České vysoké učení technické v Praze
Fakulta elektrotechnická

DIPLOMOVÁ PRÁCE

Rozšíření modelu žonglér a řízení CNC stroje

Katedra řídicí techniky

Praha, 2011

Autor: Bc. Pavel Jaroš

České vysoké učení technické v Praze
Fakulta elektrotechnická

katedra řídicí techniky

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

Student: **Bc. Pavel Jaroš**

Studijní program: Kybernetika a robotika
Obor: Systémy a řízení

Název tématu: **Rozšíření modelu žonglér a řízení CNC stroje**

Pokyny pro vypracování:

Cílem této práce je rozšíření modelu žonglér, který je řízen prostředky B+R a programován v návrhovém prostředí Automation Studio, a následně řízení CNC frézky ve stejném návrhovém prostředí.

1. Navrhněte a realizujte úpravu pro model žonglér tak, aby byl schopen žonglovat se čtyřmi koulemi.
2. Seznamte se s CNC řízením společnosti B+R.
3. Navrhněte vizualizaci CNC frézky a realizujte jej na reálné frézce.

Seznam odborné literatury:

Dodá vedoucí práce

Vedoucí: Ing. Pavel Burget, Ph.D.

Platnost zadání: do konce letního semestru 2011/2012

prof. Ing. Michael Šebek, DrSc.
vedoucí katedry

L.S.

prof. Ing. Boris Šimák, CSc.
děkan

V Praze dne 14. 4. 2011

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem svou diplomovou práci vypracoval samostatně a použil jsem pouze podklady (literaturu, projekty, SW atd.) uvedené v přiloženém seznamu.

V Praze dne _____ _____

podpis

Poděkování

Na tomto místě bych rád poděkoval především vedoucímu diplomové práce Ing. Pavlu Burgetovi, Ph.D., který se cennými radami a připomínkami nemalou měrou zasloužil o vznik této práce.

Poděkování patří také mým kolegům Tomáši Kohoutovi, Josefu Necidovi a Lubomíru Prudkovi za jejich přínosné rady a spolupráci.

V neposlední řadě bych chtěl poděkovat také společnostem B&R a Vanad, bez jejichž odborné pomoci bych se jenom těžko obešel.

Velké díky patří rovněž mé rodině za poskytnutí psychické a materiální podpory v průběhu celého mého studia.

Abstrakt

Tato diplomová práce se ve své první části zabývá rozšířením mechanického stroje - „Žonglér“ o převodové ústrojí a vytvořením kinematiky os pro proces žonglování se čtyřmi koulemi. K návrhu trajektorií pohybu os stroje je použito vačkových profilů, vytvořených v programu Automation Studia společnosti B&R.

Ve druhé části práce je popsán obecný koncept CNC řízení se softwarovými a hardwarovými prostředky společnosti B&R. Následuje praktická realizace CNC řízení na reálném stroji. Jedná se o kyslíkový a plazmový CNC řezací stroj společnosti Vanad 2000 a.s., ke kterému je navrhnutý vrtací a gravírovací suport, splňující požadavky na CNC řízení. V práci je uvedena především realizace vizualizační části projektu.

Abstract

First part of this diploma thesis deals with improvement of model Juggler by adding gearboxes into the machine and with creation of kinematics of axes for juggling with four balls. New trajectories of individual axes were created in Automation Studio Cam designer.

In the second part of this work is described concept of CNC control on B&R systems. This part also contains practical realization of CNC machine - plasmas and oxygen cutting machine of Vanad company and additional tool Drill and Mill. The main object of this part is development of vizualization for this tool.

Obsah

Seznam obrázků **x**

Seznam tabulek **xiii**

Seznam použitých značek **xiv**

1 Úvod **1**

2 Rozšíření modelu „Žonglér“ **3**

2.1 Specifikace modelu „Žonglér“ 3

2.1.1 Historie modelu 4

2.1.2 Technická a funkční specifikace stroje 5

2.1.2.1 Řízená část stroje 5

2.1.2.2 Řídící a komunikační část stroje 7

2.2 Rozšíření modelu o převodovky 8

2.2.1 Model bez převodovek 8

2.2.2 Návrh mechanické převodovky 9

2.2.2.1 Převodový poměr 9

2.2.2.2 Typ převodovky 10

2.2.2.3 Zvolený typ převodu 12

2.2.3 Model s převodovkou 12

2.3 Rozšíření modelu o funkci žonglování se čtyřmi koulemi 16

2.3.1 Kinematika řízených os stroje 16

2.3.1.1 Volba techniky žonglování 17

2.3.1.2 Omezení kolize koulí 18

2.3.1.3 Parametry žonglování 20

2.3.2 Vačkové profily 23

2.3.2.1 Charakteristika elektronické vačky 23

2.3.2.2 Návrhové prostředí 25
2.3.2.3 Vačkové profily pro žonglování se čtyřmi koulemi 25
2.3.2.4 Přizpůsobení vačkových profilů 27

3 Řízení CNC stroje 29
3.1 Úvod do CNC problematiky 29
3.1.1 Hlavní části CNC stroje 31
3.1.2 Souřadný systém CNC stroje 31
3.1.3 Základní body CNC stroje 32
3.1.3.1 Nulový bod stroje 32
3.1.3.2 Referenční bod 32
3.1.3.3 Základní bod nástroje 33
3.1.3.4 Nulový bod materiálu 33
3.1.3.5 Výchozí bod programu 33
3.1.4 Způsoby odměřování polohy na CNC stroji 33
3.1.5 Softwarový koncept CNC 34
3.1.5.1 NC objekty 35
3.1.5.2 CNC dekodér 38
3.1.5.3 CNC path generátor 39
3.1.6 CNC program 39
3.1.6.1 Struktura CNC programu 39
3.1.6.2 Feedrate F 40
3.1.6.3 G - funkce 40
3.1.6.4 Podprogramy 41
3.1.6.5 Externí parametry 42
3.1.6.6 M - funkce 43
3.1.6.7 Matematické operace 44
3.1.6.8 Logické konstrukce 45
3.1.6.9 Vytváření CNC programu 45
3.2 Kyslíkové a plazmové CNC řezací stroje 46
3.2.1 Typy strojů VANAD 46
3.2.2 Obecná koncepce strojů VANAD 47
3.2.2.1 Rozvržení os na stroji 48
3.2.2.2 Rozvržení os v projektu 48
3.2.3 Hardwarové vybavení 49

3.2.4 Softwarové vybavení 50
3.2.4.1 Struktura aplikačních úloh 50
3.2.4.2 Vizualizační část projektu 51
3.3 Rozšíření strojů Vanad o vrtací a gravírovací suport 53
3.3.1 Požadavky na vrtací a gravírovací suport 53
3.3.1.1 Technologické požadavky 53
3.3.1.2 Požadavky na ovládání 54
3.3.2 Přepínání technologií 54
3.3.3 Rozšíření stávající vizualizace projektu 56
3.3.3.1 Nastavení parametrů reálné osy 57
3.3.3.2 Nastavení technologie vrtání a gravírování 57
3.3.3.3 Ovládání hlavní a vedlejší technologie 58
3.3.3.4 Definování ofsetu suportu 59
3.3.3.5 Stavový řádek 59
3.3.4 Možná rozšíření vrtacího a gravírovacího suportu 60
3.3.4.1 Automatická výměna nástroje 60
3.3.4.2 Ofukování obráběného materiálu 60
3.3.4.3 Zjištění polohy nulového bodu osy Z 60

4 Závěr **61**
4.1 Model „Žonglér“ 61
4.2 Technologie vrtání a gravírování 62

Literatura **I**

A Fotografie **III**

B Obsluha modelu „žongléra“ **IX**
B.1 Před spuštěním stroje IX
B.2 Spuštění stroje X
B.3 Signalizace a hlášení stavu stroje X
B.4 Problémy při provozu modelu XI
B.5 Nefunkční části modelu XI

C Značení vačkových profilů - 4 koule **XIII**

D Obsah přiloženého DVD **XV**

Seznam obrázků

2.1 Původní podoba stroje 4
2.2 Aktuální podoba stroje 4
2.3 Hlavní mechanický celek modelu 6
2.4 Řídící a komunikační část modelu 7
2.5 Převodové ústrojí 9
2.6 Momentová charakteristika synchronního motoru 8NSA55 10
2.7 Řez převodovým ústrojím 13
2.8 Spojení pohonu, převodovky a lin. vedení 14
2.9 Nastavení limitních parametrů pohonů v prostředí AS 15
2.10 Trajektorie pohybu - vertikální směr 16
2.11 Trajektorie pohybu - horizontální směr 18
2.12 Trajektorie letu a dopadu koule v závislosti na úhlu výhozu 19
2.13 Trajektorie pohybu při vrhu šikmém vzhůru 22
2.14 Princip přepínání vačkových profilů vačkovým automatem 24
2.15 Editor vačkových profilů 25
2.16 Sekvence řazení vaček a časové rozvržení 26
2.17 Snímek z průmyslové kamery 27

3.1 Pálící a řezací CNC stroj firmy Vanad 30
3.2 Kartézský souřadnicový systému - 2 1/2 D 32
3.3 Nastavení NC Managera 34
3.4 Softwarový koncept CNC podle B&R 35
3.5 Hiearchické uspořádání uvnitř NC objektů 36
3.6 Nastavení parametrů CNC systému 37
3.7 Výběr typu osy pro CNC 37
3.8 Aktivování os z knihovny ACP10 pro CNC systém 38
3.9 Dekodér - path generátor 38

3.10 Struktura CNC programu 40
3.11 Výběr pracovní roviny 41
3.12 Volba absolutních nebo relativních souřadnic 41
3.13 Volání lokálního podprogramu 42
3.14 Volání globálního podprogramu 42
3.15 Externí parametry v CNC programu 42
3.16 Synchronizace CNC a PLC 43
3.17 Nastavení indexů pro synchronní a asynchronní M-funkce 44
3.18 CNC pálicí stroj VANAD PROXIMA 47
3.19 Rozvržení a orientace hlavních os stroje VANAD 48
3.20 Rozvržení os v projektu 49
3.21 Struktura aplikačních úloh 50
3.22 Obrazovka vizualizace - struktura 51
3.23 Struktura vizualizace projektu VANAD 52
3.24 Podoba vrtacího a gravírovacího suportu - schéma 54
3.25 Ofset hlavního a vedlejšího suportu 56
3.26 Volba technologie vrtání a gravírování 56
3.27 Nastavení parametrů reálné osy 57
3.28 Nastavení technologie vrtání a gravírování 58
3.29 Technologie vrtání a gravírování 58
3.30 Nastavení technologie vrtání a gravírování 59
3.31 Nulový bod osy *Zvf* - nenalezený 60

A.1 Jednostupňová úhlová planetová převodovka WPLE 120 III
A.2 Planetová převodovka WPLE 120 IV
A.3 Model „žonglér“- výstava Ampér 2011 V
A.4 Rozvaděč modelu „žonglér“- zavřený VI
A.5 Rozvaděč modelu „žonglér“- otevřený VII

Seznam tabulek

2.1 Známé parametry žonglování a kladená omezení 21
2.2 Parametry žonglování se čtyřmi koulemi 23

Seznam použitých značek

Značení	Jednotka	Popis
d_{koule}	mm	Průměr biliárdové koule
F	mm	Horizontální vzálenost letu koule
β_V	$^\circ$	Úhel výhozu
β_{CH}	$^\circ$	Úhel dopadu
v_0	m/s	Počáteční vektor rychlosti daný vertikální a horizontální rychlostí hodu
v_{0_x}	m/s	Počáteční horizontální rychlost hodu
v_{0_y}	m/s	Počáteční vertikální rychlost hodu
v_x	m/s	Horizontální rychlost hodu
v_y	m/s	Vertikální rychlost hodu
b	–	Počet koulí
h	–	Počet mechanických rukou určených k přehazování koulí
f	s	Čas letu koule (čas mezi vyhozením a chycením koule)
d	s	Čas držení koule (čas mezi chycením a vyhozením koule)
e	s	Čas prázdné ruky mezi vyhozením a chycením další koule
r	–	Činitel obsazenosti ruky
τ	s	Perioda hodu (čas mezi dvěma hody ze stejné ruky)
ω	–	Průměrný počet koulí ve vzduchu v jednom oblouku
g	m/s^2	Gravitační zrychlení
H	m	Výška hodu koule
α	$^\circ$	Elevační úhel hodu
t_V	s	Čas, za který dosáhne koule vrcholu trajektorie V
t_D	s	Čas, za který koule dopadne do koncového bodu D
r_h	mm	Poloměr hnané hřídele lineárního vedení, $r_h = 46\,mm$
d_{koule}	mm	Průměr biliardové koule, $d_{koule} = 57\,mm$

Kapitola 1

Úvod

V současné době se v průmyslu setkáváme stále častěji s plně automatizovanými provozy, u kterých se hledají cesty k urychlení a zpřesnění technologických procesů. S tím souvisí zavádění nových technologií výroby. Jedním z možných prostředků, jak dosáhnout lepších výsledků při výrobě, může být použití rychlých a přesných servopohonů v kombinaci s inteligentními řídícími systémy.

Tato diplomová práce navazuje ve své první části na diplomové a bakalářské práce, které vznikaly po dobu trvání projektu "Žonglér", jehož hlavními cíli je vytvoření komplexního výukového modelu, sloužícího k výuce na katedře řídicí techniky, a také stroje použitelného při prezentaci výukových aktivit katedry. Studenti, kteří budou na stroji od zimního semestru 2011 pracovat, se seznámí s průmyslovým řešením úloh se servosystémy, s návrhem a řízením polohových aplikací. Za účelem prezentace má být stroj rozšířen o převodové ústrojí, které zajistí kontinuální chod, a tím možnost úspěšné prezentace při různých příležitostech. Od návrhu převodového ústrojí, působícího ve vertikálním směru pohybu, je očekáváno především zlepšení mechanických a termodynamických možností stroje. Pro zvýšení atraktivity stroje bude navrhnutý a prakticky realizovaný režim žonglování se čtyřmi biliárdovými koulemi.

Druhá části práce se věnuje obecného popisu CNC řízení s hardwarovými a softwarovými prostředky společnosti B&R. Popsán je obecný princip činnosti CNC stroje a konkrétní softwarový koncept CNC řízení podle společnosti B&R. Naznačeny jsou principy činnosti CNC systému a jeho vytvoření ve vývojovém prostředí Automation Studia. Dále je rozebrána struktura CNC programu, jeho tvorba, princip překladu a také jeho samotné vykonávání prostřednictvím CNC systému.

Na teoretickou část CNC řízení navazuje popis konkrétního řešení CNC aplikace na reálném stroji společnosti Vanad 2000 a.s., sídlící ve městě Golčův Jeníkov. Jedná se o

kyslíkové a plazmové CNC řezací stroje, u kterých si zákazníci žádají rozšíření portfolia funkcí o automatizovaný vrtací a gravírovací suport. Nejdříve se práce věnuje obecnému popisu stávajícího projektu VANAD a poté návrhu a praktické realizaci, především vizualizační části, technologie vrtání a gravírování.

V závěru práce je zhodnocena úspěšnost realizace jednotlivých bodů diplomové práce s popisem dosažených výsledků.

Kapitola 2

Rozšíření modelu „Žonglér“

Při návrhu procesu žonglování se třemi koulemi a při identifikaci stroje bylo zjištěno nadměrné momentové zatížení pohonů, zajišťujících synchronizovaný pohyb ve vertikálním směru, a tím omezený čas, po který je stroj schopný vykonávat proces žonglování. Výkonové zatížení pohonů však nebylo na své maximální hranici, proto bylo třeba hledat řešení.

Dalšími nároky, které jsou na stroj kladeny ze strany pozorovatelů, je rozšíření jeho portfolia prezentovaných funkcí. Touto funkcí je myšlena především možnost žonglování se čtyřmi koulemi. Také z tohoto důvodu bylo třeba stroj výkonnostně přizpůsobit.

2.1 Specifikace modelu „Žonglér“

Podrobná specifikace modelu „žongléra“ a jeho částí je již uvedena v mé bakalářské práci, stejně jako popis žonglování se třemi koulemi. Pro uvedení do tématu je uveden stručný popis stroje s odkazem na moji bakalářskou práci, viz. [4]. Dále se práce věnuje výhradně rozšířením stroje o převodové ústrojí a rozšířením funkcí stroje o režim žonglování se čtyřmi koulemi.

Stroj „Žonglér“ je výukový a prezentační model umístěný ve strojovně na katedře řídicí techniky, fakulty elektrotechnické. Jedná se o automatizované zařízení schopné vzájemné součinnosti a synchronizace rychlých servopohonů pomocí sítě Ethernet Powerlink.

Dosavadní hlavní funkcí modelu byla prezentace katedry řídicí techniky respektive prezentace produktů partnerské firmy B&R. Prezentováno je především umění stroje žonglovat se třemi a nyní nově se čtyřmi kulečníkovými koulemi. Stroj však disponuje i řadou dalších funkcí (katapult, přehoz dvou koulí, aj.).

V současné době probíhá také zařazení stroje do systému vzdálených ploch - laboratoře LabLink, usnadňující výuku řídicí techniky. **LabLink** je systém, který obsahuje webovou aplikaci, která slouží k registraci zdrojů vzdálené laboratoře jejími uživateli. Jedná se tedy o server virtuálních ploch, kdy každý uživatel využívá jednu plochu a má možnost využívat jemu dostupné reálné a virtuální modely. Hlavní výhodou systému je časově i prostorově neomezený přístup do laboratoře, zapojení virtuálních i reálných modelů a jejich efektivní využití.

2.1.1 Historie modelu

Celý projekt „Žonglér“ začal již před několika lety pracemi na první verzi modelu. Průkopníky se stali v rámci svých školních prací pánové Jan Pšenička ,Tomáš Němec a Ilja Grudinin. Z jejich úsilí vznikla kostra modelu viz. obr. 2.1, tak jak ji známe dnes.

Obrázek 2.1: Původní podoba stroje

Obrázek 2.2: Aktuální podoba stroje

Jan Pšenička realizoval model včetně řídícího systému B&R. Na něj navázal Tomáš Němec, který model rozšířil o zpětnou vazbu od rychloběžné kamery s využitím predikce dopadu koule za použití Kalmanova filtru. Posledním byl Ilja Grudinin, který provedl rozvahu nad zabezpečením stroje pomocí Safety PLC. Tehdejší model zvládal přehoz max. dvou koulí a řídící program byl psán pomocí NC-akcí.

Na rozpracovaný projekt navázali svými bakalářskými pracemi pánové Tomáš Kohout [5], Lubomír Prudek [10], a já - Pavel Jaroš [4]. Projekt byl rozšířen o identifikaci modelu mechaniky a dynamiky stroje, programová část byla přepsána z původních NC-akcí do leader logiky, která využívá již předdefinovaných funkčních bloků z knihovny ACP10. Dále byly navrženy, s využitím žonglovacího teorému, vačkové profily pro možnost žonglování se třemi koulemi. Tomáš Kohout se zabýval návrhem opatření pro potlačení rušivých vlivů při snímání modelu průmyslovou kamerou tak, aby funkce kamery nebyla závislá na okolních podmínkách. Ze snahy všech členů „žonglér“ týmu vznikl stroj schopný žonglovat se třemi koulemi po omezeně dlouhou dobu se zpětnou vazbou od průmyslové kamery, sledující přítomnost koulí v cyklu žonglování.

2.1.2 Technická a funkční specifikace stroje

Model je navržený jako pětiosé mechanické zařízení osazené extrémně rychlými polohovými servomechanizmy, u nichž lze realizovat vzájemnou součinnost a synchronizaci.

Model se skládá z několika částí:

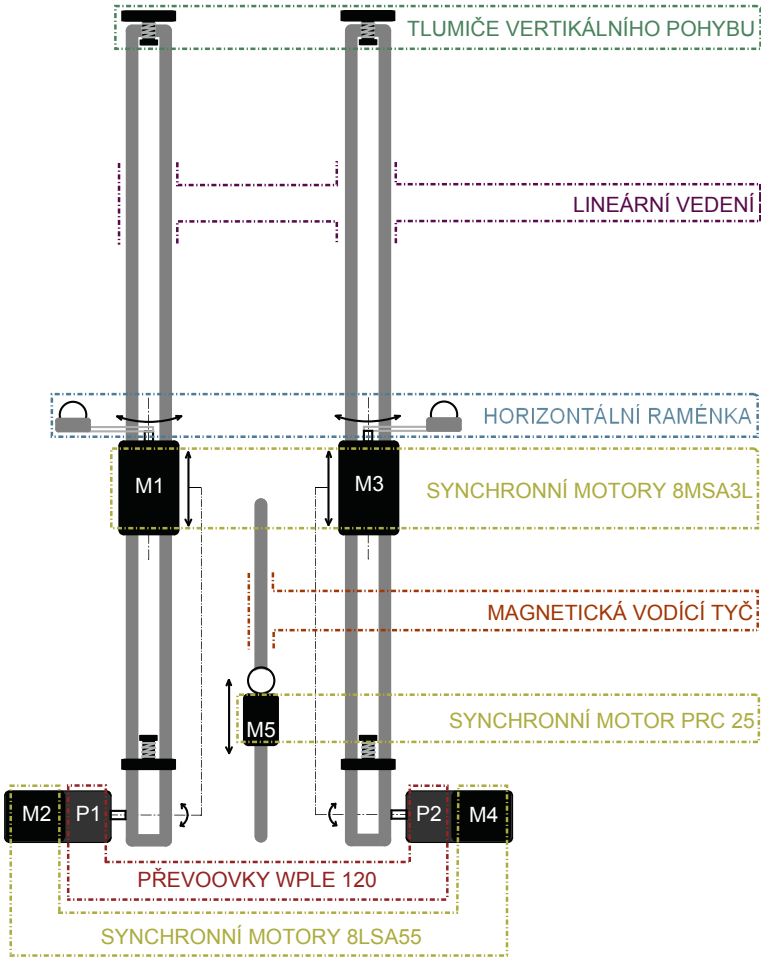
- **Řízená část** - mechanická část stroje osazena pěti synchronními pohony (4 rotační, 1 lineární), připevněná k pevné železné konstrukci.
- **Řídící a komunikační část** - nově umístěna v rozvaděči, spojení řídící a řízené části pomocí datových a silových kabelů.

2.1.2.1 Řízená část stroje

Řízená část stroje je realizována jako dva samostatné vertikálně orientované polohové servomechanizmy typu 8LSA55 (servo č.2, servo č.4). Rotační pohyb servomachanizmů je pomocí lineárních pásových vedení MLR 10 - 110 firmy Rexroth Bosh převeden na vertikální pohyb. Na každém lineárním vedení je připevněn jeden pohyblivý vozík sloužící k uchycení rotačního polohového servomechanizmu typu 8MSA3L (servo č.1, servo č.3) , který pohání otočné raménko zakončené miskou pro kouli. Mezi těmito miskami dochází k

přehazování koulí z jedné strany na druhou. Svislé lineární moduly jsou vzdáleny přesně tak, aby se středy těchto misek protínaly navzájem. V této ose je i střed misky připevněné k páté ose (servo č.5) uchycené na vodící magnetické tyči. Pátá osa je lineární pohon typu PRC 25, který slouží k výhozu koulí, umístěných ve spodní části konstrukce v tzv. zásobníku, zpět do cyklu žonglování.

