



F2

**Fakulta strojní
Ústav mechaniky, biomechaniky a mechatroniky**

Diplomová práce

Virtuální pohonový systém FANUC CNC Guide a jeho využití pro externí řízení skladového manipulátoru

Bc. Lukáš Pilný

srpen 2023

Vedoucí práce: Ing. Martin Nečas, Msc., Ph.D.

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Pilný** Jméno: **Lukáš** Osobní číslo: **483275**
Fakulta/ústav: **Fakulta strojní**
Zadávající katedra/ústav: **Ústav mechaniky, biomechaniky a mechatroniky**
Studijní program: **Robotika a výrobní technika**
Specializace: **Robotika**

II. ÚDAJE K DIPLOMOVÉ PRÁCI

Název diplomové práce:

Virtuální pohonový systém Fancu CNC Guide a jeho využití pro externí řízení skladového manipulátoru

Název diplomové práce anglicky:

Fanuc CNC Guide virtual control system and its use for external control of warehouse manipulator

Pokyny pro vypracování:

1. Seznamte se s řídicími systémy CNC a jejich virtualizací pro implementaci digitálního dvojčete.
2. Sestavte generátor NC kódu na základě požadavků pro pohyb skladového manipulátoru.
3. Implementujte systém pro spuštění NC kódu syntetizovaného v bodě 2 na virtuálním CNC
4. Sestavte dynamický simulační model pohonového systému skladu a propojte ho s interpolátorem virtuálního CNC.
5. Kriticky zhodnoťte dosažené výsledky s ohledem na budoucí využití.

Seznam doporučené literatury:

- [1] BIAGIOTTI, Luigi a Claudio MELCHIORRI. __Trajectory Planning for Automatic Machines and Robots__. Berlin Heidelberg: Springer-Verlag, 2008. ISBN 978-3-540-85628-3.
[2] Nguyen, Trung Kien, Lan Xuan Phung, and Ngoc-Tam Bui. 2020. 'Novel Integration of CAPP in a G-Code Generation Module Using Macro Programming for CNC Application' __Machines__ 8, no. 4: 61. <https://doi.org/10.3390/machines8040061>
[3] SUK-HWAN SUH, SEONG KYOON KANG, DAE-HYUK CHUNG a IAN STROUD. __Theory and Design of CNC Systems__. Springer Science & Business Media, 2008. ISBN 1848003366.
[4] FEI TAO, MENG ZHANG a A.Y.C. NEE. __Digital Twin Driven Smart Manufacturing__. Academic Press, 2019. ISBN 0128176318.
[5] UHLÍŘ, Ivan. Elektrické stroje a pohony. Vyd. 2. přeprac. Praha: ČVUT, 2007. ISBN 978-80-01-03730-0.

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) diplomové práce:

Ing. Martin Nečas, MSc., Ph.D. odbor mechaniky a mechatroniky FS

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

Datum zadání diplomové práce: **28.04.2023**

Termín odevzdání diplomové práce: **14.08.2023**

Platnost zadání diplomové práce: _____

Ing. Martin Nečas, MSc., Ph.D.
podpis vedoucí(ho) práce

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

doc. Ing. Miroslav Španiel, CSc.
podpis děkana(ky)

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

Diplomant bere na vědomí, že je povinen vypracovat diplomovou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je třeba uvést v diplomové práci.

Datum převzetí zadání

Podpis studenta

Poděkování / Prohlášení

Děkuji Ing. Martinu Nečasovi, Msc. Ph.D. za vedení mé diplomové práce, za podnětné rady a jeho drahocenný čas, který mi věnoval. Dále bych chtěl poděkovat své přítelkyni Bohuslavě za podporu během tvorby této práce. Děkuji také svým rodičům za trpělivost, kterou se mnou měli během mého studia na vysoké škole. Zvláštní poděkování patří také firmě FANUC za zapůjčení softwaru CNC guide 2 a firmě Houfek a.s. za zapůjčení softwaru SERVO guide.

Bc. Lukáš Pilný

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

V Praze, dne 14. 08. 2023

.....

Abstrakt / Abstract

Tato diplomová práce se zabývá externím řízením virtuálního pohonového systému FANUC CNC guide. Jedná se o prakticky zaměřenou práci s cílem představit možnosti ovládání emulovaného řídicího systému FANUC z PC a jeho využití při tvorbě digitálního dvojčete. Je zde ukázán koncept digitálního dvojčete a průmyslové řídicí systémy. Následně je vytvořen generátor NC programu pro řízení skladu. Jsou představeny možnosti ovládání virtuálního CNC pomocí knihovny FOCAS 2 a je vytvořen dynamický simulační model pohonů pomocí funkce Servo model. Výstupem práce je aplikace pro poloautomatické řízení skladového manipulátoru.

Klíčová slova: Digitální dvojče, Řídicí systém, Emulátor, CNC, FANUC

This master thesis deals with the external control of the virtual drive system FANUC CNC guide. It is a practice-oriented work with the aim to present the possibilities of controlling the emulated FANUC control system from a PC and its use in the creation of a digital twin. The concept of digital twin and industrial control systems is introduced. Afterward, an NC program generator for warehouse control is created. The possibilities of controlling a virtual CNC using the FOCAS 2 library are introduced and a dynamic simulation model of the actuators is created using the Servo model function. The output of the work is an application for the semi-automatic control of a warehouse manipulator.

Keywords: Digital twin, Control system, Emulator, CNC, FANUC

Title translation: FANUC CNC Guide virtual control system and its use for external control of warehouse manipulator

Obsah /

1 Úvod	1		
2 Digitální dvojče	2		
2.1 Historie	2		
2.2 Charakteristické znaky digitálního dvojčete	3		
2.3 Dělení DT	3		
2.3.1 Dělení na základě času vytvoření	3		
2.3.2 Dělení na základě použití	3		
2.3.3 Dělení na základě úrovně integrace	4		
2.3.4 Dělení na základě hierarchie	4		
2.4 Výhody a nevýhody digitálního dvojčete	5		
2.4.1 Výhody	5		
2.4.2 Nevýhody	7		
3 Průmyslové řídicí systémy	8		
3.1 Centralizované řídicí systémy	8		
3.2 Distribuovaný řídicí systém	10		
3.2.1 Architektura DCS	10		
3.3 Pyramida automatizace	11		
3.4 Komunikace	11		
3.4.1 Příklad komunikace v řídicím systému CNC od firmy FANUC	12		
3.5 Bezpečnost řídicích systémů	13		
4 Řídicí systémy CNC stojí	14		
4.1 Historie CNC strojů	14		
4.2 Virtualizace řídicího systému	15		
4.3 Integrace emulátorů CNC systémů do DT	16		
4.3.1 DT systému CNC od firmy FANUC	16		
4.3.2 DT systému CNC od firmy Siemens	17		
5 Automatický sklad a simulace jeho řídicího systému	19		
5.1 CNC guide 2	20		
5.1.1 Základní specifikace	20		
5.1.2 Rozšíření	20		
5.1.3 iHMI	20		
5.1.4 Porovnání CNC guide a CNC guide 2	21		
6 Generátor NC programu	22		
6.1 Tvorba generování NC kódu	23		
6.1.1 Generátor pro lineární pohyb mezi dvěma body	23		
6.1.2 Generátor pro diagonální přesuny desek	23		
6.1.3 Generátor pro plánovač trajektorie	24		
7 Ovládání virtuálního CNC z počítače	25		
7.1 Propojení systému FANUC s PC	25		
7.1.1 Zprovoznění komunikace mezi CNC guide 2 a PC přes Ethernet	25		
7.2 Práce s NC programem pomocí knihovny FOCAS 2	26		
7.2.1 Nahrání programu do CNC	26		
7.2.2 Volba hlavního programu	27		
7.2.3 Mazání programu	27		
7.3 Ovládání panelu operátora z PC	28		
7.3.1 PMC (Programmable Machine Controller)	28		
7.3.2 Zisk potřebných PMC adres	29		
7.3.3 Přepínání mezi režimy systému CNC (X0010)	31		
7.3.4 Ovládání NC programu (X0012)	31		
7.4 Zisk dat o průběhu programu (modální data)	32		
7.4.1 Využití modálních dat k detekci konce programu	32		
7.5 Vizualizace aktuálního stavu CNC	32		
8 Dynamický simulační model stroje (SERVO model)	34		
8.1 Servo model	34		
8.1.1 Výhody a omezení simulace se Servo modelem	35		
8.1.2 Shrnutí výhod a omezení funkce Servo model	35		
8.2 Sestavení Servo modelu	36		
8.2.1 Konfigurace Servo modelu	36		

8.2.2	Nastavení CNC parametrů pro řízení servomotorů	36	C.3	Seznam parametrů A06B-2239-B100	69
8.2.3	Vygenerování <i>.vdat</i> souboru	37	C.4	Technické parametry motorů	70
8.2.4	Nastavení parametrů mechanické části (<i>.vdat</i> soubor)	37	C.4.1	Technické parametry motorů A06B-2255-B400	70
8.2.5	Spuštění simulace	38	C.4.2	Technické parametry motorů A06B-2239-B100	71
8.3	Odhad doby běhu programu	39	C.5	Seznam mechanických vlastností Servo modelu	72
8.3.1	High-speed Simulation	40			
8.3.2	Porovnání simulace doby běhu programu za různých podmínek	40			
8.4	Měření a využití dat ze simulace (Servo model)	41			
8.4.1	SERVO guide	41			
8.4.2	Měření dat v SERVO guide	42			
8.4.3	Vizualizace naměřených dat	43			
9	Aplikace pro ovládání systému FANUC z PC	47			
9.1	Popis aplikace	47			
9.1.1	Uživatelské rozhraní	48			
9.2	Funkce pro automatizaci nahrávání programu	49			
9.2.1	Vstupní databáze	49			
9.2.2	Průběh vykonávání práce	49			
9.2.3	Stavy systému	50			
9.3	Funkce pro odhad manipulačních časů	51			
10	Shrnutí a poznatky	53			
11	Závěr	55			
	Literatura	57			
A	Zkratky	63			
A.1	Zkratky	63			
B	Tabulka specifikace CNC guide	65			
C	Data pro nastavení Servo modelu	66			
C.1	Seznam doporučených parametrů pro nastavení Servo modelu	66			
C.2	Seznam parametrů A06B-2255-B400	68			

Tabulky / Obrázky

7.1	PMC adresy režimy systému ..	31
7.2	Úryvek PMC adres pro adrese X0012.....	31
8.1	Tabulka dat doby běhu programu	41
2.1	Typy DT na základě úrovně integrace	4
2.2	Hierarchické úrovně DT ve výrobě	5
2.3	Reálné vs. virtuální náklady při prototypování.....	6
3.1	Centralizovaný řídicí model-call-return model	9
3.2	Centralizovaný řídicí model-manager model	9
3.3	Příklad architektury DCS	10
3.4	Pyramida automatizace	11
3.5	Komunikace v CNC systému FANUC	12
4.1	Stroj Milwaukee-Matic-II	14
4.2	DT CNC od firmy FANUC	16
4.3	Nástroj Run MyVirtual Machine	18
5.1	Automatická skladová buňka HOUFEK	19
5.2	iHMI	21
6.1	Formát dat NC programu	22
6.2	Šablona pro tvorbu NC programu	22
6.3	Příklad NC programu pro diagonální přesuny desek	24
7.1	Nástroj Machine Composition Setting	26
7.2	Příklad adresy v CNC FANUC	26
7.3	Příklad adresy v CNC FANUC pro zvolení programu	27
7.4	Zobrazení programů v systému FANUC	27
7.5	Základní konfigurace PMC	28
7.6	Vztahy mezi adresami v PMC .	29
7.7	Formát PMC adresy	29
7.8	PMC I/O operational panel ...	30
7.9	PMC Ladder diagram monitor	30
7.10	Obrazovka ovládacího panelu..	32
8.1	Konfigurace Servo modelu	36
8.2	Příklad adresy .vdat souboru ..	37
8.3	Příklad struktury .vdat souboru.....	37

8.4	Příklad vyplněných dat pro osu x ve <i>.vdat</i> souboru	38
8.5	Příklad adresy <i>.log</i> souboru....	38
8.6	Příklad zprávy v <i>.log</i> souboru .	39
8.7	Zobrazení parametrů doby běhu programu v systému FANUC	39
8.8	Okno High-speed Simulation function.....	40
8.9	Obrazovka SERVO guide s jeho čtyřmi softwarovými funkcemi	42
8.10	Neupravená data naměřená v SERVO guide	43
8.11	Pohyb manipulátoru (POSF) zobrazený 3D grafu	43
8.12	Graf SPEED a POSF na ose Z	44
8.13	Porovnání ERR s SPEED pro osu z.....	45
8.14	Porovnání VCMD s SPEED pro osu z.....	45
8.15	Porovnání TCMD s ACC pro osu y	46
9.1	Uživatelské rozhraní aplikace ..	48
9.2	Příklad „Databáze pohybů“ ...	49
9.3	Sekvenční diagram procesu Automatické funkce	50
9.4	Diagram aktivit procesu Cycle time funkce	51

Kapitola 1

Úvod

V roce 2011 byl poprvé oficiálně představen pojem Průmysl 4.0, který představuje německou strategickou iniciativu a plán dalšího rozvoje automatizace a digitalizace průmyslu, která byla v rámci kontextu České Republiky zpracována v dokumentu [1] a přináší řadu nových možností pro průmysl. S Průmyslem 4.0 se úzce pojí termíny digitalizace a automatizace průmyslu. Tyto dva pojmy tvoří základní pilíře efektivního fungování moderních výrobních podniků. Některé z výhod, které s sebou přináší Průmysl 4.0, se ukázaly být klíčové pro zachování provozu firem během pandemie COVID-19, kdy byl průmysl vystaven řadě nepříjemných výzev (bezpečnostní opatření, omezení výroby, problémy v zásobování, vysoké ceny). Vyřešit nebo zmírnit dopady pomohla automatizace, robotizace, sdílení dat a práce na dálku. V dnešní době pak je digitalizace a automatizace jedinou možností firem ve střední Evropě, jak si udržet konkurenceschopnost na globálních trzích. Proto je důležité získat, porozumět a využít nesmírné množství dat, která vznikají v rámci průmyslového internetu věcí (IIoT). [2–4]

Jeden ze základních kamenů digitalizace tvoří digitální dvojče (DT). Díky své virtuální podstatě a svému napojení na fyzické dvojče přináší do průmyslu řadu výhod a nových řešení v oblastech prediktivní údržby a optimalizace výroby. Dále usnadňuje práci při návrhu a vývoji nových produktů a umožňuje bezpečné vyzkoušení provozu produktu ještě před jeho samotnou fyzickou implementací. [5]

Tato práce se dále zabývá řídicími systémy CNC a jejich emulacemi. Blíže je rozebrán řídicí systém CNC značky FANUC a využití jeho emulátoru pro účely realizace DT stroje s řídicím systémem této firmy. Jsou prozkoumány možnosti ovládní řídicího systému FANUC ze vzdáleného PC pro účely automatického chodu skladového manipulátoru. Podrobně jsou rozebrány jednotlivé prvky a postupy potřebné pro automatizaci ovládní řídicího systému FANUC pro CNC na dálku.

Kapitola 2

Digitální dvojče

2.1 Historie

Koncept DT se začal utvářet již počátkem 90. let 20. století. V roce 1991 představil David Gelernter koncept, kde softwarový model na základě dat z fyzického světa kopíroval chování tohoto světa. Podobný koncept modelu ve vztahu k životnímu cyklu produktu nazývaný „Mirrored spaces model“ pak v roce 2002 představil Michael Grieves. Jeho model sestával ze tří základních komponent: reálného prostoru, virtuálního prostoru a propojujícího mechanismu pro tok dat mezi systémy. V následujících letech vyšlo několik dalších publikací, které dále rozvíjely Grievesův model a jeho využití k zefektivnění výměny informací v průběhu životního cyklu produktu. Tyto modely se ale nedočkaly praktického využití z důvodu limitů v tehdejších technologiích (např. nízký výpočetní výkon a konektivita zařízení nebo zpracovávání a ukládání dat). [5]

Samotný pojem DT poprvé použila v roce 2010 NASA v návrhové verzi technologické mapy (Technological road map). NASA ho popsala jako „integrované multifyzikální, multiškálovatelné, pravděpodobnostní simulace strojů nebo systémů, které využívají nejlepších dostupných fyzických modelů, aktualizací senzorů, historie letů, atd., aby mohly zrcadlit let svého letícího dvojčete.“ Brzy po NASA představilo Americké letectvo (US Air Force) DT pouze pro letadla a nazvalo je „Airframe Digital Twin“. Toto DT mělo sloužit k predikci fyzických a mechanických vlastností letadla, za účelem predikce závad způsobených únavou nebo lomovým poškozením konstrukce. [5]

Po leteckém průmyslu začal koncept DT pronikat i do dalších oblastí průmyslu s cílem zrcadlení neživých objektů nebo průmyslových produktů. V posledních letech našlo DT své využití i mimo neživé objekty při popisu komplexních biologických systémů, jako je například člověk nebo strom. Vzhledem k rychlému rozvoji DT a jeho využití v řadě průmyslových odvětví vzniklo od roku 2010 mnoho variant tohoto konceptu, které se často liší svým použitím, definicí i názvem. K tomu byl v posledních letech zaznamenán značný nárůst v množství publikací, zabývajících se konceptem DT. V těchto akademických pracích a v průmyslu ale nepanuje shoda ohledně toho, co ještě je DT a co už jsou jiné technologie související s digitalizací průmyslu. Například v [5] je definice DT následující:

„Digitální dvojče je dynamický a sebezvývojící se digitální/virtuální model nebo simulace reálného předmětu nebo objektu (součást, stroj, proces, člověk, atd.) reprezentující přesný stav jeho fyzického dvojčete v každém daném bodě v čase skrze výměnu dat v reálném čase, jakož i držení historických dat. Není to pouze digitální dvojče, které kopíruje své fyzické dvojče, ale také jakékoliv změny v digitálním dvojčeti jsou kopírovány jeho fyzickým dvojčetem.“

2.2 Charakteristické znaky digitálního dvojčete

Základním kamenem DT je vysoce přesný model vybraných charakteristik fyzického protějšku. Přesnost digitálního modelu je klíčová pro přesnou simulaci výstupů z DT. Jak bylo zmíněno v definici výše, DT je *dynamické*, což znamená, že se mění v čase v závislosti na změnách v jeho fyzickém dvojčeti. Dále pak je DT schopné se *rozvíjet* společně se svým fyzickým protějškem díky uzavřené zpětnovazební smyčce mezi digitální a fyzickou složkou. Na základě této výměny dat se může DT samo optimalizovat a přizpůsobovat změnám v průběhu celého životního cyklu fyzického dvojčete. V důsledku těchto unikátních změn v chování a geometrii modelu lze o DT také říct, že je *identifikovatelné*. To znamená, že je možné je identifikovat na základě odchylek vlastností reálného stroje, se kterým je propojeno. Aby mohlo DT správně fungovat, je třeba vytvářet jeho geometrické a fyzikální vlastnosti na více úrovních. Od makroskopických vlastností, jako jsou např. tvar, velikost a tolerance, po mikroskopické vlastnosti, jako je například drsnost povrchu. Obdobně tomu je i pro fyzikální vlastnosti modelů, jako je strukturální dynamika, termodynamika, zatížení, únava součásti atd. Jak už vyplývá z výše popsaných požadavků, DT je stejně jako celý koncept Průmyslu 4.0 *mezioborové*, tedy pro přesnou simulaci využívá poznatků z různých oborů, jako jsou mechanika, elektrotechnika, mechatronika a automatizace atd.. Mimo to, že je DT *mezioborové*, má také *hierarchickou* podstatu. To znamená, že jednotlivé komponenty, ze kterých sestává výsledný model DT, jsou reprezentovány svým vlastním DT. Proto na DT lze nahlížet jako na sérii do sebe integrovaných DT. [5]

2.3 Dělení DT

2.3.1 Dělení na základě času vytvoření

DT je možné klasifikovat dle okamžiku jeho vzniku v rámci životního cyklu produktu na:

- **Digitální dvojče prototypu (DTP):** Jedná se o DT, které obsahuje data a informace (kusovníky, CAD modely), které jsou klíčové pro vytvoření nebo výrobu jeho fyzické kopie. Životní cyklus DTP začíná již při vývoji prototypu produktu. DTP umožňuje otestovat prototyp ještě před vznikem jeho fyzického dvojčete, teprve v okamžiku, kdy je DTP otestováno a vyladěno, se začne vyrábět jeho fyzický protějšek. [5]
- **Instance digitálního dvojčete (DTI):** Tento typ DT vzniká až v produkční fázi produktu. Vzniká společně se svým fyzickým protějškem a je s ním provázán po celý jeho životní cyklus. Od počátku životního cyklu jsou mezi DTI a jeho fyzickým dvojčetem vyměňována data tak, aby DTI co nejvíce odpovídalo svému protějšku. [5]

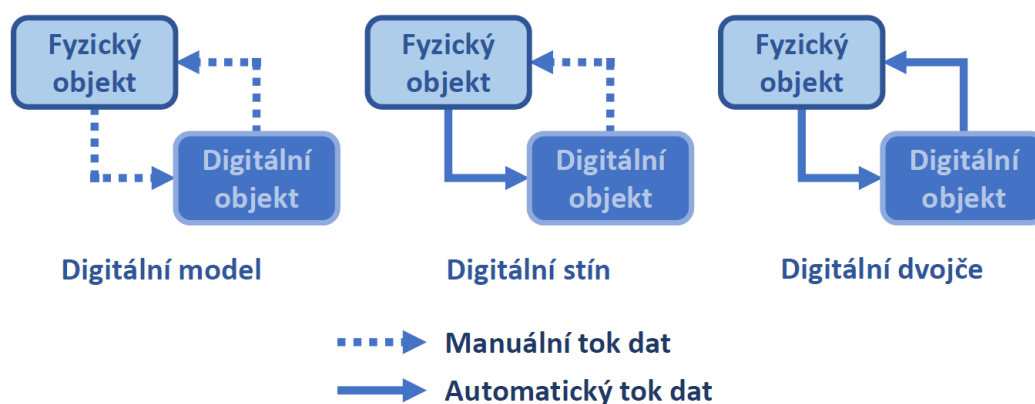
2.3.2 Dělení na základě použití

- **Digitální dvojče produktu:** Je určeno pro prototypování a analýzu vyvíjeného produktu. Umožňuje analýzu chování modelu na základě různých podmínek. Díky DT lze validovat komplexní produkt bez nutnosti vytváření fyzických prototypů, což vede k levnějšímu a rychlejšímu vývoji produktu. [5–6]

- **Digitální dvojče výroby:** DT výroby se používá k návrhu procesů výroby. Umožňuje tyto procesy validovat pomocí simulace a dále analyzovat bez nutnosti fyzické linky. Díky tomu lze vyvinout efektivní metodiku produkce výroby pod různými okolními vlivy. Společně s DT produktu tvoří základ pro monitorování a údržbu výrobní linky. [5–6]
- **Digitální dvojče výkonu:** DT výkonu se používá při rozhodovacích procesech. Získává, zpracovává a analyzuje data z chytrých produktů a výrobních zařízení. Díky tomu, že získává data výkonu jak produktu tak výroby, DT může sloužit k optimalizaci výroby v závislosti na dostupnosti zdrojů výrobního zařízení. Takto získaná data umožňují pomocí uzavřené smyčky optimalizovat chod DT produktu a výroby. [5–6]

2.3.3 Dělení na základě úrovně integrace

- **Digitální model:** V tomto typu DT jsou data mezi digitálním a fyzickým objektem vyměňována manuálně (viz obr. 2.1). Z tohoto důvodu změny ve fyzickém objektu nejsou přímo odraženy v jeho digitální kopii a obráceně. [5]
- **Digitální stín:** Data z fyzického objektu jsou automaticky posílána do digitálního objektu (viz obr. 2.1). Obráceně jsou data stále přenášena manuálně. V důsledku tohoto uspořádání digitální objekt přímo odráží změny ve fyzickém objektu, v opačném směru synchronizace neprobíhá. [5]
- **Digitální dvojče:** Tato varianta umožňuje oboustranný automatický tok dat mezi digitálním objektem a fyzickým objektem (viz obr. 2.1). Změny v obou objektech se tedy přímo odráží v jejich protějšcích. [5]

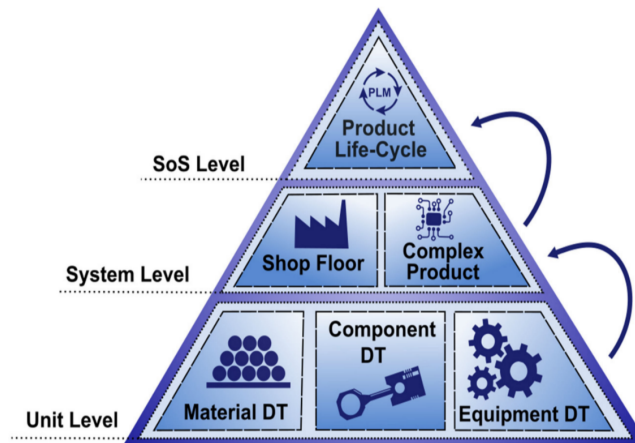


Obrázek 2.1. Typy DT na základě úrovně integrace (vytvořeno na základě [5])

2.3.4 Dělení na základě hierarchie

Z hlediska hierarchie se DT rozlišuje do tří úrovní (viz obr. 2.2):

- **Úroveň jednotek (Unit level):** Jedná se o nejmenší jednotku ve výrobě. Může se jednat o kus vybavení, materiál nebo vliv prostředí. [5]
- **Systémová úroveň (System level):** Jedná se o DT spojující více DT jednotek ve výrobním systému. Tvoří např. výrobní linky, výrobní haly, továrny atd.. Do systémové úrovně je možné začlenit i komplexní výrobky jako je např. letadlo. [5]
- **Úroveň systému systémů (System of Systems level):** Řada DT na systémové úrovni je propojena dohromady. DT na této úrovni integruje různé fáze produktu skrze celý jeho životní cyklus. [5]

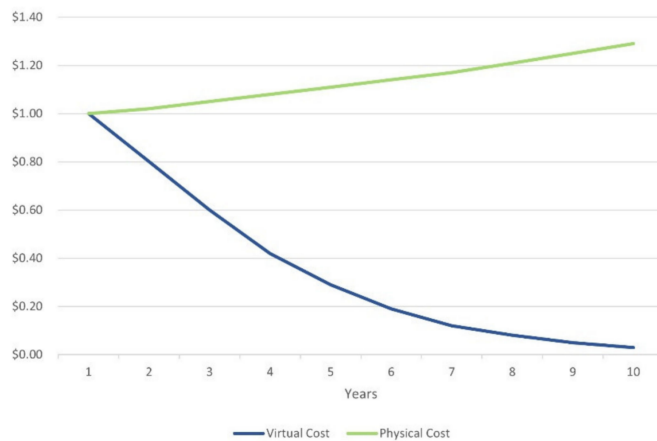


Obrázek 2.2. Hierarchické úrovně DT ve výrobě [5]

