

Závěrečná zpráva o řešení SGS projektu za rok 2015 - část I. /
Final report for SGC project for year 2015 - part I.

Řešitel projektu / <i>Researcher</i>	Interní číslo projektu / <i>Internal project number</i>	21001			
Ing. Radek Votrubec Ph.D.					
Název projektu / <i>Title of project in Czech</i>	Výzkum a vývoj řídicích systémů pneumatických, hydraulických a elektrických prvků.				
Název projektu anglicky / <i>Title of project in English</i>	Research and development of control structures of pneumatic, hydraulic and electrical components.				
Prohlašuji, že údaje uvedené v předložené zprávě o řešení grantového projektu jsou pravdivé a úplné. / <i>I declare that the information given in the report presented by the grant project are true and complete.</i>					
Datum / <i>Date</i>: 20.12.2015 Podpis / <i>Signature</i>:					

Osnova zprávy / *Outline of report:*

1. Rozbor řešení projektu (postup a metodika práce) / *Analysis of the project (process and methodology of work)*
2. Řešitelský kolektiv / *Research team*
3. Dosažené výsledky / *Achieved results*
4. Vyhodnocení výsledků projektu v porovnání s vytyčenými cíli / *Evaluation of project results in comparison with objectives*
5. Seznam výstupů v průběhu řešení projektu (publikace, přednášky, a pod.) / *List outcomes in the course of the project (publications, lectures, etc.)*
6. Změny v projektu / *Changes in the project*
7. Výkaz o hospodaření s grantovými prostředky (příloha) / *Statement on the management of grant funds (Annex)*

1. Rozbor řešení projektu (postup a metodika práce) / Analysis of the project (process and methodology of work)

Výzkum provedený v rámci tohoto projektu navázal na předchozí projekty realizované na naší katedře. Tento rok pokračovala práce na výzkumu v těchto tematických okruzích.

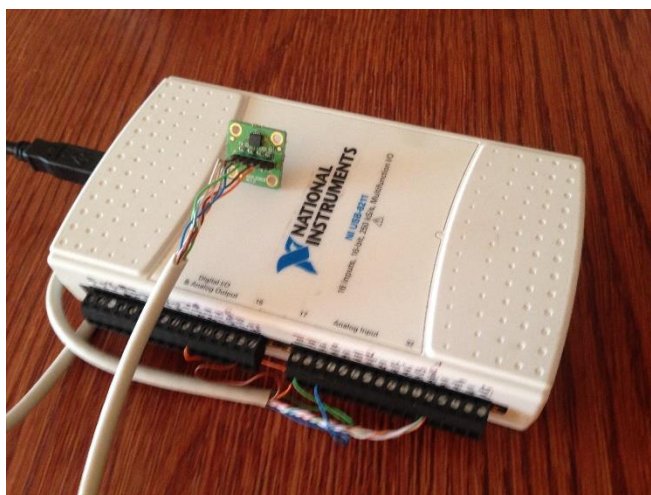
1.1 Řídicí algoritmy vibroizolačních systémů

Prvním zkoumaným systémem je sedák osobního automobilu s proměnnou tuhostí. Tento systém byl vybrán pro testování nového algoritmu řízení, kdy tuhost sedáku je nastavována na základě průběžné frekvenční analýzy budicího signálu sedačky. Do sedačky automobilu byl zabudován pneumatický prvek, Obr. 1-1.



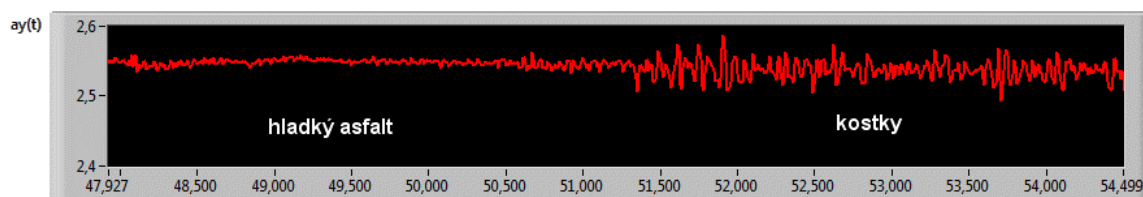
Obr. 1-1 – Sedák s pneumatickým prvkem

Pro měření zrychlení bylo použito čidlo zrychlení Analog Devices, Obr. 1-2.



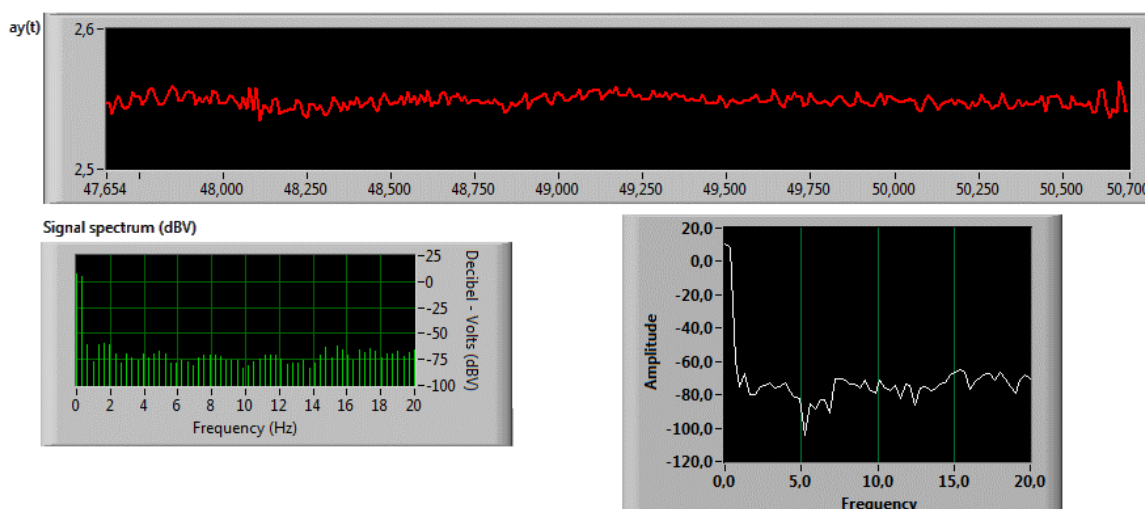
Obr. 1-2 – Měření signálu zrychlení

Příklad signálu zrychlení naměřeného za jízdy je na Obr. 1-3. Zachycuje úsek, na kterém došlo k přejetí z hladkého asfaltu na povrch s kostkami.

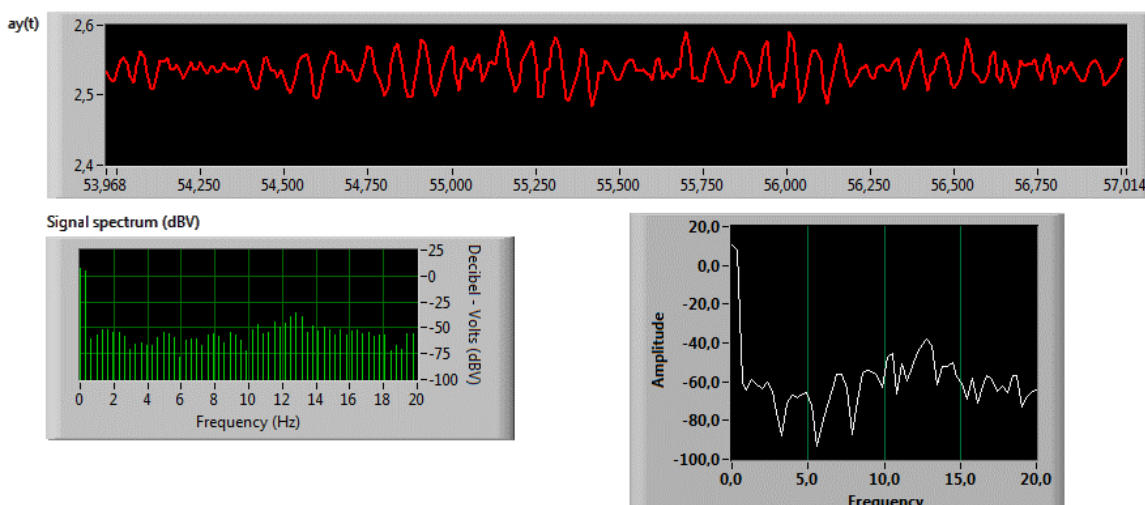


Obr. 1-3 – Signál zrychlení při jízdě po asfaltu a po kostkách

Frekvenční analýza signálů na obou površích je na Obr. 1-4 a Obr. 1-5. Pro řízení tuhosti sedáku je důležitý jednak průběh analyzovaného spektra a jednak dosažená amplituda signálu. Analýza probíhá v nastaveném intervalu pro úsek několika sekund.



