VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ
ÚSTAV VÝROBNÍCH STROJŮ, SYSTÉMŮ A ROBOTIKY
KONSTRUKČNÍ A PROCESNÍ INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING
INSTITUTE OF PRODUCTION MACHINES, SYSTEMS AND ROBOTICS
DESIGN AND PROCESS ENGINEERING

PROBLEMATIKA RYCHLÉ AUTOMATICKÉ VÝMĚNY NÁSTROJŮ U OBRÁBĚCÍCH STROJŮ

PROBLEMATIC OF FAST AUTOMATIC TOOL CHANGE BY WORKING MACHINERY

Zkrácená verze PhD Thesis

AUTOR PRÁCE Ing. JAN PAVLÍK

ŠKOLITEL prof. Ing. ZDENĚK KOLÍBAL, CSc.

OPONENTI

DATUM OBHAJOBY

Klíčová slova: automatická výměna nástrojů, AVN, nástrojové rozhraní, simulační model, LabView, Adams

Key words: automatic tool changer, ATC, tool interface, simulation model, LabView, Adams

NÁZEV PRACOVIŠTĚ KDE JE ULOŽEN RUKOPIS

Disertační práce je uložena na Oddělení vědy a výzkumu Fakulty strojního inženýrství VUT v Brně, Technická 2, 616 69 Brno

© Jan Pavlík, 2011

Tato práce vznikla jako školní dílo na Vysokém učení technickém v Brně, Fakultě strojního inženýrství. Práce je chráněna autorským zákonem a její užití bez udělení oprávnění autorem je nezákonné, s výjimkou zákonem definovaných případů.

ISBN
ISSN

Obsah

1 ÚVOD 5

2 CÍL A METODIKA DOKTORSKÉ DISERTAČNÍ PRÁCE 5

3 AUTOMATICKÁ VÝMĚNA NÁSTROJE 6

4 SOUČASNÁ ŘEŠENÍ AUTOMATICKÉ VÝMĚNY NÁSTROJŮ 7

5 ANALÝZA PROBLEMATIKY AVN 8

5.1 Obecné blokové schéma systému 9
5.2 Proces výměny – kinematika procesu 10
5.3 Formulace řešeného problému 11

6 DETAILNÍ ŘEŠENÍ JEDNOTLIVÝCH VARIANT 12

6.1 Stand STD-25 12
6.1.1 Experimentální zkoušky STD-25 13
6.1.2 Simulační model a jeho verifikace 14
6.1.3 Problematika rázu do vřetene 17
6.2 Vačkový stand 22
6.2.1 Experimentální zkoušky 23
6.2.2 Ochrana duševního vlastnictví 24
6.3 Kompaktní manipulátor AVN 24
6.4 řešení kompakt. manipulátoru s prvkem THK 26

7 ZÁVĚR 27

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY 29

ŽIVOTOPIS 30

VLASTNÍ PUBLIKACE 31

PRODUKTY A PATENTY 32

ABSTRAKT 34

1 ÚVOD

Odedávnou snahou lidstva je odstranění namáhavé, monotónní a nebezpečné práce a její nahrazení prací strojů. Stroje jako neživé objekty nepotřebují odpočinek, dovolenou a neprotestují proti vícesměnnému provozu. Požadované činnosti provádí přesně, rychle a spolehlivě. Na první pohled by se dalo říci, že stroj je naprosto ideálním prostředkem pro nahrazení člověka ve výrobním procesu. Bohužel tak tomu není. Složitost lidské mysli je mimo možnosti současné techniky, z čehož plyne nutnost zachování lidského faktoru ve výrobním procesu. Člověk svojí inteligencí, schopností vyhodnocovat a reagovat na vnější podněty je důležitým elementem v celém výrobním procesu. Stroj je tedy nadále stavěn do pozice „bezduchého“ Golema, který vykonává příkazy člověka.

Nutno podotknout, že bez strojů, a to jak ve formě výrobních zařízení, tak i ve formě automatizační techniky, by lidstvo nebylo tam, kde v současnosti je. Ač jsme stroj bagatelizovali do role bezduchého pomocníka, musíme konstatovat, že si v této roli vede naprosto výtečně. Dokonce můžeme směle říci, že jsou stroje v mnoha směrech výjimečné a nenahraditelné. Například v oblasti automatizační techniky můžeme stroje považovat za nenahraditelné z hlediska rychlosti, přesnosti, nosnosti, tak i z hlediska spolehlivosti a bezpečnosti. V duchu předešlého tvrzení můžeme konstatovat, že automatizační technika je nezbytnou a často i nedílnou součástí všech moderních výrobních strojů. Jejich potřebnost je dobře patrná ze strategií Evropského výboru pro spolupráci v průmyslu obrábění a tváření – CECIMO [9] a shromáždění CIRP [10]. Tyto strategie mimo jiné obsahují i snahu o zvýšení produktivity obráběcích strojů a s tím je úzce spjata i problematika automatizace. Fakt, že této problematice věnují pozornost i tyto dvě významné organizace dává tušit zásadnost problému. V návaznosti na výše zmíněné potřeby a strategie byl iniciován projekt, 1.2.4 Rychlá automatická manipulace, jehož řešitelem bylo Brněnské pracoviště VCSVTT (Výzkumné Centrum pro Strojírenskou Výrobní Techniku a Technologii), v jehož návaznosti bylo zvoleno i téma mé disertační práce "PROBLEMATIKA RYCHLÉ AUTOMATICKÉ MANIPULACE U VÝROBNÍCH STROJŮ A ZAŘÍZENÍ". Toto bylo z důvodu rozsáhlosti v průběhu řešení upřesněno na: „PROBLEMATIKA RYCHLÉ AUTOMATICKÉ VÝMĚNY NÁSTROJŮ U OBRÁBĚCÍCH STROJŮ“.

2 CÍL A METODIKA DOKTORSKÉ DISERTAČNÍ PRÁCE

Z provedených rešerší problematiky automatizace obráběcích center vyplývá, že klíčovou roli v minimalizaci vedlejších časů a tím i nevýrobních nákladů hraje především automatická výměna nástrojů. Tento automatizační prvek představuje rovněž nemalou položku v celkových pořizovacích nákladech na stroj. Je tedy žádoucí této problematice věnovat dostatečnou pozornost a řešit jak zvyšující se

nároky na rychlost výměny, tak i nároky na snižování pořizovacích nákladů automatické výměny nástrojů (dále jen AVN). Klíčovým prvkem, který nejzásadnějším způsobem ovlivňuje jak parametry AVN, tak i cenu, je manipulátor, a právě proto je cílem této práce řešení problematiky tohoto klíčového uzlu AVN.

Cíl práce

Stěžejním cílem disertační práce je vytvoření nové modulární koncepce manipulátoru automatické výměny nástrojů za pomoci moderních vědeckých metod. Tento manipulátor by měl svými parametry dosahovat minimálně srovnatelných parametrů současných řešení (založených převážně na mechanismu užívajících kombinaci globoidní a radiální vačky). Tyto parametry budou ověřeny pomocí simulačních modelů a předpokládá se i experimentální ověření některých dílčích výsledků.

Snahou této práce je však vytvořit takovou koncepci zařízení, která by zajišťovala její technologickou dostupnost pro běžné firmy, tedy není nutno speciálních výrobních technologií pro výrobu komponent, jako je např. globoidní vačka. Snahou řešení je navrhnout konstrukčně jednoduchý a funkčně spolehlivý mechanismus, který bude z ekonomického hlediska dostupný, a tím docílit eliminace závislosti na tradičních výrobcích AVN (např. Miksch, GIFU, atd.)

3 AUTOMATICKÁ VÝMĚNA NÁSTROJE

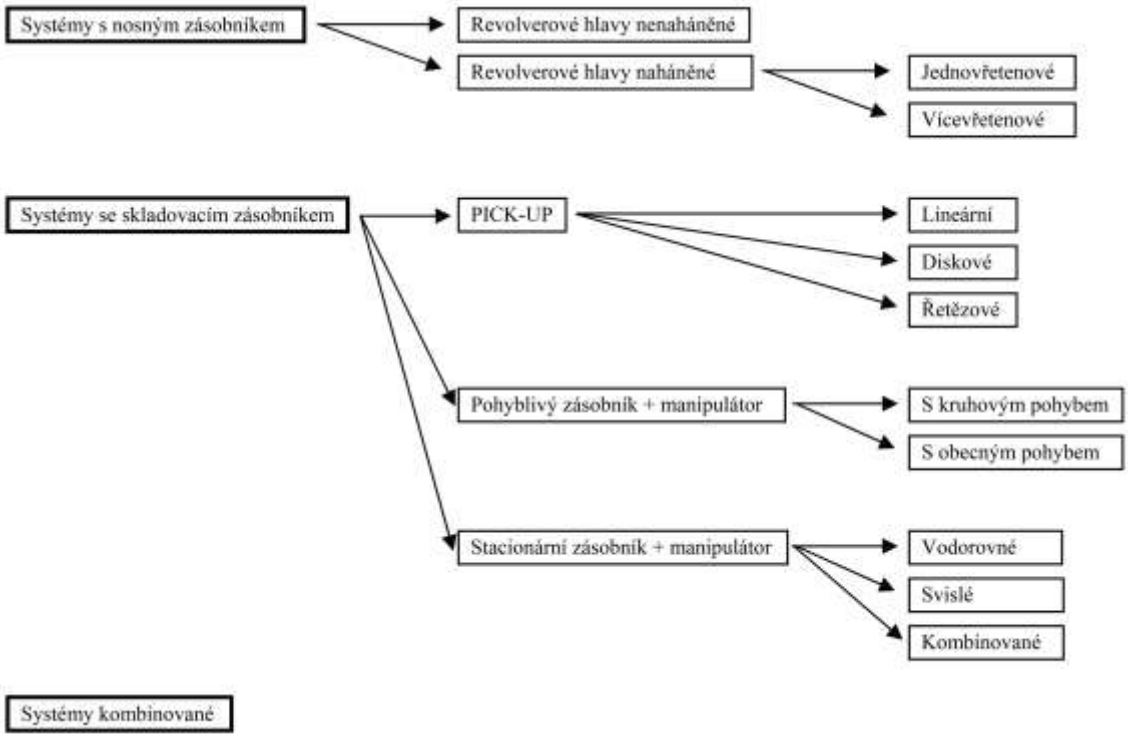
Automatická výměna nástrojů je nejtypičtějším představitelem automatické manipulace u výrobních strojů a zařízení. Je to především proto, že její aplikace na výrobní zařízení má nejvýraznější vliv na zkrácení vedlejších časů a zautomatizování výrobního procesu. U malých výrobků zkracuje zejména vedlejší časy a u velkých umožňuje stroji dále samostatnou práci bez nutnosti lidské obsluhy.

Oproti ostatním automatizačním prvkům, je vliv AVN na neproduktivní časy výraznější, a to především z důvodu toho, že je frekvence výměn nástroje podstatně větší než např. počet výměn obrobku. Je to dáno hlavně moderní koncepcí univerzálních obráběcích center, která jsou schopna provést velké množství technologických operací na jedno upnutí obrobku, což sebou přináší i zvýšené požadavky na počet typů nástrojů v zásobníku stroje.

V závislosti na potřebách jednotlivých výrobních strojů a zařízení se vyvinulo velké množství typů automatických výměn nástrojů, které se od sebe odlišují jak principiálně, tak i konstrukčním řešením jednotlivých výrobců. Jako základní a zcela univerzální lze využít následujícího dělení:

- systémy s nosným zásobníkem
- systémy se skladovacím zásobníkem
- systémy kombinované

Systémy AVN můžeme dělit podle konstrukčního principu zásobníku:



Obr. 1: Rozdělení v současnosti užívaných AVN

4 SOUČASNÁ ŘEŠENÍ AUTOMATICKÉ VÝMĚNY NÁSTROJŮ

Jak již bylo zmíněno, cílovou oblastí pro AVN, kterými se tato práce zabývá, jsou obecně stroje z kategorie frézovacích center. Pro snazší identifikaci skupin strojů stejných nebo podobných vlastností je třeba si zavést třídění, které je možné provést a to podle několika základních kritérií. Podle velikosti (zahrnuje komplexní charakteristiky stroje jako je výkon vřetene, velikost pracovního prostoru, velikost nástrojového rozhraní atd.): malá, střední, velká. Podle polohy vřetene: horizontální, vertikální. Dále je možné provést rozdělení frézovacích center na základě konstrukčního uspořádání, typu nástrojového systému, počtu os, typu řízení, typu odměřování, typu pohonů os a vřetene atd. Z hlediska identifikace markantů (z pohledu AVN) jednotlivých skupin strojů je však postačující třídění podle velikosti (malé, střední a velké) a orientace vřeteníku. Charakteristiky strojů zapadající do těchto jednotlivých skupin totiž předurčují nejen oblast využití daného typu stroje, ale rovněž i požadavky na AVN.