2.4 Výhody a nevýhody digitálního dvojčete

2.4.1 Výhody

- **Rychlé prototypování a také přepracování produktu:** Díky simulaci je možné prozkoumat řadu pracovních scénářů rychleji bez nutnosti testování na fyzickém zařízení, což přispívá k urychlení návrhu a úprav designu produktu. Je nutné také podotknout, že po vytvoření DT produktu, je možné využít DT v různých fázích vývoje produktu. To mimo jiné umožňuje vývoj produktu s úpravami na základě požadavků zákazníka. Další velkou výhodou je propojení fyzického dvojčete s DT po celý životní cyklus produktu. Díky tomu DT poskytuje řadu užitečných informací pro vývoj nové generace produktu. [5]
- **Šetří náklady:** Díky tomu, že DT z většiny využívá virtuálních zdrojů, celkové náklady na vývoj s časem klesají (viz obr. 2.3). Oproti tomu u tradičních metod prototypování je vývoj produktu časově náročný a drahý z důvodu tvorby fyzických prototypů pro testování výrobku (více v [7]). Další nevýhodou klasického prototypování jsou destruktivní zkoušky, kdy je fyzický model při testu zničen. Proti tomu DT umožňuje simulačně vyzkoušet řadu kritických scénářů, při kterých by došlo k poškození nebo zničení fyzického prototypu přímo na počítači. Poté co je DT vytvořené, lze je dále využívat například při návrhu výrobních linek a jejich optimalizace. [5]
- **Predikce problémů a plánování systémů:** DT umožňuje předvídat problémy a selhání budoucích stavů fyzického dvojčete. Díky reálnému toku dat mezi DT a jeho fyzickým protějškem je možné predikovat stavy systému po celou dobu životního cyklu produktu. Tento aspekt je obzvláště výhodný pro komplexní systémy, jakými jsou letadla nebo vozidla, u kterých je těžké predikovat selhání komponent. [5]



Obrázek 2.3. Reálné vs. virtuální náklady při prototypování [5]

- **Optimalizace řešení a vylepšená údržba:** DT proti běžným metodám údržby, které jsou založené spíše na heuristických metodách a zkušenostech, umožňuje předvídat defekty a poškození ve výrobním stroji nebo systému. Díky tomu lze dopředu naplánovat údržbu stroje. Navíc neustálá zpětná vazba mezi DT a jeho fyzickým dvojčetem umožňuje kontrolovat a optimalizovat chování stroje v průběhu celého životního cyklu. [5]
- **Dostupnost:** Virtuální systémy jako DT umožňují řízení nebo sledování stavu fyzického zařízení na dálku. Proti fyzickému systému bez DT, který je možné řídit pouze z blízkosti lokace systému, DT může být sdíleno s dalšími zařízeními a může být dostupné na dálku. Schopnost řízení a monitorování na dálku je obzvláště užitečná tam, kde je omezený přístup ke stroji, jako tomu bylo například během pandemie COVID-19. [5]
- **Bezpečnější než fyzický protějšek:** V oblastech průmyslu, kde panují extrémní podmínky, je výhodou vzdálený přístup DT ke svému fyzickému dvojčeti a schopnost předvídat chování stroje. Díky těmto vlastnostem lze snížit riziko poruchy a nehod. Podle průzkumu firmy Gartner v roce 2020 téměř jedna třetina firem používala DT k zvýšení bezpečnosti zaměstnanců pomocí vzdáleného monitorování strojů. [5, 8]
- **Redukce odpadu:** Pomocí DT je možné simulovat a testovat produkty nebo prototypy produktu ve virtuálním prostředí, což vede ke značné redukci odpadu materiálu spotřebovaného na vývoj produktu.
- **Dokumentace a komunikace:** Tvorba DT vede k hlubšímu porozumění produktu. Pro úspěšné vytvoření DT je třeba synchronizovat veškerá data týkající se produktu z různých softwarů a databází na jednom místě. [5]
- **Trénování:** DT může sloužit k vytvoření efektivnějších tréninkových programů, které jsou schopny realisticky simulovat chování stroje. DT umožňuje bezpečně simulovat chování strojů, kde by operátor byl jinak vystaven vysokému riziku nebezpečí, jako je například těžba v dolech. Navíc mimo běžných scénářů je DT schopné realisticky simulovat i krizové situace, které by na fyzickém stroji šlo trénovat jen obtížně. [5]

■ 2.4.2 Nevýhody

Přes mnoho výhod jsou tu i nevýhody, které je třeba brát v úvahu při volbě DT. Největší problémy nastávají při samotném vývoji DT a pak při údržbě DT po celou dobu provozu jeho fyzického protějšku. [9]

- **Digitální infrastruktura:** Jednou z největších výzev spojených s DT je vhodná digitální infrastruktura potřebná pro jeho správné fungování. Tvorba takového prostředí může být značně složitá. Tvorba ekosystému, ve kterém se DT může vyvíjet, vyžaduje plně integrované softwarové prostředí. Veškerý použitý software a nástroje musí fungovat synchronizovaně a musí být umožněn snadný přesun dat mezi jednotlivými systémy po celý životní cyklus produktu. Tvorba takového prostředí je náročná, neboť firmy často používají software a nástroje, které spolu nejsou zcela kompatibilní. Nemluvě o jejich připravenosti na implementaci do modelu DT. Propojení takových systémů vyžaduje značné zdroje a čas. [9]
- **Údržba digitálního dvojčete:** Jakmile je DT vytvořeno, přichází na řadu jeho údržba, která je nutná pro zachování přesnosti simulace po celou dobu životního cyklu produktu. Fyzické dvojče se v průběhu času mění kvůli faktorům, jako jsou provozní podmínky, stáří systému, opotřebení stroje nebo třeba opravy v důsledku poruch. Pokud DT není pravidelně aktualizováno, ztrácí svou schopnost přesně odrážet realitu. [9]
- **Více digitálních dvojčat pro jeden typ produktu:** Přesnost simulace DT není závislá pouze na co možná nejpřesnější kopii jeho fyzického dvojčete, ale také na reprodukci okolí, ve kterém se nachází nebo na tom jakým způsobem se zařízení používá. Tyto další vlivy mohou ovlivňovat budoucí odklon fyzického stroje od jeho DT. Proto pro jeden stroj může existovat i více DT. S tímto problémem vyvstávají další otázky na přesnost simulace při plánování tvorby DT. [9]

Kapitola 3

Průmyslové řídicí systémy

Průmyslové řídicí systémy jsou základním kamenem automatizace v průmyslu. Najdeme je ve všech průmyslových oblastech, kde se starají o řízení všeho od pohonů přes jednotlivé stroje až po celé linky a výrobní provozy.

V [10] jsou průmyslové řídicí systémy definovány následovně:

„Průmyslový řídicí systém v angličtině Industrial control systems (ICS) je kolektivní název pro různé typy řídicích systémů a přidružených nástrojů, které obsahují zařízení, systémy, sítě a ovládací prvky používané k řízení a/nebo automatizaci průmyslových procesů. V závislosti na typu průmyslu fungují ICS odlišně a jsou postaveny tak, aby elektronicky zvládly požadované úkony efektivně.“

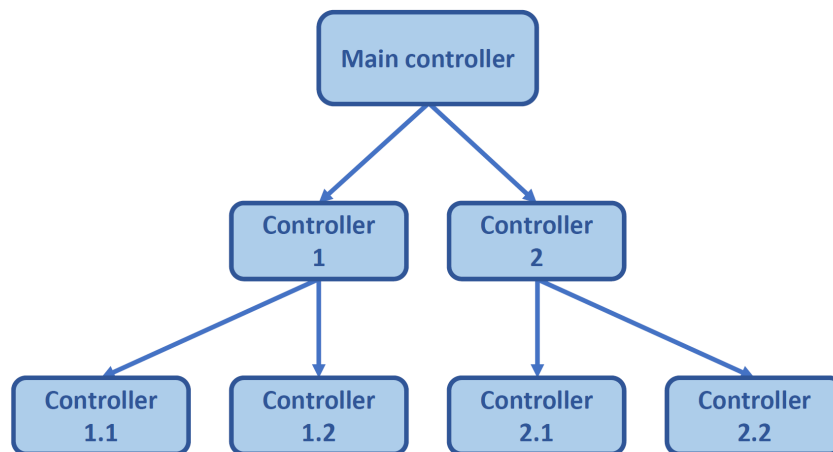
Samotný řídicí systém lze obecně definovat takto:

„Řídicí systém je soustava mechanických nebo elektronických zařízení, která řídí jiná zařízení nebo systémy pomocí řídicí smyčky, která může být buď otevřená (tedy nezávislá na výstupu ze systému) a nebo uzavřená (závislá na výstupu ze systému). Řídicí systémy jsou typicky řešeny elektronicky. Obvykle celý řídicí systém sestává ze senzorů, řídicího mikrokontroleru a řízeného elementu.“ [11]

3.1 Centralizované řídicí systémy

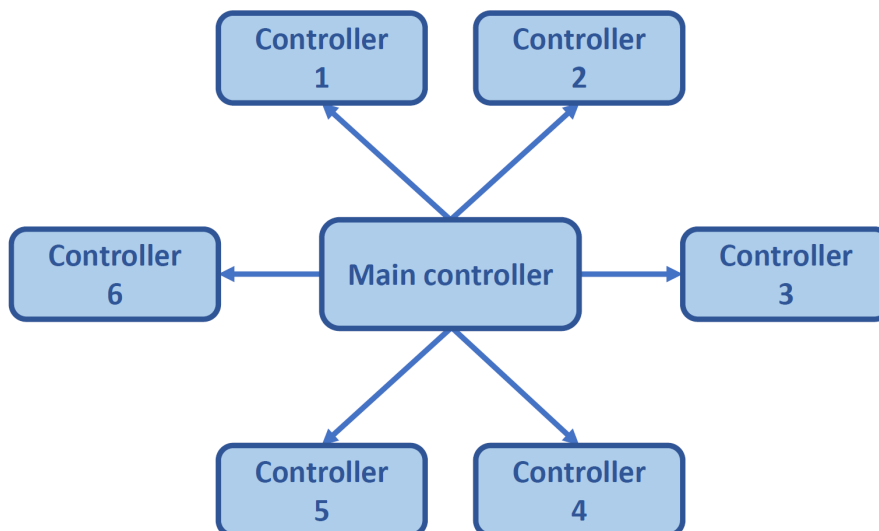
Centralizované řídicí systémy (CCS) se vyznačují jedním výkonným řídicím prvkem, který řídí celý proces. Od tohoto typu řízení se upouští zejména kvůli jeho složitosti a nákladné implementaci pro velké a komplexní systémy a vysoké citlivosti na chybu. V případě, že selže řídicí člen, celý řízený systém se zastaví. CCS lze rozdělit na základě komunikace centrálního členu s ostatními komponentami na „call–return model“ a „manager model“. [12–13]

- **Call-return model:** Je hierarchicky uspořádaná architektura (viz obr. 3.1), skládající se z několika úrovní členů. V takové struktuře centrální člen rozesílá pokyny členům v nižší úrovni a ty tyto informace dále rozesílají do nižších úrovní, dokud se nedostanou ke koncovým zařízením. Tento model řízení je vhodný pro sekvenční systémy. [12, 14]



Obrázek 3.1. Centralizovaný řídicí model-call-return model

- Manager model:** Je typ architektury, ve které jsou všechny členy systému připojeny přímo k hlavnímu řídicímu členu (viz obr. 3.2). Hlavní řídicí člen řídí všechny procesy paralelně. Výhodou tohoto uspořádání je rychlost přenosu dat mezi řídicím členem a koncovými zařízeními. Tento typ architektury je vhodný zejména pro menší méně komplikované systémy. Nevýhodou ale je, že celý řídicí program je obsažen v hlavním řídicím členu, což klade vysoké požadavky na jeho výkon a cenu. [12–14]



Obrázek 3.2. Centralizovaný řídicí model-manager model

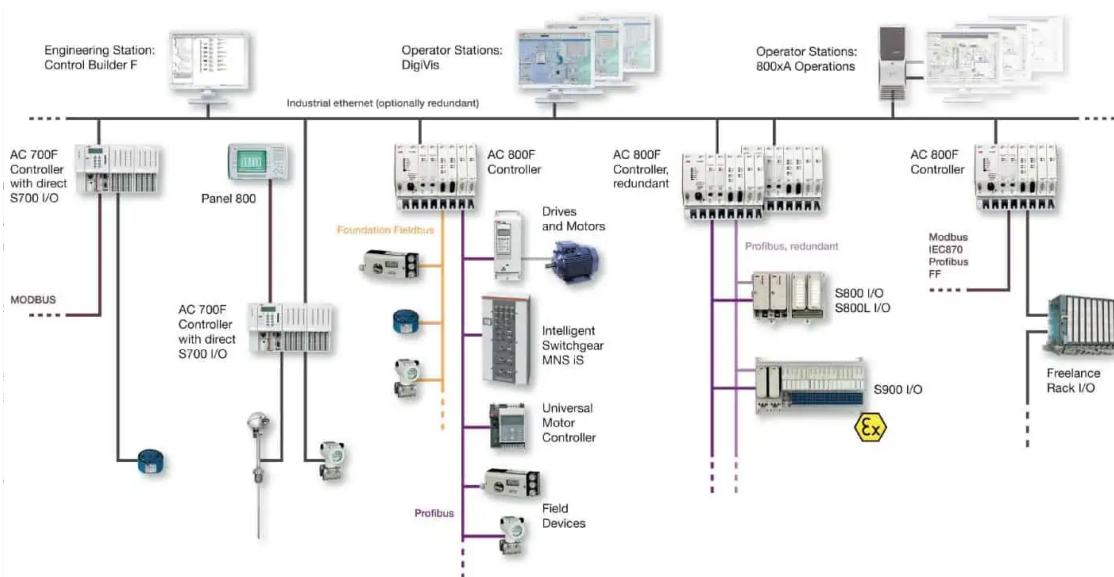
3.2 Distribuovaný řídicí systém

Distribuovaný řídicí systém, v angličtině „distributed control system“ (DCS), je řídicí systém sloužící k řízení výrobních systémů a procesů nacházejících se v jedné lokalitě. Obvykle se jedná o systém, který je složen z několika dílčích systémů, které jsou spolu propojeny komunikační sběrnici, a které se spolu podílí na řízení bez centrálního řídicího členu. Základní myšlenkou DCS je integrovaná databáze, která sdružuje všechny parametry potřebné k automatizovanému řízení. Klíčovou vlastností DCS systémů je redundance systému, která je založená na úmyslné redundanci všech komponent automatizovaného procesu včetně komunikace v kritických místech systému, což vede k vyšší spolehlivosti řídicího systému. Systém je díky tomu schopný redukovat vliv jednoho selhání na celý systém. DCS jsou obzvláště vhodné pro řízení rozsáhlých procesů a výrobních závodů. DCS se běžně používají ve výrobním průmyslu, elektrických generátorech energie, chemickém průmyslu atd. [10, 13–15]

3.2.1 Architektura DCS

Na obr. 3.3 níže je architektura DCS rozdělena do třech úrovní. [14, 16]

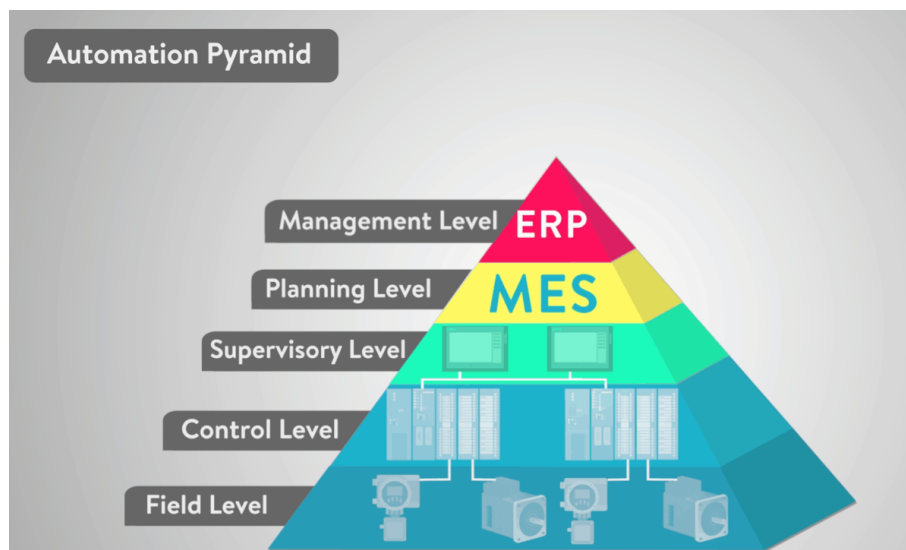
- **První úroveň** je tvořena veškerými senzory a akčními členy. Tato zařízení jsou pomocí vstupů (senzory) a výstupů (pohony) připojena k řídicím jednotkám. [16]
- **Druhá úroveň** se stará o ovládání. Jednotlivé řídicí jednotky jsou propojeny přes průmyslovou sběrnici. Kontrolér přijímá data z této sběrnice a na jejich základě vykonává program, který má v sobě uložený a pomocí kterého řídí k sobě připojená zařízení. Díky propojení řídicích jednotek pomocí průmyslové sběrnice, může řídicí jednotka posílat svá data i do jiných jednotek, pro které jsou tato data relevantní. [16]
- **Třetí úroveň** poskytuje dispečerský dohled nad řízením. Pomocí průmyslové sběrnice jsou na řídicí systém připojeny počítače, pomocí kterých lze dohlížet na jednotlivé úseky výroby a v případě potřeby měnit parametry. Na této úrovni mohou být umístěny systémy HMI (Human Machine Interface) nebo třeba systémy pro sběr dat o výrobě. [16]



Obrázek 3.3. Příklad architektury DCS [16]

3.3 Pyramida automatizace

Pro pochopení pozice řídicích systémů ve výrobních procesech Průmyslu 4.0, je třeba pochopit Pyramidu Automatizace. Pyramida Automatizace je obrazové zobrazení vrstev automatizace uvnitř podniku, kde jsou aplikovány myšlenky Průmyslu 4.0. Tato pyramida se skládá z následujících pěti úrovní: [17–18]



Obrázek 3.4. Pyramida automatizace [17]

Nejnižší pátá úroveň (Field Level) je tvořena senzory a pohonnými jednotkami, které jsou propojeny pomocí komunikačního protokolu s vyšší úrovní. Čtvrtou vrstvu (Control Level) tvoří řídicí vrstva, která je složena z mikrokontrolerů a programovatelných logických automatů (PLC), které společně s nižší vrstvou tvoří DCS. Na tyto řídicí systémy dohlíží z vyšší třetí úrovně (Supervisory Level) dozorčí řídicí systém, který buď může být ještě součástí DCS, a nebo je tvořen systémem SCADA (Supervisory Control and Data Acquisition) a rozhraním HMI (Human Machine Interface). V této vrstvě jsou data z nižších vrstev monitorována skrze uživatelská rozhraní a ukládána do databází. Skrze tuto úroveň je také možné měnit základní nastavení výrobních procesů. Nad dozorčí úrovní se nachází úroveň, kterou tvoří MES (Management Execution System). Tato úroveň umožňuje například monitoring celého výrobního procesu od surových materiálů po hotový výrobek. MES poskytuje manažerům řadu nástrojů a užitečných informací, které mohou být použity například k optimalizaci efektivity procesů a redukci odpadového materiálu. Poslední první úroveň je pak tvořena ERP (Enterprise Resource Planning). ERP označuje sadu softwaru například pro účetnictví, zásobování a řízení projektů, které organizace používají pro každodenní řízení celého podniku. [17–19]

3.4 Komunikace

Komunikace mezi jednotlivými komponentami řídicího systému hraje významnou roli v DCS. Pro komunikaci jsou běžně používané komunikační protokoly jako Ethernet, EtherCat, Profibus, ProfiNet, Powerlink atd. Není povinné používat jeden protokol pro celý řídicí systém. Některé úrovně mohou používat jednu síť, zatímco jiné druhou. Volba

komunikačního protokolu nezávisí pouze na jeho technických parametrech, ale také na tom jaké komunikační protokoly podporují komponenty řídicího systému. [16]

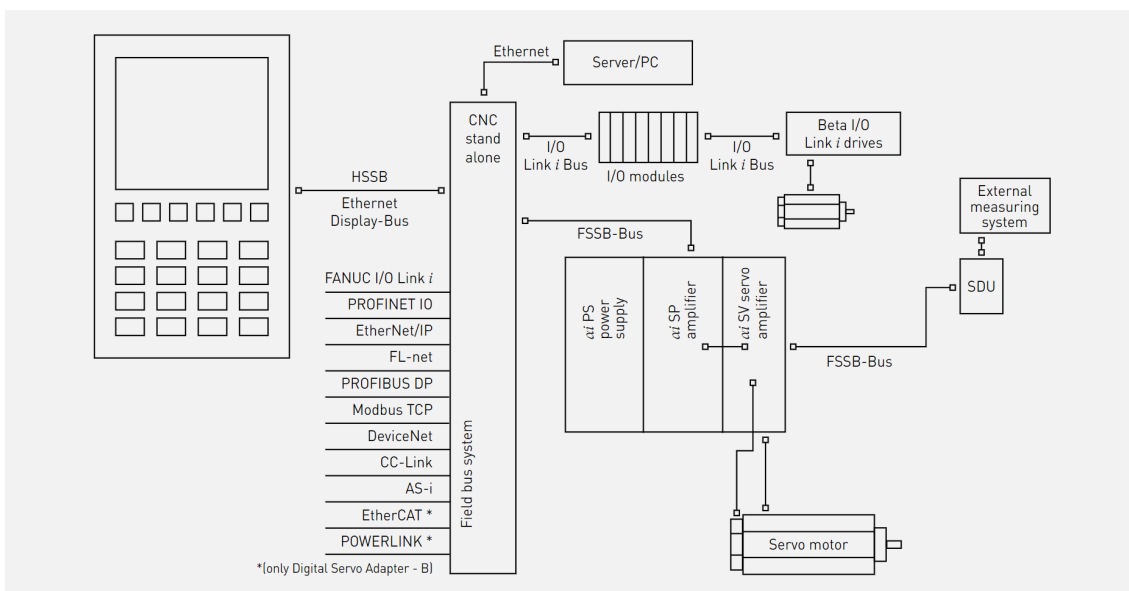
Nejnižší úroveň Pyramidy Automatizace (senzory a pohony) bývá většinou připojena k I/O modulům (vstup/výstup). U komplexnějších strojů může i tato komunikace být realizována přes některou z průmyslových sběrnic. Jednou z možností připojení senzorů a akčních členů k řídicím jednotkám je využití nesíťového komunikačního standardu IO-Link. IO-link lze použít s téměř jakoukoliv průmyslovou sběrnicí a je podporován velkým množstvím výrobců. [14, 16]

Komunikace ve vyšší vrstvě mezi jednotlivými PLC je většinou realizována přes průmyslovou komunikační sběrnicí. V průmyslu se například hojně objevuje komunikační protokol Profinet, který pro komunikaci mezi svými zařízeními používá firma Siemens. PLC od firmy Siemens převládají na tuzemském trhu. Sběrnice Profinet využívá fyzickou vrstvu Ethernetu a má pevnou přenosovou rychlost 100 Mb/s. [14]

3.4.1 Příklad komunikace v řídicím systému CNC od firmy FANUC

Uvnitř strojů značky FANUC je komunikace mezi CNC, měniči a servomotory realizována pomocí optického kabelu přes sběrnicí FSSB (Fast Servo Serial Bus). Mezi hlavní výhody sběrnic FSSB patří rychlá komunikace a možnost zapojení více os pomocí jednoho optického kabelu, což redukuje množství zapojení a kabelů ve stroji. Pro propojení různých I/O zařízení s CNC FANUC používá sběrnicí distribuovaných vstupů/výstupů I/O-Link *i*. [20]

S vnějším PC je možné CNC propojit přes Ethernet nebo pomocí optického kabelu přes HSSB (High Serial Speed Bus). Stejné možnosti připojení jsou dostupné i pro propojení s operačním panelem CNC. Systém CNC od firmy FANUC ale podporuje řadu dalších průmyslových sběrnic viz obr. 3.5 níže. [20]



Obrázek 3.5. Komunikace v CNC systému FANUC [20]

3.5 Bezpečnost řídicích systémů

Současné ICS již nepracují izolovaně, ale pro usnadnění a zlepšení podnikových procesů využívají ke svému provozu dalších sítí jako například internetu nebo podnikových sítí. V důsledku toho vzrůstá riziko vystavení ICS kybernetickým hrozbám. Jedním z častých problémů je neschopnost firem zabezpečit monitorovací systémy jako je systém SCADA proti těmto hrozbám. K tomu s rozvojem moderních technologií, jako jsou „Cloud computing“, „Big data“ a IIoT, se stává podnik zranitelným na nových místech. Z výzkumu společnosti Soitron [21], který provedl tým analytiků Void SOC (Security Operation Center) v roce 2020 vyplývá, že až 1580 průmyslových podniků v České republice a 509 na Slovensku má své ICS dostupné na internetu bez jakéhokoliv zabezpečení. [10, 22]

Příkladem kybernetického útoku na ICS může být například počítačový červ Stuxnet, který v roce 2010 napadl 14 nukleárních zařízení v Iránu, kde napadl přes 20 000 zařízení a zničil okolo 900 centrifug. Stuxnet byl prvním známým červem, který se zaměřil na kontrolu průmyslových systémů. Byl naprogramován, aby útočil na systémy SCADA a uměl přeprogramovat PLC a své změny skrýt. [23–24]

Kapitola 4

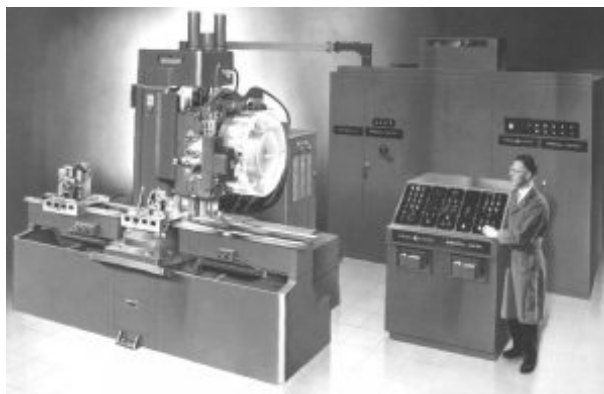
Řídící systémy CNC strojů

4.1 Historie CNC strojů

Již od vzniku prvních obráběcích strojů panovala snaha o zjednodušení procesu výroby a zvýšení kvality obrobků. Základy pro pozdější rozvoj NC a CNC strojů byly položeny na přelomu 18. a 19. století, kdy proběhla První průmyslová revoluce. Počátkem 20. století se do procesu třískového obrábění začaly aplikovat první prvky automatizace. [25–26]

K prvnímu většímu zlomu došlo v 50. letech 20. století, kdy vývoj moderních technologií umožnil vznik prvních NC strojů (číslicově řízené stroje). Motivací pro vývoj NC strojů byla snaha o výrobu přesnějších a komplexnějších dílů. Tyto stroje byly řízeny pomocí informace uložené na dřevných štítcích nebo magnetických páskách. To umožnilo částečně zautomatizovat výrobní proces. Stroje ale nevyhovovaly z hlediska přesnosti a umožňovaly řízení pohybů pouze v pravoúhlých souřadnicích. Ke konci 50. let 20. století byly v MIT vytvořeny základy univerzálního programovacího jazyka G-kódu. [27, 25–26, 28]

V 60. letech vzniklo jedno z prvních NC obráběcích center Milwaukee-Matic od firmy Kearney and Trecker s tranzistorovým systémem (viz obr. 4.1). V této době uvádí na trh německá firma Siemens svou první verzi číslicového řízení založeného na relé (předchůdce řídicího systému dnes známého pod názvem Sinumerik). [25–26]



Obrázek 4.1. Stroj Milwaukee-Matic-II [26]

V 70. letech dochází k velkému rozvoji NC strojů. NC programy jsou doplněny o editaci programů a využití pružného výrobního cyklu. V tomto období jsou také do strojů zabudované první počítače sloužící k řízení výrobního procesu. Společně s počítačem jsou stroje vybaveny obrazovkou, která slouží k indikaci programu. Začíná se mluvit o strojích CNC. [25–26]

V 80. letech panuje snaha eliminace lidského faktoru z výrobního procesu a zvýšení efektivity a snížení výrobních časů stroje. Toho se dosahuje aplikací senzorů pro identifikaci a sledování pohybů stroje a s pokrokem počítačové techniky se urychluje vývoj CNC strojů. Do výroby jsou aplikovány CNC a PLC řídicí systémy s multi-procesorovými mikropočítačovými strukturami. Ve výrobě se začínají více prosazovat soustružnická a obráběcí centra. [25–26, 28]

Na přelomu 20. a 21. století se zvyšuje přesnost výroby a CNC systémy se stávají dostupnějšími a otevřenějšími. CNC systémy mají již otevřenou architekturu a integrované CAD/CAM systémy. Také se zvyšují nároky na programátory a operátory CNC. V roce 1996 představila firma Siemens první CNC systém SINUMERIK se zabudovanými bezpečnostními funkcemi. [25–26, 28]

V současnosti se již moc konstrukce CNC strojů nemění. Neustálým vývojem ale prochází řídicí systémy CNC. Pozornost je kladena zejména na synchronizaci hardware a software, integraci CAD/CAM systémů do CNC, zvyšování produktivity a efektivnější řízení. Firmy také reagují na Průmysl 4.0, s kterým přichází nové výzvy ve formě digitalizace a automatizace, sběru a vyhodnocování dat. Firmy zabývající se výrobou obráběcích strojů proto musí reagovat na změny v průmyslu a přizpůsobovat svá řešení řídicích systémů novým výzvám Průmyslu 4.0 jako je například DT.

