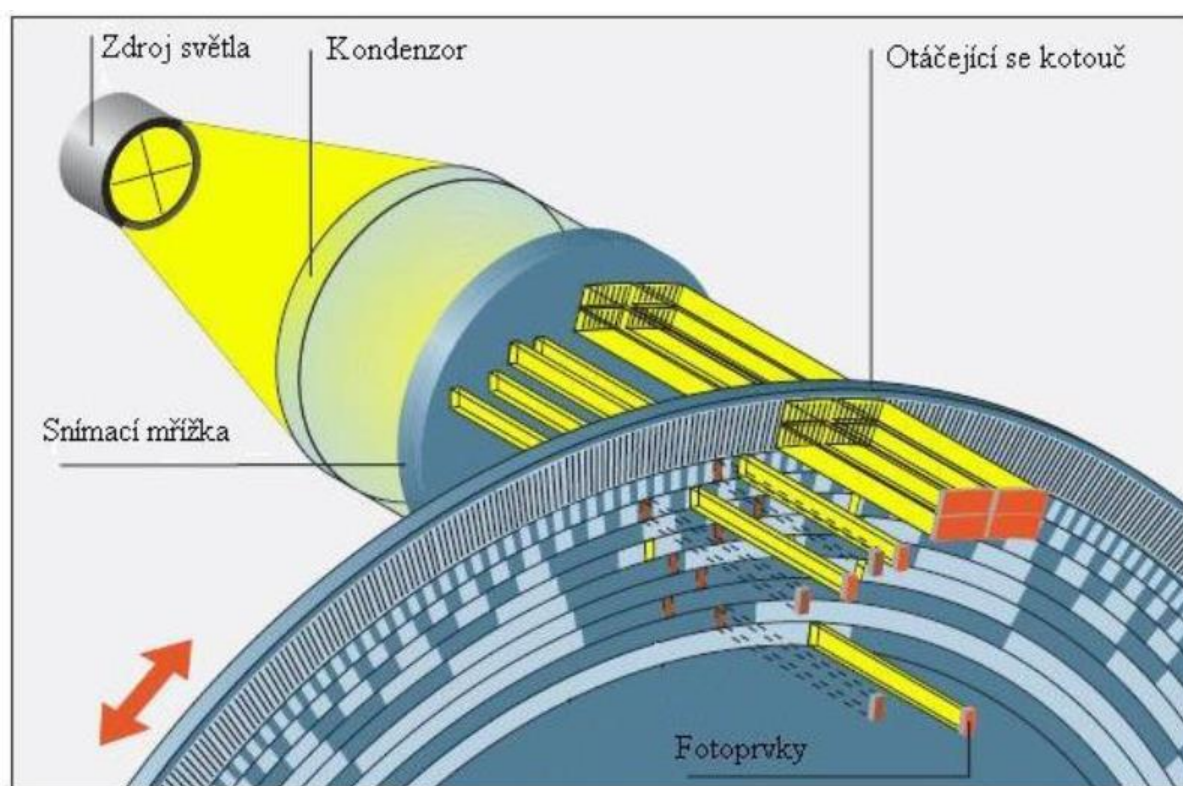
Enkodéry

Enkodéry jsou senzory určené k snímání polohy, rychlosti a zrychlení a slouží k regulaci pohybu a polohy motoru. Mají kompaktní velikost a jsou přímo napojeny na osu motoru, případně lze použít i externí senzory, ale zde je nutné kalibrovat otáčky enkodéru s otáčkami motoru. Nejčastěji se využívá inkrementálních senzorů, kde jejich název vychází z jejich principu. Uvnitř senzoru je rotační disk a snímá se přítomnost a absence materiálu, případně přechod z bílé barvy na černou [8, 9].

Čidla lze dělit dle fyzikálních principů na:

- Mechanické - obsahuje kontakty, které se spojují a rozpojují
- Optické – princip optické brány, kde se přerušuje světelný tok dle clony
- Magnetické – využití Halovo jevu
- Kapacitní – využití změny kapacity mezi dvěma elektrodami

Nejčastěji používaný senzor je inkrementální optoelektronický, kde je využit disk se světlo propustným a nepropustným materiálem, který se střídá. V těchto senzorech je využit jako zdroj světla většinou LED a jako detektor je fototranzistor. Kotouč mívá dvě řady mřížek, které jsou vůči sobě posunuté, postupným otáčením dochází k clonění jednoho nebo druhého detektoru, což na tranzistoru generuje trojúhelníkový signál, který se pomocí Schmidtova trigeru transformuje na obdélníkový signál. Díky posunu mřížky za pomoci detekce náběžných hran signálů z detektoru lze určit směr otáčení a také úhel pootočení s 4x větší přesností než je rozlišení mřížky, v případě rozlišení frekvence generovaného obdélníkového signálu lze určit také úhlovou rychlost [8, 9].



Obr. 2.2 Princip absolutního optoelektronického snímače (převzato z [9])

U absolutního enkodéru má rotační disk, neboli otáčející se kotouč, na sobě po obvodu několik mřížek s různou hustotou drážkování, jak lze vidět na Obr. 2.2. Podle počtu těchto vrstev je dána přesnost senzoru. Kombinací procházejícího světla těmito vrstvami lze určit přesnou polohu motoru, aniž bychom museli s motorem pohnout.

2.1.2 AC servo pohon

Servo pohony jsou synchronní motory s permanentním magnetem, většinou do výkonu 10 kW, které jsou tvořeny ze vzácných materiálů na bázi vzácných zemin. Díky permanentním magnetům není nutný přídavný budící zdroj proudu. Motor disponuje vysokou účinností, tím pádem nemusí mít tak velké rozměry, je to způsobeno tím, že neodebírá magnetizační proud a také proto, že nevznikají ztráty v budícím vinutí ani v rotorové kleci, jako je tomu u asynchronních motorů [10].

Nevýhodou těchto motorů je nutnost použití frekvenčního měniče, který disponuje speciálním softwarem určeným pro řízení synchronního motoru s permanentními magnety. Rozhodující parametry tohoto pohonu je přesnost polohy a vysoká dynamika, ale nižší účinnost [10].

U volby konkrétního pohonu je nutné si také zvolit, zda je rozhodujícím parametrem vysoká dynamika pohonu a nízká setrvačnost nebo nízká dynamika, ale vysoká setrvačnost [10].

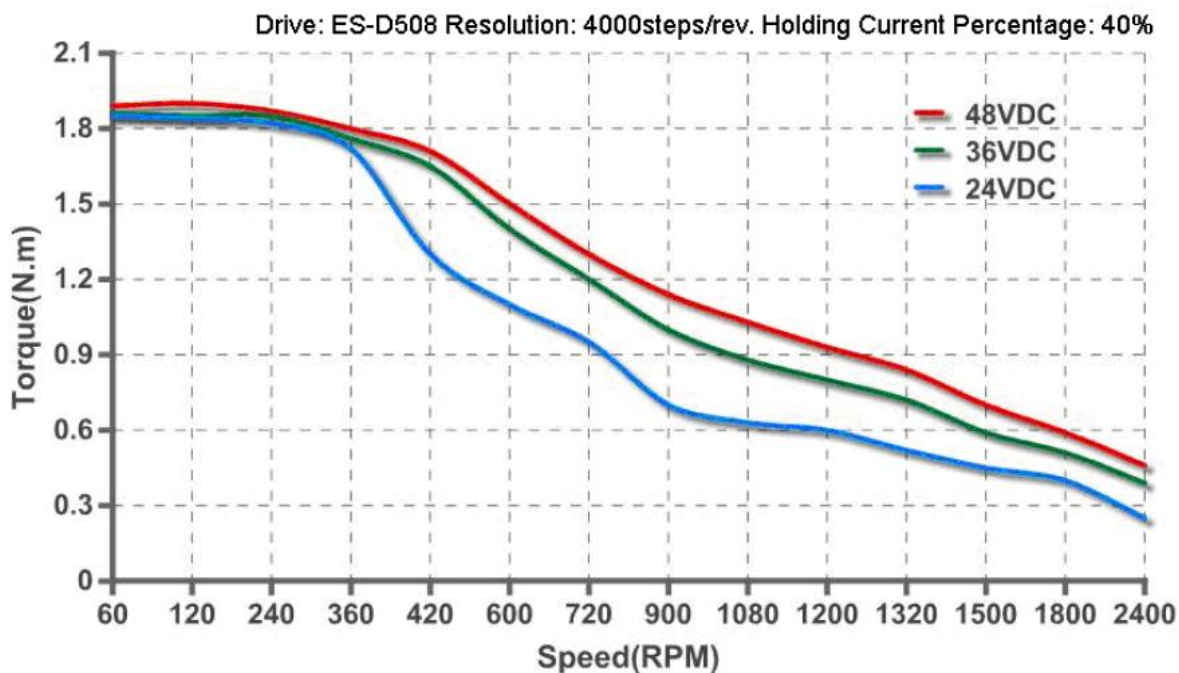
2.1.3 Volba pohonu

Jako ideální řešení byl zvolen krokový motor, jelikož je levný a lze ho relativně snadno řídit a přesně nastavit polohu i rychlost, zároveň však není potřeba velké síly, vzhledem k použití na stimulaci ECU.

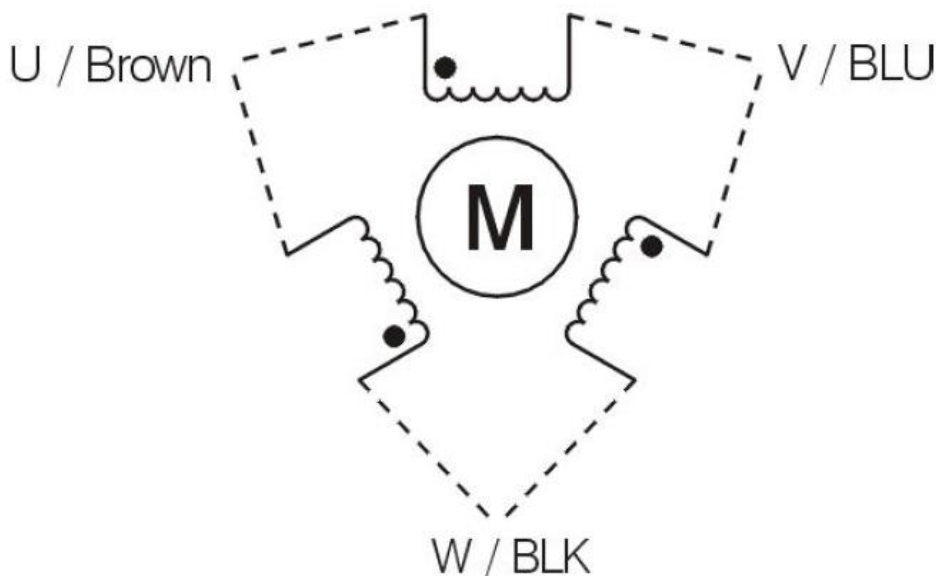
Pro pohon osy Z byl zvolen motor s enkodérem Leadshine ES-M32320 s parametry, které byly uvedeny v tabulce Tab. 2.1 a na obrázku Obr. 2.2.

Tab. 2.1 Parametry motoru Leadshine ES-M32320 (převzato z [11])

Cívky	3
Krok [°]	1,2
Fáze	3
Moment [Nm]	2
Maximální proudový odběr [A]	5,8
Ø hřídele [mm]	8
Rozměry [mm]	57x57x105
Rozlišení endodéru [pulzů/otáčka]	1000



Obr. 2.2 Graf krouticího momentu ES-M32320 v závislosti na napětí a ot. (převzato z [12])

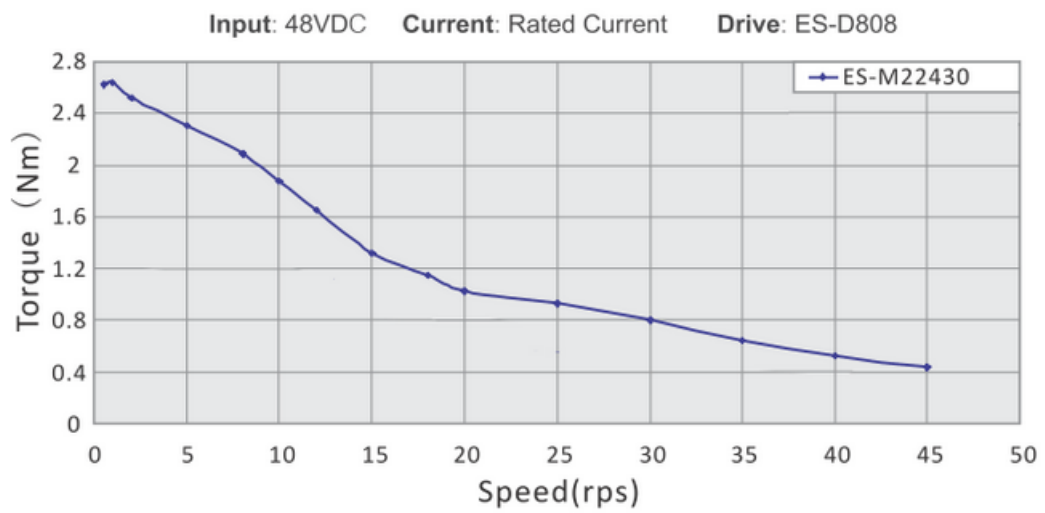


Obr. 2.3 Zapojení motoru Leadshine ES-M32320 (převzato z [12])

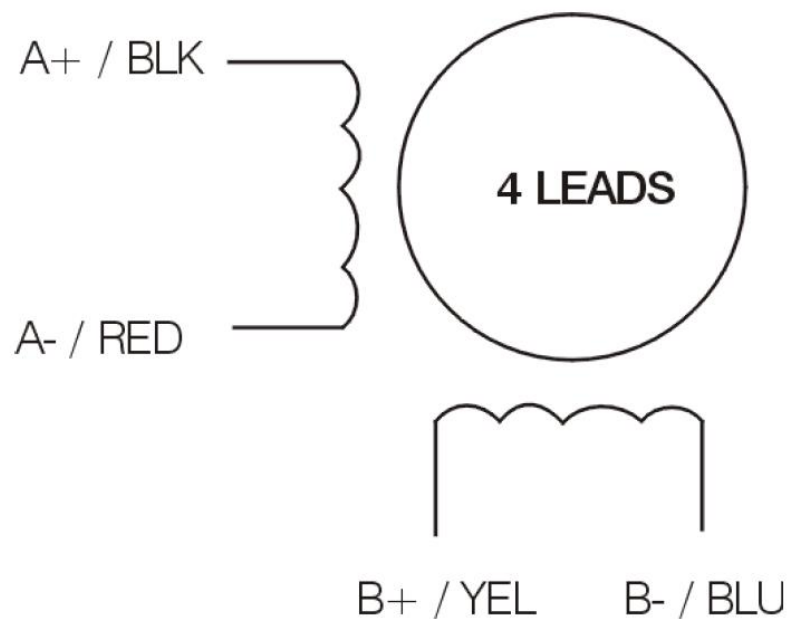
Pro osy X a Y byly zvoleny dva totožné motory Leadshine ES-M22430. K volbě stejných motorů došlo především z důvodu, že mechanická konstrukce je založena na kooperaci motorů, posuv v osách X a Y probíhá pomocí jednoho řemene. Výhodou tohoto řešení je umístění obou motorů na hlavní konstrukci a z toho vyplývají nižší dynamické síly na pohyblivých částích. Parametry motorů lze vidět v tabulce Tab. 2.2 a na obrázku Obr. 2.4.

Tab. 2.2 Parametry motoru Leadshine ES-M22430 (převzato z [11])

Cívky	2
Krok [°]	1,8
Fáze	4
Moment [Nm]	3
Maximální proudový odběr [A]	3
∅ hřídele [mm]	8
Rozměry [mm]	60x60x104
Rozlišení endodéru [pulzů/otáčka]	1000



Obr. 2.4 Graf krouticího momentu ES-M322430 v závislosti na ot. (převzato z [12])



Obr. 2.5 Zapojení motoru Leadshine ES-M22430 (převzato z [12])

2.2 Řízení motorů

Krokové motory lze řídit dvěma způsoby a to unipolárním a bipolárním řízením. Zde záleží, zda je napájena vždy pouze jedna nebo dvě cívky v jeden okamžik. O obsluhu cívek se stará driver k tomu určený, který ze signálů generovaných řídicím modulem generuje pulzy STEP, DIR a ENABLE, což jsou pulzy typické pro krokové motory, kdy pulz STEP znamená posuv o jeden krok ve směru, který určuje signál DIR logickou jedničkou nebo nulou. Signál ENABLE slouží k povolení chodu motoru.

2.2.1 Unipolární řízení

Při použití unipolárního řízení motor poskytně nejmenší odběr, ale také má nejmenší krouticí moment. U unipolárního zapojení je napájena vždy pouze jedna cívka a k zprovoznění potřebuje pouze jeden tranzistor a diodu na jednu cívku. Motory s unipolárním buzením mají nižší odběr, ale i krouticí moment [5, 6].

2.2.2 Bipolární řízení

V případě bipolárního řízení prochází proud vždy dvěma protilehlými cívkami, které jsou orientovány opačně, takže magnetický tok působí v jednom směru, motor má větší krouticí moment, ale zároveň i vyšší spotřebu. Pro integraci řízení je potřeba použít H-můstek pro každou větev, který lze vidět na obrázku Obr. 2.6 [5, 6].

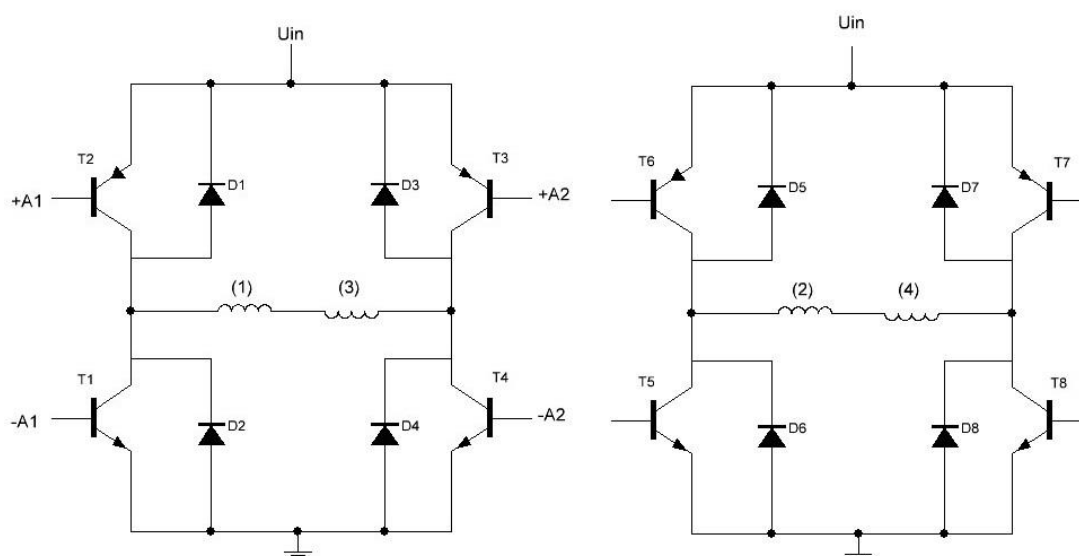
2.2.3 Jednofázové a dvoufázové řízení

Motory s jednofázovým řízením generují magnetické pole pouze jednou cívkou, v případě bipolárního řízení se tvoří magnetické pole pomocí dvou cívek.

Dvoufázové řízení motoru generuje magnetické pole vždy za pomoci dvou sousedících cívek, které jsou shodně orientované. Dosahuje se tím vyšších krouticích momentů, ale zároveň dvojnásobné spotřeby motoru [5, 6].

Řízení jednofázové a dvoufázové se využívá pro 4 a 8taktní řízení. U 4taktního řízení se jedná o takzvané řízení s plným krokem, což znamená, že jedna otáčka motoru má přesně tolik kroků, jako je počet zubů statoru daného krokového motoru. 8taktní řízení má poloviční

krok díky tomu je motor také dvojnásobně přesný. Využívá se zde toho, že se střídá krok s jednofázovým a dvoufázovým řízením [6].



Obr. 2.6 Dvojitý H-můstek pro buzení krokového motoru (převzato a upraveno z [13])

2.2.4 Drivery pro řízení

Pro řízení krokového motoru v ose Z byl zvolen již hotový výrobek Leadshire ES-508D, který potřebuje vstupní napájecí napětí v rozmezí 20 až 50 V, dokáže rozlišit vstupní pulzy s frekvencí až 200 kHz, výstupní proud se může pohybovat v rozmezí od 0,5 do 8 A. Schématické zapojení driveru a motoru je zobrazeno na obrázku Obr. 2.7 [11].

Pro osy X a Y byly zvoleny drivery Leadshire ES-808D, které dokáží pracovat s napětím 24 až 80 V a rozlišovací frekvence je také 200 kHz a maximální výstupní proud je 8,2 A [11].

Oba dva typy driverů disponují LED indikací chybových stavů, jako je proudové přetížení, přepětí, chybu polohy motoru a jsou vybaveny možností nastavení mikro-krokování. Drivery disponují také programovacím rozhraním RS232, které slouží k detailní konfiguraci.

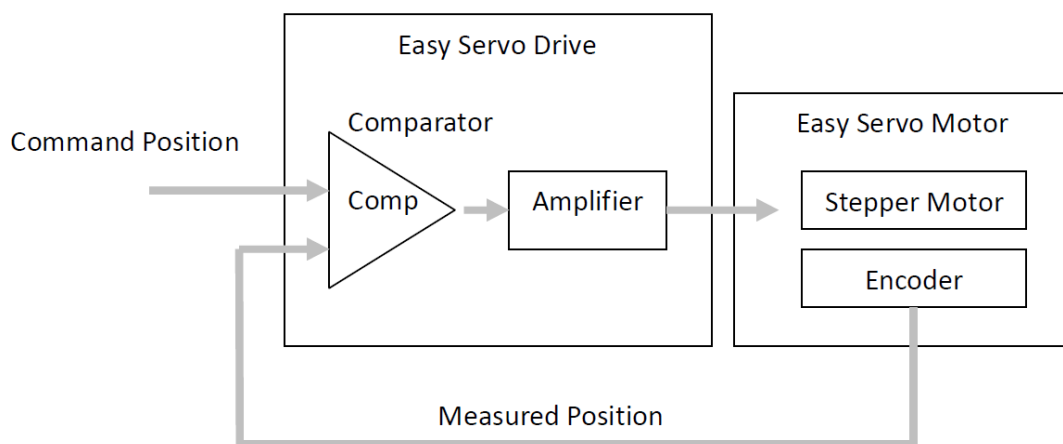
Pro programování byl použit software ES Pro Tuner, který je přímo od výrobce Leadshire. V tomto rozhraní je možné nastavit parametry PID regulátoru, maximální rychlost motoru, akceleraci, interval mezi změnou rotace, idle current, způsob řízení PUL/DIR nebo CW/CCW a další. V softwaru je možné také v případě poruchy driveru nebo motoru spustit self-test a sledovat chyby.

Nastavení PID regulátoru

Proporcionální složka K_p určuje odezvu systému na chyby polohy. Nízká proporcionální složka zajistí, že systém je stabilní, ale má za následek velkou chybu polohy. Naopak vysoká složka K_p způsobuje oscilace a nestabilitu [12].

Integrační složka K_i pomáhá řídicímu systému překonat statické chyby, které jsou způsobené například třením nebo zatížením. Integrátor zvyšuje výstupní hodnotu jako funkci součtu chyby polohy v průběhu času. Nízká, nebo nulová hodnota K_i může způsobit chybu polohy v klidovém stavu (závisí na statickém nebo třecím zatížení a K_p), naopak vysoká hodnota K_i může způsobit kmitání o nízké frekvenci okolo požadované pozice [12].