Obr. 1-4 – Frekvenční analýza signálu zrychlení při jízdě po asfaltu



Obr. 1-5 – Frekvenční analýza signálu zrychlení při jízdě po kostkách

Dále probíhal výzkum ortopedické matrace s proměnnou tuhostí. Do stávajícího molitanového nosníku byl vložen pneumatický člen, který mění tuhost nosníku v závislosti na nastaveném tlaku, Obr. 1-6.



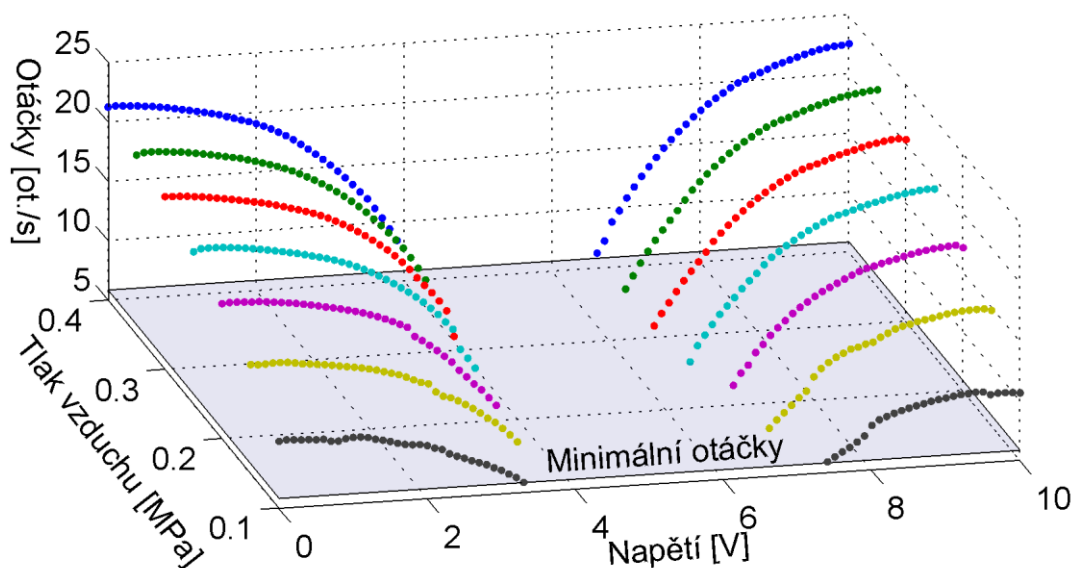
Obr. 1-6 – Pneumatické prvky pro ortopedickou matraci

1.2 Řízení rotačního pneumatického motoru

V rámci řešení projektu byla provedena linearizace statické charakteristiky řízené úlohy. K linearizaci statické charakteristiky bylo přistoupeno dvěma různými způsoby, jejichž výsledky jsou porovnány. První metodou je linearizace pomocí inverzní funkce. V druhém přístupu byl vytvořen linearizační element tvořený umělou neuronovou sítí. Neuronová síť byla také využita pro realizaci ovladače otáček pro konstantní zatížení pohonu. Pro další práci bylo potřeba upravit a vylepšit systém zatěžování motoru na měřicím přípravku. Původní systém nebyl dostatečně citlivý. U původního řešení, při kterém byla využita mechanická brzda se také projevila silná nerovnoměrnost brzdění. Nový systém zatěžování je založen na brzdění řízeným elektromotorem. Pro vytvoření kompaktního regulátoru byla využita výpočetní jednotka Arduino, na které budou testovány jednotlivé metody regulace.

V rámci projektu byla navržena linearizace statické charakteristiky pneumatického rotačního pohonu. Statická charakteristika představuje závislost ustálených otáček na nastaveném řídicím napětí

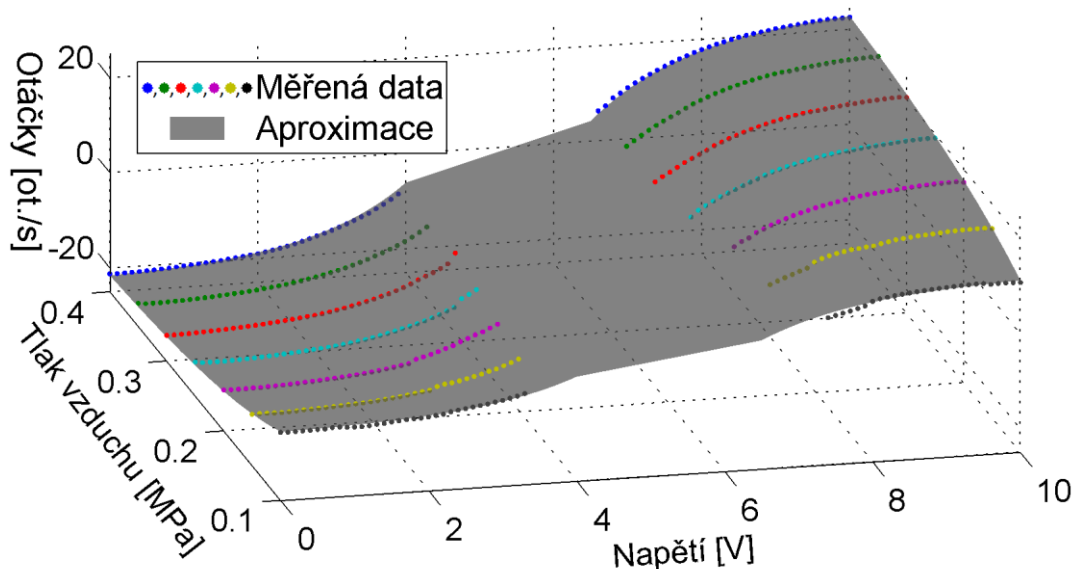
průtokového ventilu a pracovním tlaku. Statickou charakteristiku pro daný motor zachycuje Obr. 1-7. Vytvořená soustava má silně nelineární statickou charakteristiku.



Obr. 1-7 – Závislost otáček na řídicím napětí

Nelinearita v oblasti řídicího napětí je způsobena převážně nelinearitou průtokového ventilu. Charakteristika ventilu je také zatížena pásmem necitlivosti a mírným posunutím nuly ze středu intervalu. Pásmo necitlivosti je způsobeno průtokovým ventilem a minimálním průtokem potřebným k rozběhnutí motoru. Nelinearita v oblasti pracovního tlaku je způsobena převážně zvyšujícími ztrátami při vyšších otáčkách. Menší vliv má také nelinearita otáček v závislosti na průtoku vzduchu, která je také způsobena zvětšujícími ztrátami při vyšších otáčkách. Statická charakteristika je nelineární a proto je vhodné tuto charakteristiku pro možnosti dalšího popisu regulovaného procesu linearizovat. Linearizace v okolí pracovního bodu neposkytovala uspokojivé výsledky v širším rozsahu pracovních otáček. Z tohoto důvodu byly prověřeny jiné cesty k linearizaci úlohy. K této problematice bylo přistoupeno ze dvou různých směrů. První přístup byl založen na vytvoření aproximace statické charakteristiky. Inverze výsledné aproximace byla využita k lineazici úlohy. V druhém přístupu byl vytvořen linearizační prvek, který převádí sledované otáčky na napětí. Linearizační prvek je založen na natrénované neuronové síti. Linearizační prvek určuje hodnotu napětí pro dané otáčky a pracovní tlak.