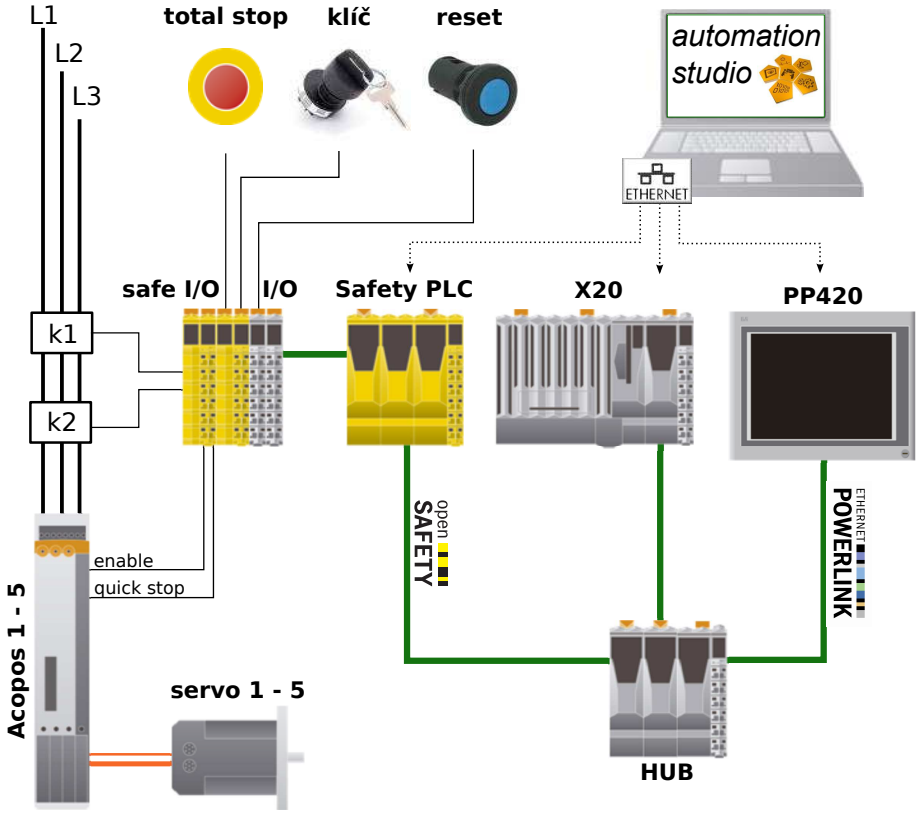
Pracovní prostor stroje je ohraničen pozitivním a negativním hardwarovým koncovým spínačem každé osy. Sepnutí kteréhokoliv koncového spínače má za následek okamžité zastavení všech pohonů a odpojení silového napájení, které zajistí servozesilovače pohonů. K ochraně lineárního vedení a pohonů před poškozením slouží také tlumiče umístěné na obou koncích lineárních modulů. Schématické uspořádání hlavních mechanických částí stroje je patrné z obr. 2.3. Fotografie reálného stroje v aktuální podobě je na obr. 2.2.



Obrázek 2.3: Hlavní mechanický celek modelu

2.1.2.2 Řídící a komunikační část stroje

Řídící a komunikační část stroje je z velké části umístěna v rozvaděči, který je s mechanickým celkem stroje propojen silovými a signálovými kabely. Ve vrchní části rozvaděče je umístěno hlavní řídící PLC Power Panel 420, přes jehož grafický dotykový displej je možné celý stroj ovládat. Dalším řídícím prvkem umístěným v rozvaděči je bezpečnostní Safety PLC X20SL8000, které obsluhuje události vznikající na zabezpečovacích prvcích celého stroje (total stop, zámek čelního plexiskla, tlačítko reset, atd.).



Obrázek 2.4: Řídící a komunikační část modelu

Na bezpečnost uživatele i stroje samotného dohlíží však ještě jedno PLC, a to konkrétně PLC X20CP1485, které zde vykonává funkci zónového zabezpečení. Vzhledem ke konstrukčnímu uspořádání stroje může uvnitř pracovního prostoru dojít ke kolizi jeho mechanických částí. V PLC X20 probíhá zabezpečovací algoritmus, který funguje na principu predikce budoucí polohy s uvažováním maximálního možného zrychlení na časovém horizontu, který je daný zpožděním mezi vznikem potencionální nebezpečné situace a počátkem akce na její odstranění. Toto zpoždění je dáno dobou potřebnou pro přenos informace sítí a výpočetním časem daného CPU. V rozvaděči je také umístěný

průmyslový hub a switch spojující jednotlivé řídící větve komunikující po síti Ethernet Powerlink. Ve střední části rozvaděče jsou umístěny společně se zdroji 24V také spínací a jistící prvky signálové a silové části rozvaděče. Ve spodní části se pak nacházejí servozesilovače Acopos, které řídí pohonné jednotky stroje. Struktura řídící a komunikační části je patrná z obr. 2.4. Rozmístění jednotlivých zařízení je vidět na fotografii rozvaděče umístěné v příloze viz. obr. A.5.

2.2 Rozšíření modelu o převodovky

Hlavním důvodem návrhu a konstrukce stroje s převodovkami je zajištění kontinuálního chodu stroje při režimu žonglování se třemi kulečníkovými koulemi respektive režimu žonglování se čtyřmi kulečníkovými koulemi. Tyto důvody jsou zřejmé, neboť stroj je prezentován na výstavách a musí být schopen nepřetržitého provozu.

2.2.1 Model bez převodovek

Proces žonglování se třemi koulemi klade na chod pohonů, zajišťujících pohyb ve vertikálním směru, velké výkonové požadavky.

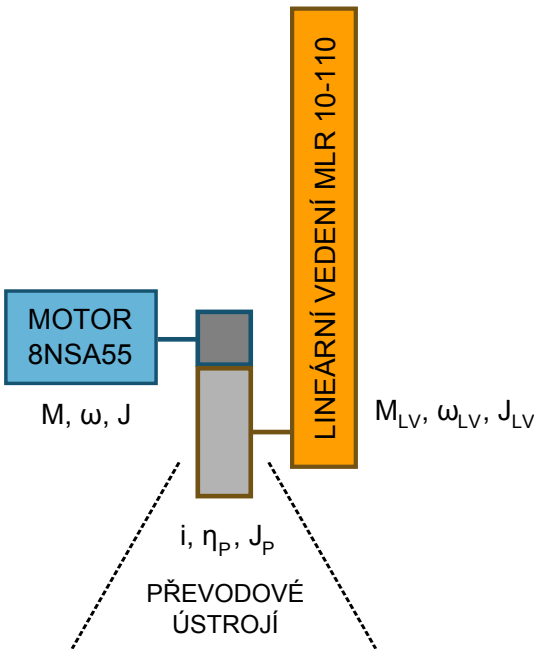
Výkon odpovídající zatížení motorů momentem ($M_{eff} = 14{,}605\,Nm$) přesahuje hodnoty pro jmenovité zatížení motorů ($M_{max} = 10{,}5\,Nm$). Z hlediska zatížení motoru tepelnými ztrátami byl vypočítán nárůst tepelného výkonu o 76 % větší, než ztrátový tepelný výkon, který je běžně motor schopen vyzářit. Z hlediska tepelných ztrát je tedy pohon zatěžován na 176 %.

Z dopočítaného termodynamického modelu [4] vertikálních pohonů stroje vyplývá, že kontinuální chod stroje při procesu žonglování se třemi koulemi lze zaručit pouze po omezeně dlouhou dobu. Stroj podle dopočítaného teplotního modelu dokáže žonglovat se třemi koulemi (maximální zatížení) po dobu 5 minut, poté je servozesilovači bezpečně odpojen, aby nedošlo k teplotnímu přetížení některého z vertikálních pohonů stroje.

Kontinuální chod stroje lze zajistit několika různými způsoby. Jedním z možných způsobů je natočení horizontálních ramének, druhým mechanické odlehčení přetěžovaných vertikálních pohonů a třetím možným způsobem je volba vhodné převodovky. Po zvážení všech pro a proti byl zvolen způsob třetí, tedy volba vhodné převodovky. Podrobnější popis zde uvedených možností viz. [4].

2.2.2 Návrh mechanické převodovky

Mechanická převodovka je technické zařízení, které mění rotační pohyb na rotační pohyb s obecně jinou úhlovou rychlostí a točivým momentem. Převodové ústrojí je naznačeno na obr. 2.5.



Obrázek 2.5: Převodové ústrojí

U stroje „žonglér“ se naráží na omezení maximálního jmenovitého momentu motoru, ačkoliv má motor stále výkonovou rezervu. Pro maximální výkon pohonu platí vztah (2.1). V našem případě dosahujeme maximálního momentu při nízkých otáčkách motoru, proto se nabízí varianta použití mechanické převodovky v režimu převodu **dopomala**. Toto uspořádání zajistí snížení výkonové rezervy motoru a dojde ke zvýšení otáček pohonu při stejné hodnotě momentového zatížení.

$$P_{max} = M_{max} \cdot \omega_{max} \tag{2.1}$$

2.2.2.1 Převodový poměr

Důležitým parametrem převodovky je její převodový poměr. Na výpočet převodového poměru převodovky jsou kladena dvě omezení. První omezení je dáno momentovou charakteristikou pohonu obr. 2.6. Maximální převodový poměr je dán maximálními

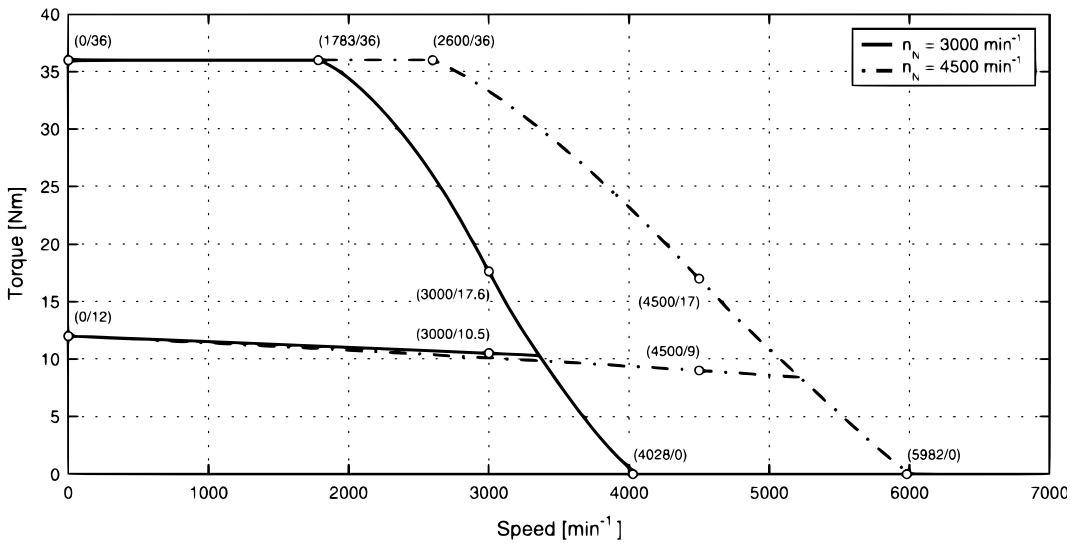
otáčkami motoru ku maximálním otáčkám na vstupu lineárního modulu při jeho maximální požadované rychlosti. Tento převodový poměr charakterizuje rovnice (2.2).

$$i_v = \frac{\omega_{max_{MOT}}}{\omega_{max_{LV}}} = \frac{6000\ ot/min}{1862\ ot/min|_{\ 9{,}0\ m/s}} \doteq 3{,}22 \tag{2.2}$$

$$i_m = \frac{M_{max_{MOT}}}{M_{max_{LV}}} = \frac{36\ Nm}{80\ Nm} = \frac{1}{2{,}22} \tag{2.3}$$

$$i = i_v = \frac{1}{i_m} \qquad \frac{1}{i_m} < i_v \Rightarrow i = \frac{1}{i_m} = 2{,}22 \tag{2.4}$$

Druhé omezení je dáno maximálním pnutím v řemenu lineárního vedení reprezentovaného maximálním kroutícím momentem na jeho vstupu. Dle dokumentace je tato hodnota $M_{max_{LV}} = 80\,Nm$. Maximální převodový poměr daný poměrem maximálních momentů lineárního modulu a motoru charakterizuje rovnice (2.3). Pro stanovení výsledného převodového poměru **i** (2.4) je třeba brát v úvahu přísnější požadavek, tj. nižší převodový poměr.



Obrázek 2.6: Momentová charakteristika synchronního motoru 8NSA55

2.2.2.2 Typ převodovky

Při návrhu převodovky je zapotřebí vycházet nejenom ze statických výpočtů, ale je třeba také zohlednit celkovou dynamiku pohonu a správně zvolit typ převodovky. Existuje mnoho typů převodů, ne každý je však pro naši aplikaci vhodný.

- **Planetová převodovka** - planetový mechanizmus se skládá z centrálního kola, satelitů, unašeče satelitů a korunového kola. Satelity jsou uloženy na unašeči a jsou v záběru v centrálním i korunovém kole.
  - \+ nezatěžuje radiální silou hřídel motoru ani hřídel lineárního vedení
  - \+ delší životnost
  - \- vyráběny pouze v daných řadách převodových poměrů (3:1, 5:1, atd.)
  - \- složitější konstrukce = dražší výroba
- **Válečkový řetěz** - převodový mechanizmus řešen válečkovým řetězem.
  - \+ robustní řešení, velká pevnost v tahu
  - \+ lze realizovat libovolný převodový poměr
  - \- velká hlučnost
  - \- nutnost mazání
  - \- radiální síla působící na hřídel motoru
- **Ozubený řemen** - převodový mechanismus řešen hnacím řemenem se zuby na vnitřním obvodu, které zabíhají do řemenic. Tažná síla se přenáší na ocelová, nebo kevlarová lanka v jeho kordu. To umožňuje přenos vysokých výkonů.
  - \+ dobré mechanické vlastnosti
  - \+ lze realizovat libovolný převodový poměr
  - \+ vysoké obvodové rychlosti
  - \- radiální síla působící na hřídel motoru
- **Ploché, drážkové a klínové řemeny** - v našem případě nepoužitelné z důvodu přirozeného záběrového skluzu.

2.2.2.3 Zvolený typ převodu

Zvážením všech pro a proti u každého typu převodu bylo rozhodnuto pořídit **planetovou převodovku**.

Pro tento typ převodu hovoří především:

- kompaktní rozměry, tichý provoz - pro model, který má být prezentovaný na výstavách a sloužit studentům při výuce jsou tyto parametry převodovky velice důležité. U ostatních převodů těchto parametrů nejsme schopni dosáhnout
- dlouhá životnost, téměř bezobslužný provoz
- nulová radiální síla na hřídeli motoru - zajistí dlouhou životnost pohonu a lineárního vedení

Nevýhodami tohoto typu převodu jsou především:

- nelze realizovat libovolný převodový poměr
- vyšší cena

2.2.3 Model s převodovkou

Po stanovení převodového poměru a typu převodovky byl návrh převodovky dokončen firmou NEUGART. Byla navrhnuta **Jednostupňová úhlová planetová převodovka WPLE 120** (obr. A.1).

Použití úhlové převodovky vyplynulo z požadavku na kompaktní rozměry stroje. Bez úhlového převodu by nebylo možné umístit převodovku společně s pohonem pod pracovní plochu stroje. Kompletní dokumentace k návrhu převodovky je uvedena v příloze, viz. obr. A.2.

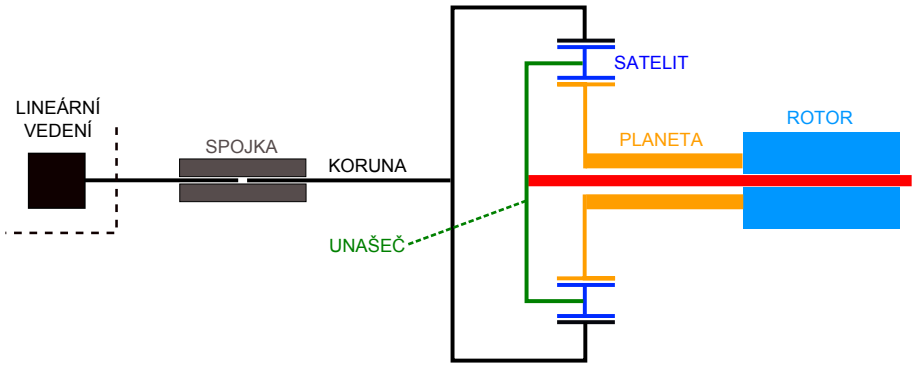
Další doplňující údaje ke zvolené planetové převodovce WPLE 120:

- účinnost 94%
- osy jsou vzájemně v úhlu 90°
- montáž v libovolné poloze
- ozubení je tvrzené
- mazání: tuková náplň vydrží po celou dobu životnosti

- stupeň krytí : IP54
- pracovní teplota : -25 až +90° C
- převodovky se vyrábí a montují podle standardu kvality DIN ISO 9001

Jak už bylo výše zmíněno je třeba při návrhu planetové převodovky počítat s tím, že na ní nelze realizovat libovolný převodový stupeň. Dle rovnice (2.4) by měl být převodový stupeň zvolen 2:1. Pro úplné výkonové využití pohonu bylo rozhodnuto, že se zakoupí převodovka s převodovým poměrem 3:1.

Volba převodového poměru 3:1 tedy porušuje omezení dané maximálním pnutím v řemenu lineárního vedení reprezentovaného maximálním kroutícím momentem na jeho vstupu (2.2). Na výstupu převodovky je tedy možné dostat vyšší kroutící moment, než je schopný lineární modul přenést. Při návrhu vačkových profilů však není možné ovlivnit přímo momentové zatížení osy. Přímo úměrné momentovému zatížení je však zrychlení, které je již možné při návrhu vačkového profilu případně softwarově v limitních parametrech jednotlivých pohonů omezit.



Obrázek 2.7: Řez převodovým ústrojím

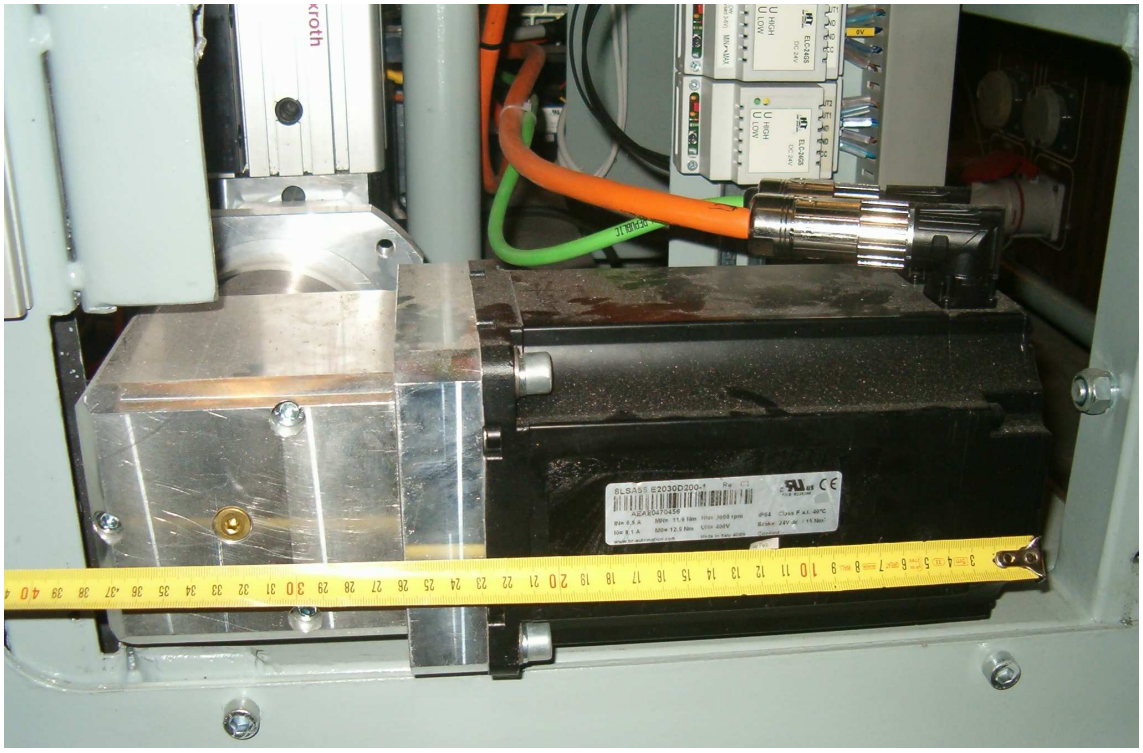
Velikost maximálního zrychlení vertikální hmoty je závislé na směru pohybu z důvodu působení gravitační síly na pohybující se vertikální hmotu, tudíž pohyb nahoru může být konán s menším zrychlením oproti pohybu dolů, tomu naopak gravitační síla pomáhá. Vertikální hmota je však proměnlivá, protože se zde objevuje nelinearita dána hmotností vlečného pásu, který chrání proti poškození přívodní kabely k menším motorům 8MSA3L, které vykonávají pohyb v horizontálním směru. Vzhledem k uchycení vlečného pásu ke konstrukci stroje dochází při pohybu ke změně hmotnosti, která se podílí na vertikální hmotnosti a ovlivňuje tak maximální možné zrychlení.

Vertikální hmota je stanovena dle hmotnosti pohonu, nosného vozíku a energetických pásů včetně kabelů na maximální možnou velikost $m_{max} = 15{,}0\,kg$.

Maximální možné zrychlení, které je možné při návrhu vačkových profilů (vertikálního pohybu) použít, charakterizuje rovnice (2.5).

$$a_{max} = \pm\frac{M_{max_{LV}}}{m_{max} \cdot r_h} = \pm 115{,}7\,m/s^2 \tag{2.5}$$

Mezi převodovku a lineární vedení je vložena ještě spojka sloužící ke spojení výstupní hnací hřídele převodovky a vstupní hnané hřídele lineárního vedení. Řez celým mechanickým celkem pohonu, planetové převodovky, spojky a lineárního vedení je vidět na obr. 2.7, fotografie reálné situace pak na obr. 2.8.

