



SLOVENSKÁ TECHNICKÁ UNIVERZITA V BRATISLAVE
MATERIÁLOVOTECHNOLOGICKÁ FAKULTA SO SÍDLOM V TRNAVE

Ing. Roman Zelník

Autoreferát dizertačnej práce

**VÝSKUM V OBLASTI VÝVOJA AUTONÓMNYCH ALGORITMOV NASTAVENIA
TLAKOVÝCH SNÍMAČOV V KALIBRAČNÝCH ZARIADENIACH PRE VÝROBNÉ
SYSTÉMY**

na získanie akademického titulu: doktor (philosophiae doctor, PhD.)

v doktorandskom študijnom programe: Strojárske technológie a materiály

v študijnom odbore: strojárstvo

Forma štúdia: denná

Trnava, máj 2024



Dizertačná práca bola vypracovaná v dennej forme doktorandského štúdia na Ústave výrobných technológií Materiálovotechnologickej fakulty so sídlom v Trnave Slovenskej technickej univerzity v Bratislave.

Predkladateľ Ing. Roman Zelník
Ústav výrobných technológií
Materiálovotechnologická fakulta so sídlom v Trnave, Slovenská
Technická univerzita v Bratislave
Jána Bottu 2781/25
917 24 Trnava

Školiteľ Dr.h.c. prof. Ing. Pavel Božek, CSc.
Ústav výrobných technológií
Materiálovotechnologická fakulta so sídlom v Trnave, Slovenská
Technická univerzita v Bratislave
Jána Bottu 2781/25
917 24 Trnava

Autoreferát bol rozoslaný dňa:

Obhajoba dizertačnej práce sa bude konať dňao.....hod.

Na Materiálovotechnologickej fakulte STU so sídlom v Trnave, J. Bottu 25, 917 24 Trnava.

.....
prof Ing. Miloš Čambál, CSc.
dekan MTF STU

OBSAH

ÚVOD.....	3
1 MERANÝ SENZOR A TECHNICKÝ ROZBOR	4
2 CIELE DIZERTAČNEJ PRÁCE	5
3 ORIGINÁLNY VÝVOJ DIAGNOSTICKÉHO LABORATÓRIA.....	6
3.1 Diagnostické laboratórium kalibrácie.....	6
3.2 Vlastné špecializované prípravky diagnostického laboratória.....	8
3.2.1 Ustavovací a polohovací prípravok senzora.....	10
3.2.2 Experimentálne tlačné prípravky diagnostického laboratória	13
4 VLASTNÝ VÝSKUM NASTAVENIA TLAKOVÝCH SNÍMAČOV	15
4.1 Základy merania sily	15
4.1.1 Vyhodnotenie merania v grafe	17
4.1.2 Metodika vyhodnotenia nameraných hodnôt	17
4.1.3 Optimalizácia meraných dát.....	18
4.2 Problematika riešená výskumom.....	19
4.2.1 Synchronizácia meraných dát	19
4.2.2 Kalibračné parametre, profil senzora, logika, možnosti, BOZP a riešenia.....	21
4.2.3 Hladinová lineárna interpolácia	22
4.3 Proces kalibrácie.....	24
4.3.1 Úkon Dotyk.....	24
4.3.2 Výpočtový a logický aspekt kalibrácie	25
4.3.3 Vizualna verifikácia stavu senzora po jeho kalibrácii	27
4.4 Opotrebenie senzora a metódy zvyšovania spoľahlivosti senzora.....	28
4.4.1 Dosiahnuteľné maximum senzora alebo prevodníka	28
4.4.2 Nestálosť daného rozsahu	29
4.4.3 Nestálosť silovej hladiny.....	30
4.4.4 Nestálosť nulovej hladiny a jej matematická korekcia.....	30
4.4.5 Opotrebenie senzora a jeho matematické vyhodnotenie	31
5 EXPERIMENTY PROCESOV KALIBRÁCIE	33
5.1 Expertíza špecializovaného prípravku vyrobeného aditívnou metódou	33
5.2 Softvérové nástroje pre verifikáciu nastavenia kalibrácie a diagnostiky	37
6 PRÍNOS VÝVOJA A VÝSKUMU KALIBRAČNÝCH PROCESOV V OBLASTI AUTONÓMNYCH ALGORITMOV DIAGNOSTIKY	39
6.1 Súčasná verzia vylepšené algoritmy kalibrácie a autonómnosť diagnostiky	39
6.2 Originálne autonómne moduly algoritmov kalibračných procesov	40
6.3 Blokové schéma Metodiky autonómnej diagnostiky tlakových senzorov	43
ZÁVER	44
ZOZNAM BIBLIOGRAFICKÝCH ODKAZOV	46
ZOZNAM PUBLIKAČNEJ ČINNOSTI	50

ÚVOD

Dizertačná práca s názvom Výskum v oblasti vývoja autonómnych algoritmov nastavenia tlakových snímačov v kalibračných zariadeniach pre výrobné systémy je orientovaná najmä v téme výskumu a vývoja nastavenia tlakových snímačov a sústreďuje sa spracovanie metodiky kalibrácie pre diagnostické zariadenia.

Diagnostika ako proces analýzy stavu cieľového systému je v súčasnej dobe nesmierne dôležitá vo všetkých oblastiach vedy a techniky. Výskum a vývoj v danej oblasti neustále napreduje, využívajú sa nové koncepcie, technológie aj materiály. Rovnako sa kladú aj vyššie nároky na presnosť, detailnosť ako aj spoľahlivosť diagnostiky.

Motiváciou výberu témy práce je možnosť profesionálneho rozvoja a prehĺbenie získaných skúseností z predchádzajúceho obdobia, v ktorom som mal možnosť realizovať sa v oblasti profesionálnej kalibrácie a diagnostiky priamo s daným typom senzora.

Význam témy práce je priniesť pre vedecko-výskumnú obec nové poznatky získané realizáciou výskumno-vývojových aktivít tak, aby sa docielilo požadovaného originálneho poznania.

Ciele práce vychádzajú z analýzy súčasného stavu oblasti diagnostiky. Aktuálne využívané algoritmy určené pre kalibráciu a diagnostiku senzorov nespĺňajú štandardy autonómnosti súčasnej doby. Na základe analýzy súčasných algoritmov a metodík je možné definovať priestor pre hľadanie nových riešení, sebarealizáciu, ako aj implementáciu inovatívnych riešení či zlepšení. Očakávaný prínos práce je priniesť nové, originálne a doposiaľ nepublikované poznatky metodiky a informácie v danej oblasti.

Aktuálnosť témy je podporená a potvrdená poznatkami o aplikácii senzorov v akomkoľvek segmente bežného života. Sensory sú rovnako adaptované do veľkého množstva strojov, zariadení a celkovo technických systémov v industriálnom odvetví. Ich využitie je široké a majú pevné zastúpenie v technickej oblasti.

Medzi metódy spracovania práce patria pozorovacie, komparačné, analogické a analyzačné postupy tvorby. Využiť je možné matematické, analytické ako aj logické prístupy k návrhu nových riešení vrátane spracovania nových konštrukčno-technologických prvkov.

Práca sa zaoberá štúdiom diagnostiky ako komplexnej témy. Zároveň sa zameriava aj na detailnú konkrétnu časť s diagnostikou priamo súvisiacu, a teda kalibráciou senzorov. Diagnostika by mala byť spojením analýzy, kalibrácie a vyhodnotenia senzorov. Na základe zložitého názvu práce je vhodné v prvej kapitole rozvinúť tematiku na odborné celky informácií, ktoré upresnia chápanie zámeru zadania.

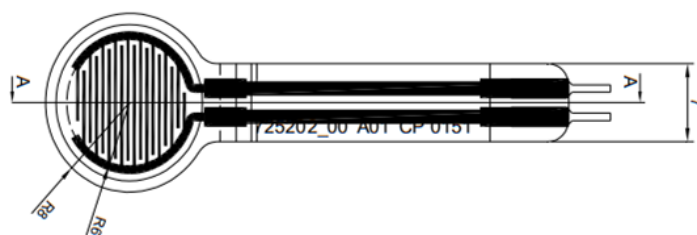
1 MERANÝ SENZOR A TECHNICKÝ ROZBOR

Pre nastavenie tlakových senzorov sa v práci použije nasledovný typ senzora:

- Senzor tlaku CP 151 NS (FSR-151 NS) | IEE (0,5-100 N/cm² D12mm) (Obr. 1)

Technické parametre:

Výrobca:	IEE
Typ senzora:	Force
Tlak Min:	- Pa
Tlak Max:	- Pa
Citlivosť:	55555
Interface:	Analog
Teplota Min:	-40 °C
Teplota Max:	+85 °C
Zapúzdenie:	15,23x51,65mm
RoHS:	Áno



Obr. 1 Senzor tlaku FSR-151 NS

Senzor je zariadenie, ktoré konvertuje fyzikálny fenomén na elektrický signál. Môže sa povedať, že senzor reprezentuje časť rozhrania medzi fyzikálnym svetom a svetom elektrických zariadení, napríklad počítačom (Wilson 2004).

Každý senzor má odlišný pracovný princíp v závislosti od fyzickej konštrukcie a fyzikálnych parametrov, ktoré práve meria. Každý z nich prenáša signál buď ako analógový alebo digitálny. Tieto špecifické detaily sú úplne demonštrované v technickom liste pre každý senzor s typickou schémou zapojenia a spôsobom jeho prepojenia (What 2020).

2 CIELE DIZERTAČNEJ PRÁCE

Cieľom práce je kompletizácia výskumu v oblasti vývoja algoritmov konfigurácie taktilných snímačov v procese kalibrácie. Výskum pozostáva z množstva meraní, nadobudnutých poznatkov a expertízy správania sa snímačov v procese merania. Dôležitý prínos publikácie je zameraný na vysvetlenie vedeckosti teórie a aplikačné možnosti poznatkov z oblasti progresívnej diagnostiky. Výstup disponuje matematickými kalkuláciami pre získavanie nových kalibračných dát, ako aj vyhodnocovacími logickými metódami analýzy stavu spoľahlivosti senzora.

Obsah práce je rozdelený na dôležité tematické kapitoly podľa charakteru a progresu výskumno-vývojových aktivít. Úvod sa zaoberá teoretickou prípravou a štúdiom potrebných informácií. Nadobudnuté poznatky sa aplikovali v ďalšej časti pri realizácii a vývoji špecializovaného diagnostického laboratória. Napriek voliteľnosti vypracovania vývojových aktivít a nevyhnutnosti skúmania definovanej problematiky sa považuje priebeh zrealizovaného aj budúceho vývoja za nevyhnutný k dosiahnutiu kvalitného výskumu.

Splnenie cieľov spočíva vo vypracovaní odbornej metodiky disponujúcej etapou rozboru charakteristiky senzora, etapou spoľahlivosti a matematických korekcií a etapou autonómneho algoritmu pre kalibračné zariadenia v technických systémoch. Výsledkom je optimálny logický postup diagnostiky snímačov pre účelové zvyšovanie ich životnosti, prevádzkyschopnosti a presnosti.

Prínosom publikácie je komplexný rozbor výskumu metód kalibrácie a diagnostiky, a určovanie nastavenia tlakových senzorov v technických systémoch, kde pre vedecko-výskumnú obec bude zdrojom informácií, poznatkov a príkladov pre ďalšiu výskumnú činnosť.

Splnenie hlavného cieľa práce je podnietené vypracovaním nasledovných vlastných čiastkových cieľov:

- Realizácia originálneho vývoja diagnostického laboratória kalibrácie tlakových senzorov v technických systémoch vrátane špecializovaných prípravkov.
- Vypracovanie vlastného výskumu nastavenia tlakových snímačov – nadobudnutie nových tematických odborných poznatkov na základe hĺbkovej analýzy a poznania správania sa senzora v rôznych mierach opotrebenia vrátane výpočtových návrhov.
- Určenie prínosu vývoja a výskumu kalibračných procesov v oblasti autonómnych algoritmov diagnostiky.

3 ORIGINÁLNY VÝVOJ DIAGNOSTICKÉHO LABORATÓRIA

Kapitola originálneho vývoja diagnostického laboratória obsahuje požiadavky kladené na proces diagnostiky, popis diagnostického laboratória kalibrácie, ako aj vlastné špecializované prípravky pre vykonávanie odborných meraní a experimentov.

Požiadavky pre realizáciu diagnostiky je nutné zlučiť ako súhrn informácií o ciele laboratória pre diagnostiku tlakových senzorov, informácií o princípe a funkčnosti laboratória, ako aj informácií o metodike a očakávaných prínosoch. Cieľom laboratória je diagnostikovať senzory z technického a matematického pohľadu, definovať nové premenné a parametre a vymedziť špecifiká senzorov ako sú rôzne typy opotrebenia a pod. Princíp a funkčnosť laboratória je merať, analyzovať a kalibrovať tlakové senzory pre účelové zvyšovanie ich životnosti, prevádzkyschopnosti, spoľahlivosti a presnosti. Metodika zvolená v práci sa zaoberá diagnostikou v reálnom čase riadenou počítačom. Sú použité algoritmické metódy pre korigovanie hodnôt výstupu senzora, ich prepočet, analýza a autonómny prístup k automatizovanej diagnostike. Očakávané prínosy vývoja laboratória sú získanie nových poznatkov o diagnostike vybraných typov senzorov, funkčný a efektívny algoritmus autonómnej diagnostiky, laboratórium progresívnych metód merania s tlakovými senzormi.