4.2 Virtualizace řídicího systému

„Virtualizace vytváří simulované neboli virtuální výpočetní prostředí namísto fyzického prostředí. Virtualizace často zahrnuje počítačem vytvořené verze hardwaru, operačních systémů, úložných zařízení atd. To umožňuje rozdělení jednoho fyzického počítače nebo serveru na několik virtuálních počítačů. Každý virtuální počítač může pracovat nezávisle a spouštět různé operační systémy nebo aplikace, zatímco sdílí prostředky jediného hostitelského počítače.“ [29]

Jak lze vyčíst z výše popsané definice, virtualizace řídicího systému umožňuje spuštění řídicího systému na počítači bez fyzického CNC stroje. Toto s sebou přináší řadu výhod, které se mohou lišit v závislosti na poskytovateli řídicího systému.

- **Užití pro výukové účely a bezpečnost:** Oddělení řídicího systému z něj dělá skvělou výukovou pomůcku. Zaučení pracovníka se stává díky absenci drahého stroje dostupnějším, levnějším (náklady na provoz stroje jsou daleko vyšší než náklady na provoz PC) a bezpečnějším. Pracovník se nemusí bát poškození stroje. [30–32]
- **Vyzkoušení NC programů a aplikací komunikujících s CNC přímo na počítači:** Simulace přesně emuluje CNC, což umožňuje NC programy psát, testovat a optimalizovat přímo v počítači. V praxi vyzkoušení výroby přímo na stroji znamená čas, kdy stroj nevydělává, snižuje se produktivita výroby a programátora. Dále je třeba také zmínit bezpečnost simulace. Operátor CNC se nemusí bát chyb v programu, které by mohly fyzické CNC poškodit. [30–31]
- **Vývoj aplikací pro CNC:** Pro usnadnění ovládání CNC firmy umožňují zákazníkům vytvářet vlastní aplikace pro automatizaci některých řídicích procesů. Obdobně jako u NC programu i tyto aplikace je možné vyzkoušet bez stroje na virtuálním CNC systému. To nejen šetří čas programátora, ale také umožňuje zákazníkovi seznámit

se se systémem a začít vyvíjet potřebné aplikace ještě před samotným zakoupením nebo instalací CNC stroje. [30, 32]

- **Odhad doby běhu programu:** Simulace řídicího systému se snaží být co nejvěrnější skutečnému CNC. Proto i běh samotného programu během simulace přibližně odpovídá době běhu programu na skutečném stroji. Takto získaný odhad doby běhu programu je možné použít pro plánování výroby. [30]

4.3 Integrace emulátorů CNC systémů do DT

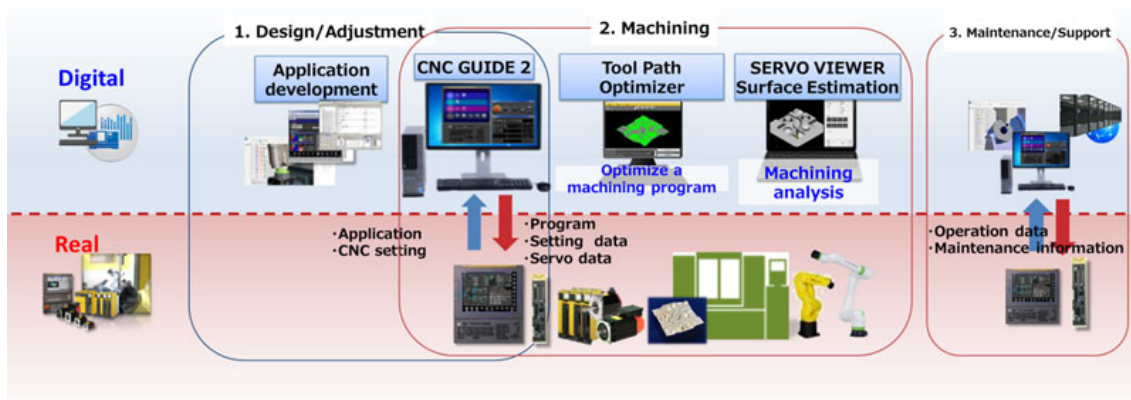
Tvorbou řídicích systémů pro CNC se zabývá celá řada firem jako například Haas, Heidenhain, FANUC, Mitsubischi a Siemens. Pro účely této kapitoly byly vybrány řídicí systémy firem FANUC a Siemens pro jejich velký podíl na českém trhu. V kapitole budou blíže představeny jejich virtualizace řídicích systémů a propojení těchto řídicích systémů s DT těchto firem.

4.3.1 DT systému CNC od firmy FANUC

V reakci na Průmysl 4.0 společnost FANUC vytvořila DT pro CNC. DT by mělo podle firmy [33] umožnit využití digitálních technologií, jako je simulace založená na zpětné vazbě ze skutečných obráběcích nástrojů. Dále by mělo zvýšit efektivitu a zjednodušit pracovní procesy jako jsou obrábění, návrh obráběcích nástrojů a údržba stroje s cílem zvýšit produktivitu obrábění. Mělo by sloužit k podpoře a zvýšení produktivity nástrojářů a operátorů stroje. [34]

DT se skládá z reálné části tvořené fyzickým zařízením a digitální části, která je tvořena softwarovými nástroji od firmy FANUC. Ústřední technologií DT je nová verze emulátoru řídicího systému FANUC s názvem CNC guide 2. CNC guide 2 byl vytvořen za účelem verifikace CNC funkcí v počítači. Dále dokáže věrně simulovat zrychlení a zpomalení stroje, díky čemuž je schopen přesně simulovat funkce pro vyhlazování křivek trajektorie, trajektorie nástroje a pracovní časy stroje. [34]

Na CNC guide 2 jsou navázány další nástroje firmy FANUC, které společně vytváří tři základní části DT od FANUC viz obr. 4.2.



Obrázek 4.2. DT CNC od firmy FANUC [33]

- **Vývoj/Prizpůsobení (Design/ Adjustment):** Vývoj/Prizpůsobení je zaměřena na vývoj a prizpůsobení řídicího systému CNC pro potřeby uživatele. Tato část je tvořena emulátorem CNC guide 2 společně s dalšími nástroji FANUC PICTURE a FANUC LADDER III. FANUC PICTURE je možné společně s FANUC LADDER III použít k efektivnímu vývoji vlastního vzhledu obrazovky operačního panelu CNC. FANUC LADDER III jde použít i samostatně k tvorbě programů pro PLC v programovacím jazyce Ladder. [34]
- **Obrábění (Machining):** Obrábění je tvořeno emulátorem CNC guide 2 společně se softwarovými nástroji „Tool Path Optimizer“, SERVO viewer a „Surface Estimation“. Aplikace „Tool Path Optimizer“ je určena k optimalizaci obráběcího NC programu. SERVO viewer společně se „Surface Estimation“ slouží k odhadu obrobeného povrch součásti, který se podobá realitě. Tento odhad kvality povrchu je možné získat dvěma způsoby, buď simulačně společně CNC guide 2 nebo ho lze odhadnout na základě pohybů fyzického stroje při spuštění programu naprázdno. [34–35]
- **Údržba/Podpora (Maintenance/Support):** Údržba/Podpora tvoří separátní smyčku mezi softwarovými nástroji od firmy FANUC pro prediktivní údržbu a podporu stroje, které jsou napojeny přímo na fyzické CNC.

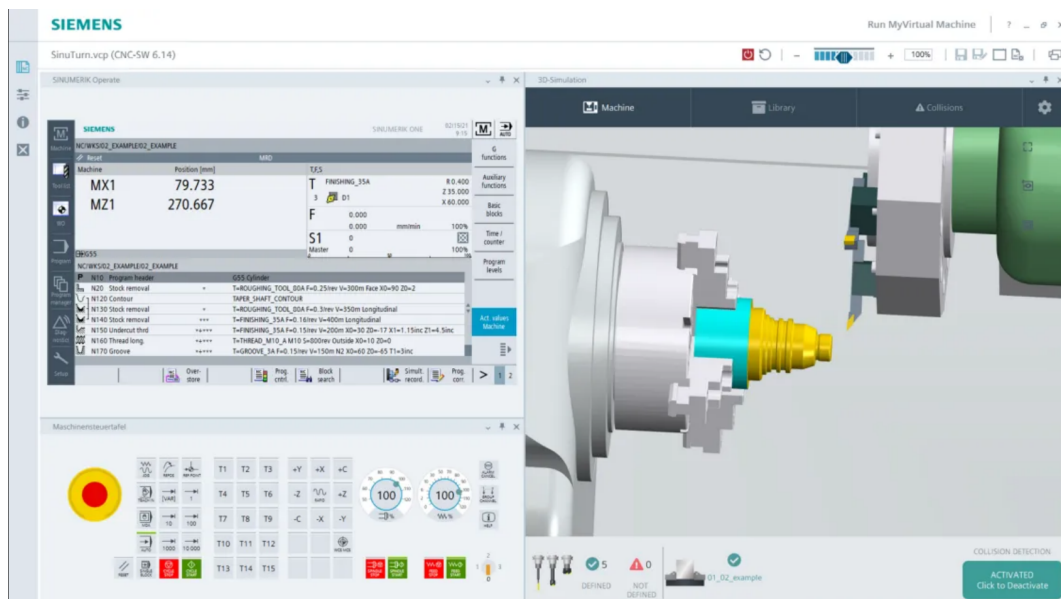
■ 4.3.2 DT systému CNC od firmy Siemens

Oproti firmě FANUC Siemens představil své řešení digitálního podniku. Jeho řešením, jak maximálně získat, porozumět a využít obrovské množství dat vznikajících v rámci IIoT, je propojení digitálního světa s reálným světem pomocí DT. Siemens v rámci své nabídky poskytuje varianty DT výroby, produktu i výkonu. [3, 6]

V roce 2019 společnost Siemens představila novou generaci CNC systému s názvem SINUMERIK ONE [36]. Tento systém se stal prvním CNC systémem, který má DT stroje i výroby zcela implementovány v NC jádře [37]. Podle Siemens [38] je „SINUMERIK ONE CNC systém připravený na výkonné stroje budoucnosti“. Když se spojí s DT od firmy Siemens, umožňuje vytvořit virtuálního dvojníka stroje i výrobku a otestovat jej ještě před spuštěním výroby, nebo dokonce před samotným sestavením stroje.

Pro tvorbu virtuálního modelu stroje vytvořil Siemens nástroj „Create MyVirtual Machine“, ve kterém lze sestavit základní komponenty stroje jako je NC, PLC a HMI. V tomto nástroji vytvořený projekt může být vyexportován do souboru, který lze vložit do programu „Run MyVirtual Machine“. [39]

Nástroj „Run MyVirtual Machine“ (obr. 4.3) umožňuje vytvořit DT procesu obrábění. Následně pak slouží k optimalizaci kapacitního využití stroje a minimalizaci doby nečinnosti. Má v sobě vloženou virtuální verzi CNC systému SINUMERIK ONE, která spolu s virtuálním modelem stroje, umožňuje realistické simulování chování stroje. Díky tomu CNC programy mohou být testovány se stejným sestavením komponent hardwaru jako u reálného stroje. Tím lze simulačně měřit dobu běhu programu s přesností přes 90%. [39]



Obrázek 4.3. Nástroj Run MyVirtual Machine [39]

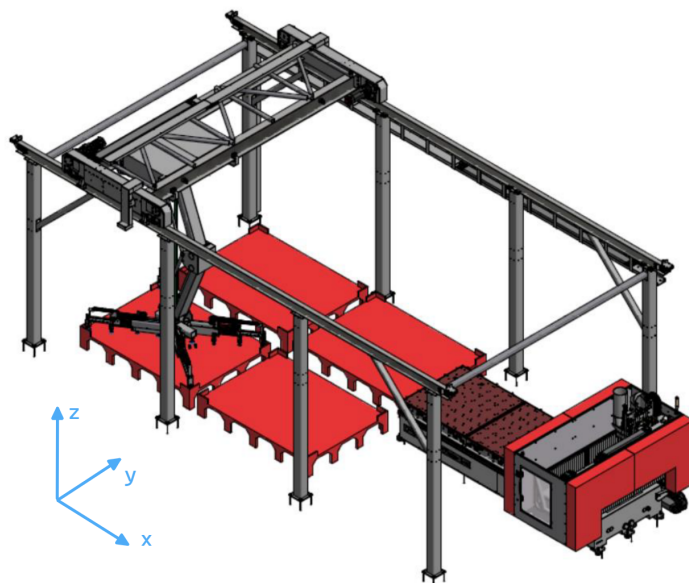
Jak bylo výše zmíněno DT je vybaveno i modelem stroje, což umožňuje jeho vizualizaci a detekci kolizí při běhu programu. Díky tomu je možné DT využít při validaci programů bez nutnosti fyzického CNC stroje. Dále díky těmto vlastnostem je možné vyzkoušet navrhovaný stroj ještě před jeho samotným sestavením. Zákazník si mimo jiné může vyzkoušet, zda navržený stroj je vhodný pro jím požadovaný typ operace, což mu šetří peníze a čas strávený přípravou technologie výroby. [39]

Kapitola 5

Automatický sklad a simulace jeho řídicího systému

Tato práce byla vytvořena v rámci projektu TAČR na fakultě strojní ČVUT, jehož podstatou je automatický sklad pro firmu Houfek a.s.. V rámci této spolupráce vzniká sklad pro přemísťování dřevěných desek pomocí manipulátoru mezi skladovými polohami a obráběcím strojem. Pro pohyb skladu byl zvolen pohonový systém od firmy FANUC (více v kapitole 8). Jako řídicí systém manipulátoru byl zvolen řídicí systém FANUC pro CNC ve variantě FS 31i-B5 Plus. [40]

Jak lze vidět na obr. 5.1, automatický sklad se skládá ze 4 skladových pozic. Na těchto pozicích jsou uskladněny dřevěné desky určené k zpracování. V dosahu skladového manipulátoru je umístěno jedno CNC firmy Houfek a.s., které desky zpracovává. Skladový manipulátor by měl být schopen přemísťovat jednotlivé desky mezi skladovacími pozicemi a zásobovat CNC uskladněným materiálem. [40]



Obrázek 5.1. Automatická skladová buňka HOUFEK [40]

Při tvorbě této práce byl využit pro simulaci řídicího systému použitého ve stroji emulátor řídicího systému CNC guide 2. CNC guide 2 byl zvolen ze dvou důvodů. Prvním důvodem bylo zprovoznění komunikace mezi počítačem a emulovaným řídicím systémem stroje. Zprovoznění komunikace bylo nutné pro zprovoznění virtuální automatizace řízení pohonového systému skladu založeném na řídicím systému FANUC. Druhým důvodem byla možnost vyzkoušet DT od FANUC, které CNC guide 2 podporuje.

5.1 CNC guide 2

Pro tvorbu této práce byl zvolen CNC guide 2, kvůli svému uplatnění při tvorbě DT a protože během tvorby této práce nebyl k dispozici fyzický stroj vybavený systémem FANUC. CNC guide 2 poskytuje všechny ovládací a řídicí funkce skutečného CNC. Dále umožňuje spustit a simulovat „Programmable Machine Controller“ (PMC) a je vybaven integrovaným nástrojem MANUAL guide *i*, který slouží k programování a validaci NC kódu přímo na stroji. V CNC guide lze také vyvíjet a debugovat „C Language Executor“, „Macro Executor“ a FANUC PICTURE programy. V neposlední řadě má v sobě integrované nástroje pro ovládání přes knihovnu FOCAS 2. [31]

5.1.1 Základní specifikace

CNC guide 2 podporuje systémy FANUC řady 30*i*, 31*i* a 32*i*. Dále pak systémy řady 0*i*, systémy série 31*i* pro lasery, drátové řezačky a lisy, CNC pro dopravní linky série 35*i* MODEL B a CNC pro řízení pohybu (Power Motion *i* - MODEL A). CNC guide umožňuje také zobrazení displeje zařízení v různých velikostech a rozvržení ovládacích prvků (CNC obrazovka, MDI klávesy, řídicí panel) ve všech dostupných variantách tak, aby ovládací panel virtuálního CNC souhlasil s reálným strojem. Více informací v příloze B. [31]

5.1.2 Rozšíření

Funkce simulátoru CNC guide 2 umožňuje propojit simulátor s dalšími nástroji, jako jsou například SERVO guide pro ladění pohonů, „Fanuc Program Transfer Tools“ pro jednoduchý transfer souborů z PC do CNC nebo například „FANUC Built-in 3D Interference Check Setting Tool“ pro vizualizaci běhu simulovaného stroje. [31, 41]

5.1.3 iHMI

S cílem zvýšit komfort, přehlednost a jednoduchost ovládacího panelu, vyvinula společnost FANUC ovládací panel iHMI (Intelligent Human Machine Interface) (obr. 5.2) běžící na průmyslové verzi operačního systému Windows 10. Toto rozhraní slouží k jednoduchému a přehlednému zobrazování i těch nejkompexnějších programů značky FANUC. Rozhraní značně usnadňuje práci se systémem FANUC. Pro zapnutí této funkce v CNC guide je třeba nastavit iHMI v nástroji „Machine setting tool“ (obr. 7.5). Dále je třeba otevřít „Option settings“ a v něm zaškrtnout funkce týkající se iHMI. [41–42]



Obrázek 5.2. *i*HMI [43]

■ 5.1.4 Porovnání CNC guide a CNC guide 2

CNC guide 2 je novou rozšířenou verzí inteligentního simulátoru CNC guide, která vyšla v listopadu 2022. Oproti jeho předchůdci byl rozšířen o funkce potřebné pro realizaci DT pro řídicí systém FANUC. Hlavní změnou je přidání možnosti dynamické simulace chování pohonů jednotlivých os v nástroji SERVO model s uvažováním věrné emulace řídicího CNC systému a to až na úrovni samotných měničů. Díky tomu je CNC guide 2 schopný přesněji simulovat chování reálného stroje. Dalšími změnami proti jeho předchůdci jsou funkce pro vyhlazování křivek a rozšíření CNC guide 2 o možnost propojení s novým nástrojem SERVO viewer pro odečítání signálů z pohonu a funkcí „Surface Estimation“ sloužící k realistické simulaci obrobeného povrchu obrobku. [31–32]

Kapitola 6

Generátor NC programu

NC program je soubor číselně vyjádřených informací, které podrobně popisují činnost stroje. Program je psán v tzv. ISO kódu (G code). Sestává z topologických, geometrických a pomocných informací. Některé z těchto informací mohou být různými CNC systémy interpretovány odlišným způsobem. Proto NC program může mít pro různé systémy lehce odlišný zápis. [44–45]

Data NC programu, který pak vstupuje do systému CNC od firmy FANUC, musí mít následující formát:

```
% LF Block1 LF Block2 LF ... LF %  
kde LF = 0x0A ('\n')
```

Obrázek 6.1. Formát dat NC programu

Data musí začínat a končit znakem „%“. Jednotlivé bloky dat končí znakem „LF“ (LINE FEED = nový řádek)[46]. Tento znak nemusí být zapisován, vkládá se automaticky při přechodu na další řádek. Dalším důležitým prvkem je vytvoření hlavičky souboru. Hlavička souboru obsahuje data sloužící k rychlé identifikaci programu, jako je název a popis programu v komentáři. Pro systém FANUC jde hlavičku vytvořit následujícího způsobem:

```
%;  
<název_programu>(komentář k programu);  
.  
.  
.  
M30;  
%;
```

Obrázek 6.2. Šablona pro tvorbu NC programu

Z hlavičky programu se řídicí systém dozví název programu, který lze pak volat na dálku pomocí knihovny FOCAS 2. Za názvem programu se v kulatých závorkách uvádí komentář k programu, který se zobrazuje v systému CNC vedle názvu programu. Pro správné ukončení programu je nutné na konec souboru přidat příkaz pro ukončení programu (M30). Příkaz M30 slouží k ukončení programu a jeho následnému návratu na začátek. [47–49]

6.1 Tvorba generování NC kódu

Řídicí systém FANUC se nestará o pohyb všech pohonů stroje, ale pouze o hlavní pohyby manipulátoru po osách x , y , z (viz obr. 5.1) a rotaci manipulátoru okolo osy z (tato rotace je pro zjednodušení v této práci zanedbána). Výsledný pohyb celého manipulátoru je skládán z více samostatných pohybů, které jsou spouštěny sekvenčně z nadřazené řídicí jednotky. Z tohoto důvodu, bylo třeba vytvořit více generátorů NC kódu, které pokryjí všechny základní požadavky na pohyb stroje. Samotné generátory byly vytvořeny pomocí funkce v softwaru Matlab. Matlab byl použit kvůli výhodám rychlého prototypování funkce a protože, jedna varianta generátoru navazovala na další práci vytvořenou v prostředí Matlab. Funkce byly vytvořeny tak, aby se daly volat z vně programu Matlab pomocí nástroje Matlab engine (více v sekci 9.1).

Pro testovací účely této práce byly vytvořeny 3 varianty NC kódu:

- generátor pro lineární pohyb mezi dvěma body,
- generátor pro diagonální přesuny desek,
- generátor pro plánovač trajektorie.

6.1.1 Generátor pro lineární pohyb mezi dvěma body

Jak už z názvu vyplývá, do funkce vstupuje požadavek s počáteční a koncovou polohou, na základě kterého je vygenerován krátký příkaz v NC kódu s výše popsányi náležitostmi.

6.1.2 Generátor pro diagonální přesuny desek

Pro naprosté zjednodušení byly plánované pohyby mezi pozicemi zredukovány na lineární pohyby, které lze popsat několika řádky NC kódu. Průběh takového pohybu mezi body A a B je následující:

- manipulátor se nachází v bodě A,
- manipulátor vyjede s deskou v ose z nad úroveň ostatních stohů desek,
- manipulátor se přemístí nad novou pozici v osách x a y ,
- v ose z manipulátor klesne nad stoh nebo podavač CNC stroje,
- manipulátor se nachází v bodě B.

Tato sekvence je zatím stejná jak pro pohyb s deskou tak bez desky. V generátoru je ale možné nastavit i rychlosti pohybů pro jednotlivé úseky trajektorie a tím pohyby s deskou a bez desky odlišit. Příklad takto vygenerovaného programu je zapsán níže:

```
%;
<01212>(short Program);
N00 M09;
N10 G92 X -3000.0 Y -2000.0 Z 560.0;
N20 G01 X -3000.0 Y -2000.0 Z 570.0 F 60.0;
N30 G01 X -3000.0 Y -2000.0 Z 3000.0 F 2000.0;
N40 G01 X 1000.0 Y 1500.0 Z 3000.0 F 10000.0;
N50 G01 X 1000.0 Y 1500.0 Z 760.0 F 2000.0;
N60 G01 X 1000.0 Y 1500.0 Z 750.0 F 60.0;
N70 M30;
%;
```

Obrázek 6.3. Příklad NC programu pro diagonální přesuny desek

V programu je možné si povšimnout, že na začátku programu se nachází příkaz M09, což je příkaz pro vypnutí chlazení. Tento příkaz tu je jen kvůli přepsání příkazu M30 v modálních parametrech, kde zůstal po předchozím programu. Toto přepsání je zásadní pro detekci konce programu (viz sekce 7.4.1).

6.1.3 Generátor pro plánovač trajektorie

Do budoucna lze generátor pro přímočaré přesuny desek nahradit sofistikovanější variantou s plánovačem trajektorie, který vytvoří časově optimální trajektorii s ohledem na kolize a dynamické vlastnosti stroje. Vstupem do generátoru by pak byla datová sada souřadnic závislých na čase. Tyto souřadnice by byly následně přepsány do NC kódu. Tato varianta má jednu velkou nevýhodu a tou je velký objem dat, který je třeba dostat do CNC. NC program rychle narůstá na objemu a je pro něj klíčové zprovoznit spuštění programu pomocí DNC (Direct Numerical Control) (více v sekci 7.2.1).