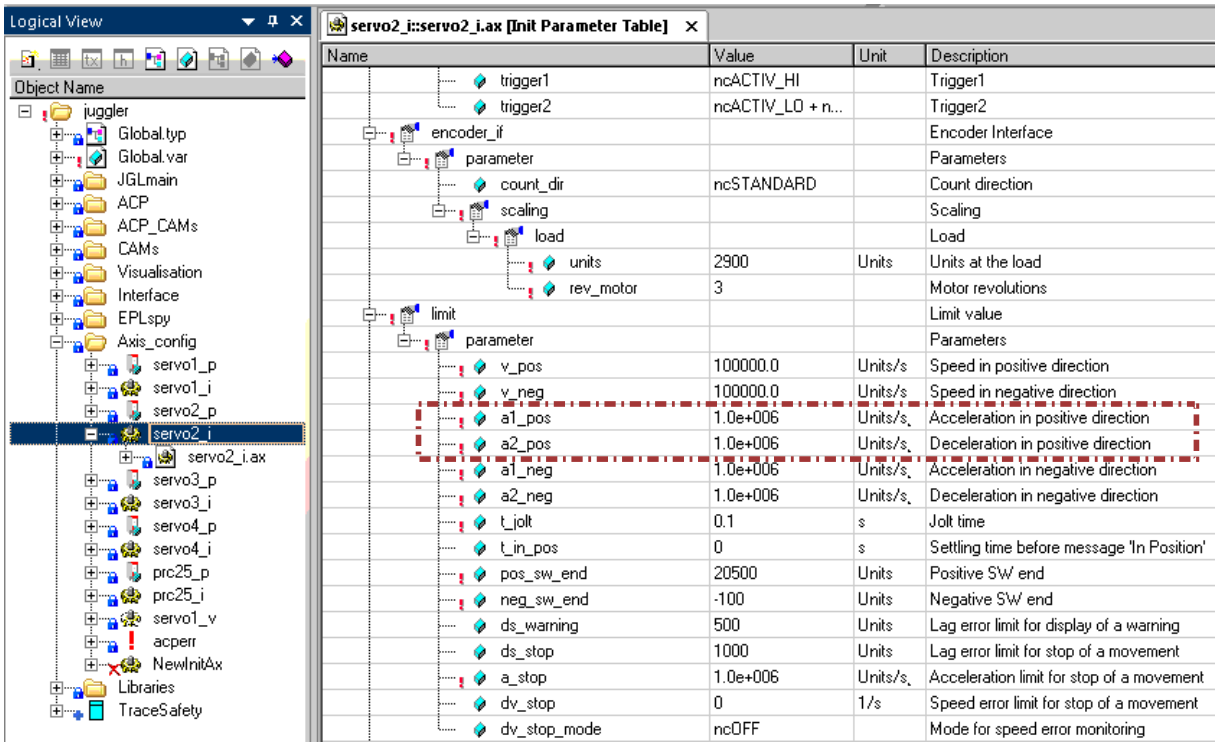


Obrázek 2.8: Spojení pohonu, převodovky a lin. vedení

Při uvažování maximálního možného zrychlení ve vertikálním směru pohybu $\ddot{y}_{max} = 79{,}0\,m/s^2$, kterého je možné na výstupu pohonu 8LSA55 dosáhnout (viz. [4]), dojde při použití planetové převodovky s navrženým převodovým poměrem 3 : 1 k jeho přibližně trojnásobnému zvýšení. Lineární vedení však při daném zatížení snese pouze zrychlení dané vztahem (2.5).

K omezení zrychlení a jemu odpovídajícímu momentu na výstupu převodovky je možné použít dva způsoby:

- **Limit vačkových profilů** - stanovením si daného limitu zrychlení, které je možné při návrhu vačkového profilu použít. Je závislé na uživateli, proto je nutné použít také druhý způsob zabezpečení.
- **Limitní parametry pohonu** - nastavením limitních hodnot v konfiguraci každého pohonu zajistíme, že při překročení daného limitu bude pohon servozesilovačem zastaven s hlášením překročení limitu zrychlení dané osy. Nastavení limitních parametrů pohonu se provádí přímo ve vývojovém prostředí Automation Studia viz. obr. 2.9.



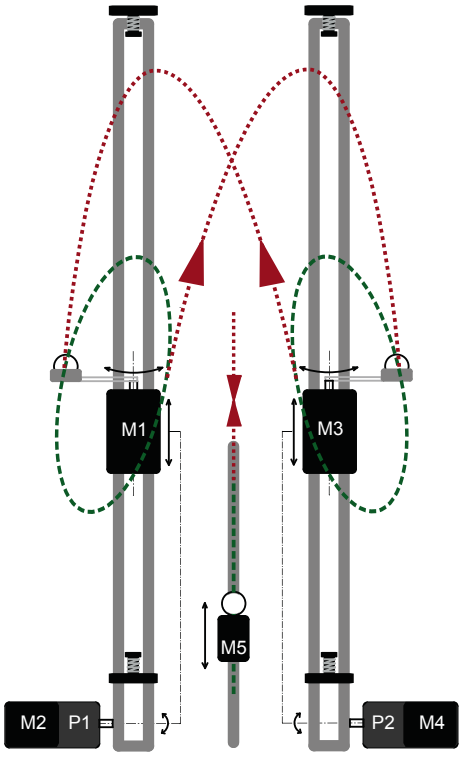
Obrázek 2.9: Nastavení limitních parametrů pohonů v prostředí AS

2.3 Rozšíření modelu o funkci žonglování se čtyřmi koulemi

Po rozšíření modelu „žongléra“ o převodovku, zajišťující plné výkonové nasazení vertikálních pohonů, je možné provést návrh kinematiky řízených os stroje pro případ žonglování se čtyřmi koulemi.

2.3.1 Kinematika řízených os stroje

Návrh kinematiky řízených os pro případy přehazování koulemi mezi vertikálními osami stroje je příkladem na variační počet, neboť hledané trajektorie jsou dané okrajovými podmínkami a známými dynamickými a termodynamickými možnostmi stroje. Mezi okrajové podmínky patří body, ve kterých přehazovaná koule opouští nebo dopadá na misku raménka. V těchto bodech přestává nebo začíná být poloha koule závislá na poloze misky, kterou je možné řídit a ovlivnit tak trajektorii přehazovaných koulí.



Obrázek 2.10: Trajektorie pohybu - vertikální směr

Při pohybu mezi první a druhou miskou sleduje koule trajektorii vrhu šikmého vzhůru s počátečním vektorem rychlosti shodným s vektorem rychlosti misky v čase odpoutání se od koule, tj. když negativní zrychlení při pohybu vzhůru překročí velikost $1g \approx 9{,}81\,m/s^2$. Pro zachycení dopadající koule musí vektor rychlosti pohybu koule opět souhlasit s vektorem rychlosti pohybu misky, když negativní zrychlení při pohybu dolů klesne pod $1g \approx 9{,}81\,m/s^2$.

Trajektorie pohybu koule, která se pohybuje mezi osami stroje je tedy složen ze dvou fází, z pohybu shodného s pohybem synchronizovaných os stroje a z pohybu vrhu šikmého vzhůru s počátečním vektorem rychlosti shodným s vektorem rychlosti misky v okamžiku odpoutání se od ní.

Trajektorie pohybu, kterou koule při režimu žonglování se třemi a čtyřmi koulemi cyklicky opisují jsou patrné z obr. 2.10.

2.3.1.1 Volba techniky žonglování

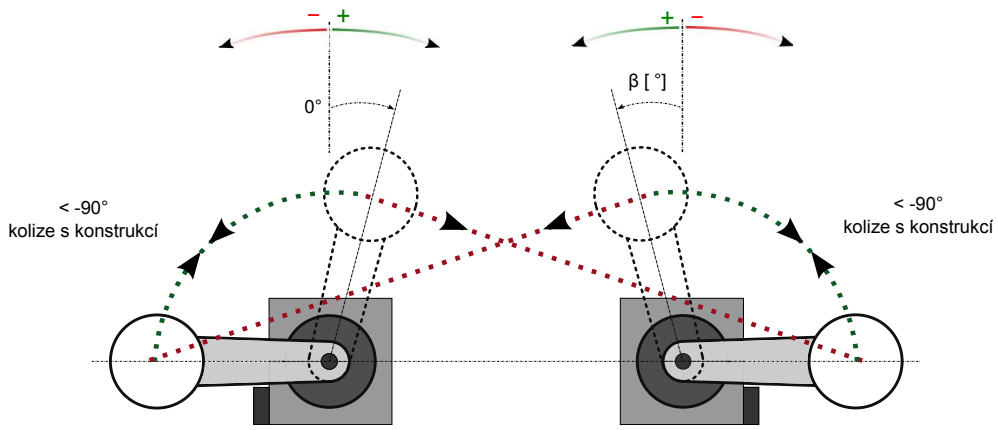
Před tím, než je možné navrhnout kinematiku řízených os pro přehazování čtyřmi koulemi, tak je nezbytné zvolit vhodnou techniku žonglování. Optimální volbou techniky žonglování lze snížit výkonové zatížení akčních částí stroje a výrazně tak prodloužit jejich chod bez výpadků způsobených přetížením a v neposlední řadě také prodloužit jejich životnost.

V praxi existuje několik možných technik žonglování, které lze mezi sebou kombinovat a skládat. Některé techniky jsou vhodné pro náš účel, jiné se však nehodí. Mezi základní techniky žonglování patří techniky známé pod názvy **„kaskáda“** a **„fontána“**. Technika, kterou nelze na modelu „žonglér“ realizovat je právě technika „fontány“. Tuto techniku nelze realizovat z důvodu konstrukčních omezení stroje. Při žonglování se třemi koulemi je využito techniky „kaskády“ a to především z důvodu, že při této technice je možné vyhazování a chytání koulí ve stejné vertikální poloze, mění se tak pouze bod vyhazování a chytání v horizontálním směru pohybu. Na pohony zajišťující pohyb žonglovacích ramének ve vertikálním směru jsou tak kladeny menší výkonové požadavky, než v případě vyhazování a chytání koule v odlišných vertikálních polohách. Oproti tomu pohony zajišťující pohyb v horizontálním směru vykonávají pouze omezený rotační pohyb téměř bez zátěže, čili jejich momentové respektive výkonové zatížení při zrychleních potřebných k přejezdu mezi bodem výhozu a bodem chytání koule je nízké. Více o maximálních hodnotách zrychlení v jednotlivých směrech pohybu v [4, Identifikace stroje].

Pro žonglování se čtyřmi koulemi je tedy také zvolena technika **„kaskády“** z důvodů

uvedených výše. Princip této techniky spočívá v postupnému přehazování koulí z jedné žonglovací ruky na druhou do dvou symetrických oblouků. Obě mechanické ruce vyhazují kouli blíže ke středu a chytají ji v nejvzdálenějším možném bodě od bodu výhozu, který je dán fyzickým omezením stroje. Trajektorie, které opisují koule a osy v horizontálním směru jsou dobře viditelné na obr. 2.11.

K žonglování je možné využít různých pomůcek. Pro model „žongléra“ padla volba na biliárdové koule. Vzhledem k jejich hmotnosti, tuhosti materiálu a stálému objemu dochází ke zjednodušení popisu kinematiky (zanedbání odporu vzduchu při přehazování koule) a k eliminaci dalších nežádoucích jevů (odraz koule od misky, atd.).



Obrázek 2.11: Trajektorie pohybu - horizontální směr

2.3.1.2 Omezení kolize koulí

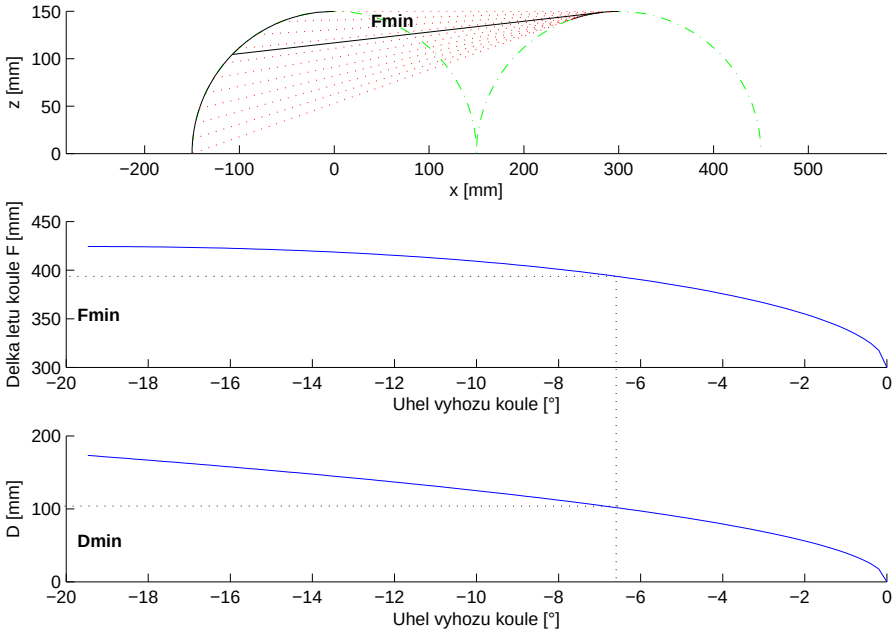
U kaskádové techniky žonglování dochází k vyhazování koulí tzv. „na přeskáčku“. Koule jsou vyhazovány střídavě z jedné a druhé strany. Protože při žonglování dochází ke křížení oblouků, tak je třeba stanovit minimální čas t_{min}, po jehož uplynutí je možné vhodit do cyklu další kouli z protějšího směru, aniž by došlo ke kolizi (2.6). Při žonglování se třemi koulemi není tento minimální čas příliš důležitý, protože cyklus ve kterém jsou koule vyhazovány dosahuje mnohem vyšších hodnot.

$$t_{min} = \frac{D_{min}}{v_0} \tag{2.6}$$

$$D_{min} = d_{koule} + (d_{koule} \cdot 0{,}75) = 100\,mm \tag{2.7}$$

Minimálního času před vyhozením další koule se využívá především při žonglování se čtyřmi koulemi, kdy je využito možnosti téměř současnému vyhazování dvou koulí z obou směrů.

Dále je třeba zamezit kolizi mezi vyhazovanou a dopadající koulí. Z tohoto důvodu musí být místo dopadu koule vzdáleno od místa výhozu koule minimálně o průměr koule $d_{koule} = 57\,mm$. Minimální vzdálenost mezi místem výhozu a místem chytání koule s 75% bezpečnostní rezervou je dána vztahem (2.7). Místo dopadu na protějším raménku je dáno průsečíkem možné trajektorie tohoto raménka s tečnou trajektorií vyhazujícího raménka v okamžiku výhozu, přičemž se bere zazší průsečík. Výhoz, trajektorie letu a dopad koule závislé na úhlu výhozu jsou znázorněny na obr. 2.12.



Obrázek 2.12: Trajektorie letu a dopadu koule v závislosti na úhlu výhozu

$$D_{min} = 100\,mm \qquad D_{max} = 173{,}25\,mm$$
$$F_{min} = 393{,}07\,mm \qquad F_{max} = 424{,}26\,mm$$
$$\beta_{V_{min}} = +6{,}49^\circ \qquad \beta_{V_{max}} = +19{,}47^\circ$$
$$\beta_{CH_{min}} = -45{,}78^\circ \qquad \beta_{CH_{max}} = -90^\circ$$

Při procesu žonglování se čtyřmi koulemi bude úhel výhozu $\beta_{V_{max}}$ a jemu odpovídající úhel dopadu $\beta_{CH_{max}}$. Tento způsob výhozu koulí zajistí nejdelší možnou délku hodu F_{max} a tím se zvýší doba jednoho cyklu procesu žonglování.

2.3.1.3 Parametry žonglování

K ozřejmění procesu žonglování s libovolným počtem koulí a libovolným počtem mechanických rukou schopných zachytit kouli a vrhat ji zpět do cyklu žonglování se používá **Shannonův žonglovací teorém**, který elegantně popisuje vztah mezi časovými proměnnými procesu žonglování a poměrem mezi počtem koulí a počtem mechanických rukou (2.8). Doplněním teorému o popis kinematiky vrhu šikmého vzhůru viz. obr. 2.13 dostaneme kompletní soubor rovnic důležitých pro stanovení všech parametrů žonglování.

Žonglovací teorém lze pomocí vztahů (2.9) zapsat více způsoby. Použité rovnice více ozřejmí vztahy mezi použitými proměnnými, které slouží k popisu cyklu žonglování.

$$\frac{b}{h} = \frac{d+f}{d+e} \tag{2.8}$$

$$\tau = d + e \qquad r = \frac{d}{\tau} \qquad \omega = \frac{f}{\tau} \tag{2.9}$$

Před použitím žonglovacího teorému je nutné stanovit některé jeho parametry z již známých omezení, případně předpokladů. Prvním předpokladem je hodnota času mezi chycením a vyhozením koule $\boldsymbol{d}$. Jedná se o parametr žonglování, který byl zjištěn na základě cyklické optimalizace této konstanty. Pro návrh vačkových profilů se osvědčila hodnota tohoto parametru $d = 4\,s$, při tomto čase má koule dostatek času na ustálení se v misce raménka a nedochází tak ke ztrátě dopadající koule, respektive nedochází k chybnému výhozu na protější raménko.

$$e_{y_{min}} = 2 \cdot \sqrt{\frac{s}{a_{max}}}^{\,1} = 0{,}11\,s \tag{2.10}$$

$$e_{x_{min}} = 2 \cdot \sqrt{\frac{b_{v_{max}} + 90^\circ}{\ddot{\varphi}_{max}}}^{\,2} = 0{,}064\,s \tag{2.11}$$

Dalším parametrem žonglování, který můžeme vyjádřit, tentokrát výpočtem, je parametr $\boldsymbol{e}$ vyjadřující časový interval prázdné ruky mezi vyhozením a chycením další koule.

[1] s - dráha, na které se musí pohyb vertikální hmoty zastavit a poté znovu rozjet

[2] $\ddot{\varphi}_{max}$ - maximální zrychlení v horizontálním směru pohybu [4]

Jeho hodnota je stanovena dle rovnic (2.10), (2.15) vyjadřující minimální hodnotu času potřebnou pro přejezd z fáze výhozu koule do fáze chytání koule ve vertikálním, respektive horizontálním směru pohybu. V úvahu je třeba brát přísnější požadavek, čili delší časový úsek.

Z Shannonova žonglovacího teorému (2.8) pak dostáváme požadavek na minimální hodnotu parametru $\boldsymbol{f}$, reprezentujícího čas letu koule. Cyklus žonglování pomocí stroje „žonglér“ je však také omezen tvarem, neboli sklonem hrany misky určující minimální poměr složek rychlosti dopadající koule, tak aby tato byla tlačena do misky a nevypadla, čímž je předurčena i minimální doba letu koule $\boldsymbol{f}$ dána vztahem (2.12) a minimální rychlost ve vertikálním (2.13) a horizontálním směru pohybu (2.14). V potaz bereme opět přísnější požadavek, tedy vyšší hodnotu minimální doby letu koule $\boldsymbol{f}$.

$$\frac{1}{\tan\varphi_d} = \min\{\frac{\delta v_{0_y}}{\delta v_{0_x}}\} = \frac{g \cdot f_{min}^2}{2 \cdot F_{max}} \qquad \Rightarrow \qquad f_{min} = 0{,}832\,s \tag{2.12}$$

$$v_{x_{min}} = \frac{F_{max}}{f_{min}} = 0{,}5096\,m/s \tag{2.13}$$

$$v_{y_{min}} = \min\{\frac{\delta v_{0_y}}{\delta v_{0_x}}\} \cdot v_{x_{min}} = 4{,}0769\,m/s \tag{2.14}$$

b	$-$	4
h	$-$	2
g	m/s^2	9,81
d	s	0,4
e	s	$\geq$ 0,11
f	s	$\geq$ 0,8320
F	m	0,4240
v_{0_x}	m/s	$\geq$ 0,5096
v_{0_y}	m/s	$\geq$ 4,0769

Tabulka 2.1: Známé parametry žonglování a kladená omezení

Nyní jsou známá již všechna omezení kladená na cyklus žonglování se čtyřmi koulemi. Známé parametry žonglování a omezení kladená na cyklus žonglování přehledně shrnuje tabulka 2.1. Kompletní soubor rovnic důležitých k výpočtu všech parametrů žonglování se čtyřmi koulemi dostaneme až po rozšíření dosavadního souboru rovnic o

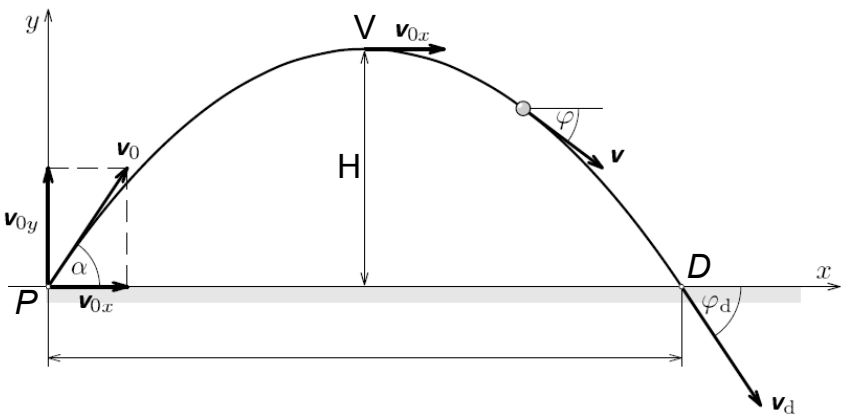
vztahy vycházejících z popisu kinematiky *vrhu šikmého vzhůru.* Dle uvedených výsledných vztahů (2.15) - (2.17) je možné dopočítat zbylé parametry důležité pro návrh vačkových profilů pro jednotlivé osy stroje. Odvození rovnic vrhu šikmého vzhůru viz. [4].

$$v_0 = \sqrt{v_{0_x}^2 + v_{0_y}^2} \qquad v_{0_y} = \frac{F \cdot g}{2 \cdot v_{0_x}} \tag{2.15}$$

$$t_V = \frac{v_0 \cdot \sin\alpha}{g} \qquad t_D = 2 \cdot t_V = f \tag{2.16}$$

$$H = \frac{v_0^2 \cdot \sin^2\alpha}{2 \cdot g} \tag{2.17}$$

Použitím výše uvedených rovnic dostáváme parametry žonglování viz. tabulka 2.2, které respektují všechna námi kladená omezení na kinematiku řízených os stroje. Parametry žonglování jsou spočítány pro několik možných výšek výhozu koule, která nesmí překročit určitou hranici, závislou na volbě místa vyhazování a dopadu koule a celkové výšky manipulačního prostoru stroje. Pro cyklus žonglování se čtyřmi koulemi volíme parametry pro výšky výhozu $H_1 = 1{,}11\,m$ a $H_2 = 1{,}35\,m$. Ze zvoleného principu žonglování je třeba uvažovat, že každý oblouk bude mít jinou výšku výhozu koule.