Technická realizácia diagnostického laboratória:

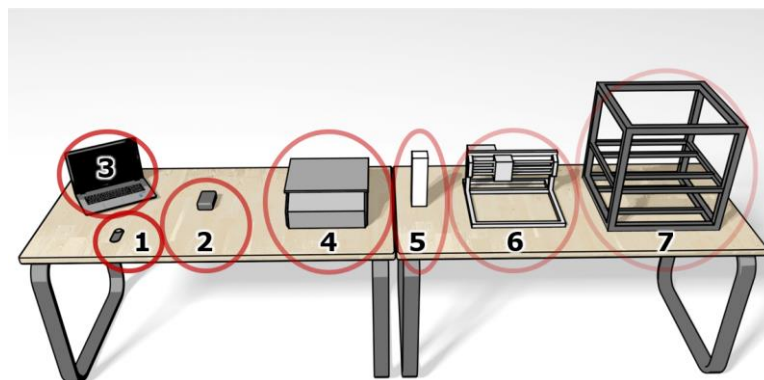
V rámci budovania diagnostického zariadenia je prirodzené, že príde potreba vyvinúť a skúmať možnosti prípravkov slúžiacich k prevádzke samotného zariadenia. Pri návrhu diagnostického zariadenia boli použité nasledovné prípravky:

- Prípravok pre ustavenie a polohovanie senzora v diagnostickom zariadení
- Zložené viacpružinové tlačné prípravky pre transformáciu sily

Osobitnú časť prípravkov môže tvoriť konštrukcia stavebnicového profilu, ktorá síce slúži ako skelet zariadenia, ale zároveň ustavuje kalibračné zariadenie. Tým zaisťuje jeho polohu voči senzoru. Tak plní funkciu nielen skeletu ale aj ustavovacieho prípravku.

3.1 Diagnostické laboratórium kalibrácie

Na úvod do časti zrealizovaného vývoja je vhodné rozobrať detaily diagnostiky a jej prevádzky. Realizácia diagnostického procesu sa musí realizovať na pracovisku na tom určenom. Začiatok výskumno-vývojového bádania bol zameraný na vyhotovenie pracoviska. Navrhnuté časti prvej idey sú zobrazené na obrázku 2.

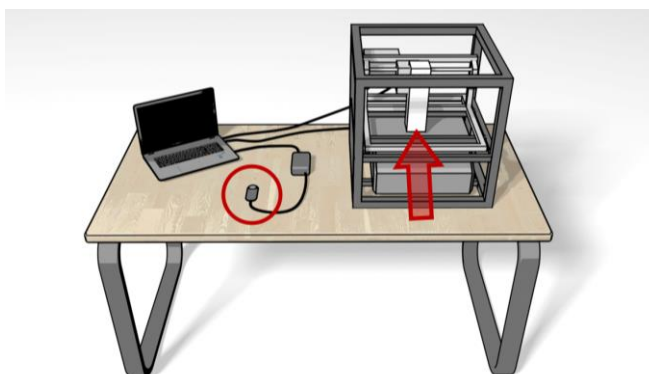


Obr. 2 Rozložená zostava konceptu diagnostického laboratória

Legenda:

1. Tlakový taktilný senzor
2. Prevodníkové zariadenie
3. Riadiaci počítač
4. Kalibračné zariadenie
5. Tlakový dotykový prípravok
6. Špeciálne CNC 3-osové zariadenie
7. Podporná konštrukcia (Skelet)

Po spojení a uložení všetkých dielov do zostavy získame koncept diagnostického laboratória schopného realizovať procesy diagnostiky. Hlavnou myšlienkou je, aby bolo diagnostické zariadenie dostatočne presné, tuhé, bezpečné a schopné vykonať určené operácie. Dokončený koncept laboratória je pripravený na vloženie diagnostikovaného senzora. Na obrázku 3 je možné vidieť červenou šípkou miesto vkladania senzora, ktorý je zvýraznený v červenom kruhu.



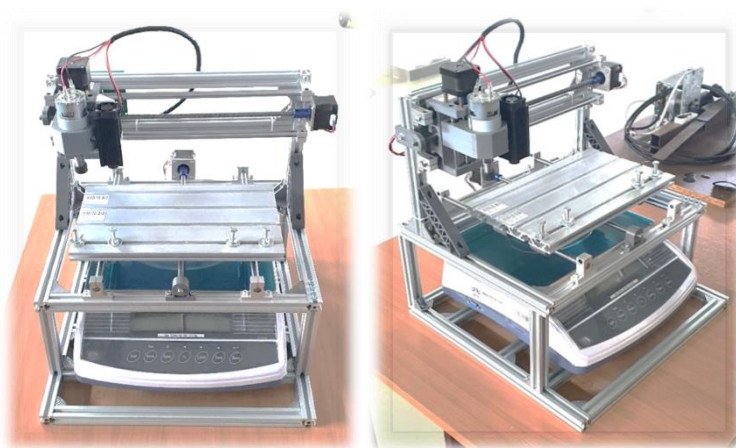
Obr. 3 Zložená zostava konceptu diagnostického laboratória

Po koncepte diagnostického laboratória sa začala jeho realizácia. Vďaka môjmu školiťovi a jeho pomoci bolo možné sa realizovať na zakúpenom CNC špecializovanom zariadení určenom pre viacúčelové operácie. Toto zariadenie je ovládané počítačom, čo vyhovuje podmienkam diagnostického procesu. Zároveň je schopné vykonávať jemný (dostatočne presný) vertikálny pohyb. Po využití vedomostí so stavebnicovým profilovým hliníkovým systémom je možné naviazať na aktuálnu konštrukciu CNC zariadenia. Nie je tak potrebná nová realizácia skeletu, využije sa tak už pomerne podstatná časť existujúcich častí. Tieto časti boli viditeľne mimoriadne tuhé a pevné, čo bolo v tomto prípade plne dostačujúce k procesom diagnostiky. K existujúceho CNC zariadeniu sa tak vývojom domontovali stojny a spodný rám, ktoré vytvárali spoločne kľetku pre kalibrátor. Po vložení kalibračného zariadenia do zostavy sa pracovalo ďalej na ostatných predmetoch zariadenia. V rámci návrhu kľetky kalibračného zariadenia bola vytvorená 3D modelová simulácia navrhovaného stavu pre overenie správnosti. Model preukázal realizovateľnosť, hospodárnosť projektu ako aj časovú a pevnostnú efektivitu. Malý náhľad do simulácie modelu je možné vidieť na obrázku 4, kde je zelenou farbou zobrazená CNC konštrukcia aktuálneho existujúceho zariadenia, modrou kalibračné zariadenie (zjednodušene) a šedou farbou sú znázornené na mieru vytvorené časti kľetky spodnej časti technického systému (Zelník R. 2021).



Obr. 4 3D Simulovaný návrh kletky diagnostického zariadenia

Celý hotový systém v kompletnej podobe prešiel základnými testami a vyhovuje v danom bode vývoja diagnostike. Zariadenie zobrazené v dvoch pohľadoch v danom bode vývoja je možné vidieť na obrázku 5, zľava: pohľad na prednú časť a pohľad šikmo z boku na zariadenie.



Obr. 5 Diagnostické laboratórium s vytvorenou časťou kletky

3.2 Vlastné špecializované prípravky diagnostického laboratória

Prípravky implementované do diagnostického laboratória sú nevyhnutnou časťou výskumu a vývoja súvisiaceho s experimentami a meraním. Častokrát sa bez prípravkov nezaobídeme ani pri základných úkonoch v bežnej prevádzke, preto sa ich dôležitosť nesmie podceňovať. V mojom prípade sa vytvorilo viac typov prípravkov, k ktorým vybrané prípravky boli aj vyrobené a implementované do diagnostického laboratória.

Prípravky transformácie sily sú špecifickým segmentom najmä kvôli svojej špecializácii. Sú určené cieľovo pre konkrétny účel vykonávaný v diagnostickom zariadení. V tomto prípade sa jedná o transformáciu sily pôsobiacej na senzor.

Transformácia sily je v tomto type prípravkov definovaná ako premena dynamického pohybu prípravku na sústredený tlak (a silu) v lokálne orientovanom mieste. Pohyb prípravku sa plánuje realizovať pomocou diagnostického zariadenia, pričom bude uchytený v hlave CNC zariadenia. Pohyb sa vykonáva vo vertikálnom smere v konkrétnom rozsahu určenom koncovými polohami CNC zariadenia. Samotný výkon vytvorenia tlaku je rovnako definovaný výkonom CNC zariadenia, konkrétne technickej časti krokového motora. Nie je potrebné v tomto prípade definovať výkon reálnymi fyzikálnymi parametrami, ale je nutné určiť výstupnú silu a schopnosť zariadenia adaptabilne reagovať na zmeny potrieb diagnostiky. Tie je možné docieľiť na základe

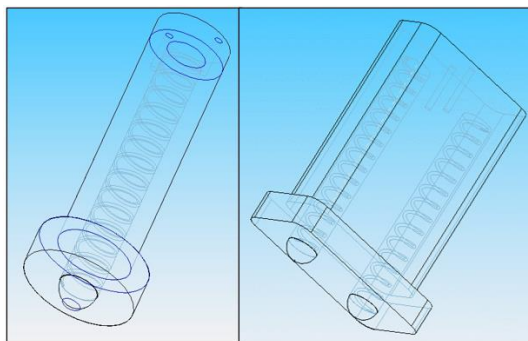
rôznych premenných. Výstupná sila je sila vyvíjaná na plochu senzora. Samotné CNC zariadenie túto silu vytvoriť nedokáže v potrebnej miere a v požadovaných parametroch a preto sa naskytá potreba prípravku.

Prípravok premeny pohybu na tlak je konštrukčným jednoduchým prostriedkom na to, aby sa v rámci diagnostiky mohlo doceliť požadovanej krivky meraním. Jeho konštrukcia umožní plynulú zmenu pohybu na tlak, pričom slovo plynulý je kľúčové. Plynule sa tak zreguluje meraný tlak na senzory, čo umožní jeho detailnú kontrolu a verifikáciu stavu aktuálne meraných hodnôt. Zároveň umožní konštrukcia prípravku tzv. ustálené meranie. Ide o stav, kedy CNC zariadenie vyvinie pohyb do meracej pozície, kým sa vyvinie tlak, napríklad 50N. V tejto nameranej hodnote sa CNC hlava zastaví. Ustálené meranie je v tomto okamihu dané konštrukciou prípravku tak, aby sa aj naďalej vyvíjal rovnaký a ustálený tlak na senzor.

Začiatok výskumu dizertačnej práce sa venoval vývoju prípravkov potrebných pre transformáciu sily, z ktorých je možné zosumarizovať dva rozdielne modely. Oba sú typovo aj ideovo rovnaké, mení sa však vnútorná časť. Prípravok začína základňou a jeho funkčným zakončením je dotykový tlačník. Ten sa vo svojej pohybovej podstate dotýka diagnostikovaného senzora a tak vyvíja tlak pre realizáciu diagnostiky.

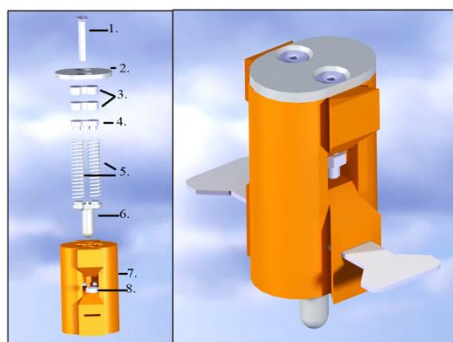
Prvým typom prípravku je jednopružinový tlačný prípravok. Podľa názvu disponuje jednou pružinou a systémom dielov, ktoré zabezpečujú funkčnosť chodu pružiny od tlačníka, cez horný doraz, pružinu až po spodný doraz. Je možné do prípravku vkladať vymedzovacie podložky, ktoré menia výšku stlačenia pružiny a tým sa dá manuálnym spôsobom empiricky meniť charakter aj výstup tlačenia. Ide o konštrukčne primitívny ale nesmierne efektívny prvok zmeny charakteristiky, nakoľko v rámci diagnostiky, výskumu aj vývoja je najhodnejšie myslieť na drobné detaily, ktoré v budúcnosti môžu výrazným spôsobom pomôcť ku kvalitnejšej diagnostike a presnejším a variabilnejším výstupom.