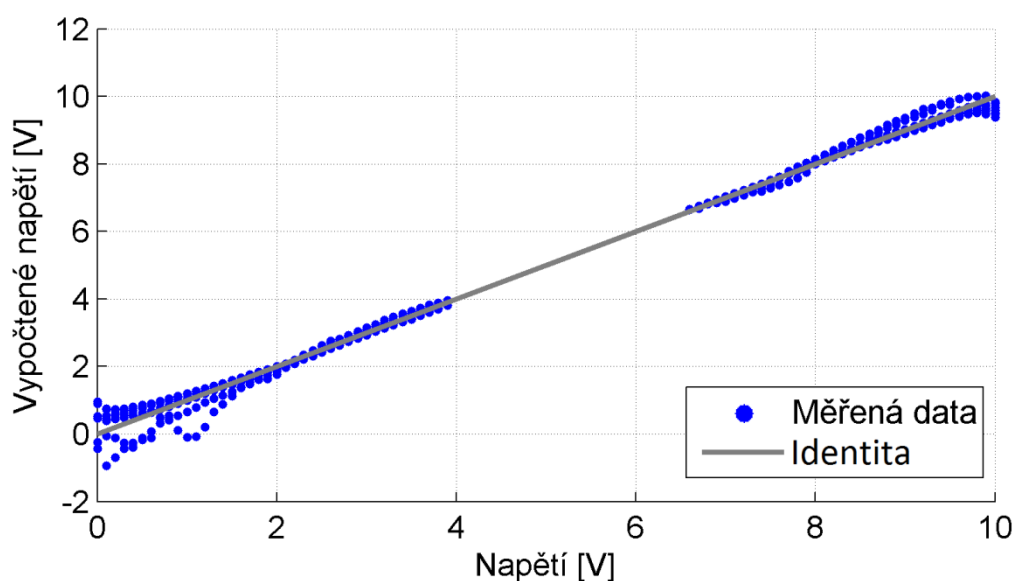
Pro aproximaci závislosti otáček motoru na průtoku vzduchu a pracovním tlaku je třeba nalézt funkci dvou proměnných, jejíž funkční hodnota se blíží hodnotě naměřené. Naměřené hodnoty jsou zatíženy chybou měření a také ovlivněny procesy, které neočekávaně zasahují do ustáleného chodu motoru. Naměřené hodnoty pod minimálními otáčkami nebyly zařazeny do množiny naměřených dat. Získaná funkce dvou nezávislých proměnných pro nastavené řídicí napětí průtokového ventilu a pracovní tlak určí otáčky motoru. Takto vzniklá plocha je srovnána s naměřenými daty na Obr. 1-8.



Obr. 1-8 – Srovnání naměřených otáček a plochy aproximační funkce

Výsledkem je inverzní funkce, která naměřeným otáčkám při zvoleném pracovním tlaku určí hodnotu řídicího napětí průtokového ventilu. Vzhledem k principu superpozice stačí pouze invertovat aproximační funkce závislosti otáček na řídicím napětí. Vzhledem jednoduchým tvarům aproximačních funkcí je jejich inverze snadná. Pro inverzní funkci se také změnil průběh na tři úseky. Inverzní funkce byly také rozšířeny o normování měřených otáček funkční hodnotou podle zvoleného pracovního tlaku.

Složená inverzní funkce byla vyzkoušena při interpretaci měřených dat. Vstupními parametry byl pracovní tlak a naměřené otáčky. Vypočtené napětí bylo porovnáno s nastaveným řídicím napětím. Zpracované hodnoty a identita jsou zachyceny na Obr. 1-9. Z obrázku je patrné, že odchylky oproti ideálnímu stavu jsou hlavně v krajních úsecích, kde je malý rozdíl otáček vůči rozdílu napětí. Inverzní funkce byla implementována v měřicí stanici pomocí elementárních bloků v prostředí LabVIEW.



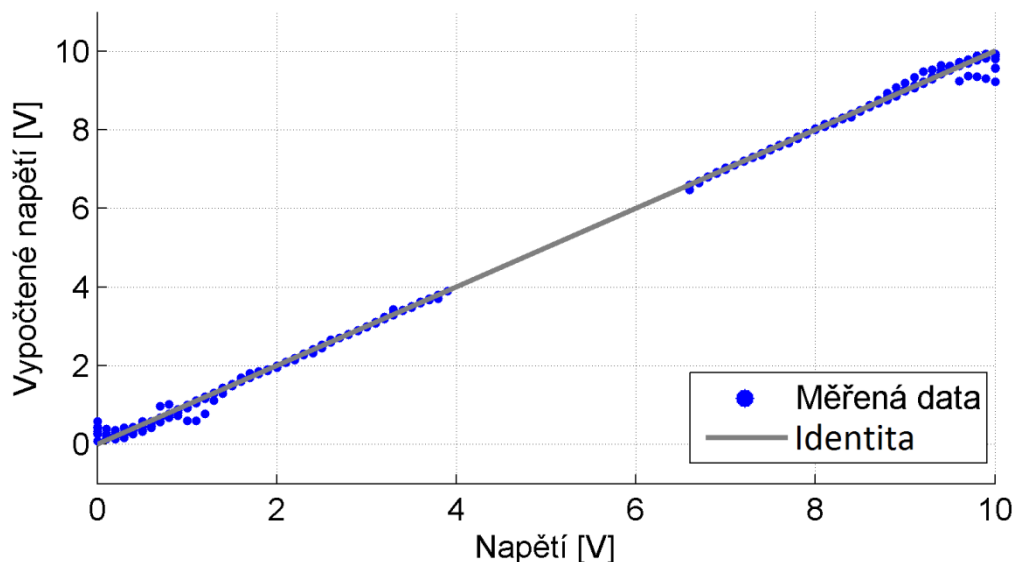
Obr. 1-9 – Nastavené a vypočtené napětí pomocí inverzní aproximace

V druhém přístupu k linearizaci úlohy byl vytvořen linearizační prvek, který má vnitřní strukturu tvořenou neuronovou sítí. Na neuronovou síť můžeme pohlížet jako na datovou strukturu skládající se z neuronu a jejich spojnic. V linearizačním prvku byly použity umělé neurony založené na modelu McCulloch–Pitts. V ovladači je využita vrstevnatá neuronová síť, jejíž struktura je tvořena vrstvami. Mezi vrstvami jsou propojeny umělé neurony každý s každým. Pro ovladač je navržena síť s dvěma skrytými vrstvami. Tato síť má dva neurony na vstupní vrstvě. Na vstup těchto neuronů jsou přivedeny hodnoty měřených otáček a pracovního tlaku. Skryté vrstvy mají každá dvacet neuronů.

Trénování neuronové sítě pro úlohu určení napětí proběhlo metodou určení s učitelem. K tomuto procesu je potřeba sestavit trénovací množinu tvořenou vstupními a výstupními vektory. Z naměřených dat byl vybrán soubor tvořící trénovací množinu. Vstupní data jsou pracovní tlak a měřené otáčky. Obrazem je napětí průtokového ventilu.

Vytvořená síť je na svou úlohu připravená pomocí trénování s využitím použití učitele. Tato třída učících metod je založena na trénovací množině, ze které jsou předkládány vstupní vektory. Vybavené vektory jsou porovnány s hodnotami v trénovací množině. Podle rozdílu výstupních vektorů jsou upraveny hodnoty vah a prahu. Nejčastěji se využívá některé z gradientních metod. Pro trénování neuronové sítě linearizačního prvku byla zvolena modifikovaná metoda Backpropagation. K trénování neuronové sítě bylo využito prostředí MATLAB s příslušným rozšířením.

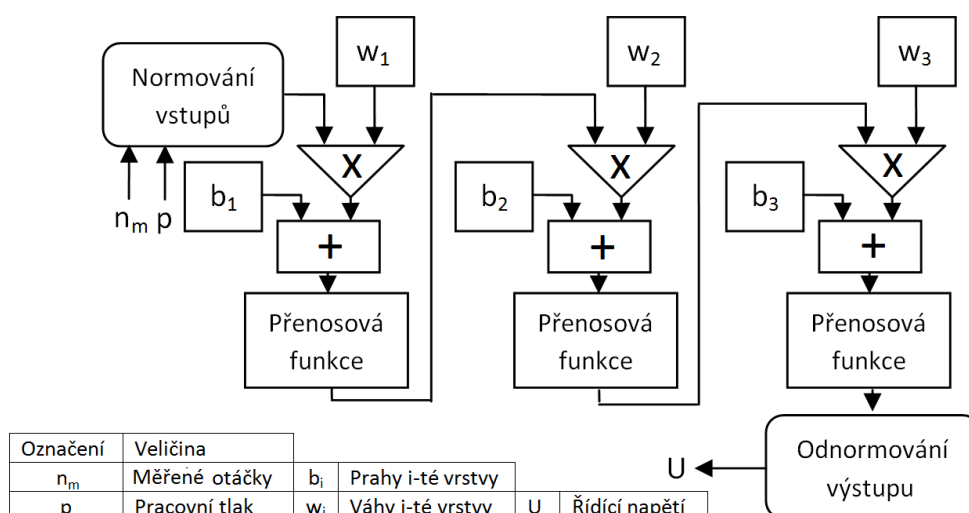
Ideálním stavem je identita, kdy obrazy přímo odpovídají svým vzorům. Ze závislosti je patrné, že největší rozptyl a odchylka od linearity jsou při vyšších hodnotách řídicího napětí. To je opět způsobeno nelinearitou řízené soustavy, kdy změna řídicího napětí průtokového ventilu má minimální vliv na změnu otáček. Malá difference otáček zvětšuje šum vzniklý nedokonalým během motoru a nepřesnostmi měření. Při srovnání obou metod dosahuje kvalitnějších výsledků linearizační prvek. Na Obr. 1-10 můžeme vidět srovnání výsledků vybavování sítě s údaji v trénovací množině.