Kapitola 7

Ovládání virtuálního CNC z počítače

Pro komunikaci s řídicím systémem CNC firma FANUC poskytuje knihovnu FOCAS 2. Knihovna FOCAS 2 umožňuje interakci mezi počítačem a systémem CNC FANUC a nabízí vše, co je potřeba k vývoji aplikací pro systém Windows, které komunikují s CNC systémy FANUC přes Ethernet nebo HSSB. Mimo jiné umožňuje číst a zapisovat data CNC souborů, číst data pohonů a vřeten nebo číst a měnit parametry nastavení stroje. [50]

Velkou část funkcí knihovny FOCAS 2 je možné vyzkoušet přímo na počítači bez fyzického stroje v aplikaci CNC guide 2. Je ale nutné podotknout, že CNC guide 2 se od skutečného CNC liší ve výkonu hardwaru nebo například v konfiguraci servomotorů a vřeten. Proto některé funkce spustitelné na CNC nelze spustit v CNC guide 2. [51]

7.1 Propojení systému FANUC s PC

Systémy FANUC lze propojit s externím zařízením přes Ethernet nebo přes HSSB. Přes tyto sběrnice lze také simulovat připojení mezi PC a CNC guide 2. Nastavení připojení mezi PC a CNC guide 2 je značně jednodušší, než propojování s fyzickým strojem. V případě propojení s fyzickým strojem je třeba nastavit parametry pro připojení přes Ethernet/HSSB přímo v systému stroje. [50]

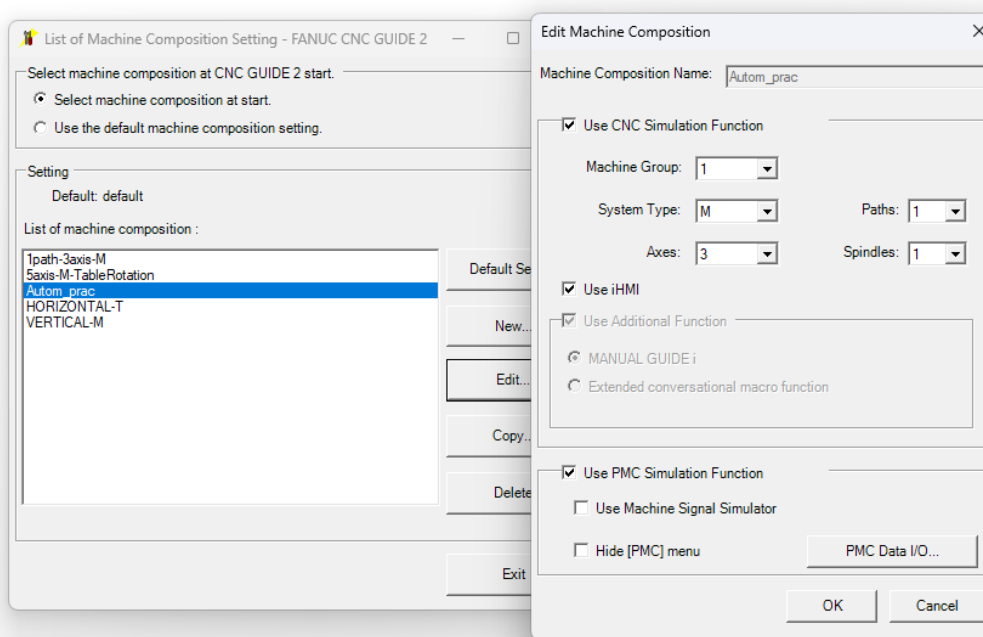
7.1.1 Zprovoznění komunikace mezi CNC guide 2 a PC přes Ethernet

Pro zprovoznění komunikace mezi aplikací CNC guide 2 a PC přes Ethernet je třeba v nástroji „Machine Composition Setting“ (nástroj s názvem *MachineSetting.exe* při CNC guide 2 sloužící k základnímu nastavení virtuálního stroje jako např. typ stroje, počet os, počet vřeten atd.) zvolit funkci „PMC simulation function“ (viz obr.7.1).

K samotnému propojení slouží v knihovně FOCAS 2 pro Ethernet (*fwlib32.dll* a *fwlibe1.dll*) funkce `cnc_allc1ibhnd12()` [52]. Pro tuto funkci platí následující nastavení:

- **IP adresa:** 127.0.0.1 (localhost)

- **Číslo portu:** 8193



Obrázek 7.1. Nástroj Machine Composition Setting

7.2 Práce s NC programem pomocí knihovny FOCAS 2

7.2.1 Nahrání programu do CNC

Existují dvě základní varianty, jak vložit NC program do CNC.

- **Vložení programu přímo do paměti CNC:** Vložit program do interní paměti CNC může operátor přímo na místě z datového nosiče, jako je USB flash disk nebo paměťová karta. Druhá možnost je nahrát ho přímo do CNC na dálku z PC přes Ethernet nebo HSSB pomocí knihovny FOCAS 2. [49]
- **Spuštění programu pomocí DNC (Direct Numerical Control):** DNC umožňuje spustit NC program na CNC z externího uložení. V tomto případě je program uložen jinde než v paměti CNC a do CNC se posílá pouze aktuální řádek kódu. Tato metoda je obzvláště užitečná tehdy, kdy NC program je větší než interní paměť CNC. [49, 53]

Pro automatizaci nahrávání souborů do CNC byla zvolena metoda nahrávání souboru z PC pomocí knihovny FOCAS 2. Pro samotné nahrání NC programu byly použity funkce `cnc_dwnstart4()`, `cnc_dwnload4()` a `cnc_dwnend4()`. Klíčový pro správné fungování funkcí je zápis požadované adresy v CNC, který vypadá následovně:

```
//CNC_MEM/USER/PATH1/
```

Obrázek 7.2. Příklad adresy v CNC FANUC

Je nutné mít na paměti, že za názvem složky musí následovat „/“, jinak systém CNC bere název jako název souboru. Co se týče adresy ze strany PC, ta se zapisuje podle běžných zvyklostí a název souboru se udává i s příponou s typem souboru (například *.txt*). [49]

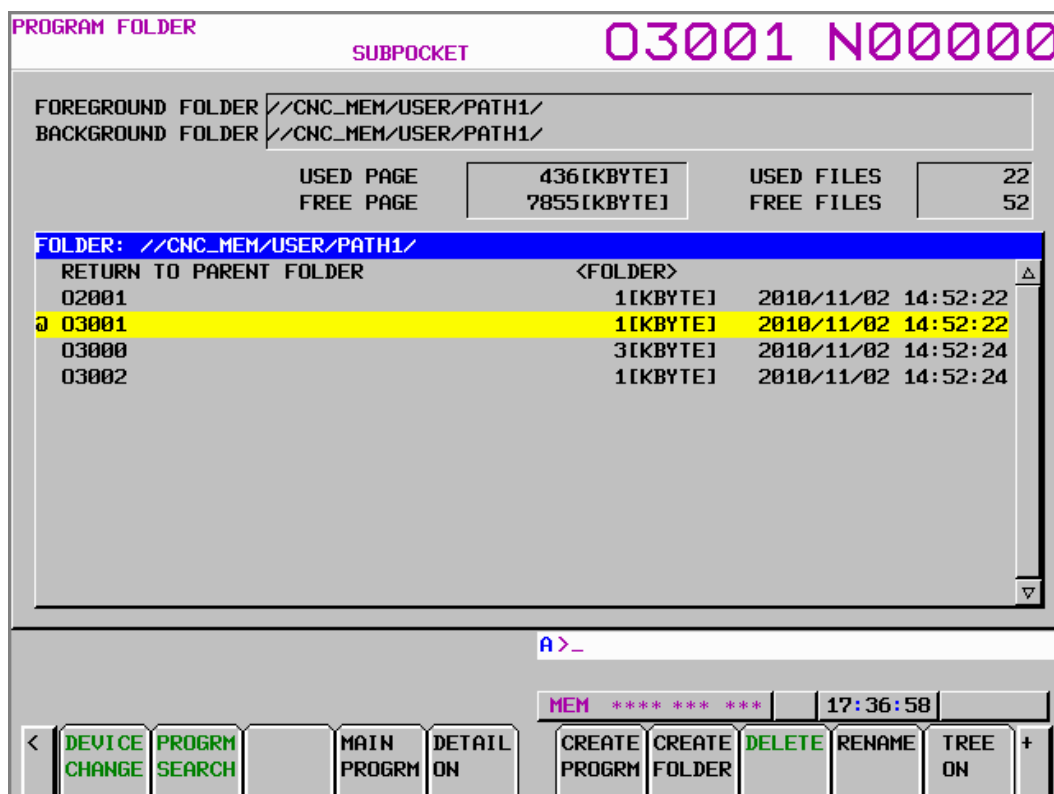
7.2.2 Volba hlavního programu

Ke spuštění souboru na CNC je třeba navolit požadovaný NC program. Zvolený program je nutné v systému nastavit jako „main program“. Toho lze dosáhnout buď přímo v CNC, nebo na dálku pomocí funkce `cnc_pdf_slctmain()`. Zápis adresy vybraného programu se uvádí s názvem programu na konci bez „/“ [49]:

```
//CNC_MEM/USER/PATH1/O3001
```

Obrázek 7.3. Příklad adresy v CNC FANUC pro zvolení programu

Program zvolený jako „main program“ je v CNC označený pomocí symbolu „@“ na-
levo od názvu programu viz obr. 7.4.



Obrázek 7.4. Zobrazení programů v systému FANUC a zvolený program O3001

7.2.3 Mazání programu

V případě, že bude třeba do CNC vkládat více objemných NC programů, jeho interní paměť se rychle zaplní. Proto je třeba myslet i na mazání souborů v průběhu

běhu automatického skladu. Toho lze na dálku dosáhnout jednoduše pomocí funkce `cnc_pdf_del()`, která v systému vymaže specifikovanou složku nebo soubor. Zápis pro mazání souboru je obdobný jako zápis pro zvolení hlavního programu. Možnost vymazání souboru je ale dostupná pouze, když je CNC v režimu `EDIT mode`. [49]

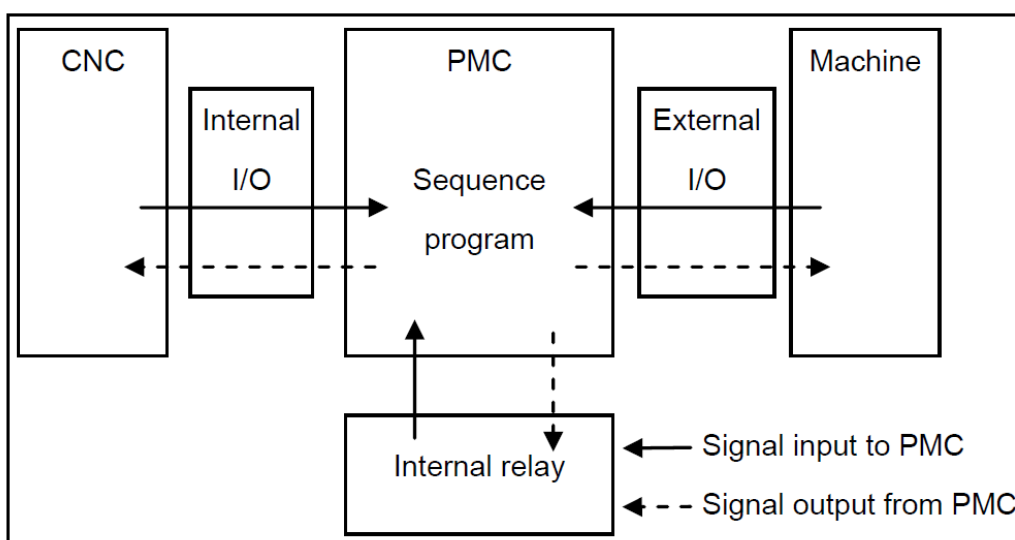
7.3 Ovládání panelu operátora z PC

Pro automatický běh systému bez nutnosti zásahů operátora do procesu je třeba ovládat klávesy na ovládacím panelu operátora, jako jsou klávesy měnící režim řídicího systému (`EDIT mode`, `AUTO mode`, ap.) a klávesa pro spuštění programu (`CYCLE START`). Stisknutím tlačítka na ovládacím panelu je obvykle spuštěna naprogramovaná sekvence v PMC, která vykoná požadavek operátora. Tuto konkrétní sekvenci v PMC lze také spustit na dálku přes knihovnu FOCAS 2 z PC. [49, 54]

7.3.1 PMC (Programmable Machine Controller)

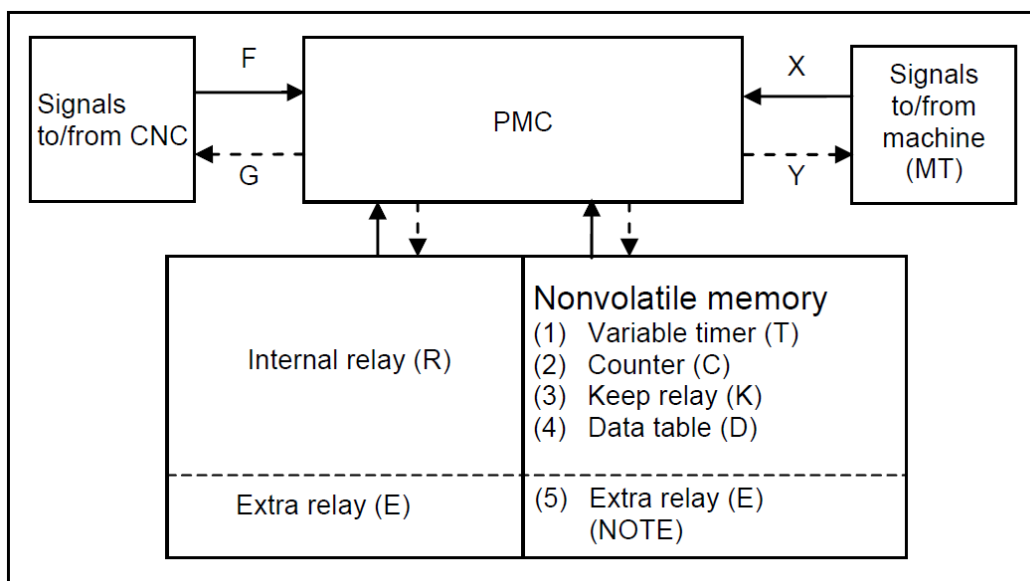
PMC je virtuální PLC, které funguje zevnitř již existujícího CPU od firmy FANUC. Slouží k sekvenčnímu řízení pro nástroje stroje, jako je rotace vřetena, výměna nástrojů, ovládací panel stroje atd. Sekvenční řízení slouží k postupnému vykonávání řídicích operací v určeném pořadí nebo podle logických operací. Program pro sekvenční řízení se nazývá sekvenční program. K programování sekvenčních obvodů v PMC se používá jazyk Ladder. Pro vytváření Ladder programů pro FANUC je určen softwar FANUC Ladder III. [54–55]

Na obr. 7.5 je zobrazena základní konfigurace PMC. Vstupní signály v PMC se skládají ze vstupních signálů CNC, jako jsou například signály M a T funkcí, a vstupních signálů stroje, jako je například tlačítko `CYCLE START`. Naopak výstupní signály z PMC do CNC obsahují signály, jako „příkaz cycle start“ (spuštění programu) a výstupní signály do stroje jako signál „vřeteno zastaveno“ nebo „rotace vřetene“. PMC tyto vstupní a výstupní signály ovládá pomocí vykonávání sekvenčních programů. [54]



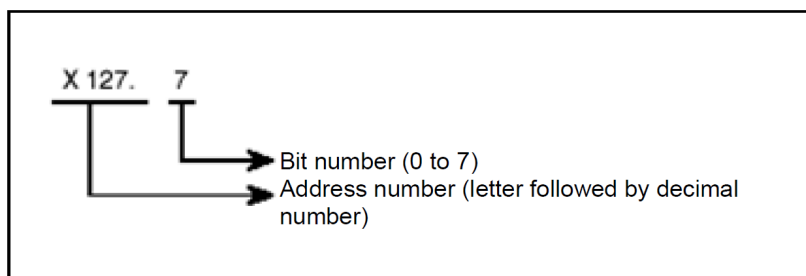
Obrázek 7.5. Základní konfigurace PMC [54]

PMC adresy signálů indikují polohy vstupních a výstupních signálů, které si mezi sebou vyměňují stroj a CNC s PMC, a polohu adres signálů pro vnitřní relé a data v nevolatilní paměti. PMC adresy lze zevrubně rozdělit do tříd popsaných na obr. 7.6.



Obrázek 7.6. Vztahy mezi adresami v PMC [54]

Samotná PMC adresa se skládá z jejího čísla a čísla bajtu (0 až 7) jako na obr. 7.7. První znak v čísle adresy reprezentuje typ signálu (např. X reprezentuje vstupy ze stroje do PMC).

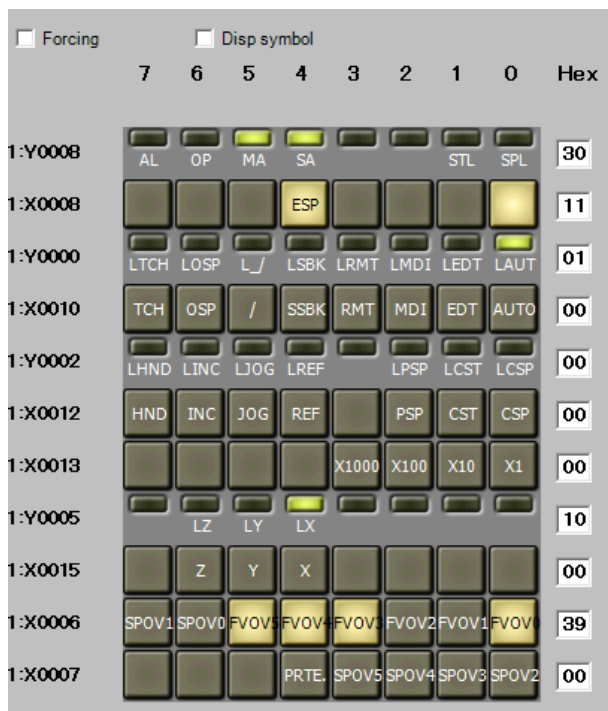


Obrázek 7.7. Formát PMC adresy [54]

7.3.2 Získ potřebných PMC adres

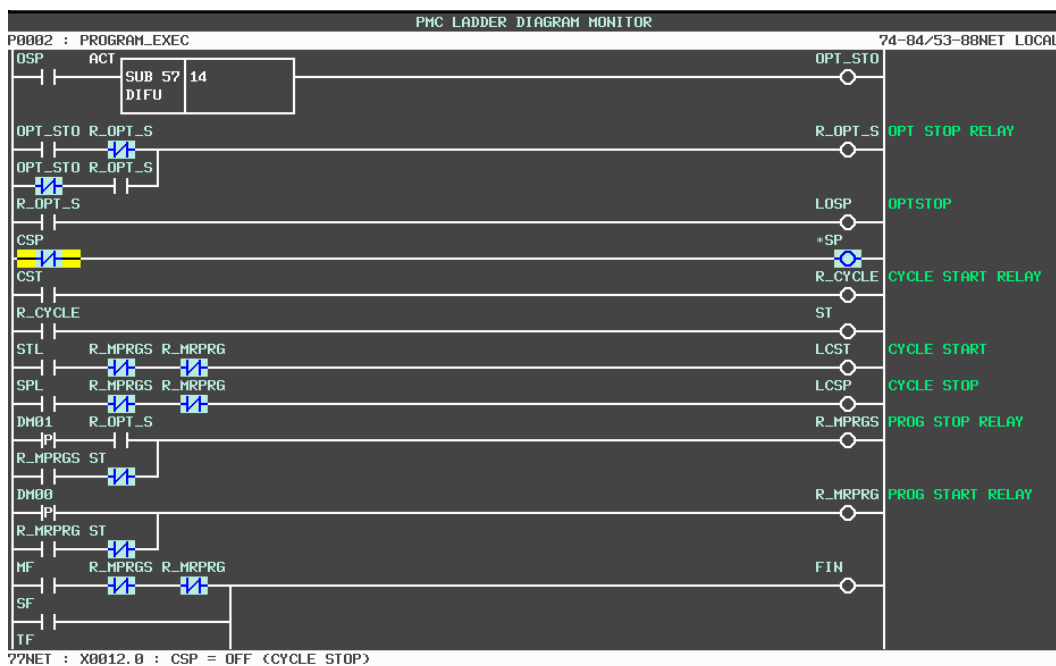
Potřebné adresy pro ovládání panelu je možné získat přímo z CNC guide 2 dvěma způsoby:

- PMC I/O operational panel:** Při zmáčknutí pravého tlačítka myši nad obrazovkou CNC guide se objeví kolonka PMC. V ní lze spustit nové okno s „PMC I/O operational panel“ (viz obr.7.8). V tomto okně jsou v levé části zobrazeny adresy X a Y. Uprostřed jsou zobrazena tlačítka pro dané adresy seřazená podle čísla dodatečného bajtu zleva doprava. Vpravo se nachází sloupec označený jako HEX. Zde se ukazuje v šestnáctkové soustavě aktuální stav relé pod danou adresou.



Obrázek 7.8. PMC I/O operational panel

- PMC Ladder diagram monitor:** V záložce „Nastavení“ v řídicím systému CNC se nachází „PMC Ladder diagram monitor“, který zobrazuje sekvenční obvody v Ladderu, které ovládají chod stroje. Při najetí kurzoru na požadované relé se zobrazí jeho PMC adresa a jeho stav viz obr. 7.9. V PMC Ladder diagram monitoru se také zobrazuje aktuální stav relé, takže v něm lze i sledovat reakci programu na vnější vstupy.



Obrázek 7.9. PMC Ladder diagram monitor

7.3.3 Přepínání mezi režimy systému CNC (X0010)

Pro správné fungování automatického řízení CNC je nutné na dálku z PC přepínat mezi režimy AUTO mode a EDIT mode. V EDIT mode režimu může uživatel měnit nastavené parametry a mazat soubory, což je kritické pro běh automatického ovládání. Naopak v režimu AUTO se NC program spouští pomocí tlačítka CYCLE START.

K přepnutí relé byla použita funkce `pmc_wrpmcrng()` z knihovny FOCAS 2. Vstupem do funkce je PMC adresa signálu bez bajtu na konci, číslo v decimální soustavě, reprezentující binární stav relé a typ formátu posílaných dat. Například pro spuštění relé pro EDIT mode je třeba do funkce poslat bajt s informací „0010“, což je v šestnáctkové soustavě „2“ (viz tabulka 7.1). Pro správnou simulaci tlačítka musí po „1“ následovat signál s informací „0“. Protože při stisku tlačítka je relé sepnuto a po puštění tlačítka se vrací do původního stavu „0“.

PMC adresy pro některé režimy CNC:

MODE	Adresa	data v HEX pro spuštění
AUTO	X0010.0	1
EDIT	X0010.1	2
MDI	X0010.2	4
REMOTE	X0010.3	8
Single Block	X0010.4	10
Block skip	X0010.5	20

Tabulka 7.1. Úryvek PMC adres pro režimy systému

7.3.4 Ovládání NC programu (X0012)

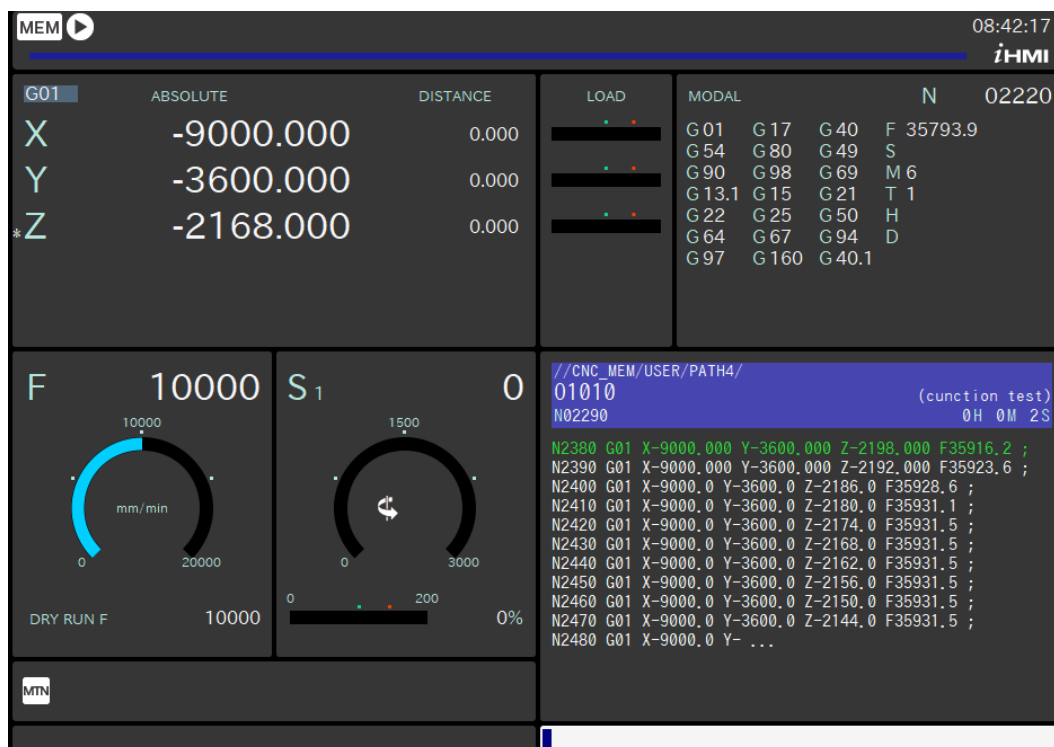
Pro práci s programem jsou určena tlačítka na ovládacím panelu operátora, která jsou pod adresou X0012 (viz tabulka 7.2). Pro spuštění NC programu je třeba nejdříve nastavit správný program jako „Main program“, dále je třeba nastavit režim stroje na AUTO mode. Poté lze na dálku spustit program zmáčknutím tlačítka CYCLE START (adresa „X0012.1“). Zde je třeba si oproti volbě režimů dát pozor na to, aby na relé, do kterého vstupuje signál z tlačítka CYCLE START, byla přivedena sekvence hodnot, která ho nejdříve zapne a poté hned vypne. Vypnutí relé je v tomto případě klíčové, protože celá sekvence se spustí až při puštění tlačítka.