Jednopružinový prípravok s dvoma tlačnými pružinami je identický prípravok ako v predchádzajúcom prípade (Obr. 6). Konštrukcia tlačnej zostavy je rovnaká, jedinou zmenou je, že konštrukcia prípravku ponúka dve tlačné zostavy a umožní tak diagnostikovanie dvoch senzorov v jednom diagnostickom cykle. Výhodou je, že zostavy môžu mať rovnaký charakter diagnostiky, v prípade, že bude použitý rovnaký typ pružiny a dielov tlačnej zostavy. V prípade zmeny pružiny v jednej tlačnej zostave je možné upraviť charakter tlaku a tým vytvoriť dve rôzne diagnostické zostavy pôsobiace v jednom okamihu diagnostiky. Zároveň sa dá doceliť zmena charakteru tlaku aj pri rovnakých pružinách v tlačných zostavách, ak do jednej zostavy umiestnime vymedzovanie krúžky (podložky). V tomto type prípravkou sa môžu použiť aj pružiny s progresívnym alebo degresívnym charakterom a podobne.



Obr. 6 Jednopružinový tlačný prípravok jednou a dvoma tlačnými zostavami

Druhým typom prototypu prípravku je Zložený viacpružinový prípravok (Obr. 7), ktorý je konštrukčne zložitejší, než predchádzajúci prípad. Ide o kombinovanú vnútornú tlačnú zostavu pozostávajúcu z dvoch zároveň tlačiacich pružín. Tento prípad tlačnej zostavy je špecifický a neponúka zmenu pružín v jednej zostave, nakoľko by mohlo prísť k neželaným vnútorným tlakom a deformáciám v rámci prípravku. Tak sa teda použijú rovnaké typy pružiny. Prípravok ma však oproti menšej nevýhode k variabilite minimálne jednu neporovnateľne väčšiu výhodu. Ide o účel použitia dvoch pružín. V rámci rozkladu síl pri realizácii tlačenia vytvoria dve pružiny v porovnaní s jednou výrazne vyššiu protisilu tlačníka, čo je v rámci diagnostiky a dávkovania sily a rozsahu sily obrovské pozitívum. Na základe variácie sily je teda sledovaný prípravok považovaný za konštrukčne zložitejší, ale aj ako optimálny pre kvalitný proces budúcej diagnostiky.



Obr. 7 Zložený viacpružinový tlačný prípravok

3.2.1 Ustavovací a polohovací prípravok senzora

Diagnostické zariadenia sú špecifické svojimi nárokmi na celé spektrum technológií, vďaka ktorým je možné konštatovať, že ich zloženie je z veľkej časti tvorené z na mieru vytvorených prvkov a komponentov. Takým komponentom je aj ustavovací a polohovací prípravok. Diagnostiku môžeme definovať v rámci funkčnosti prípravku ako mechanické pôsobenie sily na senzor. Pri pôsobení sily šikmým smerom na senzor dochádza k rozkladu síl. V procese diagnostiky ide o nežiadúci a skresľujúci jav. Kolmé pôsobenie sily na plochu senzora eliminuje rozklad síl. Pre dodržanie tejto podmienky a dosiahnutie stavu kolmosti pôsobenia sily je nutné navrhnuť prípravok pre ustavenie senzora. K úspešnému návrhu prípravku a jeho správne použitiu v diagnostickom zariadení sa musia zohľadniť a rešpektovať zadané vstupné hodnoty ako kritériá. Priamo súvisia s kvalitou merania a diagnostiky na danom senzore, definovaním konkrétnej priestorovej polohy (pozície) senzora ako aj systémom jeho ustavenia v prípravku. Základné vlastnosti a kritériá návrhu prípravku je možné chápať ako vstupné hodnoty funkčnosti prípravku.

Kritériá funkčnosti prípravku:

1. ustavenie polohy senzora v prípravku,
2. umožnenie vertikálneho pohybu ukotveného senzora bez jeho natáčania,
3. zvyšná konštrukčná časť prípravku pevne ukotvená v zariadení.

Rozmerové kritériá prípravku:

1. prípravok sa uchyťava na dve tyče hliníkového stavebnicového profilu,
2. dodržať možnosť voľného vertikálneho pohybu ukotveného senzora v rozsahu 15mm v oboch smeroch od východiskovej polohy senzora,

3. poloha prípravku voči kalibru určuje veľkosť dištančného valčeka pre zabezpečenie prenosu pohybu a teda aj sily.

Kritériá kvality návrhu prípravku:

1. zabezpečenie vertikálneho pohybu puzdra v komínovej časti základni,
2. poloha základne ľahko nastaviteľná v zariadení vďaka drážkam pre skrutky,
3. optimalizácia jej tvaru pre univerzálnosť montáže.

Pri navrhovaní zariadenia na polohovanie senzora sa začalo určením základných funkčných parametrov, ktoré musí toto zariadenie spĺňať. Tie boli napr. možnosť senzora pohybovať sa vo vertikálnej osi 15mm v zápornom aj kladnom smere ako aj zabezpečenie prenášania sily (tlaku) vo vertikálnom smere v takomto zariadení vo všetkých funkčných polohách. Na splnenie všetkých funkčných parametrov sme rozdelili zariadenie na 3 funkčné komponenty (základňa, puzdro a dištančný valček). Určili sa rozmerové parametre zariadenia (prípravku). Následne vznikol základný návrh zariadenia, zobrazený na obrázku 8.



Obr. 8 Navrhnutý prípravok v rozloženom pohľade zostavy

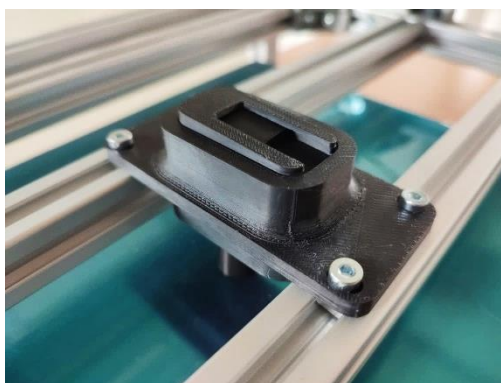
Najpoužívanejší materiál pri technológii FDM je ABS. Tento materiál dosahuje dobré mechanické vlastnosti a termodynamické vlastnosti (Varotsis 2022). Kyselina polymliečna (PLA) sa považuje za alternatívu k existujúcim materiálom ako je ABS. PLA je biologicky odbúrateľný polymér, ktorý má dobrú pevnosť, táto vlastnosť je veľmi výhodná pri výrobe novších komponentov prostredníctvom FDM (Aravind 2018). PLA aj ABS sú termoplasty. PLA je pevnejší a tuhší ako ABS, ale jeho nízka tepelná odolnosť znamená, že PLA materiál sa väčšinou používa pre prototypy, ktoré nebudú tepelne zaťažované. Materiál ABS je slabší a menej tuhý, ale zároveň tvrdší a ľahší. Vďaka tomu je lepším plastom pre prototypové aplikácie (PLA 2022). V prípade výroby prípravku sa komponenty vyrobili z materiálu ABS (Obr. 9), FDM technológiou 3D tlače, čo rešpektuje materiálové odporúčania aplikácie prototypového inžinieringu.



Obr. 9 Komponenty prípravku vyrobené 3D tlačou

O splnenie parametrov funkčnosti prípravku sa starajú komponenty puzdro a základňa. Základným kritériom bolo ustavenie senzora v prípravku. K splneniu tohto kritéria sa navrhla časť puzdro, ktoré v sebe zapuzdruje diagnostikovaný senzor. V komponente sa nachádza drážka, kde sa vsúva senzor. Hrany drážky sú zaoblené z dvoch dôvodov. Prvým je ochrana senzora pri ustavovaní a druhým je manuálne jednoduchšiemu vsúvaniu senzora operátorom. Veľkosť drážky je v porovnaní so senzorom väčšia, avšak jej zväčšenie je na toľko optimalizované aby ustavovaný senzor nemohol v drážke samovoľne vykonávať pohyb.

Puzdro vrátane senzora sa vkladá do základne. V nej sa puzdro pohybuje vertikálnym smerom. Na to, aby bol umožnený vertikálny pohyb puzdra a senzora sa navrhla komínová časť základne. Táto časť má identický tvar ako tvar puzdra a jej vnútorný rozmer je zväčšený o veľkosť voľného uloženia pre plynulý pohyb. Vykonávaný pohyb v komínovej časti základne je plynule umožnený rozdielnymi rozmermi puzdra a komína základne. Zároveň ich tvar zaručuje, že sa puzdro vrátane senzora nebude natáčať okolo osi Z a nebude vykonávať iné neželané pohyby. Plynulý pohyb puzdra v základni umožnia zaoblenia v rohoch komponentov s rovnakým charakterom zaoblenia. Tento krok zabezpečí zlepšenie funkčných parametrov a zároveň zlepší estetickosť prípravku. Zväčšenie časti, v ktorej sa puzdro pohybuje je nastavené tak, aby bol horizontálny pohyb puzdra plynulý. Puzdro sa tak nebude zasekávať. Medzi komponentmi je malá medzera, ktorá zároveň umožní dostatok malého tlakovo-pohybového deformovania, ktoré nebude vytvárať trenie a iné nepriaznivé vplyvy diagnostiky. Finálna podoba prípravku v prevádzke je zobrazená na obrázku 10.



Obr. 10 Prípravok v praxi

Výhody použitia prípravku v praxi:

- ustavenie a polohovanie senzora,
- umožnenie bezpečného vertikálneho pohybu prípravku,
- bezpečné ukotvenie senzora v puzdre,
- zabezpečenie prenosu sily dištančným valčekom.

Nevýhody prípravku:

- teoretické opotrebenie puzdra v komínovej časti základne,
- ABS plast nemusí disponovať dostatočnou tuhosťou pre dlhodobé a intenzívne používanie prípravku,
- dlhodobým, intenzívnym/rázovým (diagnostickým) využívaním prípravku môžu vplyvom sily a tlaku vznikať v prípravku teplom ovplyvnené zóny, ktoré môžu narušiť štruktúru, tuhosť a integritu prípravku.

Prínosy a nové možnosti prípravku:

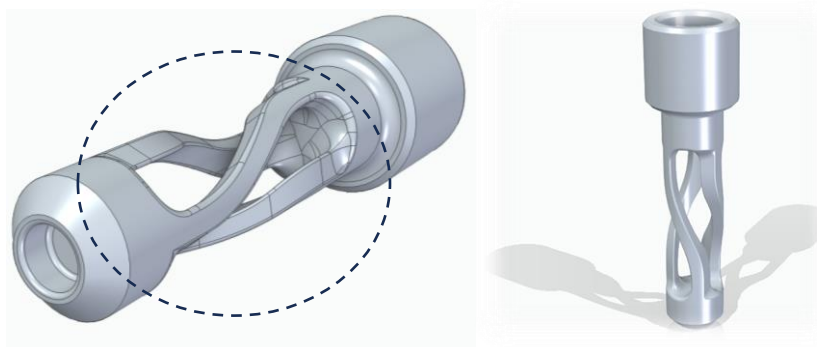
Diagnostika zadaného typu senzora je realizovateľná iba s daným na mieru navrhnutým prípravkom, ktorého hlavným prínosom je diagnostikovať samotný senzor. Ďalším podstatným prínosom je možná diagnostika iných typov senzorov pre merania tlaku. Funkčnosť prípravku zostane zachovaná aj pri použití senzorov iných rozmerov a parametrov, pričom stačí len upraviť celkové rozmery prípravku a prispôbiť ich novému typu senzora. V budúcnosti má prípravok ďalšie ambície pre pokračovanie v návrhoch v oblasti konštruovania, technológií ako aj efektívnosti diagnostiky. Jedným z mnohých malých nápadov pre budúce rozširovanie prípravku je vytvoriť iný variant prípravku, tzv. dvojpuzdrový. Takto je možné diagnostikovať viacero senzorov v jednom testovacom takte/cykle. Meniť sa môžu aj tvary puzdra pre špeciálne typy senzorov, napríklad kruhový, alebo eliptický tvar a profil puzdra. V budúcnosti je možné skúmať nové technické možnosti vertikálneho pohybu puzdra v komíne. Rovnako je možné meniť puzdro a prispôbovať ho tak pre špecifické typy senzorov a snímačov. Prípravok sa môže modifikovať aj v iných diagnostických zariadeniach, ako aj môže byť použitý na ustavenie iných typov senzorov, než len pre tlakový typ. V dostatočne prispôbenom diagnostickom laboratóriu môže prípravok slúžiť pre podporné diagnostikovanie tepelných, zvukových alebo aj optických senzorov.

3.2.2 Experimentálne tlačné prípravky diagnostického laboratória

„Tlačný prípravok s vertikálnym adaptívnym prevádzkovým účinkom“

Návrh prípravku pozostával z viacerých variantov pričom každý mal rôznu myšlienku a tiež sa líšili po konštrukčnej, dizajnovej aj funkčnej stránke.