Derivační složka K_d poskytuje tlumení úpravou výstupní hodnoty jako funkce rychlosti změny chyb. Nízká hodnota způsobuje velmi malé tlumení, což může způsobit překmit po změně hodnoty. Velká hodnota způsobuje pomalejší odezvu na krok, ale zároveň umožní nastavit vyšší K_p bez toho, aniž by došlo k oscilaci [12].



Obr. 2.7 Schématické zapojení a funkce driveru a motoru (převzato z [12])

2.3 Elektronické chapadlo

Nedílnou součástí manipulátoru je chapadlo, které slouží k uchopování nástrojů pro automatizované testování. Při testování HMI je většinou potřeba simulovat lidský dotek prstem, což je jeden z nástrojů, další nástroje mohou být spjaty s konkrétní ECU, jako například nástroj pro vysunutí/zasunutí SD karty a podobně.

Výběr chapadla byl velmi zúžen podmínkou, že chapadlo musí být plně elektronické, jelikož bylo nežádoucí k systému přidávat ještě rozvod vzduchu a kompresor. Jako výhoda, ale ne podmínka pro chapadlo bylo snímání síly, kterou prsty vyvíjí. Samozřejmě cena a parametry, jako jsou přesnost a konektivita, byly také zahrnuty do výběru.

Tab. 2.3 Tabulka srovnání parametrů chapadel [14, 15])

	Schunk	SMC
Zdvih na čelist [mm]	32	32
Min. uchopovací síla [N]	5	11
Permanentní síla uchycení [N]	20	28
Doporučená váha nástroje [kg]	0,1	-
Max. přípustná délka prstu [mm]	40	-
Opakovatelnost pohybu [mm]	± 0,03	± 0,05
Maximální rychlost [mm/s]	250	-
Maximální akcelerace [mm/s ²]	3500	-
Hmotnost [kg]	0,32	-
Minimální teplota okolí [°C]	5	5
Maximální teplota okolí [°C]	50	40
Stupeň krytí IP	20	-
Jmenovité napětí [V DC]	24	24
Jmenovitý proud [A]	0,3	1,17
Maximální proud [A]	0,7	2,37
Řídicí elektronika	integrována	LECP6 - externí
Komunikační rozhraní	Ethernet TCP/IP	RS485
Rozhraní pro nastavení	Ethernet TCP/IP	RS485
Cena [Kč]	45 000	31 000

Dle uvedených kritérií byl nakonec vybrán přesnější gripper od společnosti Schunk i navzdory vyšší ceně. Toto chapadlo vyhrálo díky přesnosti, konektivitě přes Ethernet, snímání síly a také díky tomu, že řídicí elektronika je plně integrována. Ceny uvedené v tabulce jsou bez DPH a po započítání poskytnuté slevy, která činila v případě Schunk gripperu téměř 30%, v případě SMC 15%.

2.4 Řídicí systém manipulátoru

Řídicí systémy jsou hlavní částí všech robotických pracovišť, na jejich spolehlivosti, rychlosti zpracování dat a přesnosti závisí kvalita celého zařízení. Systémů, ze kterých lze robotický manipulátor ovládat, je na trhu mnoho, zde je shrnut užší výběr, který je detailněji popsán. Veškeré uvedené ceny uvedené v této kapitole jsou beze slev a bez DPH.

2.4.1 Požadavky na řídicí systém

Z mechanické konstrukce vyplynuly následující požadavky na řídicí systém:

1. Řízení minimálně tří krokových motorů/tří driverů (do budoucna možnost připojení 4. rotační osy)
2. Digitální vstupy (6x senzor polohy, E-stop)
3. Ethernet rozhraní pro řízení chapadla, nebo sběrnice ModBus v případě použití levnější alternativy chapadla bez senzoru síly.

2.4.2 PLC

První z řídicích systémů pro manipulátor je průmyslové PLC, které se využívá v současné době jako centrální řízení u regulačních a řídicích systémů, nebo k předzpracování signálů pro nadřazení ovládací a vizualizační systému, převážně tvořené klasickým nebo průmyslovým PC. PLC je průmyslové provedení PC s mikroprocesorem a vlastním operačním systémem, který je přizpůsobený pro potřeby automatizace úloh v reálném čase s co nejmenší časovou odezvou.

PLC jsou vybaveny vstupními a výstupními periferiemi, ke kterým lze zapojit snímače, senzory a tlačítka a lze tam zpracovat jak digitální tak i analogové signály. Výstupní periferie slouží k řízení akčních členů, v našem případě motorů a elektronického chapadla. Mimo klasických periferií disponují PLC také komunikačním rozhraním, většinou se jedná o průmyslovou sběrnici pro komunikaci s ostatními zařízeními, jako je např. RS232, EtherCat, ProfiBus, ModBus, ProfiBus, Profinet a další. Pro komunikaci s PC a programování PLC, případně připojení uživatelského rozhraní slouží většinou rozhraní USB nebo Ethernet [16].

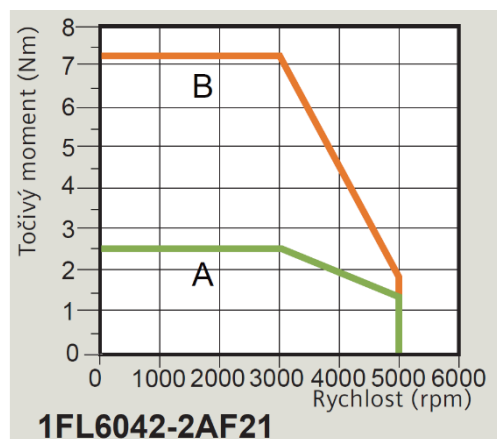
Siemens

Jeden z obrovského množství výrobců PLC a automatizační techniky je společnost Siemens. Z nabídky tohoto výrobce byla vybrána sestava s rozšiřujícími moduly a bezpečnostním relé, konkrétně CPU S7-1200.

Parametry PLC S7-1200:

- 14 digitálních vstupů
- 10 digitálních výstupů
- 2 analogové vstupy
- Komunikační port Ethernet, Profinet, UDP

Digitální vstupy lze použít pro zapojení indukčních snímačů a signálu E-STOP, zapojené přes bezpečnostní relé. Napájení PLC obstarává 24 V zdroj, pro pohon os byl zde zvolen AC servo pohon a drivery přímo od dodavatele Siemens. Řízení chapadla lze v tomto případě realizovat přes rozšiřující modul RS422/485 pomocí protokolu MODBUS. Pohon všech tří os obstarávají drivery připojené k PLC přes sběrnici PROFINET, s napájením 230V a příkonem 0,75kW. Motory byly zvoleny s nízkou setrvačností a vysokou dynamikou, jelikož pro tuto aplikaci, stimulaci tlačítek, je toto řešení lepší. Graf momentu je vyznačen zelenou křivkou na obrázku Obr. 2.8 Motor má již v základu ochranu IP65 a integrovaný absolutní enkodér s rozlišením 21 bitů.



Obr. 2.8 Graf kroučícího momentu motoru Siemens (převzato z [17])

Tab. 2.4 Komponenty a ceny řídicího systému na bázi PLC Siemens (převzato z [17])

Controller				
Part Number	Model	Description	Quantity	Price [Kč]
6ES7214-1AG40-0XB0	Simatics S7 – 1200 CPU 1214C	DC/DC/DC, 4xDO 100 kHz/6xDO 30kHz/14xDI/2xAI	1	8 741
s6EP1334-1LB00	SITOP PSU100L	Stabilized power supply input: 120/230V AC, output: DC 24V/10A	1	8 269
			Subtotal:	17 010
Modules				
6SL3210-5FB10-8UF0	SINAMICS V90	Motor driver, power input: 230V 1AC/3AC, size: FSC	3	13 974
6FX3002-5CK01-1AD0	SINAMICS V90	Power cable, lenght: 3 m	3	1 005
6FX3002-2CT20-1AD0	SINAMICS V90	Absolut sensor cable, lenght: 3 m	3	1 492
6ES7241-1CH32-0XB0	CM 1241	Communication module CM 1241, RS 422/485	1	3 004
			Subtotal:	52417
Motor				
1FL6042-2AF21-1MA1	SIMOTICS 1FL6	0,75 kW, 2,39 Nm, 3000 rpm, axes size 40 mm, low moment of inertia	3	10 661
			Subtotal:	31983
			Total:	101 410

Výhodou tohoto řídicího systému je průmyslový standard, který PLC splňuje, a zároveň vysoká přesnost, spolehlivost pohonu a velmi dobré dynamické hodnoty pohonu. Nevýhodou je cena, která je však nižší než v případě National Instruments (NI) a to i navzdory tomu, že do kalkulace byly zahrnuty drivery a motory.

2.4.3 NI Hardware

National Instruments disponuje velkou modularitou systémů ke zpracování dat a řízení. Byla zvažována dvě možná řešení, jedno založené na PXI platformě a druhé na cRIO platformě.

cRIO platforma

Tato platforma je vybavena řadou vestavěných řadičů se dvěma procesními cíli. První cíl je komunikace a zpracování v reálném čase, jež obstarává procesor zařízení a druhý cíl je programovatelná FPGA s vlastním časováním a během přímo na hardwaru, která slouží k vysokorychlostnímu řízení. K této platformě lze připojit bloky s analogovými i digitálními I/O, drivery pro motory, jednotku pro zpracování obrazu, rozšiřující bloky s průmyslovými sběrnici a displeje sloužící pro uživatelské rozhraní [18].

Tab. 2.5 Komponenty a ceny řídicího systému na bázi cRIO (převzato z [18])

Integrated Controller and Chassis				
Part Number	Model	Description	Quantity	Price [Kč]
785624-01	NI cRIO-9040	cRIO-9040, 1.3 GHz Dual-Core, 70T	1	71 300
		FPGA, RT, 4-Slot, Non-XT		
		STANDARD REPAIR COVERAGE	1	
781093-01	NI PS-15 Power Supply	NI PS-15 Power Supply, 24 VDC, 5 A,	1	6 470
		100-120/200-240 VAC Input		
		STANDARD REPAIR COVERAGE	1	
Subtotal:				77 770
Modules				
781030-01	NI 9375 with Dsub	NI 9375 D-SUB, 16-ch DI, 16-ch DO,	1	14 170
		DI/DO C Series Module		
		STANDARD REPAIR COVERAGE	1	
781503-01	NI 9923 Front-mount D-SUB to screw terminals	NI 9923 Front-mount terminal block for 37-pin D-Sub Modules	1	3 905
779944-01	NI 9512	NI 9512 1 Axis Stepper Drive Interface	3	15 400
		w/Encoder Feedback		
		STANDARD REPAIR COVERAGE	3	
Subtotal:				64 275
Services				
SRV-CR5674851	Standard Services	STANDARD SERVICE PROGRAM FOR COMPACTRIO SYSTEMS	1	10 424
Subtotal:				10 424
Total:				152 469

Pro systém manipulátoru byla vybrána sestava komponent v „low cost“ variantě, základ tvoří kontrolér s dvoujádrovým procesorem Intel Atom taktovaným na 1,3 GHz, FPGA Kinex-7 a napájecí zdroj. Zařízení disponuje rozráním Gigabit Ethernet, USB 3.1, RS232 a RS485 a má 4 sloty pro rozšiřující karty. Pro snímání sensorů a tlačítek byla použita karta s 16 digitálními výstupy a 16 digitálními vstupy. Pro řízení motorů byly vybrány 3 karty pro ovládání krokových motorů a snímání polohy z enkodérů. Pro ovládání chapadla bylo nutné zakoupit Ethernetový switch, který nebyl zahrnut do ceny. Nevýhoda tohoto systému je především cena, ačkoliv byly vybrány jedny z nejlevnějších komponent, a také nemožnost dále rozšiřovat počet pohyblivých os, to by bylo možné v případě použití výkonnějšího kontroléru s více sloty, což by negativně ovlivnilo cenu.

PXI platforma

PXI je počítačová platforma pro systémy měření a automatizace s modulárním pouzdem. PXI kostra disponuje napájením, chlazením i komunikační sběrnici PCI nebo PCI Express a je dostupná v mnoha konfiguracích. K volbě je počet slotů od 4 do 18, které lze osadit kartami

s analogovými i digitálními vstupy i výstupy, průmyslovými sběrnici, čítači, časovači, multimetry, signálovými analyzátory, osciloskopy, frame grabbery, drivery pro motory, FPGA kartami, signálovými generátory a dalšími [18].

Tab. 2.6 Komponenty a ceny řídicího systému na bázi PXI (převzato z [18])

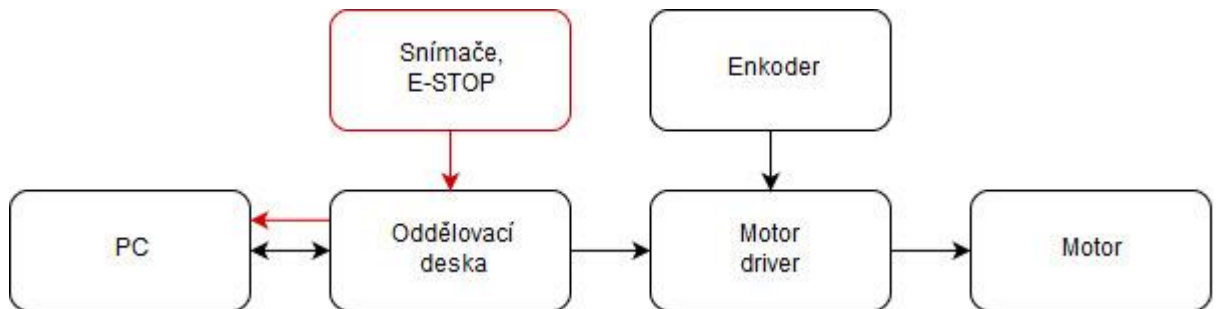
Controller				
Part Number	Model	Description	Quantity	Price [Kč]
785545-01	NI PXIe-8821	PXIe-8821, Windows 10 64-bit (Multiple Languages)	1	56 400
		STANDARD REPAIR COVERAGE	1	
			Subtotal:	56 400
Modules				
778965-01	NI PXI-6514	NI PXI-6514 Industrial 32 DI, 32 Source DO Isolated DIO & NI-DAQ	1	16 920
		STANDARD REPAIR COVERAGE	1	
785024-01	SCB-100A	SCB-100A Noise Rejecting, Shielded I/O Connector Block	1	10 040
		STANDARD REPAIR COVERAGE	1	
185095-02	SH100-100-F Cable (2m)	CABLE ASSY, Type SH100-100-FLEX, 2 m	1	6 470
780244-01	NI PXIe-8234	NI 8234 Dual Gigabit Ethernet Controller for Windows	1	25 900
		STANDARD REPAIR COVERAGE	1	
778444-01	NI PXI-7334	NI PXI-7334, 4 Axis Stepper Motion Controller	1	59 700
		STANDARD REPAIR COVERAGE	1	
778558-01	NI UMI-7774	UMI-7774, 4 Axis Universal Motion Interface, DSUB Connectors	1	31 700
186380-02	SHC68-C68-S Cable (2m)	SHC68-C68-S, 68 pin VHDCI to 68 pin VHDCI, 2m	2	6 330
			Subtotal:	163 390
Chassis				
781368-01	NI PXIe-1071	NI PXIe-1071, 4-Slot 3U PXI Express Chassis	1	28 400
		STANDARD REPAIR COVERAGE	1	
			Subtotal:	28 400
Services				
SRV-PX5618278	Standard Services	STANDARD SERVICE PROGRAM FOR PXI SYSTEMS	1	15 788
			Subtotal:	15 788
			Total:	263 978

Platforma PXI pro manipulátor byla založena na kontroléru s dvoujádrovým procesorem Intel Core i3 o taktu 2.6 GHz, 2GB RAM, rozhraním Gigabit Ethernet, USB 3.0, RS232 a Display portem. Na systému je standardně nainstalován Windows 10. Zařízení je tvořeno 4 slotovým šasi, kde jeden slot je zabrán samotným kontrolérem, další slot tvoří IO karta s 32 DI a 32 DO, na třetí kartě jsou umístěny dva rozšiřující Ethernetové porty a poslední kartu tvoří univerzální karta až pro 4 krokové motory včetně vstupů pro enkodér. Výhodou tohoto řešení

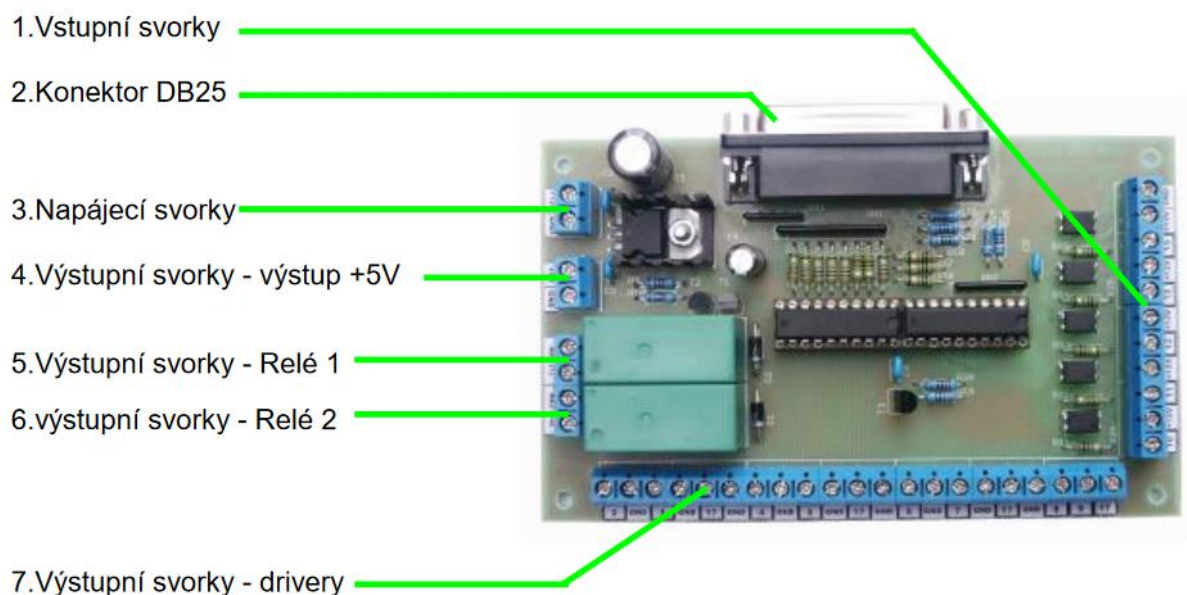
je robustnost a univerzálnost celého systému, což je však vykoupené vysokou pořizovací cenou, ve které nejsou zahrnuty pohony.

2.4.4 CNC řídicí deska

Jednou z možností realizace systému je použití řídicí desky pro CNC stroje. Lze použít oddělovací desku, připojenou k PC pomocí paralelního portu (LPT), kde PC se stará o veškerou logiku a generuje pulzy pro jednotlivé drivery motorů, také vyhodnocuje pulzy od koncových snímačů a bezpečnostních prvků jako je E-STOP, což lze vidět znázorněné na obrázku Obr. 2.9. Oddělovací deska slouží především jako ochrana před proudovým přetížením a jako galvanické oddělení. Toto řešení je velmi nízkonákladové, avšak není příliš doporučené z především z důvodu softwarového zpracování bezpečnostních funkcí. Používá se většinou pro hobby účely a menší jednoúčelová zařízení [8].

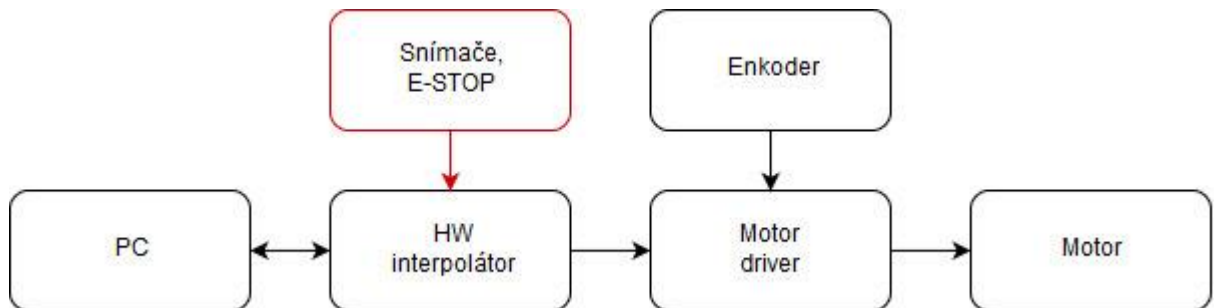


Obr. 2.9 Schéma architektury oddělovací desky LTP (převzato a upraveno z [8])



Obr. 2.10 Oddělovací deska LTP (převzato z [11])

Druhá možnost je využití HW interpolátoru, který je většinou postaven na bázi mikro kontroléru a je určen k interpolaci polohy. Systém je zodpovědný za zpracování všech signálů od senzorů a akčních členů, hardwarově generuje pulzy pro drivery (STEP, DIR) a řídí jejich frekvenci v závislosti na požadavku od řídicího PC na rychlost pohybu, zrychlení a směr.



Obr. 2.11 Schéma architektury HW interpolátoru (převzato a upraveno z [8])

K řízení za pomoci oddělovací desky a i některých HW interpolátorů je nutné zakoupit také software, pomocí kterého se deska, potažmo drivery a motory ovládají. Na trhu je velká řada softwaru, nedostupnější je MACH3.

Jeden z HW interpolátorů je například i CNC kontrolér od společnosti PlanetCNC, který je dodáván i včetně řídicího systému, kde lze konfigurovat většinu parametrů potřebných pro pohyb, nastavení homing pozice, softwarové limity, kalibraci zařízení a další. Design zařízení lze vidět na obrázku Obr. 2.12

Parametry řídicí desky PlanetCNC MK3:

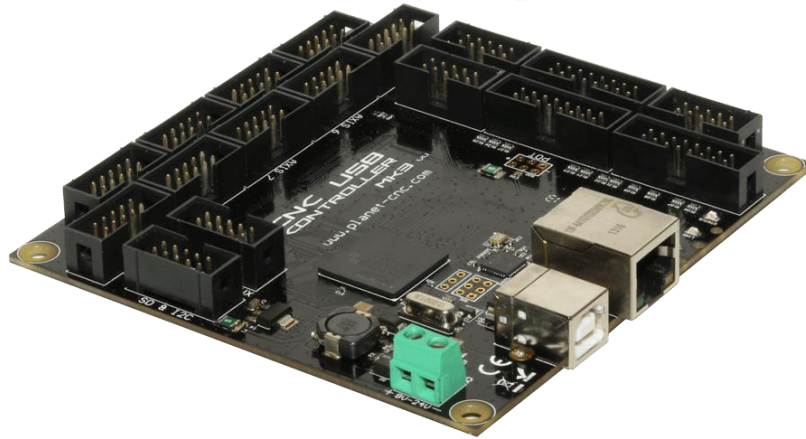
- Řízení pro 9 os (110kHz maximální frekvence kroku, 25 μ s šířka pulsu)
- připojení přes USB nebo Ethernet
- 8 digitálních výstupů (z toho 3 PWM s frekvencí 10Hz až 500kHz)
- Výstup pro připojení jog klávesnice
- 8 vstupů pro snímače
- 8 digitálních vstupů + možnost až 32 vstupů po připojení rozšiřovací desky
- 4 analogové vstupy
- Podpora MPG pendantu
- Sběrnice I2C a UART pro komunikaci s externím zařízením

Řídicí systém založený na interpolační desce od PlanetCNC má výhodu v univerzálnosti v použití pro řízení pohyblivých os, lze zapojit až 9 driverů motorů, má dostatek vstupů i výstupů pro samotné ovládání a hlídání koncových poloh, je zde 8 předpřipravených vstupů pro koncové snímače, E-STOP. K desce je dodán zároveň software pro obrábění, frézování, 3D tisk a podobné aplikace.