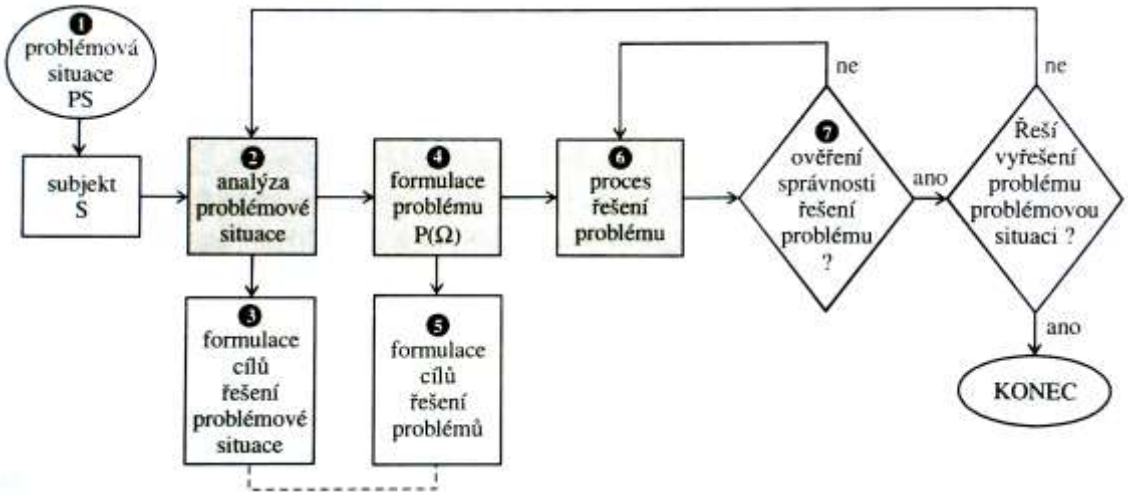
V rámci disertační práce byla provedena poměrně rozsáhlá rešerše, a to jak výrobců strojů, tak i výrobců AVN. Z této rešerše jednoznačně vyplynulo dominantní postavení manipulátorů využívajících globoidní vačky. Jedná se tedy o zařízení vyžadující pro svoji výrobu značně pokročilých technologií, které nemůžeme považovat za běžně dostupné.

Series	Linear stroke (mm)	Max change arm centres (mm)	Max. tool weight (kg)	Max. stat. torque Ms (N.m)	Max. axial force Fa (N)	Time of cycle (s)	Installed Power (kW)	Lubr. (dm^3)	Mass (kg)
CUT 31	85 60	600	5	105	600	See selection diagrams	0.18	4.5	38
CUT 41	110 60	700	10	215	1400		0.37	7.2	65
CUT 51	165 85	800	20	415	2100		0.75	13	130

Obr. 2: Přehled manipulátorů typu CUT firmy Miksch [11]

5 ANALÝZA PROBLEMATIKY AVN

Důkladný rozbor a pečlivě provedená systémová analýza je jedním ze základních kamenů, jež nám umožní správně problém definovat a tím ho úspěšně řešit. Umožňuje nám komplexně postihnout danou problematiku při zachování srozumitelnosti a struktury celého systému na dané rozlišovací úrovni.



Obr. 3: Struktura procesu řešení problémové situace [3]

Obr. 3 popisující proces řešení problémové situace názorně dokládá důležitost procesu analýzy problémové situace. Správnost provedení této analýzy ovlivňuje jak formulaci samotného systému $\sum(\Omega)$, tak i problému $P(\Omega)$. Správnost těchto počátečních etap řešení problémové situace však zásadním způsobem ovlivňují proces řešení a tím i relevantnost získaných výsledků. Nesprávná počáteční formulace problému nás tedy může zavést k řešení, které neřeší problémovou situaci. Je tedy žádoucí se soustředit na tyto počáteční etapy ve snaze docílit takového formulování problému $P(\Omega)$, který povede k vyřešení problémové situace. Je tím většinou docíleno jak časových, tak i především finančních úspor.

Systémová analýza a syntéza představují komplexní nástroj sloužící k důkladnému rozboru problémové situace reálného nebo abstraktního objektu, a to za pomocí algoritmizovaných a formalizovaných metod.

Na základě výše uvedeného je zřejmé, že prvním krokem řešení je formální vytvoření systému $\sum(\Omega)$, který bude v našem případě představovat abstraktní objekt tvořený jednotlivými prvky a systémem podstatných veličin. Je nutné si nejdříve ujasnit, které objekty budou v systému $\sum(\Omega)$ obsaženy a v návaznosti na to definovat systémem podstatných veličin.

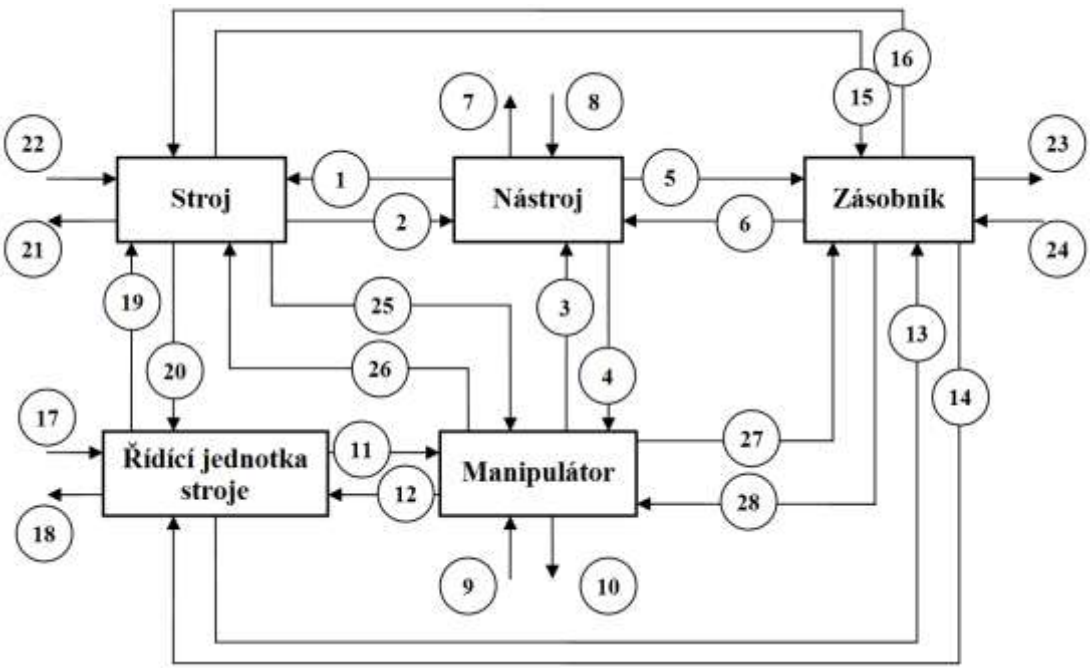
Definice podmnožin systému podstatných veličin **[3]**

Podmnožiny {S_i} vytváří tuto soustavu:

- ***Podmnožina S0*** – obsahuje veličiny v_0, popisující prvky okolí objektu; jsou to tzv. ***environmentální veličiny***.
- ***Podmnožina S1*** – veličiny v_1 komplexně popisují ***objekt***, tj. ***strukturu objektu, rozmístění (topologii; topografii) prvků*** objektu v prostoru a ***geometrii*** těchto prvků – lze je proto označit jako ***objektové veličiny***.
- ***Podmnožina S2*** – její veličiny v_2 popisují ***podstatné vazby*** objektu s jeho okolím $O(\Omega)$ a na nich probíhající ***interakce***, resp. vazby mezi jednotlivými podobjekty, na něž je objekt dekomponován. Popsat podstatné vazby vyžaduje vymezit i ***podstatné prvky okolí objektu***. Tyto veličiny lze označit jako ***vazbové veličiny***.
- ***Podmnožina S3*** – patří do ní ty veličiny v_3, které vyjadřují takovou ***aktivaci*** objektu Ω z jeho okolí, která na objektu vyvolává procesy. Veličiny v_3 lze označit jako ***aktivační veličiny*** nebo taky podněty či příčiny.
- ***Podmnožina S4*** – tato podmnožina obsahuje veličiny v_4, které působí z okolí na objekt a ovlivňují na něm probíhající procesy – lze je označit jako ***ovlivňující veličiny***.
- ***Podmnožina S5*** – patří sem veličiny v_5 vyjadřující ***vlastnosti prvků struktury*** objektu, na němž se řeší problém. Mohou to být vlastnosti geometrické, strukturní, fyzikální, mechanické, technologické, přičemž jednotlivá vlastnost může být vyjádřena i několika charakteristikami. Lze je nazvat jako ***strukturně-vlastnostní veličiny***. *Poznámka*: geometrické veličiny mohou být popsány i v podmnožině S1.
- ***Podmnožina S6*** – obsahuje veličiny v_6 popisující ***procesy*** probíhající na struktuře objektu, uvádějící objekt do různých ***stavů***, odlišných od stavů počátečních. Jsou to ***procesní veličiny*** a ***stavové veličiny***. Oboje se obvykle dávají do jedné podmnožiny, protože je mezi nimi úzká souvislost – stavy jsou důsledky procesů.
- ***Podmnožina S7*** – patří sem veličiny v_7 vyjadřující ***projevy (chování) objektu***, které odpovídají stavům, do nichž se objekt dostal tím, že na objektu proběhly určité procesy. Lze je označit jako ***projevové veličiny***.
- ***Podmnožina S8*** – zahrnuje veličiny v_8 popisující ***důsledky projevů*** objektu na jeho okolí nebo na něho samého. Pro tyto veličiny lze použít název ***důsledkové veličiny***.

5.1 OBECNÉ BLOKOVÉ SCHÉMA SYSTÉMU

Blokové schéma znázorňuje systém $\sum(\Omega)$ s jednotlivými objekty a vazbami, které se vyskytují v reálné soustavě. Tento systém bude níže popsán z hlediska systému vazbových veličin, kde bude rovněž řešeno, které vazby jsou pro řešení problému $P(\Omega)$ podstatné a které nikoliv.



Obr. 4: Zjednodušené schéma systému AVN

5.2 PROCES VÝMĚNY – KINEMATIKA PROCESU

Tato etapa, při níž dochází k realizaci samotné výměny nástrojů, je stěžejní částí celého procesu. Posloupnost jednotlivých pohybů, z nichž je tento proces sestaven, má vliv nejen na rychlost celého procesu, ale především na samotnou mechaniku manipulátoru, která tyto pohyby realizuje. Je tedy třeba s dostatečnou bedlivostí řešit nejen návrh celého sledu těchto pohybů, ale v návaznosti na to i způsob jakým budou tyto pohyby realizovány.

Pro uskutečnění procesu automatické výměny nástrojů (přímé výměny, kdy manipulátor realizuje výměnu mezi vřetenem a zásobníkem nebo pomocným manipulátorem) musí být realizováno několik dílčích pohybů, které pouze jako celek umožňují úspěšné provedení celého procesu. Jednotlivé etapy tohoto procesu je možno rozdělit následovně:

[1] uchopení nástroje/nástrojů

[2] přemístění nástroje/nástrojů

- vyjmutí nástroje z vřeteníku a zásobníku / pomocného manipulátoru
- realizace pohybu vedoucí k výměně obou nástrojů
- zasunutí nástroje do vřeteníku a zásobníku / pomocného manipulátoru

[3] uvolnění nástroje/nástrojů

Z hlediska realizace je možné konstatovat, že jednotlivé pohyby vedoucí k realizaci výměny budou tvořeny elementárními rovinnými pohyby, tedy translačním a rotačním pohybem. I když není pro realizaci těchto operací vyloučeno užití pohybu s obecnou trajektorií, je užití základních pohybů jak z hlediska konstrukčního řešení, tak i programování a řízení podstatně jednodušší. Tedy je vhodné preferovat jednodušší typy polohových transformací pro zachování jednoduchosti celého řešení.

Tabulka 1: Možné varianty pohybů a jejich vhodnost

Pořadí	Pohyb 1	Pohyb 2	Pohyb 3	Vhodnost
1	T	T	T	Ano
2	R	T	T	Ne
3	T	R	T	Ano
4	R	R	T	Ne
5	T	T	R	Ne
6	R	T	R	Ano
7	T	R	R	Ne
8	R	R	R	Ano

Podle výše uvedeného, je snahou realizovat všechny změny polohy pomocí základních rovinných pohybů jako je translace a rotace. Následující tabulka uvádí výpis všech možných uspořádání pohybů a zároveň udává vhodnost jednotlivých uspořádání pro další řešení.

Jak již bylo uvedeno, vhodnou kombinací mohou být především taková uspořádání pohybů, která jsou symetrická. Tedy první a třetí pohyb realizující výměnu musí být stejného typu. Podmínka symetrie je dána především snahou o docílení jednoduchosti mechanismu, která je v takovýchto případech dána užitím stejných prvků/uzlů pro realizaci první a třetí etapy pohybu. Jak již bylo několikrát uvedeno, existují speciální aplikace (některá řešení strojů s mimoběžnými osami vřetene a zásobníku, atd.), kdy je striktně zapotřebí řešení nesymetrické, ale taková řešení nebývají příliš častá, protože výsledné řešení manipulátoru bývá příliš komplikované.