Obrázek 2.13: Trajektorie pohybu při vrhu šikmém vzhůru

		H [m]			
		0,90	1,11	1,35	1,45
v_{0_x}	m/s	0,4949	0,4457	0,4041	0,3899
v_{0_y}	m/s	4,2022	4,6668	5,1467	5,3339
v_0	m/s	4,2313	4,6880	5,1625	5,3481
$\sin\alpha$	rad	0,9931	0,9955	0,9969	0,9973
$\cos\alpha$	rad	0,1170	0,0951	0,0783	0,0729
f	s	0,8567	0,9514	1,0492	1,0874
d	m	0,4	0,4	0,4	0,4
e	m	0,2283	0,2757	0,3246	0,3437
ω	m	1,3634	1,4080	1,4480	1,4621
r	m	0,6366	0,5920	0,5520	0,5379
τ	m	0,6283	0,6757	0,7246	0,7437

Tabulka 2.2: Parametry žonglování se čtyřmi koulemi

2.3.2 Vačkové profily

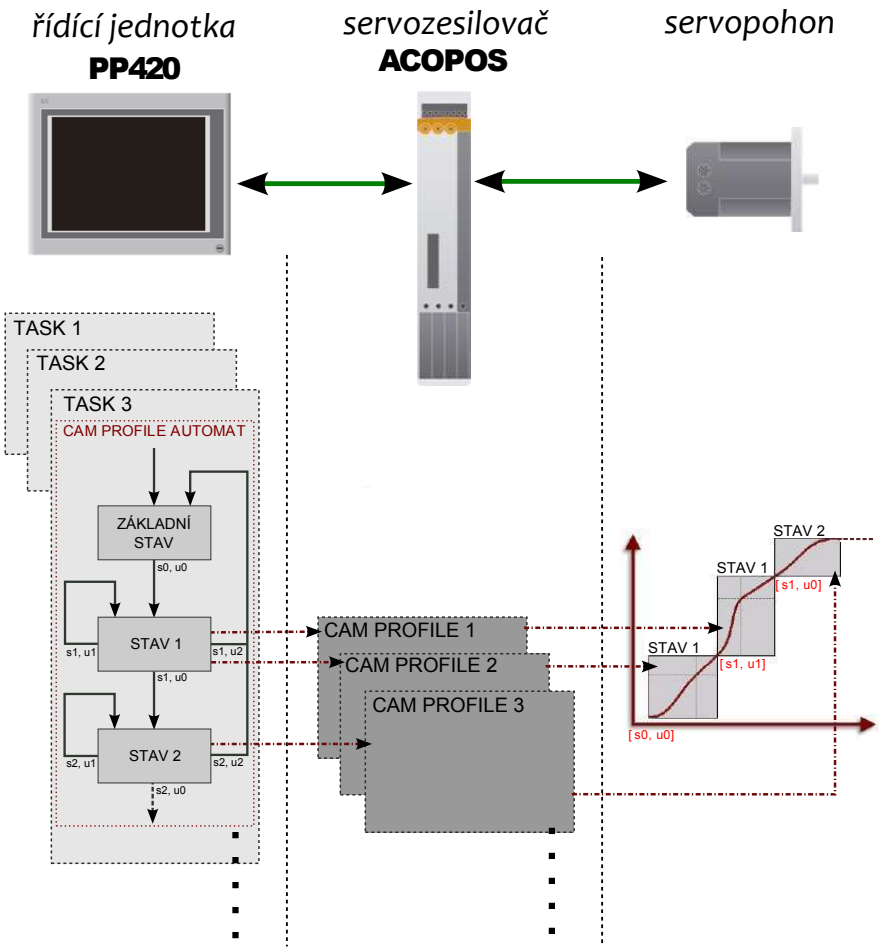
K nastavování polohy se v průmyslové automatizaci využívá velmi mnoho systémů a softwarových řešení. Obecně vačka ve strojích zajišťuje transformaci jednoho pohybu na druhý. Asi nejznámějším využitím *mechanických vaček* je ovládání pohybu ventilů ve čtyřdobém spalovacím motoru. Nevýhodou je však velmi komplikovaný mechanický systém, který se ne příliš snadno počítá. Důležité je si uvědomit také neflexibilitu takového systému, protože při změně uspořádání je nutné pro každý mechanismus stroje vyrobit nový vačkový kotouč.

2.3.2.1 Charakteristika elektronické vačky

V případech, kdy není stroj, využívající vaček, používán jako jednoúčelový, ale je od něj žádaná flexibilita a nasazení pro více aplikací, je nutná možnost okamžité změny vačkového profilu. K tomuto účelu byla vyvinuta tzv. *elektronická vačka*, která funguje jako soubor dat uložený v paměti řídicího obvodu, popisující závislost polohy, rychlosti a zrychlení na čase. Při stále zvyšujících se výkonech řídicích jednotek regulátorů je možné převést koordinaci pohybu pohonů z nadřazených řídících zařízení právě na regulátor pohonu.

Servozesilovače Acopos firmy B&R podporují možnosti softwarového řízení pomocí speciálních řídicích příkazů tzv. *NC-akcí*, řízení pomocí funkčních bloků mezinárodního standardu polohového řízení *PLCopen MC* využívající řízení **vačkovými automaty** (CAM profile automat), které používají **vačkových profilů** (CAM profile) realizujících kinematiku řízených os stroje pomocí uživatelem definovaných křivek polohy, rychlosti a zrychlení.

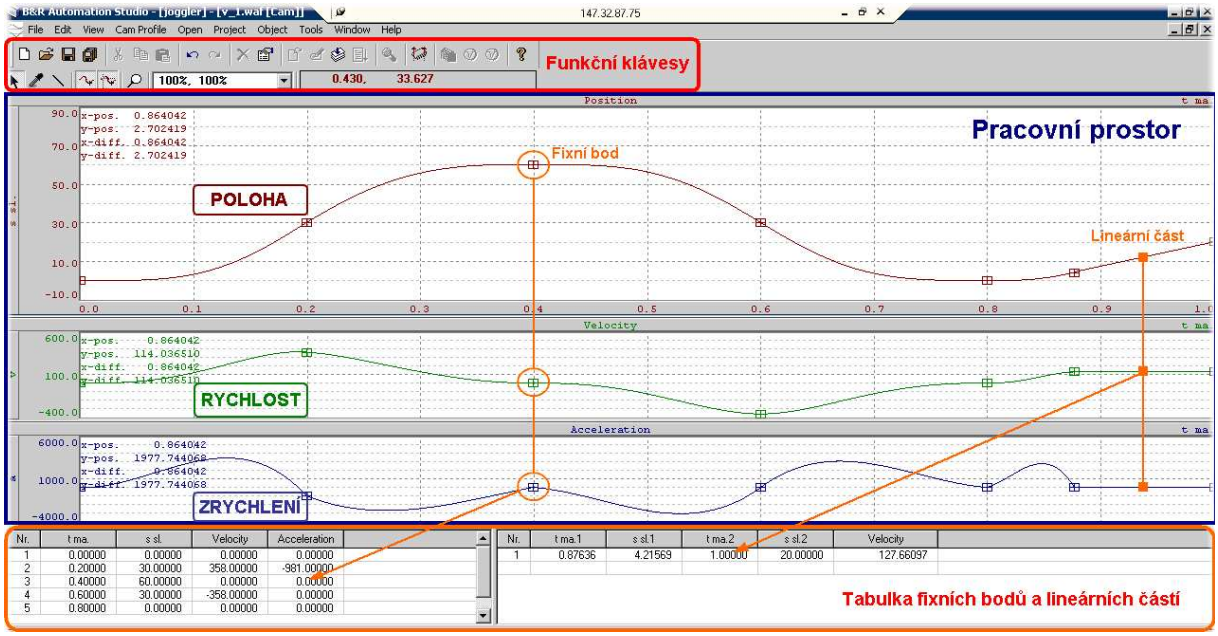
Vačkový automat je sekvenční automat, který lze libovolně nastavovat. Umožňuje elektronicky spojit několik vačkových profilů podle stavu, ve kterém se automat nachází. Vzájemné závislosti mezi osami se definují pomocí vhodně volených polynomů, neboli vačkových profilů. Princip, jakým jsou vačkové profily na základě stavu vačkového automatu řazeny je zřejmý z obr. 2.14.



Obrázek 2.14: Princip přepínání vačkových profilů vačkovým automatem

2.3.2.2 Návrhové prostředí

Podporou k návrhu vačkových profilů z připravených dat a zavedení projektu do provozu zajišťuje tzv. *editor vačky*. Editor vačkových profilů je jednou z komponent Automation Studia společnosti B&R. Editor se skládá z několika funkčních částí patrných z obr. 2.15. Podrobnějším popisem samotného editoru vačky a jeho funkčních částí s jednoduchým návodem pro tvorbu vačkového profilu a popisem potřebných nastavení se zabývám ve své bakalářské práci [4, Editor vačkových profilů].



Obrázek 2.15: Editor vačkových profilů

2.3.2.3 Vačkové profily pro žonglování se čtyřmi koulemi

Jak již víme, tak vzájemné závislosti mezi osami stroje se definují pomocí vhodně volených vačkových profilů, skládajících se z tzv. fixních bodů, které jsou prokládány polynomy libovolného stupně (v praxi nejčastěji pátého a šestého stupně). Nastavení správné aproximace mezi dvěma nebo více fixními body může v řadě případů zlepšit průběh pohybu na reálném modelu.

Souřadnice fixních bodů pro vyhození a chytání koule mají následující tvar:

Výhoz koule

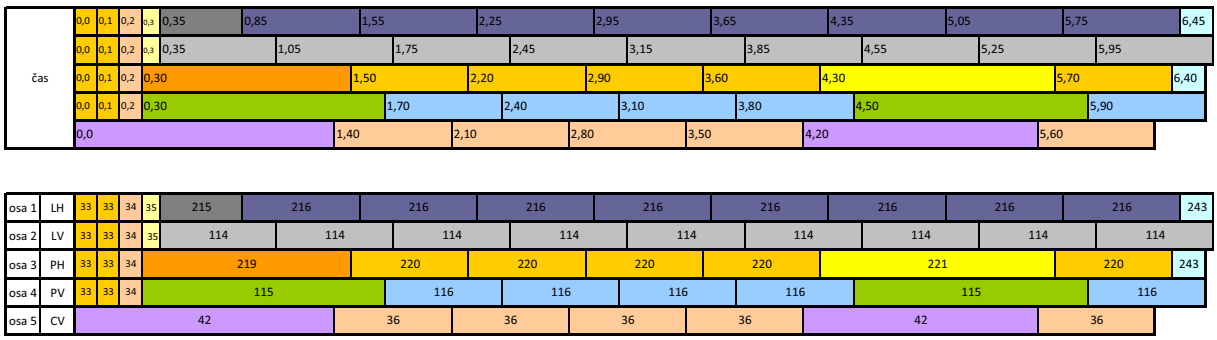
$$\begin{bmatrix} (s_x = s_{x_{vyhozu}}, & s_y = s_{y_{vyhozu}}) \\ (v_x = v_{x_{vyhozu}}, & v_y = v_{y_{vyhozu}}) \\ (a_x = 0, & a_y = -9{,}81\ ) \\ & (\ t\ ) \end{bmatrix}$$

Dopad koule

$$\begin{bmatrix} (s_x = s_{x_{dopadu}}, & s_y = s_{y_{dopadu}}) \\ (v_x = v_{x_{dopadu}}, & v_y = v_{y_{dopadu}}) \\ (a_x = 0, & a_y = -9{,}81\ ) \\ & (\ t\ ) \end{bmatrix}$$

K dispozici již máme napočítané parametry žonglování nutné ke stanovení souřadnic všech fixních bodů, proto je možné navrhnout vačkové profily pro pohyby vertikálních a horizontálních os stroje. Před vytvářením vačkových profilů je vhodné nakreslit si jednoduchý přechodový diagram vystihující pohyb jednotlivých koulí v cyklu žonglování.

Protože proces žonglování se čtyřmi koulemi není periodický, neboť potřebujeme zajistit nahazování koulí na počátku, respektive v průběhu cyklu žonglování, tak bylo vytvořeno více vačkových profilů, které se vhodným způsobem sestavují do požadované sekvence prostřednictvím již výše zmíněného vačkového automatu. Tímto postupem lze dosáhnout kontinuálního chodu procesu žonglování se čtyřmi koulemi. Sekvence řazení vačkových profilů pro jednotlivé osy viz. obr. 2.16. Značení a popis vačkových profilů používaných v projektu jsou uvedeny v příloze C.



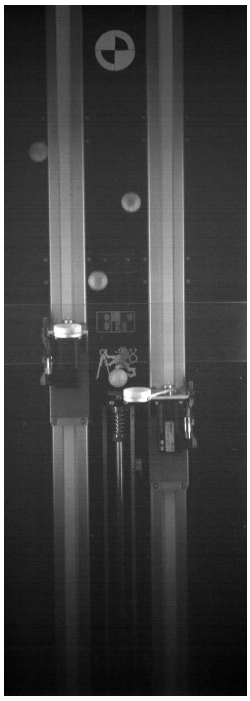
Obrázek 2.16: Sekvence řazení vaček a časové rozvržení

Cyklus žonglování klade vysoké nároky na přesnost synchronizace jednotlivých os. Synchronizace jednotlivých os vykonávajících průběhy příslušných vačkových profilů je realizována konstrukcí master - slave osa. V případě modelu „žongléra“ tvoří master osu osa virtuální a slave osy, sledující pohyb nadřazené master osy, jsou reálné osy stroje. Více o možnostech vazbení virtuálních a reálných os a konstrukci master - slave viz. [4].

2.3.2.4 Přizpůsobení vačkových profilů

Nároky kladené na přesnost vyhazování a chytání koulí jsou při procesu žonglování obrovské, protože koule má velice krátký čas na ustálení svého pohybu mezi chycením a samotným výhozem koule. Pád koule je způsoben i minimální odchylkou v trajektorii letu koule, respektive v její minimální časové nepřesnosti, kdy osy stroje při takto vysokých rychlostech urazí značnou vzdálenost. Tyto odchylky vznikají při návrhu kinematiky pro přehazování koulí a při samotném chodu stroje, jehož motory sledují trajektorii vačky s malou, avšak nezanedbatelnou odchylkou. Odchylka je závislá na nastavení regulátoru pohonu. Jsou voleny takové konstanty regulátoru, které zajistí kompromis mezi přesností výhozu a rozkmitem při sledování referenční hodnoty, kterou definuje vačkový profil. Tyto chyby však nejsou náhodné, čili je možná jejich kompenzace ručním doladěním vačkových profilů.

Z navrhnutých vaček pro vertikální směr pohybu je patrné, že při rychlostech pohybu os stroje přesahujících rychlost $5\,m/s$ bude možné kompenzovat nepřesnosti pouze na základě přímého pozorování. Celý cyklus žonglování je vhodné zpomalit, k čemuž byla použita průmyslová kamera schopná vytvořit cca 100 snímků/s. Ze záběrů pořízených touto kamerou je již možné určit nepřesnosti a příslušné vačkové profily přizpůsobit. Ukázka snímku z průmyslové kamery je na obr. 2.17.



Obrázek 2.17: Snímek z průmyslové kamery

Kapitola 3

Řízení CNC stroje

3.1 Úvod do CNC problematiky

Pojem CNC se vztahuje k velké skupině strojů, které používají počítačovou logiku pro řízení pohybů několika os viz. definice 3.1. Pozice os jsou určeny volně programovatelnou dráhou v rovině (2D) nebo prostoru (3D). Číslicově řízené výrobní stroje jsou charakteristické tím, že ovládání jejich pracovních funkcí je prováděno řídícím systémem na základě vytvořeného *CNC programu*. Pro názornost je na obr. 3.1 ukázán portálový pálící CNC stroj firmy Vanad.

Definice 3.1 (CNC - Computer Numerical Control): Počítačem číslicově řízený stroj s volně programovatelnou trajektorií pohybu. ►

Na rozdíl od ručního řízení stroje není CNC stroj ovlivňován nepřesnostmi, které do výrobního procesu vnáší obsluha stroje. Běh NC stroje je automatický a zasahování obsluhy do procesu výroby je omezeno na minimum, což se projevuje v časové náročnosti jednotlivých úkonů i jakosti výroby.

CNC řízení se uplatňuje téměř ve všech oblastech strojírenské výroby, nejčastěji pro:

- obráběcí stroje
- rýsovací stroje
- tvářecí stroje
- manipulační techniku

Kromě těchto oblastí je CNC řízení rozšířeno i na vypalovací stroje, stroje pro svařování a vrtání, montážní stroje, stroje pro kontrolu vad materiálu apod.

Obrázek 3.1: Pálící a řezací CNC stroj firmy Vanad

Výhody použití CNC:

- zvýšení kvality i kvantity výrobků
- zlepšení pracovních podmínek, zvýšení úrovně řídící práce
- zkrácení průběžné doby výroby

Nevýhody použití CNC:

- vysoká pořizovací cena
- vyšší nároky na technologickou přípravu
- zvýšené nároky na údržbu a organizaci pracoviště

3.1.1 Hlavní části CNC stroje

Základní a důležitou částí všech číslicově řízených obráběcích strojů tvoří **lože** nebo **rám stroje**. Hlavními požadavky na konstrukci lože jsou vysoká tuhost, schopnost přenášet všechny zatěžující síly s minimální deformací, dobrá schopnost tlumit chvění, jednoduchost a snadná údržba, dobrý odvod odpadního materiálu, tepla atd. Lože je nejčastěji vyrobeno z litiny nebo konstrukční oceli, které se vyznačují výše uvedenými vlastnostmi.

Neméně důležitou částí CNC jsou jeho **pohony** jednotlivých řízených os. Pohon posuvu řízené osy CNC převádí příkazy od regulátoru pohonu na pohyb nástroje nebo obrobku. Obecně posuvový motor (např. servomotor) přenáší buď přímo nebo přes ozubený řemen kroutící moment na typ převodu, který převádí otáčivý pohyb na přímočarý (např. šroubový převod tvořený kuličkovým šroubem a maticí). Pro většinu aplikací se používají pohony elektrické, hydraulické, případně pneumatické. V současnosti se používají nejvíce elektrické střídavé pohony, ale dochází také k stále většímu použití stejnosměrných krokových motorů.

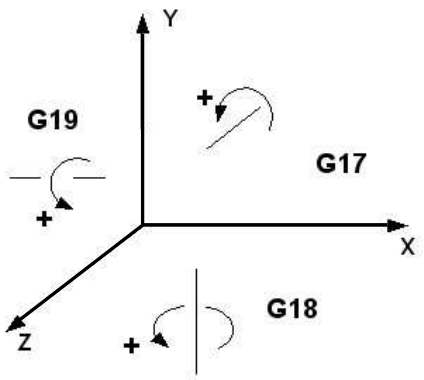
3.1.2 Souřadný systém CNC stroje

Pro popis pracovních pohybů nosiče nástroje v pracovním prostoru je nutno definovat souřadný systém stroje a souřadný systém obrobku a vztah mezi těmito souřadnými systémy. Pro zjednodušení programování je nutné, aby označování jednotlivých souřadných os souřadných systémů obráběcích strojů různých výrobců bylo stejné. Základní používanou souřadnou soustavou je tzv. soustava pravoúhlá pravotočivá (systém „pravé ruky“). Podle pravidla pravé ruky směřuje kladná osa X ve směru palce, ukazovák ukazuje kladný směr osy Y a ohnutý prostředník kladný směr osy Z. Natočení kolem souřadných os X, Y, Z označujeme adresami A, B, C, přičemž kladný smysl natočení se řídí podle pravidla „pravotočivého šroubu“.

- vždy musí být definována osa X
- osa X leží v upínací rovině obrobku nebo je s ní rovnoběžná
- osa Z je totožná nebo rovnoběžná s osou pracovního vřetena
- kladný smysl lineárních os je od obrobku k nástroji

O CNC řízení se mluví při pohybech maximálně v prostoru označovaného jako **2 1/2 D** viz. obr. 3.2. V takto definovaném prostoru dvě osy definují pracovní rovinu, zatímco třetí osa udává ofset nebo vrstvu roviny. Dvě osy, které definují rovinu, mohou být interpolovány současně. Třetí osa nejprve zaujme polohu udávající vrstvu nebo ofset.

Vzájemná interpolace tří os X, Y, Z (prostor **3D**) je považována již za robotický pohyb.



Obrázek 3.2: Kartézský souřadnicový systému - 2 1/2 D

3.1.3 Základní body CNC stroje

Kromě základního souřadného systému je nutno v pracovním prostoru CNC stroje definovat tzv. vztažné body, s jejichž pomocí se definuje vzájemná poloha stoje, nástroje a obráběného materiálu.

3.1.3.1 Nulový bod stroje

Je daný počátkem souřadnicového systému stroje a jeho pevné umístění je zadáno výrobcem v dokumentaci stroje a je na něj seřízen měřící systém stroje jako na nulový bod stroje.

3.1.3.2 Referenční bod

Druhý v pořadí, výrobcem pevně stanovený a pro ustavení měřící části CNC systému stroje velmi důležitý bod, který definuje základní polohu suportu nebo vřetene na stroji. Před zahájením nebo po přerušení práce je stroj přestaven do svého referenčního bodu.

3.1.3.3 Základní bod nástroje

Jedná se o bod, od kterého řídící systém odměřuje pohyb nástroje v příslušné ose a připočítává k němu základní rozměry a korekce nástrojů.

3.1.3.4 Nulový bod materiálu

Je základním bodem souřadnicového osového systému, který je možné naprosto volně měnit podle potřeby. Od tohoto bodu jsou počítány rozměry materiálu a přepočítány zadané souřadnice pro jednotlivé pohyby os.

3.1.3.5 Výchozí bod programu

Označujeme jím místo počátku CNC programů. U většiny programů je totožný s nulovým bodem materiálu.

3.1.4 Způsoby odměřování polohy na CNC stroji

Odměřovací zařízení, která jsou použita pro CNC stroje slouží k odměřování dráhy vykonané řídícím členem a do značné míry ovlivňují přesnost takovéhoto CNC stroje.

Způsoby odměřování dělíme podle umístění snímače polohy na CNC stroji na:

- **přímé** - odměřovací zařízení je umístěno přímo na pohybujících se uzlech stroje např. suportu, stolu. Přímé odměřování se vyznačuje větší přesností, protože závisí jen na přesnosti snímání z měřítka. Přímé odměřování se používá u velmi přesných strojů, zejména u souřadnicových vrtaček, vyvrtávaček a u některých obráběcích center, které mají vyšší pořizovací cenu.

- **nepřímé** - odměřovací zařízení je snímač polohy umístěný na posuvovém kuličkovém šroubu, a to buď přímo, nebo pomocí převodu. Dráha pohybové části stroje se odměřuje nepřímo a závisí na pootočení kuličkového šroubu nebo jeho převodu. V současné době se při použití servopohonů využívá přímého měření ujeté vzdálenosti uvnitř pohonů pomocí *enkodérů* různých typů např. EnDat (absolutní rotační snímač polohy). Údaje o poloze jsou předávány datovým kabelem do regulátoru pohonu. Nevýhodou nepřímého způsobu odměřování je , že nepřesnosti pohonu, kuličkového šroubu, převodu i vlivy silových účinků na snímač polohy se přenáší do vlastního měření. Tento způsob je rozšířený pro svoji jednoduchost a cenu.

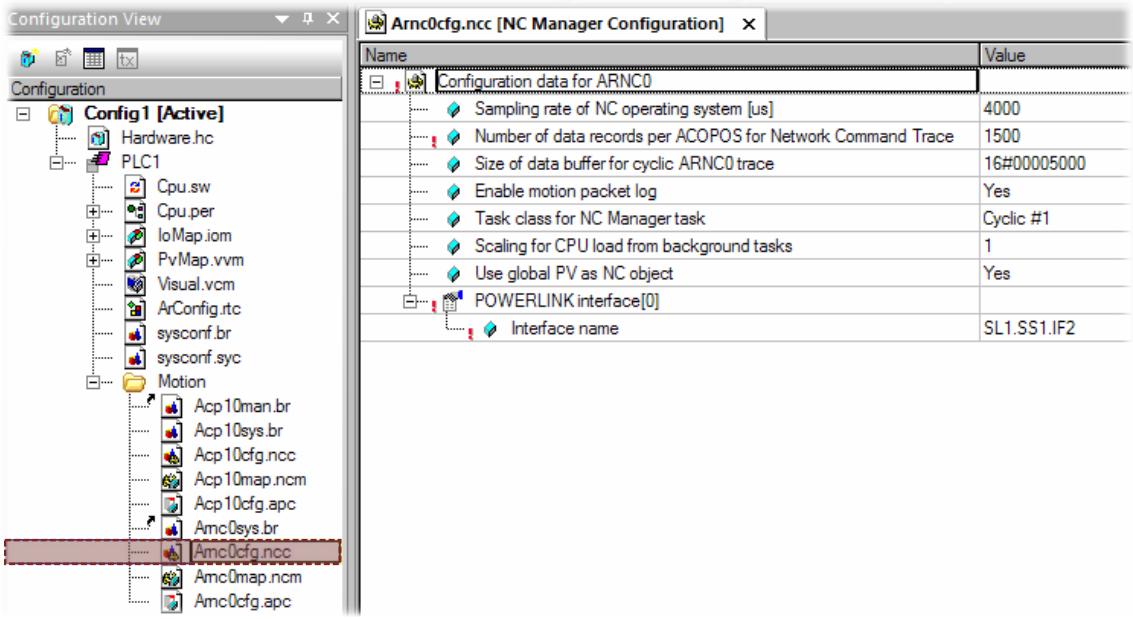
Poznámka: V dalších částech této práce bude uvažován koncept CNC řízení společnosti B&R. □

3.1.5 Softwarový koncept CNC

Pro vytvoření CNC aplikace potřebujeme mít k dispozici:

- **minimálně dvě osy**
- **CNC systém**
- **CNC program**

V prostředí Automation Studia se využívá k definování datových typů a funkcí pro CNC systém a polohování os *knihovna* ***ARNC0*** (Automation Runtime Numeric Control 0). Součástí knihovny je také **ARNC0 Manager**, který pracuje s objekty os, s objektem CNC systému a zajišťuje mezi nimi komunikaci. Dále řídí komunikaci mezi řídícím PLC a pohony. ARNC0 Manager musí být vždy umístěn v cyklické třídě Cyclic #1. Nastavení NC Managera viz. .