Obr. 1-10 – Nastavené a vypočtené napětí pomocí linearizačního prvku

Výsledný linearizační prvek byl stejně jako inverzní aproximační funkce implementován v měřicí stanici v prostředí LabVIEW. V tomto prostředí byli implementováni jako samostatný blok. To usnadňuje jeho opětovné použití. Jelikož jedinou potřebnou funkcí neuronové sítě v ovladači je vybavování, byl využit k popisu neuronové sítě maticový zápis. Tento přístup velmi zjednodušuje implementaci vybavování neuronové sítě, protože využívanými operacemi jsou pouze násobení a

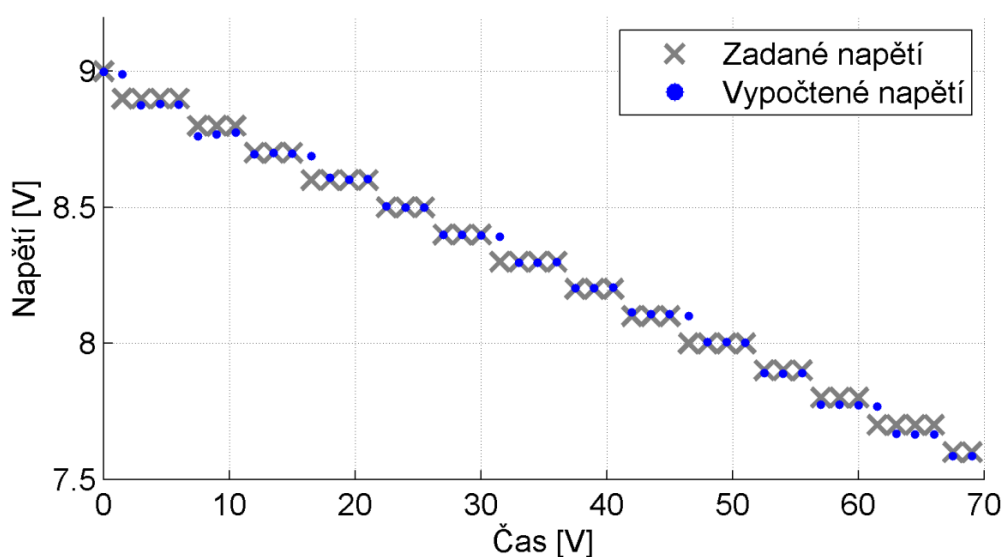
sčítání matic. Dalším potřebným krokem je aplikace přenosové funkce neuronu na hodnoty vektoru. Přenosové funkce byly sestaveny se základních bloků.



Obr. 1-11 – Schéma výpočtu pomocí neuronové sítě

Pro správnou funkci neuronové sítě je nutné provést transformaci vstupních a výstupních hodnot. Vstupní hodnoty je potřeba normovat pro rozsah od -1 do 1. Výstupní hodnoty je potřeba odnormovat na výstupní rozsah. Koeficienty pro normování a odnormování hodnot byly získány z naměřených dat. Vnitřní struktura linearizačního prvku je zachycena na Obr. 1-11.

Pro testování funkčnosti a možností linearizačního prvku byla provedena zkušební měření. Při měření byly zaznamenávány měřené otáčky a pracovní tlak. Také bylo zaznamenáno řídicí napětí průtokového ventilu. Pomocí linearizačního prvku bylo vyčísleno vypočítané řídicí napětí. Měření byla provedena v rozsahu pracovních otáček při tlaku 0.35 MPa. Řídící napětí se krokově měnilo od 9 do 7.6 voltu. Změna napětí byla provedena vždy po 5 sekundách s krokem 0.1 voltu. Měření proběhlo ve vzestupném i sestupném směru pro zachycení vlivu na ovládání. Průběh nastaveného a odměřeného řídicího napětí lze srovnat na Obr. 1-12. Počet bodů v grafu byl redukován, aby si graf zachoval vypovídající hodnotu.



Obr. 1-12 – Porovnání zadaného a vypočteného napětí v čase

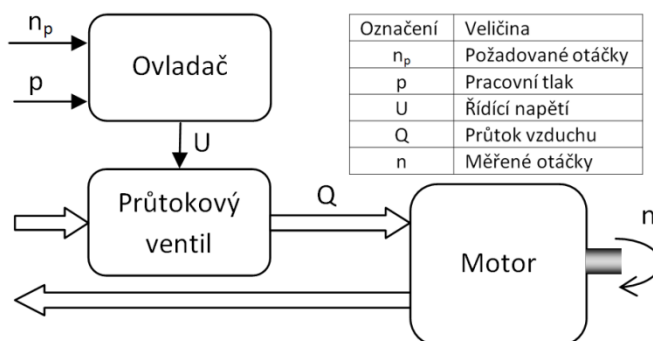
Z grafu je patrné, že linearizační prvek podává dobré výsledky. Přesnost opět klesá v krajních hodnotách řídicího napětí, ale v běžně používaném rozsahu dává dobré výsledky. To potvrzuje předcházející předpoklad o natrénování neuronové sítě.

Vytvořená inverzní aproximace stejně jako linearizační prvek poskytuje uspokojivý nástroj k linearizaci řízené úlohy. V posouzení a porovnání kvality obou metod můžeme postupovat podle několika kritérií. Prvním kritériem může být odchylka od linearity. Tu můžeme posoudit dvěma různými způsoby. Prvním údajem označeným er_{sq} je hodnota součtu čtverců odchylek. Testovací množina obsahovala 7200 záznamů. Druhým parametrem označeným er_{max} je maximální odchylka v testovacím souboru dat. Tyto hodnoty získané pro testovací soubor dat lze nalézt v tabulce 1. Druhým kritériem může být zvážení výpočetní, datové a implementační náročnosti. Toto kritérium vstupuje v úvahu při využití velmi jednoduchých mikrokontrolerů, kde jsme omezeni výpočetním výkonem. Implementační omezení jsou daná instrukční sadou a omezenou sadou uživatelských funkcí. Výpočetní náročnost je nižší u inverzní aproximační funkce. Kde se jedná o sadu aritmetických operací se skaláry. Náročnějším výpočtem je pouze vyčíslení hodnot funkcí exponenciála a logaritmus. U linearizačního prvku využívající neuronovou síť je otázka komplikovanější. Samotný výpočetní čas konkrétního mikrokontroleru může být velmi závislý na podpoře a metodách akcelerace výpočtu s maticemi. Problémem implementace může být také vytvoření přenosových funkcí a jejich větší náročnost výpočtu. Paměťová náročnost je v obou případech bezvýznamná nicméně linearizační prvek je náročnější protože musí pojmout neprázdné matice vah a prahů.

Tabulka 1 : Parametry kvality linearity

Metoda linearizace	er_{sq}	$er_{max}[V]$
Inverzní aproximace	8.172	0.079
Linearizační prvek	4.658	0.111

Dalším cílem bylo vylepšení ovladače otáček. Pro ovládání otáček rotačního pneumatického motoru byl vytvořen ovladač. Ovládání otáček probíhá pomocí nastavení řídicího napětí na proporcionálním průtokovém ventilu. Ovladač nemá při ovládání informaci o aktuálních otáčkách motoru a ovládání probíhá na základě předchozích natrénovaných zkušeností s řízeným systémem. Vnitřní struktura ovladače je tvořena připravenou neuronovou sítí. Schéma ovládání otáček je zachyceno na Obr. 1-13.



Obr. 1-13 – Schéma ovládání motoru

Ovladači jsou předloženy vstupní informace tvořené požadovanými otáčkami a pracovním tlakem stlačeného vzduchu. Ovladač podle vstupních informací nastaví řídicí napětí na průtokovém ventilu pro dosažení zvolených otáček. Neuronová síť aproximuje přenosovou funkci systému.