5.3 FORMULACE ŘEŠENÉHO PROBLÉMU

Posledním krokem před samotným procesem řešení je etapa formulace problému, na jejímž základě je prováděno samotné řešení a zároveň slouží jako kriteriální podmínka pro ověření správnosti/relevance dosaženého řešení. Snahou je tedy pomocí co možná nejjednodušších, jednoznačných a snadno srozumitelných podmínek definovat nebo kvantifikovat daný problém. Snahou by mělo být dosažení optimálního počtu kritérií, která zbytečně neokleští možnosti kreativního přístupu k danému problému, nebo v opačném případě nesmějí být vágní a nejednoznačná

vedoucí k výslednému řešení, které sice splňuje tyto podmínky, ale nesplňuje reálné požadavky.

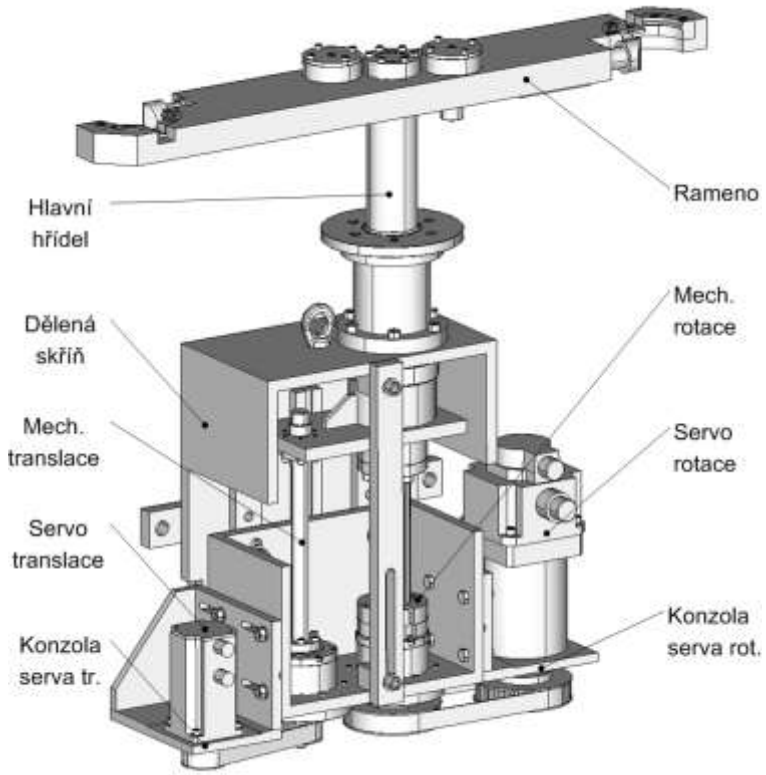
- spolehlivá funkce a velká životnost
- nízká výrobní / pořizovací cena
- rychlost výměny (podle velikosti nástroje)
- jednoduchá konstrukce (především kinematického uspořádání mechanismu) a snadná vyrobitelnost komponent
- modularita zařízení – pro různé velikosti a typy rozhraní
- zařízení musí být dále navrženo tak, aby v době své nečinnosti nezasahovalo do pracovního prostoru stroje, a tím ho omezovalo
- zařízení by dále mělo být chráněno před nečistotami z pracovního prostoru stroje
- zařízení musí být opatřeno dostatečným krytování, nebo musí mít takové uspořádání, aby při plnění své funkce neohrožovalo obsluhu
- ekologický provoz a energetická nenáročnost
- jednoduchá montáž, servis a údržba
- bezproblémová likvidace a recyklace

6 DETAILNÍ ŘEŠENÍ JEDNOTLIVÝCH VARIANT

6.1 STAND STD-25

Jedná se o zařízení sloužící k realizaci experimentálních zkoušek v oblasti vývoje a výzkumu AVN systémů. Návrh konstrukčního řešení zkušebního standu vychází z inspirace spoluprací na vývoji reálného systému AVN realizované Brněnským pracovištěm VCSVTT a jedním z českých výrobců obráběcích strojů. V rámci zapojení ve VCSVTT a řešení tématu disertační práce jsem byl pověřen konstrukčním návrhem tohoto standu, a to včetně odměřovacího subsystému.

Sand je navržen jako snadno modifikovatelný, umožňující experimenty s uplatněním různých způsobů pohonu, převodů a řízení manipulačních pohybů. Nejsme omezeni pouze na jeden typ pohonu či kinematického uspořádání. Vhodnou volbou konstrukce je dosaženo velké univerzálnosti tohoto zařízení. Pro realizaci experimentů s jiným typem pohonů, nebo částečně i kinematického uspořádání je možno použít značnou část, především složitějších komponentů (dělená skříň, rameno, hlavní hřídel, atd.). Tím je docíleno velkého potenciálu zařízení pro realizaci experimentů i do budoucna.



Obr. 5: 3D návrh manipulátoru STD-25

Indikace polohy pomocí integrovaných snímačů nám bohužel neposkytuje žádné informace o reálné poloze potřebné pro sestavení dostatečně přesného simulačního modelu translačního pohybu, proto pro měření těchto veličin bude stand oproti skutečnému manipulátoru vybaven odměřovacím subsystémem, který nám poskytne komplexní informace o přesné poloze, rychlosti a zrychlení ramene manipulátoru při translaci.

6.1.1 Experimentální zkoušky STD-25

Experimentální zkoušky prováděné na standu STD-25, které již přinesly relevantní data, a tedy již nesloužila k prostému ověření funkce, byla realizována v několika fázích. První dvě fáze popsané výše můžeme v současnosti považovat za zcela standardní operace prováděné na všech zařízeních využívajících servopohonů, proto se jejich popisu nebudu věnovat. Zajímavá a naprosto zásadní se však jeví fáze třetí, zaměřená na plánování a realizaci experimentálních zkoušek na standu STD-25.

Výsledkem celého tohoto snažení bylo získání komplexních charakteristik a dat o chování manipulátoru, která by umožnila provedení verifikace simulačních modelů vytvářených v prostředí MSC.Adams. Několik následujících obrázků prezentuje příklady získaných experimentálních dat.

Tabulka 2: Orientační tabulka času výměny v závislosti na hmotnosti nástroje

Hmotnostní třída	Celková hmotnost nástrojů dané třídy [kg]	Průměrný čas výměny [s]
1	14	4,25
2	20	4,95
3	26	5,3

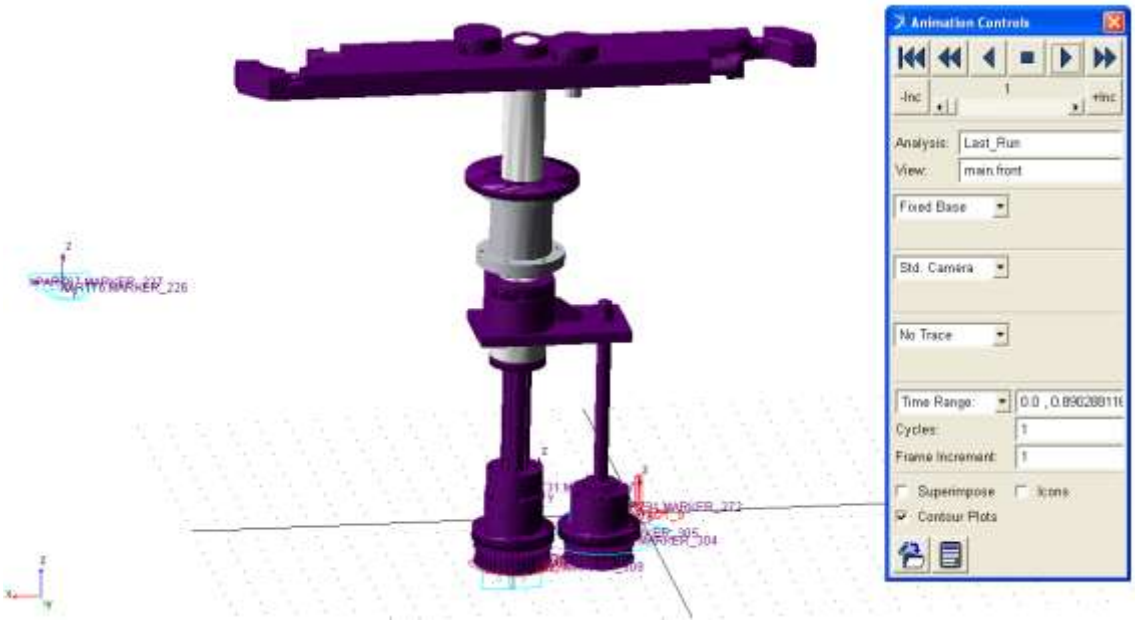
Tabulka 3: Orientační tabulka dosahovaných přesností polohování rotačního a translačního pohybu

Typ pohybu	Opakovatelná přesnost najeti do polohy [mm]
translace	0,37
rotace	2,5

Při analýze dat bylo dále detekováno několik neduhů týkajících se jak projevů samotného konstrukčního řešení, tak i nedokonalostí v řízení (nastavení PID regulátoru)

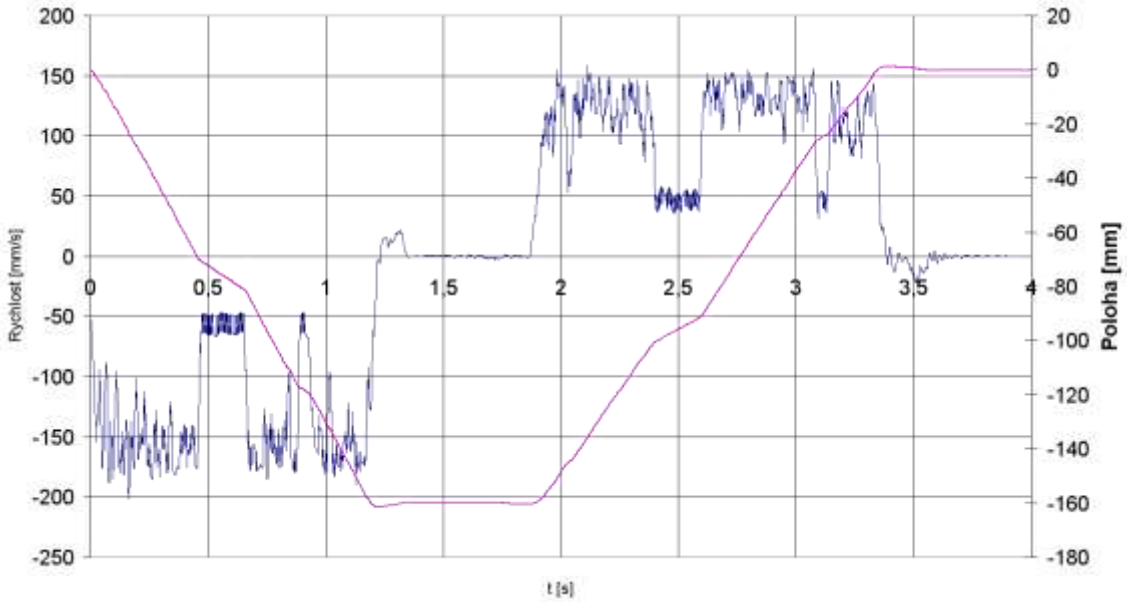
6.1.2 Simulační model a jeho verifikace

Vytvoření simulačního modelu a jeho verifikaci můžeme považovat za jednu ze stěžejních částí práce. Nejedná se pouze o ověření shodnosti výsledků reálných a teoretických, ale jedná se o celý komplex poznatků, zkušeností a dovedností, jež musely být při získávání praktických experimentálních, tak i teoretických dat vynaloženy a získány.

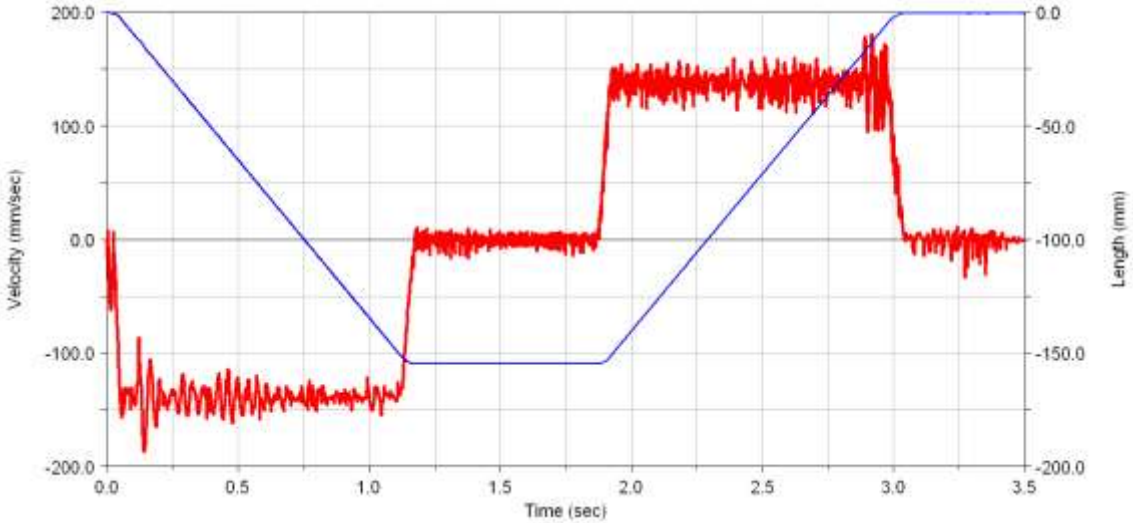


Obr. 6: Prostředí MSC.ADAMS s jedním z používaných modelů

Následující dvojice obrázků prezentuje v prvním případě průběhy naměřených veličin translačního pohybu a v druhém pak veličiny spočítané za pomocí simulačního modelu.