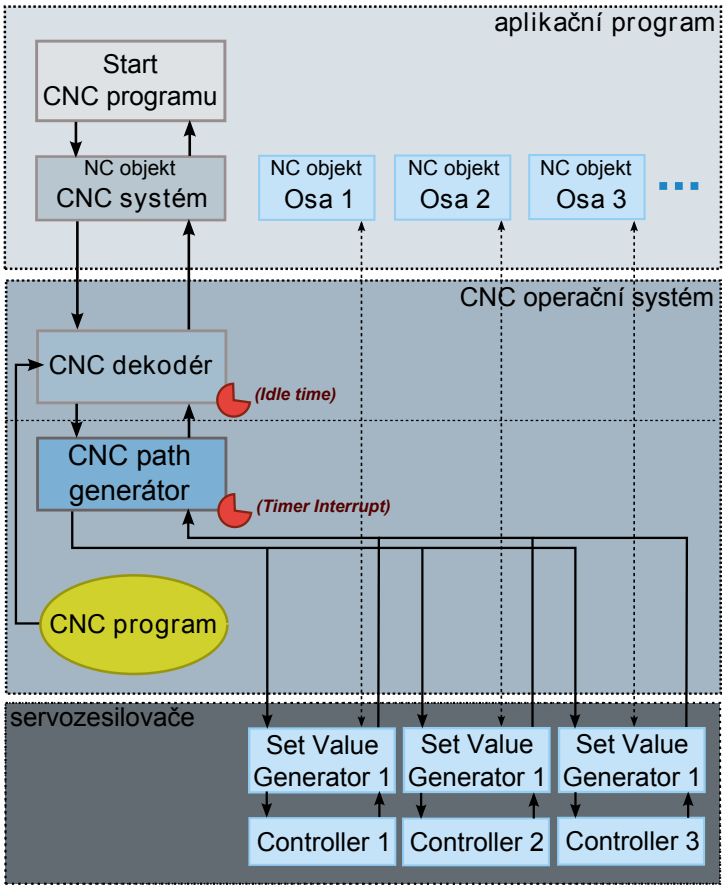


Obrázek 3.3: Nastavení NC Managera

Pro vysvětlení softwarového konceptu CNC, se kterým přichází společnost B&R, se nejlépe hodí blokový diagram uvedený na obr. 3.4.

Koncept CNC je tvořen ze dvou částí, **aplikačním programem** vytvořeným pro konkrétní aplikaci, který v sobě zahrnuje deklaraci tzv. NC objektů, jimiž jsou objekty CNC systému a NC os. NC objekty mají podobu struktury, která obsahuje informace o parametrech a nastaveních vztahujících se k danému objektu.

Druhou částí je pak **CNC operační systém**, který zpracovává CNC program a pracuje s výše uvedenými NC objekty CNC systému a NC os.



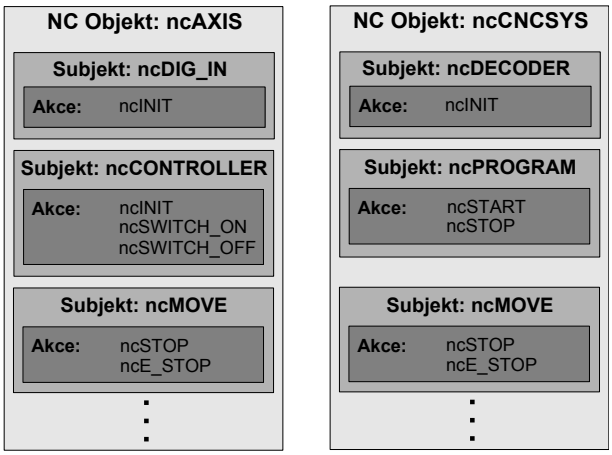
Obrázek 3.4: Softwarový koncept CNC podle B&R

3.1.5.1 NC objekty

NC software společnosti B&R je objektově orientovaný, takže je možné vytvářet aplikace v jednoduché a jasné formě. Tím se minimalizuje čas potřebný pro vývoj aplikace a zvyšuje se možnost dalšího použití.

Pro potřeby CNC se je třeba zmínit o NC objektech typu **CNC systém** - ncCNCSYS a **NC os** - ncAXIS definované knihovnou ARNC0, která pro každý objekt definuje několik *datových typů*.

Struktura datového typu slouží jako zdroj konkrétních informací o NC objektu. NC objekt je možné ovládat prostřednictvím tzv. *NC-akcí*. Pro názornost jsou uvedeny konkrétní vazby uvnitř CNC objektů na obr. 3.5.



Obrázek 3.5: Hiearchické uspořádání uvnitř NC objektů

- **CNC systém** - Ze softwarového konceptu CNC je zřejmé, že důležitou funkcí CNC systému je obousměrná komunikace s CNC dekodérem.

  Kromě jiného ve své struktuře obsahuje nastavitelné položky (subjekty) jako např. limitní parametry CNC systému, parametry inicializačního a právě spuštěného NC programu, typ jednotlivých os příslušného souřadnicového systému CNC (viz. obr. 3.6) a další.

  CNC systém přiřazuje osám, které řídí, jejich typ. Je možné vybrat z několika možností:

  ⇒ *ncCNC* - jedná se o osy kartézského souřadnicového systému, které definují pracovní plochu (obvykle X, Y, Z). V kartézském souřadnicovém systému jsou na sebe všechny souřadnice kolmé.

  ⇒ *ncLINEAR* - jedná se o další lineární osu, která je mimo kartézský souřadnicový systém a způsobuje zastavení na přechodu mezi částmi trajektorie. Používá se jako doplňující osa, např. jako přídržná osa.

  ⇒ *ncTANGENT* - jedná se obvykle o rotační osu, která je kolmá k pracovní rovině. Orientace tangenciální osy je závislá na směru vykonávané trajektorie. Chování osy na přechodu je závislé na dalších parametrech. Příkladem použití může být natočení nože při řezání.

⇒ *ncROTARY* - jedná se o rotační osu, jejíž jednotky jsou v CNC programu zadávány ve stupních. Příkladem použití je držák materiálu otáčející se kolem své osy.

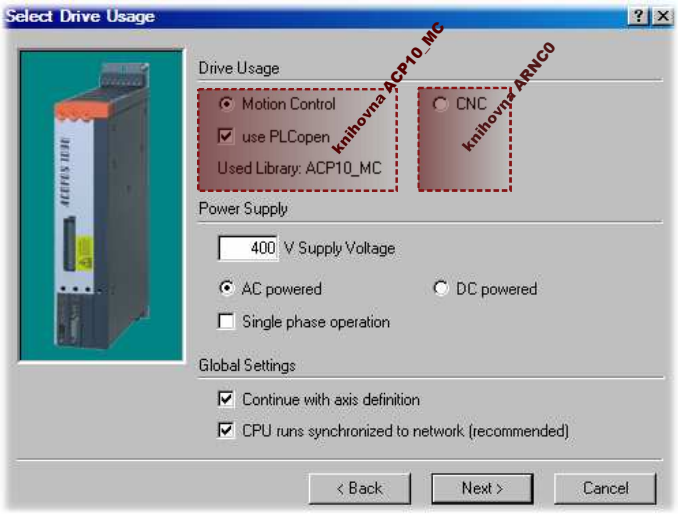
⇒ *a další.*

ARNC0CNC_typ			
limit			Limit value
move			Movement
decoder			Decoder
axis			NC-axis
axis[0]			NC-axis
nc_object_name	vx_obj		NC object name
name	X		Name of the axis in the NC programm
type	ncCNC		Type
unitfactor	100.0		Multiplication factor of the units
t_axfilter	0.06	s	Time of filter for axis jolt
rot_period	360.0		Period of rotary axis
rot_offset	0.0		Start of period for rotary axis
axis[1]			NC-axis
nc_object_name	vy_obj		NC object name
name	Y		Name of the axis in the NC programm
type	ncCNC		Type
unitfactor	100.0		Multiplication factor of the units
t_axfilter	0.06	s	Time of filter for axis jolt
rot_period	360.0		Period of rotary axis
rot_offset	0.0		Start of period for rotary axis

Obrázek 3.6: Nastavení parametrů CNC systému

V jedné aplikaci je možné spustit několik nezávislých CNC systémů.

- **NC osy** - obecně lze použít ve spojení s CNC systémem (z knihovny ARNC0) dvou typů os, viz.obr. 3.7. První možností je použití os, které definuje knihovna ARNC0, druhou možností je využití os, které definuje knihovna ACP10, umožňující ovládání os pomocí mezinárodního standardu *PLCopen Motion Control Library.*



Obrázek 3.7: Výběr typu osy pro CNC

Celá specifikace standardu PLCopen tvoří vlastní knihovnu funkčních bloků pro ovládání a řízení jedné a více os. Tuto knihovnu funkcí PLCopen (acp10_mc) je před použitím zapotřebí vložit do seznamu knihoven.

Acp10map.ncm [NC Mapping]

NC Object Name	Module Address	Nc Object T...	Channel	NC INIT Parameter	ACOPOS Parameter	Additional Data
gAxis01	SL1.SS1.IF2.ST1	ncAXIS	1	gaxis01i	gaxis01a	CNC_Enabled="1"
SL1.SS1.IF2.ST1.VAxis1	SL1.SS1.IF2.ST1	ncV_AXIS	1			
gAxis02	SL1.SS1.IF2.ST2	ncAXIS	1	gaxis02i	gaxis02a	CNC_Enabled="1"
SL1.SS1.IF2.ST2.VAxis1	SL1.SS1.IF2.ST2	ncV_AXIS	1			

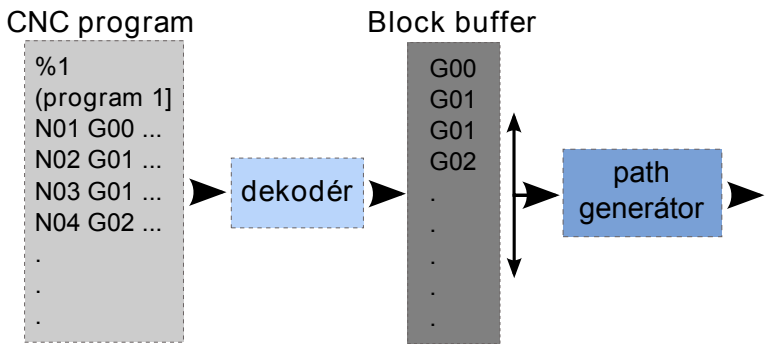
Obrázek 3.8: Aktivování os z knihovny ACP10 pro CNC systém

Při použití PLCopen os v CNC systému je nutné vyplnit v mapovací tabulce os (mapping table) sekci *Additional data* viz. obr. 3.8.

3.1.5.2 CNC dekodér

CNC dokodér slouží k překladu (interpretaci) CNC programu do příkazů pro *CNC path generátor*. Jednotlivé příkazy v podobě bloků jsou zapisovány do *block bufferu*, ze kterého může CNC path generátor číst dopředu i zpětně. Princip zpracování programu viz.obr. 3.9.

Velikost block bufferu je definována v CNC systému v datovém typu ARNC0CNC_typ, element **limit**. Konfigurace block bufferu je důležitá vzhledem ke správné funkci dekódování CNC programu. Kromě jiného je třeba definovat maximální počet bloků, které dekodér dekóduje předtím, než je path generátor začne číst (Lookahead), a počet uložených bloků v block bufferu před započetím samotného pohybu (Elements).



Obrázek 3.9: Dekodér - path generátor

Dekódování některých NC bloků může probíhat vícekrát, např. při použití smyček nebo podprogramů.

Některé hodnoty externích parametrů, jako např. R, P a EX, jsou zohledněny během dekódování (dekodér - synchronní). Pozdější změna uvedených parametrů nemá žádný vliv na dekódované NC bloky. Parametry mohou být synchronně čteny nebo zapisovány pouze pomocí G-funkce G170 (decoder synchronization).

Některé parametry však zohledněny během dekódování nejsou. Jsou zohledněny, když CNC path generátor dosáhne odpovídající pozice v NC programu.

3.1.5.3 CNC path generátor

Jak název napovídá, tak CNC path generátor slouží ke generování trajektorie jednotlivých os systému. V každém cyklu CNC systému (Timer Interrupt) je servozesilovači každé osy posílána informace o požadované poloze a rychlosti.

3.1.6 CNC program

Při číslicově řízeném obrábění je program výroby součásti zadán stroji ve formě čísel, alfabetických znaků a dalších symbolů ve zvoleném kódu.

CNC program je ohraničená posloupnost oddělených skupin znaků, kterým říkáme **bloky** sestávající se ze **slov**.

V každém programu jsou uvedeny zpravidla dva druhy informací:

- **geometrické** - definují tvar opisované trajektorie
- **technologické** - informace o technologii

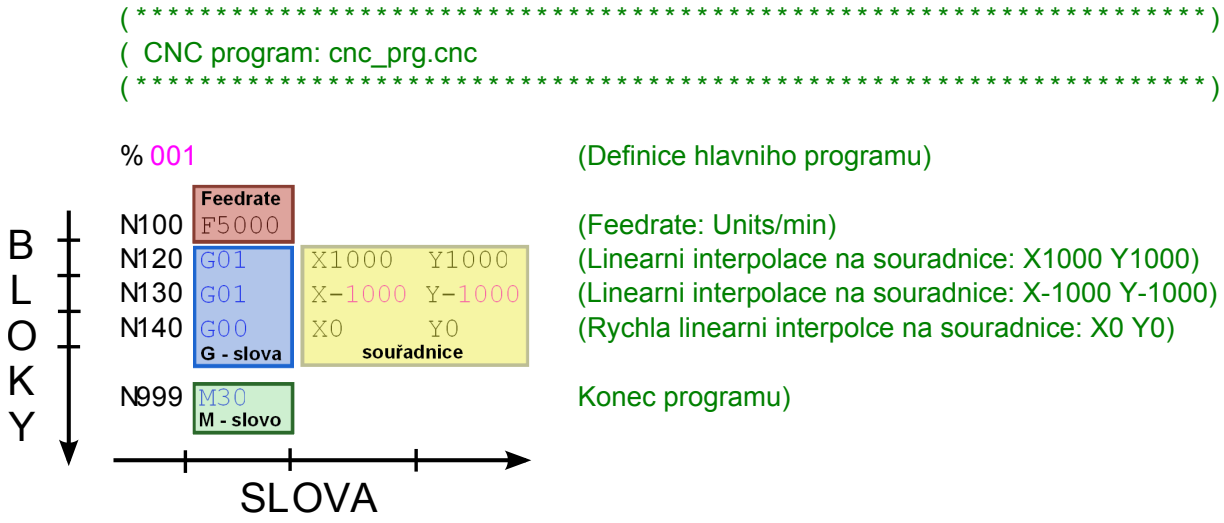
3.1.6.1 Struktura CNC programu

Jak již bylo řečeno, program se skládá z jednoho či více bloků a bloky obsahují jedno či více slov. Jednotlivá slova jsou adresy registrů následované jejich hodnotami. CNC program je textový soubor v ASCII formátu. Ukázka CNC programu je na obr. 3.10.

Základní set slov a jejich možné kombinace v bloku je specifikováno v DIN 66025/ISO 6983.

Začátek bloku obvykle začíná číslem **N**xxxx. Tento údaj je však nepovinný a slouží pouze k lepší orientaci v CNC programu. Číslování nemá žádný vliv na pořadí vykonávání bloků.

CNC program je vykonáván postupně, jeden blok po druhém. Slova jsou vykonávána ve zvláštním pořadí (např. **M**-slova před **G**-slovy) a nezáleží na jejich pozici uvnitř bloku.



Obrázek 3.10: Struktura CNC programu

3.1.6.2 Feedrate F

Toto slovo CNC programu určuje rychlost pohybu po trajektorii. Využívá se např. při lineární interpolaci dvou bodů v pracovní rovině. Její hodnota je dána rovnicí (3.1). Z rovnice je patrné, že Feedrate je dána pouze rychlostmi jednotlivých CNC os kartézského souřadného systému.

Maximálně hodnota Feedrate je omezena v limitních parametrech CNC systému.

$$F = \sqrt{v_x^2 + v_y^2 + v_z^2} \qquad [F] = units/min \tag{3.1}$$

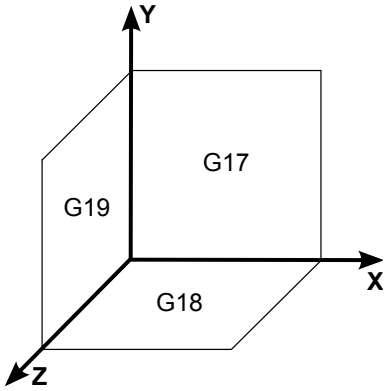
3.1.6.3 G - funkce

Jedná se o přednastavené funkce, které určují způsob generování trajektorie pro jednotlivé osy. V CNC programu jsou jednotlivé G-funkce (G00, G02, atd.) definovány pomocí již známých G-slov viz. obr. 3.10.

V této práci bude uvedeno pouze několik nejpoužívanější G-funkcí, podrobný popis viz. [1].

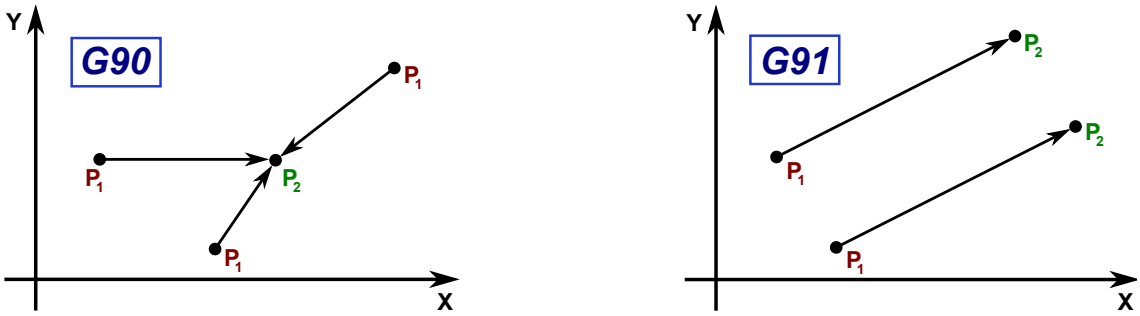
- **G00** Rychlá lineární interpolace - vypočítává nejkratší cestu k cílovému bodu nejvyšší možnou rychlostí danou limity os.

- **G01** Lineární interpolace - vypočítává nejkratší cestu k cílovému bodu s tím, že dodržuje požadovanou *Feedrate F* definující rychlost na trajektorii.
- **G17, G18, G19** Výběr pracovní roviny - viz. obr. 3.11



Obrázek 3.11: Výběr pracovní roviny

- **G90 G91** Volba absolutních / relativních souřadnic - viz. obr. 3.12

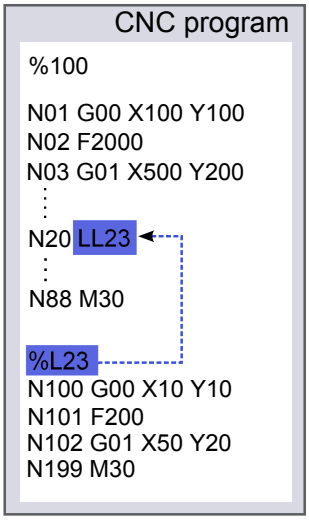


Obrázek 3.12: Volba absolutních nebo relativních souřadnic

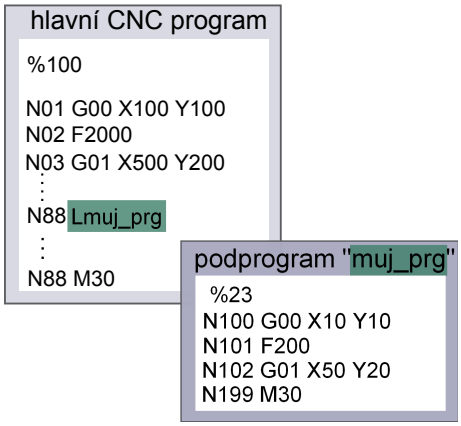
3.1.6.4 Podprogramy

V CNC programu je možné spouštět také podprogramy:

- **LOKÁLNÍ** - podprogram je součástí hlavního CNC programu viz. obr. 3.13. Podprogram se definuje pomocí konstrukce **L**<*název_podprogramu*>. Volání podprogramu se provádí pomocí konstrukce **LL**<*číslo_podprogramu*>.
- **GLOBÁLNÍ** - podprogram je spouštěn z externího CNC programu do hlavního CNC programu voláním konstrukce **L**<*název_podprogramu*> viz. obr. 3.14.



Obrázek 3.13: Volání lokálního podprogramu



Obrázek 3.14: Volání globálního podprogramu

3.1.6.5 Externí parametry

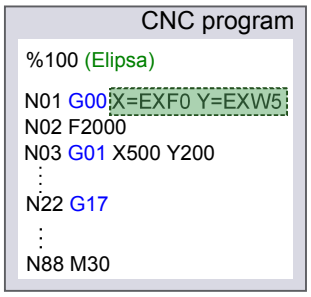
Externí parametry jsou umístěné ve sdílené paměti PLC a CNC systémem a jsou z ní plně dostupné. Pomocí externích parametrů tedy dochází k výměně informací mazi PLC a CNC systémem. Může se například jednat o data dané technologie, které zadává operátor do PLC a ty jsou dále předána do NC programu.

Přístup k externích parametrů je následující:

- **z CNC systému - EX**<*datový typ*><*index*>=<*hodnota*>
- **z PLC** - pomocí dynamické proměnné datového typu ARNC0EXPAR_typ

  ex_param.EXB[<*index*>]=<*hodnota*>

Lze použít až 100 (index 0 až 99) externích parametrů pro každý datový typ (např. INT16 - **W**ord, INT32 - **L**ong, FLOAT - **F**loat, atd.)