- Vytvoření vnitřní struktury ovladače

Vnitřní struktura ovladače je tvořena neuronovou sítí. V ovladači je využita vrstevnatá neuronová síť s dvěma skrytými vrstvami. Tato síť má dva neurony na vstupní vrstvě. Na vstup těchto neuronů jsou přivedeny hodnoty požadovaných otáček a pracovního tlaku. Skryté vrstvy mají každá dvacet neuronů. Přenosové funkce byly zvoleny shodně pro všechny neurony v jedné vrstvě. Ve skrytých vrstvách byla zvolena hyperbolická tangenciální sigmoidální přenosová funkce. U výstupní vrstvy byla jako přenosová funkce použita identita.

- Vytvoření trénovací množiny

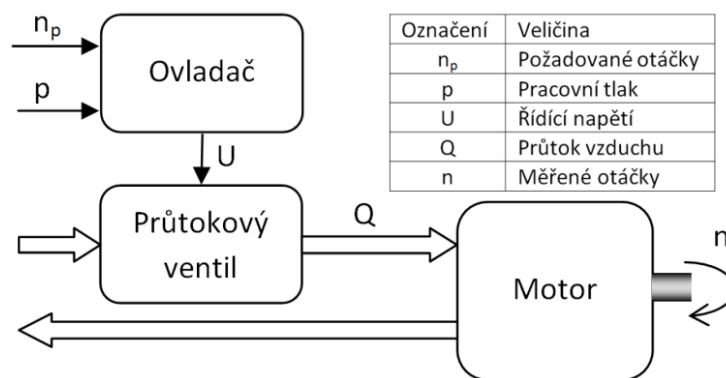
Trénování neuronové sítě pro úlohu ovládání otáček proběhlo metodou určení s učitelem. K tomuto procesu je potřeba sestavit trénovací množinu tvořenou vstupními a výstupními vektory. Pro získání dat proběhlo měření, kdy při nastaveném řídicím napětí průtokového ventilu a vstupním tlaku byly po ustálení chodu odměřeny otáčky. Měření pro každou konfiguraci proběhlo třikrát. Z naměřených dat byl vybrán soubor tvořící trénovací množinu.

- Implementace ovladače

Výsledný ovladač je implementován v měřicí stanici v prostředí LabVIEW. Jelikož jedinou potřebnou funkcí neuronové sítě v ovladači je vybavování, byl využit k popisu neuronové sítě maticový zápis. Tento přístup velmi zjednodušuje implementaci vybavování neuronové sítě, protože využívanými operacemi jsou pouze násobení a sčítání matic. Dalším potřebným krokem je aplikace přenosové funkce neuronu na hodnoty vektoru. Pro aplikaci přenosové funkce na vektor bylo vytvořené samostatné vnořené schéma. Pro správnou funkci neuronové sítě je nutné provést transformaci vstupních a výstupních hodnot. Vstupní hodnoty je potřeba normovat pro rozsah od -1 do 1. Výstupní hodnoty je potřeba odnormovat na výstupní rozsah. Koeficienty pro normování a odnormování hodnot byly získány z naměřených dat.

- Verifikace ovladače

Pro testování funkčnosti a možností ovladače byla provedena zkušební měření. Při měření byly zaznamenávány skutečné a požadované otáčky. Měření byla provedena v rozsahu 400 až 700 ot/min s krokem 50 ot/min a to vzestupně i sestupně směru pro zachycení vlivu na ovládání. Pracovní tlak byl 0,15 MPa. Měření a nastavené otáčky jsou zachyceny na Obr. 1-14. Otáčky měřené jsou označeny n a otáčky požadované n_p .



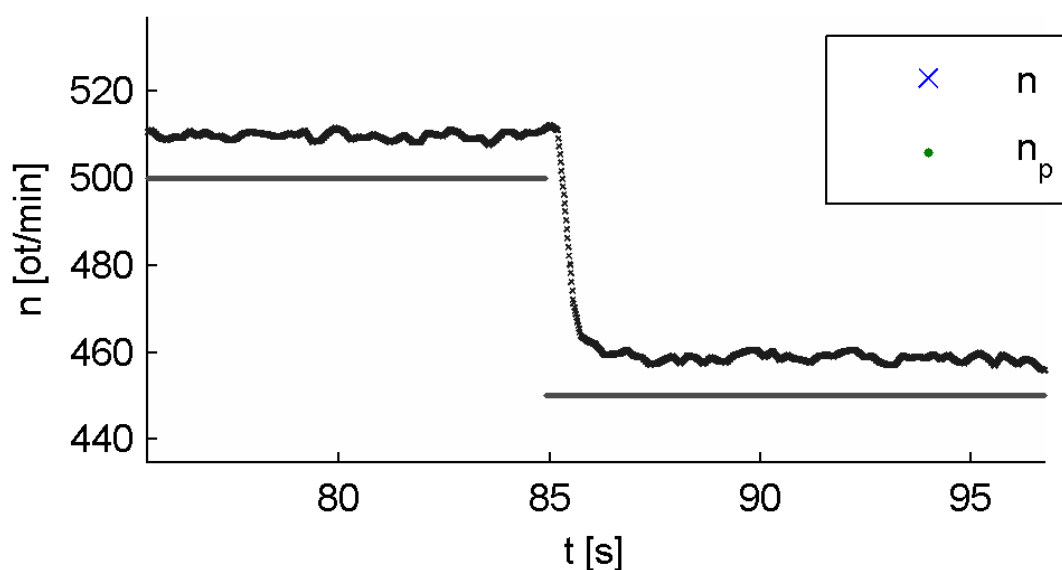
Obr. 1-14 – Srovnání nastavených a měřených otáček

Z grafu je patrné, že ovladač umožňuje řídit motor s určitou přesností, která klesá se stoupajícími otáčkami. To potvrzuje předcházející předpoklad o natrénování neuronové sítě. Ovládání proběhlo při relativně nízkém pracovním tlaku jako ověřovací měření při nepříznivých podmínkách. Při vyšším tlaku by se řídicí napětí pohybovalo ve strmější části charakteristiky a ovládání by bylo přesnější. Pro lepší představu o výsledcích měření byly zpracovány základní statistické údaje pro ustálený běh motoru. Výsledky jsou zachyceny v tabulce 2. V tabulce sloupec n_p představuje požadované otáčky. Druhý sloupec označený $E(n)$ zachycuje střední hodnotu měřených otáček. V posledním sloupci označeném $D(n)$ je zaznamenán rozptyl naměřeného souboru.

Tabulka 2. Výsledky měření

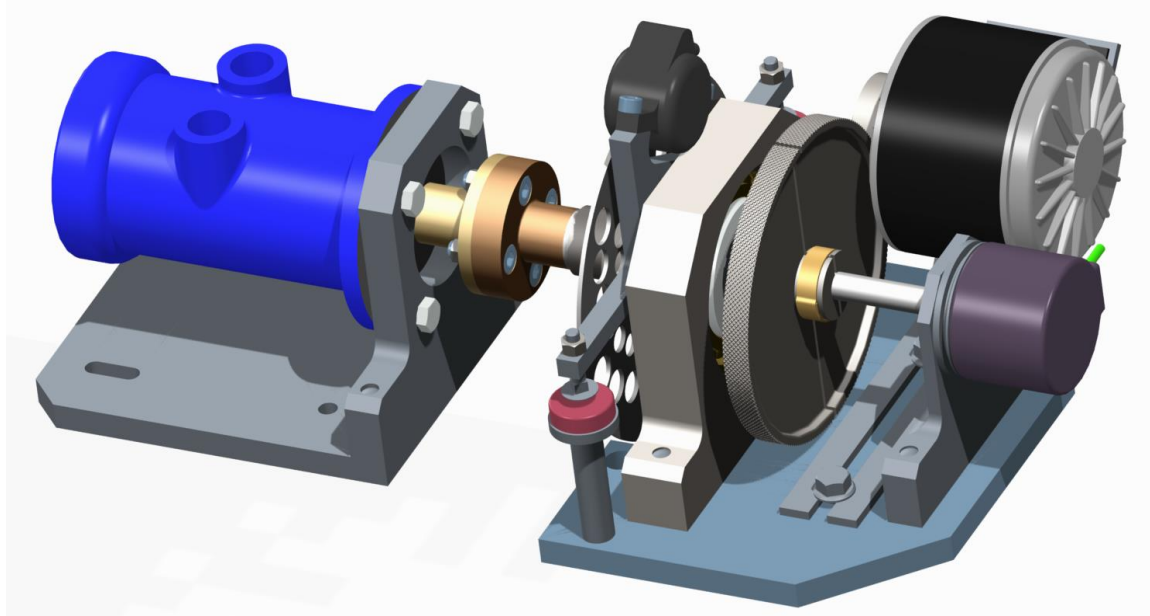
n_p [ot/min]	$E(n)$ [ot/min]	$D(n)$
400	399,8	1,56
450	454,5	1,04
500	506,5	1,70
550	559,5	2,90
600	604,9	14,83
650	661,9	8,43
700	732,8	3,27

Přechodová charakteristika změny otáček z 500 na 450 ot/min je zachycena na obrázku 9. Z grafu je patrné, že změna je poměrně rychlá, plynulá, a že ovládací proces je kvalitní.