Obr. 7: Průběh polohy translace (fialová [mm]) a rychlosti translace (modrá [mm/s]) v závislosti na čase reálného zařízení

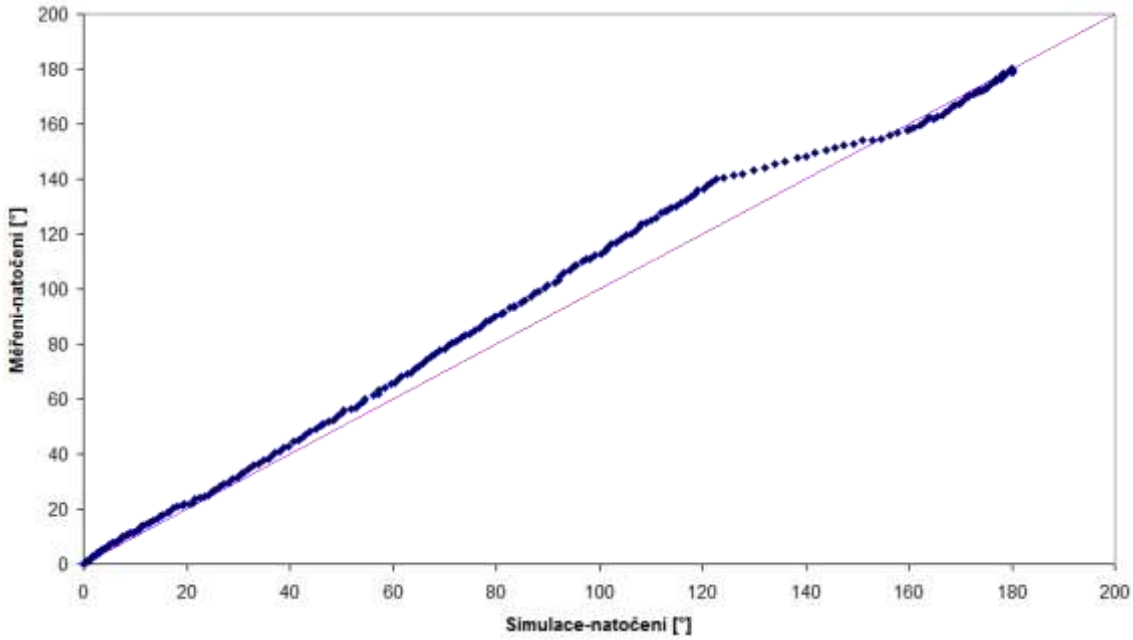


Obr. 8: Průběh polohy translace (modrá [mm]) a rychlosti translace (červená [mm/s]) v závislosti na čase simulačního model

Verifikace, nebo také ověření simulačního modelu, je založeno na porovnávání hodnot skutečných - naměřených na reálném zařízení a hodnot vypočítaných modelem. Za tímto účelem byla použita celá řada statistických metod.

- Rozptylový diagram
- Korelační koeficient
- Vychýlení

- Normalizovaná střední kvadratická odchylka
- Procentuální shoda



Obr. 9: Rozptylový diagram úhlového natočení ramene manipulátoru simulační model – reálné zařízení

Korelační koeficient reprezentuje podobnost dvou datových souborů. Jestliže S reprezentuje soubor vypočtených dat a M data získaná z experimentálních zkoušek, bude korelační koeficient r roven:

$$r = \frac{\sum_{i=1}^{n}\left(M_i - \overline{M}\right)\cdot\left(S_i - \overline{S}\right)}{\sqrt{\sum_{i=1}^{n}\left(M_i - \overline{M}\right)^2 \cdot \sum_{i=i}^{n}\left(S_i - \overline{S}\right)^2}} \qquad (1)$$

Na základě výpočtu byla obdržena hodnota korelačního koeficientu 0,9856. Na základě Studentova rozdělení byla stanovena kritická hodnota korelačního koeficientu 0,257 na hladině významnosti α=0,05. Z porovnání hodnot vyplývá, že porovnávané veličiny jsou závislé.

Procentuální shoda vyjadřuje míru překrytí mezi naměřenými a vypočítanými hodnotami.

$$FM = 100 \cdot \frac{\sum_{i=1}^{n}\min\left(M_i, S_i\right)}{\sum_{i=1}^{n}\max\left(M_i, S_i\right)} \qquad (2)$$

Při FM = 100 % je shoda absolutní. V našem případě hodnota 90,97% reprezentuje rovněž dobrou shodu simulačního modelu s experimentálně získanými daty. Analogicky bylo postupováno při ověřování dalších variant simulačních modelů.

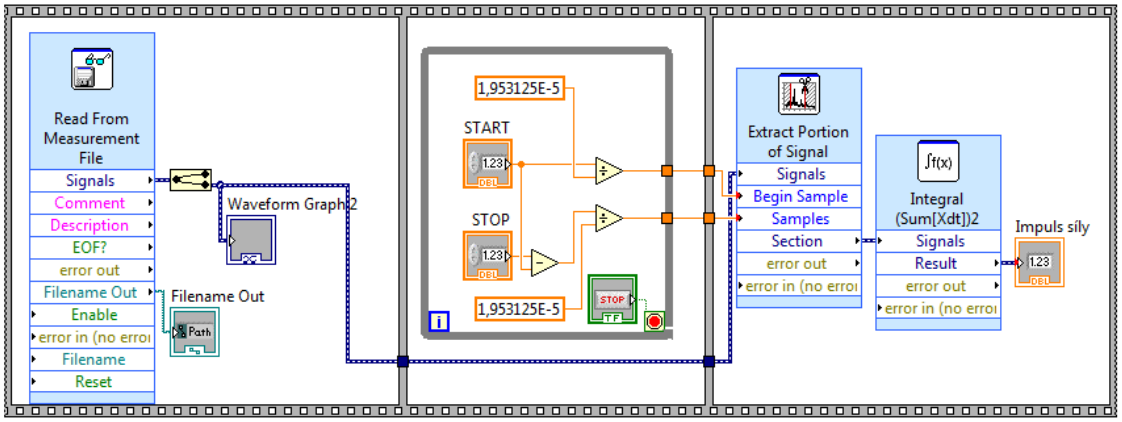
Jak již bylo zmíněno, ladění a výsledná verifikace simulačních modelů byla otázkou dlouhodobých experimentálních zkoušek. Tyto ve výsledku vedly k dosažení vhodných parametrů modelů, které zajišťovaly dostatečnou shodu s reálným zařízením. Tento fakt byl potvrzen též za pomoci statistických metod, a to nejen pro výše uvedené konkrétní příklady, ale i pro celé spektrum dat, která byla při experimentech a tvorbě simulačního modelů shromážděna.

6.1.3 Problematika rázu do vřetene

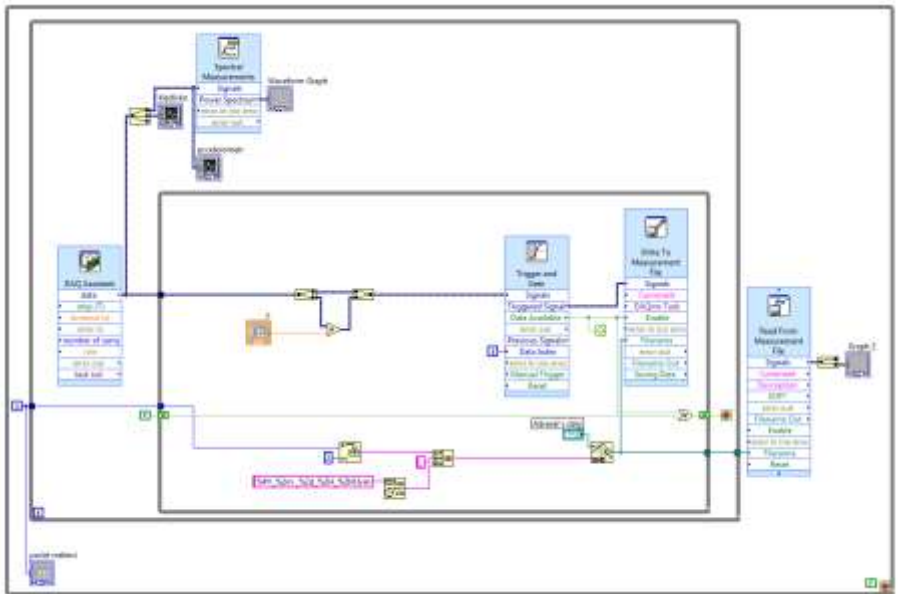
Při realizaci experimentálních zkoušek na standu STD-25 byl zjištěn zajímavý postřeh týkající se problematiky související se silovým působením ramene manipulátoru na nástroj, potažmo vřeteno. Přesněji řečeno, na základě pozorování bylo zjištěno, že rameno klasické konstrukce (zasekávacího typu s aretačním palcem) generuje při uchopování nástroje značné rázy, které mohou potenciálně poškozovat ložiskové skupiny vřeteníku.

K zaseknutí nástroje ramenem a překonání odporu palce je využíváno rovněž i kinetické energie pohybujících se částí manipulátoru. Z toho plyne i důležitý poznatek. Aby bylo možné tuto energii potřebnou pro překonání síly aretačního palce využít, je třeba, aby rameno v okamžiku kontaktu nástroje a palce mělo dostatečnou rychlost a tedy i energii.

Pro experimentální určení velikosti kontaktních sily bylo užito aparatury pro měření modálních vlastností materiálů. Z finančních důvodů však bylo zapotřebí provést kalibraci akcelerometrů svépomocí. Proto bylo z naší strany přistoupeno k vývoji vlastních kalibračních prostředků, jež zajistí v dostatečné přesnosti kalibraci námi používaných snímačů. Snahou bylo vytvořit jednoduchá zařízení umožňující kalibraci snímačů s minimálními náklady a s velkou přesností. Na realizaci zařízení pro kalibraci se dále podíleli kolegové Ing. Miroslav Opl a Ing. Michal Holub.



Obr. 10: Struktůra programu pro integraci impulsu síly



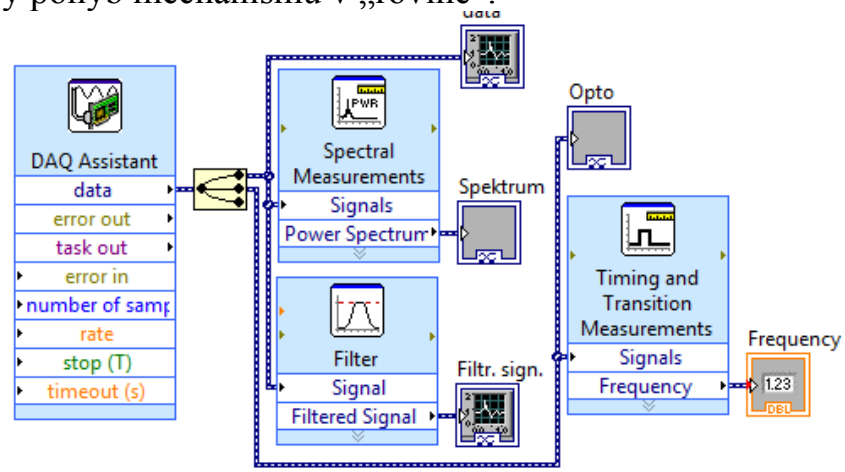
Obr. 11: Program v prostředí LabView pro sběr dat z kladívka

Měření založené na využití balistického kyvadla je zatíženo několika chybami, spočívajícími v nejistotě určení některých parametrů, jako je například délka kyvadla (není přesně známá poloha těžiště) a úhel výkmitu kyvadla. Ostatní parametry, tedy hmotnost kyvadla a tíhové zrychlení je možno zjistit nebo změřit velice přesně.