Pred-finálny variant prototypu (obr. 21 vpravo) bol vyhotovený pomocou aditívnej výroby. Základnou myšlienkou bol silový rozklad, ktorého vedľajším účinkom mala byť deformácia na úrovni troch pružných ramien. Tým by sa vertikálny posun postupne a plynule menil na lokálne pôsobiaci tlak vďaka deformácii v pružných ramenách. Tento návrh nebol simulovaný, ale bol priamo vyrobený tak, aby bolo možné túto myšlienku overiť priamo v praxi. Nápad s rozkladom síl sa neprejavil ako efektívny, nakoľko by bolo potrebné skúmať väčšie množstvo materiálov a tlačných technológií aditívnej výroby pre vhodnejšie výstupné parametre. V rámci bežných testov bol použitý ABS plast so špecifickými parametrami. Tak bola zachovaná pružnosť v oblasti ramien prípravku (obr. 11 vľavo). Napriek zaujímavej myšlienke zostali ale po výrobe ramená príliš tuhé na to, aby zodpovedali charakteru požadovaného výstupu. Na základe meraní sa táto tento prípravok za nevhodný.



Obr. 11 Tlačný prípravok v pred-finálnom koncepte

Konečný typ tlačného prípravku (Obr. 12) prešiel rôznymi konštrukčnými dizajnovými a tvarovými úpravami a stal sa finálnym prototypom najvhodnejším k výrobe a realizácii meraní a experimentov v praxi. Tento typ prípravku prešiel priamo od prototypu až po hotový sfinalizovaný prípravok implementovaný do diagnostického laboratória. Prípravok pozostáva z častí, ako sú ustavovacia hlava, tlačný klin, pružné segmenty a zaisťovací kolík. Celá zostava umožňuje vykonať merania experimenty a expertízy v rámci silového pôsobenia a to v rôznych tipoch v rôznych rozsahoch, ako aj v rôznych charakteroch merania, čo sa týka vertikálneho posunu. V mojej práci som tiež vykonal experimenty súvisiace s týmto prípravkom ktoré popíšem v ďalšej kapitole.



Obr. 12 Tlačný prípravok – Finálne zvolený dizajn konceptu prípravku

Transformácia pohybu na lokálne určené miesto pôsobí silou a vytvára tak želaný tlak. Výhodou prípravku je voliteľné silové pôsobenie pomocou vymedzovacích podložiek/segmentov. V budúcnosti je možné počítať aj s tvarovými úpravami, variantami hrotov, alebo možnosťami s pružinovým systémom tlaku (sériovo za sebou idúce konštruované pružiny vytvárajúce špecifickú charakteristiku vzniku tlaku a vnútornej deformácie).

4 VLASTNÝ VÝSKUM NASTAVENIA TLAKOVÝCH SNÍMAČOV

Výskum bol realizovaný v diagnostickom laboratóriu so zapožičaným podporným systémom pre konvertovanie dát do PC. Za základe vykonania mnohých a rozsiahlych meraní bolo možné vytvoriť originálny vlastný metodický blok informácií, grafov a vzorcov tak, aby sa vymedzilo hlbšie poznanie senzora a jeho charakteru v danom meraní. Informácie, logika, vzorce a grafy sú teda výstupom vlastných meraní, poznatkov a sú vyvodením a záverom z praktickej časti.

Úvod do procesu merania, zberu dát a vyhodnocovania:

Meraná sila aplikovaná na senzor prechádza ako informácia ďalej do prevodníka (zariadenie pre konvertovanie hodnoty odporu na analógovú RAW hodnotu). Prevodník informáciu o sile posúva ďalej do počítača. Zber dát prebieha v počítači v rôznych softvérových nástrojoch, ktoré po meraní prebiehajú ďalším spracovaním. Záver zberu dát končí uloženými hodnotami v tabuľkovom procesore ako napríklad Microsoft Excel. Následné vyhodnocovanie prebiehalo v mojom prípade taktiež v MS Excel, nakoľko disponuje flexibilnou tvorbou vzorcov a umožňuje aplikovať pokročilú výpočtovú časť, ako aj vykreslenie zobrazenia potrebných hodnôt.

4.1 Základy merania sily

Meraná sila senzora bude v algoritme vyjadrená vstupnou hodnotou bez špecifikovanej veličiny. Dátový vstup sa ďalej nazýva hodnota senzora. Druhou hodnotou je meraná sila na kalibračnom zariadení, ktorá bude vyjadrená ako hodnota kalibračného zariadenia. Poslednou zložkou je komunikácia s CNC zariadením na vyvinutie tlaku. Komunikačný protokol sa nazýva hodnota údajov z tlačníka. Tlačník je vedľajším prvkom, napriek svojmu zdanlivo prioritnému vyvíjaniu tlaku je počítačom riadený hodnotami kalibračného zariadenia, a teda kalibračné zariadenie je v tomto prípade riadiaci prvok, od ktorého sa celý proces odvíja.

Graf simulovaného merania tlakovej sily:

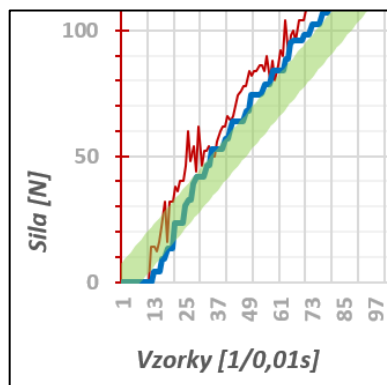
Priebeh merania a interpretácia výsledkov merania je vizualizovaná pomocou grafu. Graf nielen zobrazí prehľadne celý priebeh merania ale aj umožní detegovať voľným okom rôzne charakteristiky alebo anomálie.

Graf priebehu merania je definovaný ako krivka tvorená údajmi merania v konkrétnom čase a v konkrétnej hodnote. Čas, ktorý je definovaný na vodorovnej osi grafu je možné vymeniť aj za inú časovo orientovanú premennú ako je napríklad vzorka (sample). Na vertikálnej osi sú zobrazované premenné celého merania, je ale možné túto silu vymeniť za tlak. Pretože sila pôsobí v rámci merania vždy na rovnakú plochu nakoľko je snímač v rámci jednej diagnostiky rovnaký je možné predpokladať že tlak a sila sú v tomto prípade ekvivalentnou hodnotou. V mojom prípade sa bude skúmať hodnota sily definovaná v Newtonoch.

Pre účel prvotnej vizualizácie grafu a začiatok jeho štúdia bolo potrebné navrhnuť jeho simulovanú verziu vychádzajúcu zo skutočných dát. Pritom boli tieto dáta upravené tak, aby umožňovali konkretizovať účel samotnej diagnostiky zameranej pre operácie kalibrácie. Úprava grafu zahŕňa vo všeobecnosti hodnoty senzora ako aj kalibračného zariadenia.

Už v simulovanom grafe je zrejma nepresnosť senzora v rámci jeho kmitania okolo cieľovej hodnoty v porovnaní s kalibračným zariadením a jeho krivkou (Obr. 13). Takéto správanie ako aj iné prejavy už teoreticky

môžu patriť medzi isté prejavy starnutia, alebo opotrebenia. Následná podrobnejšia analýza v iných hladinách sily určí bližšie jeho charakteristiku.



Obr. 13 Detail grafu znázorňujúceho predpoklad merania

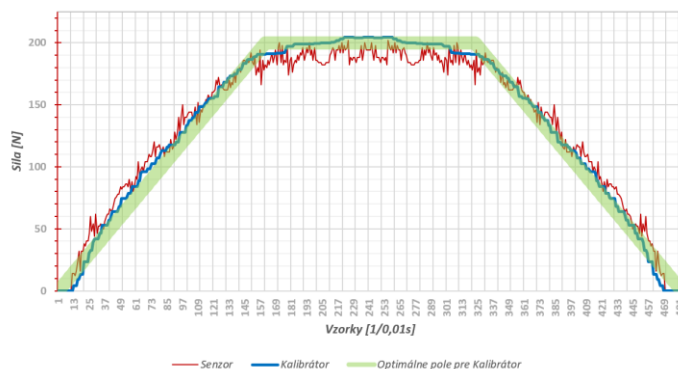
Teoretická časť merania sily:

Graf pre základnú meraciu procedúru je ohraničený úsek dátovej stopy. Na vertikálnej osi sú údaje zo vstupov definované v newtonoch a jednotkách senzora. Na horizontálnej osi sú takzvané vzorky. Ide o merací interval počtu hodnôt získaných v čase. Vzorky a ich počet je určený rýchlosťou, resp. frekvenciou merania.

Ako prvá dátová zbernica na grafe je definovaná krivka nameranej sily na snímači. Snímač je považovaný ako cieľový prvok merania a je možné predpokladať, že údaje zo snímača budú mať najhustejšie množstvo vzoriek a najvyššiu citlivosť samotnej diagnostiky.

Druhou dátovou stopou sú údaje kalibračného zariadenia, ktorým je v tomto prípade certifikovaná priemyselná váha. Údaje z tohoto zariadenia sú bližšie špecifikované a charakterizované na základe viacerých meraní. Je možné predpokladať, že toto kalibračné zariadenie bude disponovať nižším meracím výkonom rýchlosti komunikácie v rámci rýchlosti a frekvencie. Za to bude merať veľmi presne a tomu sa bude prispôbovať ďalšia logika.

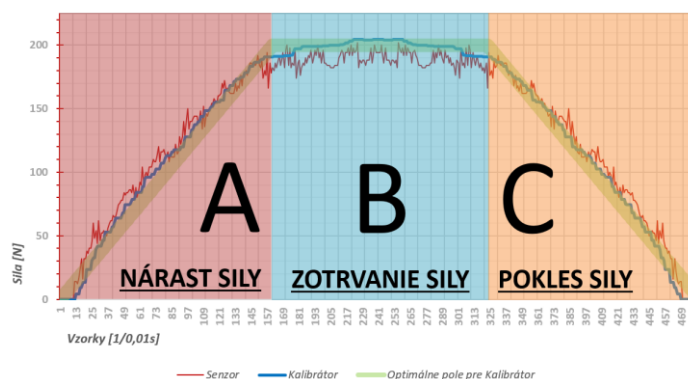
Tretou teoretickou stopou je nešpecifikovaná ideálna krivka, ktorá definuje optimálne meranie diagnostiky na kalibračnom zariadení. Pri meraní voľnou rukou sa dosahuje prirodzená nepresnosť človeka ako ľudského faktora. Pre zamedzenie tohoto vplyvu nepresnosti sa ľudský faktor nahrádza automatizovaným zariadením ako je toto diagnostické laboratórium. Mohlo by merať presnejšie v požadovanom rozsahu, výkone, rýchlosti a podobne. Ideálna krivka ako spomínaná tretia teoretická stopa tvorí základnú charakteristiku analýzy senzora. Táto charakteristika je viditeľná ako rozsah pri stúpaní, zotrvaní aj klesaní, pričom cieľom je aby sa kalibračné zariadenie svojím priebehom udržalo v tomto rozsahu ideálnej stopy. Dokázalo by tak diagnostikovať, respektíve analyzovať senzor v rámci jeho základného vizualizovania dát. Graf pre základné meranie je na obrázku 14.



Obr. 14 Graf merania v základnom charaktere meracieho procesu

4.1.1 Vyhodnotenie merania v grafe

Charakteristika priebehu grafu je znázornená na obrázku 15, kde je možné vidieť tri zóny. Prvá zóna A pomenovaná ako „nárast sily“ je priebeh merania od jeho nulovej hodnoty až po požadovanú hodnotu (cieľovú meranú hodnotu). Druhá zóna B pomenovaná ako „zotrvanie sily“ je priebeh merania bez zmeny sily v čase a teda jej udržanie v požadovanom priebehu času merania. Treťou zónou C je „pokles sily“ pri ktorom sila klesá z cieľovej hodnoty na nulovú hodnotu. Nulovou hodnotou je považovaný pokojový stav systému, čo by v tomto prípade znamenalo zastaviť proces tlakového dotyku senzora a tlačníka.

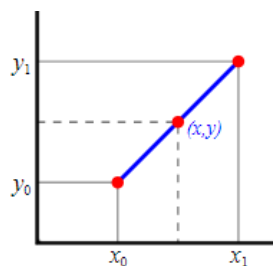


Obr. 15 Graf znázorňujúci zóny silového pôsobenia na senzor

4.1.2 Metodika vyhodnotenia nameraných hodnôt

Predpokladá sa, že dáta získané meraním zo všetkých zdrojov budú disponovať rôznorodými parametrami frekvencie. V takom prípade je potrebné údaje „synchronizovať“. Ide o proces zosúladenia všetkých vstupov na spoločnú časovú os tak, aby dáta korešpondovali s potrebnou a hlavne korektnou premennou. V tomto prípade je to čas. Tým pádom snímky (vzorky), ktoré sa získajú v čase sa musia spoločne zladit' tak, aby boli všetky údaje získané z rovnakej časovej dĺžky merania. Keď však každý meraný prvok bude mať inú frekvenciu, množstvá dát v danom požadovanom čase sa budú líšiť. V takom prípade sa musí použiť prepočet dát, najpravdepodobnejším a najjednoduchším prepočtom bude lineárna interpolácia údajov (Obr. 16) s prípadnou redukciiu dát v prípade prílišného množstva dát. Túto teoretickú situáciu bude vhodné do budúcnosti rozoberať detailnejšie až v prípade, že bude viac informácií o konkrétnych frekvenciách meraní senzora, kalibračného zariadenia a CNC-riadiaceho zariadenia. Zvážit' sa môžu aj rozhodovacie mechanizmy pre

prioritizáciu kalibrátora v prepočtoch, nelineárna interpolácia alebo váženie hodnôt na základe iných v budúcnosti dôležitých premenných.