MODE	Adresa	data v HEX pro spuštění
CYCLE STOP	X0012.0	1
CYCLE START	X0012.1	2
PROGRAM STOP	X0012.2	4
REF	X0012.4	10
JOG	X0012.5	20

Tabulka 7.2. Úryvek PMC adres pro adresu X0012

7.4 Zisk dat o průběhu programu (modální data)

Modální data reprezentují právě platící modální a blokové příkazy NC programu (G, X, F, M ...). Modální příkazy jsou příkazy, jejichž platnost s naprogramovanou hodnotou zůstává zachována ve všech následujících blocích, dokud není přepsána jinou hodnotou a nebo zrušena. Naopak blokové příkazy platí pouze v bloku, v němž jsou naprogramovány. Díky vizualizaci těchto dat je možné kontrolovat, jaké příkazy během běhu programu aktuálně platí (viz blok 1 v obr. 7.10). [46, 49]



Obrázek 7.10. Obrazovka ovládacího panelu

7.4.1 Využití modálních dat k detekci konce programu

Konec programu jde detekovat pomocí modálních dat v systému CNC. Pro detekování konce programu stačí detekovat některý z M příkazů (M02, M30) ukončujících program. Problém s touto funkcí spočívá v tom, že příkaz M30 setrvává v modálních datech do doby, než je přepsán novým příkazem. Tedy může setrvat i po spuštění nového programu. Proto na začátku nového programu je třeba, hodnotu příkazu M přepsat jinou proměnnou např. příkazem M09 pro vypnutí chlazení. K odečítání dat na dálku byla použita funkce `cnc_modal()`. [46, 49]

7.5 Vizualizace aktuálního stavu CNC

Pro kohokoliv, kdo chce svůj stroj řídit na dálku, je klíčová možnost spolehlivé vizualizace aktuálního stavu stroje. FANUC umožňuje pomocí knihovny FOCAS 2 získat data o aktuálním stavu CNC, která se zobrazují na hlavní obrazovce ovládacího panelu (position screen) viz obr 7.10. Dále umožňuje také pomocí knihovny FOCAS 2 na dálku číst chybové hlášky z CNC.

Na dálku je možné si zobrazit následující parametry o stavu stroje:

- **Aktuální poloha** (mm) - CNC v základu zobrazuje čtyři údaje o poloze. Absolutní polohu („absolute position“), relativní polohu („Relative position“), polohu stroje („Machine position“) a zbývající vzdálenost („distance to go“).
- **Posuvová rychlost** (mm/min)
- **Zátěž na pohonech** (%)
- **Otáčky vřetene** (ot/min)
- **Zátěž na vřetení** (%)
- **Informace o obrábění stroje** - Zde CNC zobrazuje informace o chodu CNC, jako je doba obrábění stroje, doba cyklu a počet obrobeků.
- **Chybové hlášky** („Alarm messages“ nebo „Operator messages“)

Všechny výše zmíněné parametry je možné získat pomocí knihovny FOCAS 2. Nelze ale otestovat správnost implementace některých funkcí, protože simulace v CNC guide 2 neumožňuje vizualizaci zatížení pohonů a vřetene. Proto bylo pro aplikaci vytvořeno pouze okno zobrazující aktuální stav polohy stroje. Pro odečítání těchto parametrů byly použity následující funkce: `cnc_rdaxisdata()` (poloha os) a `cnc_actf()` (posuvová rychlost/„feed rate“). Vzhledem k absenci vřetene v automatickém skladu, byly funkce pro vřeteno vynechány. [49]

Je nutné ještě podotknout, že tento typ odečítání informací o stroji, je vhodný pouze pro informační účely. Množství získaných dat není dostatečné pro reálnou analýzu stroje. K tomu je vhodné využít odečítání dat jinými metodami, jako například přes aplikace SERVO guide a SERVO viewer, které umožňují odečítání signálů až s vzorkovací frekvencí 1 kHz.

Chybové hlášky je možné také číst na dálku. K jejich získání slouží funkce `cnc_rdalmsg2()` („alarm message“) a `cnc_rdopmsg3()` („operator message“). V případě detekce nějakého problému systémem CNC je možné díky čtení chybových hlášek zjistit na dálku, o jaký problém se jedná. Plus chybové hlášky umožňují kontrolu toho, zda CNC funguje, jak má. Tato funkce nebyla využita v této práci při tvorbě aplikace. [49]

Kapitola 8

Dynamický simulační model stroje (SERVO model)

Součástí řídicího systému jsou i pohony (servomotory a vřetenové motory), které jsou pomocí řídicího systému ovládány a řízeny. Pohání například posuvové osy stroje, polohovací osy a vřetena. FANUC mezi dodavateli CNC řízení nabízí nejširší sortiment servomotorů na trhu. [56]

Pro stavbu skladového manipulátoru bylo zvoleno několik typů pohonů, ale pro cíle této práce jsou důležité pouze pohony starající se o pohyb manipulátoru ve směru os x , y a z . Pro podélný pohyb příčnicku ve směru sloupové pojezdové dráhy (osa x) a k zdvihu desky (osa z) byly zvoleny pohony typu A06B-2255-B400 [57]. Tyto pohony jsou propojeny s řídicím systémem prostřednictvím dvoukanálových měničů A06B-6290-H208 a H209 a jednoho jednocanálového A06B-6290-H125. K těmto měničům jsou ještě připojeny další dva pohony typu A06B-2239-B100 [58], z nichž jeden se stará o příčný pojezd manipulátoru (osa y) a druhý o rotaci desky podél osy z . [40]

8.1 Servo model

Servo model (SM) je nová funkce, která je nově implementována v CNC guide 2 jako součást jeho DT. SM umožňuje simulovat servo řízení, chování servo motorů od firmy FANUC a chování posuvných os stroje při uvažování jejich mechanických vlastností. CNC guide 2 simuluje chování AC servopohonů a posuvových os, včetně uvažování některých jejich dynamických vlastností. Díky tomu ho lze využít pro simulaci odchylek stroje od požadované polohy. Při propojení CNC guide 2 se spuštěnou simulací SM a softwaru SERVO viewer s nástrojem Surface Estimation je možné na základě simulovaných dat realisticky odhadovat kvalitu povrchu obrobků. [52]

Tato funkce umožňující dynamickou simulaci pohonů je významným vylepšením v porovnání s předchozí „statickou“ verzí softwaru CNC guide. Pomocí SM je možné definovat pouze zátěžné hmoty připojené přímo na výstupy pohonů, ale bohužel neumožňuje napojení na uživatelem vytvořený dynamický simulační model soustavy více těles, vytvořený v jiném softwaru pro simulaci dynamických soustav (např. Adams, MBDyn nebo třeba Matlab Simulink) na pohony simulované v CNC guide 2 ani nepodporuje napojení na standardizované kosimulační spojení pomocí standardu FMI (Functional Mockup Interface). [59]

■ 8.1.1 Výhody a omezení simulace se Servo modelem

V Manuálu Operátora pro CNC guide 2 [52] jsou popsány následující výhody a omezení používání funkce SM:

■ Výhody simulace

- Pomocí simulace lze měřit pro jednotlivé osy data o poloze pohonů, odchylky polohy a kroutící moment pohonů. [52]
- Na základě simulace se SM je možné ladit parametry pro řízení rychlosti posuvu, nebo pro řízení zrychlení a zpomalení os. [52]
- Doba běhu programu může být predikována pomocí kontroly polohy. [52]
- Odhad kvality povrchu obrobku („Surface Estimation“) na základě naměřených polohových dat ze simulace. [52]

■ Omezení simulace

- Chování stroje, pohonů a měničů nemůže být pomocí simulace zcela zreprodukováno, a proto
 - simulace nemůže být použita pro nastavování servomotorů,
 - simulace nemůže být použita pro výběr pohonů a měničů,
 - pomocí SM nelze simulovat chování brzd.
- Simulace je prováděna pouze na polohové řídicí smyčce, a proto
 - simulace nemůže být použita pro rychlostní a momentové řízení,
 - SM nemůže simulovat polohové řízení vřetene.
- V simulaci nejsou uvažovány řezné odpory a ovlivňování mezi osami.
- SM nepočítá při simulaci tření s mazáním a hysterezí.
- Simulace nedosahuje správných výsledků, pokud:
 - je spuštěna funkce „High speed cycle machining function“,
 - jsou použity funkce, které nejsou v příloze C.1.

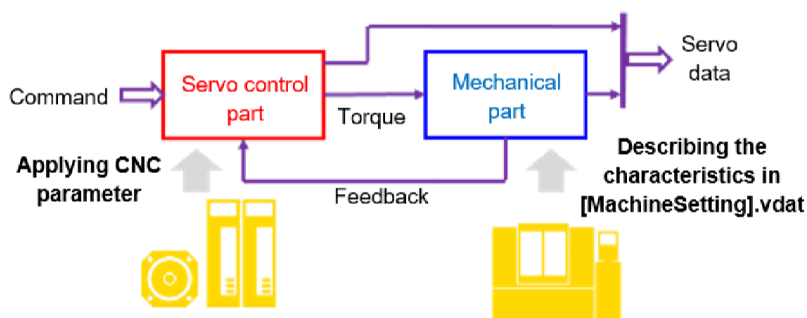
■ 8.1.2 Shrnutí výhod a omezení funkce Servo model

Z výhod a omezení simulace s funkcí SM vyplývá, že možnosti této funkce jsou značně omezené. SM je v podstatě možné použít pouze pro získání dat popsaných ve výhodách funkce SM. Nejdůležitější z funkcí SM popsaných ve výhodách (sekce 8.1.1) je funkce „Surface Estimation“, která tvoří část DT pro FANUC. Aktuální podoba DT od firmy FANUC v tuto chvíli umožňuje realisticky simulovat pouze kvalitu obrobeného povrchu. Proto DT pro FANUC je natolik omezené svými nedostatky, že v podstatě zamezuje jeho plnohodnotné využití při tvorbě DT s CNC řídicím systémem FANUC.

8.2 Sestavení Servo modelu

8.2.1 Konfigurace Servo modelu

SM sestává z **řídící části servomotorů** („Servo control part“) a z **mechanické části** („Mechanical part“) viz obr. 8.1. **Řídící část servomotorů** simuluje řízení servomotorů na základě CNC parametrů týkajících se řízení servomotorů (převážně parametry č. 1800 - 2999). **Mechanická část** načítá mechanické vlastnosti stroje nutné pro simulaci pohybu motorů a posuvových os z *.vdat* souboru, který je součástí definičních dat stroje v nástroji „Machine Composition Setting“ (nástroj pro stavbu stroje). [52]



Obrázek 8.1. Konfigurace Servo modelu [52]

8.2.2 Nastavení CNC parametrů pro řízení servomotorů

V manuálu operátora pro FANUC CNC guide 2 [52] je uveden seznam parametrů, které mají vliv na servořízení v SM (viz příloha C.1). Pro správné nastavení parametrů je důležité při doplňování postupovat společně s dokumentací „SERVO PARAMETER MANUAL (B-65270)“ [60] a s dokumentací pro servomotory [57–58] (příloha C.4.1 a příloha C.4.2). Část těchto parametrů je nutné doplnit ze seznamu parametrů pro daný typ servomotoru (příloha C.2 a C.3), který lze dohledat pro oba motory v „SERVO PARAMETER“ manuálu [60]. V rámci systémů FANUC se konkrétní typ motoru definuje pomocí ID motoru. Jedná se o třímístné číslo, které je možné vyčíst z dokumentace motoru pod názvem „Model code“ viz přílohy C.4.1 a C.4.2. Toto číslo je jedním z parametrů, které je nutné nastavit. Slouží k identifikaci motorů v dokumentaci.

Samotné nastavení a porozumění těmto parametrům je klíčové pro správné fungování virtuálního stroje. Parametry, které nejsou přímo specifikovány pro daný typ motoru (přílohy C.2 a C.3), je třeba nastavit na základě doporučených hodnot v SERVO PARAMETER manuálu [60] nebo tak, aby se nacházely v mezích požadovaných hodnot. Systém CNC nekontroluje, zda vyplněné parametry odpovídají rozsahu požadovaných hodnot, což komplikuje případné hledání chyb. V manuálu operátora pro CNC guide 2 [52] je doporučeno, aby byly vyplněny pouze parametry v příloze C.1. Upravování jiných parametrů by mohlo mít negativní vliv na kvalitu simulace.

Vyplnění parametrů pro SERVO model:

Během nastavování parametrů povolených pro SM (příloha C.1) byly zadány všechny parametry týkající se pohonů na základě pohonové techniky prezentované v [40]. Osy *x* a *z* byly nastaveny pro motor typu A06B-2255-B400 a osa *y* pro motor A06B-2239-B100.

Parametry týkající se přímo daných pohonů byly nastaveny podle parametrů v přílohách C.2 a C.3. Ostatní parametry, které nešlo vyplnit podle tabulek pro pohony v přílohách C.2 a C.3, byly vyplněny na základě doporučených hodnot v **SERVO PARAMETER** manuálu [60]. Ostatní parametry, například parametry pro nastavení filtrů, byly vypnuty. [40]

■ 8.2.3 Vygenerování *.vdat* souboru

Generování *.vdat* souboru probíhá automaticky při spuštění CNC guide 2, pokud jsou splněny následující podmínky vyjmenované v [52]:

- žádný *.vdat* soubor pro vybrané nastavení stroje neexistuje
- existuje minimálně jedna funkční servo osa
- nevyskytnul se error SV1067 FSSB configuration error
- osy jsou správně očíslovány (parametr č. 1023)

■ 8.2.4 Nastavení parametrů mechanické části (*.vdat* soubor)

Data s nastavením parametrů mechanické části stroje jsou uložena ve *.vdat* souboru a generována pro každé nastavení stroje („Machine setting“) zvlášť. Například adresa pro nastavení stroje s názvem `1path-3axis-M` a řídicí systém `FS30i-B` je zobrazena na obr. 8.2.

```
[C:\ProgramData\FANUC\NCGuide FS30i-B\MachineSetting\1path-3axis-M.vdat]
```

Obrázek 8.2. Příklad adresy *.vdat* souboru

Daný soubor má formát XML tagů. Je možné ho otevřít a upravovat například v „Poznámkovém bloku“. Struktura *.vdat* souboru vypadá následovně:

```
<?xml version="1.0" encoding="utf-8"?>
  <VDAT_AXIS_INFO>
    <VD_AXIS_DATA>
      <axis_index>0</axis_index>
      <servomodel_sim>1</servomodel_sim>
      <table_unit>10.0</table_unit>
      <ratio_num>1</ratio_num>
      ...
    </VD_AXIS_DATA>
    ...
  </VDAT_AXIS_INFO>
</VDAT_XML_DATA>
```

Obrázek 8.3. Příklad struktury *.vdat* souboru


```

2023/08/05 08:12:47vd_sim_start_log 1011 ...
... Simulation was started on 1-axis.
2023/08/05 08:12:47vd_sim_start_log 1011 ...
...Simulation was started on 2-axis.

```

Obrázek 8.6. Příklad zprávy v *.log* souboru

8.3 Odhad doby běhu programu

Data získaná simulací s využitím funkce SM lze použít pro plánování pohybů a jednotlivých operací manipulátoru a jejich optimalizaci. Pro tyto požadavky je klíčové znát co nejpřesněji dobu běhu programu. Pro získání této informace je třeba program spustit v CNC guide 2 a celý běh programu simulovat. Dobu běhu programu pak lze odečíst z obrazovky ovládacího panelu, nebo ji lze získat pomocí funkce `cnc_rdparar()`, která umožňuje vyčíst systémové parametry CNC. Dobu běhu programu reprezentují CNC parametry číslo „6757“ a „6758“ (viz obr. 8.7). Čas reprezentovaný těmito parametry je udáván v minutách v parametru „6758“. Parametr „6757“ reprezentuje čas v milisekundách, který zbývá po odečtení všech minut z výsledné doby běhu cyklu. Výsledný čas je kombinací obou parametrů. [52]

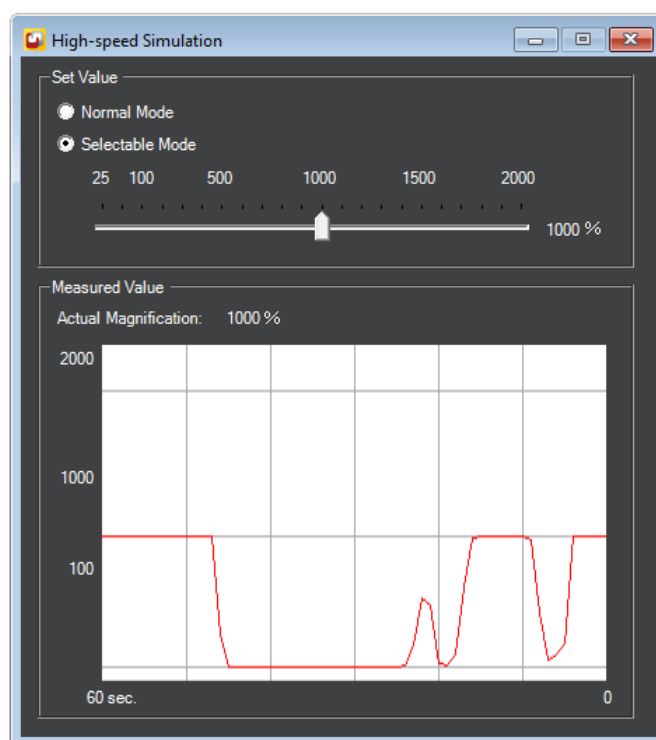
PARAMETER	
06700	PRT PCM 06754 231
06710 COUNT UP M-CODE	06755 THRON ON TIME 0
06711 PARTS COUNT	06756 0
06712 PARTS TOTAL	06757 CYCLE TIME 53712
06713 PARTS REQUIRED	06758 1
06750 POWER ON TIME	
06751 OPERATING TIME	
06752	
06753 CUTTING TIME	

Obrázek 8.7. Zobrazení parametrů doby běhu programu v systému FANUC

Přesnost odhadu doby běhu programu je možné zvýšit spuštěním funkce Servo model a správným nastavením parametrů emulovaného řídicího systému, tak aby se jeho nastavení shodovalo s nastavením reálného CNC.

8.3.1 High-speed Simulation

V CNC guide 2 přibyla také funkce „High-speed Simulation function“ (HSSF). Tato funkce umožňuje zrychlit simulaci běhu CNC až dvacetinásobně. Na obrázku 8.8 je vidět okno s nastavením rychlosti běhu simulace. Ve spodní části okna je možné vidět graf rychlosti simulace za posledních 60 s. Tato funkce je obzvláště vhodná pro kontrolu správnosti dlouhých obráběcích cyklů. Vysoká rychlost má ale negativní vliv na přesnost simulace. V případě, že je potřeba znát pouze orientační odhad doby běhu programu, tato funkce může značně urychlit dobu simulace. [52]



Obrázek 8.8. Okno High-speed Simulation function

8.3.2 Porovnání simulace doby běhu programu za různých podmínek

Pro otestování vlivu simulace s funkcí SM na odhad doby běhu programu byla použita testovací „databáze pohybů“ blíže popsaná v sekci 9.2.1. Na základě těchto poloh byly pomocí automatizační funkce popsané v sekci 9.1 vytvořeny pohyby, které byly následně simulovány dvakrát. Jednou se spuštěnou simulací se Servo modelem a jednou bez ní. Dále byla naměřena data i pro dvacetinásobné zrychlení simulace pomocí funkce HSSF v obou výše zmíněných případech. Tato data byla naměřena v CNC guide 2 (varianta FS 31i-B5 Plus) s parametry nastavenými na základě pohonného systému použitého pro automatický sklad (viz kapitola 8). Bohužel vzhledem k absenci fyzického manipulátoru nebylo možné porovnat naměřená data s dobou běhu programu na fyzickém stroji. Naměřená data jsou zobrazena v následující tabulce 8.1.

NC Program	Simulace bez SM	Simulace bez SM s HSSF	Simulace se SM	Simulace se SM a HSSF
1.	3 min 34 s	3 min 34 s	3 min 35 s	3 min 35 s
2.	3 min 24 s	3 min 24 s	3 min 24 s	3 min 24 s
3.	3 min 1 s	3 min 1 s	3 min 1 s	3 min 1 s
4.	1 min 49 s	1 min 48 s	1 min 49 s	1 min 49 s
5.	2 min 50 s	2 min 50 s	2 min 50 s	2 min 50 s

Tabulka 8.1. Tabulka dat doby běhu programu

Z dat v tabulce 8.1 je patrné, že simulace pohybů manipulátoru se zapnutou funkcí SM má na odhad doby běhu programu jen minimální vliv. Totéž lze říct i pro odhad doby běhu programu při dvacetinásobné rychlosti simulace. Odhadnutá doba při zapnuté funkci HSSF se většinou zpožďuje proti odhadu při normální rychlosti. Maximální takto naměřené zpoždění se rovnalo jedné sekundě.

8.4 Měření a využití dat ze simulace (Servo model)

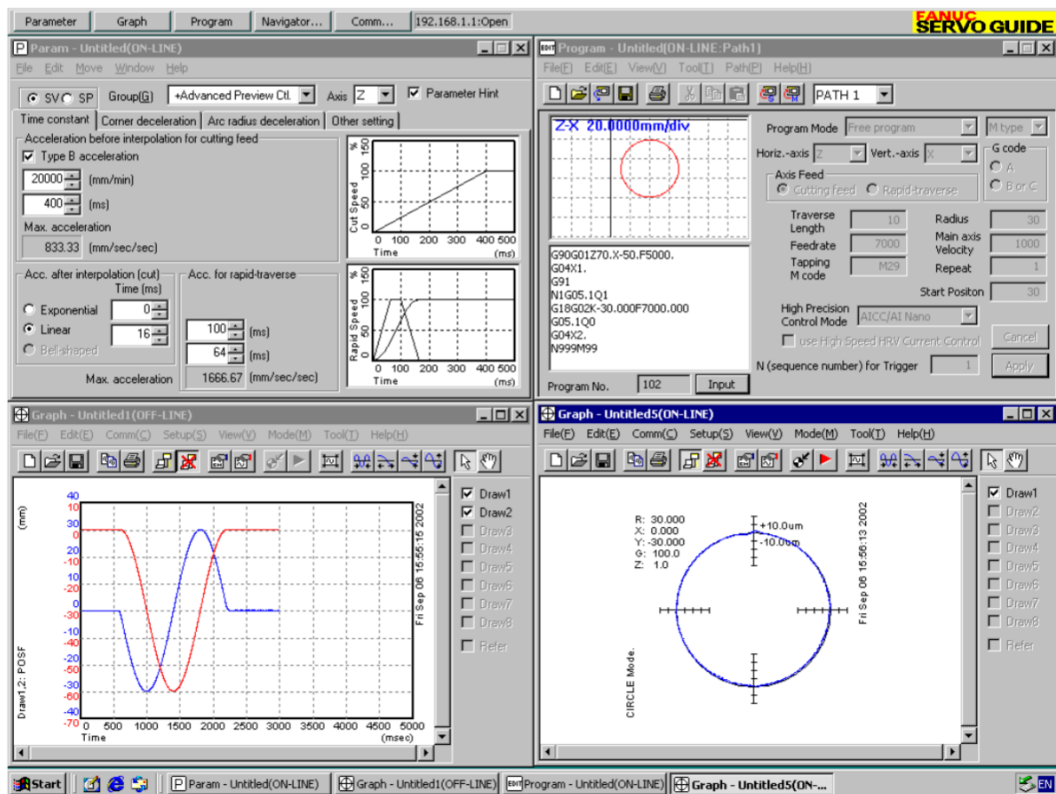
Data z pohybových os a servopohonů je možné snímat pomocí softwaru SERVO guide (verze 12.20 a novější) a SERVO viewer (verze 3.90 a novější). SERVO viewer tvoří, jak už bylo výše zmíněno v sekci 5.1.4, spolu s funkcí „Surface Estimation“ část DT od FANUC umožňující na základě naměřených dat ze simulace SM realistický odhad kvality obrobeneho povrchu obrobku.

Je nutné také zmínit, že k odečítání dat z os a servomotorů ze simulace nejde použít knihovna FOCAS 2. Tato skutečnost v podstatě znemožňuje jednoduchou automatizaci tohoto procesu. Pro měření dat v této práci byl použit software SERVO guide, který byl zapůjčen firmou Houfek a.s.. V této práci vytvářená aplikace pomocí knihovny FOCAS 2, nemůže plnohodnotně komunikovat s CNC, pokud současně CNC bude propojeno se softwarem SERVO guide a budou z něj pomocí této aplikace měřena data [52]. Proto tato část práce tvoří samostatnou větev. Data získaná pomocí SERVO guide nelze použít přímo ve vytvářené aplikaci. Cílem této kapitoly je prozkoumat možnosti získání dat ze simulovaných servomotorů a zjistit možnosti jejich využití při realizaci DT skladového manipulátoru, která v této práci nebud dále rozvíjena.

8.4.1 SERVO guide

FANUC SERVO guide je integrované prostředí vytvořené firmou FANUC pro usnadnění ladění servomotorů a vřeten stroje. SERVO guide sestává ze čtyř softwarových funkcí (obr. 8.9):

- **Parameter Window** - slouží zobrazení a přepisování CNC parametrů přímo z PC (na obr. 8.9 vlevo nahoře) [61]
- **Graph Window** - funkce slouží k měření dat z vřeten a servomotorů (na obr. 8.9 vlevo dole) [61]
- **Program Window** - funkce pro testování NC programu (na obr. 8.9 vpravo nahoře) [61]
- **Tuning Navigator, AI Servo Tuning** - funkce pro automatické ladění parametrů pohonů [61]



Obrázek 8.9. Obrazovka SERVO guide s jeho čtyřmi softwarovými funkcemi [61]

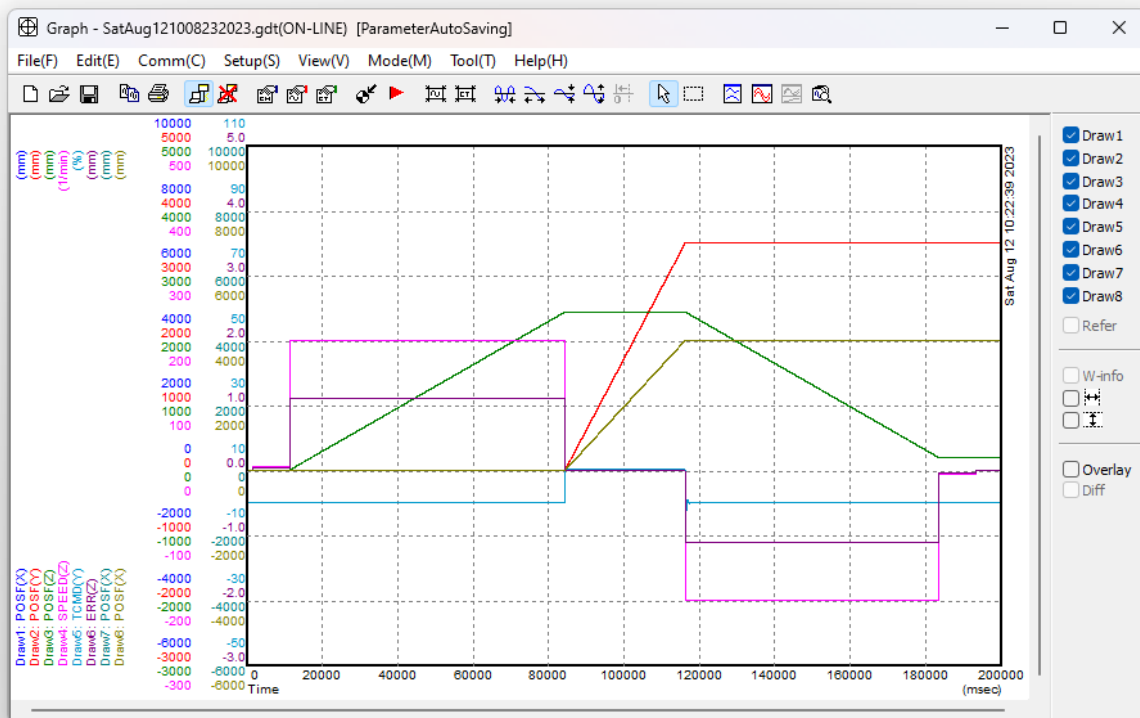
8.4.2 Měření dat v SERVO guide

Pro odečítání dat ze simulace pomocí SERVO guide je potřeba softwarová funkce „Graph Window“. Pomocí této funkce je možné měřit ze simulace s funkcí SM následující data:

- odezva integrální hodnoty polohy (POSF/POSF3D)
- skutečná rychlost (SPEED)
- požadovaný kroutící moment (TCMD)
- odchylku skutečné od požadované polohy (ERR)
- požadovaná rychlost (VCMD)
- údaje pro řízení ze simulovaného senzoru akcelerometru (ACC)

Odečítání dat ze simulace funguje pouze při simulace v CNC guide 2 se spuštěnou funkcí SM. Pomocí SERVO guide lze měřit až 8 datových signálů najednou s nejmenší vzorkovací frekvencí 1 kHz. Z jedné osy lze odečítat maximálně 4 signály najednou. Takto naměřená data je možné zobrazit přímo v SERVO guide, nebo je vyexportovat v .csv souboru a následně analyzovat v jiném softwaru pro zpracování dat.