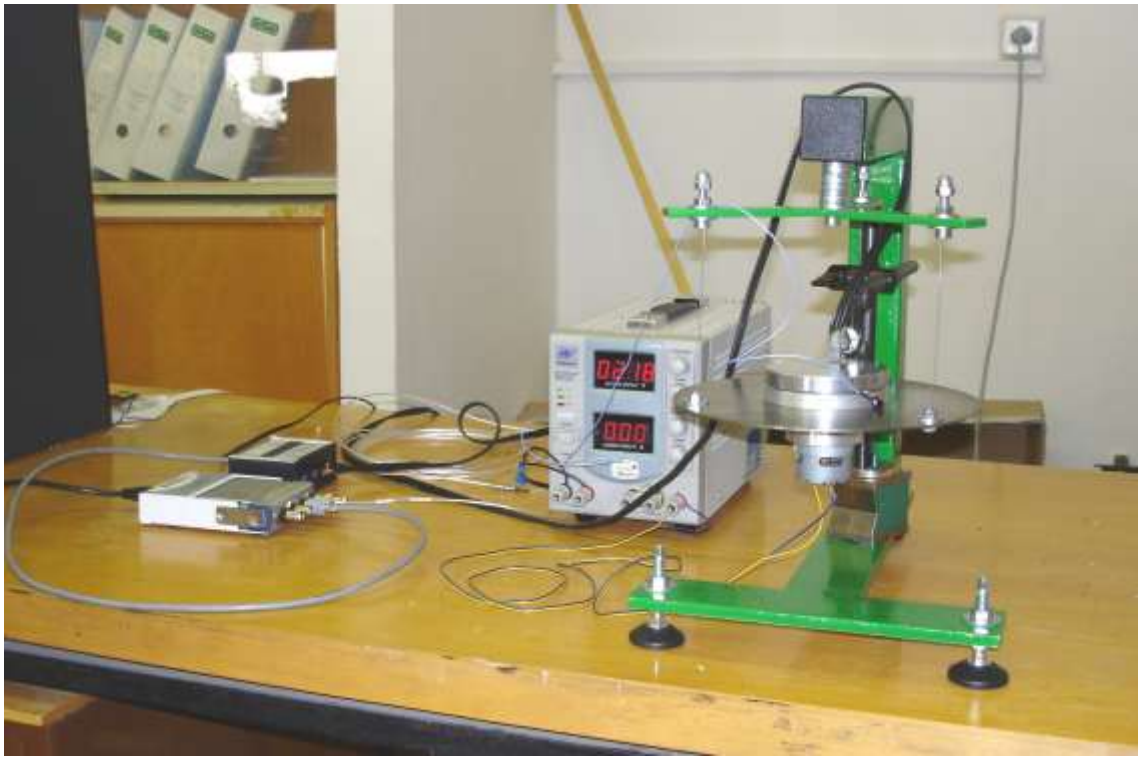
Obr. 12: Pohled na realizaci klibračního zařízení při měření doby kyvu

V rámci experimentů, jež na tomto kalibračním zařízení probíhaly, bylo dosaženo velice dobrých výsledků. Kalibrace snímače modálního kladívka proběhla s výslednou chybou cca do 3%. Ve srovnání s finančními náklady na realizaci, které se pohybovaly v řádu několika set korun, představuje dosažený výsledek velký úspěch.

Druhou metodou pro kalibraci snímačů s menším rozsahem je užití harmonického generátoru. Tedy rotujícího kotouče s přesně definovanou nevývahou. Zařízení se skládá z disku, v němž je uložen motor nahánějící rotující kotouč. Tento disk je zavěšen na trojici dostatečně dlouhých a poddajných táhel, které umožňují bezproblémový pohyb mechanismu v „rovině“.



Obr. 13: Program pro sběr dat u klibračního zařízení s rotujícím kotoučem

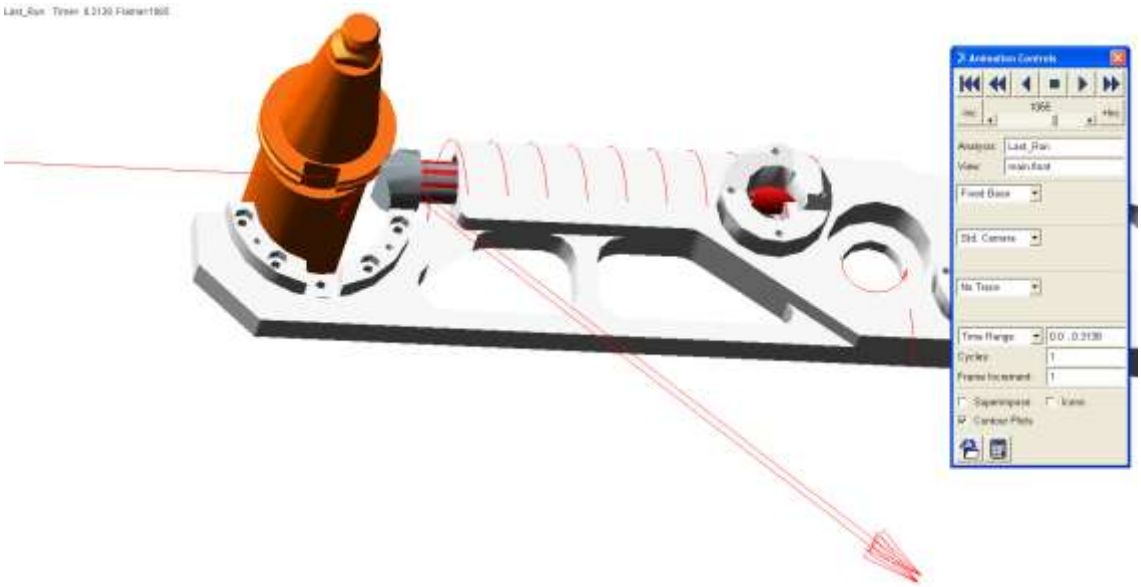


Obr. 14: Pohled na realizaci klibračního zařízení s rotujícím kotoučem

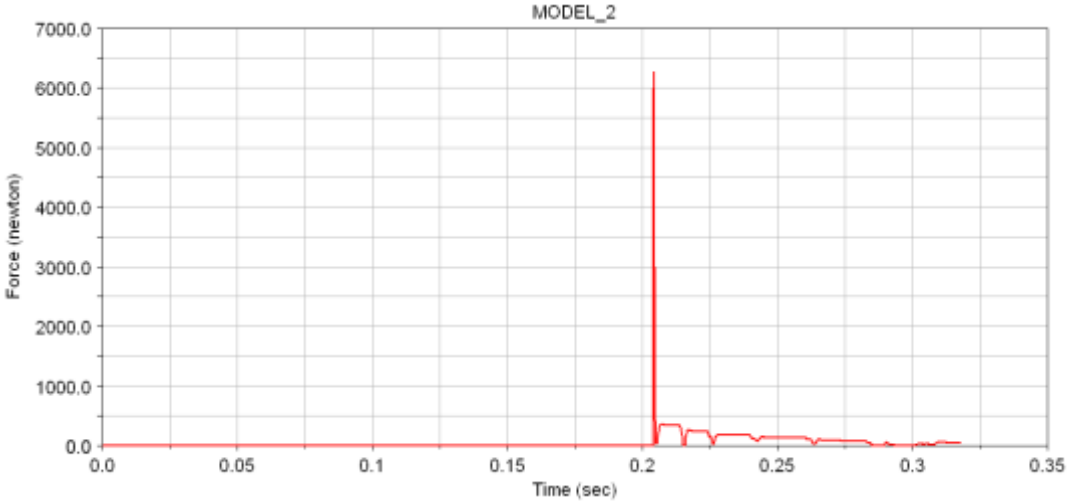
Nepřesnosti určení nevývahy, celkové hmotnosti mechanismu a úhlové rychlosti bylo dosaženo při opakovaných experimentech celkové chyby kalibrace snímače cca 2%. Opět i tento výsledek je upokojivý.

Simulace rázového děje

Na základě ověření funkčnosti modelů byla rovněž sestavena i pro řešení této problematiky simulace, jejíž snahou byla predikce velikosti silového působení při uchopení nástroje ramenem manipulátoru. Tento simulační model navázal na data získaná z předchozích experimentů a v dostatečné míře uplatnil hojně využívaných vazeb typu Contact.



Obr. 15: Průběh simulace s vizualizací kontaktní síly (normálné i třecí síly)



Obr. 16: Simulace púrůběhu rázu – síla v kontaktní vazbě

Na základě realizovaných simulací bylo dosaženo maximální kontaktní síly 6300N, která působí na nástroj a tím tedy ve výsledku i na vřeteník. Velikost této

síly je však pomocí výše uvedeného vybavení velice obtížně zjistitelná, proto bylo přistoupeno k tomu, že bude realizováno měření porovnávající velikosti impulsu síly a velikosti odezvy. Na základě těchto poměrů bude následně usuzována velikost budící síly. Jedná se o poměrně zjednodušující model, ale pro požadovaný účel zcela vyhovující.

Experimentální měření rázového děje

Experimenty probíhaly tak, aby co nejvěrněji simulovaly reálný stav u stroje. Byly prováděny postupně dvojice sad měření. První zaznamenávala za pomocí akcelerometru umístěného na stojanu rázy vyvolané manipulátorem - ramenem uchopujícím nástroj a druhá série vyvolávala buzení za pomocí rázového kladívka. Vše bylo pomocí měřící aparatury zaznamenáno a uloženo pro další zpracování.

Tabulka 4: Tabulka naměřených rázů od kladívka a dopočtené síly

Měření	Max síla [N]	Impuls [N.s]	Amplituda [g]	Poměr amplitud	Vypočtená síla
1	3935	0,476751	6,6	1,893939	7452,652
2	5040	0,603992	7,4	1,689189	8513,514
3	3320	0,410835	8,5	1,470588	4882,353
4	3572	0,454794	7,4	1,689189	6033,784
5	3260	0,427727	5	2,5	8150
					(Σ/n) 7006,46

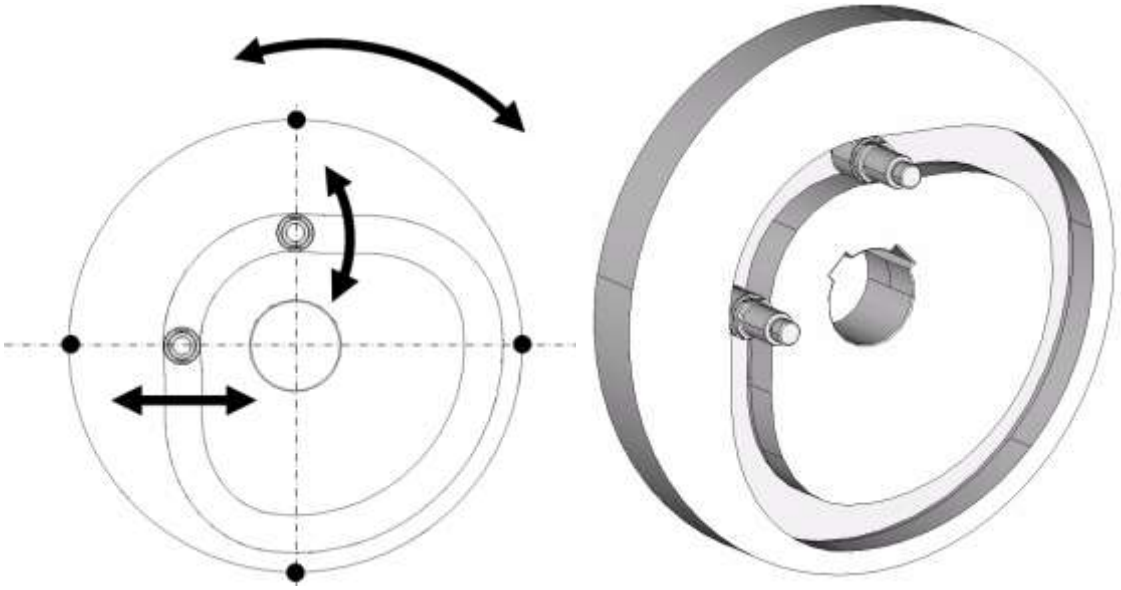
Vyhodnocení výsledků a vyplývající doporučení

Jak již bylo zmíněno, s dostupnými prostředky není jednoduše možné přesněji identifikovat sílu vznikající při uchopování nástroje ramenem manipulátoru, ale jako orientační parametr pro identifikaci možných příčin poškozování ložiskových skupin je tato metoda dostačující. Ač se najedná o síly, které by u většiny strojů překračovaly dovolené zatížení vřetene, je v tomto případě nutno dbát zvýšené pozornosti především na fakt, že vřeteno v okamžiku výměny nástroje stojí, jde tedy o statické zatěžování. Má vždy stejně orientované kroužky ložisek, což ve výsledku znamená cyklické namáhání jednoho místa na vnitřním i vnějším kroužku ložiska. Další nebezpečnost tkví rovněž v rychlosti náběhu působící síly, kdy je maxima dosaženo během 0,5ms. Je nutno podotknout, že tato problematika je otázkou především strojů opatřených velmi rychlou automatickou výměnou nástrojů.

Ukazuje se tedy, že zajímavou oblastí dalšího vývoje jsou nejen řešení založená na využití servopohonů, jež umožňují plynulé řízení dráhy, pomocí jejíž optimalizací je možné omezit silové působení na vřeteno. Dále se pak otvírá oblast vývoje nových systému uchopování a aretace nástrojků v rameni, které by svojí konstrukcí zamezovaly vzniku těchto sil. Nové směry ve vývoji v této oblasti je možno spatřit viz Příloha - Patentová rešerše.