Tab. 2.7 Komponenty a ceny řídicího systému na bázi CNC desky (převzato z [11, 19])

Controller			
Model	Description	Quantity	Price [Kč]
CNC controller Mk3	9 axes; 8xDO/8xDI/4xAI	1	5 600
D-120-A	Stabilized power supply input: 230 V AC; output: DC 12V - 5A; 5V - 12A	1	890
Subtotal:			6 490
Modules			
RPS369	Stabilized power supply input: 120/230 V AC; output: DC 36V - 9,7A	1	1 752
RPS608	Stabilized power supply input: 120/230 V AC; output: DC 60V - 8,5A	1	1 806
S25-24	Stabilized power supply input: 230 V AC; output: DC 24V - 1A	1	295
ES-D508	Motor driver, power input < 50 V DC; peak current max 8A	1	3 004
ES-D808	Motor driver, power input < 80 V DC; peak current max 8,2A	2	3 182
CABLEG-BM3M0	Absolut sensor cable, lenght: 3 m	3	326
CABLEH-RZ3M0	Power cable, lenght: 3 m	3	355
FS105 ProSafe	5-port Ethernet switch 100 Mb/s	1	521
Subtotal:			15785
Motor			
ES-M32320	3-phase stepper motor, endocer 1000 imp/rev; 2Nm	1	2 603
ES-M22430	2-phase stepper motor, endocer 1000 imp/rev; 3Nm	2	3 107
Subtotal:			8817
Total:			31 092

V kalkulaci jsou již zahrnuty drivery i motory včetně potřebných spínaných zdrojů, velkou nevýhodou použitých komponent je to, že nejsou připraveny k montáži na DIN lištu a motory nemají udanou ochranu IP, stejně tak propojení motorů standardními konektory D-sub, pro enkodér, a 4-pin ATX konektorem pro napájení nemá ochranu vůči vodě/vlhku. Další nevýhodou této sestavy je nutnost použití různých napájecích napětí. Naopak velkou výhodou je cena celého systému.

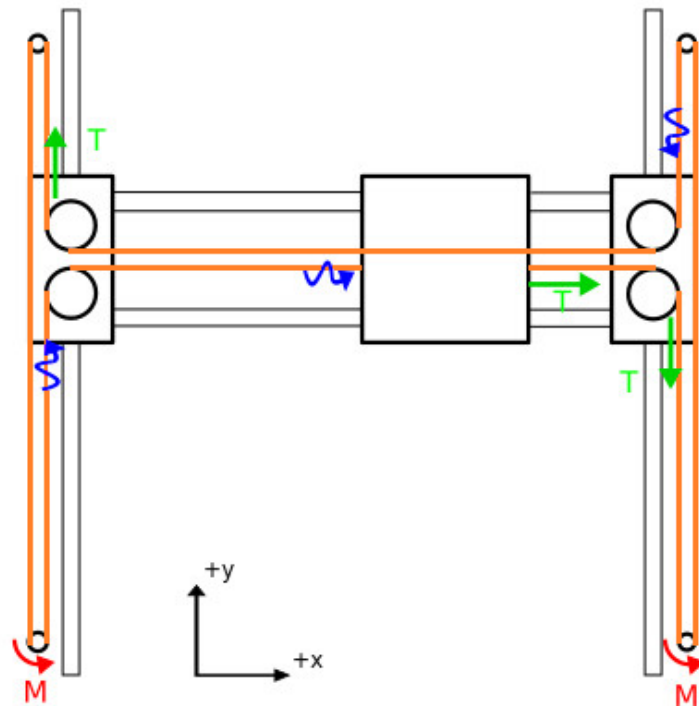


Obr. 2.12 HW interpolátor PlanetCNC (převzato [19])

2.5 Mechanická konstrukce

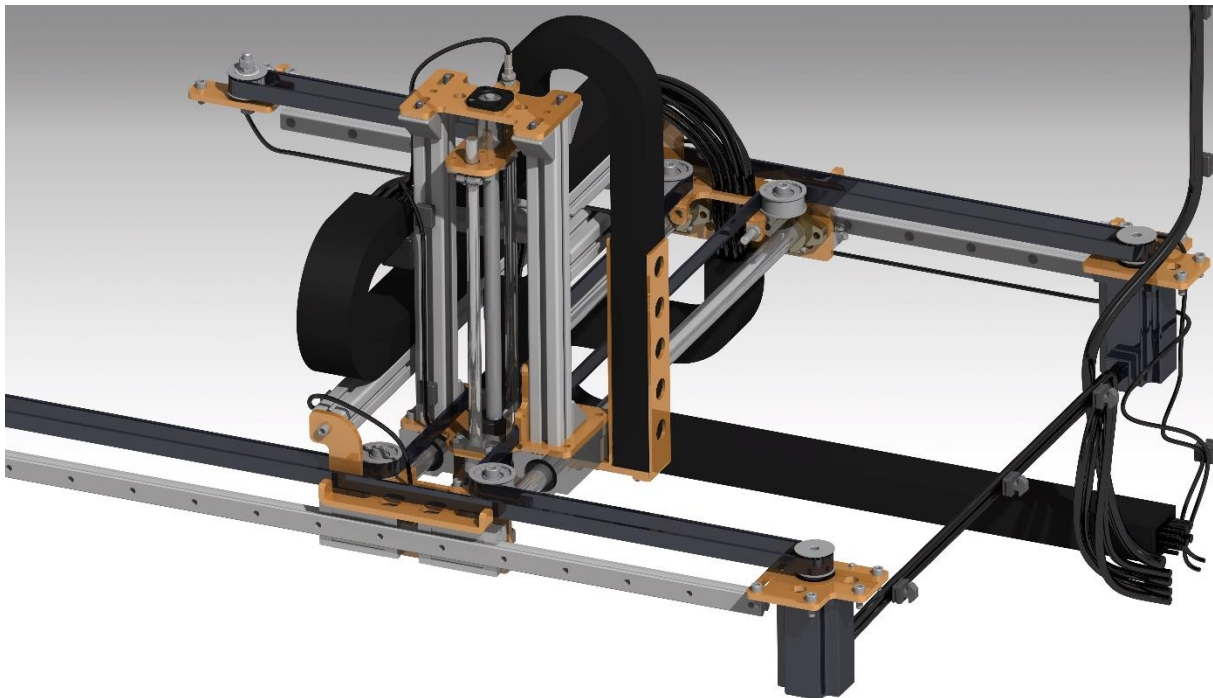
Mechanická konstrukce manipulátoru byla kompletně vyvinuta ve spolupráci s konstrukčním oddělením společnosti MBtech Bohemia s.r.o. V první fázi vývoje se mělo jednat o konstrukci malých rozměrů, cca 300 x 300 x 250 mm, postupem času se došlo k závěru, že by se jednalo spíše pouze o jednoúčelové zařízení, takže základna byl zvětšena, aby se dosáhlo určité univerzality a bylo možné osadit ECU o větších rozměrech s tím, že pracovní plocha finálního zařízení je 450 x 615 x 270 mm.

Základní konstrukci tvoří ITEM profily z hliníku o rozměru 40 x 40 mm a 40 x 60 mm. Posuv v nejdelsí ose Y je zajištěn pomocí dvou lineárních vedení o délce 800 mm a čtyř vozíků s kuličkovými ložisky v pouzdře. Posun v ose X zajišťují dvě vodící tyče o průměru 20 mm a délce 450 mm na kterých se pohybují dva vozíky s kuličkovými ložisky. Pro pohon v osách XY slouží ozubený řemen a ozubené řemenice o vnějším průměru 36 mm. Pro pohon v obou osách slouží jeden řemen, přes který jsou připojeny dva motory, takže se lze pohybovat za pomoci jednoho řemenu v obou osách, je ale nutné řídit oba motory současně tak, aby pracovaly koordinovaně. Výhodou tohoto řešení je snížení dynamických sil, jelikož jsou oba hlavní motory umístěny na pevné konstrukci. Schématické zobrazení pohybu lze vidět na obrázku Obr. 2.13.



Obr. 2.13 Schématické znázornění kinematiky zařízení

Pro pohyb v ose Z slouží dvě vodící tyče o průměru 12 mm a délce 350 mm na kterých jsou vozíky s kuličkovými ložisky. Převod pohybu z motoru je zajištěn přes řemenice a řemen, který je napojen na kuličkový šroub o průměru 14,6 mm, délce 300 mm a se stoupáním 10 mm na otáčku.



Obr. 2.14 Vizualizovaný detail na pohybové části konstrukce

Vnější rozměry zařízení byly zvoleny tak, aby šlo manipulátor snadno přemístit a prošel skrz dveře, takže celkové vnější rozměry jsou 850 x 1050 x 1200 mm včetně madel a pantů. Z důvodu bezpečnosti byl manipulátor zakrytý průhledným plexisklem.

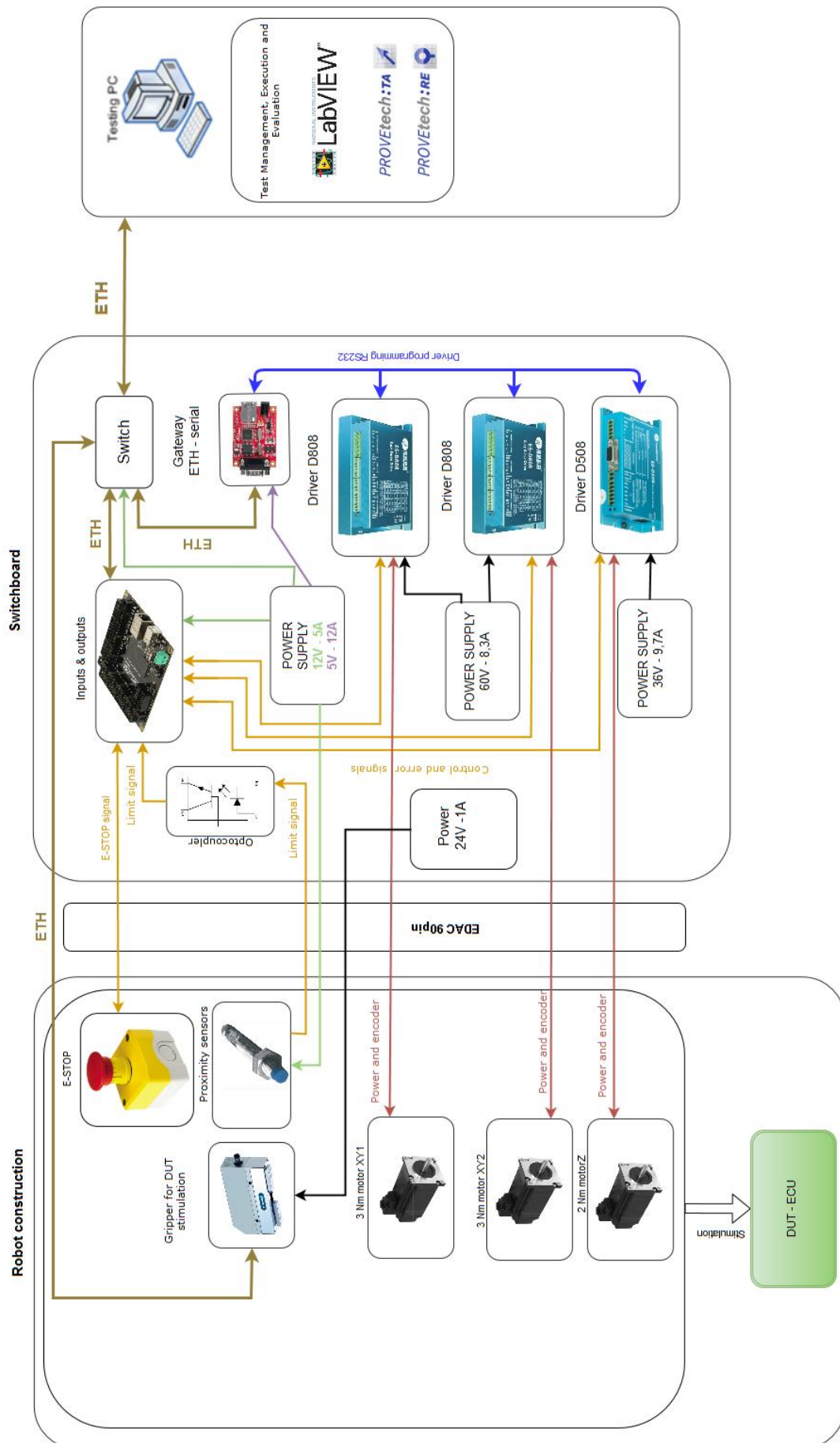


Obr. 2.15 Vizualizace celého zařízení

2.6 Elektrická konstrukce

Z pohledu elektrické části je zařízení rozděleno na tři oddíly: řídicí PC, hlavní rozvaděč a vedlejší rozvaděč přímo na konstrukci manipulátoru. Detailní zapojení lze najít v příloze na obrázku Obr. 2.16. Přívod elektrické energie je přes síťový kabel a zástrčku IEC C20 s kolébkovým spínačem. Fáze je zapojena přes jednopólový jistič 16 A s charakteristikou B a následně vedena do svorkovnice, vodiče N a PE jsou vedeny přímo do svorkovnic. Napájení 230 V slouží k napájení čtyř spínaných zdrojů, které byly zvoleny na základě použitého hardwaru, který není zcela v průmyslovém standardu, kde se primárně používá napětí 24 V a pak případně druhé napětí pro napájení motorů. Napájení 5 V bylo použito pro napájení gatewaye, 12 V slouží pro napájení řídicí desky, Ethernetového switche, indukčních čidel a ventilátoru. Spínaný zdroj o napětí 24 V byl dodatečně přidán pro napájení elektronického chapadla. Zdroje o napětí 36 V a 60 V slouží pro drivery motorů, kde velikost napětí byla volena tak, aby motory měly dostatečný krouticí moment. Samotné napájení driverů motorů je zapojeno přes pojistky F1-F3 se jmenovitou hodnotou 5 A a 4 A. V rozvaděči, který byl umístěn na konstrukci manipulátoru, jsou svorkovnice pro 12 V a GND sloužící pro napájení senzorů, zároveň je zde svorkovnice ochranného vodiče. Propojení mezi rozvaděči je zajištěno přes konektory EDAC 90pin a kabelový svazek, s proudovým zatížením až 8.5 A na pin.

Schématické zapojení lze vidět na obrázku Obr. 2.16 Schématické zapojení manipulátoru, kde lze pozorovat, že veškeré řízení je provozováno na Ethernetovém rozhraní. Na Ethernetové sběrnici je připojen switch, který slouží pro připojení PC, řídicí CNC desky, převodníku z Ethernetu na RS232 a elektronického chapadla. Veškeré ovládací signály pro kontroléry motorů jsou v TTL logice, indukční čidla pro kalibraci a hlídání koncových poloh jsou na 12 V s tím, že čidla jsou galvanicky oddělena.



Obr. 2.16 Schématické zapojení manipulátoru

3 Ochranná opatření

Průmyslové roboty a zařízení mohou být v případě nedodržení základních norem velmi nebezpečné. Rizika jsou dobře identifikovatelná, počet a typ nebezpečí je vždy přímo úměrný povaze automatizačního procesu a komplexnosti instalace. Proto je nutné se na tyto rizika zaměřit a eliminovat možné nebezpečí ať už z pohledu mechanické a elektrické konstrukce, tak z pohledu řídicího systému [20].

3.1 Mechanická konstrukce

Konstrukce musí být v souladu s normou ISO 12100 pro relevantní nebezpečí a tak, aby byly splněny požadavky uvedené v čl. 5.2 až 5.15 normy ČSN EN ISO 10218-1. Nebezpečí jako jsou ostré hrany, v tomto článku nejsou obsažena [20].

3.1.1 Přenos síly

Veškeré pohyblivé součásti, jako jsou hřídele motoru, ozubená kola, řemeny, musí být chráněny integrálními kryty, buď pevnými, nebo pohyblivými. U krytů, které jsou určeny pro odnímání za účelem provedení servisního intervalu, se požaduje takové uchycení, které musí zůstat připojeno ke stroji nebo ke krytu. Pohyblivé kryty musí být opatřeny takovým způsobem, aby se nebezpečný pohyb zastavil před tím, než by mohl způsobit nebezpečí [20].

3.1.2 Ztráta energie

Kolísání, nebo úplná ztráta energie systému nikdy nesmí zapříčinit nebezpečí, z čehož vyplývá, že při výpadku, ať už elektrické, pneumatické, nebo hydraulické energie, se nesmí zařízení pohnout. Výpadek energie může zapříčinit pohyb zařízení pouze v případě, že tomuto nebezpečí je již chráněno konstrukcí. Veškerá nebezpečí, která nejsou chráněna při předpokládaném použití, musí být identifikována a detailně popsána v návodu pro použití [20].

3.1.3 Selhání součástí

Veškeré součásti systému robota musí být navrženy a zkonstruovány tak, aby nebezpečí způsobená poškozením, jako je například zlomení, uvolnění, nebo ztrátou či uvolnění uchované energie, byla minimalizována.

3.1.4 Zdroj energie

Musí být zajištěny prostředky pro izolaci jakéhokoliv zdroje nebezpečné energie k robotu. Tyto prostředky musí být poskytnuty s možností uzamčení nebo zajištění jiným způsobem v pozici bez dodávky energie [20].

Musí být poskytnuty prostředky pro ovládané uvolnění uchované nebezpečné energie. Pro identifikaci nebezpečí z uchované energie musí být připojen štítek. Uchovaná energie se může objevit ve vzduchu a hydraulických tlakových akumulátorech, kondenzátorech, bateriích, pružinách, protizávažích, setrvačnicích, atd [20].

3.2 Elektromagnetická kompatibilita – emisivita

Rušením okolí, respektive vyzařováním elektromagnetického pole, které ovlivňuje okolní předměty a zařízení se zabývá elektromagnetická kompatibilita (EMK), v tomto konkrétním případě se jedná o průmyslové zařízení, pro které určuje požadavky norma ČSN EN 55011.

Zkonstruovaný manipulátor nebyl podroben testy elektromagnetické kompatibility, v této kapitole byly shrnuty pouze požadavky a způsob měření.

3.2.1 Rozdělení zařízení

Zařízení se z hlediska EMK dělí do skupin a tříd, dle kterých jsou následně určeny požadavky, které musí být pro udělení označení CE, splněny.

Rozdělení do skupin:

- 1) První skupina obsahuje všechna zařízení spadající do rozsahu platnosti normy 55011, která nejsou klasifikována jako skupina 2 [21].
- 2) Skupina 2 obsahuje všechna zařízení, kde je cíleně vytvářena vysokofrekvenční energie v kmitočtovém rozsahu 9 kHz až 400 GHz, které se následně používá například pro inspekční účely nebo inspekční účely [21].

Rozdělení do tříd:

- A) Zařízení třídy A je určeno pouze pro použití v průmyslovém prostředí. Tyto zařízení mohou být přímo připojena na nízkonapěťovou síť rozvodu elektrické energie v obytných budovách a musí mít upozornění v dokumentaci, že se jedná o průmyslové zařízení [21].

- B) Zařízení této třídy jsou vhodná pro použití v domácnostech a provozech přímo připojených na síť nízkonapěťového rozvodu elektrické energie napájecí obytné budovy [21].

Z tohoto rozdělení lze vyvodit požadavky, které musí průmyslové zařízení, konkrétně postavený průmyslový manipulátor, splňovat. Manipulátor byl zařazen do 1. skupiny a do třídy A.

3.2.2 Mezní hodnoty svorkového rušivého napětí

Mezní hodnoty svorkového napětí zkoušeného zařízení musí splňovat jednu ze dvou podmínek. Buď mez pro střední hodnotu stanovenou pro měření prováděná přijímačem s detektorem střední hodnoty i mez pro kvazivrcholovou hodnotu stanovenou pro měření prováděná detektorem kvazivrcholové hodnoty, nebo mez pro střední hodnotu v případě použití přijímače s detektorem kvazivrcholové hodnoty [21].

U kmitočtového rozsahu 9 kHz až 150 kHz není stanovena v této normě mez, tím pádem není nutné ji měřit [21].

Kmitočtový rozsah 150 kHz až 30 MHz je stanoven mezními hodnotami rušivých napětí v Tab. 3.1.

Tab. 3.1 Mezní hodnoty rušivých napětí na síťových svorkách pro zařízení třídy A skupiny 1
(převzato a upraveno z [21])

Kmitočtový rozsah [MHz]	Jmenovitý příkon <20kVA		Jmenovitý příkon >20kVA	
	Kvazivrcholová [dB]	Střední [dB]	Kvazivrcholová [dB]	Střední [dB]
0,15 - 0,50	79	66	100	90
0,50 - 5	73	60	86	76
5 - 30	73	60	90	80
			lineárně klesající s log. kmitočtu na:	
			73	60

3.2.3 Mezní hodnoty elektromagnetického rušení šířeného zářením

Zařízení musí vyhovovat kvazivrcholovým mezím při použití detektoru kvazivrcholové hodnoty.

Pro kmitočtový rozsah 9 kHz až 150 kHz nejsou u skupiny 1 stanoveny meze.

Pro zařízení skupiny 1 nejsou v rozsahu 150 kHz až 30 MHz stanoveny meze, měří se v rozsahu 30 MHz až 1 GHz, mezní hodnoty lze vidět v Tab. 3.2. Zařízení skupiny 1, třídy A lze měřit na zkušebním stanovišti ve vzdálenosti 10 m nebo 30 m [21].

Tab. 3.2 Mezní hodnoty rušivého elektromagnetického vyzařování pro zařízení třídy A, skupiny 1, při měření na zkušebním stanovišti (převzato a upraveno z [21])

Kmitočtový rozsah [MHz]	Jmenovitý příkon <20kVA	Jmenovitý příkon >20kVA
	Kvazivrcholová [dB]	Kvazivrcholová [dB]
30 - 230	40	50
230 - 1000	47	50

3.2.4 Požadavky měření

Pro měření v místě instalace platí jiné mezní hodnoty, než zde uvedené, je zde bráno v potaz, že manipulátor je kompaktních rozměrů a lze ho bez problémů přemístit.

Měření zařízení je většinou prováděno na zkušebním pracovišti. V případě, že se jedná o nekompaktní zařízení, které nelze dostat do zkušebního stanoviště, tak v případě skupiny A lze provádět měření na místě instalace, ale nikdy nelze brát v potaz jako referenční měření i pro ostatní výrobky, toto měření je platné pouze pro konkrétní místo instalace. Zařízení skupiny B se vždy musí měřit na zkušebním pracovišti. Měření se vždy provádí pouze ve frekvenčních rozsazích, které jsou definovány [21].

Při měření se bere v potaz okolní rušení, které by mělo být minimálně o 6 dB pod mezními hodnotami, v případě, že kombinace okolního rušení a vyzářování ze zkoušeného zařízení nepřekročí stanovenou mezní hodnotu [21].

3.2.5 Zatěžovací podmínky

Podmínky se dělí podle toho, o jaké zařízení se jedná, na lékařské, průmyslové, mikrovlnné a podobně.

Průmyslové zařízení lze zkoušet buď se zátěží užívanou v provozu, nebo s ekvivalentní náhradní zátěží. V případě, že zařízení potřebuje k provozu např. vodu, plyn, vzduch atd., příklady do zařízení se musí provést pomocí izolačních trubek o délce alespoň 3 m. Kabely musí být při měření rozmístěny jako při normálním použití. Měření se musí provádět při maximálním a polovičním výstupním výkonu [21].