Obr. 16 Ukážka lineárnej interpolácie v grafickej podobe

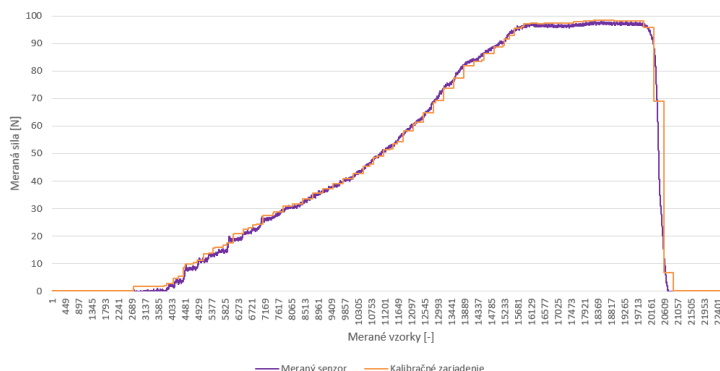
Na obrázku 27 je priebeh lineárnej interpolácie meraných údajov pre optimalizáciu spoločných dát časovej osi. Matematická rovnica pre lineárnu interpoláciu jednej hľadanej vzorky dát (y) je možné vypočítať podľa vzťahu (1).

$$y = (x - x_1) * (y_2 - y_1) / (x_2 - x_1) + y_1 \quad (1)$$

Lineárna interpolácia je matematický nástroj, podľa ktorého je možné vytvoriť aj prototyp matematickej kalkulácie váženia interpolácie podľa hodnoty sily tak, aby sa výsledná krivka „vyhladila“. V praxi by to znamenalo presnejšie medzi-údaje merania, ako aj vizuálne (hypoteticky) krajšiu krivku každého elementu merania, senzora ako aj kalibračného zariadenia.

4.1.3 Optimalizácia meraných dát

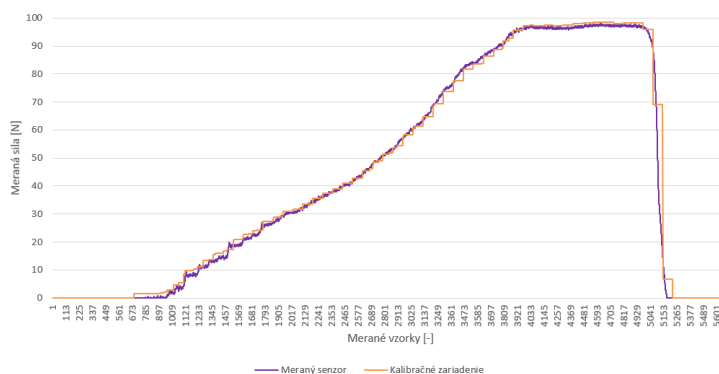
Hrubé (surové) dáta merania sa získavajú ako výstup programu Microsoft Excel (Obr. 17). Na základe nastavených parametrov prevodníka a meraného senzora v konkrétnom čase je určené celkové množstvo vzoriek. V prípade dlhšieho merania rádovo v niekoľkých sekundách môžeme hovoriť o tisícoch vzoriek v jednom meraní. Pre meranie nad 10 sekúnd môže mať výstup viac ako 10-tisíce riadkov (vzoriek) pre každú stopu merania. Spracovanie takéhoto množstva výsledkov môže byť náročné nielen časovo, ale aj výpočtovo. Z toho dôvodu je vhodné takéto hrubé dáta spracovať, respektíve vhodne optimalizovať.



Obr. 17 Graf merania s plným rozsahom vzoriek bez optimalizácie

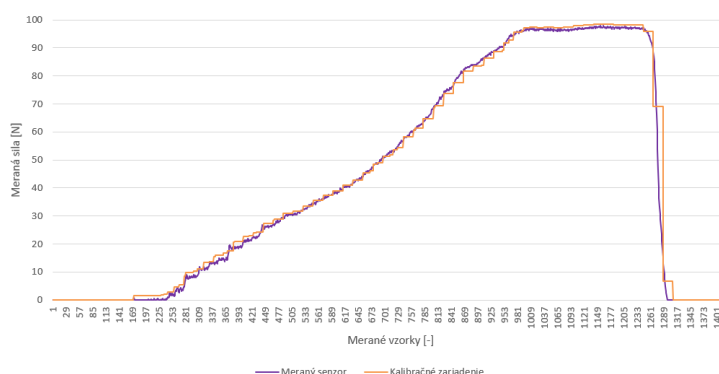
Zvolil som optimalizáciu dát na základe redukcie riadkov krokovým spôsobom. Ide o výber každého štvrtého riadku merania bez ohľadu na hodnotu. Na základe analýzy výstupu merania bolo evidentné že desiatky

riadkov po sebe idúcich nemali žiadne výrazné skokové rozdiely a teda samotná optimalizácia by neznížila žiadnym dôležitým spôsobom kvalitu výstupu alebo jeho jemnosť a detailnosť (Obr. 18).



Obr. 18 Graf merania s optimalizovaným rozsahom vzoriek (4x voči originálu)

Po základnej optimalizácii dát je stále možné ešte použiť jednu redukciu každého štvrtého riadku a je možné vidieť, že graf si stále zachoval verné a podstatné detaily merania a nenastalo žiadne významné skreslenie v rámci vizuálneho zobrazenia hodnôt (Obr. 19).



Obr. 19 Graf merania so super-optimalizovaným rozsahom vzoriek (16x)

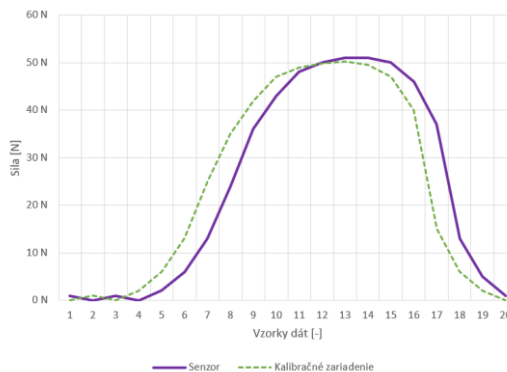
4.2 Problematika riešená výskumom

V rámci všetkých vykonaných meraní som vyskúmal niekoľko najdôležitejších vlastností a metodických poznatkov, ktoré dohromady tvoria základ metodiky mojej práce a sú najdôležitejšou časťou v skúmanej oblasti. Jedná sa o synchronizáciu meraných dát a s ňou súvisiacou problematikou, definovanie kalibračných parametrov, návrh a realizovanie špecializovaného profilu senzora a s tým súvisiacou logikou. Dôležité sú tiež metódy zvyšovania spoľahlivosti na základe získaných skúseností opotrebenia senzora.

4.2.1 Synchronizácia meraných dát

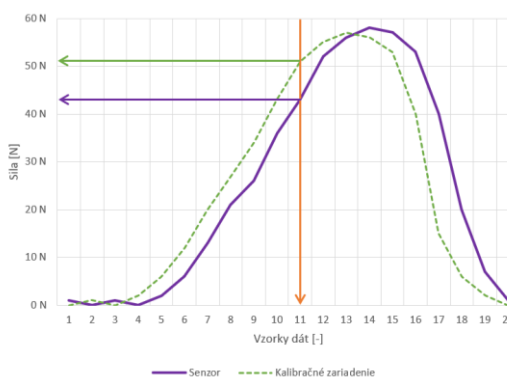
Získavanie údajov merania v reálnom čase patrí medzi zaujímavé oblasti problematiky výskumu a hľadania nových riešení pre skvalitnenie celkového procesu zberu dát. Merané dáta z celkového merania pozostávajú z niekoľkých meraných vrstiev ako sú dáta senzora, dáta kalibračného zariadenia a tiež dáta získané z riadenia vertikálneho posuvu diagnostického zariadenia. Všetky hodnoty sú získané v konkrétnom čase. Napriek tomu sú na spoločnej časovej osi vzájomne posunuté s miernou, ale veľmi dôležitou odchýlkou. Práve táto odchýlka patrí medzi veľký problém pri kvalitnej kalibrácii, analýze a diagnostike senzora.

Na obrázku 20 je možné vidieť graf synchronizácie meraných dát, kde zelenou čiarkovanou čiarou je zobrazené kalibračné zariadenie a plnou fialovou čiarou sú zobrazené hodnoty zo senzora. Na grafe jasne viditeľný časový posun jedného zariadenia voči druhému. Tento posun v čase je rôzny pri každej novej kalibrácii alebo analýze a preto nie je možné vyrovnať tieto rozdiely konštantnou korekciou, ale je potrebné vymyslieť nový postup.



Obr. 20 Graf synchronizácie meraných dát

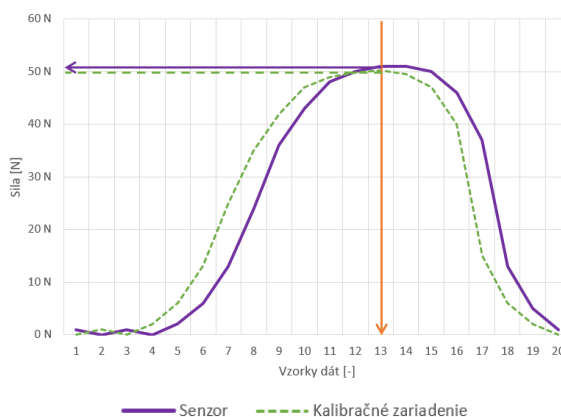
Na obrázku číslo 21 je možné vidieť nevhodné získavanie vzorky. Ak by sme v rámci kalibrácie vybrali konkrétnu vzorku a v nej porovnávali hodnotu kalibračného zariadenia voči senzoru, prišli by sme k veľkým nepresnostiam na základe časového posunu.



Obr. 21 Graf synchronizácie meraných dát – nevhodné získavanie vzorky

Riešením je vytvorenie špecifickej schémy merania spomenutej už vyššie. Jednoduchý úkon dotyku senzora rozdelíme do troch základných zón. Prvá zóna je nárast sily, kde sila stúpa z nulovej hodnoty na požadovanú hodnotu silového pásma. Nasleduje zóna zotrvania sily, kde sa snažíme udržiavať hodnotu sily vplývajúcej na senzor a po zotrvaní pôsobenia danej sily v konkrétnom časovom úseku. Nakoniec nasleduje pokles sily z požadovanej silovej hladiny až na nulu do pokojového stavu senzora. Tento úkon merania na senzory patrí medzi najmenšie možné merateľné úkony a nazývame ho dotyk v silovej hladine (bližšie popísané v ďalšej kapitole).

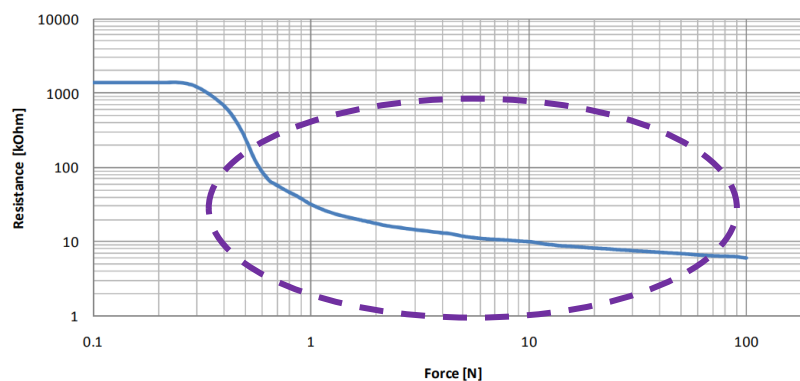
Na obrázku číslo 22 je možné vidieť úkon dotyku senzora v silovej hladine s krátkym zotrvaním v čase v danej silovej hladine. V tom prípade by bolo možné nájsť niekoľko spoločných charakteristických vzoriek zo spoločným pôsobením rovnakej konštantnej sily. Korektný postup merania hodnôt z danej vzorky je možné vidieť na obr. 22, ako aj spoločnú hodnotu sily senzora a kalibračného zariadenia s minimálnou odchýlkou.