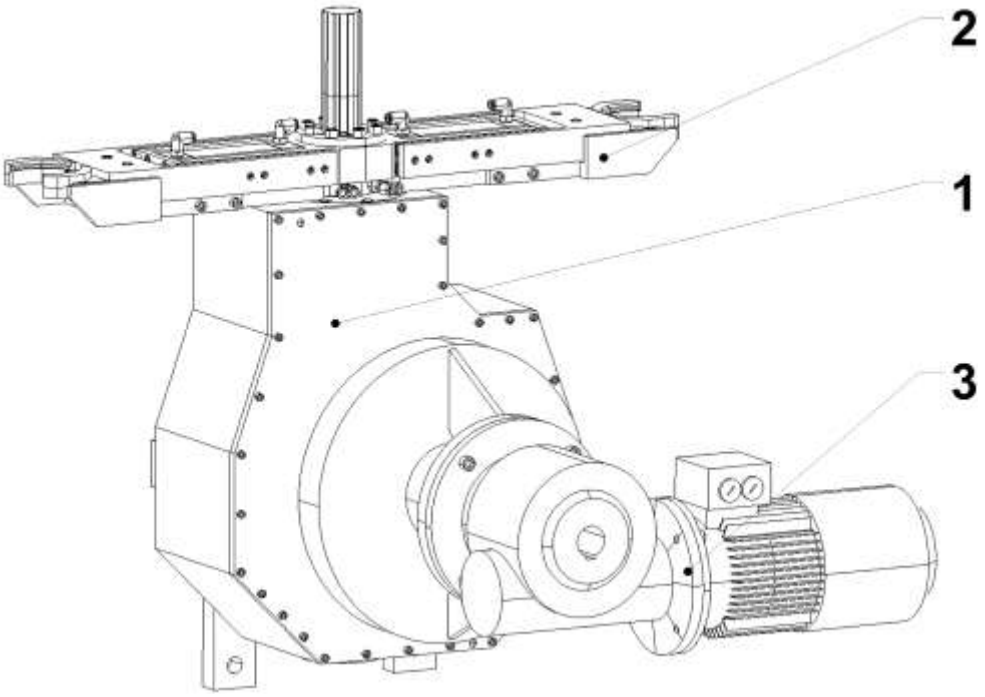
6.2 VAČKOVÝ STAND

Na základě rozsáhlé rešerše a informací získaných při návštěvách tuzemských i zahraničních veletrhů je možné konstatovat, že v konstrukci AVN se ustálila určitá konstrukční řešení. Mezi nejrozšířenější můžeme zařadit konstrukci založenou na využití dvouvačkového mechanismu (radiální vačka pro realizaci translačního pohybu, globoidní vačka pro realizaci rotačního pohybu, popřípadě dvojice globoidních vaček). Je tedy zřejmé, že takovéto řešení užívající tvrdé automatizace má mnoho výhod a to například rychlost, přesnost, spolehlivost a velkou životnost. Oproti zmíněným výhodám má zároveň nevýhodu, která je dána velkou náročností na výrobu a ta se následně odráží ve vyšší ceně zařízení. Výroba globoidních vaček v dostatečné přesnosti je velice náročná a vyžaduje využití speciálních obráběcích strojů, popřípadě jednoúčelových zařízení. Myšlenka eliminace globoidní vačky z konstrukce AVN je tedy logickou cestou, jak zpřístupnit a zlevnit výrobu těchto zařízení. Před několika lety byla na toto téma řešena diplomová práce, v níž byl pohyb manipulátoru realizován za pomoci několika radiálních vaček. Řešení se tehdy dobře zhostil Ing. Stonavský [4], kterému dělal vedoucího práce prof. Ing. Zdeněk Kolíbal, CSc. Na jeho práci navázal v roce 2006 Ing. Pavel Badin [5], který tuto koncepci pod mým vedením dále rozpracoval a navrhl řešení využívající jednu vačku. Práce obou zmiňovaných kolegů posloužila jako odrazový můstek pro vývoj nového vačkového standu, na kterém se dále podílely kolegové prof. Ing. Zdeněk KOLÍBAL CSc, doc. Ing. Petr BLECHA Ph.D., Ing. Radim BLECHA Ph.D., Ing. František BRADÁČ Ph.D.. Hlavní myšlenkou celého problému je odstranění globoidní vačky a nahrazení její funkce vačkou radiální, která bude sloužit jak pro realizaci rotačního pohybu ramene, tak i pro realizaci translačního pohybu ramene. Řešení je realizováno pomocí radiální drážkové vačky a dvou palců, které jsou v drážce oproti sobě posunuty o 90°. Tím je dosaženo možnosti rozfázování jednotlivých pohybů kladek, které dále zajišťují pohyb ramene.



Obr. 17: Vačka s dvojicí palců, vyznačen směr realizace pohybů palců

Z koncepce je dále patrné, že kvůli zachování jednoduchosti drážky vačky nemůže za pomocí tohoto řešení dojít k realizaci složitého pohybu výměny jako vačky globoidní (zastavování ve více mezipolohách). Navrhované řešení umožňuje realizaci pohybů ve čtyřech fázích, kdy každá dvojice vykonává vratný pohyb, a to buď rotační, nebo translační. Tento fakt nás tedy limituje v možnosti volby způsobu uchopení nástroje. Nemožnost realizovat uchopení nástroje za pomocí rotačního pohybu a snah zachovat manipulátoru možnost současného uchopení nástroje ve vřetenu a zásobníku byla důvodem, proč bylo přistoupeno k vývoji teleskopického ramene.



Obr. 18: Celkový pohled na jednovačkový manipulátor

6.2.1 Experimentální zkoušky

Jelikož se jedná o zcela nové zařízení, bylo zapotřebí odladit některé nedostatky, které se vyskytly již krátce po uvedení zařízení do provozu.

Jak již bylo zmíněno výše, konstrukce manipulátoru je řešena za pomocí prvků tvrdé automatizace. Tedy z hlediska experimentálních zkoušek se měření opakovatelné přesnosti jeví jako nezajímavé. Jako důležitější se však ukázala oblast experimentů týkajících se zkoušek životnosti komponent manipulátoru a dále pak rychlostní zkoušky zaměřené na vytipování optimálních ramp náběhu, doběhu a maximální rychlostí pohonu ve vztahu k namáhání komponent manipulátoru.

Při hledání optimálních parametrů náhonu bylo dosaženo celkové rychlosti manipulace cca 4,5 s, což zcela koresponduje s běžnými manipulátory (dané třídy) s kterými se v současnosti můžeme na trhu setkat. Tento čas je však dosažen na prototypu, který disponuje mnoha nedostatky a není zcela optimalizován. Výsledný

čas, kterého by podle odhadů bylo možno za pomoci plné optimalizace dosáhnout, se blíží času cca 3s.

Celkový počet cyklů, který manipulátor během testů provedl, byl cca 1700. Po skončení testovací fáze byla provedena demontáž některých komponentů (např. vačka, vodící kladky, hřeben apod.). Po jejich důkladném očištění byly tyto komponenty dále důkladně zkoumány z hlediska zjištění poškození vlivem opotřebení a únavy, jež mají nejzásadnější vliv na celkovou životnost mechanismu. Při této prohlídce nebylo zjištěno vážnějších poškození způsobených provozem. Mírná otlačení v oblasti změny zakřivení dráhy byly pozorovány na hlavní vačce.

6.2.2 Ochrana duševního vlastnictví

Jednoduchost a unikátnost navrženého řešení vedla k tomu, že byla navázána spolupráce s Útvarem transferu technologií na VUT v Brně, který zprostředkoval a finančně podpořil podání patentové přihlášky a přihlášky o udělení užitného vzoru. V roce 2010 byl udělen a uveden v platnost užitný vzor. Patentové řízení nadále pokračuje. Kompletní výčet autorů podílejících se na vývoji a podání užitného vzoru a patentové přihlášky: Ing. Jan PAVLÍK, Ing. Pavel BADIN, prof. Ing. Zdeněk KOLÍBAL CSc, doc. Ing. Petr BLECHA Ph.D., Ing. Radim BLECHA Ph.D., Ing. František BRADÁČ Ph.D.

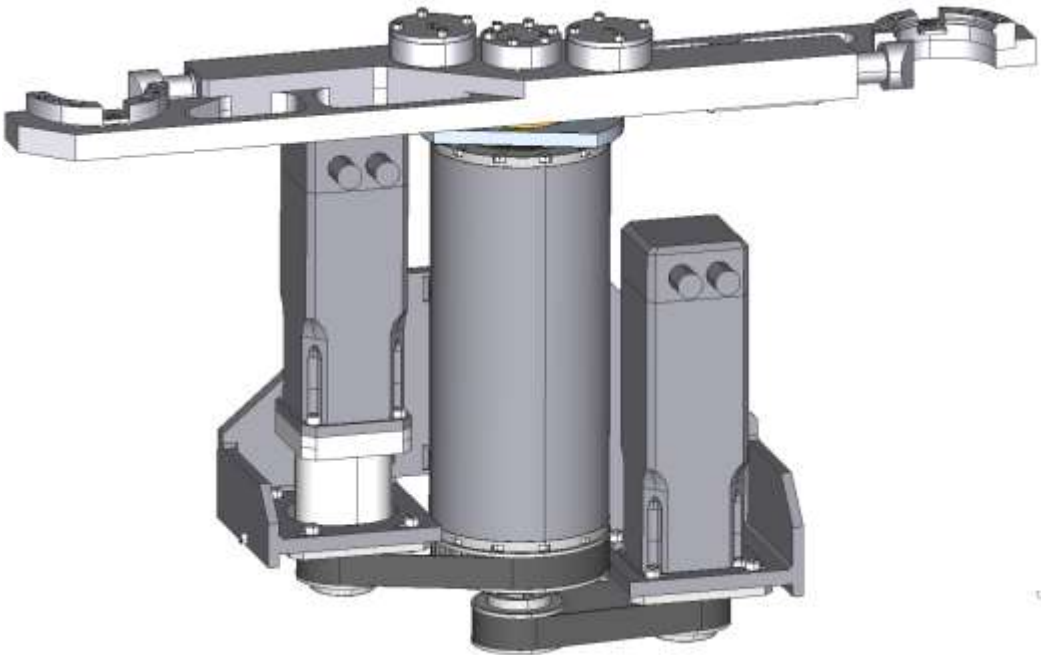
6.3 KOMPAKTNÍ MANIPULÁTOR AVN

Na základě poznatků a zkušeností získaných při vývoji a experimentálních zkouškách na STD-25 bylo přistoupeno k realizaci návrhu nového velmi rychlého manipulátoru pro výměnu nástrojů. Snahou tohoto vývoje bylo zachování všech výhod dosavadního řešení, tedy především jeho jednoduchosti a možnosti vyrobit toto zařízení i s omezenými výrobními možnostmi (není nutno vyrábět složité globoidní vačky) a současně eliminovat veškeré nedostatky, které se na STD-25 projevily během zkoušek.

Při návrhu byly zohledněny i současné trendy vedoucí k ekologickým a energeticky nenáročným řešením. Koncepce užívající dvojici servomotoru, které nemají v kinematickém řetězci zařazen žádný samosvorný mechanismus, umožňují provádět rekuperaci, tedy při procesu brzdění není energie naakumulovaná v mechanismu a mařena v brzdných odporech, nebo ve tření, ale je pomocí procesu rekuperace a k tomu speciálně navrženým měničům opět přeměňována na elektřinu.

Takto získaná energie může být buď vrácena do sítě, nebo lépe z hlediska menšího rušení elektrické soustavy, ukládána do superkapacitorů, které umožní pozdější využití této energie. Další nemalou výhodou řešení využívající superkapacitory je šetrnost k elektrické soustavě. Energie v nich akumulovaná je uvolňovaná především v době náběhu motoru, tedy v době největšího odběru. Toto umožňuje minimalizovat proudové rázy do sítě a tím celkově zlepšit její stav.

Při konstrukci byl kladem maximální důraz na jednoduchost řešení, z níž plyne i snaha o co možná nejmenší počet vyráběných komponent a nároků na jejich obrábění. Byly preferovány především komponenty rotačního charakteru, jejichž výroba je výrazně rychlejší a z ekonomického hlediska příznivější než u komponent nerotačních. Též byl kladen důraz na možnost seřízení některých funkčních uzlů, čímž bylo dosaženo snížení nároků na geometrickou přesnost některých funkčních ploch (např. vedení kladek rotace).



Obr. 19: 3D model manipulátoru v zasunutém stavu

Na základě výsledků ze simulačních modelů mechanismu byly odhadnuty předpokládané časy výměn, který by toto zařízení bylo schopno dosáhnout.