3.2.6 Záznam výsledků

Výsledky získané z měření vysokofrekvenčního rušení šířené vedením a/nebo zářením se musí zaznamenat do zkušebního protokolu. V případě, že výsledky nejsou zaznamenávány průběžně a/nebo v grafické podobě ve sledovaném frekvenčním rozsahu, musí se dodržet minimální požadavky, tj. u emisí šířenými vedením se musí zaznamenat alespoň úrovně a frekvence šesti nejvyšších rušení v každém sledovaném frekvenčním pásmu. Záznam také musí obsahovat označení vodiče, na kterém se rušení vyskytovalo a pro emise šířené zářením se musí zaznamenat úrovně a kmitočty šesti nejvyšších rušení v každém sledovaném frekvenčním rozsahu. Záznam musí také obsahovat polarizaci antény, výšku antény a pozici natočení otočného stolu, v případě měření ve zkušebním stanovišti se musí také uvést zvolená vzdálenost měření [21].

Zkušební protokol musí vždy obsahovat nejistotu měřícího zařízení podle specifikace CISPR 16-4-2.

3.2.7 Posouzení vyhovění

Posouzení, zda zařízení vyhovuje, se musí provést porovnáním naměřených hodnot s mezními hodnotami. V případě že se jedná o zařízení, které bude sériově vyráběno, musí být jistota minimálně 80%, to znamená, že alespoň 80% vyrobených kusů bude vyhovovat daným mezím.

Výsledky měření zařízení, které byly získány v místě instalace a ne na zkušebním pracovišti, platí pouze pro toto místo a nesmí se pokládat za reprezentativní pro jakékoliv jiná místa instalace [21].

3.3 Elektromagnetická kompatibilita – odolnost

Elektromagnetickou odolností v průmyslovém prostředí se zabývá norma ČSN EN 61000-6.2:2001, která určuje požadavky na elektrické a elektronické přístroje. Norma definuje požadavky na odolnost ve frekvenčním rozsahu 0 Hz až 400 GHz. Veškeré zkoušky se měří dle stanovených požadavků [22].

Pro účely zkoušek odolnosti je nejprve nutné zmínit termíny a definice uvedené v IEC 60050-161.



Obr. 3.1 Příklady vstupů/výstupů (převzato a upraveno z [22])

Vstup/výstup krytem přístroje

Fyzická hranice přístroje, kterou může elektromagnetické pole vnikat nebo vyzařovat.

Vstup/výstup kabelu

Bod, ve kterém je vodič nebo kabel připojen k přístroji (např.: vstupy/výstupy signálů a napájení).

Vstup/výstup svorkami signálů

Vstup/výstup, kde je připojen k přístroji kabel určený pro přenos signálů (např.: analogové vstupy, výstupy a ovládací vedení; datové sběrnice; komunikační sítě).

Vstup/výstup napájením

Místo, ve kterém je vodič nebo kabel nesoucí primární elektrickou energii potřebnou pro provoz (fungování) přístroje nebo místo připojení souvisícího přístroje.

Dlouhá vedení

Vedení připojená ke vstupu/výstupu svorkami signálů a která uvnitř budovy jsou delší než 30 m nebo vychází ven z budovy.

3.3.1 Funkční kritéria

Jeden z požadavků na vyhovění EMC odolnosti je funkční bezpečnosti zařízení. V případě, že zařízení nesplní ani jedno z níže uvedených kritérií a stane se během zkoušek nezpůsobilým nebo nebezpečným, tak je přístroj posouzen, jako by nevyhověl.

- a) **„Funkční kritérium A:** Přístroj musí pracovat nepřetržitě během zkoušky i po ní dle svého určení. Není dovoleno žádné zhoršení činnosti nebo ztráta funkce pod úroveň činnosti stanovenou výrobcem, pokud je přístroj užíván dle svého určení. Úroveň činnosti může být nahrazena dovolenou ztrátou činnosti. Není-li stanovena výrobcem minimální úroveň činnosti nebo přípustná ztráta činnosti, pak obojí může být odvozeno z popisu výrobku a dokumentace a dále z toho, co může uživatel rozumně očekávat od přístroje, je-li užíván dle svého určení.
- b) **Funkční kritérium B:** Přístroj musí po zkoušce pracovat nepřetržitě dle svého určení. Není dovoleno žádné zhoršení činnosti nebo ztráta funkce pod úroveň činnosti stanovenou výrobcem, pokud je přístroj užíván dle svého určení. Úroveň činnosti může být nahrazena dovolenou ztrátou činnosti. Během zkoušky je však dovoleno zhoršení činnosti. Není dovolena změna aktuálního provozního stavu nebo ztráta uložených dat.

Není-li stanovena výrobcem minimální úroveň činnosti nebo přípustná ztráta činnosti, pak obojí může být odvozeno z popisu výrobku a dokumentace a z toho, co může uživatel rozumně očekávat od přístroje, je-li užíván dle svého určení.

- c) **Funkční kritérium C:** Je dovolena dočasná ztráta funkce za předpokladu, že funkce je samoobnovitelná nebo může být obnovena řízením.“ [22]

3.3.2 Zkušební podmínky

Zařízení je nutné testovat v běžném provozním režimu, při kterém je z předběžného zkoušení největší citlivost na rušení. Má-li být přístroj připojen k pomocným zařízením v provozu, je nutné jej při zkouškách připojit k reprezentativní konfiguraci přístrojů pro zkoušení vstupů/výstupů, obdobně jako je popsáno v CISPR 22 [22].

Pokud výrobce stanovil a uvedl v návodu k užití použití externího ochranného opatření, poté se musí zkoušky provádět za použití externího ochranného zařízení nebo opatření.

Veškeré zkoušky, pořadí a postup, musí být zaznamenáno ve zkušebním protokolu. Pokud má zařízení velký počet vstupů a výstupů, poté se volí vhodná kombinace, aby byl od každého typu obsažen alespoň jeden [22].

Zkoušky jsou prováděny za stálé teploty, vlhkosti a atmosférickém tlaku, které jsou specifikovány pro výrobek [22].

3.3.3 Požadavky na měření

Zkoušky se musí provádět předem definovaným a reprodukovatelným způsobem. Každá zkouška musí být provedena samostatně, na pořadí zkoušek nezáleží.

3.4 Ovládání

Vlastnosti bezpečnostního ovládacího systému robota musí být jasně uvedena v informaci pro použití. Pro účely normy ISO 10218 jsou vlastnosti bezpečnostního ovládacího systému uvedeny jako:

- 1) Úrovně vlastností (PL) a kategorie popsané v normě ISO 13849-1:2006, čl. 4.5.1
- 2) Úrovně integrity bezpečnosti (SIL) a požadavky na toleranci chybovosti hardwaru, jak jsou popsány v IEC 62061:2005, čl. 5.2.4 [20].

V těchto normách jsou popsány metody pro funkční bezpečnost. Požadavky, uvedené v těchto normách, mohou být použity z obou norem nebo jen z jedné. Veškerá data a kritéria nezbytná pro stanovení bezpečnostního ovládacího systému musí být zahrnuta v informaci pro použití [20].

Jakákoliv porucha bezpečnostního ovládacího systému musí vyústit v zastavení kategorie 0 nebo 1 v souladu s IEC 60204-1 [20].

3.4.1 Požadavky na ovládání

- 1) Jednotlivá závada na kterékoliv části nesmí vést ke ztrátě bezpečnostní funkce.
- 2) Rozumně předvídatelné závady musí být detekovány.
- 3) V případě objevení jednotlivé závady se musí vždy vykonat bezpečnostní funkce a bezpečný stav musí být udržován do té doby, kdy je detekovaná závada opravena [20].

3.4.2 Ovládač spuštění

Ovládače spuštění, které inicializují energii nebo pohyb, musí být navrženy tak, aby splňovaly následující kritéria [20].

- 1) Ochrana před nechtěnou operací: Umístění ovládače musí být navrženo tak, aby bylo zamezeno nechtěné operaci. Např. může být použito zakrytované tlačítko.
- 2) Indikace stavu: U průmyslového robotu musí být indikován stav, například pomocí tzv. semaforu, který ukazuje, je-li zapnuté napájení, detekována porucha, nebo běží automatický provoz. Indikátor musí být vhodně umístěn a musí splňovat požadavky IEC 60204-1.
- 3) Jediný bod ovládání: Ovládací systém musí být konstruován tak, aby v případě, že je robot umístěn pod místním ručním ovládacím panelem nebo jiným ručním

programovacím ovládacím zařízením, bylo zamezeno iniciaci pohybu robota, nebo změně volby místního ovládače z jakéhokoliv jiného zdroje.

3.4.3 Zastavení robotu

Každý robot musí mít funkci ochranného zastavení a nezávislou funkci nouzového zastavení. Tyto funkce musí být opatřeny zařízením pro připojení externích ochranných zařízení. Dále může být zajištěn výstupní signál nouzového zastavení [20].

Nouzové zastavení

Robot musí mít vždy nouzové zastavení – to se dělí na kategorii 0 a 1, v souladu s IEC 60204-1)

Každá ovládací stanice schopná iniciace pohybu musí mít ručně iniciovanou funkci nouzového zastavení, která:

1. splní požadavky ovládacího systému a normy IEC 60204-1
2. má přednost před všemi jinými ovládači robota
3. způsobí zastavení při všech nebezpečích
4. odpojí energii od ovládačů robota
5. poskytne schopnost ovládání nebezpečí ovládáním systému robota
6. zůstává aktivní, dokud není funkce znovu spuštěna
7. musí být znovu spuštěna pouze ruční aktivací, která nezpůsobí opětovné spuštění po resetování, ale musí pouze povolit opětovné spuštění
8. musí být funkční, když je energie k robotu vypnuta
9. v případě nefunkčního výstupu, když je napájení robota zapnuto, musí generovat signál nouzového zastavení [20].

4 Řídicí software

4.1 CNC USB Controller

Pro řízení 3osého manipulátoru, respektive řízení použité CNC desky MK3, lze použít defaultně software, který je dodaný od výrobce, „CNC USB Controller“, jedná se o aplikaci pro systém Windows, která může obsloužit veškeré funkce kontroléru. Toto prostředí, jak již název napovídá, je prioritně určeno pro aplikaci CNC strojů, potažmo 3D tiskáren. Software dokáže zpracovat standardně G-kód (ISO-kód), což je programovací jazyk CNC strojů, lze importovat také DXF, PLT a gerber soubory, ale také 2D a 3D obrázky a text. Veškeré importované soubory jsou převedeny na G-kód. Data lze dostat do CNC desky také na SD kartě, kde je ale nejprve nutné provést export do RAW formátu přes již výše zmíněný software.

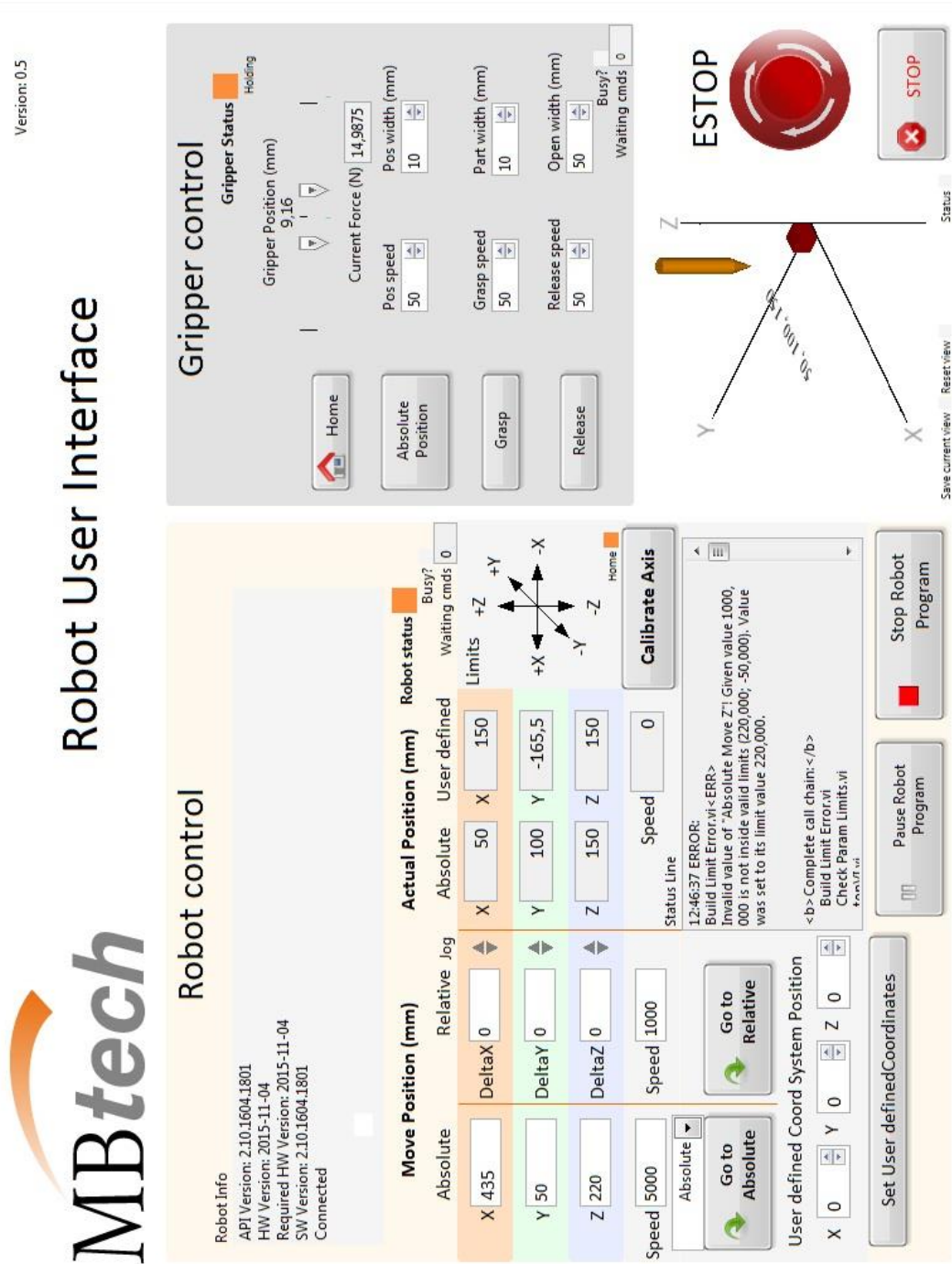
4.2 Vývojové rozhraní LabVIEW

Pro automatizované testování řídicích jednotek byl zvolen software LabVIEW, což je grafické programovací rozhraní, kde lze vyvíjet sofistikované měřicí, testovací a řídicí systémy. Prostředí LabVIEW tvoří rozhraní s hardwarem mezi cílem a operačními systémy, lze využít širokou škálu poskytovaných knihoven.

V tomto prostředí bylo navrženo a vytvořeno uživatelské rozhraní a napsán software pro automatizované testování a uživatelské řízení robotu.

4.2.1 Uživatelské rozhraní

V první řadě bude popsáno uživatelské rozhraní (dále jen GUI), které lze vidět na obrázku **Chyba! Nenalezen zdroj odkazů..** Budou popsány jednotlivé sekce, položky a funkcionality rozhraní.



Obr. 4.1 Uživatelské rozhraní manipulátoru

GUI je rozděleno na 4 sekce - Robot control, Gripper control, 3D vizualizace polohy a tlačítka E-STOP a STOP.

Robot control

V této sekci lze vidět aktuální informace o řízení CNC desky, jako je verze API, HW a SW, zároveň je zde informace, zda je řídicí deska připojena. Dále je zde samotné ovládání, kdy lze zadat polohu v absolutních hodnotách do kterých má manipulátor najet, případně zadat pouze relativní posuv, zadávané hodnoty jsou programově omezeny, takže nelze zadat hodnotu mimo pracovní rozsah. Rolovací menu slouží k přepnutí souřadného systému, ve kterém se manipulátor pohybuje, pro některé aplikace je výhodnější si stanovit nový souřadný systém s nulou na okraji testovaného zařízení. Druhý souřadný systém, tzv. User defined, lze zadat tak, že najedeme do námi požadované polohy, kde chceme mít počátek souřadného systému a stiskneme tlačítko Set user defined Coordinates. Pokud se z nějakého důvodu nelze dostat s koncovým bodem manipulátoru až na počátek souřadného systému, lze najet do blízké pozice a do políček u tlačítka na nastavení uživatelského souřadného systému a zadat posuv vůči novému počátku.

Pole Actual Position slouží k zobrazení aktuální pozice v defaultním a uživatelském souřadném systému. Dále je zde zobrazeno definování směrů a os v souřadném systému, kdy se jedná o pohled z čela robotu (pohled na madla víka), zde je zobrazen i současný stav indukčních čidel, která slouží k hlídání krajních poloh os. Pokud je čidlo aktivní, tak konkrétní šipka osy je oranžově zvýrazněná. Indukční čidla slouží také ke kalibraci všech os.

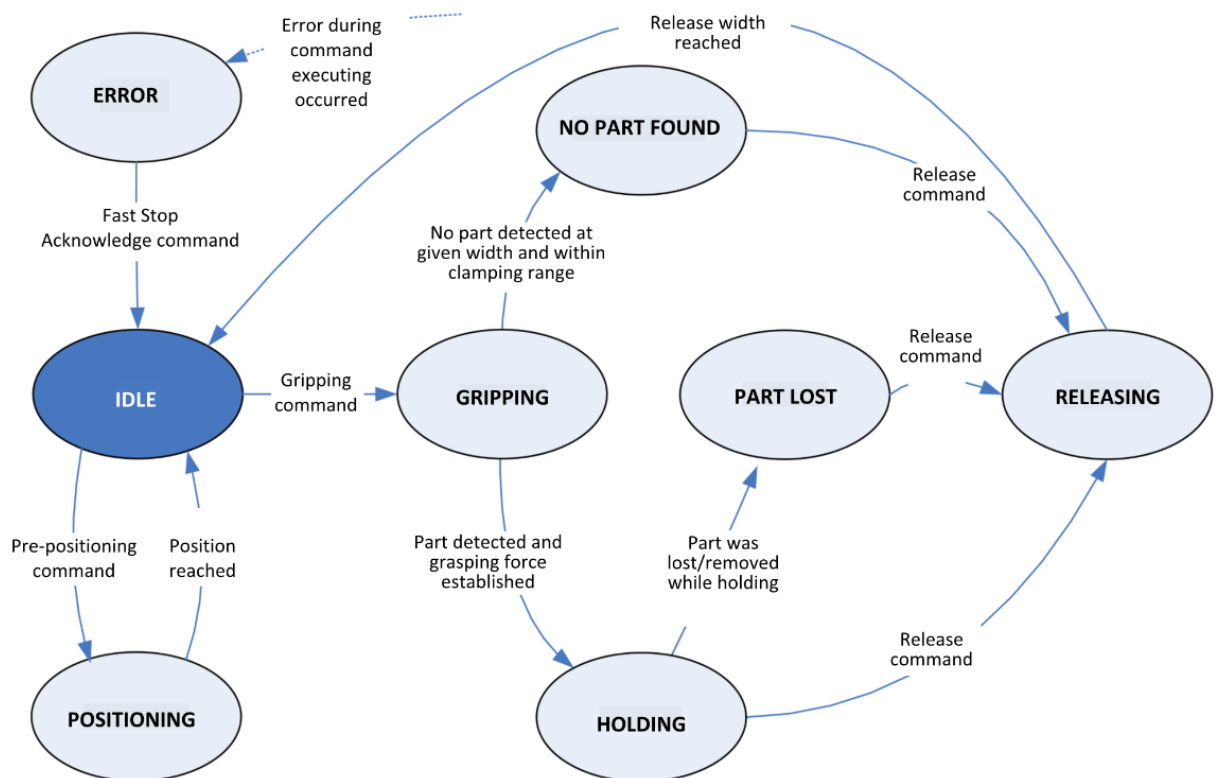
Status line slouží k výpisu provedených činností a případně také k chybovým hláškám, např. zadání polohy mimo rozsah manipulátoru, zadání vysoké rychlosti, případně odpojení zařízení a zároveň toto pole slouží i pro výpis chyb a statusu gripperu. Poslední v této sekci je Pause Robot Program a Stop Robot Program, kdy tlačítko pause slouží k pozastavení právě vykonávané činnosti a po opětovném stisku se pohyb dokončí, Stop program slouží k zastavení manipulátoru.

Gripper control

Sekce umožňuje plně ovládat gripper a zároveň sledovat jeho aktuální pozici, status, zda je chapadlo připojené, a aktuální sílu, kterou chapadlo vyvíjí.

Tlačítko Home slouží ke kalibraci prstů chapadla. Aby bylo možné použít plný rozsah posuvu, je nutné mít chapadlo při kalibraci bez nástroje. Posuv v absolutních hodnotách slouží pouze pro najetí přesně do konkrétní polohy bez přídržné síly, v případě, že něco brání chapadlu, ve status line je vypsána chyba.

Pro uchopení předmětů nebo nástrojů slouží tlačítko Grasp, kdy by uvedená šířka by měla odpovídat velikosti uchopovaného předmětu, s tím, že funkce Grasp pracuje s parametrem „Part width tolerance“ a v těchto mezích uchopení bude považovat za úspěšné. Release slouží k uvolnění uchopeného předmětu. Níže jsou uvedeny přechody mezi stavy gripperu.



Obr. 4.2 Přechody mezi stavy chapadla(převzato z [14])

3D vizualizace

Slouží k zjednodušené vizualizaci polohy nástroje vůči počátku souřadného systému. Lze uložit stav o poloze jako obrázek, vizualizaci lze otevřít v samostatném okně a dle libosti otáčet.

E-STOP, STOP

Tlačítko E-STOP slouží k softwarovému nouzovému zastavení manipulátoru a vizualizaci stavu E-STOPU z řídicí CNC desky. Tlačítko STOP slouží k ukončení celé aplikace.