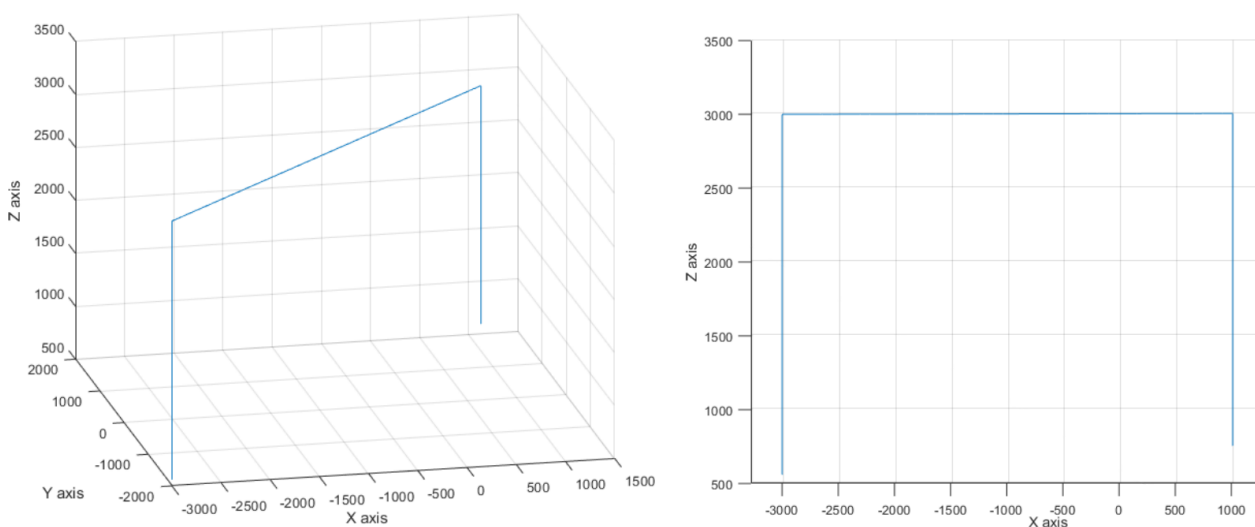
Pro vzorové měření dat byl využit NC program zobrazený v obr. 6.3 vytvořený v Generátoru pro diagonální přesuny desek. Příklad naměřených dat vizualizovaných v SERVO guide je zobrazen na obr. 8.10. Data byla naměřena se vzorkovací frekvencí 100 Hz. V rámci měření byly vyzkoušeny všechny typy výše vyjmenovaných dat, které je možné odečítat během simulace s SM.



Obrázek 8.10. Neupravená data naměřená v SERVO guide

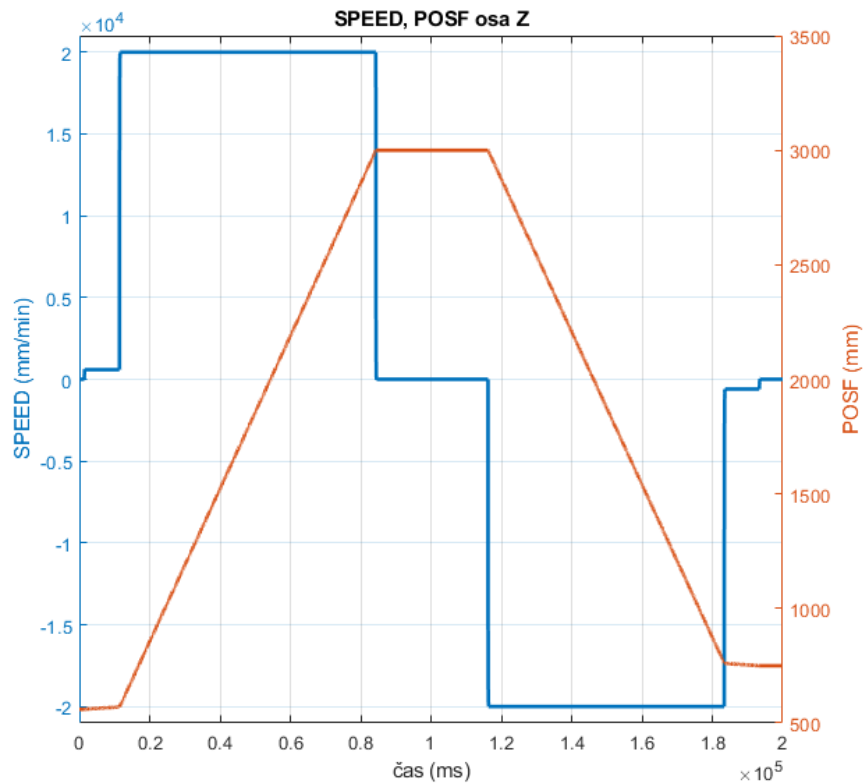
8.4.3 Vizualizace naměřených dat

- Polohová data (POSF):** Na obr. 8.11 je vidět trajektorii pohybu manipulátoru v 3D grafu a v rovině XZ. Manipulátor se podle NC programu pohybuje na obrázcích zleva doprava.



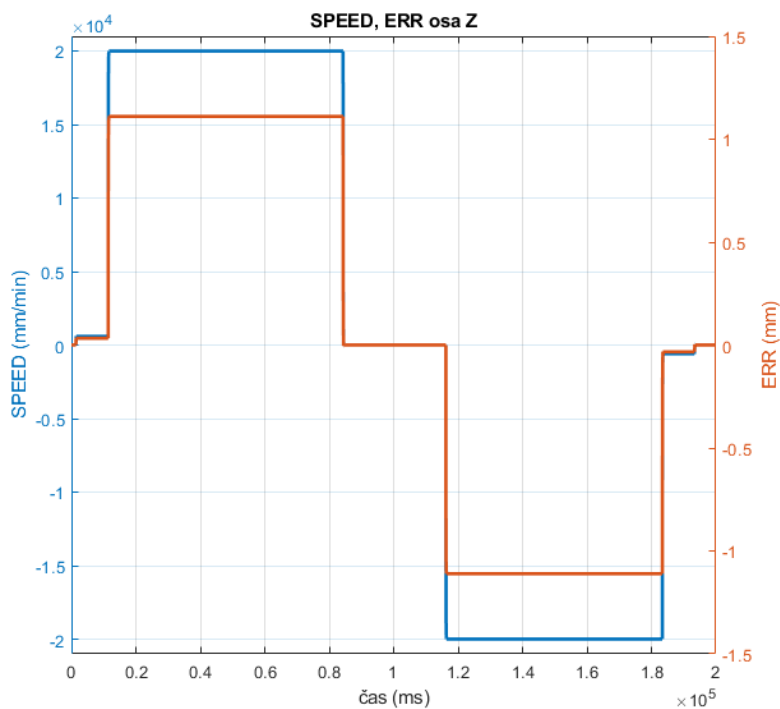
Obrázek 8.11. Pohyb manipulátoru (POSF) zobrazený 3D grafu

- Skutečná rychlost (SPEED):** Na následujícím obr. 8.12 je vidět průběh polohy a rychlosti na ose z . Z grafu lze vyčíst, že manipulátor se na začátku pohybuje směrem vzhůru v ose z ve dvou fázích. V první fázi se manipulátor pohybuje vzhůru rychlostí 60 mm/min. Tato část simuluje odlepení zvedané desky od zbylých desek ve stohu. Po dosažení 10 mm nad počáteční polohou přichází na řadu druhá fáze, ve které se již manipulátor pohybuje vzhůru rychlostí 2000 mm/min. Při dosažení maximální polohy se pohyb v ose z zastaví a manipulátor se pohybuje v rovině XY. Obdobně vypadá klesání manipulátoru do nové polohy.



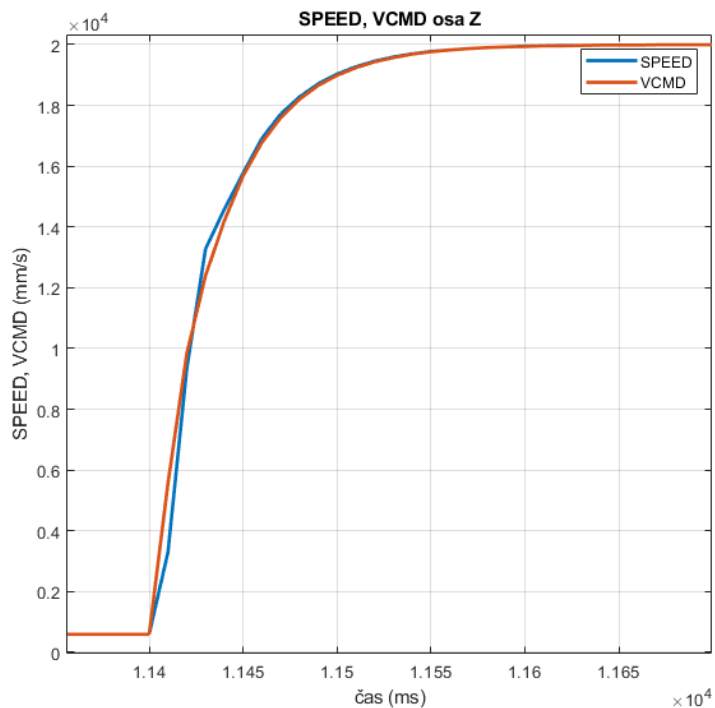
Obrázek 8.12. Graf SPEED a POSF na ose z

- Odchylna skutečné polohy od požadované polohy (ERR):** Na následujícím obr. 8.13 je zobrazen vztah mezi skutečnou rychlostí a ERR v ose z . Z grafu je možné vyčíst, že ERR kopíruje tvar průběhu skutečné rychlosti. Lze si povšimnout, že ERR je závislá na skutečné rychlosti (skutečná rychlost roste společně s ERR).



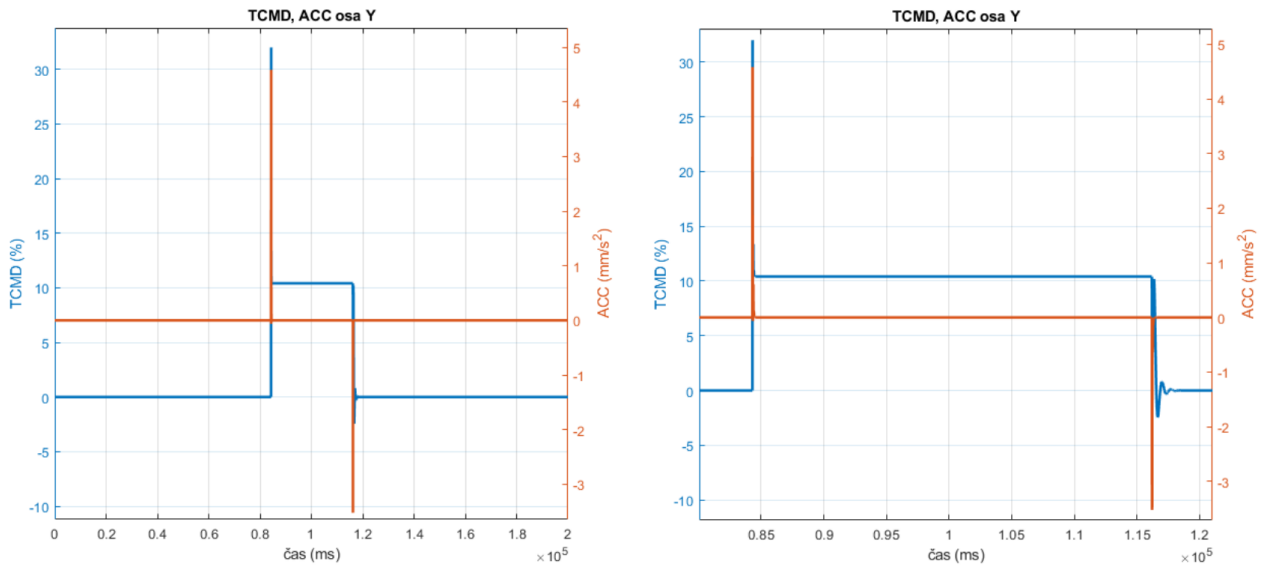
Obrázek 8.13. Porovnání ERR s SPEED pro osu z

- **Požadovaná rychlost (VCMD):** Na následujícím obr. 8.14 je zobrazen skok rychlosti z 60 mm/min na 2000 mm/min. V grafu jsou zobrazeny průběhy požadované a skutečné rychlosti.



Obrázek 8.14. Porovnání VCMD s SPEED pro osu z

- Zrychlení (ACC) a požadovaný krouticí moment (TCMD):** Následující graf na obr. 8.15 zobrazuje data požadovaného TCMD a data ze simulovaného akcelerometru na ose y . Požadovaný krouticí moment je udáván v procentech vůči maximálnímu krouticímu momentu motoru. Z grafu lze vyčíst, že TCMD naroste ve chvíli, kdy se osa y dá do pohybu a setrvá na deseti procentech maximálního TCMD až do konce pohybu manipulátoru v ose y . Se změnou rychlosti také vzroste ACC. To se rychle vrací zpět na nulu, protože osa y se pohybuje konstantní rychlostí a znovu naroste v opačném směru až při zastavování pohybu manipulátoru v této ose.



Obrázek 8.15. Porovnání TCMD s ACC pro osu y

Kapitola 9

Aplikace pro ovládání systému FANUC z PC

V rámci diplomové práce byla vytvořena aplikace pro ovládání řídicího systému FANUC na dálku z PC. Tato aplikace byla sestavena z prvků popsaných v předchozích kapitolách. Aplikace byla vytvářena s cílem prozkoumat ovládání řídicího systému FANUC na dálku a možnosti automatizace některých jeho řídicích procesů. Cílem aplikace bylo připravit půdu pro tvorbu automatického řízení pro ovládání manipulátoru automatického skladu a prozkoumat možnosti využití CNC guide 2 pro tvorbu DT tohoto skladu.

9.1 Popis aplikace

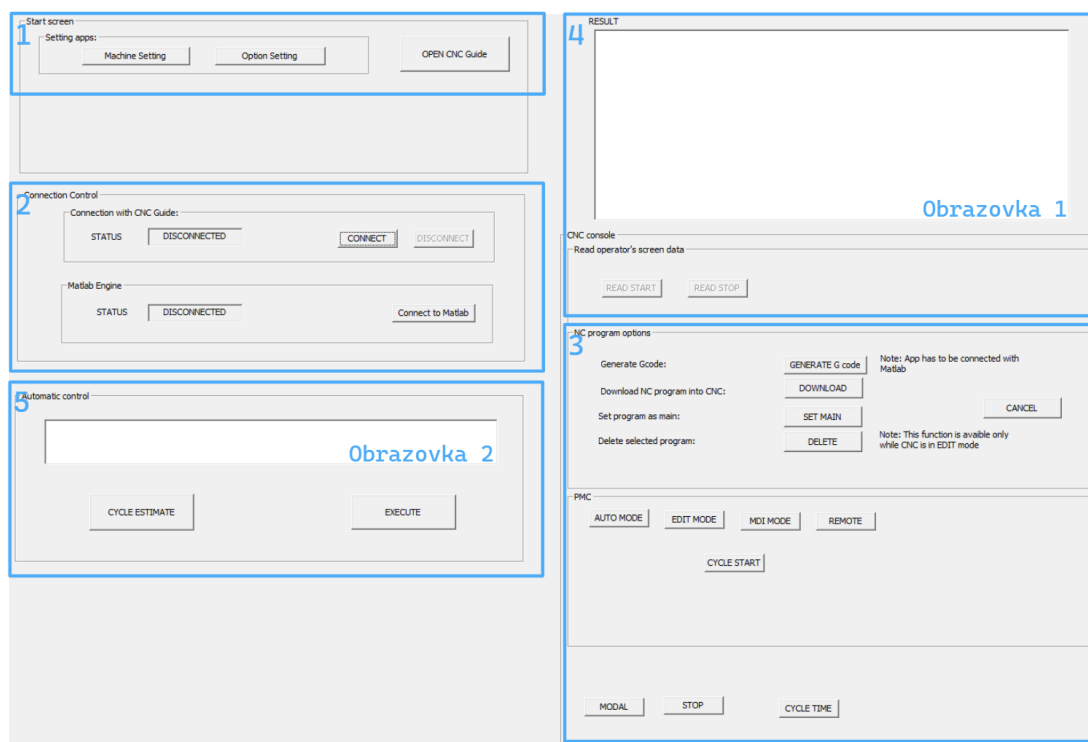
Aplikace byla z větší části tvořena v programovacím jazyce C++. K tvorbě aplikace byla využita knihovna MFC (Microsoft Foundation Classes)[62]. Zbýlá část aplikace byla vytvořena v prostředí Matlab a byla propojena s MFC aplikací prostřednictvím Matlab engine API pro C++. Matlab engine API je rozhraní, které umožňuje C++ programům spustit Matlab, volat Matlab funkce a vyměňovat mezi sebou data [63]. Matlab engine byl zvolen z důvodu urychlení vývoje aplikací, neboť generátor NC programu, který byl vytvořen v prostředí Matlab, navazoval na další aplikace vyvíjené v tomto prostředí, jako například plánovač trajektorie [64]. K ovládání systému FANUC byla využita knihovna FOCAS 2 pro 64 bit aplikace (*Fwlib64.dll*). Funkce použité v aplikaci byly vytvořeny na základě vzorových programů knihovny FOCAS 2. [49]

Aplikace komunikuje s aplikací CNC guide 2, na které je virtuálně spuštěn systém řízení ve variantě FS 31i-B5 Plus použitý pro řízení manipulátoru automatického skladu. Konkrétní varianta systému by ale neměla mít vliv na správnost fungování aplikace v případě, že se uživatel bude držet používání řídicích systémů řady 30i. Pro ostatní řady řídicích systémů existují určitá omezení funkcí knihovny FOCAS 2, na která musí uživatel brát zřetel. Dále CNC guide 2, jak již bylo zmíněno, neodpovídá zcela skutečnému stroji a některé funkce se mohou lišit. Bohužel v rámci této práce nebyla možnost vyzkoušet aplikaci na skutečném stroji.

9.1.1 Uživatelské rozhraní

Uživatelské rozhraní aplikace (obr. 9.1) je možné rozdělit do pěti následujících bloků:

- **1 Blok pro spuštění aplikací:** Aplikace od firmy FANUC se nevyznačují jednoduchostí. Proto například CNC guide 2 je tvořen hlavní aplikací CNC guide 2 s označením *Simbase.exe* a dalšími nástroji („Machine settings“ a „Option setting“), které je potřeba spouštět ze složky, ve které se nachází konkrétní verze CNC guide 2. Pro usnadnění práce s aplikacemi FANUC byla aplikace vybavena tlačítky pro spuštění většiny potřebných aplikací viz blok 1 na obr. 9.1.
- **2 Blok pro propojení s aplikacemi:** Další blok tvoří tlačítko pro propojení aplikace s nástrojem CNC guide 2 a tlačítko pro propojení s prostředím Matlab prostřednictvím Matlab engine API.
- **3 Blok pro spuštění jednotlivých funkcí:** Tento blok obsahuje jednotlivé funkce potřebné pro ovládání CNC systému na dálku. Mimo jiné je zde blok pro ovládání NC programu, který umožňuje vygenerovat, nahrát a zvolit program pro CNC. Dále je zde blok s tlačítky pro ovládání CNC na dálku a blok pro získání doby běhu programu.
- **4 Blok vizualizace stavu systému:** Do aplikace byl přidán blok, který zobrazuje aktuální stav CNC, jeho aktuální polohy a rychlosti pohybů os a vřetene. Vizualizace dalších údajů z obrazovky CNC není pro simulaci možná. V případě aplikace na fyzickém stroji je možné ještě přidat informace o zátěži pohonů.
- **5 Blok automatizace řízení:** Tento blok obsahuje všechny funkce obsažené v bloku tři zakomponované do dvou sekvenčních programů. První program umožňuje poloautomatické řízení manipulátoru (EXECUTE). Aktuální stav chodu aplikace je zobrazen na obrazovce 2. Další důležitou funkcí v tomto bloku je funkce pro odhad doby běhu programu sekvence pohybů (CYCLE ESTIMATE), která je určená pro simulaci na DT.



Obrázek 9.1. Uživatelské rozhraní aplikace

9.2 Funkce pro automatizaci nahrávání programu

Proces bude nazýván Automatizační funkce. Při návrhu Automatizační funkce bylo počítáno s jejím následným začleněním do většího řídicího celku. Tento celek by měl sestávat z více řídicích jednotek, které se budou starat o chod jednotlivých částí manipulátoru. Například na manipulátoru budou další motory a přísavky, které budou sloužit k uchycení a puštění desky. Tato část řízení se ale bude odehrávat pravděpodobně mimo řídicí systém od firmy FANUC, a proto při tvorbě sekvence úkonů pro řízení manipulátoru byla nahrazena vstupem operátora, který po přemístění manipulátoru nad novou pozici musí manuálně spustit další sekvenci pohybů (tlačítko EXECUTE).

9.2.1 Vstupní databáze

Vstupem pro Automatizační funkci by měla být „Databáze pohybů“ a parametr `StartPos`. „Databáze pohybů“ by měla obsahovat všechna data potřebná pro rekonstrukci pohybů manipulátoru. Pravděpodobně bude obsahovat seznam požadovaných poloh a informace o pohybu mezi polohami. Informace o pohybu by měly obsahovat rychlosti pohybů a typ generované trajektorie. Při plánování pohybu se totiž počítá s tím, že se pohyby manipulátoru budou lišit v závislosti na tom, zda přenáší dřevěnou desku, nebo se pohybuje bez zátěže. Parametr `StartPos` určuje aktuální polohu manipulátoru v „Databázi pohybů“.

Pro demonstraci fungování Automatizační funkce byla „Databáze pohybů“ zjednodušena pouze na posloupnost poloh manipulátoru uložených v `.csv` souboru viz obr. 9.2. Na obrázku je možné vidět jednotlivé souřadnice poloh oddělené čárkou ve formátu `[x,y,z]`. Každý řádek reprezentuje jednu polohu. V případě rozšíření databáze o informace o pohybu, by za polohami odděleny čárkou následovaly další informace.

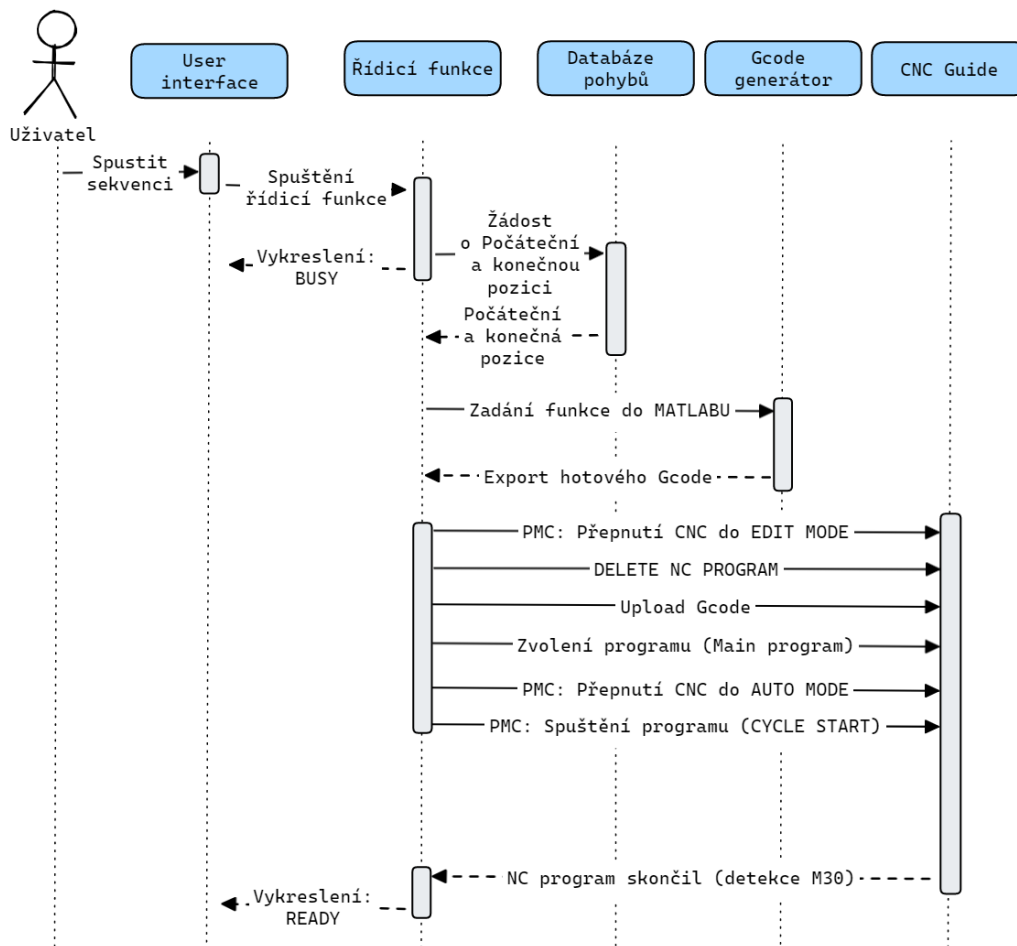
```
x ,   y ,   z
-3000, -2000, 500
2500, 2000, 350
1500, 1300, -260
700, -1700, 1500
200, -4000, 2000
1111, 1300, 50
```

Obrázek 9.2. Příklad „Databáze pohybů“

9.2.2 Průběh vykonávání práce

Na obr. 9.3 je možné vidět sekvenční diagram pro přesunutí manipulátoru mezi dvěma polohami. Celá sekvence se spustí stiskem tlačítka EXECUTE (viz obr. 9.1). Po stisku tlačítka se aplikace přepne do stavu „BUSY“. Systém si následně zjistí polohu počáteční pozice (parametr `StartPos`) manipulátoru v „Databázi pohybů“. Z databáze získá aktuální a následující polohu, pro které vygeneruje v prostředí Matlab NC program. Pro Automatizační funkci byl použit Generátor pro diagonální přesuny desek (viz sekce 6.1.2). Následně je z paměti CNC smazán předchozí program a místo něj je tam nahrán nově vygenerovaný program. Tento NC program je poté nastaven jako „main program“ a následně spuštěn. Se spuštěním programu je v aplikaci spuštěna také

smyčka kontrolující ukončení programu pomocí detekce příkazu M30. V případě zjištění konce programu je sekvence ukončena. Aktualizuje se parametr StartPos a aplikace je připravena na další sekvenci, která se spustí po stisku tlačítka EXECUTE. Aplikace se přepne do stavu „READY“.