Obr. 22 Graf synchronizácie meraných dát – správne získavanie vzorky

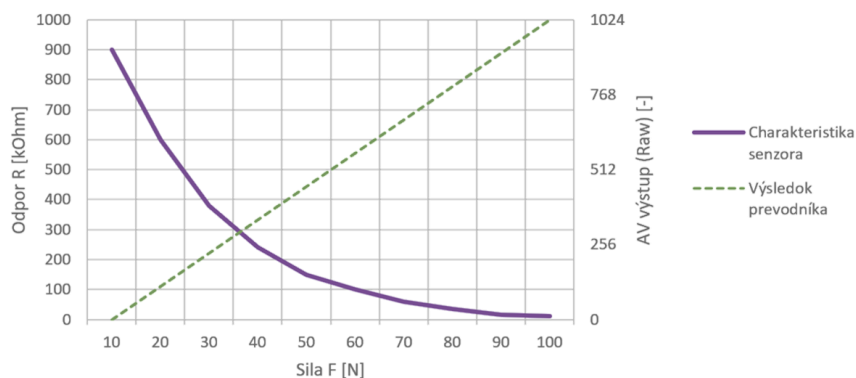
4.2.2 Kalibračné parametre, profil senzora, logika, možnosti, BOZP a riešenia

Hlavnými parametrami merania sú získavanie hodnôt digitálnych a analógových. Digitálne hodnoty získavame z kalibračného zariadenia a sú udávané v newtonoch a analógové hodnoty získavame z prevodníka senzora. Rozlišujeme rôzne typy parametrov pre digitálne aj analógové hodnoty, ako napríklad parametre profilu, parametre merania (respektíve analýzy) a rôzne iné porovnávacie parametre. Kalibračné parametre sú v tomto prípade parametre profilu senzora, tiež sú to parametre veľkosti a množstva silových hladín a ďalšie štatistické hodnoty. Originálny profil senzora a jeho charakteristika je na obrázku 23.



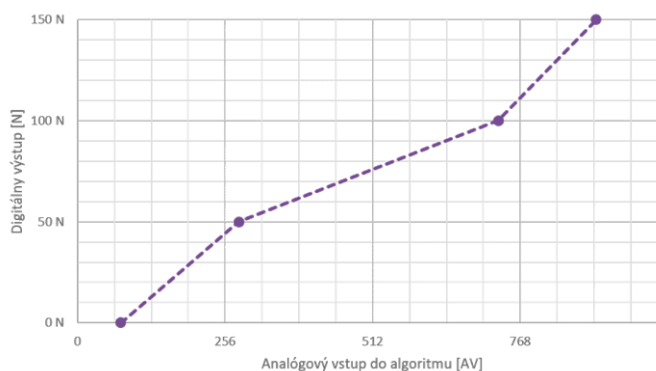
Obr. 23 Graf charakteristiky meraného senzora (údaje od výrobcu)

Pre účely korektnej diagnostiky nikdy nestačí charakteristika od výrobcu senzora, nakoľko sa v rámci tohto senzora jedná o senzor v stave polotovaru a prechádza ďalším spracovaním, čo priamo ovplyvní jeho vlastnosti. Následne je teda potrebné korigovať tieto hodnoty senzora nielen na úrovni poznaných premenných, ale aj matematicky, prepočtovo, na úrovni vstupných dát v PC. Na to slúži vlastná metóda kalibrácie pomocou kalibračného „Profilu senzora“. Než bude možné vyšpecifikovať profil senzora, musia dáta zo senzora prejsť procesom digitalizácie vďaka prevodníkovému zariadeniu. Ten má svoju špecifickú charakteristiku a jeho účelom je „preklopiť“ a linearizovať hodnoty senzora z klesajúcich na postupne stúpajúce s lineárnou charakteristikou (Obr. 24).



Obr. 24 Graf charakteristiky prevodníka

Na základe charakteristiky prevodníka je možné predpokladať zmenu hodnôt senzora ako aj správania sa senzora. Hodnoty, ktoré získame z prevodníka (RAW) preklapíme na digitálne hodnoty (AV). Každá digitálna hodnota sily (DV) silového pásma (FL_x) má svoju analógovú hodnotu (AV). Tak nám vznikne krivka profilu senzora. Každá krivka je jedinečná a napriek rovnakému charakteru kriviek profilu je každá jedna dôležitá, lebo zodpovedá presnému profilu senzora danej kalibrácie v danom čase merania (Obr. 25).

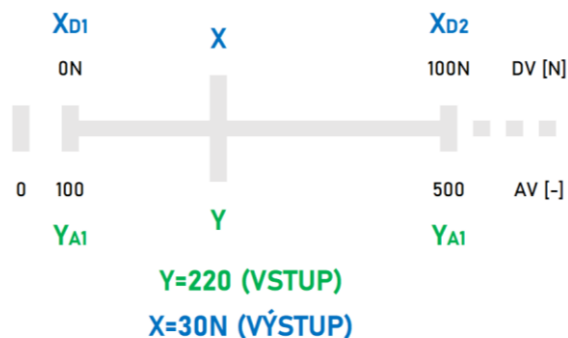


Obr. 25 Graf teoretického zobrazenia profilu senzora

4.2.3 Hladinová lineárna interpolácia

Lineárna interpolácia je v matematike bežne používaný pojem a napriek jeho univerzálnosti som sa rozhodol vyvodiť si pre môj prípad vlastný vzorec, ktorý zodpovedá použitiu v rámci sledovania hodnôt profilu senzora. Tiež bude možné ho aplikovať do mnou vytvoreného špecializového Microsoft Office Excel nástroja.

Bežná lineárna interpolácia je v tomto prípade hľadanie hodnoty v konkrétnom pásme hodnôt, ktorých charakter progresu je vzájomne lineárny. V tomto prípade budú existovať dve pásma, pásmo analógových hodnôt a pásmo digitálnych hodnôt. Na obrázku 26 je možné vidieť schematické zobrazenie lineárnej interpolácie pre môj prípad. Zelenou farbou sú označené hodnoty prislúchajúce analógovému pásmu a modrým sú označené hodnoty prislúchajúce pásmu digitálnych hodnôt.



Obr. 26 Znáznornenie logiky výpočtu lineárnej interpolácie

Začiatok aj koniec sledovaného pásma bude vždy ohraničený oboma hodnotami. Na základe vstupnej premennej hodnoty z analógového pásma budeme zisťovať hodnotu výstupnú pre digitálne pásmo. Výpočet bude nasledovný:

Všeobecná lineárna interpolácia analýzy merania:

$$Li = \frac{X - X_{D1}}{X_{D2} - X_{D1}} = \frac{Y - Y_{A1}}{Y_{A2} - Y_{A1}} \quad (2)$$

Odvedená vyžadovaná hodnota X (napríklad pre digitálnu hodnotu senzora DV_{M-X}):

$$X = X_{D1} + \frac{(Y - Y_{A1}) \cdot (X_{D2} - X_{D1})}{(Y_{A2} - Y_{A1})} \quad (3)$$

Zadanie hodnôt do rovnice (príklad):

$$X = 0 + \frac{(220 - 100) \cdot (100 - 0)}{(500 - 100)} = 30N$$

4.3 Proces kalibrácie

Kalibrovanie senzora môže prebiehať na dvoch úrovniach: hardvérovej a softvérovej. V mojom prípade a v prípade meraného senzora môže kalibrácia prebiehať jedine na softvérovej a teda matematickej úrovni. Hardvérovo je senzor natoľko jednoduchý, že nie je možné ho nastaviť alebo ovplyvniť konštrukčne, aby hodnoty zodpovedali kalibračnému zariadeniu. Kalibrácia je teda softvérová a je vhodné zvoliť čo najjednoduchšiu, ale efektívnu aplikáciu procesu kalibrácie.

Kalibrácia senzora je spojením niekoľko po sebe idúcich aktivít. Prvou je analýza senzora. Ide o realizáciu merania hodnôt senzora formou úkonu Dotyku (popísané nižšie) s následným matematickým zhodnotením odchýlky senzora od pôvodných dát profilu senzora. V prípade, že nové kalkulované hodnoty zodpovedajú hodnotám profilu senzora (s minimálnou/zanedbateľnou odchýlkou), analýza určí senzor ako presný a vyjadrí jeho presnosť odchýlkou voči profilu. V prípade, že kalkulácia určí veľkú odchýlku, môžu sa do profilu zapísať nové hodnoty z aktuálneho merania a stanú sa tak novým profilom senzora.

V jednoduchosti je možné definovať pre tento prípad že: „Kalibrácia je softvérové nahradenie (prepísanie) súčasných hodnôt profilu senzora novými hodnotami na základe aktuálneho fyzického merania hodnôt senzora voči kalibračnému zariadeniu.“

4.3.1 Úkon Dotyk

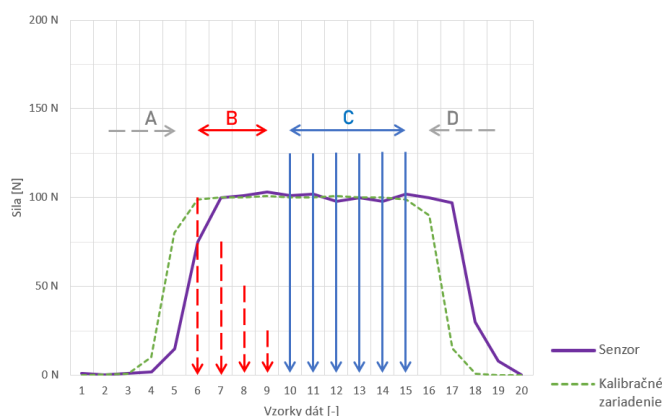
Na grafe Procesu kalibračného merania s vymedzovacími zónami silového pásma je možné vidieť štyri silové pásma rozoznatelne podľa nasledovného rozdelenia: prvé pásmo „A“ je Nábeh, nasleduje „B“ ako Ustálenie, potom pásmo „C“ ako Meranie a na záver pásmo „D“ ako Uvoľnenie. Každé silové pásmo v grafe má nielen svoj charakteristický priebeh, ale aj logicky zdôvodniteľné opodstatnenie a matematické ohraničenie.

Pásmo Nábehu v optimálnom prípade trvá dlhší čas (kvôli bezpečnosti senzora) a teda časovo je možné rátať s viac ako 2 sekundy na každých 50N nábehu. Ide o rýchlosť zvyšovania pôsobenia sily na senzor. Pomalší nábeh je v rámci kalibrácie ľahšie ukontrolovateľný. Nábeh je charakterizovaný ako začiatok pôsobenia sily na senzor z jeho pokojového nezaťažného stavu až po požadovanú silu na základe požiadavky dosiahnutia silového pásma.

Druhé pásmo označené ako „B“, Ustálenie, je pásmom, kedy využívame krátky čas pre priebeh dvoch prejavov naraz. Prvý prejav je vyrovnanie hodnôt v čase (Problematika synchronizácie dát je tým aplikovaná) a druhým prejavom je stabilizácia merania. Meranie sily pri konkrétnych hodnotách vytvára v senzory tlak, ktorý je vhodný istým okamihom udržať. Pri ustálení pri dobe do 1 sekundy už prebehnú oba prejavy (aj ustálenie sily/tlaku ako aj synchronizácia dát).

V tomto okamihu sú už splnené podmienky pre priamy zber hodnôt senzora, teda nastáva pásmo Merania. Celý čas merania sa definuje buď časom, alebo meranými snímkami/vzorkami. Všetko závisí od frekvencie merania a teda aj od nastavenia prevodníka. V mojom prípade budem uvažovať vzorky a ich hodnoty.

Posledným pásmom je Uvoľnenie, charakterizované ako rýchle uvoľnenie pôsobiacej sily na senzor z požadovanej silovej hladiny na nulu, resp. do pokojového (nezaťažného) stavu senzora. Všetky pásma a celú logiku Dotyku je možné vidieť na obrázku 27.



Obr. 27 Proces kalibračného merania s vymedzovacími zónami silového pásma

Výpočet priemerovania výstupnej hodnoty (všetkých samplov) – aritmetický priemer:

$$AV_{AVG-X} = \frac{1}{n_S} \cdot \sum_{i=1}^{n_S} x_{i_{AV}} \quad [-] \quad (4)$$

$$CV_{AVG-X} = \frac{1}{n_S} \cdot \sum_{i=1}^{n_S} x_{i_{CV}} \quad [N] \quad (5)$$

Použité premenné:

- AV_{AVG-X} je analógová hodnota (AV) aritmetického priemeru (AVG) v danej silovej hladine (X)
- CV_{AVG-X} je kalibračná hodnota (CV) aritmetického priemeru (AVG) v danej silovej hladine (X)
- n_S je počet vzoriek realizovaných meraním (platí rovnaký pre AV aj DV)
- x_i je premenná všetkých meraných vzoriek (pre AV aj DV), ktoré budú sumarizované

Korekcia neistoty výstupu kalibračného zariadenia:

Získané celkové hodnoty AV_{AVG-X} a CV_{AVG-X} je potrebné dostať do súladu s meranou silovou hladinou FL_X , ktorá je definovaná digitálnou hodnotou DV_X . Výpočet je nasledovný:

$$AV_{AVG-XK} = AV_{AVG-X} \cdot \frac{DV_X}{CV_{AVG-X}} \quad (6)$$

4.3.2 Výpočtový a logický aspekt kalibrácie

V tabuľke je možné vidieť množstvo premenných potrebných pre vyhodnotenie senzora na základe merania a analýzy.