4.2.2 Zdrojový kód

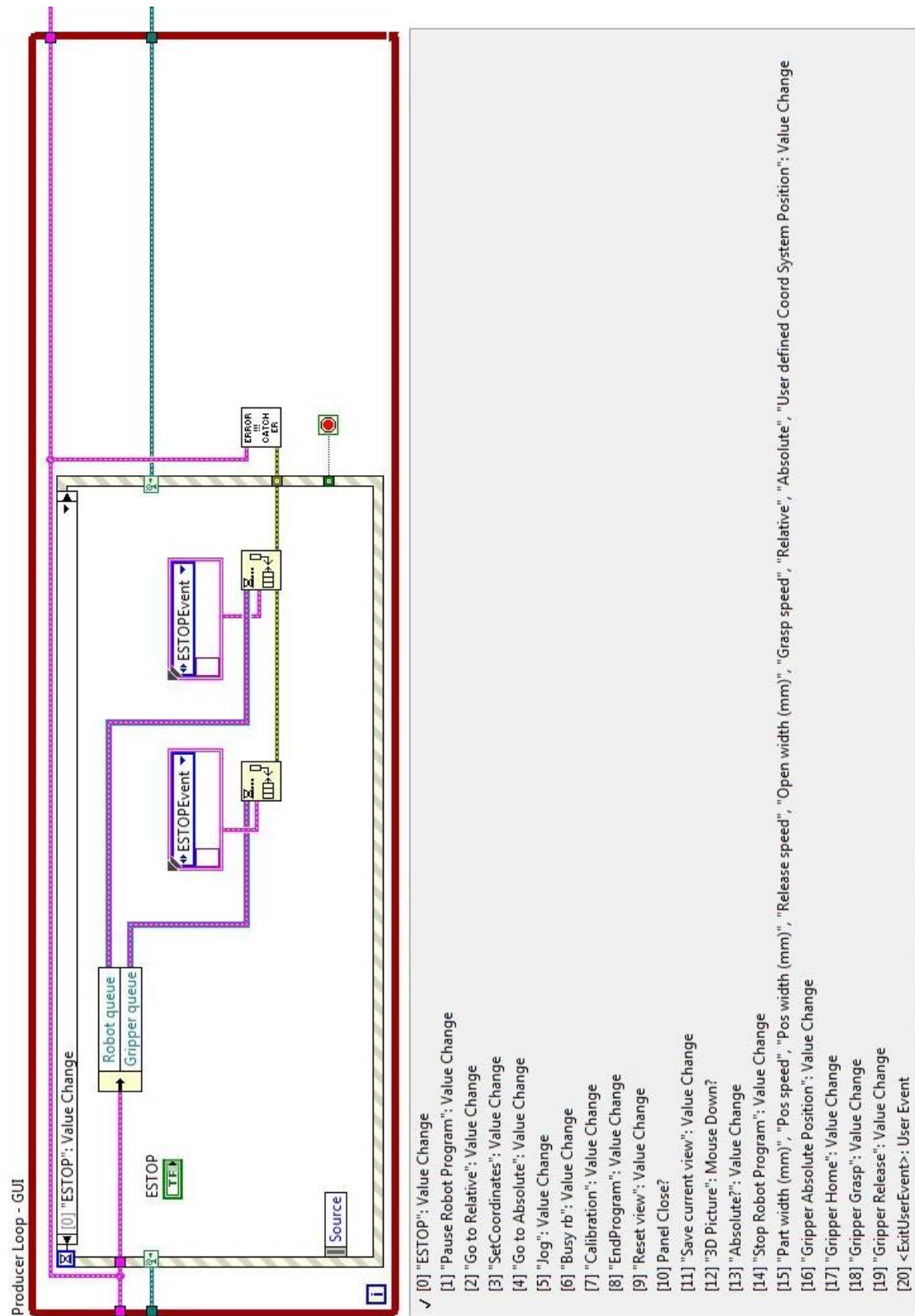
Po spuštění programu se zobrazí okno, které čeká na navázání komunikace a inicializaci uživatelského prostředí. V aplikaci je použitý paralelní chod pomocí front a jednotlivých smyček, kdy veškeré příkazy jsou posílány přes hlavní smyčku, tzv. Producer loop, která slouží pouze k odchytnutí eventů a dle toho následné přidávání činností do front. Výkonná část je realizována ve spotřebitelských smyčkách tzv. Consumer loop. Jsou zde 4 smyčky pro zpracování příkazů, jedna je určena pro zobrazování a vnitřní funkce v uživatelském rozhraní, druhá je pro obsluhu řídicí desky, třetí pro ovládání gripperu a poslední pro indikaci chodu aplikace.

Na obrázku Obr. 4.5 lze pozorovat velmi zjednodušený vývojový diagram, kde je vidět jeden cyklus chodu programu.

Producer loop

Jedná se o while loop, do které vstupuje reference eventů a fronta pro robota, gripper a uživatelské rozhraní. Uvnitř while smyčky je eventová struktura, která v případě vyvolání eventů provede danou operaci, v tomto případě přiřadí case do fronty pro consumery. While smyčka běží až do doby, než přijde příkaz k ukončení aplikace, který je vyvolán eventem od smyčky producenta GUI. V producent while se nachází také SubVI, které v případě chyby, která nastala, v této smyčce zařadí do fronty GUI „Error“ case a předá data o chybě.

Na Obr. 4.3 lze vidět strukturu smyčky producenta a eventy, které obsahuje. Jako příklad byl zvolen event. ESTOP, kdy event smyčka čeká na změnu hodnoty tlačítka ESTOP, což znamená jeho zmáčknutí. Takže v případě zmáčknutí tlačítka ESTOP se cluster, což je skupina dat a typů spojená do jednoho formátu, se fronty rozbalí a do fronty pro robot a gripper je přidán case „ESTOPEvent“. Tento event je jako jediný přidáván vždy na začátek fronty tak, aby byl co nejdříve zpracován v consumer loop, zbytek příkazů se přidává standardně na konec fronty.



Obr. 4.3 Producent loop – while a event loop

Consumer loop

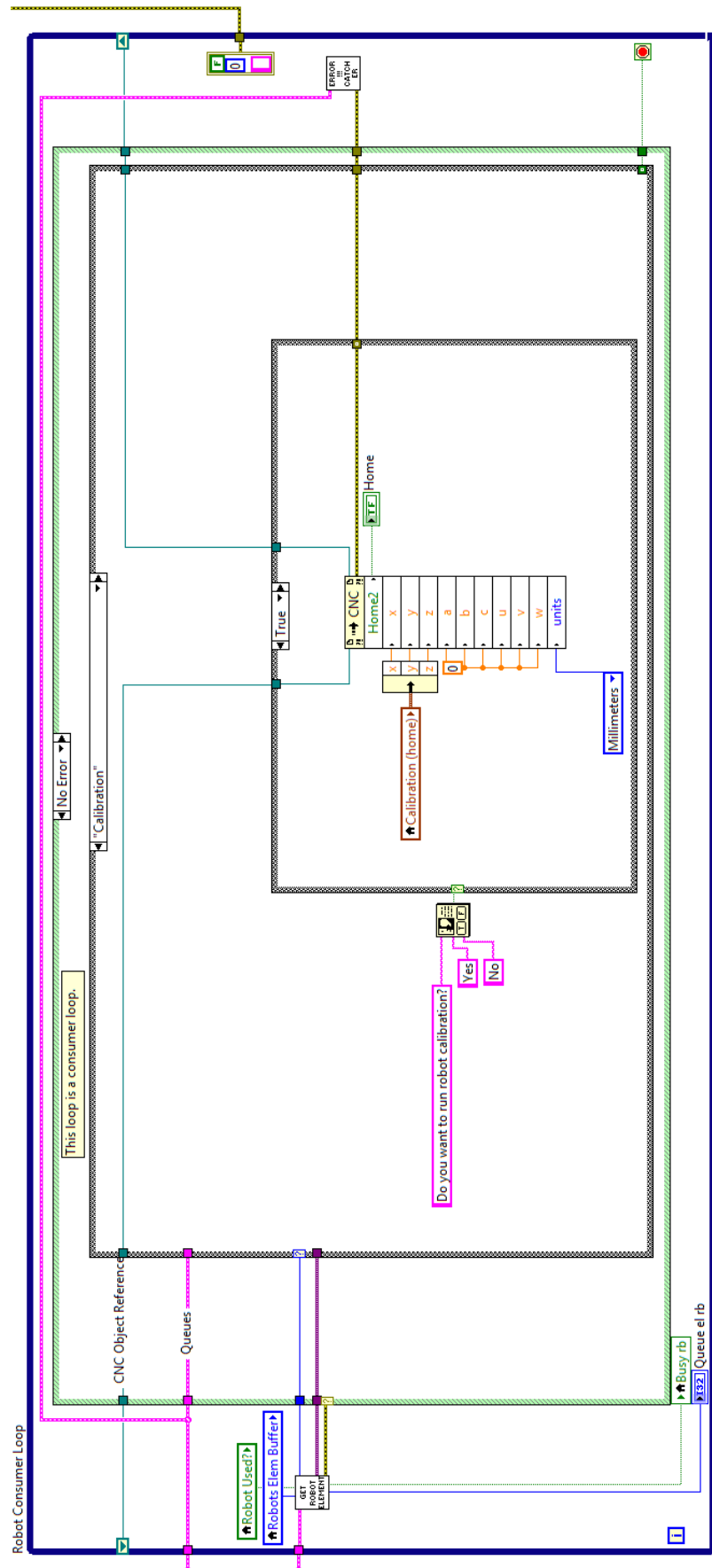
Consumer loop jsou smyčky, které jsou určeny pro jednotlivé vykonávání příkazů od producenta. Ke zpracování příkazů dochází dle pořadí ve frontě jednotlivě po sobě, proto jsou jednotlivé smyčky rozděleny, mohou tak pracovat paralelně a tím pádem jedna druhou nezdržuje. Tato while smyčka obsahuje dvě Case struktury, jedna slouží pouze pro volný vstup do druhé case struktury, pokud nenastal předtím žádný error, druhá je pro případ chyby, kdy je následně aplikace řízeně ukončena.

V kódu se vyskytují dva druhy errorů jeden, je cíleně generovaný ze SubVI „ERROR !!! CATCHER“ a je řízený, slouží k informaci uživatele, o chybách které nemají vliv na chod (v GUI zadaná hodnota mimo rozsah os,... kdy dochází i k automatické korekci na maximální možnou hodnotu). Druhý typ erroru je založen na chybě při zpracování, jedná se tedy o chybu, která může ovlivnit chod aplikace a celého stroje, je tedy nezbytně nutné veškerý chod stroje ukončit, tato chyba je odchytnuta právě v první case struktuře.

Druhá case struktura slouží k vykonávání příkazů pro nastavení, funkcionalitu a ukončení.

Smyčka GUI slouží k vizualizaci uživatelského prostředí, aktualizaci limitních parametrů, například při změně z defaultního souřadného systému do uživatelského souřadného systému, výpisu chyb, 3D vizualizaci polohy nástroje, případně k ukládání tohoto obrázku.

Smyčka Robota slouží k polohování robota a obsluhu všech dostupných funkcí pro robota, potažmo interpolační desku. Blíže popsán bude pouze pro představu jen jeden případ, a to kalibrace, strukturu consumer smyčky pro tento případ lze vidět na Obr. 4.4. V tomto případě je před case smyčkami SubVI „GET ROBOT ELEMENT“, která vezme jednu položku z fronty a zároveň předá informaci o tom, kolik je ještě položek ve frontě je. Odebraná položka je dále zpracována v case struktuře, kde je využita reference na inicializovaný .NET CNC objekt, která se předává přes shift registr od inicializace. Před vykonáním příkazu je vyvolán pop-up s dotazem, zda chceme vykonat kalibraci, následným potvrzením se skočí do case struktury „True“ a zde je použit blok „invoke node“, což vyvolá jednu z dostupných funkcí v referencované knihovně. Zde je to „Home2“, jako vstupní parametry slouží lokální proměnná Calibration, kde jsou uloženy Home pozice. Vzhledem k tomu, že jsou použity jen 3 osy, ostatní parametry jsou 0 a parametr units jsou milimetry.



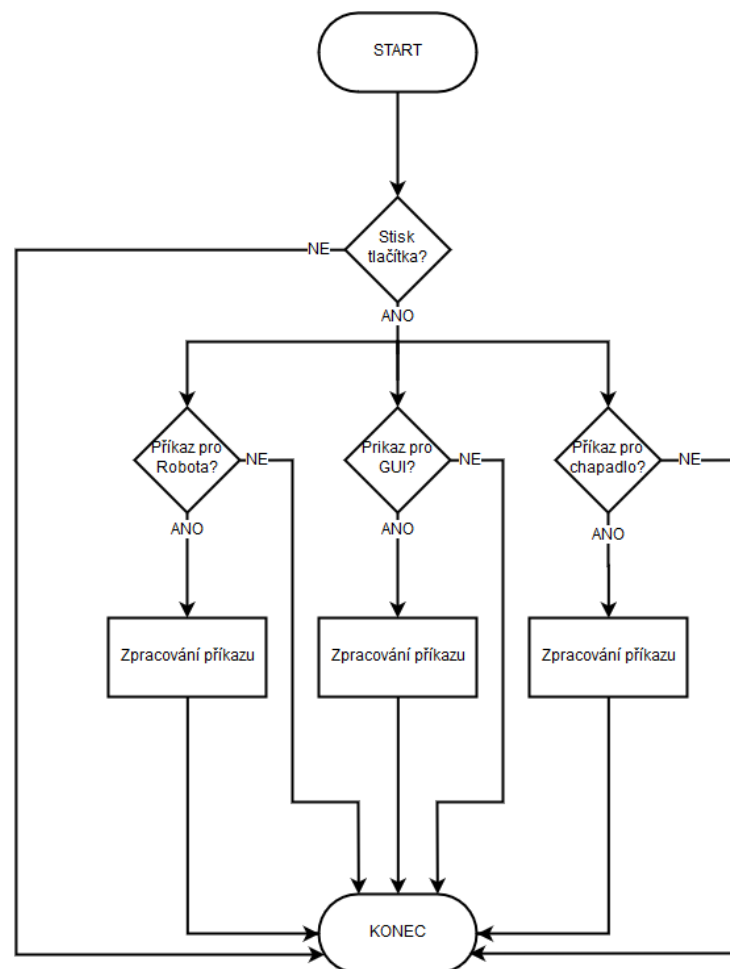
Obr. 4.4 Robot consumer loop - calibration

Smyčka chapadla slouží ke kompletnímu ovládní. Byly zde použity předpřipravené balíčky knihoven s VI přímo od dodavatele gripperu.

Všechny smyčky consumerů mají v SubVI „GET ... ELEMENT“ timeout u bloku dequeue element a rozhodovací podmínku o tom, zda došlo k vypršení tohoto časového intervalu mezi zpracováním příkazů. Pokud ano, do fronty se zařadí case „Timeout“, který je následně vykonán. Tyto případy slouží ke kontrole připojení na zařízení a zároveň k obnově aktuálních informací/indikátorů v uživatelském rozhraní. Timeout pro robota je 100ms, u gripperu je to 200ms.

Status indicator

Smyčka slouží pouze k indikaci bezproblémového chodu aplikace. Každých 500 ms se zde neguje hodnota bool parametru Status, takže je ve vizualizaci je blikající pole, které slouží k indikaci, že se program nezasekl.



Obr. 4.5 Zjednodušený vývojový diagram jednoho cyklu zdrojového kódu

5 Parametry manipulátoru

Pro manipulátor pro automatizované testování HMI jsou důležité pouze některé parametry, zde není až tak kritická rychlost posuvu a nosnost ramene, ale je zde prioritní komunikační rozhraní, cena a následně přesnost. Rozsah pracovního postupu samozřejmě zvyšuje univerzalitu zařízení.

5.1 Přesnost

Přesnost a opakovatelnost pohybů je jedna z klíčových vlastností manipulátoru. Vzhledem k tomu, že zařízení je určeno k testům funkcionality řídicích jednotek, je nutné zajistit možnost opakování konkrétního testu za stejných podmínek, to znamená i ECU stimulace na stejném místě. Přesností polohování se zabývá řada norem a směrnic, liší se od sebe především analýzou naměřených hodnot a definicí klíčových parametrů, proto zařízení může mít přesnost závislou na druhu použité normy [23].

Normy se liší na zemi, ve které se zkoušky provádí, například v Německu se používá norma VDI/DGQ 3441, v Japonsku se používá norma JIS B 6330 – 1980 a v USA je to norma ASME B5.54 – 2005. Pro ČR je stanovena norma ISO 230 – 2:2006, která určuje postupy a metody měření pro nastavení polohy v číslíkové řízených osách [24].

Norma ISO 230 se zabývá měřením přesnosti stroje bez zatížení. Norma se nezabývá funkčními zkouškami stroje (trhavé pohyby, vibrace atd.), tyto zkoušky by měly být provedeny před měřením přesnosti. Zkouška je založena na opakovaném měření v každé poloze, příslušné parametry jsou definovány a vypočteny, zároveň tato norma definuje metody pro měření emisí hluku, zkoušky kruhové interpolace a tepelných vlivů na stroj [23].

Pro pochopení používané metody a popisu je nezbytné vysvětlit některé použité pojmy.

Rozsah dráhy v ose – největší lineární dráha, v jejímž rozsahu se může jednotlivá osa pohybovat

Zadaná poloha – poloha nástroje, do které je stroj řízeně poslán

Skutečná poloha – dosažená poloha nastavená zadáním polohy

Úchylka polohy – rozdíl mezi dosaženou a zadanou polohou

Necitlivost v poloze – hodnota průměrné úchylky při najíždění do polohy v obou směrech

Necitlivost v ose – absolutní hodnota největší necitlivosti ze všech zadaných poloh osy

Průměrná necitlivost v ose – aritmetický průměr necitlivostí v poloze

Jednosměrná opakovatelnost – schopnost opakovat pohyb v jednom směru pohybu

Obousměrná opakovatelnost - schopnost opakovat pohyb v obou směrech pohybu

Opakovatelnost v bodu – schopnost opakovat pohyb do bodu ve všech stupních volnosti

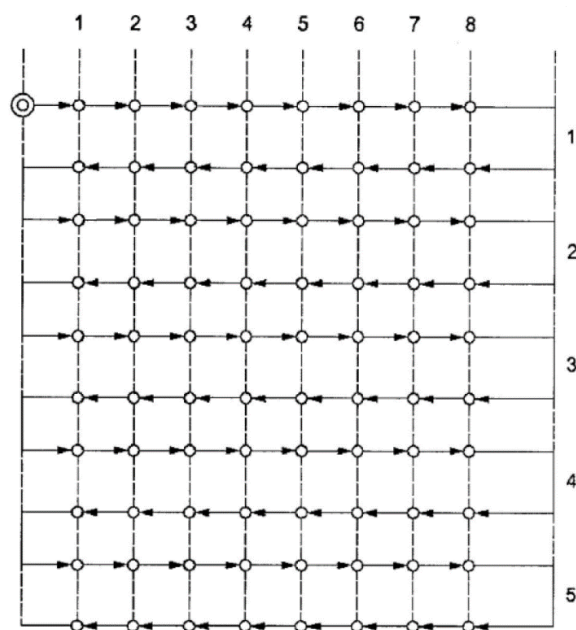
Rozlišení – nejmenší možný pohyb, který stroj může dosáhnout

Měřený rozsah dráhy – část rozsahu dráhy, která byla použita pro měření, tato poloha musí být určena tak, aby bylo možné do krajních poloh najet z obou stran.

Měření přesnosti polohy probíhalo na certifikovaném zařízení pro měření přesnosti Zett Mess AMS 12/12 CNC s přesností $MPE_e = 50.0 \mu\text{m}$. Avšak kalibrace měřícího stroje byla provedena na rám manipulátoru, který není s lineárními vedeními souosý, což vyplývá z tabulek přiložených v příloze B, C a D, v nichž lze právě nesouosost vyzorovat. Při měření byly osy měřícího zařízení posunuty vůči osám manipulátoru o hodnotu uvedenou vždy na začátku tabulky.

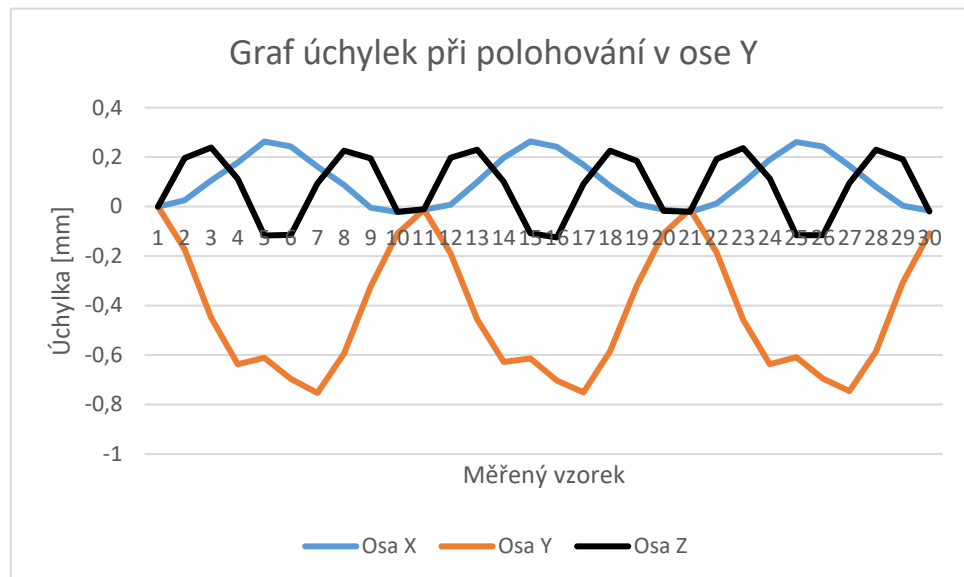
Rozsah dráhy v ose X = 443 mm, osa Y = 612 mm, osa Z = 272 mm. Měřený rozsah dráhy pro osu X = 440 mm, Y = 475, Z = 177 mm. Rozsah dráhy byl zvolen právě takto z důvodu omezeného přístupu měřícím zařízením ke koncovému bodu manipulátoru.

Zadané polohy jsou v základním rozsahu 3-osého manipulátoru, skutečná poloha je poloha změřená zařízením Zett Mess.



Obr. 5.1 Běžný zkušební cyklus (převzato a upraveno z [23])

Z obrázku Obr. 5.1 za tabulky Tab. 5.1 lze vidět postup měření, kdy se do poloh najíždí z obou stran vždy v jedné ose. Z tabulek k výpočtu úchylek bylo započten posuv osy manipulátoru vůči ose měřicího zařízení, ale jak si lze povšimnout na obrázku Obr. 5.2 a na výpočtu úchylky, osy nejsou rovnoběžné. Při měření dochází ke statické chybě, která byla způsobena především tím, že manipulátor je umístěn na stavěcích šroubech, které nebyly zcela v rovině. Zároveň také chybu způsobuje samotná konstrukce, kde lineární vedení v ose Y je připevněno na maticích do T drážek profilů, a to i přes snahu srovnat obě vedení, aby byla souběžná a vodorovná. V ose X je chyba způsobená použitím levných kuličkových vozíků, které mají vůli v ložiskách, takže je při působení síly na koncovém bodu manipulátoru je znatelná vůle, která se také mohla promítnout do měření.