Obrázek 9.3. Sekvenční diagram procesu Automatizační funkce

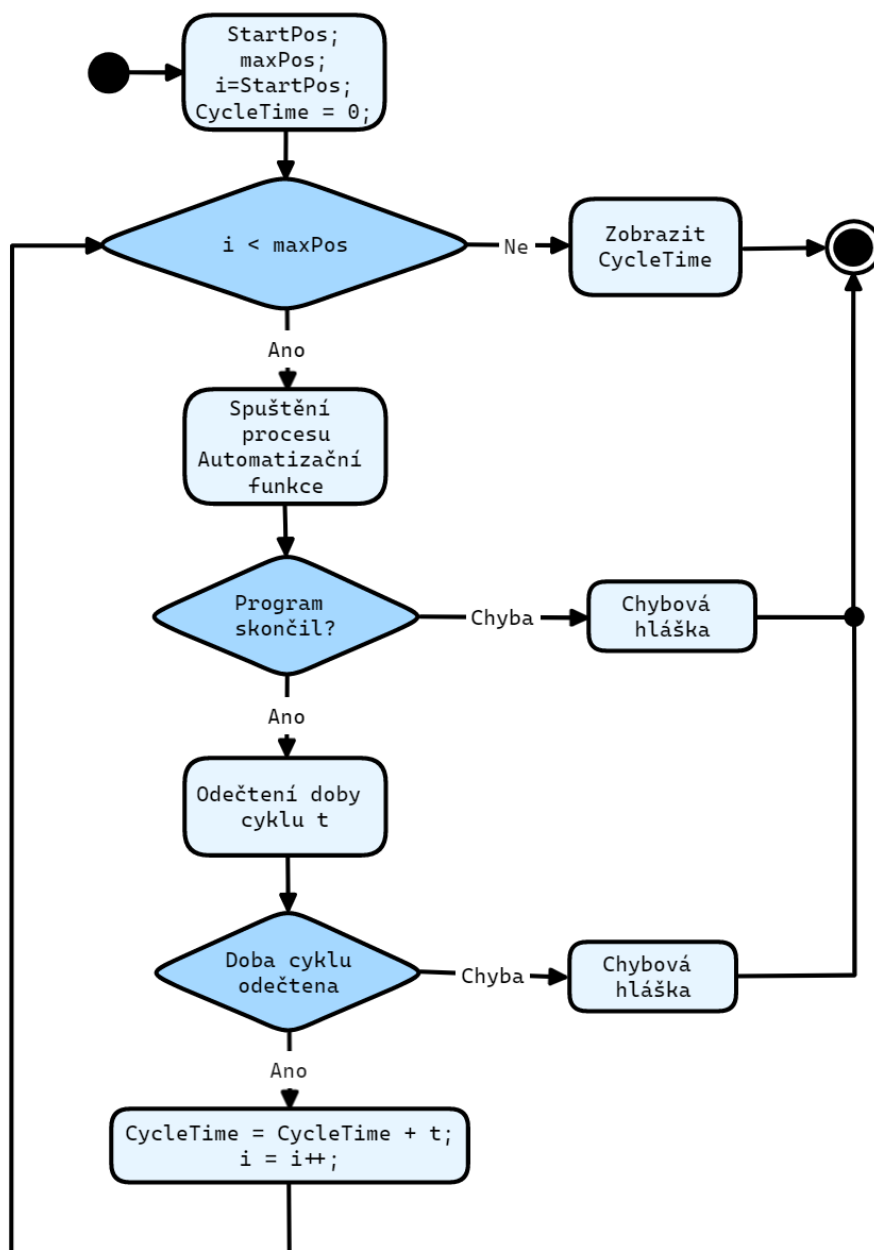
9.2.3 Stav systému

Pro automatický chod systému je do budoucna počítáno s tím, že řídicí systém bude přecházet mezi následujícími třemi stavy, z nichž dva již byly zmíněny výše:

- **READY** V tomto stavu je stroj připraven k přijetí nového programu. Nebyla nahlášena žádná chyba a stroj se nachází ve známé poloze.
- **BUSY** Do tohoto stavu se stroj přepne po stisku tlačítka EXECUTE. V tomto stavu se systém nachází po celou dobu vykonávání procesu Automatizační funkce.
- **ERROR** Chyba nastane tehdy, kdy řídicí systém CNC nebo aplikace detekuje chybu při vykonávání některého z úkonů.

9.3 Funkce pro odhad manipulačních časů

Výše popsanou Automatizační funkci je možné dále rozšířit a využít ji k automatizaci odhadu doby běhu programu na simulovaném řídicím systému v CNC guide 2. Tato funkce bude dále nazývána jako Cycle time funkce. Vstupem do této funkce je interval poloh, který je určený adresou počáteční (`StartPos`) a koncové polohy (`maxPos`) v „Databázi pohybů“. Samotná funkce je pak plně automatická. Jak je možné vidět na obr. 9.4, postupně pro každý pohyb v intervalu je odsimulován pohyb stroje a po jeho dokončení odečtena doba běhu programu. Výstupem z funkce je součet všech manipulačních časů manipulátoru v sekundách.



Obrázek 9.4. Diagram aktivit procesu Cycle time funkce

Pro simulaci v emulátoru CNC guide 2 bylo zvoleno nastavení s dynamickým modelem funkce SM. Dále pro urychlení simulace byla použita funkce HSSF, jejíž vliv na odhad doby běhu programu je podle dat naměřených v sekci 8.3.2 minimální.

Automatický sklad vytvořený firmou Houfek a.s., bude mít formu chaotického skladu. To znamená, že při naskladňování budou do skladovacích pozic na sebe náhodně umístěny desky čítající mnohem více druhů, než je počet skladovacích pozic. Při provozování takového skladu je nutné naplánovat optimální sekvenci pohybů k vyskladnění skladu. V takovéto sekvenci manipulátor přemísťuje desky ve skladu, dokud se nedostane k desce, která je aktuálně určená k obrábění. Funkce Cycle time byla vytvořena pro tento případ rozvržení materiálu ve skladu. Funkce by mohla sloužit k plánování a optimalizaci pohybů manipulátoru v automatickém skladu Houfek a.s. na základě kritéria času. Vstupem do funkce by v praxi byla sekvence desek, které by manipulátor musel přemístit, výstupem výsledný čas sekvence operací v sekundách.

Kapitola 10

Shrnutí a poznatky

Počátky vývoje aplikace pro řízení emulovaného řídicího systému FANUC byly dost komplikované. Software firmy FANUC je poměrně fragmentovaný, rozdělený do jednotlivých placených nástrojů, k nimž jsou k dispozici pouze obecné popisy v letáčích FANUC, nebo příliš složité a obsáhlé 200 - 500 stránkové manuály. Struktura dokumentace je z pohledu začátečníka náročná na orientaci ve funkcích a vlastnostech a lze konstatovat, že počáteční časová investice do funkční orientace v softwarovém ekosystému FANUC je poměrně značná.

Bližší orientace v systému CNC guide 2 bez absolvování placeného kurzu od firmy FANUC je také značně komplikovaná. FANUC na internetu neposkytuje žádné návody, které by usnadnily orientaci v CNC guide 2 a jeho nastavení pomocí nástroje „Option setting“. Produkt CNC guide 2 je aktuálně ve fázi dynamického vývoje a neexistují žádné volně přístupné materiály umožňující základní orientaci v nově implementovaných funkcích. Práce proto byla vytvořena na základě dokumentace FANUC poskytnuté spolu se softwarem CNC guide 2. Dokumentace firmy FANUC je naštěstí volně přístupná po přihlášení na webových stránkách FANUC. Zmíněná dokumentace je ovšem také značně fragmentovaná. Pro pouhé propojení zprovoznění komunikace mezi CNC guide 2 a knihovnou FOCAS 2 je třeba tří manuálů, které na sebe vzájemně odkazují. Z těchto důvodů může tato práce posloužit jako jednoduchý manuál pro realizaci podobné aplikace.

Hlavním cílem diplomové práce bylo vytvoření aplikace umožňující ovládání emulovaného řídicího systému v CNC guide 2 na dálku. Aplikace byla vybavena dvěma automatickými funkcemi, z nichž první je Automatizační funkce. Tato funkce bude pravděpodobně v upravené podobě začleněna do řízení manipulátoru automatického skladu společnosti Houfek a.s. Funkce je plně funkční a umožňuje poloautomatický chod emulovaného řídicího systému. V rámci diplomové práce nebyla funkce vybavena bezpečnostními prvky, které v případě detekce chyby vyhlásí chybovou hlášku a zastaví její běh. Do budoucna je třeba funkci doplnit o kontrolní prvky, které budou hlídat zda se stroj skutečně nachází v nastaveném stavu. Během vývoje se několikrát vyskytla komplikace, kdy se program na stroji nepovedlo na dálku spustit. Příčinou bylo špatné nastavení intervalů mezi jednotlivými ovládacími akcemi. Lze tedy předpokládat, že u skutečného stroje může tento problém nastat a je třeba jej vyřešit pomocí kontrolní smyčky, která se v případě potřeby pokusí program spustit opakovaně. V rámci bezpečnosti je také třeba doplnit funkci o detekci chyb ve stroji. Toho je možné dosáhnout pomocí odečítání chybových hlášek stroje prostřednictvím knihovny FOCAS 2.

Druhou vytvořenou funkcí byla funkce Cycle time, která vycházela z předchozí Automatizační funkce. Úkolem této funkce je odečítání doby běhu programu a její princip je založen na odečítání dat přímo z parametrů emulovaného CNC. Cycle time funkce byla upravena tak, aby byla schopna odhadnout dobu běhu programu pro sekvenci pohybů. Takto získaná doba běhu manipulátoru by měla sloužit k plánování a optimalizaci pohybů manipulátoru na základě kritéria času. Aplikace je plně funkční a oproti Automatizační funkci se obejde bez přidání bezpečnostních prvků. Přesnost fungování

Cycle time je závislá pouze na nastavení virtuálního řídicího systému a jeho schopnosti odrazet realitu. Použití této funkce dává smysl pouze s funkcí HSSF, se kterou lze dosáhnout až dvacetinásobného urychlení běhu simulace, která byla přidána do CNC guide 2. Do budoucna by mohla být funkce rozšířena o započítání časů prostoje stroje, jako je doba, kterou zabere aplikaci nahrát a spustit NC program řídicího systému FANUC nebo doba trvání sekvencí pro uchopení a puštění desky (za předpokladu, že by se jejich čas neměnil).

Jednou z částí zadání bylo vytvoření dynamického modelu pohonů v CNC guide 2 za pomoci funkce SM. V rámci této práce byly prozkoumány možnosti použití DT firmy FANUC pro tvorbu DT manipulátoru skladu s tímto řídicím systémem. Lze konstatovat, že funkce SM je udělaná na míru nástroji „Surface Estimation“ pro odhad kvality povrchu a její použití pro tvorbu DT CNC v jakémkoliv podobě není vhodné. Její jediné možné využití v rámci tvorby DT skladového manipulátoru, je tak pro odhad doby běhu programu.

Kapitola 11

Závěr

V první části této práce byly představeny řídicí systémy CNC a jejich virtualizace pro implementaci digitálního dvojčete. V první kapitole byl ukázán koncept digitálního dvojčete a bylo zde představeno jeho dělení, podrobně rozebrány vlastnosti a nakonec shrnuty klady a zápory. Další kapitola se zabývala průmyslovými řídicími systémy. Čtenář byl seznámen s řídicími systémy a jejich pozicí v průmyslovém podniku, kde jsou aplikovány myšlenky Průmyslu 4.0. Dále byla rozebrána komunikace mezi jednotlivými úrovněmi průmyslových řídicích systémů. Následující kapitola se již zaměřila na řídicí systémy CNC strojů. Ve stručnosti zde byla představena historie CNC řídicích systémů. Následně byly ukázány virtualizace řídicích systémů od společností FANUC a Siemens. V rámci této kapitoly byly prozkoumány možnosti využití těchto virtualizací pro tvorbu digitálního dvojčete stroje. Tímto byl splněn první bod zadání diplomové práce.

V druhé části byl představen automatický sklad firmy Houfek a.s., pro který bylo v této práci vytvářeno automatické řízení a otestován dynamický simulační model pohonového systému. Dále byl v této sekci vytvořen Generátor NC programu. Nejprve byl představen formát dat pro tvorbu NC programu pro systémy FANUC. Poté byly popsány 3 vytvořené varianty Generátoru lišící se v typu tvorby trajektorie v NC programu. Tímto byl splněn druhý bod zadání.

Třetí část práce představila ovládací prvky potřebné k řízení emulovaného řídicího systému v CNC guide 2 z PC pomocí knihovny FOCAS 2. Nejprve byl popsán postup pro propojení s CNC. Následně byly představeny operace potřebné pro manipulaci s programem a jejich ovládání z externího PC. Nakonec bylo popsáno ovládání MDI kláves na panelu operátora CNC pomocí spouštění sekvenčních programů v integrovaném PLC FANUC (PMC).

Ve čtvrté části byl sestaven a otestován dynamický simulační model pohonového systému skladu. Tento model byl vytvořen přímo v CNC guide 2 za použití funkce Servo model. V této části byl blíže popsán postup zprovoznění simulace s dynamickým modelem v CNC guide 2 a byly zde prozkoumány jeho možnosti využití pro tvorbu digitálního dvojčete. Na konci kapitoly byla spuštěna vzorová simulace pohonového systému. Na emulovaném stroji byl spuštěn NC program vytvořený pomocí generátoru popsaného v druhé části této práce. Ze simulace byla odečtena data pomocí aplikace SERVO guide. Tato data byla následně stručně analyzována. Tímto byl splněn čtvrtý bod zadání této práce.

V poslední části práce byla vytvořena a popsána aplikace pro ovládání emulovaného CNC řídicího systému na dálku. Aplikace byla vytvořena na základě poznatků prezentovaných v druhé až čtvrté části. Jednotlivé popsání ovládací prvky zde byly úspěšně zprovozněny a na základě nich byla vytvořena Automatizační funkce, která po stisku tlačítka operátora vygenerovala program, nahrála jej do stroje, program spustila a detekovala konec programu. Nakonec byla představena funkce pro odhad doby běhu stroje, zadané sekvence pohybů. Tato funkce byla vytvořena spojením dynamického simulačního modelu pohonů v CNC guide 2 a Automatizační funkce rozšířené o odečet doby běhu programu. Dokončením aplikace byl splněn třetí bod zadání diplomové práce.

Poslední bod zadání byl splněn v kapitole Shrnutí a poznatky (viz kapitola 10). V této kapitole byly kriticky zhodnoceny výsledky této práce a představeny možnosti dalšího vývoje aplikace. Dále se zde autor podělil o poznatky získané během práce se softwarem firmy FANUC.

Literatura

- [1] Vladimír Mařík. *Průmysl 4.0*. 1. vyd.. Praha: Management Press, 2016. ISBN 978-80-7261-440-0.
- [2] Musilek Slavoj. *Automatizace je nutný základ a nyní přichází na řadu data a jejich lepší využití. Vše o průmyslu [online]*. 2023 [cit. 2023-07-31]. Dostupné z: <https://www.vseoprumyslu.cz/inspirace/firemni-novinky/automatizace-je-nutny-zaklad-a-nyni-prichazi-na-radu-data-a-jejich-lepsi-vyuziti.html>.
- [3] SIEMENS. *Stáňte se digitálním podnikem a urychlete svou digitální transformaci. Siemens [online]*. [cit. 2023-07-31]. Dostupné z: <https://www.siemens.com/cz/cs/reseni/digitalni-podnik.html>.
- [4] Morteza Ghobakhloo. Industry 4.0, digitization, and opportunities for sustainability. *Journal of Cleaner Production*. 2020, 252 119869. DOI <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.119869>.
- [5] Maulshree Singh, Evert Fuenmayor, Eoin P. Hinchy, Yuansong Qiao, Niall Murray a Declan Devine. Digital Twin: Origin to Future. *Applied System Innovation*. 2021, 4 (2), DOI 10.3390/asi4020036.
- [6] SIEMENS. *Digitální podnik pro výrobní průmysl. Siemens [online]*. [cit. 2023-07-12]. Dostupné z: <https://www.siemens.com/cz/cs/reseni/digitalni-podnik/discrete-industry.html>.
- [7] Michael Grieves a John Vickers. *Digital Twin: Mitigating Unpredictable, Undesirable Emergent Behavior in Complex Systems*. In: 2017. 85-113. ISBN 978-3-319-38754-3.
- [8] Gartner. *Gartner Survey Reveals 47% of Organizations Will Increase Investments in IoT Despite the Impact of COVID-19*. 2020 [cit. 2023-07-15]. Dostupné z: <https://www.gartner.com/en/newsroom/press-releases/2020-10-29-gartner-survey-reveals-47-percent-of-organizations-will-increase-investments-in-iot-despite-the-impact-of-covid-19->.
- [9] Belcan. *Pros and Cons of Digital Twin Technology. Belcan [online]*. [cit. 2023-07-15]. Dostupné z: <https://www.belcan.com/2023/01/16/pros-and-cons-of-digital-twin-technology/##:~:text=While%20digital%20twins,and%20operating%20conditions..>
- [10] Trend Micro. *Industrial Control System. Trend Micro [online]*. [cit. 2023-07-25]. Dostupné z: [https://www.trendmicro.com/vinfo/us/security/definition/industrial-control-system##:~:text=Industrial%20Control%20System-,Industrial%20control%20system%20\(ICS,and%20water%20treatment%20industries.,-There%20are%20several\).](https://www.trendmicro.com/vinfo/us/security/definition/industrial-control-system##:~:text=Industrial%20Control%20System-,Industrial%20control%20system%20(ICS,and%20water%20treatment%20industries.,-There%20are%20several).)

- [11] KIRVAN Paul. *Definition control system. What Is? [online]*. 2023 [cit. 2023-08-01]. Dostupné z: <https://www.techtarget.com/whatis/definition/control-system>.
- [12] SOMMERVILLE Ian. *Centralized Control [online]*. 2008 [cit. 2023-07-19]. Dostupné z: <https://ifs.host.cs.st-andrews.ac.uk/Books/SE9/Web/Architecture/ArchPatterns/CentralControl.html>.
- [13] Jiří Koziorek a Jiří Kocián. *DISTRIBUOVANÉ SYSTÉMY ŘÍZENÍ*. 1. vyd.. Ostrava: 2011. ISBN 978-80-248-2599-1.
- [14] Patrik Doležal. *Navrhování distribuovaných řídicích systémů*. 2020.
- [15] Arkadiusz Hulewicz, Zbigniew Krawiecki a Krzysztof Dziarski. Distributed control system DCS using a PLC controller. *ITM Web Conf.*. 2019, 28 01041. DOI 10.1051/itmconf/20192801041.
- [16] ELECTRICAL TECHNOLOGY. *What is Distributed Control System (DCS)? Electrical technology [online]*. [cit. 2023-07-11]. Dostupné z: <https://www.electricaltechnology.org/2016/08/distributed-control-system-dcs.html>.
- [17] REALPARS TEAM. *What is the Automation Pyramid? RealPars [online]*. [cit. 2023-08-01]. Dostupné z: <https://realpars.com/automation-pyramid/>.
- [18] GORDON-BOX Mathew. *The 5 Layers of the Automation Pyramid and Manufacturing Operations Management. SYSPRO [online]*. 2019 [cit. 2023-07-25]. Dostupné z: <https://www.syspro.com/blog/erp-for-manufacturing/the-5-layers-of-the-automation-pyramid-and-manufacturing-operations-management/>.
- [19] ERP. *Definice plánování podnikových zdrojů (ERP). Oracle [online]*. [cit. 2023-07-28]. Dostupné z: <https://www.oracle.com/cz/erp/what-is-erp/>.
- [20] FANUC. *CNC Controls*. 2021.
- [21] *Průmyslové řídicí systémy veřejně dostupné z internetu jsou pozvánkou pro hackery. SystemOnLine: S přehledem ve světě podnikové informatiky [online]*. [cit. 2023-07-16]. Dostupné z: <https://m.systemonline.cz/zpravy/prumyslove-ridici-systemy-verejne-dostupne-z-internetu-jsou-pozvankou-pro-hackery-z.htm>.
- [22] William Knowles, Daniel Prince, David Hutchison, Jules Ferdinand Pagna Disso a Kevin Jones. A survey of cyber security management in industrial control systems. *International Journal of Critical Infrastructure Protection*. 2015, 9 52-80. DOI <https://doi.org/10.1016/j.ijcip.2015.02.002>.
- [23] ILEVIČIUS Paulius. *Stuxnet explained — the worm that went nuclear. NordVPN [online]*. [cit. 2023-07-26]. Dostupné z: <https://nordvpn.com/blog/stuxnet-virus/>.
- [24] *Stuxnet. Wikipedia [online]*. [cit. 2023-07-26]. Dostupné z: <https://cs.wikipedia.org/wiki/Stuxnet?oldformat=true>.
- [25] *Factory Automation [online]*. [cit. 2023-07-21]. Dostupné z: <https://factoryautomation.cz/10-dat-z-historie-obrabeni-na-cnc-strojich-kam-saha-historie-cnc-obrabeni/>.

- [26] WARFIELD Bob. *What is CNC, CNC Machining and CNC Machines? CNC Cookbook [online]*. 2020 [cit. 2023-08-02]. Dostupné z: <https://www.cnccookbook.com/what-is-cnc-machining-and-cnc-machines/>.
- [27] *Introduction. Computer Numerical Control [online]*. [cit. 2023-07-20]. Dostupné z: <http://cnc.fme.vutbr.cz/>.
- [28] Vít Dlouhý. *Vývojové etapy v CNC obrábění*. 2018.
- [29] *Co je virtualizace? Microsoft [online]*. cit. 2023-08-02]. Dostupné z: <https://azure.microsoft.com/cs-cz/resources/cloud-computing-dictionary/what-is-virtualization>.
- [30] *Software CNC Guide Intelligent Simulator. FANUC [online]*. [cit. 2023-08-02]. Dostupné z: <https://www.fanuc.eu/cz/cs/cnc/development-software/cnc-guide>.
- [31] FANUC. *CNC GUIDE- INTELLIGENT SIMULATOR SOFTWARE-MBR-01893-EN-V4.1-Flyer*. 08/2019.
- [32] FANUC. *A-42147-01163EN/02 CNC GUIDE 2- FANUC CORPORATION*. 2022.
- [33] FANUC. *Digital Twin for FANUC CNC. FANUC [online]*. [cit. 2023-07-18]. Dostupné z: https://www.fanuc.co.jp/en/product/cnc/f_digitaltwin.html.
- [34] FANUC. *New Function: CNC GUIDE 2. FANUC [online]*. 2022 [cit. 2023-07-02]. Dostupné z: https://www.fanuc.co.jp/en/product/new_product/2022/202206_cncguide2.html.
- [35] FANUC INDIA. *Digital Twin For FANUC CNC. FANUC [online]*. [cit. 2023-08-02]. Dostupné z: <https://www.fanucindia.com/cnc-cnccs-2/>.
- [36] SIEMENS. *Siemens představuje první digitálně nativní CNC systém Sinumerik: Sinumerik ONE. Siemens [online]*. [cit. 2023-07-19]. Dostupné z: <https://www.siemenspress.cz/siemens-predstavuje-prvni-digitalne-nativni-cnc-system-sinumerik-sinumerik-one/>.
- [37] SIEMENS. *Digitální dvojče Siemens a jeho výhody v praxi. Vše o průmyslu: portál pro moderní výrobu [online]*. 2021 [cit. 2023-07-17]. Dostupné z: <https://www.vseoprmyslu.cz/inspirace/nazory-a-komentare/siemens-digitalni-dvojce-a-jeho-vyhody-v-praxi.html#:~:text=Dne%C5%A1n%C3%AD%20vlajkovou%20lod%C3%AD,pouh%C3%A9%20t%C5%99i%20dny..>
- [38] SIEMENS. *SINUMERIK ONE. SIEMENS [online]*. [cit. 2023-08-02]. Dostupné z: <https://www.siemens.com/cz/cs/products/automation/systems/cnc-sinumerik/sinumerik-one.html#:~:text=Jak%20budou%20vypadat,i%20jejich%20u%C5%BEivatele%C5%AFm..>
- [39] SIEMENS. *Run MyVirtual Machine. Siemens [online]*. [cit. 2023-07-25]. Dostupné z: <https://www.siemens.com/global/en/markets/machinebuilding/machine-tools/cnc4you/fokus-digitalisierung/run-myvirtual-machine.html>.
- [40] Houfek. *Odborná zpráva o postupu prací a dosažených výsledcích za rok 2022-Chytrý automatický sklad*. 2022.
- [41] DOMŠA Petr. *CNC systém s impozantním rozsahem rozšířených funkcí. MM průmyslové spektrum [online]*. 2008 [cit. 2023-08-02]. Dostupné z:

- <https://www.mmspektrum.com/clanek/cnc-system-s-impozantnim-rozsahem-rozsirenych-funkci>.
- [42] FANUC. *FANUC iHMI pomáhá uživatelům maximálně využívat jejich zařízení. FANUC [online]*. [cit. 2023-08-02]. Dostupné z: <https://www.fanuc.eu/cz/cs/cnc/ihmi>.
- [43] FANUC. *CNC Panel HMI. FANUC [online]*. [cit. 2023-08-02]. Dostupné z: <https://www.fanucamerica.com/products/cnc/ihmi-cnc-panel-interface>.
- [44] Václav Němec a Stanislav Dlouhý. *Programování CNC obráběcích strojů*. Gymnázium, SOŠ a VOŠ Ledec nad Sázavou, 2013.
- [45] *Obecný úvod do problematiky CNC programování CZ.1.07/1.1.01/02.0084. Velká Bíteš*.
- [46] SIEMENS. *SIEMENS. SINUMERIK 840D sl/828D -Programovací příručka 6FC5398-1B40-5UA3*. 2015..
- [47] *CNC_UPLOAD4 | PROGRAM. Inventcom [online]*. [cit. 2023-08-03]. Dostupné z: https://www.inventcom.net/fanuc-focas-library/program/cnc_upload4##:~:text=Format%20of%20input,by%20cnc_upend4..
- [48] *NC Machine G Codes and M Codes – CNC Milling and Lathe. HELMANCNC [online]*. [cit. 2023-08-03]. Dostupné z: <https://www.helmancnc.com/cnc-machine-g-codes-and-m-codes-cnc-milling-and-lathe/>.
- [49] FANUC. *A-42148-186EN FOCAS2 library sample program manual*.
- [50] FANUC. *Knihovna FOCAS. FANUC [online]*. [cit. 2023-07-17]. Dostupné z: <https://www.fanuc.eu/cz/cs/cnc/development-software/focas-development-libraries>.
- [51] FANUC. *NCGuide FOCAS2 Function OPERATOR'S MANUAL*.
- [52] FANUC. *A-42148-00518EN/04- FANUC CNC GUIDE 2 - OPERATOR'S MANUAL (OPERATION)*.
- [53] SABHADIYA Jignesh. *What Is Direct Numerical Control And Their Types? Engineering choice [online]*. 2023 [cit. 2023-07-27]. Dostupné z: <https://www.engineeringchoice.com/what-is-direct-numerical-control/>.
- [54] FANUC. *B-645113EN/03 - PMC programming manual*.
- [55] STONE Daniel. *The Benefits of Using Fanuc PMC. Robots [online]*. 2019 [cit. 2023-07-28]. Dostupné z: <https://www.robots.com/articles/the-benefits-of-using-fanuc-pmc>.
- [56] *NC řídicí systémy. Průmyslové spektrum [online]*. 2021 [cit. 2023-08-05]. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/cnc-ridici-systemy##:~:text=%C4%8C%C3%ADslicov%C4%9B%20%C5%99%C3%ADzen%C3%A9%20pohony,neboli%20E2%80%9EDD%E2%80%9C%20motory..>
- [57] FANUC. *A06B-2255-B400 - Datasheet*.
- [58] FANUC. *A06B-2239-B100 - Datasheet*.
- [59] STANOJEVIC Milan. *Best Multibody Dynamics Software. Window report [online]*. 2020 [cit. 2023-08-10]. Dostupné z: <https://windowsreport.com/multibody-dynamics-simulation-software/>.