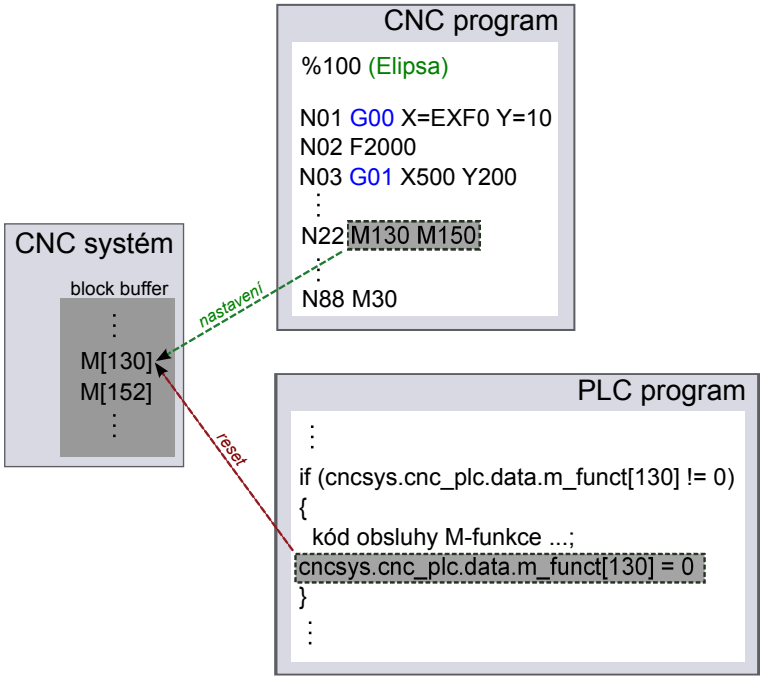
Obrázek 3.15: Externí parametry v CNC programu

3.1.6.6 M - funkce

M-funkce se používají stejně jako externí parametry ke komunikaci mezi systémem CNC a PLC. Jejich funkce je však jiná, než tomu je u externích parametrů. M-funkce jsou volány v případech, kdy technologie vyžaduje zásah, který nelze řídit prostřednictví CNC systému a je tedy proveden pomocí PLC programu:

- **Synchronizace s externím zařízením** - např. obsluha upínacího zařízení, obsluha svářecí hlavy, atd.
- **Automatická výměna nástroje**
- **Automatická výměna materiálu**
- **Synchronizace s jinými CNC kanály**

Pokud je M-funkce dosaženo při zpracování NC programu, tak se nastaví příslušný BYTE v uživatelských datech CNC systému (cncsys_dat.cnc_plc.data.m_funct[i]) na hodnotu 1. Aktivovaná M-funkce je odchycena PLC programem a je na ni příslušnou částí kódu v PLC programu reagováno. Po vykonání této části kódu dochází k potvrzení ukončení M-funkce jejím nastavením do 0. Princip synchronizace PLC a CNC je naznačen na obr. 3.16.



Obrázek 3.16: Synchronizace CNC a PLC

M-funkce dělíme podle toho, jak ovlivňují běh NC programu na:

- **Synchronní M-funkce** - vykonávání NC programu je pozastaveno do té doby, než dojde k nastavení M-funkce do 0 (reset M-funkce), dekódování NC programu však pokračuje dále. Příkladem může být roztočení vrtací hlavy, kdy pohyb vrtací hlavy směrem dolů nemůže pokračovat dříve, než vřeteno dosáhne požadovaných otáček.
- **Asynchronní M-funkce** - při použití asynchronních M-funkcí není ovlivněn chod programu, čili se nečeká na reset M-funkce. Příkladem může být sepnutí světelné signalizace stavu stroje, kdy není třeba čekat na dokončení této operace.

Typ M-funkcí je nastaven v CNC systému deklarací indexů pro synchronní a asynchronní M-funkce viz. obr. 3.17.

Všechny M-funkce jsou vždy zpracovány na začátku NC bloku (vyjma M00 and M01) a každá M-funkce je zpracována v jednom cyklu CNC.

Maximálně můžeme deklarovat 1024 M-funkcí s tím, že ihned po sobě může následovat max. 10 bloků v *block bufferu* s M-funkcemi.

V CNC systému je již předpřipraveno několik M-funkcí, mezi které patří např. **M00** - Stop programu, **M30** - Konec programu, atd.

Element	Data Type	Description
...		
cnc_plc		**CNC PLC Data**
parameter		**Parameters**
t_fcn_init	USINT	Initialize T function with CNC RESET: ncOFF / ncON (preset: ncOFF)
s_fcn_init	USINT	Initialize S function with CNC RESET: ncOFF / ncON (preset: ncOFF)
first_M	UINT	Index of first M function without synchronization (preset: 40)
last_M	UINT	Index of last M function without synchronization (preset: 49)
first_MmS	UINT	Index of first M function with synchronization (preset: 50)
last_MmS	UINT	Index of last M function with synchronization (preset: 59)
...		

Synchronní M-funkce

Asynchronní M-funkce

Obrázek 3.17: Nastavení indexů pro synchronní a asynchronní M-funkce

3.1.6.7 Matematické operace

V CNC programu lze používat také matematické operace, mezi které patří *základní operace* (+, -, *, /, MOD, atd.), *geometrické funkce* (SIN[ ], COS[ ], atd.) a *číselné funke* (SQRT[ ], LOG[ ], atd.)

3.1.6.8 Logické konstrukce

Stejně jako při programování v některém z vyšších programovacích jazyků lze v CNC programu využít logických konstrukcí. Mezi logické konstrukce patří:

- Podmínky: =, !=, <, >, >=, <=
- IF - ELSEIF - ELSE - END_IF
- FOR - ENDFOR
- SWITCH - CASE - END_SWITCH
- a další

3.1.6.9 Vytváření CNC programu

V současné době je CNC program ve většině případů generován přímo speciálním softwarem. Konstruktér vytvoří výrobní součást v CAD softwaru a vzniklý soubor je následně přeložen pomocí tzv. CAM softwaru (např. WRykRys) do CNC programu.

Při opakované výrobě je možné jednou vypracovaný CNC program, uložený na přenosném médiu, kdykoliv znovu využít.

3.2 Kyslíkové a plazmové CNC řezací stroje

Se základními znalostmi CNC řízení uvedených výše je možné přejít ke konkrétní aplikaci kyslíkových a plazmových CNC řezacích strojů společnosti Vanad.

Poznámka: Od tohoto místa dále je popisováno konkrétní softwarové a hardwarové řešení kyslíkových a plazmových CNC řezacích strojů společnosti Vanad. Z důvodu podpisu smlouvy o mlčenlivosti nebudou zveřejněny informace, které by mohly odhalit know-how společnosti. □

3.2.1 Typy strojů VANAD

Firma Vanad, spol. s r.o. se sídlem v Golčově Jeníkově byla založena v roce 1994. V roce 2001, v souvislosti s rozvojem firmy, došlo ke změně právní formy a názvu společnosti na **Vanad 2000 a.s.** Firma je výrobcem výkonných CNC strojů moderní konstrukce pro tvarové řezání plechů kyslíkem a nejmodernějšími plazmovými technologiemi současnosti.

V současné době společnost nabízí několik typů strojů lišících se ve velikosti pracovní šířky a délky a ve standardním vybavení stroje. Velkou výhodou strojů Vanad je možnost rozšiřitelnosti základního vybavení stroje o další volitelné vybavení.

Stroje se prodávají pod konkrétními obchodními názvy **ARENA**, **PROXIMA** a **KOMPAKT**.

Pro představu nabízeného vybavení je popsán stroj ***VANAD PROXIMA***.

Jedná se o moderní zařízení používané v širokém spektru aplikací termického dělení materiálu. Stroj je určen pro nasazení technologie kyslíkového řezání, plasmové technologie řezání – konvenčních plasmových zdrojů i nejmodernějších plasmových systémů třídy High Definition a High Performance, doplňkovými technologiemi, používanými v oboru tepelného dělení kovových materiálů a výroby výpalků (navrtávání, značení, popisování).

Standardní vybavení:

- oboustranný pohon portálu
- podélné vyztužené nosníky IPE
- ohebné energetické řetězy
- elektronická regulace výšky hořáků
- a další

Volitelné vybavení:

- značící jednotka – plazmové značení
- značící jednotka – mikroúderová
- značící jednotka – rýsovací jehla
- navrtávací jednotka
- a další

Obrázek 3.18: CNC pálicí stroj VANAD PROXIMA

3.2.2 Obecná koncepce strojů VANAD

Stroj Vanad je **2D** pálicí stroj, který v sobě zahrnuje možnost použití několik typů technologie termického dělení kovů.

1. **Plazma** - u tohoto typu technologie mohou být použity až dva plazmové hořáky na jednom společném suportu. Technologie využívá osy X, Y, Z (plazma 1) a Z2 (plazma 2). Při volbě dvou plazmových hořáků je pohyb druhého suportu v ose Y řešen přes upevnění na lanko k prvnímu suportu, který má vlastní pohon.

2. **Autogen** - v současné době dochází k rozšíření na 8 hořáků, ve skutečnosti použity a testovány jen dva. Použité osy X, Y. Zdvih hořáků ve směru osy Z je řešen stejnosměrnými motory, které jsou řízené PWM. Pohyb v ose Y je řešen přes upevnění na lanko k ose Y, které je tažené pohonem hlavního suportu.

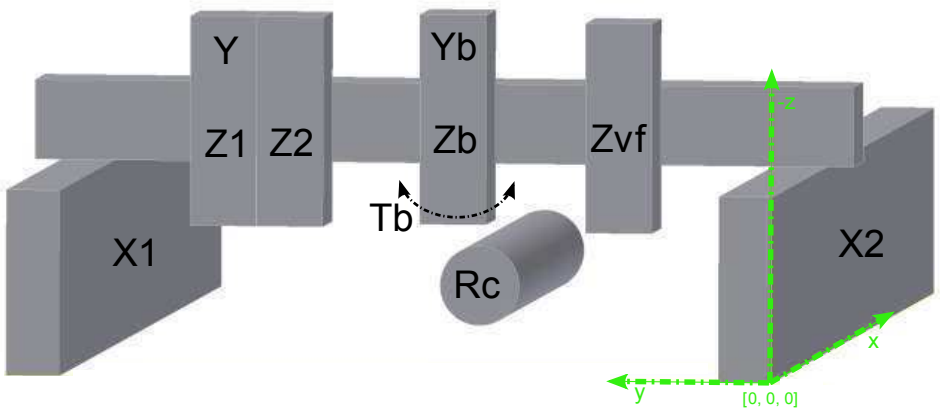
3. **Autogen s tříhořákovou naklápěcí hlavou** - využití automatické tangencionální osy (rotační osa kolmá k pracovní rovině). Použité osy X, Yb, Zb a Tb. Pro pohyb v ose Y se používá vlastní pohon.

4. **Rotátor** - jedná se o jiný režim používané technologie. Místo osy X je použita rotační osa Rc.

5. **Značení** - použity značící nástroje jehla, důlčik, značící plazma, vrtání. Značící nástroje jsou spojeny se suportem plazmy nebo autogenu.

3.2.2.1 Rozvržení os na stroji

Projekt je navržený tak, aby bylo možné na každý stroj instalovat všechny kombinace uvedených technologií. To znamená, že podle požadované konfigurace stroje je stroj vybaven příslušným počtem os a odpovídajícími vstupy a výstupy. Rozvržení a orienatce jednotlivých os stroje viz. obr. 3.19.



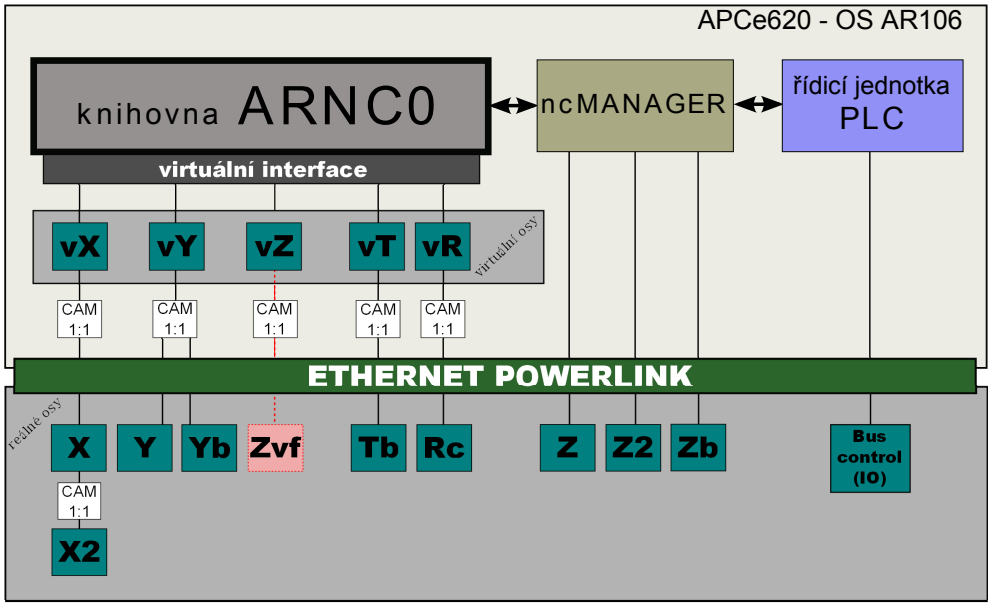
Obrázek 3.19: Rozvržení a orientace hlavních os stroje VANAD

3.2.2.2 Rozvržení os v projektu

Podle zvoleného typu technologie jsou zavazbeny příslušné reálné osy na osy virtuální přes vačkový profil, který převádí pohyb virtuální osy na pohyb osy reálné v poměru 1:1. CNC systém ovládá pohyb virtuálních os. Výhodou tohoto způsobu ovládání reálných

os je možnost rozvazbení osy virtuální a reálné např. při pauze programu, kdy je možné provést úkon mimo pálící plán a poté znovu pokračovat v programu.

Do této chvíle byl v projektu VANAD realizován CNC systém ovládající pohyby v ose X a Y. Pohyby v ose Z jsou řešeny přímo v aplikační části projektu podle typu zvolené technologie. Osu Z tedy nelze ovládat přímo z CNC programu. Rozvržení os v projektu viz. obr. 3.20.



Obrázek 3.20: Rozvržení os v projektu

3.2.3 Hardwarové vybavení

Výše uváděné stroje využívají především hardwarových produktů firmy B&R. K řízení se používá průmyslových PC, konkrétně **APC620** a **APCe620**. Řídící systém ovládá servozesilovače Acopos, které řídí několik typů pohonů. Osy stroje mohou být poháněny synchronními, stejnosměrnými a krokovými pohony. Komunikace mezi zařízeními probíhá přes Ethernet Powerlink, CAN, RS232 a Ethernet.

K ovládání stroje se využívá touch panelu s externí klávesnicí, která je vyrobena speciálně pro ovládání technologie řezání. Stroj může být dále vybaven mobilním operátorským panelem MP50 s 6,5“ displejem, který je také přizpůsoben pro ovládání technologie řezání.

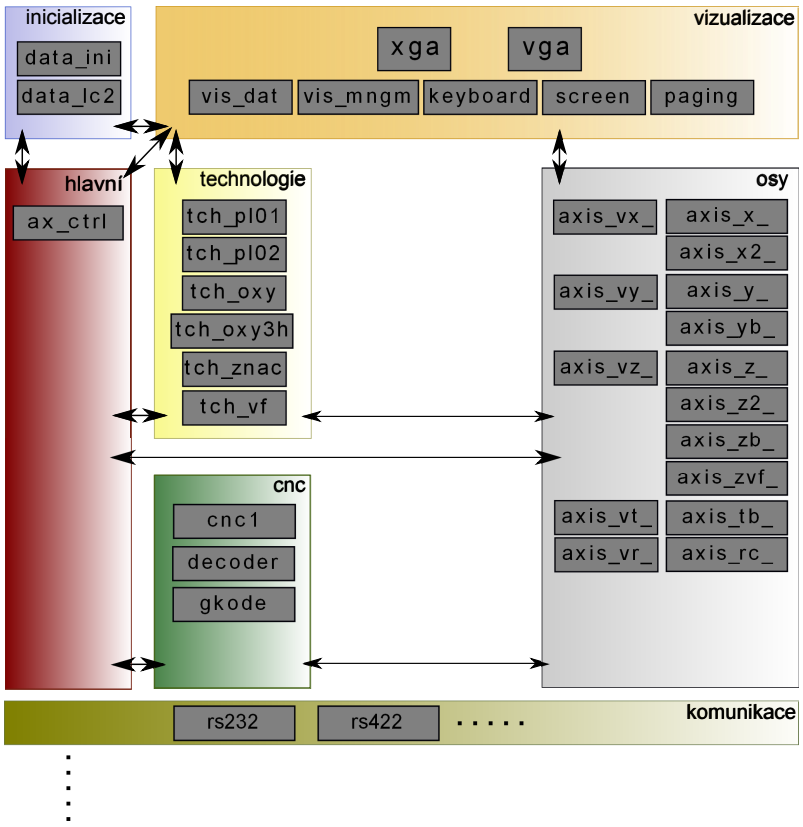
3.2.4 Softwarové vybavení

Softwarová část stroje je kompletně vytvořena ve vývojovém prostředí Automation Studia společnosti B&R. Pro všechny stroje VANAD je vytvořen jeden projekt, který je při uvádění stroje do provozu nakonfigurován podle potřeb zákazníka. V projektu jsou vytvořeny dvě hardwarové konfigurace, mezi kterými se vybírá podle typu použitého průmyslového PC.

Jeden projekt pro všechny technologie má své výhody a nevýhody. Výhodou jednoho projektu pro všechny technologie je možnost okamžité změny technologie bez zdlouhavého přehrávání softwaru. Nevýhodou je stále se rozšiřující projekt, který se může stát pro programátora, ale i pro obsluhu, dříve či později nepřehledný.

3.2.4.1 Struktura aplikačních úloh

Aplikační úlohou je myšlena cyklická úloha, která se podílí na řízení stroje, respektive technologie. Ukázka rozdělení jednotlivých aplikačních úloh projektu VANAD do logických skupin viz. obr. 3.21.



Obrázek 3.21: Struktura aplikačních úloh

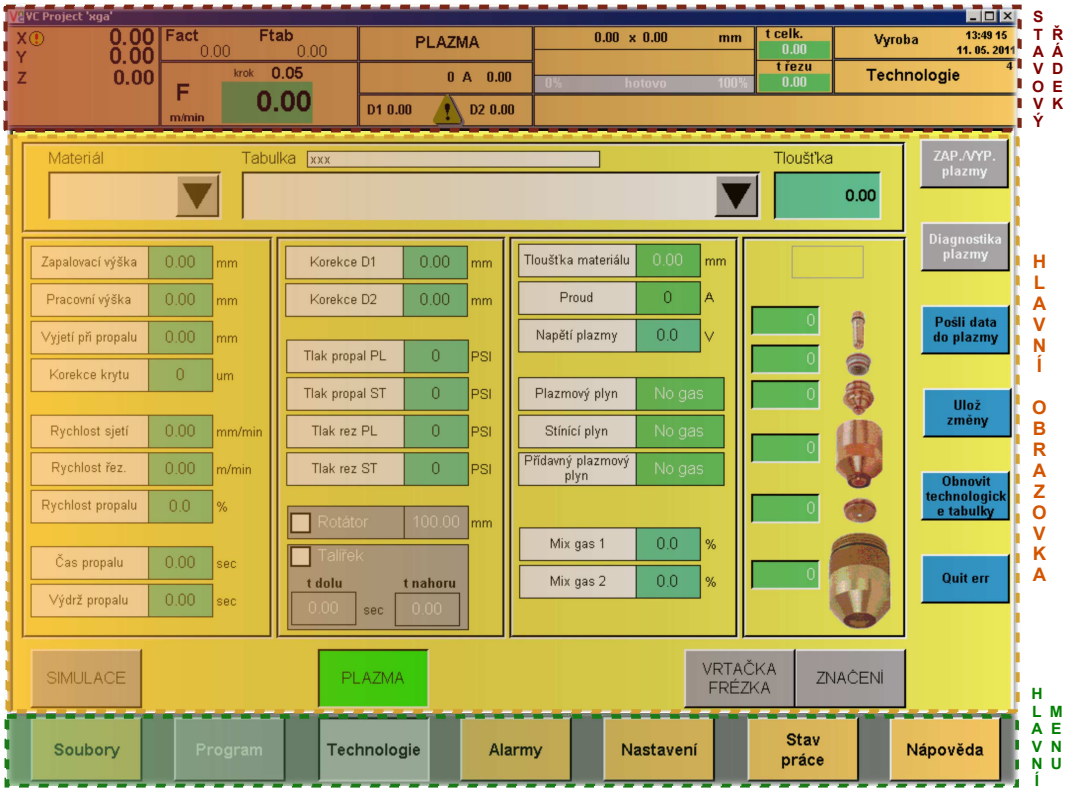
V mé práci se budu podrobněji zabývat vizualizační částí projektu. Technologickou částí projektu se zabývá ve své diplomové práci kolega Tomáš Kohout, viz. [6].

3.2.4.2 Vizualizační část projektu

Důležitou součástí každého projektu je jeho vizualizace. Vizualizace zajišťuje kromě jiného zobrazení důležitých informací o spuštěné technologii a její pohodlné ovládání prostřednictvím ovládacích zařízení.

V projektu VANAD se využívá více zobrazovacích a ovládacích zařízení. Mezi tato zařízení patří touch panel s externí klávesnicí a mobilní operátorský panel. Pro tato dvě zařízení jsou vytvořeny dvě aplikační úlohy **xga** (touch panel), respektive **vga** (mobilní panel), které tvoří grafické rozhraní projektu. Vznikající události ve vizualizaci jsou dále předávány dalším aplikačním úlohám (vis_dat a další), které se starají o předání informací dále do projektu, kde je na vzniklé události příslušným způsobem reagováno.

Vizualizační úlohy mají přístup ke všem globálním a lokálním proměnným deklarovaných v projektu. Tyto proměnné mohou číst a také do nich zapisovat.



Obrázek 3.22: Obrazovka vizualizace - struktura

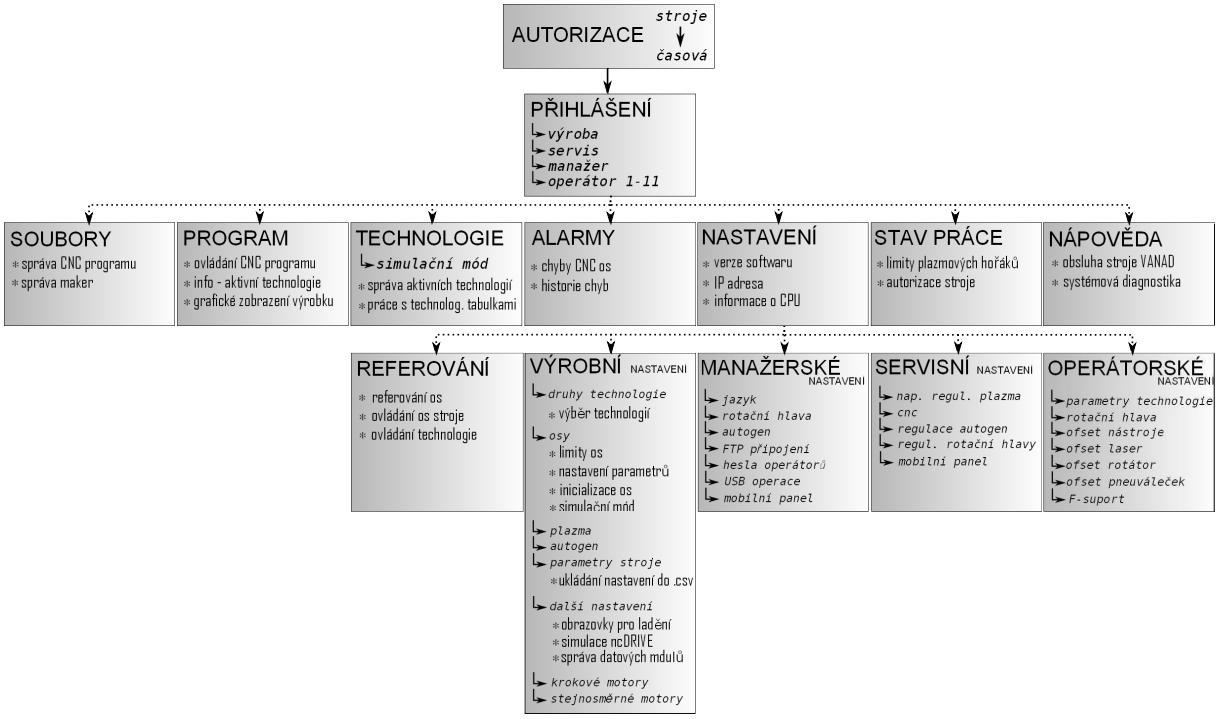
Na obr. 3.22 je vidět ukázka obrazovky projektu VANAD. Strukturu obrazovky tvoří několik částí:

- **Stavový řádek** – tato horní část obrazovky zůstává pro všechny obrazovky vizualizace stejná. Obsahuje globální informace o stavu stroje, informace o spouštěném programu, poloze os, atd.