Tabulka 5: Tabulka dosažitelných rychlostí v závislosti na hmotnosti nástroje

Hmotnostní třída	Celková hmotnost nástrojů dané třídy [kg]	Průměrný čas výměny [s]
1	14	3
2	20	3,75
3	26	4,5

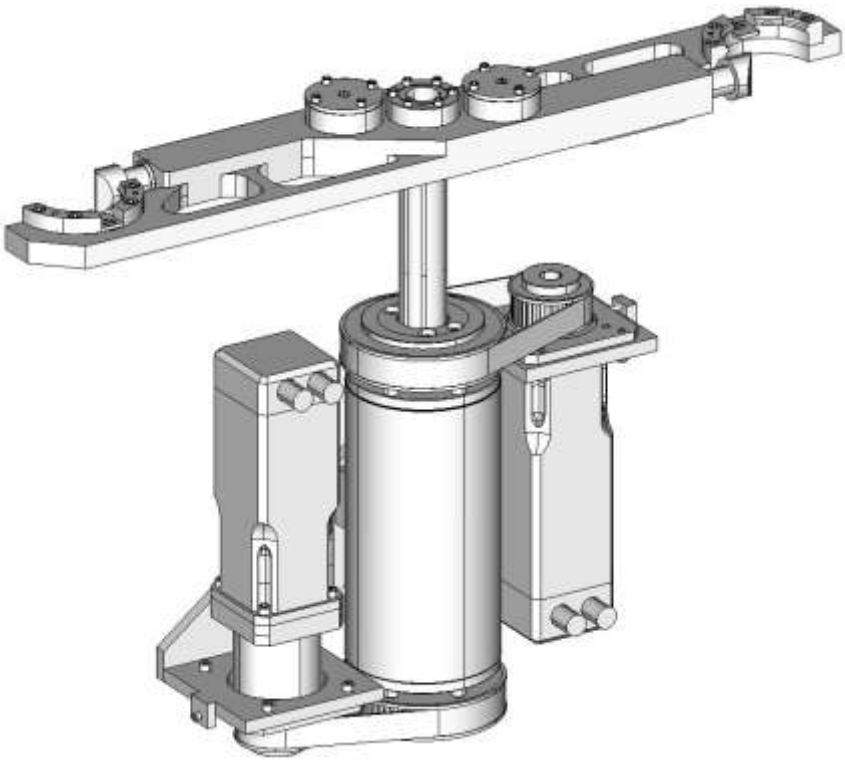
Takto výrazné zlepšení časů oproti STD-25, i při zachování stejného typu pohonu, je způsobeno především optimalizací konstrukce. Koncepce je navržena tak, aby nedocházelo k silovým působením, která by nadbytečně zatěžovala mechanismus a tím snižovala jeho rychlost/výkonnost. V neposlední řadě je nutno podotknout, že i výsledná přesnost při realizaci rotačního pohybu bude výrazně zlepšena. Zařízení eliminovalo vliv vůle v drážkovaném hřídeli a chyba rotace je zatížena už jen tuhostí

a přesností synchronního řemenového převodu a dále pak bezvůlové planetové převodovky.

6.4 ŘEŠENÍ KOMPAKT. MANIPULÁTORU S PRVKEM THK

Z hlediska zjednodušení konstrukce byla nalezena alternativa k výše uvedené variantě kompaktního řešení manipulátoru. Tato spočívá v implementaci speciálního prvku, který v sobě integruje dvojici vlastností, a to vlastnosti kuličkového šroubu a kuličkové tyče s drážkami. Tím je dosaženo podobných vlastností jako u uvedeného řešení, pomocí dvou rotačních pohybů je docíleno celého procesu výměny. Primárně je tento prvek určen pro implementaci do robotů typu Scara, kde realizuje translační pohyb v ose Z. Z hlediska funkčnosti, robustnosti a kompaktnosti je však možné tento komponent s úspěchem aplikovat i v manipulátorech AVN.

Srovnáme-li obě výše uvedené koncepce, můžeme konstatovat, že každá má svá pro a proti, na jejichž základě je možno zvolit příslušnou variantu. Firma disponující dostatečnou technologií a kapacitou bude spíše preferovat variantu, u níž se bude snažit minimalizovat cenu za pomoci výroby komponent svépomocí, zatímco firmy s chybějící technologií, nebo nedostatečnou kapacitou budou volit především cestu nákupu co možná největšího počtu komponent.



Obr. 20: Koncepce manipulátoru s drážkovaným šroubem (tubus skryt)

Výhody druhé varianty jsou především v kompletně valivém uložení, které minimalizuje ztráty, malé zástavbové rozměry a především pak značná jednoduchost řešení, která je založena na jednom integrovaném nakupovaném prvku. Toto však sebou přináší i značnou nevýhodu v závislosti na jednom nebo omezeném počtu

dodavatelů schopných tento komponent zajisti. Jako další nedostatek je možno uvést nutnost větší vzdálenosti spodní části manipulátoru od ostatních komponent. Při zasouvání ramen totiž dochází k vysouvání šroubu z manipulátoru.

Jako další možnost směřovanou především do budoucna je návrh integrace momentových motorů k tomuto typu řešení. Toto řešení vede k dalšímu zjednodušení konstrukce manipulátoru, ke zpřesnění polohování (eliminací řetězce komponent mezi motorem a hnanou hřídelí, přímé odměřování na motoru). Jsou zde rovněž eliminovány možné ztráty, které jsou tvořeny pouze valivými elementy na drážkovaném šroubu a v uložení dvojice „matic“.

Varianta užívající momentových motorů má demonstrovat možnosti a směry dalšího vývoje automatické výměny nástrojů, vedoucí k vytvoření inteligentních systémů adaptivně přistupujících k jednotlivým nástrojům, především s ohledem na jejich hmotnost, polohu těžiště atd. Prvním krokem k takovémuto komplexnímu řešení je právě návrh manipulátoru, které umožňuje souvisle řídit polohu nástroje v průběhu celé výměny, čímž je dosaženo nejefektivnějšího využití výkonu motoru a v neposlední řadě zvyšování účinnosti a možnost opětovného využití energie akumulované v pohybujících se nástrojích. Přímé náhony mají právě oproti klasickým řešením s vačkou možnost realizovat rekuperaci, čímž je dosaženo efektivnějšího využití energie zohledňující nejmodernější trendy v strojírenství. Neustále se snižující cena, a to jak elektroniky v podobě frekvenčních měničů, tak i moderních typů pohonů, jako jsou právě užité momentové motory, které dávají tušit, že doba jejich praktického nasazení i v těchto typech aplikací není příliš vzdálená.

7 ZÁVĚR

Autor disertační práce se podílel na řešení mnoha projektů jak MŠMT, Inovačních voucherů JMK, tak i projektů specifického výzkumu na FSI VUT v Brně. V návaznosti na zapojení do projektu „1.2.4 Rychlá automatická manipulace“ Brněnského pracoviště VCSVTT (Výzkumné Centrum pro Strojírenskou Výrobní Techniku a Technologii) bylo vytvořeno téma této disertační práce PROBLEMATIKA RYCHLÉ AUTOMATICKÉ VÝMĚNY NÁSTROJŮ U OBRÁBĚCÍCH STROJŮ.

Práce se v široké míře zabývá rešeršní činností, jejíž snahou je vytipování vhodného segmentu na trhu s obráběcími stroji, u nějž je možno předpokládat potenciál pro uplatnění nových koncepcí. Jako potenciálně vhodná se jeví oblast malých a středně velkých frézovacích center, kde v současnosti drží takřka monopol asijští dodavatelé unifikovaných zařízení pro automatickou výměnu nástrojů. Snahou této práce je nalézt vhodné alternativní řešení manipulátorů pro výměnu nástrojů, vůči v současnosti masově dodávaným vačkovým mechanismům.

Za pomocí moderních metod jako je systémová analýza, 3D modelování, MKP výpočty (pevnostní, kinematiky i dynamiky) atd., byly vytvořeny konstrukční návrhy několika alternativních řešení manipulátorů jak vlastní, tak u vačkového standu navazující na řešení vyplývající z diplomové práce, jejíž byl autor disertační

práce vedoucím. Pro vybraná řešení byly dále vypracovány simulační modely pro predikci vlastností a chování mechanismů.

V návaznosti na řešený projekt 1.2.4 bylo finančně umožněno vyrobení dvojice fyzických výstupů - standů, které sloužily jak pro ověření funkčních vlastností, tak i pro ověření simulačních modelů, které byly za pomocí SW MSC.ADMS sestaveny. Dalším nezanedbatelným výstupem, který vyplynul z řešení a vzájemné spolupráce s ostatními kolegy z Brněnského pracoviště VCSVTT, bylo udělení užitného vzoru v roce 2010 na řešení jednovačkového manipulátoru pro automatickou výměnu nástrojů. Souběžně bylo zahájeno i patentové řízení, které nadále probíhá.

Rovněž je nutné zdůraznit, že výsledky projektu 1.2.4, na něž je tato práce navázána, byly jak v rámci průběhu řešení, tak i při závěrečných oponenturách obhájeny, a to jak před odborníky z VCSVTT, tak i před externími oponenty MŠMT, kteří byli za tímto účelem přizváni. Na základě těchto odborných posudků byl projekt uzavřen jako úspěšně vyřešený.

Tato disertační práce rovněž poukazuje na některé opomíjené aspekty související s danou problematikou, jimž je nutné nadále věnovat pozornost a předkládá možnosti a směry dalšího vývoje vedoucího ke kvalitnější a rychlejší automatizaci výměny nástrojů.

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

[1] KOLÍBAL, Z. *Průmyslové roboty I – Konstrukce průmyslových robotů a manipulátorů*, Brno: Nakladatelství VUT v Brně, 1993. ISBN 80-214-0526-0

[2] KOLÍBAL, Z. – KADLEC, Z. *Průmyslové roboty II – Konstrukce výstupních hlavic a periferií*, Brno: PC-DIR spol. s r.o., 1993. ISBN 80-0533-3

[3] JANÍČEK, Přemysl. *Systémové pojetí vybraných oborů pro techniky : Hledání souvislostí*. 1. Brno : CERM Brno, 2007. ISBN 978-80-7204-554-9.

[4] STONAVSKÝ, J. *Manipulátor pro automatickou výměnu nástrojů u horizontálních frézek : diplomová práce*, Brno: VUT v Brně, Fakulta strojního inženýrství 2005.

[5] BADIN, P. *Manipulátor pro výměnu nástrojů řízený vačkami : diplomová práce*, Brno: VUT v Brně, Fakulta strojního inženýrství 2006.

[6] Houša, J. a kolektiv *Konstrukce číslicově řízených obráběcích strojů*, Praha : SNTL, 1985. 287 s

[7] BLECHA, P. - BLECHA, R. - BRADÁČ, F. - PAVLÍK, J.: *Závěrečná zpráva projektu 1.2.4, VCSVTT : výzkumná zpráva*, Brno: Brněnské pracoviště VCSVTT, 2005, 2006, 2007, 2008, 2009.

[8] MAREK, J. *Konstrukce CNC obráběcích strojů*, Praha: MM publishing s.r.o., 2006. ISBN 1212-2572

[9] *CECIMO* [online]. 2009 [cit. 2009-07-08]. Dostupné z WWW: <http://www.cecimo.be>.

[10] *CIRP* [online]. 2009 [cit. 2009-07-08]. Dostupné z WWW: <http://www.cirp.net>.

[11] *MIKSCH GmbH* [online]. 2011 [cit. 2011-01-11]. Dostupné z WWW: <http://www.miksch.de>.

[12] *Gifu ENTERPRISE CO., LTD* [online]. 2011 [cit. 2011-01-07]. Dostupné z WWW: <http://www.atcgifu.com>.

[13] Poppeová, V. a kolektiv *Automatizácia strojárskej výroby*, 1. vyd., V Žilině : EDIS, 2002. 229 s. ISBN: 80-8070-009-5

[14] KOLOC, Z. - VÁCLAVÍK, M. *Vačkové mechanismy, Praha*: SNTL, 1988.

ŽIVOTOPIS

Osobní data:
Jméno, Příjmení: Ing. Jan Pavlík
Bydliště: U Hájku 517, 691 25 Vranovice
Telefon: +420737966047
E-Mail: pavlik.j@fme.vutbr.cz
Datum narození: 30.9.1980

Vzdělání:

09/1995 – 06/1999	Střední průmyslová škola strojnická, Brno, Sokolská 1
09/1999 – 06/2004	VUT v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Obor: Stavba výrobních strojů a zařízení Studium zakončeno s titulem inženýr (Ing.) Téma diplomové práce: Teleskopické krytování těžkých obráběcích strojů
07/2004 – dosud	Ústav výrobních strojů, systémů a robotiky, Fakulta strojního Inženýrství, Vysoké učení technické v Brně Doktorské studium Téma: Problematika rychle automatické manipulace u výrobních strojů a zařízení

Praxe:

2006– dosud	technicko hospodářský pracovník, Výzkumné centrum automatické manipulace, ÚVSSaR, FSI VUT v Brně
2010– dosud	garant SVOC-VCPM projektu OPVK, ÚTT, VUT v Brně

Jazykové znalosti: Německý jazyk

Další znalosti:
Word, Exel, Power Point, Access, Autocad, I-DEAS, NX, Adams, LabView, atd.

VLASTNÍ PUBLIKACE

[1] NOVOTNÝ, T.; BRADÁČ, F.; BLECHA, P.; BLECHA, R.; KOLÍBAL, Z.; PAVLÍK, J.; OPL, M. Závěrečná zpráva projektu 2.4.1. Praha: VCSVTT, 2010.