-
- [60] FANUC. *B-65270EN/08 - SERVO MOTOR PARAMETER MANUAL*. FANUC.
- [61] FANUC. *B-65404EN/03 - SERVO GUIDE OPERATOR'S MANUAL*. 2005.
- [62] MICROSOFT. *MFC Desktop Applications [online]*. 2021 [cit. 2023-07-02]. Dostupné z:.
<https://learn.microsoft.com/en-us/cpp/mfc/mfc-desktop-applications?view=msvc-170>.
- [63] *Call MATLAB from C++*. MathWorks [online]. [cit. 2023-08-07]. Dostupné z:.
<https://www.mathworks.com/help/matlab/calling-matlab-engine-from-cpp-programs.html>.
- [64] Jakub Švadlena. *Manipulátor pro automatický sklad deskového materiálu*. 2022.

Příloha A

Zkratky

A.1 Zkratky

CAD	Computer-aided design
CAM	Computer-aided manufacturing
CCS	Centralizované řídicí systémy (Centralized Control Systems)
CNC	Computer Numerical Control
ČVUT	České vysoké učení technické v Praze
DCS	Distribuované řídicí systémy (Distributed Control Systems)
DNC	Direct Numerical Control
DT	Digitální dvojče (Digital twin)
DTI	instance digitálního dvojčete (Digital Twin Instance)
DTP	digitální dvojče prototypu (Digital Twin Prototype
ERP	Enterprise Resource Planning).
ERR	odchylka skutečné od požadované polohy (position error)
FMI	Functional Mockup Interface
FSSB	Fast Servo Serial Bus
HMI	Human Machine Interface
HSSB	High Serial Speed Bus
HSSF	High-speed simulation function
ICS	Průmyslové řídicí systémy (Industrial Control Systems)
iHMI	Intelligent Human Machine Interface
IIoT	průmyslový internet věcí (Industrial Internet of Things)
I/O	Input/Output
ISO	International Organization for Standardization
LF	Line Feed
MDI	Media Device Interface
MFC	Microsoft Foundation Classes
MIT	Massachusetts Institute of Technology
MES	Management Execution System
NC	Numerical Control
NASA	National Aeronautics and Space Administration
PC	Osobní počítač (Personal Computer)
PLC	Programovatelný logický automat (Programmable Logic Controller)
PMC	Programmable Machine Controller
POSF	Odezva polohy (Position feedback)
SCADA	Supervisory Control and Data Acquisition
SM	Servo model
SPEED	Rychlost motoru (Motor speed)
TAČR	Technologická Agentura České Republiky
TCMD	Požadovaný krouticí moment (Torque command)

VCMD požadovaná rychlost (Velocity command)

Příloha B

Tabulka specifikace CNC guide

Specification list CNC GUIDE		
Item	Specification	
Applicable devices	30i series	Series 30i - MODEL B ^{*1} Series 31i - MODEL B Series 31i - MODEL B5 Series 32i - MODEL B Series 31i - MODEL A
	0i series	Series 0i - TD / MD Series 0i - TF / MF Series 0i - TF / MF Plus
	Laser / punch press / wire cut	Series 31i - LB / PB / WB
	CNC for transfer line	Series 35i - MODEL B
	CNC for motion control	Power Motion i - MODEL A
Display device type	8.4" / 10.4" / 15"	
MDI key	QWERTY / ONG	
Display mode	Picture mode	Displays actual CNC appearance
	Window mode	CNC screen, MDI Key, Operators panel, and more at each separate window
Display mode	CNC operation screen section ^{*1}	24 languages (English, Japanese, German, French, Spanish, Italian, Chinese (Traditional), Chinese (Simplified), Korean, Portuguese, Dutch, Danish, Swedish, Hungarian, Czech, Polish, Russian, Turkish, Romanian, Bulgarian, Slovak, Finnish, Vietnamese, Indonesian)
	Application operation section	2 languages (English, Japanese)
Item	CNC GUIDE	CNC GUIDE Education Package
System	Lathe / Machining	
Maximum number of paths	4 paths	1 path
Maximum number of control axes	20 axes	4 axes
Maximum spindle number	4 axes	1 axis
Maximum program capacity	8Mbytes	32Kbytes
Maximum program number	4000	63

*1) will vary depending on the model. Series 30i - when you select model B.

*2) including iHMI

Převzato z [31]

Příloha C

Data pro nastavení Servo modelu

C.1 Seznam doporučených parametrů pro nastavení Servo modelu

Parameter number	Description
1825	Servo loop gain
2020	Motor number
2021	Load inertia ratio
2022	Direction of motor rotation
2043	Velocity loop integral gain (PK1V)
2044	Velocity loop proportional gain (PK2V)
2046	Velocity loop gain (PK4V)
2060	Torque limit
2067	Torque command filter
2069	Velocity feed forward coefficient
2080	First-order lag time constant for dual position feedback
2092	Advanced preview feed forward coefficient
2095	Feed-forward timing adjustment coefficient
2105	Torque constant for torque control

Převzato z [52].

Parameter number	Description
2107	Velocity loop gain override during cutting
2113	Resonance elimination filter 1 : attenuation center frequency
2144	Position feed forward coefficient for cutting
2145	Velocity feed forward coefficient for cutting
2149	Exponent part of PK1V
2150	Exponent part of PK2V
2156	Torque command filter (during rapid traverse)
2165	Maximum amplifier current
2177	Resonance elimination filter 1 : attenuation bandwidth
2178	Servo loop gain (during rapid traverse)
2335	Velocity loop gain magnification (valid only during high-speed HRV current control)
2359	Resonance elimination filter 1 : damping
2360	Resonance elimination filter 2 : attenuation center frequency
2361	Resonance elimination filter 2 : attenuation bandwidth
2362	Resonance elimination filter 2 : damping
2363	Resonance elimination filter 3 : attenuation center frequency
2364	Resonance elimination filter 3 : attenuation bandwidth
2365	Resonance elimination filter 3 : damping
2366	Resonance elimination filter 4 : attenuation center frequency
2367	Resonance elimination filter 4 : attenuation bandwidth
2368	Resonance elimination filter 4 : damping

Převzato z [52].

Parameter number	Bit	Description
1815	#1	Uses separate position detector
2005	#1	Enables feed forward
2010	#2	Enables linear motor control
2017	#7	Enables the velocity loop high cycle management function
2019	#7	Enables dual position feedback
2202	#1	Enables the cutting/rapid feed velocity loop gain switching function
2213	#6	Enables the cutting/rapid feed position loop gain switching function
2214	#4	Enables the cutting/rapid feed-forward switching function
2283	#0	Enables high-speed HRV current control in cutting feed
2300	#2	Enables DD motor control
2301	#7	Enables torque control setting range extension

Převzato z [52].

C.2 Seznam parametrů A06B-2255-B400

αiF series HV

	Motor model	α iF4 5000HV	α iF8 3000HV	α iF8 4000HV	α iF12 4000HV	α iF22 3000HV	α iF22 4000HV	α iF30 4000HV	α iF40 3000HV	α iF40 3000HV Fan
	Motor specification Motor ID No.	0225	0229	0220	0245	0249	0240	0255	0259	0259
		275	279	493	295	299	495	304	309	479
PRN NO	SERVO PRM									
2003		00001000	00001000	00001000	00001000	00001000	00001000	00001000	00001000	00001000
2004		00000011	00000011	00000011	00000011	00000011	00000011	00000011	00000011	00000011
2005		00000000	00000000	00000000	00000000	00000000	00000000	00000000	00000000	00000000
2006		00000000	00000000	00000000	00000000	00000000	00000000	00000000	00000000	00000000
2007		00000000	00000000	00000000	00000000	00000000	00000000	00000000	00000000	00000000
2008		00000000	00000000	00000000	00000000	00000000	00000000	00000000	00000000	00000000
2009		00000000	00000000	00000000	00000000	00000000	00000000	00000000	00000000	00000000
2010		00000000	00000000	00000000	00000000	00000000	00000000	00000000	00000000	00000000
2011		00000000	00000000	00000000	00100000	00100000	00000000	00100000	00000000	00000000
2012		00000000	00000000	00000000	00000000	00000000	00000000	00000000	00000000	00000000
2013		00000000	00000000	00000000	00000000	00000000	00000000	00000000	00000000	00000000
2014		00000000	00000000	00000000	00000000	00000000	00000000	00000000	00000000	00000000
2210		00000000	00000000	00000000	00000000	00000000	00000000	00000000	00000000	00000000
2211		00001010	00001010	00001010	00000000	00000000	00001010	00001010	00011010	00011010
2300		00000000	00000000	00000000	00000000	00000000	00000000	00000000	00000000	00000000
2301		00000000	00000000	00000000	00000000	00000000	00000000	00000000	00000000	00000000
2040	CUR GAIN I	570	1222	526	1200	1919	1214	785	1441	1441
2041	CUR GAIN P	-3578	-5890	-3270	-6059	-9132	-5218	-4179	-7513	-7513
2042	CUR GAIN 3	-1309	-1322	-1322	-1339	-1346	-1313	-1347	-1350	-1350
2043	VEL GAIN I	113	113	90	193	197	110	225	188	188
2044	VEL GAIN P	-1009	-1008	-807	-1727	-1765	-1513	-2016	-1684	-1684
2045	VEL GAIN 3	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2046	VEL GAIN 4	-8235	-8235	-8235	-8235	-8235	-8235	-8235	-8235	-8235
2047	OBSERVER POA1	3762	3764	4704	2197	2150	2412	-1882	2253	2253
2048	BLACC CMP	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2049	DPFMX	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2050	OBSERVER POK1	956	956	956	956	956	956	956	956	956
2051	OBSERVER POK2	510	510	510	510	510	510	510	510	510
2052	OVER SPEED	6000	3900	5600	4800	3600	4800	4600	3600	3600
2053	DB-CMP PPMAX	21	21	21	21	21	21	21	21	21
2054	DB-CMP PDDP	1894	1894	1894	1894	1894	1894	1894	1894	1894
2055	DB-CMP PHYST	319	319	319	319	319	319	319	319	319
2056	EMFCMP	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2057	D-PHASE CUR	-11788	-6159	-10007	-8203	-5136	-7616	-7697	-5137	-5137
2058	D-PHASE CUR	-1734	-1261	-1593	-1178	-2824	-2514	-2512	-2027	-2027
2059	PPBAS	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2060	TCMD LIMIT	7282	8010	7282	7282	7282	7282	7282	7282	7282
2061	EMFLMT	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2062	OVC K1	32433	32433	32522	32548	32548	3247	32501	32501	32501
2063	OVC K2	4184	4184	3078	2755	2755	3517	3332	3332	3332
2064	TGALMLV	4	4	4	4	4	4	4	4	4
2065	OVC LIMIT	12461	12461	9154	8192	8192	9418	9912	9912	9912
2066	ACC FB GAIN	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2067	TCMD FILTER	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2068-2073		0	0	0	0	0	0	0	0	0
2074	AALPH	12288	12288	12288	12288	8192	8192	12288	8192	8192
2077-2083		0	0	0	0	0	0	0	0	0
2086	RATED CURRENT	1888	1948	1588	2092	2118	1817	2259	1876	2607
2087-2089		0	0	0	0	0	0	0	0	0
2090	ROBSTL	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2091-2098		0	0	0	0	0	0	0	0	0
2099	ONEPSL	400	400	400	400	400	400	400	400	400
2100	INPA1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2101	INPA2	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2102	DBLIM	0	0	0	15000	15000	0	0	0	0
2103	ABVOF	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2104	ABTSH	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2105	TORQUE CONST.	190	369	461	516	934	1013	2215	1869	1869
2106-2109		0	0	0	0	0	0	0	0	0
2110	MGSTCN	1553	782	1300	774	787	1517	1815	1044	1044
2111	TQLIM IN DEC.	10300	0	6500	5191	0	5415	0	4241	4241
2112	AMRDML	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2113	HRV FILT	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2127	NINTCT	2573	4191	1631	4787	6547	2216	3354	6538	6538
2128	MFVKCE	1001	6000	3139	4000	6000	5518	3000	6147	6147
2129	MFVKBL	2568	1810	3089	2320	1808	2316	2833	1809	1809
2130-2132	SMOOTH CMP	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2133	PHDLY1	8220	5150	5141	7701	0	5111	5150	3594	3594
2134	PHDLY2	8990	8990	8981	5141	0	8911	8990	6414	6414
2159	DGCSMM	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2160	TROGUP	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2161	OVC STP	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2162	OVC2 K1	32766	32765	32765	32765	32765	32712	32763	32762	32763
2163	OVC2 K2	31	33	40	39	40	5	58	78	58
2164	OVC2 LIMIT	5676	6042	5746	6969	7142	7818	9912	8288	9912
2165	MAX CURRENT	25	25	45	45	45	5	85	85	85
2302	TQLIM AT STOP	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2304	ACCSLM	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2305	ACDCEBD	0	0	0	0	0	0	0	36	36
2310	DG1DBS	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2316	LIMLIN	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Remarks *2 Supporting servo software is required.

Převzato z [60].

C.3 Seznam parametrů A06B-2239-B100

αiS series HV (1/4)

	Motor model	α iS2 5000HV	α iS2 6000HV	α iS4 5000HV	α iS4 6000HV	α iS8 4000HV	α iS8 6000HV	α iS12 4000HV	α iS12 6000HV	α iS22 4000HV	α iS22 6000HV	α iS30 4000HV
	Motor specification Motor ID No.	0213	0219	0216	0214	0236	0233	0239	0237	0266	0263	0269
		263	287	266	467	286	292	289	463	316	453	319
PRM NO	SERVO PRM											
2003		00001000	00001000	00001000	00001000	00001000	00001000	00001000	00001000	00001000	00001000	00001000
2004		00000011	00000011	00000011	00000011	00000011	00000011	00000011	00000011	00000011	00000011	00000011
2005		00000000	00000000	00000000	00000000	00000000	00000000	00000000	00000000	00000000	00000000	00000000
2006		00000000	00000000	00000000	00000000	00000000	00000000	00000000	00000000	00000000	00000000	00000000
2007		00000000	00000000	00000000	00000000	00000000	00000000	00000000	00000000	00000000	00000000	00000000
2008		00000000	00000000	00000000	00000000	00000000	00000000	00000000	00000000	00000000	00000000	00000000
2009		00000000	00000000	00000000	00000000	00000000	00000000	00000000	00000000	00000000	00000000	00000000
2010		00000000	00000000	00000000	00000000	00000000	00000000	00000000	00000000	00000000	00000000	00000000
2011		00000000	00000000	00000000	00000000	00000000	00000000	00000000	00000000	00000000	00000000	00000000
2012		00000000	00000000	00000000	00000000	00000000	00000000	00000000	00000000	00000000	00000000	00000000
2013		00000000	00000000	00000000	00000000	00000000	00000000	00000000	00000000	00000000	00000000	00000000
2014		00000000	00000000	00000000	00000000	00000000	00000000	00000000	00000000	00000000	00000000	00000000
2210		00000000	00000000	00000000	00000000	00000000	00000000	00000000	00000000	00000000	00000000	00000000
2211		00001010	00001010	00001010	00001010	00001010	00001010	00001010	00001010	00001010	00001010	00001010
2300		00000000	00000000	00000000	00000000	00000000	00000000	00000000	00000000	00000000	00000000	00000000
2301		00000000	00000000	00000000	00000000	00000000	00000000	00000000	00000000	00000000	00000000	00000000
2040	CUR GAIN I	400	497	425	432	694	381	783	471	709	605	816
2041	CUR GAIN P	-2312	-2371	-1641	-1673	-3858	-1749	-4294	-2249	-4008	-2393	-4681
2042	CUR GAIN 3	-1251	-1249	-1266	-1266	-1318	-1305	-1333	-1321	-1345	-1335	-1348
2043	VEL GAIN I	39	48	64	77	34	53	52	43	76	102	82
2044	VEL GAIN P	-351	-429	-574	-688	-306	-473	-470	-387	-685	-914	-738
2045	VEL GAIN 3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2046	VEL GAIN 4	-8235	-8235	-8235	-8235	-8235	-8235	-8235	-8235	-8235	-8235	-8235
2047	OBSERVER POA1	-1081	-884	-661	5516	-1240	-794	-808	-980	5538	4150	5143
2048	BLACC CMP	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2049	DPPMX	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2050	OBSERVER POK1	956	956	956	956	956	956	956	956	956	956	956
2051	OBSERVER POK2	510	510	510	510	510	510	510	510	510	510	510
2052	OVER SPEED	7000	7500	7000	7500	5600	7500	5600	7500	5600	7500	5400
2053	DB-CMP PPMAX	21	21	21	21	21	21	21	21	21	21	21
2054	DB-CMP PDDP	1894	1894	1894	1894	1894	1894	1894	1894	1894	1894	1894
2055	DB-CMP PHYST	319	319	319	319	319	319	319	319	319	319	319
2056	EMFCMP	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2057	D-PHASE CUR	-10252	-13062	-10262	-13326	-7685	-16393	-5898	-12808	-7683	-12039	-6412
2058	D-PHASE CUR	-1600	-1200	-3300	-2500	-2000	-1000	-3000	-1800	-1000	-2000	-2300
2059	PPBAS	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2060	TCMD LIMIT	7282	7282	7282	7282	7282	7282	7282	7282	7282	7282	7282
2061	EMFLIM	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2062	OVC K1	32532	32416	32289	32288	32596	32549	32530	32688	32501	32501	32501
2063	OVC K2	2953	4405	5994	5995	2153	2755	2976	998	3332	3332	3332
2064	TGALMLV	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4
2065	OVC LIMIT	8782	13123	17889	17893	6396	8192	8848	2960	9912	9912	9912
2066	ACC FB GAIN	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2067	TCMD FILTER	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2068-2073		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2074	AALPH	16384	20480	8192	16384	8192	8192	8192	12288	8192	4096	4096
2077-2083		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2086	RATED CURRENT	1526	1866	2824	2586	1302	2075	1532	1181	1810	1977	1847
2087-2089		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2090	ROBSTL	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2091-2098		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2099	ONEPSL	400	400	400	400	400	400	400	400	400	400	400
2100	INPA1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2101	INPA2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2102	DBLIM	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2103	ABVOF	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2104	ABTSH	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2105	TORQUE CONST.	117	96	127	104	541	346	690	837	1093	819	1460
2106-2109		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2110	MGSTCM	40	1555	40	3092	519	1284	521	528	513	1288	775
2111	TQLIM IN DEC.	10260	11550	10260	8208	7268	10255	6159	10260	6194	12830	6430
2112	AMRDML	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2113	HRV F.I.L.T	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2127	NINTCCT	4548	2302	1293	1368	5103	1600	4904	2292	4264	2000	5117
2128	MFNKCE	1250	2200	3000	3000	4500	1400	2000	667	2000	1000	3000
2129	MFNKBL	3847	4112	5122	4365	2580	5390	2575	3850	3092	3854	2574
2130-2132	SMOOTH CMP	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2133	PHDLY1	7690	7690	7685	7690	5150	10260	6174	7690	5150	7690	5150
2134	PHDLY2	12850	7740	12850	12830	8990	12835	8990	8990	8990	8990	8990
2159	DGCSMM	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2160	TROGUP	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2161	OVC STP	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2162	OVC2 K1	32766	32766	32762	32763	32767	32765	32766	32764	32766	32765	32766
2163	OVC2 K2	20	30	77	63	14	33	20	45	28	34	30
2164	OVC2 LIMIT	3711	5544	12702	10651	2702	6857	3738	1721	5218	6222	5432
2165	MAX CURRENT	10	10	10	10	45	45	45	85	85	85	85
2302	TQLIM AT STOP	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2304	ACCBLSM	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2305	ACDCEBD	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2310	DCIDBS	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2316	LINLIM	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	Remarks											

Převzato z [60].

C.4 Technické parametry motorů

C.4.1 Technické parametry motorů A06B-2255-B400

A06B-2255-B400 - Servo Motor ALPHA iF 30/4000HV-B, Straight Shaft, Brake 35 Nm, Absolute Encoder ALPHA iA4000, IP65

General			
Description	Servo Motor ALPHA iF 30/4000HV-B, Straight Shaft, Brake 35 Nm, Absolute Encoder ALPHA iA4000, IP65		
Model Name	ALPHA iF 30/4000HV		
Specification	A06B-2255-B400		
Standard Amplifier [A]	80		
Encoder Type	Pulsecoder ALPHA iA4000		
Int. Prot. Rating (IEC 60529)	IP 65		
Thermal Protection (IEC 34-11)	TP 211		
Model Code	304		
Technical Data		(Default)	
Item	Symbol	Value	Unit
Supply Voltage	U	400	VAC
Cooling Method	-	None	-
Rated Output	P_r	5	kW
Rated Speed	n_r	3000	min^{-1}
Rated Torque (at stall) ¹⁾	T_s	30	Nm
Continuous Current (at stall) ¹⁾	I_0	19.5	A_{rms}
Maximum Speed	n_{max}	4000	min^{-1}
Maximum Output	P_{max1}	23	kW
Rotor Inertia	J_m	0.0176	kgm^2
Armature Resistance ¹⁾	R_a	0.16	Ω
Weight	m	46	kg
Torque Constant ¹⁾	k_T	1.54	Nm/A_{rms}
Back EMF Constant ¹⁾	k_e	54	$\text{V}/1000\text{min}^{-1}$ (1-)
Mechanical Time Constant	t_m	0.003	s
Thermal Time Constant	t_t	70	min
Static Friction	T_F	1.8	Nm
Brake Torque	T_b	35	Nm

Remarks

1) The values are standard values at 20°C and tolerance is 10%.

Převzato z [57].

C.4.2 Technické parametry motorů A06B-2239-B100

A06B-2239-B100 - Servo Motor ALPHA iS 12/4000HV-B, Straight Shaft, Absolute Encoder ALPHA iA4000, IP65

General			
Description	Servo Motor ALPHA iS 12/4000HV-B, Straight Shaft, Absolute Encoder ALPHA iA4000, IP65		
Model Name	ALPHA iS 12/4000HV		
Specification	A06B-2239-B100		
Standard Amplifier [A]	40		
Encoder Type	Pulsecoder ALPHA iA4000		
Int. Prot. Rating (IEC 60529)	IP 65		
Thermal Protection (IEC 34-11)	TP 211		
Model Code	289		
Technical Data		(Default)	
Item	Symbol	Value	Unit
Supply Voltage	U	400	VAC
Cooling Method	-	None	-
Rated Output	P_r	2.5	kW
Rated Speed	n_r	3000	min^{-1}
Rated Torque (at stall) ¹⁾	T_s	12	Nm
Continuous Current (at stall) ¹⁾	I_0	6.7	A_{rms}
Maximum Speed	n_{max}	4000	min^{-1}
Maximum Output	P_{max1}	12	kW
Rotor Inertia	J_m	0.0023	kgm^2
Armature Resistance ¹⁾	R_a	0.84	Ω
Weight	m	12.6	kg
Torque Constant ¹⁾	k_T	1.8	Nm/A_{rms}
Back EMF Constant ¹⁾	k_e	63	$\text{V}/1000\text{min}_1 (1-)$
Mechanical Time Constant	t_m	0.002	s
Thermal Time Constant	t_t	25	min
Static Friction	T_F	0.3	Nm
Brake Torque	T_b	0	Nm
Remarks			
1) The values are standard values at 20°C and tolerance is 10%.			

Převzato z [58].

C.5 Seznam mechanických vlastností Servo modelu

XML tag	name	Unit	Setting value (MIN-MAX)	Initial value
<VDAT_AXIS_INFO>	-	-	-	-
<VD_AXIS_DATA>	-	-	-	-
<axis_index>	Controlled axis number	-	1~128	-
<servomodel_sim>	Simulation	-	1 : Enabled 0 : Disabled	0
<table_unit>	Unit travel of feed axis	mm *1	0.000001 ~ 1000000.000000	10.0
<ratio_num>	Speed ratio of motor to feed axis [numerator]	-	1~1000000	1
<ratio_den>	Speed ratio of motor to feed axis [denominator]	-	1~1000000	1
<motor_j>	Motor inertia	kgm ² *2	0.000001~999.999999	0.000291
<inertia_r>	Inertia ratio	-	0.000000~999.999999	1.0
<tcmd_per_vt>	Coefficient of viscous friction	%/(mm/s) *3	0.000000~999.999999	0.001
<freq_a>	Anti-resonant frequency	Hz	0.00~500.00	60.0
<zeta_a>	Damping ratio of anti-resonance	-	0.00~2.00	0.15
<motor_mu>	Motor static friction	%	0.000000~999.999999	0
<table_mu>	Feed axis static friction	%	0.000000~999.999999	0
<table_dis>	Stationary disturbance	%	0.000~999.999	0
<select_posf>	POSF selection	-	0 : Servo control 1 : Motor position 2 : Feed axis position	0

*1: [mm] for a linear feed axis, [deg] for a rotary feed axis

*2: [kgm²] for a rotary motor and [kg] for a linear motor

*3: [%/(mm/s)] for a linear feed axis and [%/(deg/s)] for a rotary feed axis

Převzato z [52].