Obr. 5.2 Graf úchylek při polohování v ose Y

Tab. 5.1 Tabulka naměřených hodnot a vypočtených úchylek při posuvu osy Y

	Zadaná poloha			Skutečná poloha			Úchylky		
	poloha x	poloha y	poloha z	změřená x	změřená y	změřená z	úchylka x	úchylka y	úchylka z
Posuv osy							134,8590	-120,8355	-281,0877
	-20,0000	0,0000	-100,0000						
y1	-20,0000	50,0000	-100,0000	114,8590	-70,8355	-381,0877	0,0000	0,0000	0,0000
y2	-20,0000	150,0000	-100,0000	114,8338	29,3371	-381,2840	0,0252	-0,1726	0,1963
y3	-20,0000	250,0000	-100,0000	114,7529	129,6142	-381,3263	0,1061	-0,4497	0,2386
y4	-20,0000	350,0000	-100,0000	114,6813	229,8015	-381,1995	0,1777	-0,6370	0,1118
y5	-20,0000	450,0000	-100,0000	114,5960	329,7762	-380,9713	0,2630	-0,6117	-0,1164
	-20,0000	475,0000	-100,0000						
y6	-20,0000	450,0000	-100,0000	114,6157	329,8611	-380,9732	0,2433	-0,6966	-0,1145
y7	-20,0000	350,0000	-100,0000	114,6972	229,9178	-381,1817	0,1618	-0,7533	0,0940
y8	-20,0000	250,0000	-100,0000	114,7720	129,7586	-381,3137	0,0870	-0,5941	0,2260
y9	-20,0000	150,0000	-100,0000	114,8634	29,4891	-381,2827	-0,0044	-0,3246	0,1950
y10	-20,0000	50,0000	-100,0000	114,8810	-70,7262	-381,0666	-0,0220	-0,1093	-0,0211
	-20,0000	0,0000	-100,0000						
y11	-20,0000	50,0000	-100,0000	114,8707	-70,8234	-381,0770	-0,0117	-0,0121	-0,0107
y12	-20,0000	150,0000	-100,0000	114,8513	29,3546	-381,2845	0,0077	-0,1901	0,1968
y13	-20,0000	250,0000	-100,0000	114,7596	129,6200	-381,3179	0,0994	-0,4555	0,2302
y14	-20,0000	350,0000	-100,0000	114,6621	229,7930	-381,1884	0,1969	-0,6285	0,1007
y15	-20,0000	450,0000	-100,0000	114,5961	329,7788	-380,9802	0,2629	-0,6143	-0,1075
	-20,0000	475,0000	-100,0000						
y16	-20,0000	450,0000	-100,0000	114,6176	329,8679	-380,9629	0,2414	-0,7034	-0,1248
y17	-20,0000	350,0000	-100,0000	114,6898	229,9151	-381,1793	0,1692	-0,7506	0,0916
y18	-20,0000	250,0000	-100,0000	114,7758	129,7503	-381,3130	0,0832	-0,5858	0,2253
y19	-20,0000	150,0000	-100,0000	114,8491	29,4839	-381,2718	0,0099	-0,3194	0,1841
y20	-20,0000	50,0000	-100,0000	114,8708	-70,7258	-381,0706	-0,0118	-0,1097	-0,0171
	-20,0000	0,0000	-100,0000						
y21	-20,0000	50,0000	-100,0000	114,8813	-70,8250	-381,0663	-0,0223	-0,0105	-0,0214
y22	-20,0000	150,0000	-100,0000	114,8472	29,3502	-381,2795	0,0118	-0,1857	0,1918
y23	-20,0000	250,0000	-100,0000	114,7620	129,6224	-381,3241	0,0970	-0,4579	0,2364
y24	-20,0000	350,0000	-100,0000	114,6697	229,8019	-381,2010	0,1893	-0,6374	0,1133
y25	-20,0000	450,0000	-100,0000	114,5982	329,7739	-380,9724	0,2608	-0,6094	-0,1153
	-20,0000	475,0000	-100,0000						
y26	-20,0000	450,0000	-100,0000	114,6161	329,8594	-380,9717	0,2429	-0,6949	-0,1160
y27	-20,0000	350,0000	-100,0000	114,6938	229,9106	-381,1830	0,1652	-0,7461	0,0953
y28	-20,0000	250,0000	-100,0000	114,7788	129,7501	-381,3177	0,0802	-0,5856	0,2300
y29	-20,0000	150,0000	-100,0000	114,8551	29,4701	-381,2787	0,0039	-0,3056	0,1910
y30	-20,0000	50,0000	-100,0000	114,8755	-70,7273	-381,0679	-0,0165	-0,1082	-0,0198
	-20,0000	0,0000	-100,0000						

Z těchto naměřených a vypočítaných hodnot vyplývá, že se jedná o chybu měření, která se při každém nájezdu do polohy opakuje, tím pádem bylo nutné vždy první najetí do polohy brát jako referenční a z něho následně počítat úchylky. Úchylky byly tedy počítány jako rozdíl skutečné polohy 1. referenčního měření a skutečné polohy opakovaného nájezdu.

Tab. 5.2 Tabulka naměřených a vypočítaných hodnot včetně korekce nesouososti pro osu X

	Zadaná poloha	referenční 1. měření			Opakovaný nájezd			Úchylky		
		Skutečná poloha			Skutečná poloha			úchylka x	úchylka y	úchylka z
	x	y	z	x	y	z				
Měření zprava	0	135,5108	-172,0454	-380,7375	135,5575	-172,0387	-380,7370	-0,0467	-0,0067	-0,0005
	100	235,4182	-172,2802	-380,8456	235,4452	-172,2427	-380,8305	-0,0270	-0,0375	-0,0151
	150	285,4962	-172,3869	-380,8378	285,5370	-172,3763	-380,8342	-0,0408	-0,0106	-0,0036
	200	335,5632	-172,6000	-380,7973	335,5967	-172,5834	-380,7985	-0,0335	-0,0166	0,0012
	250	385,6304	-172,7582	-380,7464	385,6659	-172,7496	-380,7694	-0,0355	-0,0086	0,0230
	300	435,6096	-173,0292	-380,6371	435,6503	-173,0249	-380,6396	-0,0407	-0,0043	0,0025
	400	535,6916	-173,3980	-380,3689	535,7101	-173,4004	-380,3771	-0,0185	0,0024	0,0082
	0				135,5455	-172,0349	-380,7346	-0,0347	-0,0105	-0,0029
	100				235,4690	-172,2687	-380,8287	-0,0508	-0,0115	-0,0169
	150				285,5344	-172,3903	-380,8493	-0,0382	0,0034	0,0115
	200				335,5955	-172,5855	-380,8037	-0,0323	-0,0145	0,0064
	250				385,6628	-172,7446	-380,7599	-0,0324	-0,0136	0,0135
	300				435,6516	-173,0219	-380,6523	-0,0420	-0,0073	0,0152
	400				535,7006	-173,3926	-380,3940	-0,0090	-0,0054	0,0251
Měření zleva	0				135,6538	-171,9925	-380,7339	-0,1430	-0,0529	-0,0036
	100				235,6988	-172,2057	-380,8295	-0,2806	-0,0745	-0,0161
	150				285,7754	-172,3818	-380,8388	-0,2792	-0,0051	0,0010
	200				335,8289	-172,5572	-380,8068	-0,2657	-0,0428	0,0095
	250				385,8993	-172,7623	-380,7611	-0,2689	0,0041	0,0147
	300				435,8838	-173,0442	-380,6412	-0,2742	0,0150	0,0041
	400				535,7833	-173,4126	-380,3659	-0,0917	0,0146	-0,0030
	0				135,6416	-172,0072	-380,7467	-0,1308	-0,0382	0,0092
	100				235,7013	-172,2204	-380,8373	-0,2831	-0,0598	-0,0083
	150				285,7644	-172,3649	-380,8398	-0,2682	-0,0220	0,0020
	200				335,8173	-172,5625	-380,8057	-0,2541	-0,0375	0,0084
	250				385,8816	-172,7528	-380,7668	-0,2512	-0,0054	0,0204
	300				435,8751	-173,0319	-380,6497	-0,2655	0,0027	0,0126
	400				535,7890	-173,4287	-380,3953	-0,0974	0,0307	0,0264
Necitlivost v ose								0,2831	0,0745	0,0264
Průměrná necitlivost v ose								-0,1298	-0,0147	0,0052
Obousměrná opakovatelnost								0,2921	0,1052	0,0433

Dle vypočtených obousměrných opakovatelností pro jednotlivé osy lze vypočítat celkovou opakovatelnost v bodu, pomocí Pythagorovy věty, kdy byly započteny vždy nejhorší výsledky obousměrné opakovatelnosti, což je vždy u měření pro konkrétní osu.

$$B = \sqrt{x^2 + y^2 + z^2} = \sqrt{0,2921^2 + 0,1052^2 + 0,0433^2} = 0,33719 \quad (1)$$

Celková opakovatelnost v bodu je 0,337 mm, což není zcela ideální, ale pro účely, pro které byl manipulátor navržen, je to dostačující. Zároveň tato hodnota je nejhorší možná a jak je vidět z naměřených hodnot, ve skutečnosti je přesnost na celkem obstojné úrovni.

Některé nepřesnosti zařízení lze odstranit doladěním mechanické konstrukce, především vyrovnáním všech vedení do souběžnosti. Tuhost konstrukce v současném stavu bohužel již nelze příliš vylepšit, bylo by nutné použít místo vodících tyčí profilované kolejničky a patřičné vozíky. Zároveň by bylo také vhodné použít větší řemen pro pohon os X a Y, nebo případně použít pohon přes kuličkový šroub, který disponuje největší přesností a tuhostí.

Tab. 5.3 Tabulka naměřených a vypočítaných hodnot včetně korekce nesouososti pro osu Y

Zadaná poloha	referenční 1. měření			Opakovaný nájezd			Úchytky			
	Skutečná poloha			Skutečná poloha						
	x	y	z	x	y	z	úchytko x	úchytko y	úchytko z	
Měření zleva	20	334,8918	-166,1041	-260,6333	334,8816	-166,0973	-260,6187	0,0102	-0,0068	-0,0146
	-14	334,8844	-166,0514	-294,6237	334,8912	-166,0491	-294,6098	-0,0068	-0,0023	-0,0139
	-48	334,8745	-166,0015	-328,6154	334,8915	-165,9775	-328,6147	-0,0170	-0,0240	-0,0007
	-82	334,9212	-165,9343	-362,6369	334,9187	-165,9053	-362,6164	0,0025	-0,0290	-0,0205
	-130	334,9236	-165,7620	-410,5966	334,9242	-165,7817	-410,6173	-0,0006	0,0197	0,0207
	20				334,8833	-166,0861	-260,6146	0,0085	-0,0180	-0,0187
	-14				334,8938	-166,0490	-294,6133	-0,0094	-0,0024	-0,0104
	-48				334,8858	-165,9875	-328,6110	-0,0113	-0,0140	-0,0044
Měření zprava	-130				334,9261	-165,9095	-362,6065	-0,0049	-0,0248	-0,0304
	-130				334,9264	-165,7658	-410,6147	-0,0028	0,0038	0,0181
	20				334,8841	-166,1064	-260,6039	0,0077	0,0023	-0,0294
	-14				334,8817	-166,0206	-294,6061	0,0027	-0,0308	-0,0176
	-48				334,8952	-165,9869	-328,6017	-0,0207	-0,0146	-0,0137
	-82				334,9257	-165,8986	-362,6167	-0,0045	-0,0357	-0,0202
	-130				334,9191	-165,7697	-410,5997	0,0045	0,0077	0,0031
	20				334,8862	-166,0841	-260,6114	0,0056	-0,0200	-0,0219
	-14				334,8902	-166,0558	-294,6074	-0,0058	0,0044	-0,0163
	-48				334,8898	-165,9981	-328,6090	-0,0153	-0,0034	-0,0064
	-82				334,9179	-165,9133	-362,6228	0,0033	-0,0210	-0,0141
-130				334,9286	-165,7937	-410,6059	-0,0050	0,0317	0,0093	
	Necitlivost v ose						0,0207	0,0357	0,0304	
	Průměrná necitlivost v ose						-0,0030	-0,0089	-0,0101	
	Obousměrná opakovatelnost						0,0309	0,0674	0,0511	

Tab. 5.4 Tabulka naměřených a vypočítaných hodnot včetně korekce nesouososti pro osu Z

	Zadaná poloha	referenční 1. měření			Opakovaný nájezd			Úchytky		
		Skutečná poloha			Skutečná poloha			úchytko x	úchytko y	úchytko z
		x	y	z	x	y	z			
Měření zprava	50	114,8590	-70,8355	-381,0877	114,8707	-70,8234	-381,0770	-0,0117	-0,0121	-0,0107
	150	114,8338	29,3371	-381,2840	114,8513	29,3546	-381,2845	-0,0175	-0,0175	0,0005
	250	114,7529	129,6142	-381,3263	114,7596	129,6200	-381,3179	-0,0067	-0,0058	-0,0084
	350	114,6813	229,8015	-381,1995	114,6621	229,7930	-381,1884	0,0192	0,0085	-0,0111
	450	114,5960	329,7762	-380,9713	114,5961	329,7788	-380,9802	-0,0001	-0,0026	0,0089
	50				114,8813	-70,8250	-381,0663	-0,0223	-0,0105	-0,0214
	150				114,8472	29,3502	-381,2795	-0,0134	-0,0131	-0,0045
	250				114,7620	129,6224	-381,3241	-0,0091	-0,0082	-0,0022
	350				114,6697	229,8019	-381,2010	0,0116	-0,0004	0,0015
	450				114,5982	329,7739	-380,9724	-0,0022	0,0023	0,0011
Měření zleva	50				114,8810	-70,7262	-381,0666	-0,0220	-0,1093	-0,0211
	150				114,8634	29,4891	-381,2827	-0,0296	-0,1520	-0,0013
	250				114,7720	129,7586	-381,3137	-0,0191	-0,1444	-0,0126
	350				114,6972	229,9178	-381,1817	-0,0159	-0,1163	-0,0178
	450				114,6157	329,8611	-380,9732	-0,0197	-0,0849	0,0019
	50				114,8708	-70,7258	-381,0706	-0,0118	-0,1097	-0,0171
	150				114,8491	29,4839	-381,2718	-0,0153	-0,1468	-0,0122
	250				114,7758	129,7503	-381,3130	-0,0229	-0,1361	-0,0133
	350				114,6898	229,9151	-381,1793	-0,0085	-0,1136	-0,0202
	450				114,6176	329,8679	-380,9629	-0,0216	-0,0917	-0,0084
	50				114,8755	-70,7273	-381,0679	-0,0165	-0,1082	-0,0198
	150				114,8551	29,4701	-381,2787	-0,0213	-0,1330	-0,0053
	250				114,7788	129,7501	-381,3177	-0,0259	-0,1359	-0,0086
	350				114,6938	229,9106	-381,1830	-0,0125	-0,1091	-0,0165
	450				114,6161	329,8594	-380,9717	-0,0201	-0,0832	0,0004
	Necitlivost v ose							0,0296	0,1520	0,0214
	Průměrná necitlivost v ose							-0,0134	-0,0733	-0,0087
	Obousměrná opakovatelnost							0,0488	0,1605	0,0303

5.2 Rychlost posuvu a rozlišení

Rychlost posuvu se skládá z několika parametrů. Těmito parametry jsou nejmenší možný pulz generovaný řídicím systémem, počet kroků motoru na jednu otáčku a stoupavost kuličkového šroubu, který je napojený na motor, případně průměr řemenic.

Vzhledem k použité konstrukci bude počítána rychlost posuvu pro osy X a Y společná a pro osu Z jiná. V praxi je maximální rychlost omezena softwarově, takže těchto teoreticky možných hodnot není využíváno ať už z pohledu zamezení velkých proudových špiček tak z pohledu bezpečnosti. Ačkoliv jsou na krajích umístěny koncové indukční snímače, při vysokých rychlostech by mohlo dojít k nárazu pohyblivé části s konstrukcí.

Minimální šířka pulzu generovaná CNC deskou je 25 μ s, počet kroků na otáčku motorů X,Y je 4000, průměr řemenice napojené na motor je 36 mm.

V případě otočení motoru o jednu otáčku je tedy pohyblivá část posunuta o vzdálenost velikosti obvodu řemenice.

$$o_{XY} = \pi d = \pi \cdot 36 \doteq 113,1 \text{ mm} \quad (2)$$

$$R_{XY} = \frac{o}{K_{XY}} = \frac{113,1 \cdot 10^{-3}}{4000} \doteq 28,28 \text{ } \mu\text{m} \quad (3)$$

Z tohoto výpočtu vyplývá rozlišení systému pro osy XY, které činí 28,28 μm , což je nejmenší možný krok, který systém může udělat. Tento krok naprosto předčí přesnost systému, nicméně počet kroků na otáčku byl zvolen takto vysoký z hlediska plynulejšího a tiššího chodu motorů.

$$v_{maxXY} = \frac{R_{XY}}{t_{PULZ}} = \frac{28,28 \cdot 10^{-6}}{25 \cdot 10^{-6}} \doteq 1,1312 \text{ m/s} \quad (4)$$

Pro výpočet rychlosti byla použita minimální šířka pulzu generovaná řídicím kontrolérem a rozlišení systému v dané ose. Z výpočtu (4) vyplývá maximální rychlost pro posuv v ose XY, která činí 1,131 m/s, což je velmi slušný výsledek.

Osa Z je samostatná a je zde použit i jiný motor s jiným krokováním, proto je nezbytné spočítat pro něj samostatně rozlišení a maximální rychlost. Krokování motoru bylo zvoleno 4000 kroků na otáčku, ze stejných důvodů jako v ose XY, a to je hladký a tichý chod. U tohoto motoru pro hladký chod postačovalo 2000 kroků na otáčku díky 3-fázové konstrukci.

V případě osy Z jsou zde použity dvě řemenice, které jsou ale v poměru 1/1, takže nedochází k žádné převodové změně a kuličkový šroub je otáčen právě o takový úhel, o který se pootočí motor. Rozlišení systému je tedy odvozeno od stoupavosti kuličkového šroubu, které činí 10 mm/ot.

$$R_Z = \frac{s}{K_Z} = \frac{10}{2000} = 5 \text{ } \mu\text{m} \quad (5)$$

$$v_{maxZ} = \frac{R_Z}{t_{PULZ}} = \frac{5 \cdot 10^{-6}}{25 \cdot 10^{-6}} = 0,2 \text{ m/s} \quad (6)$$

Rozlišení v ose Z činí 5 μm a z té také vyplývá maximální rychlost, kterou lze dosáhnout v ose Z a to je 0,2 m/s. Rychlost by šla ještě zvýšit v případě, že by bylo použito jiné krokování, ale tato rychlost je zcela dostačující vzhledem k tomu, že zdvih osy v případě testování není velký.

Celková maximální rychlost se skládá z rychlosti v ose XY a ose Z, kdy výsledná rychlost je vypočítána přes Pythagorovu větu.

$$v_{celk} = \sqrt{s_{XY}^2 + s_Z^2} = \sqrt{1,1312^2 + 0,2^2} = 1,1487 \text{ m/s} \quad (7)$$

Maximální rychlost systému je omezena na 20000 mm/min, což je 333,3 m/s. Omezení je zde z bezpečnostního pohledu a je pouze softwarové, takže ho lze změnit.

5.3 Pracovní prostor

Pracovní prostor manipulátoru činí 450 x 615 x 275 mm. Celá pracovní plocha však není používána, jsou zde nastaveny softwarové limity, které zabraňují kolizím v případě provedení kalibrace. Takže lze využít prostor o rozměrech 435 x 610 x 270 mm. V případě stavby dalšího manipulátoru lze relativně snadno konstrukci a posuvy zvětšit, takže rozšíření pracovního prostoru je možné, ale za použití stávající koncepce by se ještě prohloubily vůle v řemenu. Bylo by tedy vhodné tedy použít kuličkové šrouby pro pohon.

5.4 Porovnání manipulátoru s robotem UR5

Tab. 5.5 Porovnání základních parametrů robotu UR5 a 3osého manipulátoru

Parametr	UR5	3osý manipulátor
Počet stupňů volnosti	6	3
Užitečné zatížení	5 kg	-
Dosah ramene	850 mm	
Pracovní prostor		435 x 610 x 270 mm
Rychlost	1 m/s	0,33 m/s
Rozsah kloubů	+ - 360°	-
Přesnost	0,1 mm	0,33 mm
Hmotnost	18 kg	cca 60 kg
Příkon	200 W	-
Třída ochrany	IP54	-
Napájení	200-240 V, 50/60 Hz	230 V, 50/60 Hz
Konektivita	Ethernet, Modbus	Ethernet, USB
Cena	23 500 eur	7 560 eur

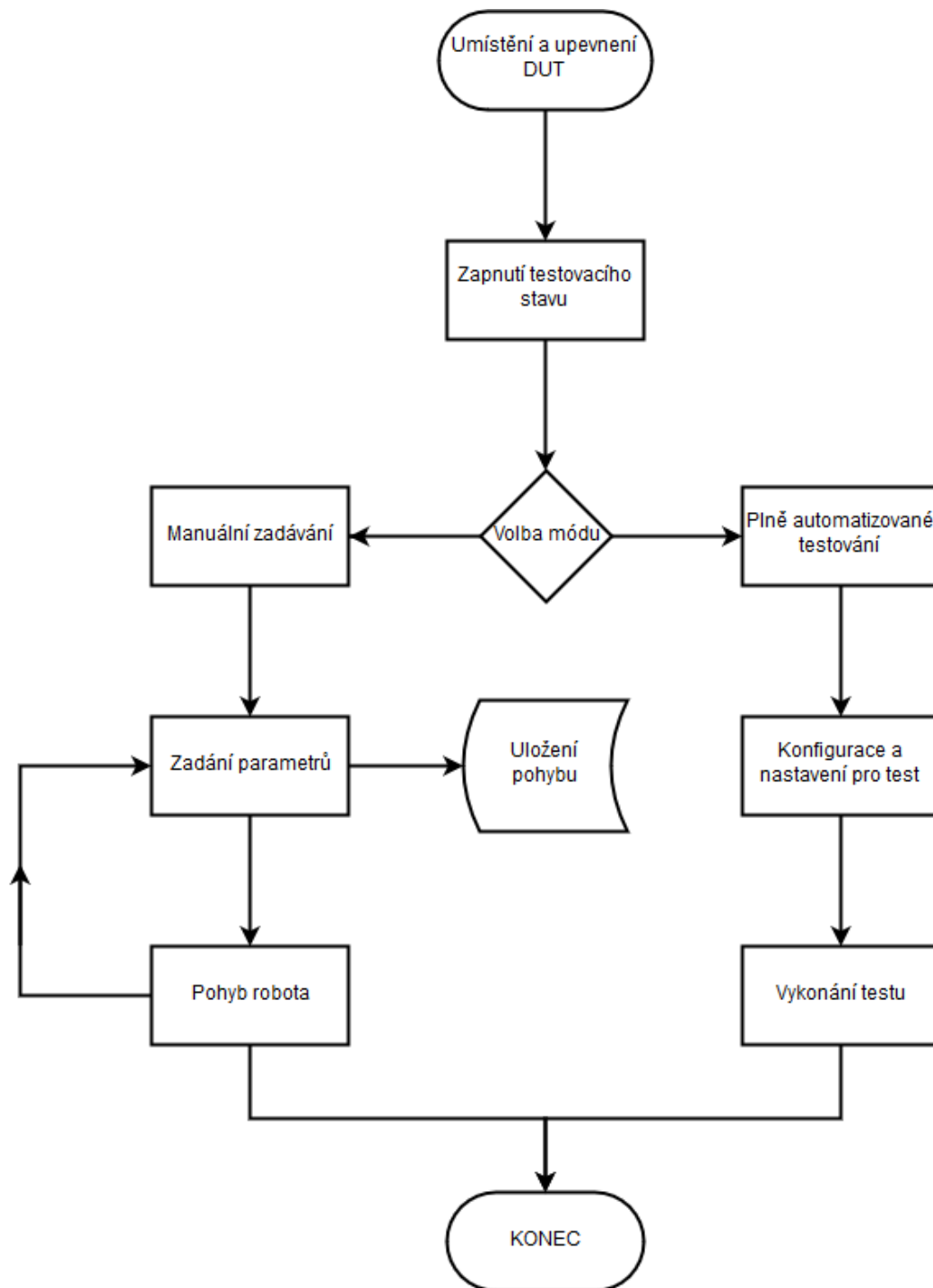
V tabulce Tab. 5.5 lze vidět přímé porovnání základních parametrů robotické ruky a 3osého manipulátoru. Pro automatizované testování je ale nezbytně nutné sestrojít ještě konstrukci, pro uchycení robotické ruky a testovaného zařízení.

Co se týká propojení systému s nástroji pro automatizované testování, v případě UR5 se využívá přímé volání vytvořených pohybových sekvencí v kontroléru. V případě 3osého manipulátoru se využívá vyčítání požadované polohy z textového souboru, do kterého lze zapsat z nástroje pro automatizované testování a následně podat požadavek na pohyb, kdy aplikace vyvinutá v LabVIEW vyčte z textového souboru a odešle požadavek CNC desce.

Robotický stav na bázi UR5 v současné době disponuje řídicím PC s Provetech:TA a PROVEtech:RE, což jsou nástroje pro automatizované testování a nástrojem Vision Builder pro rozpoznávání a zpracování obrazu, přes kterou se kontrolují provedené testové kroky. Pro testování HMI, konkrétně multimediálního systému byl ještě přidán Vector CANcase, který slouží pro simulaci okolí pomocí CAN sběrnice a pro přepínání vstupů u USB CAN switchu, kdy se simuluje zasunutí USB do rádia. Bluetooth dongle, který slouží pro simulaci bluetooth zařízení, například mobilního telefonu včetně všech dostupných funkcí a samozřejmě zdroj pro napájení DUT. Ani jeden z těchto komponent není zahrnut v ceně, jelikož se jedná o konkrétní integraci pro jednotlivý typ testovaného zařízení.