Obr. 1-15 – Přechodová charakteristika

Dalším cílem byla úprava měřicího přípravku. Zatěžování pneumatického motoru pomocí hydraulicky ovládané mechanické brzdy se v praktických testech neukázalo jako vhodný přístup. Původní návrh počítal s vyššími pracovními tlaky stlačeného vzduchu, které z důvodu malé kapacity vzdušníku kompresorového systému laboratoře není možné dosáhnout po dostatečně dlouhou dobu pro provedení měření. Působení mechanické brzdy bylo velmi citlivé na nastavení tlaku hydrauliky. Nerovnoměrnost byla způsobena vyšší účinností při rozběhu a je zaviněna vyšším statickým třením, než dynamickým. Druhým elementem, negativně ovlivňujícím kvalitu zatěžování, byly změny způsobené ohřevem mechanické brzdy. Nový systém zatěžování je realizován pomocí řízeného elektromotoru, který působí v opačném smyslu otáčení. Motor je řízen pomocí pulzně šířkové modulace. Pro uchycení motoru byl vyroben držák připevněný k měřicímu přípravku. Držák je navržen s ohledem na usnadnění spojení hřídele pneumatického motoru s hřídelí elektromotoru pomocí třecího spojení. Elektromotor pracuje při vyšších otáčkách, proto je převodový poměr navržen do pomalu. Pro snížení setrvačnosti a namáhání přípravku je větší kotouč vyroben z plastu. Pro zvýšení tření je jemně rýhovaný. Kotouč elektromotoru je vyroben z oceli a potažen gumou. Upravený přípravek je zachycen na Obr. 1-16.



Obr. 1-16 – Upravený systém zátěže na měřicím přípravku

Pro řízení elektromotoru a testování implementace připravených regulátoru byla nainstalovaná výpočetní jednotka Arduino. Arduino je otevřená platforma založená na mikrokontrolerech ATmega od firmy Atmel a grafickém vývojovém prostředí. Platforma se vyznačuje velkou modularitou, snadným vývojem a jednoduchou implementací. Jednotka Arduino bude využita také pro testování a srovnání jednotlivých typů regulátoru a jejich nastavení. Výhodou je také implementace v programovacím C, která umožňuje snadnou přenositelnost navrženého regulátoru do jiných systémů. Jednotka je vybavena dvěma analogovými výstupy. První je využit pro řízení regulátoru elektromotoru. Druhý analogový výstup je využit o ovládání proporcionálního průtokového ventilu. Jednotka je také vybavena digitálními výstupními porty a jedním analogovým vstupním portem. Při práci s přípravkem lze zvolit, zda řízení bude provádět měřicí stanice nebo jednotka Arduino.

1.3 Řídicí systém prostorového polohovacího zařízení

Třetím tématem je výzkum a realizace řídicího systému prostorového polohovacího zařízení. Cílem této části projektu bylo testovat stroj na úlohách s vysokou přesností a vytvořit software pro kompenzaci nepřesnosti polohování.

- Kalibrace přístroje

Přesnost polohování přístroje je jedním z jeho nejdůležitějších parametrů. Z tohoto důvodu byla měřena přesnost polohování. Měření probíhalo pro každou osu přístroje zvlášť v rozsahu od 0 mm do 10 mm. Naměřené výsledky jsou uvedeny v Tab. 3, ve sloupci 2, 4, a 6. Po analýze naměřených dat bylo zjištěno, že chyba polohování dosahuje 1 až 2 procent požadované hodnoty. Tak velká chyba je pro polohovací přístroj nepřijatelná, proto bylo rozhodnuto o kalibraci. Výsledky měření po kalibraci jsou uvedené v Tab. 3 ve sloupci 3, 5 a 7.

Výsledky měření byly statisticky zpracovány. Aritmetický průměr byl počítán pomocí vzorce

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i,$$

kde x_i jsou výsledky jednotlivých pokusů, n je počet pokusů měření. Měření probíhalo 30 krát v každé pohybové ose.

Výběrový rozptyl byl počítán rovnicí

$$S^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2,$$

výběrová směrodatná odchylka vztahem

$$S = \sqrt{S^2}.$$

Porovnáním aritmetických průměrů ujeté vzdálenosti před a po kalibraci bylo zjištěno výrazné zlepšení přesnosti polohování. Přesnost se zvýšila o jedno desetinné místo. Pro ověření, zda kalibrace opravdu vedla k výrazným změnám, byl použit statistický test. Vybrán byl dvou výběrový t-test. Ten se vyznačuje velkou silou testu, avšak vyžaduje normalitu zkoumaných dat. Pro každý soubor byl zjištěn medián $\hat{x}$, který byl porovnán s aritmetickým průměrem. Relativní odchylka mediánu od aritmetického průměru byla spočítána pomocí vzorce

$$\Delta_x = \frac{\hat{x} - \bar{x}}{\bar{x}} \cdot 100\%.$$

Tato odchylka byla pro všechny soubory menší 10%, z čehož byl udělán závěr, že soubory obsahovaly data s normálním rozdělením pravděpodobnosti.

Testová statistika pro dvou výběrový t-test byla počítána rovnicí

$$T = \frac{\bar{x} - \bar{y}}{S_v} \cdot \sqrt{\frac{n \cdot m}{n + m}},$$

kde $\bar{x}$ je aritmetický průměr vzdálenosti před kalibrací, $\bar{y}$ je aritmetický průměr vzdálenosti po kalibraci,

n a m je počet pokusů v příslušném souboru dat (v našem případě 30).

Vážený výběrový rozptyl byl dán rovnicí

$$S_v^2 = \frac{1}{n+m-2} \cdot [(n-1)S_x^2 + (m-1)S_y^2].$$

Testová statistika byla porovnána s příslušným kvantilem Studentova rozložení $t_{n+m-2}(1 - \frac{\alpha}{2})$. Hladina testu α byla zvolena ve výši 0,05. Tomu odpovídá kvantil $t_{58}(0,975)$. Porovnání bylo provedeno pro každou měřenou osu. Byly uvažovány následující hypotézy:

- nulová hypotéza: $\bar{x} = \bar{y}$ (nedošlo ke změně aritmetického průměru po kalibraci).
- alternativní hypotéza: $\bar{x} \neq \bar{y}$ (došlo ke změně aritmetického průměru po kalibraci).

Výsledky testů jsou uvedeny v Tab. 3 v příslušném řádku. Hodnoty testové statistiky jsou výrazně větší, než kvantil Studentova rozdělení pro všechny pohybové osy. Z toho důvodu nulovou hypotézu zamítáme ve všech případech a můžeme udělat závěr, že došlo ke změně aritmetického průměru ve všech osách. Lze tedy konstatovat, že kalibrace měla kladný vliv na přesnost polohování.

Tab.3: Výsledky měření a statistického zpracování.