Tabuľka 1 Kalibračné matematické a analytické parametre

		A	B			01	02	03
FL _X	DV _P [N]	AV _P [-]	AV _A [-]	CV _A [N]	AV _{DEV} [-]	DV _M [N]	C _{DEV} [%]	C _M [%]
FL ₀	DV _{P-0}	AV _{P-0}	AV _{A-0}	CV _{A-0}	AV _{DEV-0}	DV _{M-0}	C _{DEV-0}	C _M = C _{DEV-AVG}
~	~	~	~	~	~	~	~	
FL ₃	DV _{P-3}	AV _{P-3}	AV _{A-3}	CV _{A-3}	AV _{DEV-3}	DV _{M-3}	C _{DEV-3}	
Hladina	Profil 01		Analýza (Meranie senzora)	Analýza (meranie kalib.z.)	Odchýlka (rozdiel)	Sila v N (Meranie)	Porovnanie (napr. C _{DEV-0} =DV _{M-0} /DV _{P-0})	
Existujúce dáta Profilu kalibrácie			Nové dáta získané meraním a vyhodnotením					

Hlavné premenné:

- FL je silová hladina (Force Level)
- DV je digitálna hodnota (Digital Value)
- AV je analógová hodnota (Analog Value)
- CV je kalibračná hodnota z kalib. zariadenia (Calibration Value)
- C je porovnávací premenná (Comparison)

Spodné indexy:

- X (pre FL_X) je vydefinovanie konkrétnej silovej hladiny
- P (pre DV_P a AV_P) sú hodnoty z profilu senzora
- A (pre AV_A) sú hodnoty z merania z pohľadu analýzy
- DEV (pre AV_{DEV}) sú hodnoty odchýlky merania voči profilu senzora (nepovinné)
- M (pre DV_M) sú hodnota merania sily definované v N
- DEV (pre C_{DEV}) sú odchýlkou hodnôt nového merania voči profilu vyjadrenou v %
- M (pre C_M) je % hodnota celkového aritmetického priemeru odchýlok (prehľadová hodnota)

Tabuľka 2 Príklad analýzy dát senzora z merania

		01	02	03	04	05
FL _X	DV _P [N]	AV _P [-]	AV _A [-]	DV _M [N]	C _{DEV} [%]	C _M [%]
FL ₀	0 N	236	242	Korekcia „0“ (AV _{A-0} > AV _{P-0})		
FL ₁	50 N	420	431	51,3 N	2,6 %	2,6 %
FL ₂	100 N	621	640	103,1 N	3,1 %	
FL ₃	150 N	730	746	153,3 N	2,2 %	
Hladina	Profil 01		Analýza (Meranie)	Sila v N (Meranie)	Porovnanie	

Vzťah medzi hodnotami DV a AV:

$$\frac{DV_{PX}}{DV_{MX}} = \frac{AV_{PX}}{AV_{AX}} \quad (7)$$

Priama úmera výpočtu DV_M :

$$DV_{MX} = DV_{PX} \cdot \frac{AV_{AX}}{AV_{PX}} \quad (8)$$

Výpočet jednotlivých odchýlok:

$$C_{DEVX} = \frac{DV_{MX}}{DV_{PX}} \quad (9)$$

Výpočet celkového priemeru odchýlok:

$$C_M = \frac{1}{n_C} \cdot \sum_{i=1}^{n_C} C_{DEV-X_i} \quad (10)$$

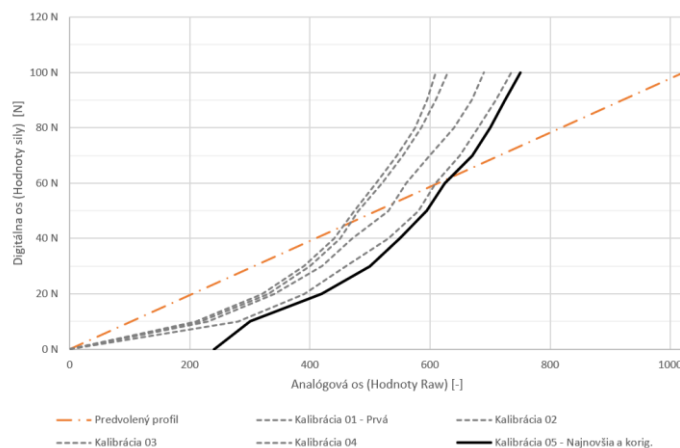
Použité premenné:

- C_M – aritmetický priemer zo všetkých C_{DEV-X}
- n_C – počet hodnôt C_{DEV-X}
- C_{DEV-X} – hodnoty podľa silových hladín

Výsledok procesu kalibrácie je, keď:

- hodnota AV_{A-X} v meranej silovej hladine FL_X nahradí pôvodnú hodnotu AV_{P-X} .

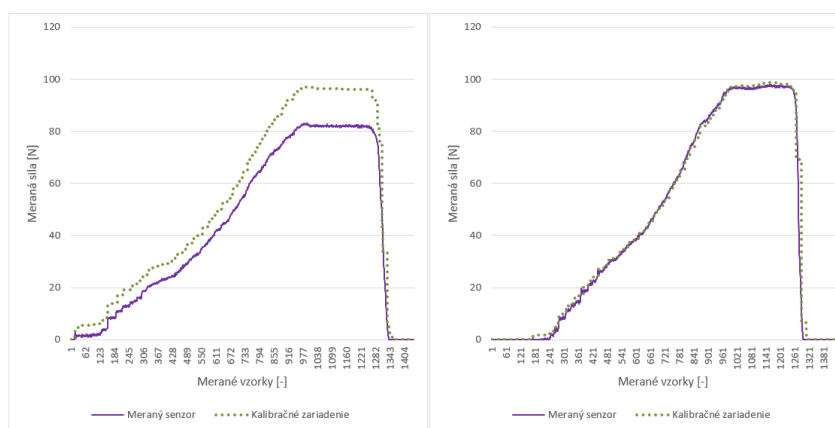
Tým prebehne „aktualizácia“ hodnôt profilu na nové korigované hodnoty zodpovedajúce súčasnému stavu senzora. Systém profilu senzora umožňuje aj vizuálnu interpretáciu stavu opotrebenia senzora pomocou grafu (Obr. 28), kde je možné vidieť posun jeho kalibračných kriviek profilu smerom doprava až po najnovšiu krivku profilu senzora znázornenú hrubou čiernou čiarou vrátane korekcie nulovej hladiny.



Obr. 28 Profily kalibrácií senzora

4.3.3 Vizuálna verifikácia stavu senzora po jeho kalibrácii

Na základe aplikácie nových hodnôt do profilu senzora sa po meraní (analýza) vykonáva ďalšie meranie (verifikácia). Tieto dve merania majú rovnakých charakter a podmienky, rozdiel medzi nimi je iba v aktualizovanom profile senzora na základe nových kalibračných dát. Na obrázku 29 je možné vidieť rozdiel presnosti senzora prakticky v celom meranom rozsahu. Kalibráciu tak môžeme považovať za úspešnú. Kvantifikovať úspešnosť kalibrácie numericky je možné prípadným opätovným meraním Dotykom a komparáciou výsledkov pomocou vzorcov pre kalkuláciu odchýlok.



Obr. 29 Meranie presnosti senzora pred kalibráciou (vľavo) a po kalibrácii (vpravo)

4.4 Opatrebnie senzora a metódy zvyšovania spoľahlivosti senzora

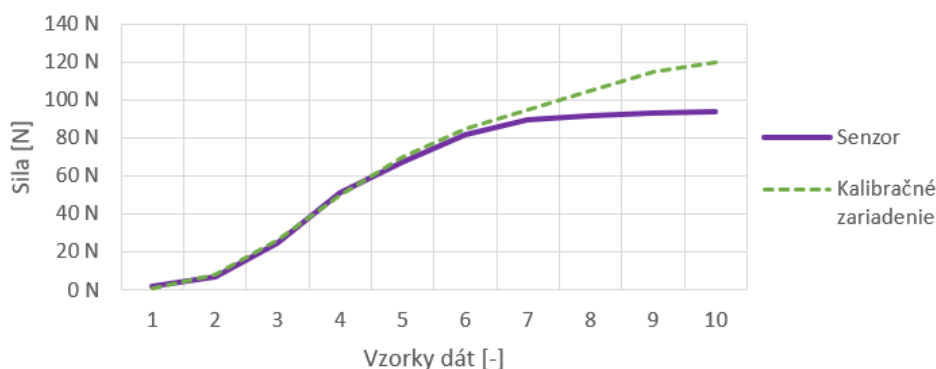
Priebeh meraní disponuje špecifickou fázou spoznávania správania sa senzorov v rôznych situáciách a v rôznom stave opotrebovania. Práve všeobecný stav opotrebenia senzora disponuje niekoľkými

charakteristikami opotrebenia, ktoré si v nasledujúcich podkapitolách definujeme podrobnejšie. Všetky charakteristiky sú výsledkom veľkého množstva realizovaných meraní a vyvodzovaní záverov spoločných rysov a prejavov. Ide o vlastné originálne závery metód zvyšovania spoľahlivosti pomocou zistenia možných opotrebení senzora.

4.4.1 Dosiahnuteľné maximum senzora alebo prevodníka

V priebehu merania sa pri istých typoch opotrebených senzorov často stáva špecifický jav, kedy sa citlivosť senzora pri vyšších silách výrazne znižuje až sa pri konkrétnej silovej hladine umrtví a zastaví. Tento jav prebieha postupne a je možné ho sledovať v rôznych silových rovinách v závislosti od opotrebenia senzora a od jeho všeobecného silového namáhania. Tento jav nazývame Dosiahnuteľné maximum, resp. angl. „PO“ (Peak Overload, špičkové preťaženie).

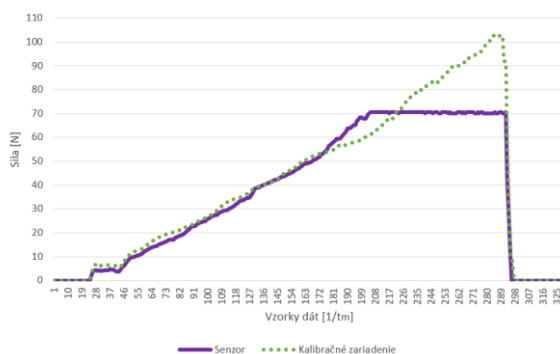
Taktiež je možné si tento jav vysvetliť ako fyzické pôsobenie vnútorného tlaku v mieste snímania sily v senzory. Nakoľko senzor pozostáva len s niekoľkých vrstiev a tá najcitlivejšia je mimoriadne tenká, môžeme predpokladať, že senzor pôsobením sily je priamo ovplyvňovaný fyzickým tlakom iba do konkrétnych limitov. V dobe častého a intenzívneho opotrebenia sa jeho dosiahnuteľná maximálna na sila rapídne zníži, na základe čoho je možné postupne určovať jeho životnosť ako aj opotrebenie. Na grafe (Obr. 30) je možné vidieť postupné a plynule vyrovnanie krivky v čase v hodnotách sily medzi 80 až 100 newtonmi pričom kalibračné zariadenie pokračovalo vo zvyšovaní pôsobenia sily.



Obr. 30 Graf dosiahnuteľného maxima senzora

Na grafe (Obr. 41) je možné vidieť skutočné praktické meranie sily voči kalibračnému zariadeniu so skutočnými hodnotami, pričom v tomto prípade dosiahol senzor hodnoty sedemdesiatich newtonov a následne nebol schopný pokračovať vo vyhodnotení ďalšej sily a teda dosiahol svoje merateľné maximum. Skutočné zistenie hodnoty dosiahnuteľného maxima sa zisťuje výsledovaním začiatku jeho PO hodnoty, kde sa v danej vzorke prevezme hodnota zodpovedajúca kalibračnému zariadeniu.

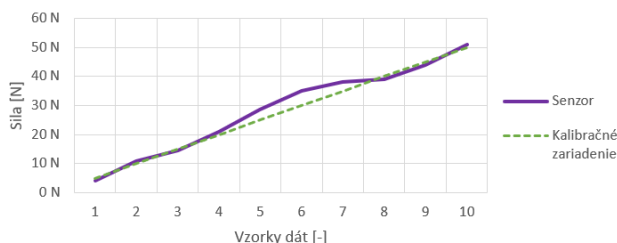
V tomto prípade než senzor dosiahol hodnotu 70N (kalkulovaná hodnota z profilu senzora) sa určuje jeho dosiahnuteľné maximum z kalibračného zariadenia, ktoré malo v danej vzorke približne 60N (medzi vzorkami 199 a 208, obr. 31). Dosiahnuteľné maximum je teda 60N.