Robotický stav na bázi 3osého manipulátoru zatím nebyl integrován pro konkrétní DUT, ale již byla provedena rešerše na rozšíření a integraci pro bílou techniku, konkrétně dotykové varné desky, pro kterou je tato konstrukce téměř ideální, jediné co by bylo potřeba přidat z pohledu mechanické stránky je upravený držák pro DUT, 4. rotační osa s absolutním enkodérem a kamery pro snímání a rozpoznání obrazu.

Princip chodu testování pomocí 3osého manipulátoru lze vidět na Obr. 5.3, kdy je možnost zadávat pohyby manuálně a následně je ukládat do textového souboru, který následně lze využít pro reprodukovatelnost těchto manuálních pohybů, případně k tvorbě dokumentace pro ruční testy.



Obr. 5.3 Vývojový diagram testování

Závěr

Cílem práce bylo na základě mechanické konstrukce zvolit vhodný způsob řízení manipulátoru, vytvoření uživatelského rozhraní pro manuální obsluhu a vytvoření způsobu, jak řídit manipulátor i z nástrojů pro automatizované testování. Zadání bylo splněno.

Práce byla rozdělena na 5 částí, v první části byl stručně popsán cíl a motivace pro automatizované testování, kde bylo zjištěno, že automatizované testování je v dnešní době výrazně důležitější než dříve, protože vývoj nových technologií jde stále rychleji dopředu a testování již tomuto vývoji nestačí. Automatizované testování snižuje časovou náročnost na testy a zároveň zajišťuje reprodukovatelnost a ihned i vytváří dokumentaci k provedeným testům. V poslední době se stále více využívá i řídicích jednotek s tzv. human machine interface, kdy je nutné testovat i odezvu na dotek, případně reakci na vložení CD, SD karty, kde již pouze softwarová simulace není dostatečná. Právě pro tyto případy se využívá robotizovaných systémů a snímání a vyhodnocení obrazu.

Druhá část již byla věnována praktické části, kde byla provedena rešerše pohonů a jejich řízení, dále elektronických chapadel a samotného řídicího kontroléru pro robotický manipulátor. Zároveň byly v této části popsány vybrané motory a budiče motorů. Vzhledem k požadavku na cenu byly zvoleny krokové motory, které se v těchto aplikacích velmi často používají. Důkazem toho jsou v poslední době velmi rozšířené 3D tiskárny, ve kterých jsou téměř vždy použity krokové motory. Bylo zde také popsáno srdce celého systému, tedy kontrolér. Bylo zváženo několik architektur, kdy ale opět s důrazem na cenu bylo zvoleno nízkonákladové řešení a použití interpolační desky pro CNC zařízení. Kapitola se zabývá také popisem konkrétní mechanické konstrukce, která byla vyvinuta ve spolupráci s oddělením konstrukce pohonů, a byla zde popsána elektrická konstrukce a zapojení systému.

Následující, třetí kapitola byla věnována ochranným opatřením na konstrukci, požadavkům na ovládání systému a EMC, zároveň zde byly popsány požadavky a způsoby měření EMC odolnosti i emisivity. Tato kapitola byla zpracována s důrazem na splnění požadavků pro vydání prohlášení o shodě CE.

Kapitola Řídicí software byla věnována popisu vyvinuté aplikace, v níž je možné ovládat manipulátor z uživatelského rozhraní i z nástrojů pro automatizované testování za pomoci

zápisu požadovaných souřadnic do textového souboru a následným vykonáním události v consumer smyčce pro posuv v absolutních souřadnicích. Při běhu na notebooku s dvoujádrovým procesorem Intel Core i5 o taktu 2,5 GHz a 4GB RAM aplikace zatěžuje procesor v průměru na 3% a zabírá necelých 100MB v paměti.

V poslední kapitole byly rozebrány základní parametry manipulátoru, především přesnost, která byla prověřována na zařízení Zett mess pro měření tolerancí s přesností 50,0 μm . Výpočet přesnosti byl proveden na základě normy ISO 230 – 2:2006, kdy ale muselo dojít ke korekcím kvůli ne zcela dobře provedené kalibraci z důvodu omezeného přístupu měřicí sondy k měřeným osám. Bylo zde rozebráno i rozlišení systému, maximální rychlost a možnosti rozšíření pracovního prostoru systému.

Na závěr bylo zmíněno porovnání systému pro automatizované testování na bázi robotu UR5 a vyvinutého manipulátoru se třemi osami, z kterého vyplynulo, že pro jednodušší aplikace použití tří, potažmo čtyřosého manipulátoru má význam, ale vzhledem k použitým komponentům, které jsou nízkonákladové, by bylo komplikované zaručit bezchybný chod celého manipulátoru. V případě prodeje zařízení zákazníkům by bylo potřeba změnit řídicí systém i použité drivery s motory. Jako vhodné řešení s dobrým poměrem cena/výkon by mohl být systém založený na PLC.

Seznam literatury a informačních zdrojů

- [1] DALECKÝ, Filip. *Návrh testovacího pracoviště pro automatizované testování elektronické řídicí jednotky* [online]. Brno: Vysoké učení technické v Brně. Fakulta strojního inženýrství. 2015. [cit. 2017-10-14]
Dostupné z: <http://hdl.handle.net/11012/41630>.
- [2] KUBÍK, Michal. *Testování elektronických systémů automobilu* [online]. 2011. [cit. 2017-10-14] Dostupné z: <http://hdl.handle.net/11025/5146>
- [3] BHIDE, Rajashree M. *Automated Testing Tool for Engine Software* [online]. 2016. [cit. 2017-11-19]
Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?arnumber=7877725>
- [4] KRÁLÍK, J. *Návrh pohonu se stejnosměrným motorem, pro náhradu krokového motoru* [online]. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2016. [cit. 2018-04-09]
Dostupné z: https://dspace.vutbr.cz/bitstream/handle/11012/59058/2016_BP_Kralik_Jan_162899.pdf?sequence=2&isAllowed=y
- [5] ŘEZÁČ, Kamil. *Krokové motory* [online]. 2002. [cit. 2018-04-09].
Dostupné z: <https://robotika.cz/articles/steppers/cs>
- [6] MRÁZ, Přemysl. *Řízení technologického procesu pomocí PLC* [online]. 2006. [cit. 2018-04-06]
Dostupné z: https://support.dce.felk.cvut.cz/mediawiki/images/9/99/Dp_2006_mraz_premysl.pdf
- [7] *Stepper Motor Technical Note: Microstepping: Myths and Realities* [online]. Micromo 2015 [cit. 2018-05-09] Dostupné z: www.micromo.com.
- [8] FRYDLEWICZ, Lukasz. *Řídicí jednotka souřadnicové frézky s krokovými motory* [online]. 2014. [cit. 2018-04-09]
Dostupné z: https://dspace5.zcu.cz/bitstream/11025/15243/1/BP_Lukasz_Frydlewicz.pdf
- [9] JEHLÁŘ, Zbyněk. *VLIV EXTERNÍCH ELEKTROMAGNETICKÝCH POLÍ NA FUNKCI SNÍMACU OTÁČEK* [online]. 2009. [cit. 2018-04-03]
Dostupné z: https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=14936
- [10] KOMÁREK. *Speciální pohony* [online]. Praha ČVUT: Katedra elektrických pohonů a trakce. 2004. [cit. 2018-04-03]
Dostupné z: http://motor.feld.cvut.cz/sites/default/files/predmety/A1M14PO2/Prednaska_6_Spec_pohony.pdf
- [11] *CNCshop.cz - CNC & automatizace* [online]. CNCshop.cz 2010. [cit. 2018-04-03]
Dostupné z: <http://www.cncshop.cz/>
- [12] *Leadshine - Leading Technology, Shining Value* [online]. Leadshine [cit. 2018-05-09]
Dostupné z: <http://www.leadshine.com/>
- [13] ZAJAČEK, Michal. *Jak se řídí krokové motory* [online]. 2014. [cit. 2018-05-09]
Dostupné z: <http://www.stomisi.cz/jak-se-ridi-krokovy-motory>

- [14] LAUFFEN/NECKAR. *Schunk Electric Servo 2 - Finger Parallel Gripper WSG 50* [online]. 2018. [cit. 2018-05-09]
Dostupné z: <https://schunk.com/fileadmin/pim/docs/IM0004935.PDF>
- [15] *Electric Grippers - LEH-E* [online]. SMC Expertise - Passion - Automation [cit. 2018-05-09] Dostupné z: http://content2.smcetech.com/pdf/LEH-E_EU.pdf
- [16] *PLC - Programovatelný logický automat* [online]. PLC automatizace [cit. 2018-05-09]
Dostupné z: <http://www.plc-automatizace.cz/knihovna/plc.htm>
- [17] *Siemens Industry mall - Česká republika* [online]. Siemens [cit. 2018-05-09]
Dostupné z: <https://mall.industry.siemens.com>
- [18] *National Instruments: Testovací, měřicí a integrované systémy* [online]. National Instruments 2018. [cit. 2018-05-09] Dostupné z: <http://www.ni.com>
- [19] *Planet CNC - CNC USB Controllers* [online]. PlanetCNC 2018. [cit. 2018-05-09]
Dostupné z: <https://planet-cnc.com/>
- [20] BC. JAROSLAV BUBENÍČEK. *ElektroPrůmysl.cz* [online]. 2015. [cit. 2018-05-09]
Dostupné z: <http://www.elektroprumysl.cz/casopis/2015/srpen/files/assets/common/downloads/publication.pdf>
- [21] ČSN EN 55011, *Průmyslová, vědecká a lékařská zařízení - Charakteristiky vysokofrekvenčního rušení - Meze a metody měření*. B.m.: Úřad pro technickou normalizaci metrologii a státní zkušebnictví. 2010.
- [22] ČSN EN 61000-6-2, *Elektromagnetická kompatibilita (EMC) - Část 6-2: Kmenové normy - Odolnost pro průmyslové prostředí (IEC 61000-6-2:2005)*. B.m.: Český normalizační institut. 2006.
- [23] BRAVENEC, Libor. *Polohování CNC frézky dle normy ISO 230-2* [online]. 2012. [cit. 2018-05-09]
Dostupné z: <https://theses.cz/id/8kly2v/?lang=en;furl=%2Fid%2F8kly2v%2F>
- [24] MULLANY, Brigid. *Evaluation And Comparison Of The Different Standards Used To Define The Positional Accuracy And Repeatability Of Numerically Controlled Machining Center Axes* [online]. 2007. [cit. 2018-05-09]
Dostupné z: www.amtonline.org/article_download.cfm?article_id=63300

Přílohy

Příloha A – Elektrické schéma zapojení manipulátoru

A

B

C

D

E

F

1

2

3

4

Electrical documentation of 3-axis manipulator for automated testing

Project:	MBB_robot_construction		
Title:	Cover sheet		
Drawn by:	J.Vanek		
Date:	12.3.2017		Sheet: 1 of 8



MBtech Bohemia s.r.o.

A

B

C

D

E

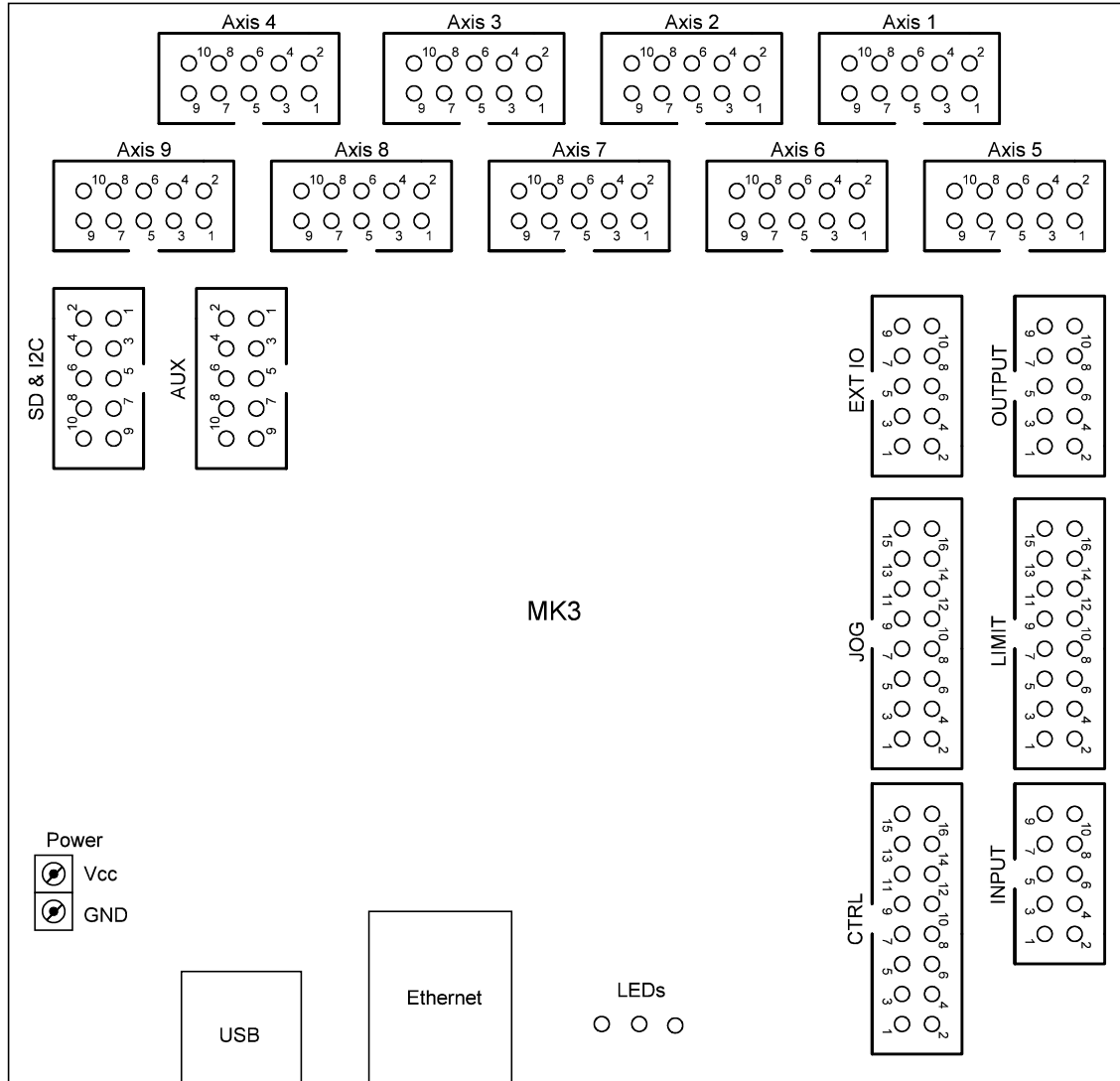
F


1

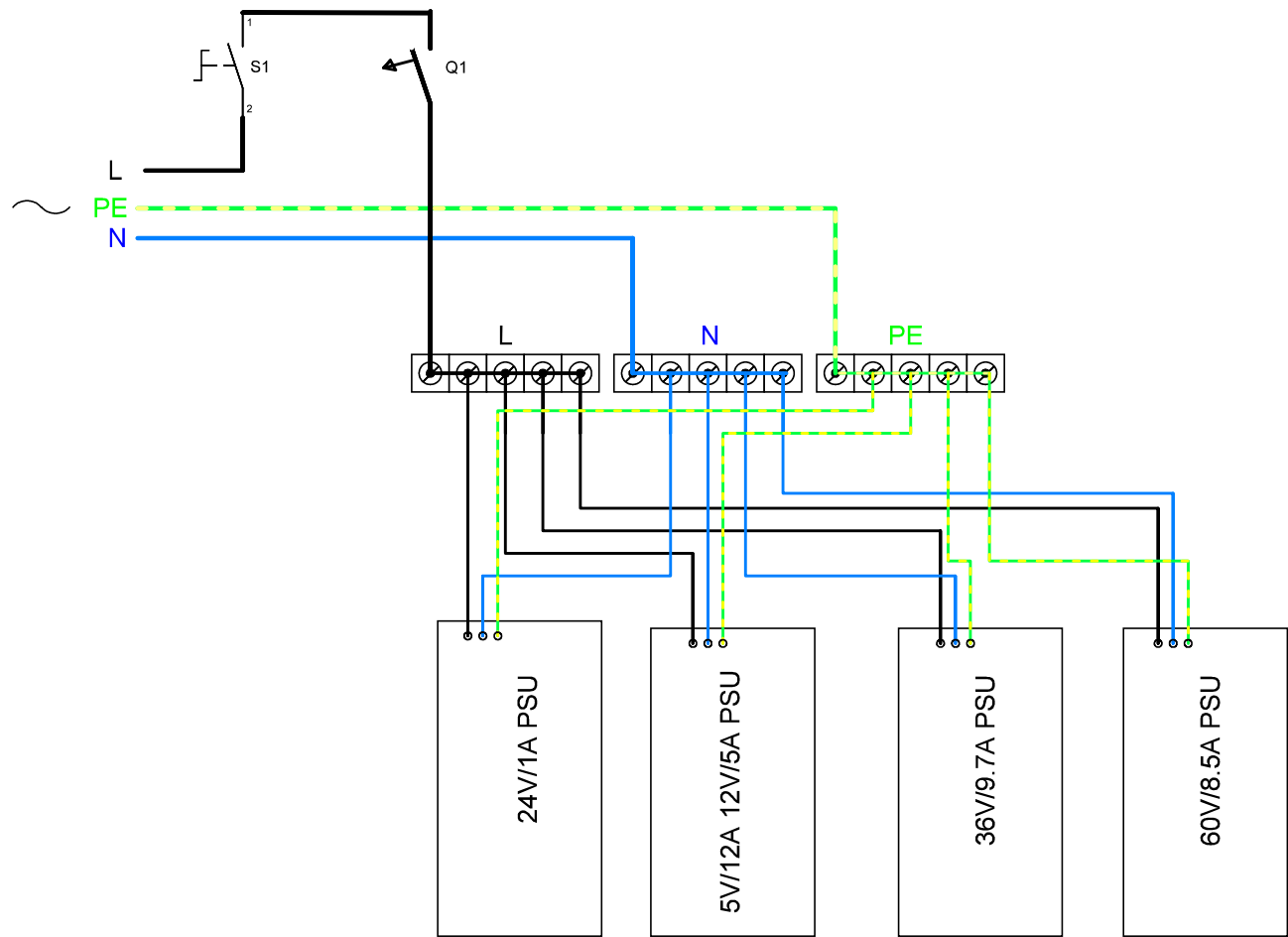
2


3

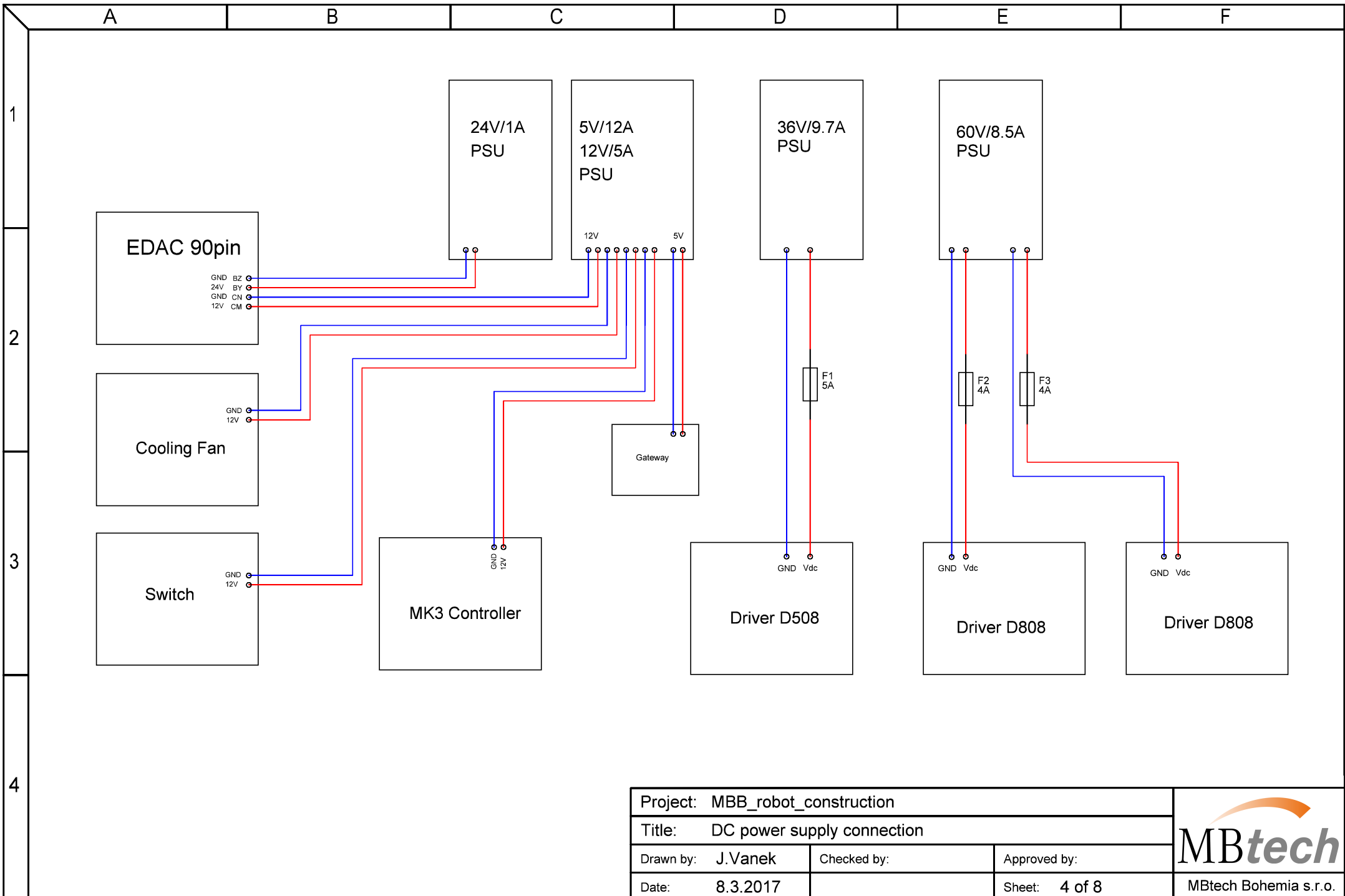
4



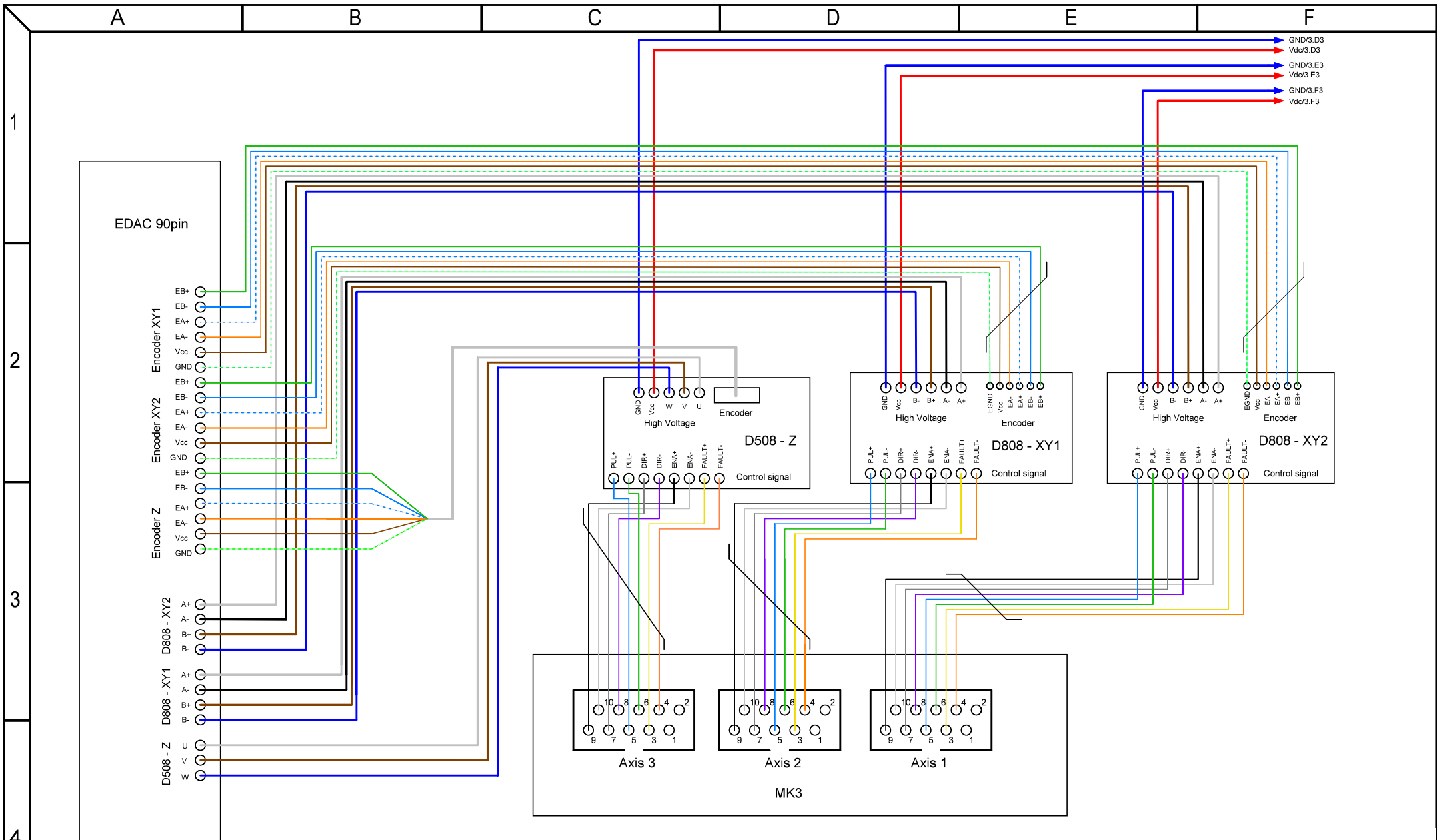
Project: MBB_robot_construction			 MBtech Bohemia s.r.o.
Title: CNC desk MK3 pinout			
Drawn by: J.Vanek	Checked by:	Approved by:	
Date: 12.3.2017		Sheet: 2 of 8	