Osa	X		Y		Z	
Výsledky měření						
	Před kalibrací	Po kalibraci	Před kalibrací	Po kalibraci	Před kalibrací	Po kalibraci
1	10,15	10,02	9,81	9,99	10,11	9,99
2	10,10	10,01	9,80	10,00	10,09	10,01
3	10,07	9,99	9,81	10,01	10,09	10,01
4	10,07	10,01	9,81	10,00	10,06	10,01
5	10,08	10,01	9,81	9,99	10,10	10,02
6	10,06	10,01	9,81	10,00	10,09	10,01
7	10,08	10,01	9,80	10,00	10,09	10,00
8	10,07	10,01	9,80	10,01	10,10	10,00
9	10,09	10,01	9,79	10,02	10,09	10,01
10	10,09	10,00	9,79	10,01	10,09	10,01
11	10,07	10,01	9,81	10,02	10,08	10,01
12	10,07	10,01	9,81	10,01	10,01	10,00
13	10,07	10,00	9,82	10,01	10,07	10,01
14	10,07	10,01	9,82	10,01	10,02	10,02
15	10,07	10,01	9,83	10,01	10,08	10,01
16	10,07	10,01	9,82	10,00	10,09	10,03
17	10,07	10,01	9,80	10,01	10,09	10,00
18	10,06	10,00	9,82	10,02	10,07	10,00
19	10,07	10,00	9,82	10,02	10,09	10,01
20	10,07	10,00	9,80	10,02	10,05	10,01
21	10,07	10,00	9,80	10,01	10,08	10,02
22	10,07	10,00	9,81	10,00	10,08	10,01
23	10,06	10,01	9,83	10,00	10,09	10,01
24	10,06	10,01	9,82	10,01	10,11	10,01
25	10,06	10,01	9,80	10,02	10,09	10,01
26	10,06	10,01	9,81	10,00	10,09	10,00
27	10,06	9,99	9,82	10,01	10,09	10,01
28	10,05	10,01	9,83	10,01	10,08	10,02
29	10,02	10,00	9,80	10,01	10,04	10,01
30	10,05	10,01	9,81	10,02	10,09	10,01
Výsledky statistického zpracování						
Aritmetický průměr	10,0703	10,0063	9,8103	10,0083	10,08	10,0093
Medián	10,07	10,01	9,81	10,01	10,09	10,01
Relativní odchylka mediánu od průměru	0,182%	0,037%	0,004%	0,017%	0,099%	0,007%
Výběrový rozptyl	0,009759	0,000045	0,000121	0,000076	0,000538	0,000062
Výběrová směrodatná odchylka	0,098789	0,006687	0,010981	0,008743	0,023193	0,007849
Ověření významnosti kalibrace pomocí dvouvýběrového t-testu						
Testová statistika	16,2		77,3		15,8	
Kvantil Studentova rozdělení $t_{58}(0,975)$	2,002					

Další činností byl výzkum software pro kompenzaci nepřesnosti polohování při využití v různých aplikacích. Pro správnou funkčnost jakéhokoliv zařízení musí být správně nastaveny tři věci: Hardware, Software a Firmware. V této kapitole bude popsán software, firmware a zpracování výsledků (skládání snímků).

Ze začátku jsme používali testovací software Repetier-HOST, pomocí kterého jsme generovali řídicí signály pro mikrokontrolér Arduino s univerzálním firmwarem. Motor byl ovládán driverem, jenž dostával signály z Arduina napojeného na PC. Proces probíhal v manuálním režimu, tzn., bylo zapotřebí dvou softwarů. Jeden pro operace kamery, druhý pro řízení motorů. Nevýhodou manuálního řízení byla časová náročnost, kvůli prodlevám mezi jednotlivými kroky.

Bylo rozhodnuto, že je potřeba naprogramovat software a firmware, pro synchronizaci ovládání kamery a řízení motorů. Díky tomu se zvýší přesnost polohování kamery vůči objektu a zjednotí se nastavení parametrů jednotlivých kroků. Bude tak možno proces automatizovat a zjednoduší se postprocessing.

Pro programování firmwaru byl použit volně dostupný kompilátor Arduino 1.6.6. Pro programování softwaru byl použit kompilátor Microsoft Visual Basic 6.0, kvůli kompatibilitě s SDK od výrobce námi používaného mikroskopu Dino-Lite i kvůli tomu, že všechny návody byly psány pro Visual Basic.

Komunikace Arduina s PC probíhá pomocí sériového portu (SPI). Princip komunikace spočívá v tom, že Arduino načte určité množství bajtů/symbolů z bufferu sériového portu. Takže náš software posílá data do bufferu, odkud jsou dále načítána a zpracovávána. Buffer pojme maximálně 64 bajtů. Komunikace je pouze jednosměrná (PC -> Arduino), tedy není žádná zpětná vazba, což nevadí, protože pro naše účely není potřebná.

Firmware obsahuje několik algoritmů řízení motorů, pro různé druhy pohybu. Nejdůležitější algoritmy jsou pro pohyb nad snímaným objektem v rovině XY, návrat do základní polohy a test jednotlivých částí systému. Je možné měnit velikost kroku i rychlost motorů, tak, aby vše odpovídalo přiblížení používaného mikroskopu.

Během zkoušky strojů pro řešení různých manipulačních úloh s vysokou přesností se zjistilo, že nedochází ke ztrátě kroků a že odchylka je zanedbatelná.

Existuje několik metod pro skládání 2D snímků:

První metoda je manuální skládání podle úsudku operátora. Což je nepřesné, zdlouhavé a finančně náročné.

Druhá metoda využívá algoritmus speciálního softwaru, který hledá totožné části snímků, podle nichž pak snímky skládá. Nevýhoda tohoto algoritmu se projeví při skládání velmi podobných snímků, například série snímků švu. Výhodou je úplná automatizace, je však třeba myslet na částečné překrytí snímků. Tuto metodu lze vylepšit použitím referenčních bodů (pro běžné rozměry objektu). V našem případě snímání mikroskopického objektu přidávání referenčních bodů postrádá smysl, kvůli obtížnosti.

Poslední metoda je podobná první, s tím, že když víme velikost kroku a jeho přesnost, můžeme složit snímky na základě znalosti pozice konkrétního snímku. Tato metoda je pro nás nejvhodnější a proto jsme ji použili.

Popis procesu:

- 1) Zadání rozměrů snímaného objektu
- 2) Nastavení zvětšení mikroskopu
- 3) Najetí do základní polohy
- 4) Zahájení automatizovaného procesu
- 5) Software řídí a synchronizuje práci dvou zařízení. Nejdřív mikroskop pořídí snímek ve vysokém rozlišení, pak se vyšle signál pro přesun mikroskopu do další pozice v rovině XY
- 6) Po focení dostaneme matici snímků, která vypadá takto:



Obr. 1-17 – Matice snímků a směr pohybu kamery

- 7) Software vytvoří nový obrázek, do něhož začne postupně umisťovat jednotlivé snímky podle jejich pozice při snímání.
- 8) Software umožňuje ručně vyrovnat případné nepřesnosti kroku
- 9) Uložení

2. Řešitelský kolektiv / *Research team*

Ing. Radek Votrubec Ph.D.	- odpovědný řešitel projektu (KSA)
prof. Ing. Miroslav Olehla, CSc.	- školitel a akademický pracovník (KSA)
Ing. Jan Kolaja Ph.D.	- akademický pracovník (KSA)
Ing. Michal Moučka Ph.D.	- akademický pracovník (KSA)
Ing. Miroslav Vavroušek	- student (KSA)
Ing. Lukáš Stanislav	- student (KSA)
Ing. Michal Kašpárek	- student (KSA)
Ing. Maryna Garan	- student (KSA)
Ing. Iaroslav Kovalenko	- student (KSA)
Bc. Andrii Shynkarenko	- student (KSA)
Bc. Tomáš Kobr	- student (KSA)
Bc. Michal Říčan	- student (KSA)
Bc. Jakub Horáček	- student (KSA)
Bc. Martin Sova	- student (KSA)

3. Dosažené výsledky / *Achieved results*

V rámci prvního okruhu, řízení vibroizolačních systémů, bylo provedeno zabudování pneumatického prvku do sedačky automobilu. Za jízdy bylo provedeno měření tlaku v sedáku a zrychlení sedačky. Pro frekvenční analýzu byl vybrán jako vhodnější signál zrychlení. U ortopedické matrace bylo navrženo několik způsobů na modifikaci tuhosti jejích nosníků pomocí různých pneumatických prvků. Byl navržen řídicí systém pro regulaci tlaku v těchto prvcích.

V rámci druhého okruhu byly vytvořeny prvky pro linearizaci systému, které umožní využití metod řízení lineárních dynamických systémů. Vytvoření linearizačního prvku realizovaného neuronovou sítí umožnilo otestovat možnosti neuronových sítí v oblasti regrese funkčních zvilostí. Linearizace pomocí neuronové sítě byla porovnána s nalezenou aproximační funkcí. Pro řízení motoru bez zpětné vazby byl vytvořen ovladač využívající neuronovou síť. V budoucí práci by bylo vhodné ovladač rozšířit o možnost kompenzace zatížení motoru. Pro měření a testování chování motoru při zátěži byl upraven brzdový systém přípravku a doplněn elektromotorem pro simulaci zátěže. Pro nestandardizované součásti brzdového systému byla vytvořena výkresová dokumentace a technologický postup výroby. Motor je vybaven řízením s pulzně šířkovou modulací. Pro řízení elektromotoru a testování navržených regulátorů byla v měřicí soustavě instalována jednotka Arduino.