[2] PAVLÍK, J.; KOLÍBAL, Z.; BLECHA, P.; BLECHA, R.; BRADÁČ, F.; OPL, M.; NOVOTNÝ, T. Závěrečná zpráva projektu 1.2.4 - 2009. Praha: VCSVTT, 2009.

[3] OPL, M.; PAVLÍK, J.; MATĚJKA, P.; KOLÍBAL, Z. Parallel Planar Mechanism for the Support of Education in Robotics and Mechatronics. In RAAD 2009. Brasov, Romania: Editura Printech, 2009. s. 141-141. ISBN: 978-606-521-315- 9.

[4] MATĚJKA, P.; PAVLÍK, J.; OPL, M.; KOLÍBAL, Z.; KNOFLÍČEK, R. Mechatronic Backlash- Free System for Planar Positioning. In Recent Advances in Mechatronics 2008- 2009. Berlin: Springer- Verlag Berlin Heidelberg, 2009. s. 377-382. ISBN: 978-3-642-05021- 3.

[5] PAVLÍK, J.; KOLÍBAL, Z.; BLECHA, P.; BLECHA, R.; BRADÁČ, F. Závěrečná zpráva projektu 1.2.4. Číslo zprávy: V-08-071. Praha: VCSVTT, 2008. s. (24 s.)

[6] PAVLÍK, J.; KOLÍBAL, Z.; OPL, M.; MATĚJKA, P. Konstrukce odlitků hlavních částí vodorovné vyvrtávačky Fermat. Praha: VCSVTT, 2008. s. (19 s.)

[7] PAVLÍK, J.; KOLÍBAL, Z.; OPL, M.; MATĚJKA, P. Transfer of knowledge of control of non-conventional reconfigurable parallel mechanism in production machines and robots. In RAAD 2008 Programme and book of abstract. Ancona, Italy: Tipografia Piefederici, 2008. s. 83-84. ISBN: 978-88-903709-0- 8.

[8] PAVLÍK, J.; BRADÁČ, F.; HOUFEK, L.; KOLÍBAL, Z. Analýza deformací střižného nástroje na lisu MOSSINI. Praha: VCSVTT, 2008. s. (30 s.)

[9] PAVLÍK, J.; OPL, M.; BLECHA, R. Systémy AVN, AVO a manipulace s třískami. In Obráběcí stroje na EMO Hannover 2007. Praha: Společnost pro obráběcí stroje, 2007. s. 117-125. ISBN: 978-80-903421-7- 0.

[10] BLECHA, P.; BLECHA, R.; BRADÁČ, F.; PAVLÍK, J. Závěrečná zpráva projektu 1.2. 4. č.zprávy V-07- 050. Praha: VCSVTT, 2007. s. (22 s.)

[11] PAVLÍK, J.; KOLÍBAL, Z.; KUBELA, T.; POCHYLÝ, A. Modern methods of solving complex kinematical structures of robots and manipulators. In RAAD 2007: Programme and Book of Abstracts. RAAD 2007. Ljubljana - Slovenia: University of Ljubljana, 2007. s. 378-383. ISBN: 978-961-243-067-2.

[12] BRADÁČ, F.; PAVLÍK, J.; KOLÍBAL, Z.; POCHYLÝ, A.; KUBELA, T.; BLECHA, P.; BLECHA, R. ROBOTIC MANIPULATORS FOR TOOLS MANIPULATION. In Summaries Volume. Bratislava: SLOVAK UNIVERSITY OF TECHNOLOGY, BRATISLAVA, 2007. s. 162-1 (282 s.) ISBN: 978-80-227-2677-1.

[13] BLECHA, P.; PAVLÍK, J.; BLECHA, R.; BRADÁČ, F. Systémy automatizace OS, systémy AVN, AVO, manipulace s třískami a polotovary. In Seminář SpOS a VCSVTT: Obráběcí stroje na EMO Hannover 2005. Praha: ČVUT Praha – VCSVTT, 2006. S. 119-127. ISBN: 80-903421-5-9.

[14] PAVLÍK, J. Fast automatic tool change. In Book of Abstracts – 4th International PhD Conference on Mechanical Engineering – PhD2006. Plzeň: Západočeská univerzita Plzeň, 2006. S. 67-68. ISBN: 80-7043-486- 4.

[15] BLECHA, P.; BLECHA, R.; BRADÁČ, F.; PAVLÍK, J. Závěrečná zpráva projektu 1.2.4: Rychlá automatická manipulace. Č.zprávy V-05- 077. Praha: VCSVTT, 2005. S. (80 s.)

[16] KOLÍBAL, Z.; BLECHA, R.; BLECHA, P.; BRADÁČ, F.; PAVLÍK, J. Studie kinematických struktur nového typu „Automatizované manipulace s nástroji". Brno: VCSVTT, 2004. s. (42 s.)

[17] HOLUB, M., PAVLÍK, J., OPL, M., BLECHA, P. Identification of geometric errors of rotary axis in machine tools, 9th International Conferences Mechatronics 2011 - přijat k publikování.

[18] HOLUB, M., PAVLÍK, J., OPL, M., BLECHA, P. DELTA - robot with parallel kinematics, 9th International Conferences Mechatronics 2011 - přijat k publikování.

[19] PAVLÍK, J. Problematic of Fast Automatic Tool Change by Working Machinery, MM Science Journal – přijat k publikování.

PRODUKTY A PATENTY

[1] PAVLÍK, J.; BADIN, P.; KOLÍBAL, Z.; BLECHA, P.; BLECHA, R.; BRADÁČ, F.; Vysoké učení technické v Brně: *Manipulátor pro automatickou výměnu nástrojů*. 20453, užitný vzor. Praha (2010)

[20] PAVLÍK, J.; OPL, M.; MATĚJKA, P.; KOLÍBAL, Z.: Rovinný paralelní mechanismus. FSI A1/ 1229c. (funkční vzorek)

[21] PAVLÍK, J.; BRADÁČ, F.; OPL, M.: Průběžný mísič Gifos; Gifos s.r.o. Přízova 1, 60200 Brno. (funkční vzorek)

[22] PAVLÍK, J.; BRADÁČ, F.; MATĚJKA, P.; NOVOTNÝ, T.: Pračka vzduchu 2000 m3. Gifos s.r.o. Přízova 1, 602 00 Brno. (prototyp)

[23] PAVLÍK, J.; OPL, M.; HOLUB, M.: Stand pro kalibraci akcelerometrů. VUT v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Technická 2, 61669 BRNO. (funkční vzorek)

[24] BLECHA, P.; PAVLÍK, J.; BRADÁČ, F.; BLECHA, R.; KOLÍBAL, Z.: Systém AVN Tyc 32; Systém automatické výměny nástrojů. Strojírna Tyc s.r.o.. (funkční vzorek)

[25] BLECHA, P.; PAVLÍK, J.; BRADÁČ, F.; BLECHA, R.; KOLÍBAL, Z.: Stand pro výzkum rychlé automatické manipulace s nástroji. FSI VUT v Brně - lab. C1.

[26] BRADÁČ, F.; BLECHA, R.; BLECHA, P.; PAVLÍK, J.; KOLÍBAL, Z.: Automat na třídění pryžových ucpávek. AGGA speciální technická pryž Vlachovice. (funkční vzorek)

[27] BLECHA, P.; BLECHA, R.; BRADÁČ, F.; PAVLÍK, J.; KOLÍBAL, Z.: Systémová metodika pro stanovení preventivních opatření k předcházení potenciálních rizik. FSI VUT v Brně. (certifikovaná metodika)

[28] KOLÍBAL, Z.; PAVLÍK, J.; BADIN, P.; BLECHA, P.; BLECHA, R.; BRADÁČ, F.: Jednovačkové zařízení pro automatickou výměnu nástrojů. Těžká laboratoř C1 na FSI VUT v Brně, ÚVSSR. (funkční vzorek)

[29] KOLÍBAL, Z.; PAVLÍK, J.; BLECHA, P.; BLECHA, R.; BRADÁČ, F.: Výsuvné rameno automatické výměny nástrojů. Těžká laboratoř C1 na FSI, VUT v Brně, ÚVSSR. (funkční vzorek)

[30] BRADÁČ, F.; BLECHA, R.; NOVOTNÝ, T.; SYNEK, M.; PAVLÍK, J.: Lineární servopohon; Laboratorní polohovací zařízení s lineárním motorem. VUT FSI B1/ 305. (funkční vzorek)

[31] BRADÁČ, F.; PAVLÍK, J.; SYNEK, M.; BLECHA, R.; NOVOTNÝ, T.: 2D laboratorní pneumaticky řízený manipulátor. VUT FSI B1/ 305. (funkční vzorek)

[32] BRADÁČ, F.; BLECHA, R.; SYNEK, M.; PAVLÍK, J.; NOVOTNÝ, T.: 3D laboratorní manipulátor. VUT FSI B1/ 305. (funkční vzorek)

[33] HOLUB, M.; OPL, M.; PAVLÍK, J.; BRADÁČ, F.: Univerzální software pro měření teplotními senzory. ÚVSSR, FSI VUT, Technická 2, 616 69, Brno. (software)

[34] HOLUB, M.; BRADÁČ, F.; OPL, M.; PAVLÍK, J.: Sběr a zpracování dat z měření geometrických odchylek. VUT v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Technická 2, 61669 BRNO. (software)

[35] HOLUB, M.; PAVLÍK, J.; OPL, M.; BRADÁČ, F.: Zařízení pro měření geometrických chyb rotačních stolů. VUT v Brně, FSI, Technická 2, 61669, Brno, Místnost A1/ 1224. (funkční vzorek)

[36] BRADÁČ, F.; PAVLÍK, J.; NOVOTNÝ, T.; MATĚJKA, P.: Pračka vzduchu 3000 m3. Gifos s.r.o. Přízova 1, 602 00 Brno. (prototyp)

[37] BRADÁČ, F.; HOLUB, M.; PAVLÍK, J.; OPL, M.; NOVOTNÝ, T.; TŮMA, Z.: DeltaRobot; Manipulátor na bázi paralelní kinematiky - delta robot s třemi osami. VUT FSI, Technická 2, B1/ 305. (funkční vzorek)

ABSTRAKT

Disertační práce je věnována problematice automatické výměny nástrojů, u frézovacích center, kde se v poslední době ukazuje toto téma jako velice aktuální. Obsahem této práce je jak provedení komplexní rešerše jednotlivých typů AVN v závislosti na typu stroje, tak i rešerše současných nástrojových rozhraní, které s touto problematikou úzce souvisejí. Na základě množství získaných rešeršních dat byla dále provedena komplexní analýza, z níž vyplynuly jak hlavní faktory ovlivňující tuto problematiku, tak i oblast, kterou se práce dále zabývá a rozvíjí ji.

Jako nejproblematičtější oblast dnes používaných zařízení pro automatickou výměnu nástrojů se ukázal manipulátor zajišťující výměnu nástroje mezi vřetenem a zásobníkem. Kinematické uspořádání a konstrukční řešení jednotlivých prvků velmi významně ovlivňuje dynamiku celého procesu výměny nástroje. Proto se práce dále věnuje řešení problematiky manipulátoru. Hlavními výsledky této práce jsou pak konstrukční návrhy několika typů manipulátorů, z nichž byly některé v rámci projektu 1.2.4 Brněnského pracoviště VCSVTT (Výzkumné Centrum pro Strojírenskou Výrobní Techniku a Technologii) realizovány v podobě zkušebních standů. Pro vybrané typy manipulátorů byly vytvořeny simulační modely, k jejichž verifikaci bylo užito měření na reálném standu.

Na základě řešení této problematiky byl identifikován další klíčový problém související nejen s procesem výměny, ale i komplexním problémem životnosti vřetene. Jedná se o problém sil vznikajících při procesu uchopení nástroje. Práce nastiňuje možnosti dalšího výzkumu, týkajícího se právě vlivu těchto sil na životnosti vřeteníku (především životnosti ložiskových skupin uložení vřetene).

ABSTRACT

This dissertation thesis is focused on the problem of the Automatic Tool Change for milling centers, which is recently shown as a very current topic. The content of this work is to conduct a comprehensive research of various types of ATC depending on the type of machine, as well as research of the current tool interface relating closely with these problems. There was made a comprehensive analysis on the basis of data obtained by comprehensive research, from which both the main factors affecting this topic and the area dealed and developed by this work resulted.

The most problematic area of machinery used nowdays for the Atomatic Tool Change was detected as manipulator provided the exchange between spindle and tool

storage. Kinematic structure and design of individual elements affects very significantly the dynamics of the whole process of exchange of tools. Therefore, the work is focused on problematic of the manipulator. The main results of this thesis are constructional design of several types of manipulators, which were partly realized within the project 1.2.4 of Brno department of RCMT in the form of the testing stands. There was developed simulation models for selected types of manipulators which were verificated by measuring on the real stand.

On the basis of abovementioned problem there was identified another key issue related not only to the exchange process but also with complex problem of service life of spindle. It is a grab force in the process of picking tools. The work outlines the possibilities for further research of these forces on the service file of spindle (especially on service life of bering groups of spindle).