- **Hlavní část obrazovky** – v této části obrazovky jsou poskytovány všechny údaje související s projektem. Obsah je závislý na volbě možnosti v hlavním menu.

- **Hlavní menu** – pro přehlednost je projekt členěn do několika částí. Výběrem položky hlavního menu se zobrazí příslušné údaje v hlavní části obrazovky.

Aplikační úlohy, které tvoří základ vizualizace projektu VANAD se skládají vždy z několika obrazovek, jejichž struktura a možnosti jsou naznačeny na obr. 3.23.



Obrázek 3.23: Struktura vizualizace projektu VANAD

3.3 Rozšíření strojů Vanad o vrtací a gravírovací suport

Na základě požadavků zákazníků se rozhodla firma Vanad o rozšíření doposud nabízeného portfolia technologií realizovatelných na strojích VANAD o technologii vrtání a gravírování. Z tohoto důvodu jsme ve spolupráci s kolegou Tomášem Kohoutem a firmami Vanad a B&R vyvinuli automatizovaný vrtací a gravírovací suport.

3.3.1 Požadavky na vrtací a gravírovací suport

3.3.1.1 Technologické požadavky

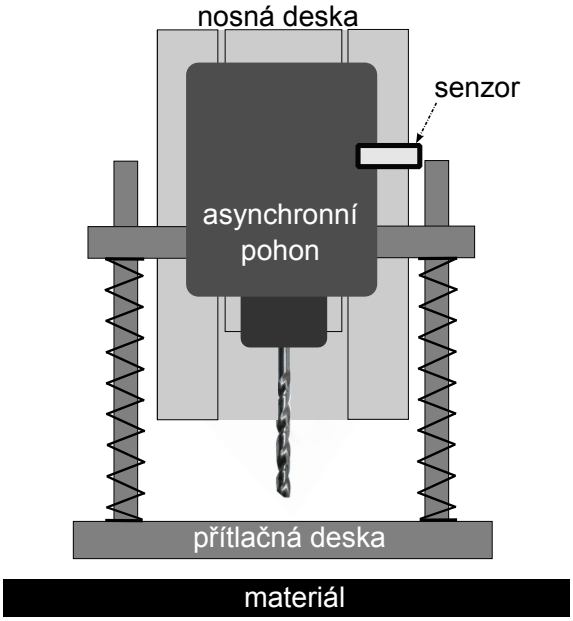
- Vrtání otvorů do plochých materiálů (kovových i nekovových) průměrem vrtáku od 5,0 *do* 13,0 mm

- Otvory mohou být navrtávány do materiálu o tloušťce až 200 mm.

- Drážky a gravírovací stopa nástroje je uvažována od průměru nástroje 3,0 *do* 10,0 mm, při maximální hloubce do oceli 1,5 mm, do měkkých hmot (dřevo, plast) 8,0 mm.

- Technologie má být realizovaná jako přídavné zařízení (vedlejší suport) stávajících technologií na strojích VANAD. V budoucnu se uvažuje o zařazení technologie mezi samostatně nabízené technologie (hlavní suport).

Podoba vrtacího a gravírovacího suportu je naznačena na obr. 3.24. Asynchronní pohon, který otáčí vřetenem je k suportu přichycený přes drážky nosné desky. To umožní obsluze nastavit výšku vřetene nad materiálem. K suportu je přichycena přítlačná deska, která bude sloužit k přítlaku obráběného materiálu a ke zjišťování pracovní polohy nástroje společně se snímačem polohy.



Obrázek 3.24: Podoba vrtacího a gravírovacího suportu - schéma

.

3.3.1.2 Požadavky na ovládání

- Ovládání otáček vřetene bude zajišťovat frekvenční měnič *ACPinverter*. Otáčky budou zadány v pálícím (vrtacím) plánu.
- Operátor musí mít možnost ručně upravovat tyto otáčky (tlačítkem na klávesnici a ručním zadáváním otáček na obrazovce).
- Vrtací plán bude obsahovat mimo pohybů os X a Y také polohování osy Z.
- Jednoduché a spolehlivé nastavení pracovní polohy osy Z.

3.3.2 Přepínání technologií

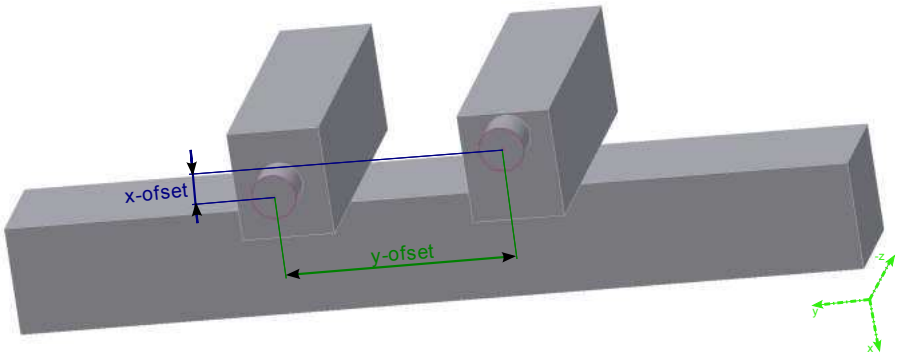
Vrtací a gravírovací technologie je v projektu vedena jako doplňková k ostatním technologiím (plazma, oxy), proto je nutné řešit přepínání hlavní a vedlejší technologie při vykonávání CNC programu. Suport gravírovací a vrtací technologie nemá vlastní pohon v ose Y, proto je technologie brána jako doplňková. Vedlejší a hlavní suport jsou spojeny pevným spojem. Ofset pracovních nástrojů hlavní a vedlejší technologie se zadává ve vizualizaci viz. kapitola 3.3.3.4. Situace ofsetu mezi hlavním a vedlejším suportem je naznačena na obr. 3.25.

Proces přepnutí souřadnic hlavního a vedlejšího suportu při změně technologie, který je volán M-funkcí (M63, M64) z CNC programu, je odchycený v cyklické úloze technologie gravírování a vrtání *tch_vf* a je předán k obsluze v hlavní cyklické úloze *ax_ctrl*.

Přepnutí technologie znamená přemístění vedlejšího suportu na souřadnice suportu hlavního. Před aktivováním pohybu v ose X a Y je třeba vyjet nad pracovní polohu osou Z. Poté dojde k rozvazbení reálných a virtuálních os (X, Y) s následným přejetí reálných os o zadaný ofset. Nakonec jsou opět osy reálné a virtuální zavazbeny.

```
action CTRL_W_START_1:
    .
    .
    .
        (* ODVAZBENI, POSUN, ZAVAZBENI *)
        else if(ctrl.cmd.bShiftRealAxis = 1)then
                ctrl.cmd.bShiftRealAxis = 0
                        axis_x.cmd.bUnLink = 1
                        axis_yAktiv.cmd.bUnLink = 1
                        ctrl.wStep = CTRL_SHIFT_UNLINK_W
    .
    .
    .
action CTRL_SHIFT_UNLINK_W:
        if((axis_x.info.ucAxisIsLink = 0) and (axis_y_info_ucAxisIsLink = 0))then
                ctrl.wStep = CTRL_SHIFT_MOVE
        endif
        endaction
action CTRL_SHIFT_MOVE:
        case ctrl.para.ucAxisShiftOffset of
                ;Zadny pohyb
                action 0:
                        axis_x.par.lAbs_s = axis_x.info.lSet_s
                        axis_yAktiv.par.lAbs_s = axis_yAktiv.info.lSet_s
                endaction
        action CTRL_OFSET_VF:
                ;X
                axis_x.par.lAbs_s = axis_x.info.lSet_s - DINT(ctrl.para.fAxisShiftDirection *
            stParamOperator.fVFOfset_x / stParamVyroba.fPresnostPaleni)
                if(ucAllAxisHoming_Ok = 1)then
                    axis_x.par.fMove_v = axis_x.info.fLim_v ; [u./s]
                else
                    axis_x.par.fMove_v = axis_x.info.fHomingToSwitch_v ; [u/s]
                endif
     .
     .
     .
endaction
```

Ukázka zdrojového kódu - přepínání technologií

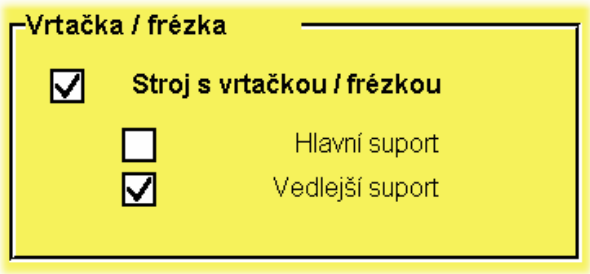


Obrázek 3.25: Ofset hlavního a vedlejšího suportu

.

3.3.3 Rozšíření stávající vizualizace projektu

S rozšířením projektu VANAD o vrtací a gravírovací technologii souvisí také rozšíření jeho vizualizační části. Technologii lze vybrat v *Nastavení* → *Výrobní nastavení* → *Druhy technologie*. Vybrání gravírovací a vrtací technologie viz. obr. 3.26. Lze vybrat, zda je technologie realizována na hlavním nebo vedlejším suportu. V současné době je však funkční pouze volba vedlejšího suportu.



Obrázek 3.26: Volba technologie vrtání a gravírování

.

Po povolení technologie se automaticky zpřístupní další obrazovky související s technologií vrtání a gravírování.

3.3.3.1 Nastavení parametrů reálné osy

Po přidání nové technologie vrtání a gravírování, která souvisí s přidáním nové reálné osy *Zvf* do projektu, vykonávající vertikální pohyb suportu, je třeba přidat obrazovku s možností nastavení důležitých parametrů této nové osy.

Mezi důležité parametry reálné osy patří např. rychlost najíždění na referenční spínač, zesílení polohového a rychlostního regulátoru pohonu, typ motoru, a další.

Obrazovku (obr. 3.27), kde je možné nastavit tyto parametry, nalezneme v *Nastavení* → *Výrobní nastavení* → *Osy další.*

Druhy technologie | Osy | Osy další | Plazma | Autogen | Parametry stroje | Další nastavení | Krokové motory | Stejnosměrné motory

	Simulace	Limity os		Referování			Změna směru os	Převodový poměr		Zesílení regulátoru		Typ motoru
		Rychlost m/min	Zrychlení m/s2	Rychlost na koncák m/min	Rychlost z koncáku m/min	Zrychlení m/s2		Pocet jednotek mm	Pocet otacek [ot.]	Polohovy Kv [-]	Rychlostní Kv [-]	
Yb	Zapnuta	31.50	2.00	3.00	0.30	0.30	Normal	54.98	10.0	250.0	0.50	8LSA33 R0060D000
Zb	Zapnuta	4.00	2.00	3.00	0.30	0.30	Normal	6.87	10.0	250.0	0.50	8LSA33 R0060D200
Zvf	Zapnuta	4.00	2.00	3.00	0.30	0.30	Invert	6.87	10.0	250.0	0.50	8LSA33 R0060D200

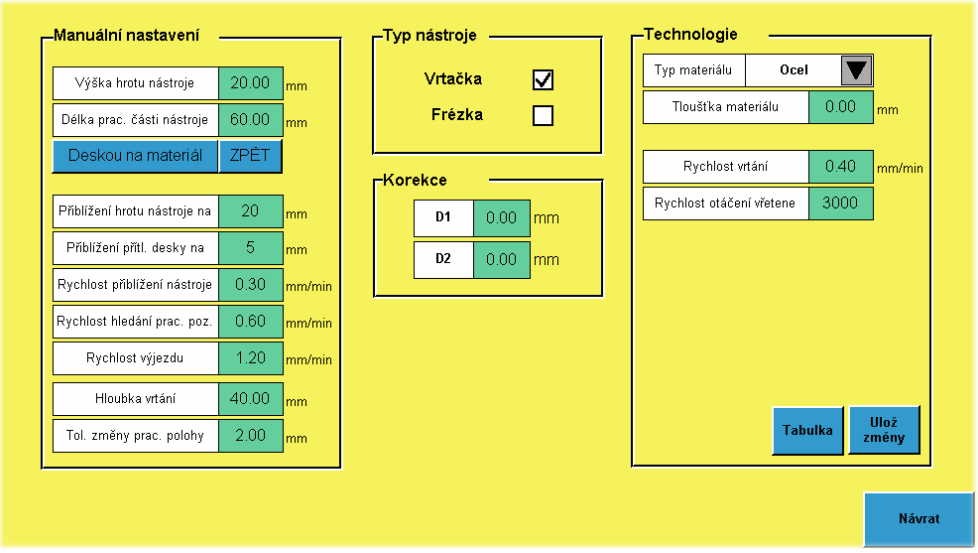
Obrázek 3.27: Nastavení parametrů reálné osy

3.3.3.2 Nastavení technologie vrtání a gravírování

Obrazovka pro nastavení technologie vrtání a gravírování se zobrazí až po její aktivaci přes *Technologie* → *Vrtačka, frézka.*

Obrazovka viz. obr. 3.28 je rozdělena do několika částí:

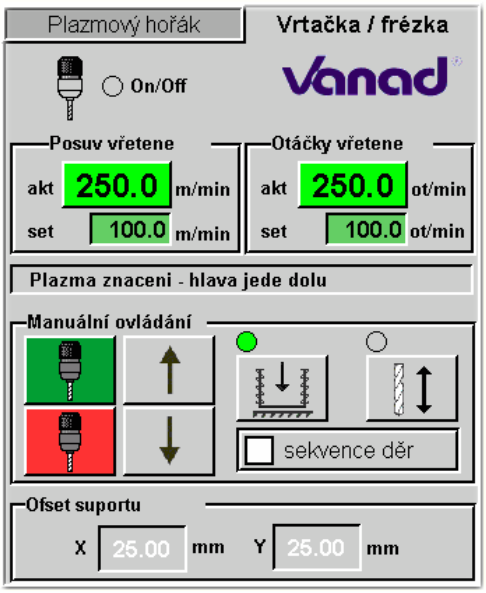
- **Typ nástroje** - výběr mezi vrtačkou a frézkou.
- **Manuální nastavení** - nastavení parametrů, které zadává operátor při seřizování a přípravě technologie.
- **Technologie** - parametry technologie, které operátor mění v průběhu práce s technologií. Připraveno pro možnost nastavování parametrů technologie z tabulkových dat.



Obrázek 3.28: Nastavení technologie vrtání a gravírování

3.3.3.3 Ovládání hlavní a vedlejší technologie

Protože je technologie vrtání a gravírování brána jako doplňková a za běhu CNC programu je třeba, aby měl operátor přehled o hlavní i vedlejší technologii, tak bylo třeba vyřešit zobrazení obou technologií na jedné obrazovce. Na obrazovce však není dostatek místa pro zobrazení obou technologií, proto je zvolen způsob přepínání viz. obr. 3.29.



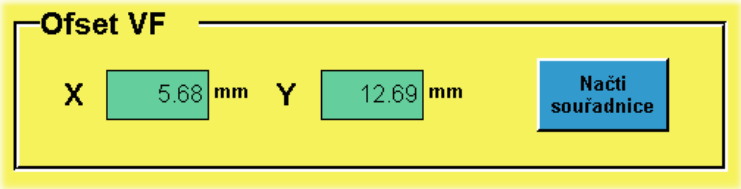
Obrázek 3.29: Technologie vrtání a gravírování

Operátor má možnost přepínání mezi hlavní a vedlejší technologií, vidí tak informace o obou technologiích a může na vzniklé události reagovat.

Technologie vrtání a gravírování je ovládána přes CNC program (vrtací plán), nebo může být ovládána operátorem manuálně. V manuálním režimu má obsluha možnost zapnutí a vypnutí vřetene, nastavit rychlost posuvu vřetene směrem do materiálu, spustit sekvenci vrtání děr, spustit vrtání a další.

3.3.3.4 Definování ofsetu suportu

Pro vrtací a gravírovací suport se ve vizualizaci, *Nastavení* → *Operátorské nastavení* → *Ofset vrtačka, frézka*, nastavuje ofset tohoto vedlejšího suportu oproti hlavnímu suportu, viz. obr. 3.31.



Obrázek 3.30: Nastavení technologie vrtání a gravírování

Souřadnice ofsetu je možné nastavit ručně nebo lze využít tlačítka *Načti souřadnice*, které po stisknutí načte aktuální pozici nástroje vztaženou k nulovému bodu materiálu.

3.3.3.5 Stavový řádek

Po aktivování technologie vrtání a gravírování je třeba rozšířit možnosti stavové části obrazovky. Mezi tyto možnosti patří například zobrazení informace o tom, že pro osu Zvf (osa technologie vrtání a gravírování) nebyl dosud nalezený *nulový bod*. Tento fakt se projeví blikáním otazníku u osy Z viz. obr. 3.31.

Při přepnutí technologie je třeba zajistit přepnutí souřadnic dle aktivované technologie.

Obrázek 3.31: Nulový bod osy *Zvf* - nenalezený

3.3.4 Možná rozšíření vrtacího a gravírovacího suportu

3.3.4.1 Automatická výměna nástroje

Automatickou výměnu nástrojů během pracovního cyklu stroje zajišťují systémy automatické výměny nástrojů. Pro vrtací a gravírovací zařízení by byl vhodný jednoduchý systém rotační hlavy, který by obsahoval nástroje důležité pro konkrétní úlohu.

Přepínání nástrojů by bylo řízené voláním M-funkcí z CNC programu, tedy automatické.

3.3.4.2 Ofukování obráběného materiálu

Využití přítlačné desky k hledání nulového bodu osy Z by bylo vhodné použít společně s ofukovacím systémem obráběného materiálu. Před spuštěním sekvence hledání nulového bodu by byl obráběný materiál ofouknut stlačeným vzduchem, který by povrch zbavil odpadního materiálu.

3.3.4.3 Zjištění polohy nulového bodu osy Z

Další možností, jak zjistit nulový bod osy Z bez použití přítlačné desky, je využití možnosti vyčítání informací o momentu ze servozesilovače řídícího pohon, který zajišťuje pohyb ve směru osy Z. Problémem však může být použitá převodovka za tímto pohonem s převodovým poměrem přibližně 260:1. Změna momentu při najetí nástroje na materiál může být nepatrná a zjišťování nulového bodu osy Z tímto způsobem nemožné.

Tento přístup by však zajistil přesné nalezení nulového bodu osy Z v daném místě obráběného materiálu. Například u prohnutého materiálu přítlačná deska nezajistí přesné nalezení nulového bodu.

Kapitola 4

Závěr

4.1 Model „Žonglér“

Model „Žonglér“ představuje pětiosé mechanické zařízení osazené synchronními motory (4 rotační, 1 lineární), u nichž lze realizovat vzájemnou součinnost a synchronizaci. Řídící program je napsaný v jazyku Ladder Diagram a využívá knihovnu *ACP10*, umožňující ovládání os stroje pomocí mezinárodního standardu *PLCopen*.

Každá vertikální osa modelu byla rozšířena o jednostupňovou úhlovou planetovou převodovku typu WPLE 120 s převodovým poměrem 3:1 (převod dopomala). Tato převodovka byla zvolena pro své kompaktní rozměry, dlouhou životnost a tichý provoz, který je pro model, prezentovaný na výstavách, velice důležitý. Převodovka zajišťuje plné výkonové využití pohonů používaných pro pohyb ve vertikálním směru. Převodovka s tímto převodovým poměrem však způsobuje překročení maximální hodnoty momentu, kterou je schopné přenést lineární vedení. Maximální moment je přepočítán na hodnotu maximálního zrychlení $a_{max} = 115{,}7\,m/s^2$, kterou lze ovlivnit při návrhu vačkových profilů a v limitních parametrech pohonů.

Po rozšíření modelu stroje o převodovky, které zaručí kontinuální chod stroje v režimu žonglování se třemi a čtyřmi koulemi, bylo možné přejít k návrhu kinematiky řízených os stroje pro žonglování se čtyřmi koulemi. K dopočítání parametrů žonglování, použitelných pro vytvoření vačkových profilů, bylo použito vztahů vyplývajících ze žonglovacího teorému společně s popisem kinematiky vrhu šikmého vzhůru.

K návrhu vačkových profilů byla použita komponenta vývojového prostředí Automation Studia známá jako editor vačkových profilů. Vačkové profily jsou vytvořeny na základě dopočítaných parametrů žonglování se čtyřmi koulemi, které respektují omezení

kladená na kontinuální chod stroje. Vačkový profil se definuje několika fixními body, které jsou editorem vačky proloženy (aproximovány) polynomem vyššího řádu. Cyklus žonglování se čtyřmi koulemi není periodický, protože v průběhu žonglování může dojít k upuštění koule a stroj musí být schopný kouli nahodit zpět do cyklu. Z tohoto důvodu bylo nutné cyklus žonglování rozdělit na menší úseky a pro každý úsek navrhnout vlastní vačkový profil. Cyklus žonglování je proto složen z několika vačkových profilů, které se spojují podle stavu vačkového automatu. O vačkovém automatu více v bakalářské práci Lubomíra Prudka, viz. [10]. Názvy, značení a popis použitých vačkových profilů v projektu jsou uvedeny v příloze C.

Model již absolvoval řadu úspěšných prezentací na výstavách, konkrétně na Ampéru 2010 v Praze, na Ampéru 2011 v Brně a na veletrhu SPC/IPC Drives 2010 v německém Norimberku. Model byl vždy umístěn na stánku společnosti B&R. Další úspěchy sklidil „žonglér“ tým v ocenění European Industrial Ethernet Award, kde se v roce 2009 umístil na 9. místě s *Analýzou možností vizuální zpětné vazby pomocí kamery*, a v roce 2010 na 2. místě se *Zabezpečením pohybů pomocí predikce trajektorií a pomocí Safety PLC*.

4.2 Technologie vrtání a gravírování

Suport vrtání a gravírování je na strojích VANAD realizovaný jako vedlejší, je tedy spojen s hlavním suportem pevným spojem, který zajišťuje pohyb ve směru osy Y. V projektu VANAD bylo doposud možné řízení pouze pohybu os X a Y z CNC programu a osa Z byla řízena přímo aplikací. Pro technologii vrtání a gravírování byl projekt rozšířen o možnost polohování osy Z přímo z CNC programu. Zařazení osy Z do CNC systému a popis technologie vrtání a gravírování je uvedeno v diplomové práci Tomáše Kohouta [6].

Vizualizační část projektu VANAD je tvořena dvěma hlavními cyklickými úlohami, pro touch panel a mobilní panel, a několika dalšími obslužnými cyklickými úlohami, které řídí např. přepínání obrazovek, předání dat z vizualizace do technologie, atd. Tyto cyklické úlohy byly přizpůsobeny podle potřeby nové technologii vrtání a gravírování.