V rámci třetího okruhu bylo testováno polohovací zařízení na úlohách s vysokou přesností a byl analyzován vliv kalibrace na přesnost polohování. Dále byl vytvořen software pro kompenzaci nepřesnosti polohování. V rámci tohoto projektu dále probíhala práce na přestavění dopravního modelu umístěného na chodbě třetího patra budovy F. Jeho řídicí systém byl přestavěn a realizován pomocí mikrokontroléru Arduino.

Výsledky výzkumu byly publikovány ve čtyřech příspěvcích na konferencích. Další příspěvky jsou rozpracovány a budou publikovány v roce 2016. Projekt dále podpořil práci na vydané monografii zabývající se identifikačními metodami tlumičů a jiných vibroizolačních soustav a činnost v rámci čtyř diplomových prací.

4. Vyhodnocení výsledků projektu v porovnání s vytyčenými cíli / *Evaluation of project results in comparison with objectives*

Cíle uvedené v přihlášce projektu byly splněny. Projekt může v příštím roce navázat na dosažené výsledky.

5. Seznam výstupů v průběhu řešení projektu (publikace, přednášky, a pod.) / *List outcomes in the course of the project (publications, lectures, etc.)*

A. Výstupy uplatnitelné v RIV s bodovým ohodnocením, které budou předkládány jako výsledky studentských projektů do RIVu za rok 2015

A.1 Kategorie publikace

článek ve sborníku konference evidovaném v databázi CSC - ISI - Thomson Reuters (D).

VOTRUBEC, Radek. Platform Stabilized by means of Two Gyroscopes and Damped with Magnetorheological Damper, In: *Applied Mechanics and Materials* s. 100-105, Elsevier, Switzerland, 2015, ISSN: 1662-7482.

KOVALENKO, Iaroslav, SHYNKARENKO, Andrii and Maryna GARAN. Digital Magnifying Device Based on Prusa i3, In: *International Conference on Applied Mechanics and Mechatronic Engineering*, Bangkok, Thailand, 2015

článek ve sborníku konference mimo databázi CSC – ISI, dle popisu metodiky (Do).

VAVROUŠEK, M. Workshop for Ph.D. Students of Faculty of Textile Engineering and Faculty of Mechanical Engineering TUL: Influence of the structure on the possibilities of neural networks. s. 254-258. Liberec: TU of Liberec, 2015. ISBN 978-80-7494-229-7.

VAVROUŠEK, M. Manufacturing Systems Today and Tomorrow 2015: The application of neural networks for function values approximation. Liberec: TU of Liberec, 2015. ISBN 978-80-7494-256-3.

Monografie

VOTRUBEC, Radek. *Identifikace parametrů matematického modelu tlumičů a vibroizolačních systémů*. 1. Liberec: Technická Univerzita v Liberci, 2015. ISBN 978-80-7494-253-2.

A.2 Kategorie patenty

A.3 Kategorie aplikované výsledky

funkční vzorek (G). Uvést uživatele výsledku

Orthopedic mattress with variable stiffness; Druh výsledku: G/B - Funkční vzorek;
Ortopedická matrace s nastavitelnou tuhostí roštu.

The system for measuring rotary pneumatic actuator; Druh výsledku: G/B - Funkční vzorek;
Přípravek na měření a regulaci pneumatických rotačních motorů.

software v souladu s metodikou (R)

StiffnessSeat.vi, Aplikace obsahuje řízení tlaku v pneumatickém prvku umístěném v sedáku sedačky osobního automobilu na základě frekvenční analýzy signálu zrychlení pohybu sedačky.

B. Výstupy u kterých bylo zahájeno uplatnění s následným zařazením do RIVu s bodovým hodnocením:

B.1 Kategorie publikace

B.2 Kategorie patenty

B.3 Kategorie aplikované výsledky

C. Doktorské disertační práce obhájené v roce 2015:

D. Diplomové práce obhájené v roce 2015:

SOVA, Martin. *Aplikace pro výpočet frekvenčních charakteristik pro mobilní zařízení s Androidem*. Liberec, 2015.

HORÁČEK, Jakub. *Řídicí systém pro přesné polohování laserových terčů*. Liberec, 2015.

ŘÍČAN, Michal. *Aplikace pro synchronizaci událostí mezi VersionOne a ALM*. Liberec, 2015.

KOBR, Tomáš. *Aplikace pro podporu pořádání závodů pro Orientační sporty*. Liberec, 2015.

E. Další příklady excelence dosažené s podporou prostředků na SGS (např. oceněné práce):

F. Ostatní výstupy včetně nebodovaných výstupů v RIVu:

6. Změny v projektu / Changes in the project

23.6.2015 bylo požádáno o změnu správce rozpočtu. Místo p. Ládrové, která odešla z katedry, byla dosazena p. Aschenbrennerová a za jejího zástupce byl dosazen p. Miroslav Vavroušek.

Tým byl doplněn o studenty NMSP, kteří se začali podílet na řešení až po podání přihlášky projektu formou řešení jejich diplomových prací, jejichž témata souvisí s náplní projektu. Jedná se o tyto studenty: Bc. Tomáš Kobr, Bc. Michal Říčan, Bc. Jakub Horáček a Bc. Martin Sova. Dále byl tým doplněn o jejich školitele Ing. Michala Moučku Ph.D.

7. Výkaz o hospodaření s grantovými prostředky (příloha) / Statement on the management of grant funds (Annex)

Účet: 501110 Spotřeba materiálu

Ortopedická matrace	29130,00	polotovary - sériově vyráběná matrace
Materiál	3960,00	el. prvky Arduino
Kabely	3739,00	materiál na řízenou matraci
Ele. Součástky	2984,00	materiál na řízenou matraci
Textilní páska	145,00	materiál na konstrukci řízené matrace
Svěrky, lepidlo, tlačná pistole	559,00	materiál na konstrukci řízené matrace
materiál	2050,00	materiál na konstrukci řízené matrace
senzory zrychlení	6534,00	senzory zrychlení pro měření signálů pro frekvenční analýzu
stavebnice na součástky	1159,00	el. prvky Arduino

Účet: 501150 Spotřeba materiálu DDHM

Motor Maxon EC90 s přísluř.	17061,00	servomotor, kabely a příslušenství
-----------------------------	----------	------------------------------------

Účet: 521110 Mzdové náklady

Zak.-odměny celkem	15000,00	odměny za hlavní činnost
Zak.-odměny celkem	17000,00	odměny za hlavní činnost

Účet: 524110 Zákonné soc.pojištění

Soc. poj. - celkem - zaměstnavatel	3750,00	platba související s odměnami
Soc. poj. - celkem - zaměstnavatel	4250,00	platba související s odměnami

Účet: 524150 Zákonné soc.pojištění

Zdr. poj. - zaměstnavatel VZP	1349,88	platba související s odměnami
Zdr. poj. - zaměstnavatel VZP	1530,19	platba související s odměnami

Účet: 549115 Jiné osta.nákl

Popl.10,2 USD Kovalen Hong Kong	250,84	poplatek za převod bance
---------------------------------	--------	--------------------------

Účet: 549135 Jiné ost.náklady-účast.popl.

Dodaň Koval Hong Kong	2737,09	konference AMME2015
Kovalenko Hong Kong AMME2015	13033,76	konference AMME2015

Účet: 549150 Jiné ost.nákl.hl.č.-stip.VaV, inov.činnost

Stip.VaV FS 5/15-115-21001	20000,00	stipendia studentům za činnost na projektu
Stip.VaV FS 6/15-115,21001	12000,00	stipendia studentům za činnost na projektu
Stip.VaV FS 9/15-115,21001	20000,00	stipendia studentům za činnost na projektu
Stip.VaV FS 10/15-115,21001	14000,00	stipendia studentům za činnost na projektu

Účet: 691115 Dotace - účelová podp. na spec.výzkum

rozúčt.dotace na proj. SGS	250000,00	dotace projektu
----------------------------	-----------	-----------------

Účet: 549198 Režie Jiné doplň. náklady

Režijní náklady	57777,24	odvedená režie
-----------------	----------	----------------

Vyjádření předsedy komise SGS fakulty / <i>Comments of Chairman of SGC committee of Faculty</i>	Datum / <i>Date</i>	
	Podpis / <i>Signature</i>	
Vyjádření předsedy komise SGS TUL / <i>Comments of Chairman of TUL SGC committee</i>	Datum / <i>Date</i>	
	Podpis / <i>Signature</i>	