Project: MBB_robot_construction			 MBtech Bohemia s.r.o.
Title: Mains connection			
Drawn by: J.Vanek	Checked by:	Approved by:	
Date: 6.3.2017		Sheet: 3 of 8	



Project: MBB_robot_construction		
Title: DC power supply connection		
Drawn by: J.Vanek	Checked by:	Approved by:
Date: 8.3.2017		Sheet: 4 of 8



Project: MBB_robot_construction		
Title: Motor Driver connection		
Drawn by: J.Vanek	Checked by:	Approved by:
Date: 8.3.2018		Sheet: 5 of 8

A

B

C

D

E

F

1

Switchboard - robot

Encoder XY1

EB+	EB-	EA-	EA+	Vcc	GND
A	B	C	D	E	F

Encoder XY2

EB+	EB-	EA-	EA+	Vcc	GND
H	J	K	L	M	N

Encoder Z

EB+	EB-	EA-	EA+	Vcc	GND
P	R	S	T	U	V

Proximity X1 out

Proximity X2 out

Proximity Y1 out

Proximity Y2 out

Proximity Z1 out

Proximity Z2 out

E-STOP

GND (E-STOP)

24V Gripper

GND Gripper

Motor XY1

12V	GND	PE	B+	A-	A+	B-
CM	CN	CP	CR	CS	CT	CU

Motor XY2

B+	A-	A+	B-	B+	A-	A+	B-
CW	CX	CY	CZ	DA	DB	W	

Motor Z

U	V	W
DA	DB	

2

3

A	B	C	D	E	F
EB+	EB-	EA-	EA+	Vcc	GND

Encoder XY1

H	J	K	L	M	N
EB+	EB-	EA-	EA+	Vcc	GND

Encoder XY2

P	R	S	T	U	V
EB+	EB-	EA-	EA+	Vcc	GND

Encoder Z

Proximity X1 out

Proximity X2 out

Proximity Y1 out

Proximity Y2 out

Proximity Z1 out

Proximity Z2 out

E-STOP

GND (E-STOP)

24V Gripper

GND Gripper

12V	GND	PE	B+	A-	A+	B-
CM	CN	CP	CR	CS	CT	CU

Motor XY1

B+	A-	A+	B-	B+	A-	A+	B-
CW	CX	CY	CZ	DA	DB	W	

Motor XY2

U	V	W
DA	DB	

Motor Z

Switchboard - external

4

Project: MBB_robot_construction

Title: Interconnecting cable and Edac connector pinout

Drawn by: J.Vanek

Checked by:

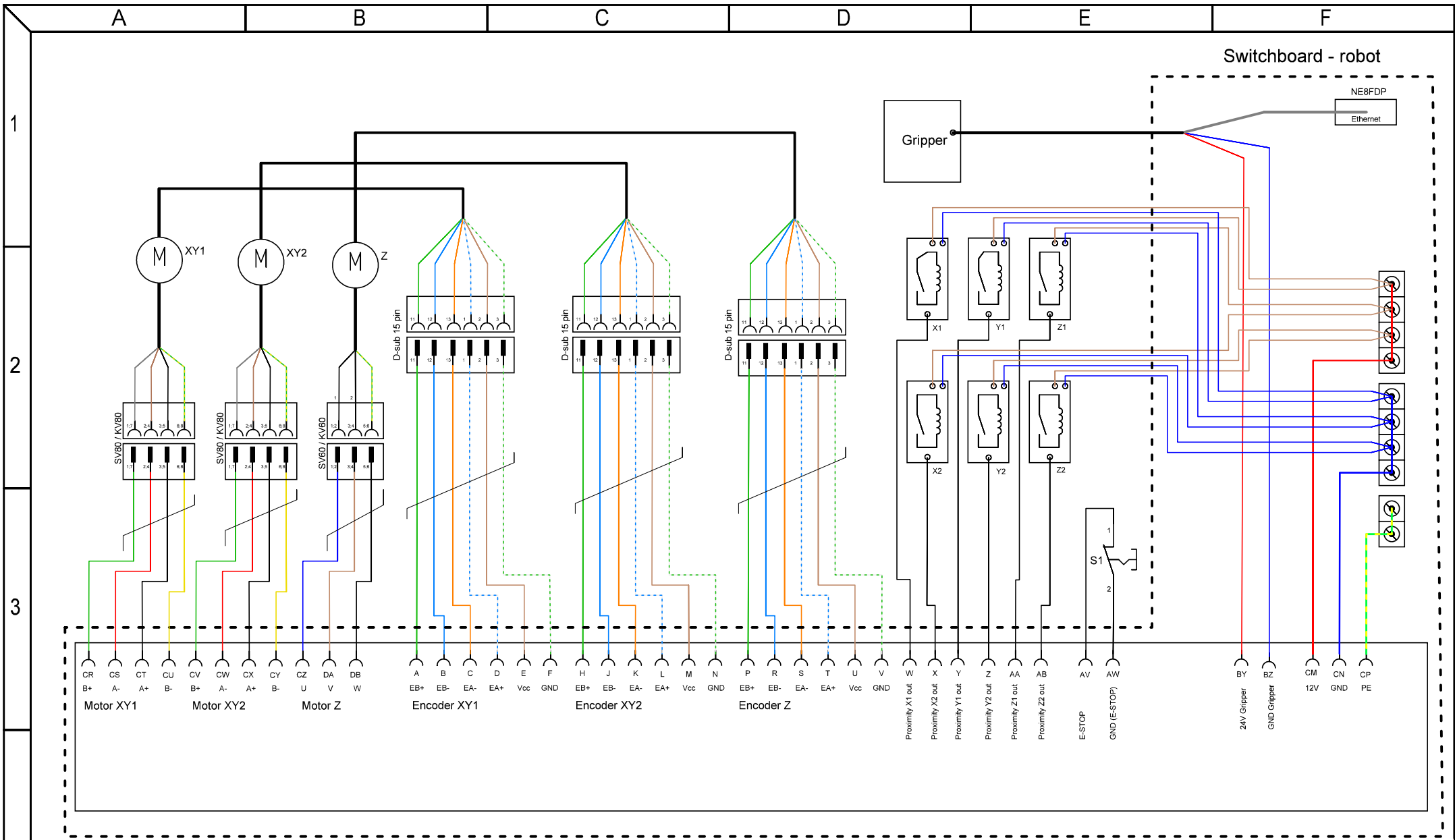
Approved by:


Date: 8.3.2017

Sheet: 6 of 8



MBtech Bohemia s.r.o.



Project: MBB_robot_construction			 MBtech Bohemia s.r.o.
Title: Robot switchboard connection and robot wiring			
Drawn by: J.Vanek	Checked by:	Approved by:	
Date: 6.3.2017		Sheet: 7 of 8	

A

B

C

D

E

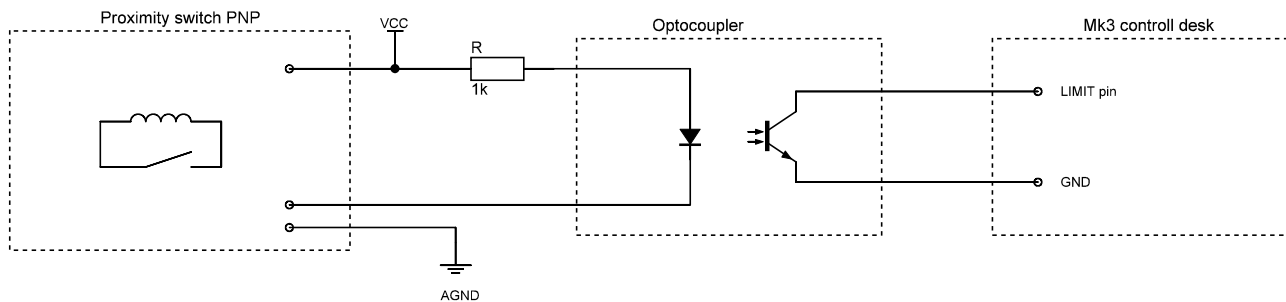
F


1

2

3

4



Project: MBB_robot_construction			 MBtech MBtech Bohemia s.r.o.
Title: Proximity sensor connection			
Drawn by: J.Vanek	Checked by:	Approved by:	
Date: 14.3.2017		Sheet: 8 of 8	

Příloha B – měření přesnosti v ose X

Tab. B1 Tabulka měření přesnosti osy X

	Poloha X	Poloha Y	Poloha Z	Změřená X	Změřená Y	Změřená Z
Bod						
x1	-20,0000	-55,0000	-100,0000	116,0954	-172,0244	-380,6816
x2	0,0000	-55,0000	-100,0000	135,5108	-172,0454	-380,7375
x3	50,0000	-55,0000	-100,0000	185,5630	-172,2051	-380,7838
x4	100,0000	-55,0000	-100,0000	235,4182	-172,2802	-380,8456
x5	150,0000	-55,0000	-100,0000	285,4962	-172,3869	-380,8378
x6	200,0000	-55,0000	-100,0000	335,5632	-172,6000	-380,7973
x7	250,0000	-55,0000	-100,0000	385,6304	-172,7582	-380,7464
x8	300,0000	-55,0000	-100,0000	435,6096	-173,0292	-380,6371
x9	400,0000	-55,0000	-100,0000	535,6916	-173,3980	-380,3689
	420,0000	-55,0000	-100,0000			
x10	400,0000	-55,0000	-100,0000	535,7833	-173,4126	-380,3659
x11	300,0000	-55,0000	-100,0000	435,8838	-173,0442	-380,6412
x12	250,0000	-55,0000	-100,0000	385,8993	-172,7623	-380,7611
x13	200,0000	-55,0000	-100,0000	335,8289	-172,5572	-380,8068
x14	150,0000	-55,0000	-100,0000	285,7754	-172,3818	-380,8388
x15	100,0000	-55,0000	-100,0000	235,6988	-172,2057	-380,8295
x16	0,0000	-55,0000	-100,0000	135,6538	-171,9925	-380,7339
	-20,0000	-55,0000	-100,0000			
x17	0,0000	-55,0000	-100,0000	135,5575	-172,0387	-380,7370
x18	100,0000	-55,0000	-100,0000	235,4452	-172,2427	-380,8305
x19	150,0000	-55,0000	-100,0000	285,5370	-172,3763	-380,8342
x20	200,0000	-55,0000	-100,0000	335,5967	-172,5834	-380,7985
x21	250,0000	-55,0000	-100,0000	385,6659	-172,7496	-380,7694
x22	300,0000	-55,0000	-100,0000	435,6503	-173,0249	-380,6396
x23	400,0000	-55,0000	-100,0000	535,7101	-173,4004	-380,3771
	420,0000	-55,0000	-100,0000			
x24	400,0000	-55,0000	-100,0000	535,7890	-173,4287	-380,3953
x25	300,0000	-55,0000	-100,0000	435,8751	-173,0319	-380,6497
x26	250,0000	-55,0000	-100,0000	385,8816	-172,7528	-380,7668
x27	200,0000	-55,0000	-100,0000	335,8173	-172,5625	-380,8057
x28	150,0000	-55,0000	-100,0000	285,7644	-172,3649	-380,8398
x29	100,0000	-55,0000	-100,0000	235,7013	-172,2204	-380,8373
x30	0,0000	-55,0000	-100,0000	135,6416	-172,0072	-380,7467
	-20,0000	-55,0000	-100,0000			
x31	0,0000	-55,0000	-100,0000	135,5455	-172,0349	-380,7346
x32	100,0000	-55,0000	-100,0000	235,4690	-172,2687	-380,8287
x33	150,0000	-55,0000	-100,0000	285,5344	-172,3903	-380,8493
x34	200,0000	-55,0000	-100,0000	335,5955	-172,5855	-380,8037
x35	250,0000	-55,0000	-100,0000	385,6628	-172,7446	-380,7599
x36	300,0000	-55,0000	-100,0000	435,6516	-173,0219	-380,6523
x37	400,0000	-55,0000	-100,0000	535,7006	-173,3926	-380,3940

Příloha C – měření přesnosti v ose Y

Tab. C1 Tabulka měření přesnosti v ose Y

	Poloha X	Poloha Y	Poloha Z	Změřená X	Změřená Y	Změřená Z
Bod						
	-20,0000	-50,0000	-100,0000			
y1	-20,0000	50,0000	-100,0000	114,8590	-70,8355	-381,0877
y2	-20,0000	150,0000	-100,0000	114,8338	29,3371	-381,2840
y3	-20,0000	250,0000	-100,0000	114,7529	129,6142	-381,3263
y4	-20,0000	350,0000	-100,0000	114,6813	229,8015	-381,1995
y5	-20,0000	450,0000	-100,0000	114,5960	329,7762	-380,9713
	-20,0000	475,0000	-100,0000			
y6	-20,0000	450,0000	-100,0000	114,6157	329,8611	-380,9732
y7	-20,0000	350,0000	-100,0000	114,6972	229,9178	-381,1817
y8	-20,0000	250,0000	-100,0000	114,7720	129,7586	-381,3137
y9	-20,0000	150,0000	-100,0000	114,8634	29,4891	-381,2827
y10	-20,0000	50,0000	-100,0000	114,8810	-70,7262	-381,0666
	-20,0000	0,0000	-100,0000			
y11	-20,0000	50,0000	-100,0000	114,8707	-70,8234	-381,0770
y12	-20,0000	150,0000	-100,0000	114,8513	29,3546	-381,2845
y13	-20,0000	250,0000	-100,0000	114,7596	129,6200	-381,3179
y14	-20,0000	350,0000	-100,0000	114,6621	229,7930	-381,1884
y15	-20,0000	450,0000	-100,0000	114,5961	329,7788	-380,9802
	-20,0000	475,0000	-100,0000			
y16	-20,0000	450,0000	-100,0000	114,6176	329,8679	-380,9629
y17	-20,0000	350,0000	-100,0000	114,6898	229,9151	-381,1793
y18	-20,0000	250,0000	-100,0000	114,7758	129,7503	-381,3130
y19	-20,0000	150,0000	-100,0000	114,8491	29,4839	-381,2718
y20	-20,0000	50,0000	-100,0000	114,8708	-70,7258	-381,0706
	-20,0000	0,0000	-100,0000			
y21	-20,0000	50,0000	-100,0000	114,8813	-70,8250	-381,0663
y22	-20,0000	150,0000	-100,0000	114,8472	29,3502	-381,2795
y23	-20,0000	250,0000	-100,0000	114,7620	129,6224	-381,3241
y24	-20,0000	350,0000	-100,0000	114,6697	229,8019	-381,2010
y25	-20,0000	450,0000	-100,0000	114,5982	329,7739	-380,9724
	-20,0000	475,0000	-100,0000			
y26	-20,0000	450,0000	-100,0000	114,6161	329,8594	-380,9717
y27	-20,0000	350,0000	-100,0000	114,6938	229,9106	-381,1830
y28	-20,0000	250,0000	-100,0000	114,7788	129,7501	-381,3177
y29	-20,0000	150,0000	-100,0000	114,8551	29,4701	-381,2787
y30	-20,0000	50,0000	-100,0000	114,8755	-70,7273	-381,0679
	-20,0000	0,0000	-100,0000			

Příloha D – měření přesnosti v ose Z

Tab. D1 Tabulka měření přesnosti v ose Z

	Poloha X	Poloha Y	Poloha Z	Změřená X	Změřená Y	Změřená Z
Bod						
	200,0000	-45,0000	22,0000			
z1	200,0000	-45,0000	20,0000	334,8918	-166,1041	-260,6333
z2	200,0000	-45,0000	-14,0000	334,8844	-166,0514	-294,6237
z3	200,0000	-45,0000	-48,0000	334,8745	-166,0015	-328,6154
z4	200,0000	-45,0000	-82,0000	334,9212	-165,9343	-362,6369
z5	200,0000	-45,0000	-116,0000	334,9164	-165,9212	-396,6442
z6	200,0000	-45,0000	-130,0000	334,9236	-165,7620	-410,5966
	200,0000	-45,0000	-155,0000			
z7	200,0000	-45,0000	-130,0000	334,9191	-165,7697	-410,5997
z8	200,0000	-45,0000	-116,0000	334,9219	-165,8934	-396,6184
z9	200,0000	-45,0000	-82,0000	334,9257	-165,8986	-362,6167
z10	200,0000	-45,0000	-48,0000	334,8952	-165,9869	-328,6017
z11	200,0000	-45,0000	-14,0000	334,8817	-166,0206	-294,6061
z12	200,0000	-45,0000	20,0000	334,8841	-166,1064	-260,6039
	200,0000	-45,0000	22,0000			
z13	200,0000	-45,0000	20,0000	334,8816	-166,0973	-260,6187
z14	200,0000	-45,0000	-14,0000	334,8912	-166,0491	-294,6098
z15	200,0000	-45,0000	-48,0000	334,8915	-165,9775	-328,6147
z16	200,0000	-45,0000	-82,0000	334,9187	-165,9053	-362,6164
z17	200,0000	-45,0000	-130,0000	334,9242	-165,7817	-410,6173
	200,0000	-45,0000	-155,0000			
z18	200,0000	-45,0000	-130,0000	334,9286	-165,7937	-410,6059
z19	200,0000	-45,0000	-82,0000	334,9179	-165,9133	-362,6228
z20	200,0000	-45,0000	-48,0000	334,8898	-165,9981	-328,6090
z21	200,0000	-45,0000	-14,0000	334,8902	-166,0558	-294,6074
z22	200,0000	-45,0000	20,0000	334,8862	-166,0841	-260,6114
	200,0000	-45,0000	22,0000			
z23	200,0000	-45,0000	20,0000	334,8833	-166,0861	-260,6146
z24	200,0000	-45,0000	-14,0000	334,8938	-166,0490	-294,6133
z25	200,0000	-45,0000	-48,0000	334,8858	-165,9875	-328,6110
z26	200,0000	-45,0000	-82,0000	334,9261	-165,9095	-362,6065
z27	200,0000	-45,0000	-130,0000	334,9264	-165,7658	-410,6147
	200,0000	-45,0000	-155,0000			

Příloha E – měření přesnosti při posuvu ve všech osách

Tab. E1 Tabulka měření přesnosti – maximální posuv ve všech osách

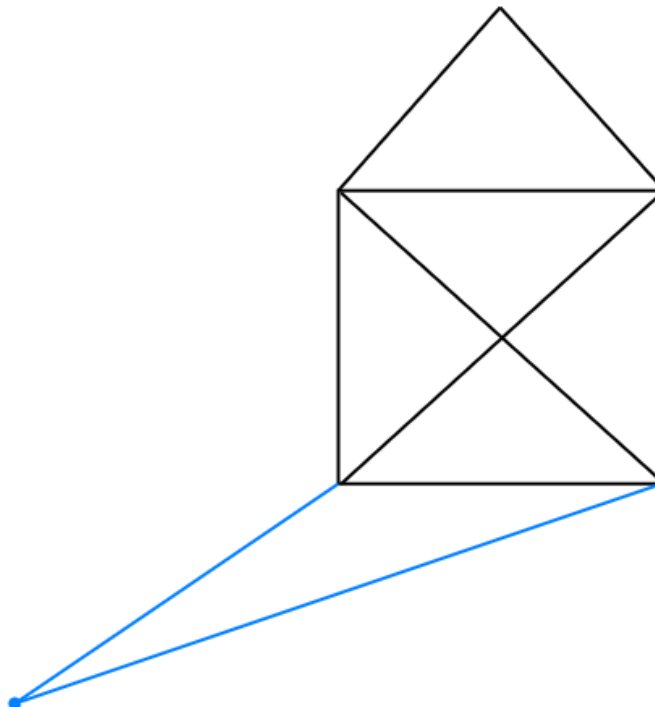
	Poloha X	Poloha Y	Poloha Z	Změřená X	Změřená Y	Změřená Z
Bod						
o1	-45,0000	100,0000	-100,0000	534,8065	-166,6300	-380,1755
	500,0000	100,0000	0,0000			
o2	-45,0000	100,0000	-100,0000	534,6730	-166,5049	-380,1648
	500,0000	100,0000	0,0000			
o3	-45,0000	100,0000	-100,0000	534,6952	-166,5172	-380,1790
	500,0000	100,0000	0,0000			
o4	-45,0000	100,0000	-100,0000	534,6815	-166,5110	-380,1783
	500,0000	100,0000	0,0000			
o5	-45,0000	100,0000	-100,0000	534,7000	-166,5133	-380,1855
	500,0000	100,0000	0,0000			

Příloha F – Ukázka G-kódu

G-kód (ISO-kód) je programovací jazyk pro CNC obráběcí stroje. U manipulátoru byl použit pro ukládání pohybů do textového souboru a zároveň pro vytváření a následné spouštění testových sekvencí.

Jako příklad byl vytvořen G-kód pro vykreslení domu jedním tahem, vizualizaci provedených pohybů ve 2D lze vidět na obrázku Obr. F0.1.

```
%  
G00 X60 Y30 Z10  
G00 Z0  
G00 X160 Y30  
G00 X160 Y130  
G00 X60 Y30  
G00 X60 Y130  
G00 X160 Y130  
G00 X110 Y180  
G00 X60 Y130  
G00 X160 Y30  
G00 Z10  
G00 X300 Y500  
%
```



Obr. F0.1 2D výkres pohybů z ukázkového G-kódu