Dále bylo pro technologii vrtání a gravírování vytvořeno několik nových vizualizačních obrazovek. Nejdříve byla vizualizace doplněna o možnost nastavení parametrů nové osy *Zvf*. Dále pak byly přidány obrazovky, které operátorovi umožňují nastavení a zobrazení důležitých údajů o nové technologii.

Pro vedlejší technologii je třeba definovat ofset vedlejšího suportu oproti suportu

hlavnímu. Ofsetu se využívá při přepínání hlavní technologie na technologii vedlejší. Přepínání technologií je možné provádět přímo za běhu CNC programu.

Funkčnost technologie vrtání a gravírování byla otestována pouze bez části řídící frekvenční měnič, který ovládá otáčky vřetene. Otestovat tuto část se nepovedlo z důvodu chyby při prvním zprovoznění frekvenčního měniče a následnými problémy s dostupností nového zařízení. Proto byla tato část technologie testována pouze v simulačním režimu.

Práce je doplněna o několik příloh. V příloze A jsou umístěny fotografie, které souvisejí s modelem „žongléra“. V příloze B je popsána obsluha modelu „žongléra“. Jsou zde uvedeny především důležité body, které je třeba splnit před spuštěním stroje a možné komplikace, které mohou nastat při provozu stroje. V příloze D je uveden obsah přiloženého DVD.

Literatura

[1] Bernecker + Rainer Industrie-Elektronik Ges.m.b.H. *Automation Studio - B+R Help Explorer.* Online Help, 2010.

[2] Brázda, J. *Technologie výroby obráběním na CNC strojích.* Brno: Vydavatelství VUT, 2009.

[3] Havlena, V. and Štecha, J. *Moderní teorie řízení.* Praha: Vydavatelství ČVUT, 2000.

[4] Jaroš, P. *Dynamika rychlých servopohonů.* Bakalářská práce, Praha: ČVUT-FEL, 2009.

[5] Kohout, T. *Vizuální kontrola chodu stroje.* Bakalářská práce, Praha: ČVUT-FEL, 2009.

[6] Kohout, T. *Model Žonglér pro vzdálenou výuku a řízení CNC stroje.* Diplomová práce, Praha: ČVUT-FEL, 2011.

[7] Mužík, R. *CNC řízení.* Školící materiály společnosti B&R, 2010.

[8] Necid, J. *Bezpečnost strojů a opatření ke snížení rizik.* Diplomová práce, Praha: ČVUT-FEL, 2011.

[9] Otevřená encyklopedie wikipedie. <http://cs.wikipedia.org>, 2010.

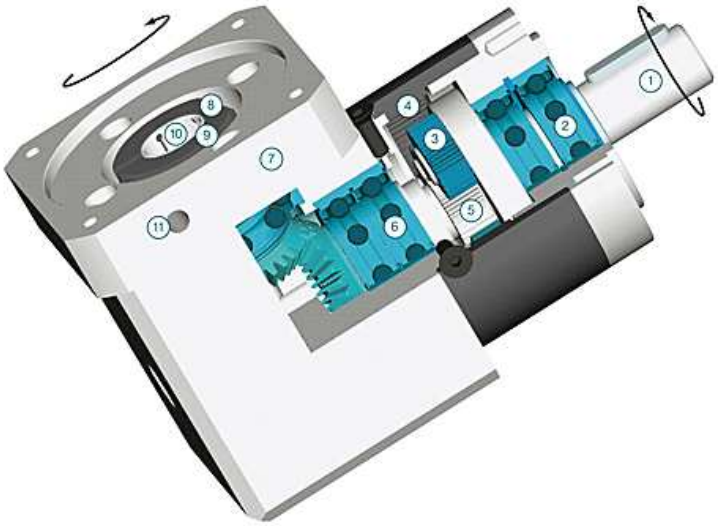
[10] Prudek, L. *Řízení rychlých servopohonů.* Bakalářská práce, Praha: ČVUT-FEL, 2010.

[11] Všetička, M. *Encyklopedie fyziky 2004.* <http://fyzika.jreichl.com/index.php>, 2009.

[12] Voss, J. *The mathematical Theory of Juggling.* <http://seehuhn.de>, 2008.

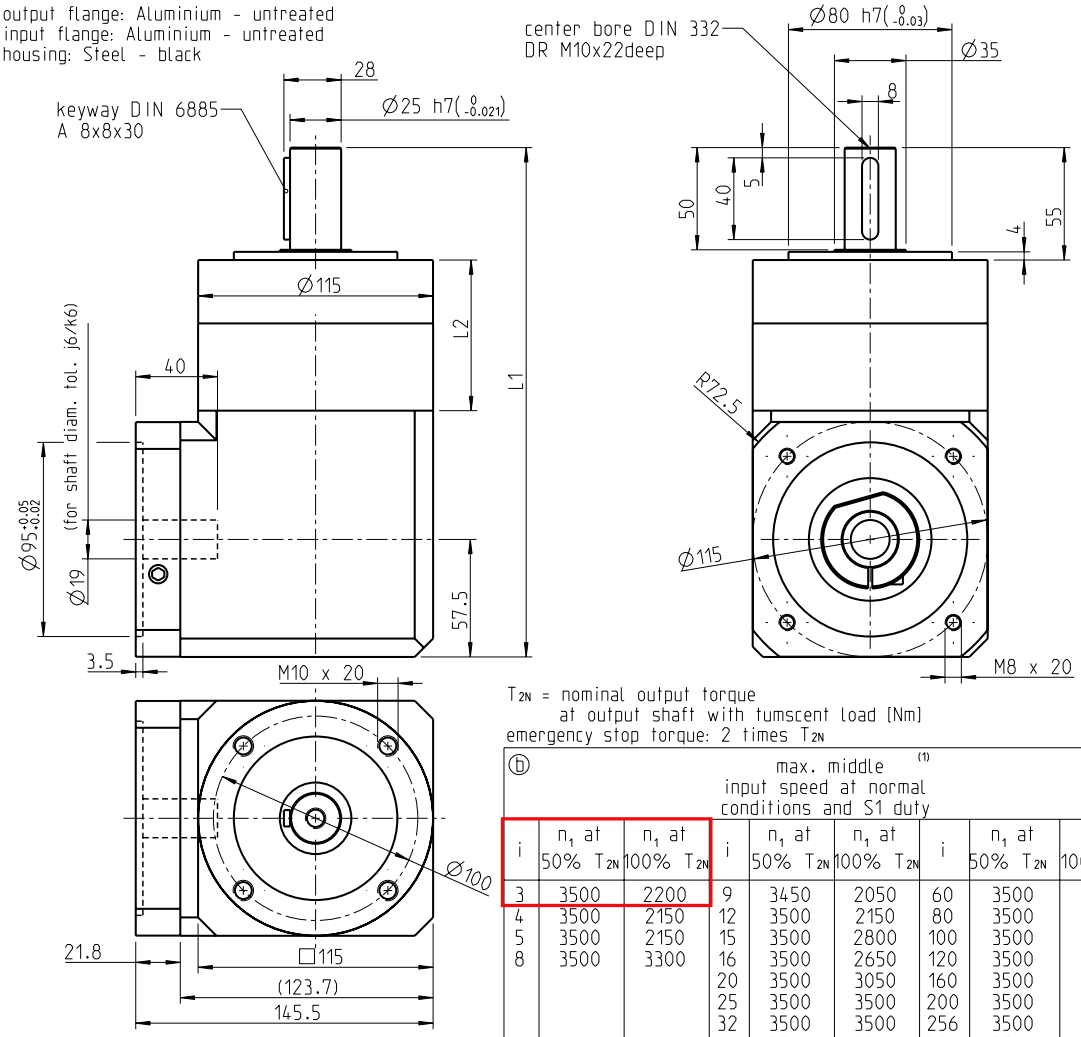
Příloha A

Fotografie



Obrázek A.1: Jednostupňová úhlová planetová převodovka WPLE 120

Material:
output flange: Aluminium - untreated
input flange: Aluminium - untreated
housing: Steel - black



T_{2N} = nominal output torque
at output shaft with tumscent load [Nm]
emergency stop torque: 2 times T_{2N}

ⓑ	max. middle input speed at normal conditions and S1 duty [1]								
i	n_1 at 50% T_{2N}	n_1 at 100% T_{2N}	i	n_1 at 50% T_{2N}	n_1 at 100% T_{2N}	i	n_1 at 50% T_{2N}	n_1 at 100% T_{2N}
3	3500	2200	9	3450	2050	60	3500	3500
4	3500	2150	12	3500	2150	80	3500	3500
5	3500	2150	15	3500	2800	100	3500	3500
8	3500	3300	16	3500	2650	120	3500	3500
			20	3500	3050	160	3500	3500
			25	3500	3500	200	3500	3500
			32	3500	3500	256	3500	3500
			40	3500	3500	320	3500	3500
			64	3500	3500	512	3500	3500

	1.stage		2.stage		3.stage	
L1	249.5		276.5		304	
L2	74		101		128.5	
	i	T_{2N} ⓐ	i	T_{2N}	i	T_{2N}
	3	80	9 [2]	210	60	260
	4	105	12 [2]	260	80	260
	5	130	15	230	100	260
	8	120	16	260	120	230
			20	260	160	260
			25	230	200	230
			32	260	256	260
			40	230	320	230
			64	120	512	120

Technical Specification
planetary gear: straight-toothed
lifetime: 20.000h
output shaft bearing: grooved ball bearing
- max. axial load: 2800N by n2=100 1/min /Fr=0 /Lh=10.000h
- max. radial load: 2000N by n2=100 1/min /Fa=0 /Lh=10.000h
- max. axial load: 2100N by n2=100 1/min /Fr=0 /Lh=30.000h
- max. radial load: 1500N by n2=100 1/min /Fa=0 /Lh=30.000h
- ref. on shaft center/T=30°
backlash: 1.stage<=12 arcmin, 2.stage<=16 arcmin
- 3.stage<=18 arcmin ref. on output shaft
max. input speed: n1=6500 1/min[1]
lubrication: life grease lubrication
operating temperature: -25°C ...+90°C
efficiency: by rated load (ratio dependently)
- ca. 94% 1.stage, ca. 92% 2.stage,
- ca. 88% 3.stage
nominal output torque: by n2 = 100 1/min
sealing: bearing 2RS
motor mounting: M2 (stocked driving pinion)
- torque of clamping screw: 16.5Nm
method of working: S1
operation ratio: cB=1
protective system: IP 54
max. motor weight static: 16kg

[1] Operating temperature may not be exceeded!
[2] lifetime deviating 10.000h at T_{2N}

Modification reserve!
Consider motor fitting instructions!

NEUGART

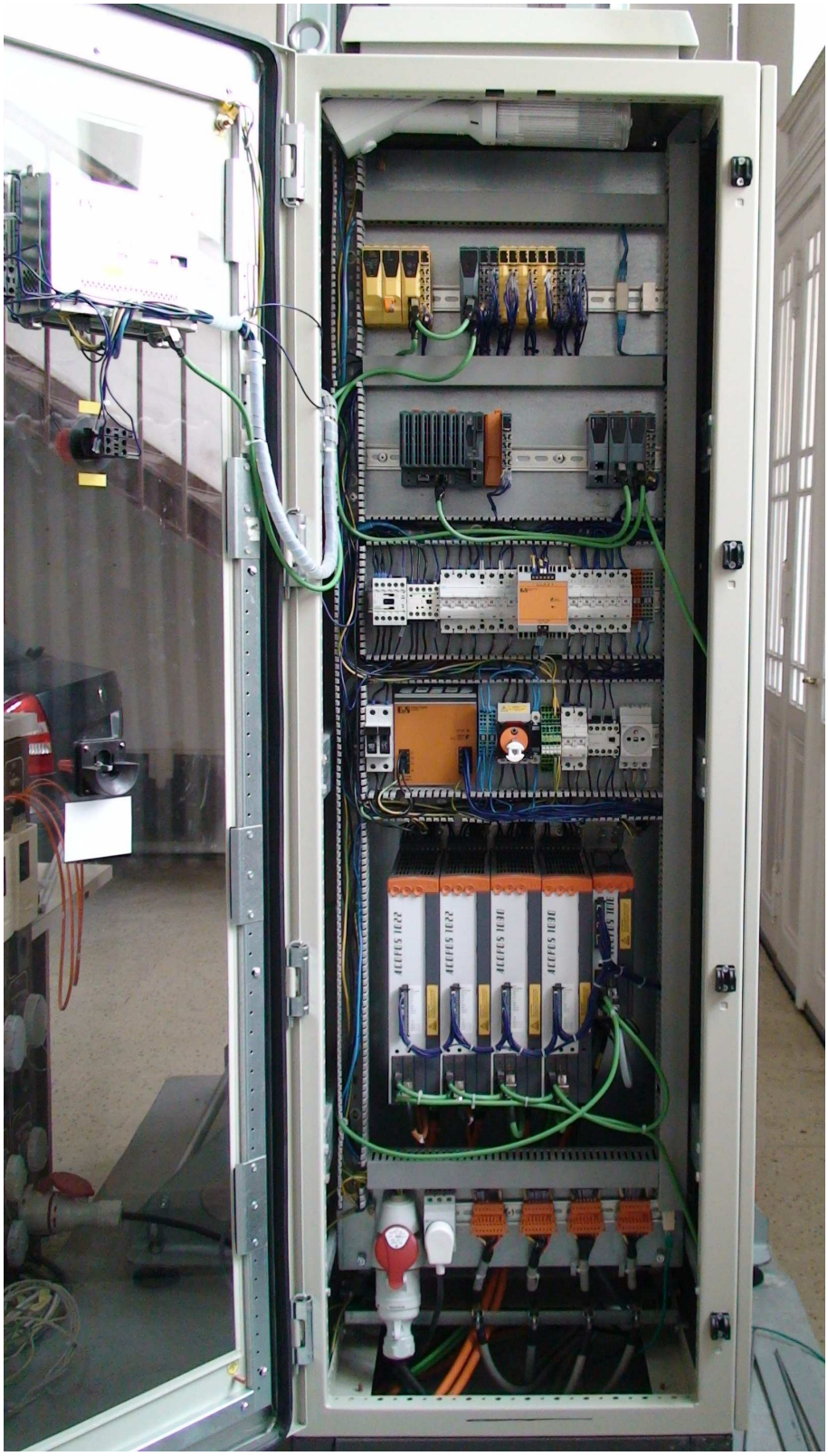
h					date	Name	
g				Auth.	14.03.06	Ille	
f				Aud.	14.03.06	Bühler	
e				Rel.	14.03.06	Cihlar	
d							
c				Neugart GmbH Keltenstrasse 16 D - 77971 Kippenheim			
b	added	10.07.06	SI/JS				
a	value adjustment	14.03.06	SI/Ci				
stat	change	date	Nam.	(Urspr.)			

scale: 3:10 | DIN A3 | ISO
data sheet WPLE 120
standard flange
Draw - No.: MB - 939
Part-No.:
Blatt
Bl.
date: 17.04.01 name: Cihlar

Obrázek A.2: Planetová převodovka WPLE 120

Obrázek A.3: Model „žonglér“ - výstava Ampér 2011

Obrázek A.4: Rozvaděč modelu „žonglér“ - zavřený



Obrázek A.5: Rozvaděč modelu „žonglér“ - otevřený

Příloha B

Obsluha modelu „žongléra“

B.1 Před spuštěním stroje

- **Usazení stroje** - kontrola usazení stroje podle olovničky umístěné na zadní straně stroje. Je třeba, aby olovnička mířila do středu matičky umístěné ve spodní části konstrukce. Pokud bylo s olovničkou manipulováno (údržba, převoz stroje) a stroj při režimu žonglování není schopný dohození koule, tak je nutné vyvážit stroj bez olovničky.

- **Mazání lineárního vedení páté osy olejem** - kvalitu výhozu koule lineárním pohonem z podavače, zpět do cyklu žonglování, ovlivňuje mazání lineárního vedení (magnetické tyče). Vhodné je použití *teflonového oleje*.

- **Upevnění horizontálních ramének** - před každým spouštěním stroje je nutné provést dotažení všech spojů přidržující horizontální raménka a koncové spínače (důležité je dotažení objímky, která svírá hřídel horizontálního pohonu). Při uvolnění může dojít ke kolizi s držákem lineárního vedení, nebo ramének mezi sebou.

- **Volný pohyb páté osy** - před spuštěním stroje je vhodné provést kontrolu správného usazení desky podavače, zda nebrání v pohybu lineárnímu pohonu. Je třeba se také ujistit, že na vyhazovací misce lineárního pohonu není více koulí.

- **Kontrola koncových spínačů** - pootočením horizontálních ramének, přes spínací kontakt koncového spínače, se ujistit, že dojde k jeho sepnutí (to stejné provést i pro lineární pohon).

- **Koule v podavači** - ujistit se, že je dostatečný počet koulí v podavači.

- **Osvětlení, ventilátor** - před spuštěním stroje je třeba připojit vidlici od osvětlení a od ventilátoru (chladícího lineární pohon) do prodlužovacího kabelu přivedeného z rozvaděče stroje (prodlužovací kabel musí být připojený v *dolní (spínané) zásuvce*).

B.2 Spuštění stroje

- **Napájení rozvaděče** - před zapnutím hlavního spínače, umístěného na čelní straně rozvaděče, je třeba připojit napájení 3 x 400 V (pěti kolík - soustava TN-S).
- **Řídící systém** - po sepnutí hlavního spínače dojde k nabootování všech řídících zařízení (4PP420, PLC X20, Safety PLC). Pokud některé zařízení hlásí chybu, tak je třeba nalézt řešení problému v manuálu.
- **Spuštění servozesilovačů** - po nabootování řídícího systému je nutné přivést napájení (sepnutím stykačů) na servozesilovače stisknutím tlačítka RESET, umístěného vedle 4PP420. Po naběhnutí (cca 20 - 30 s) jsou servozesilovače ve stavu READY (kontrolka Acoposu svítí zeleně, pokud není signalizována chyba).

  Poznámka: Po naběhnutí Acoposů signalizuje 4PP420 na displeji vždy několik chyb, které je třeba potvrdit. Pokud se některá chyba opakuje, tak je třeba ji řešit s manuálem. Bez potvrzení všech chyb nelze stroj spustit.
- **Ovládání modelu z vizualizace** - po spuštění stroje tlačítkem START (přiveden signál Enable na servozesilovače, kontrolka RUN svítí oranžově) je třeba provést inicializaci stroje (tzv. home).

  Poznámka: Při spuštění režimu žonglování, bez předchozího stisknutí tlačítka START a tlačítka INICIALIZACE se vše provede automaticky.

B.3 Signalizace a hlášení stavu stroje

- **Semafor** - je umístěný na rozvaděči stroje a jeho funkcí je světelná signalizace stavu stroje z pohledu obsluhy.

Stav stroje je definován barvou semaforu následovně:

⇒ *červená* - (bliká) Hlásí chybu stroje. (svítí) Stroj je připravený k pracovnímu režimu.

⇒ *žlutá* - (svítí) Stroj je v pracovním režimu.

⇒ *zelená* - (bliká) Stroj není inicializován.

- **Vizualizace 4PP420** - všechny informace stavu stroje jsou uvedeny ve vizualizaci.

  ⇒ *Diagnostika* - chybová hlášení, potvrzení chyb, zapnutí a vypnutí stroje, inicializace stroje.

  ⇒ *Alarmy* - hlášení stavu stroje, řešení vzniklých problémů (výpis ve stavovém řádku), informace o režimu stroje.

  ⇒ *Admin* - právo ke vstupu do této části vizualizace má pouze zaškolená osoba (pro vstup je třeba zadat heslo). Nastavení rychlosti virtuální osy, kalibrace panelu, nastavení kroutícího momentu pro zpětnou vazbu, nastavení výchozí pozice pro vertikální osy.

B.4 Problémy při provozu modelu

- **Šikmý výhoz koule lineárním pohonem** - pokud se stane, že stroj vyhazuje kouli do špatného směru, tak je problém v natočení lineárního vedení páté osy.

  Řešení - natočení magnetické tyče do správného směru. Magnetická tyč není rovná, ale ve svém středu prohnutá (prohnutá již po dodání).

- **PP420 opakovaný restart** - problém s flash pamětí

  Řešení: Při opakujícím se restartu 4PP420 je nutné vytvořit nový Compact flash.

B.5 Nefunkční části modelu

- **Čidlo teploty lineárního pohonu** - čidlo teploty, (termistor) umístěné ve vinutí lineárního pohonu, je vadné. Zapojení čidla bylo kontrolováno, tam chyba není.

Příloha C

Značení vačkových profilů - 4 koule

1. osa			Komentáře
název	index	čas [s]	
20	1	2,3	Nahod kouli
33	2	0,1	4 balls - cekaci, 4 balls fontana - cekaci
34	3	0,1	4 balls - cekaci, 4 balls fontana - cekaci
35	4	0,05	4 balls - cekaci
215	5	0,5	4 balls - prvotni
216	6	0,7	4 balls - cyklicka
217	7	0,2	4 balls - ukoncovaci
218	8	0,7	4 balls - zhod kouli
231	9	1,4	4 balls fontana - cyklicka
230	10	1,4	4 balls fontana - nahazovaci
232	11	0,2	4 balls fontana - ukoncovaci

2. osa			Komentáře
název	index	čas [s]	
10	1	2,3	Nahod kouli
33	2	0,1	4 balls - cekaci, 4 balls fontana - cekaci
34	3	0,1	4 balls - cekaci, 4 balls fontana - cekaci
35	4	0,05	4 balls - cekaci
114	5	0,7	4 balls - cyklicka
123	6	1,4	4 balls fontana - cyklicka
121	7	1,4	4 balls fontana - nahazovaci

3. osa			Komentáře
název	index	cas [s]	
20	1	2,3	Nahod kouli
33	2	0,1	4 balls - cekaci, 4 balls fontana - cekaci
34	3	0,1	4 balls - cekaci, 4 balls fontana - cekaci
219	4	1,2	4 balls - prvotni nahazovaci
220	5	0,7	4 balls - cyklicka
221	6	1,4	4 balls - nahazovani v cyklu
217	7	0,2	4 balls - ukoncovaci
230	8	1,4	4 balls fontana - nahazovaci
231	9	1,4	4 balls fontana - cyklicka
232	10	0,2	4 balls fontana - ukoncovaci

4. osa			Komentáře
název	index	čas [s]	
10	1	2,3	Nahod kouli
33	2	0,1	4 balls - cekaci, 4 balls fontana - cekaci
34	3	0,1	4 balls - cekaci, 4 balls fontana - cekaci
115	4	1,4	4 balls - prvotni nahazovaci
116	5	0,7	4 balls - cyklicka
117	6	1,4	4 balls - nahazovani v cyklu
120	7	1,4	4 balls fontana - nahazovaci
122	8	1,4	4 balls fontana - cyklicka

5. osa			Komentáře
název	index	čas [s]	
42	4	1,4	4 balls - nahazovaci, 4 balls fontana - nahazovaci
36	5	0,7	4 balls - cekaci
37	6	1,4	4 balls fontana - cekaci

Příloha D

Obsah přiloženého DVD

K této práci je přiloženo DVD, které obsahuje pět adresářů:

- **Dokumentace:** Technická dokumentace k modelu „žongléra“.
- **Text:** Text diplomové práce v digitální podobě a podklady pro její přípravu (obrázky, fotografie).
- **Skripty:** Skript použitý k identifikaci parametrů žonglování.
- **Video:** Natočená videa.