Obr. 31 Viditeľná ukážka dosiahnutia maxima senzora (na úrovni 70N)

4.4.2 Nestálosť daného rozsahu

V konkrétnom silovom rozsahu, ktorý má daný svoj začiatok a koniec istého silového pásma môže vzniknúť špecifická nestálosť presnosti (Obr. 32). Ide o všeobecnú nepresnosť v konkrétnom rozsahu, ktorá napriek opakovanej kalibrácii nie je aplikovateľne schopná korigovať sa do požadovanej miery. Nestálosť stability merania v konkrétnom rozsahu určuje kvalitu a nekvalitu senzora a zaujímavosťou je tiež, že táto vlastnosť senzora je pozorovateľná už aj na nových neopotrebovaných senzoroch. Nakoľko môže ísť o výrobnú vadu či vnútorné tlakové prepätie v senzory, ktoré sa prejaví iba pri konkrétnom pôsobení konkrétnej sily. Nestálosť daného rozsahu nie je možné matematicky spoľahlivo korigovať a preto v prípade, že sa takýto prejav opotrebenia vyskytne v senzory, tak je na zváženie vyhodnotenia tohoto senzora ako opotrebovaného a nespoľahlivého. Pri zvažovaní vyhodnotenia senzora ako opotrebovaného sa berie do úvahy hodnota odchýlky a schopnosť spätnej kalibrovateľnosti a opakovateľnosti ďalšej kalibrovateľnosti.



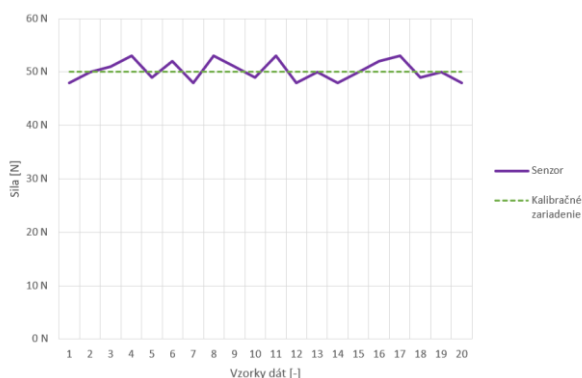
Obr. 32 Merateľná nestálosť daného rozsahu senzora

Matematické vyhodnotenie nestálosti v tomto prípade nie je považované ako relevantný matematický údaj, nakoľko je tu vysoká variantnosť výsledkov, ako aj možná zmena logiky a správania sa senzora. V teoretickom ponímaní by bolo možné navrhnúť istý výpočet pozostávajúci z niekoľkých po sebe idúcich krokov nasledovne:

- Zistenie pásma nestálosti (začiatok a koniec pásma, respektíve rozsah pásma)
- Hodnota maximálnej výchylky pásma
- Možnosti korekcie výchylky pásma k požadovanej nule voči kalibračnému zariadeniu resp. k hodnote zodpovedajúcej silovému pásmu (resp. silovej hladine)
- Opakovateľnosť právnych výsledkov na základe viacerých meraní a porovnania s predošlými výsledkami hodnoty maximálnej výchylky každého merania

4.4.3 Nestálosť silovej hladiny

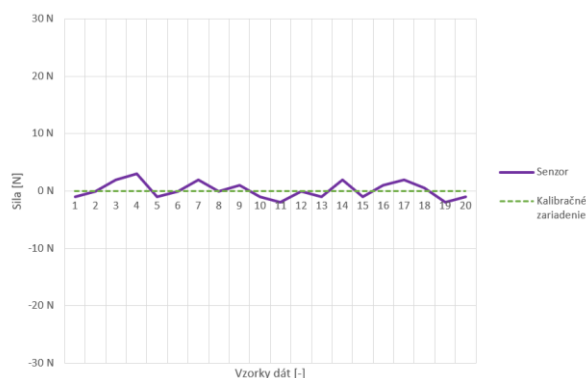
Nestálosť hodnôt v konkrétnej silovej hladine (Obr. 33) je veľmi jasným prejavom opotrebenia senzora. Nestálosť je možné merať v akejkoľvek vopred definovanej silovej hladine. Pojem nestálosti veľmi špecificky profiluje senzor v rámci výstupu jeho hodnôt a to vo zvýšenom rozsahu výstupných hodnôt pri pôsobení konštantnej sily. Na základe množstva meraní je možné očakávať, že zvyšujúcou sa požadovanou silovou hladinou v rámci merania sa bude úmerne zvyšovať nestálosť hodnôt senzora a tým aj vstupné rozpätie analógových hodnôt. Tento jav súvisí už aj so spoľahlivosťou a životnosťou senzora.



Obr. 33 Graf silovej nestálosti silovej hladiny

4.4.4 Nestálosť nulovej hladiny a jej matematická korekcia

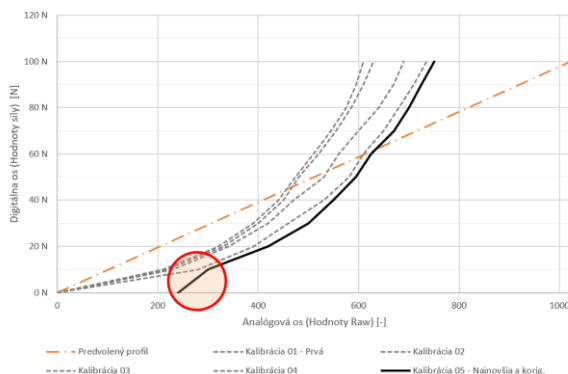
Nestálosť hodnôt v nulovej hladine (Obr. 34) je identická ako nestálosť silovej hladiny v konkrétne definovanom silovom pásme s jedným hlavným rozdielom. Nulová hladina je špecifický výraz, ktorý opisuje stav senzora v pokojovom stave. Nestálosť hodnôt senzora tak meriame v stave bez záťaže a zisťujeme tak jeho hodnoty pre našu digitálnu nulovú rovinu. Znovu platí pravidlo, že čím väčší rozptyl maximálnych a minimálnych hodnôt sa v meraní nachádza, tým väčšie máme tolerančné pásmo výstupných hodnôt. Na základe zvýšenej nestálosti nulovej hladiny je potrebné matematicky korigovať výstupné hodnoty tak, aby zodpovedali spoľahlivému meraniu.



Obr. 34 Graf nestálosti nulovej hladiny senzora (pokojový stav)

Korekcia nestálosti nulovej hladiny senzora sa prejaví ako znecitlivenie senzora v jeho najmenších hodnotách, pričom výsledok korekcie sa zapisuje do profilu senzora pre nulovú hladinu FL_0 v premennej DV_{0K} ako korigovaná hodnota. Rozdiel medzi korekciami je možné vidieť na grafe (obr. 35), kde staré profily senzora

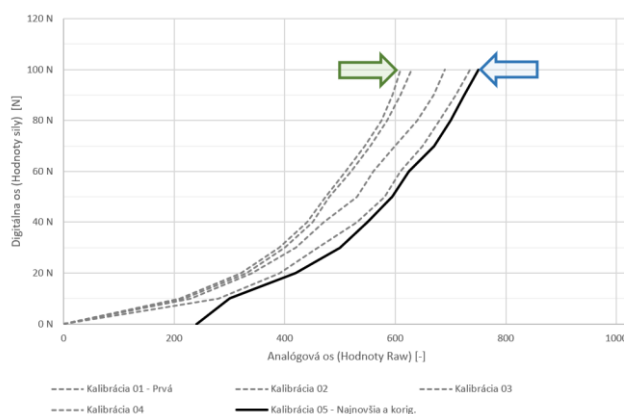
nemajú korekciu (začínajú od nuly) a najnovšia krivka profilu senzora čiernou hrubou čiarou je korigovaná hodnotou DV_{0K} .



Obr. 35 Vizualizácia matematickej korekcie nulovej hladiny senzora

4.4.5 Opatrenie senzora a jeho matematické vyhodnotenie

Senzor v rámci svojej vlastnej prevádzky mení svoje vlastnosti ako aj svoje výstupné hodnoty v závislosti intenzity pôsobiacej sily dopadajúcej na meraciu plochu. Postupné kalibrovanie v čase môže veľmi pravdepodobne meniť svoj charakter kriviek profilu. Na základe väčšieho množstva meraní môžeme tvrdiť, že zmena charakteru senzora je nevyhnutný a fyzický prirodzený proces opotrebenia senzora, či už v rámci bežnej prevádzky alebo v rámci záťažových testov a podobne. Rozdiel medzi bežnou prevádzkou a záťažovým testom je iba v rýchlosti opotrebenia medzi jednotlivými kalibráciami. Vizualne interpretovať opotrebenie senzora je možné vyjadrením grafu znázorňujúceho jednotlivé kalibrácie, ktoré postupne ukazujú posun hodnôt do vyšších výstupných čísel v rámci analógovej osi. Takýto posun je možné odsledovať na vybranej silovej hladine, pričom sa odporúča vybrať jedno z najvyšších možných silových hladín. Sledovanie zmeny hodnôt v konkrétnej silovej hladine medzi jednotlivými kalibráciami môže určiť približnú mieru opotrebenia senzora až po jeho úplné poškodenie. V rámci praktických meraní som zistil, že senzor môže v rámci svojej životnosti zmeniť postupnými kalibráciami a intenzívnou prevádzkou svoje hodnoty v maximálnej silovej hladine až o dvojnásobok (Obr. 36).



Obr. 36 Určovanie procesu opotrebenia senzora

5 EXPERIMENTY PROCESOV KALIBRÁCIE

Progresívne technické systémy sú súčasťou modernej vyspelej výroby. Disponujú rôznorodými senzorickými implementáciami ktoré môžu systém analyzovať, merať kalibrovať a diagnostikovať. V súčasnosti sa využívajú v oblasti senzorov aj senzory na meranie sily a to hneď v rôznych prevedeniach, kvalitách a materiáloch. Naše zameranie v oblasti senzorov sa sústreďuje pre štandardné menej presné rezistívne senzory, ktoré sú stále často využívané najmä pre ich konštrukčnú jednoduchosť a priaznivú cenu. V porovnaní s modernými a drahými senzormi sú tieto jednoduché ekvivalentne spoľahlivé. Moderná doba nám ponúka množstvo progresívnych materiálov, ktoré sa využívajú v odvetví vývoja a výroby prototypov, ako aj v oblasti experimentovania. Pružné materiály sú vhodným materiálom pre súčasný experiment. Teoretická príprava pre vykonanie experimentu pozostáva z dvoch hlavných častí. Prvá obsahuje informácie z oblasti diagnostiky a kalibrácie senzorov merajúcich tlak a silu. Druhá oblasť teoretického základu definuje hlavné informácie v oblasti aditívnej výroby.

5.1 Expertíza špecializovaného prípravku vyrobeného aditívnou metódou

Pre umožnenie vykonania experimentu bol vyrobený špecializovaný prípravok na mieru pre použitie v aktuálnom diagnostickom laboratóriu. V rámci inžinieringu bolo navrhnutých hneď niekoľko typov a dizajnov prípravkov s rôznou konštrukciou. Prípravok má prísnu aplikačnú podmienku, ktorou je možnosť výmeny meracích segmentov podľa potreby. Finálna verzia prípravku spĺňa túto podmienku, ale ponúka aj iné benefity v aplikácii merania, ako je rýchle a stabilné kotvenie v stabilizačnej hlave prípravku a podobne. Ďalšími nemenej dôležitými podmienkami sú tuhosť konštrukcie, stabilita počas merania a celková spoľahlivosť dodržať stanovené podmienky každého merania.

- **Výskumná otázka:** “Ako vplýva implementácia elastického materiálu na proces merania sily tlakových senzorov?”
- **Hypotéza:** “Elastický materiál v procese merania tlakových senzorov umožní menšie odchýlky merania a stabilnejší proces, zníži ale dosiahnuteľnú silu.”

Testovacie segmenty sú najdôležitejšou časťou experimentu, a preto boli vyrábané kvalitným moderným materiálom. V rámci testovacej fázy a prípravy experimentu boli zvolené rôzne materiály ako aj tvary segmentov, kde sa následne ešte posudzovala ich elasticita ako aj vhodnosť použitia pre ďalšie merania.

Cieľovým materiálom bol zvolený progresívny materiál skupiny elastických materiálov skupiny TPE (termoplastický elastomér), konkrétne Filaflex (Filaflex 82A Skin 1,75mm). Všeobecne môžeme tvrdiť, že ide o veľmi pružný materiál s vhodnými vlastnosťami pre náš experiment. Na obrázku 48 je možné vidieť orientačný text segmentov rôznych tuhostí.

Použitým zariadením na výrobu všetkých komponentov je 3D tlačiareň Prusa i3 MK2.5. Umožnila nám vyrobiť vhodné experimentálne diely podľa potrieb merania kvalitne a rýchlo. Na obrázku 37 sú znázornené všetky dôležité meracie pružné segmenty.



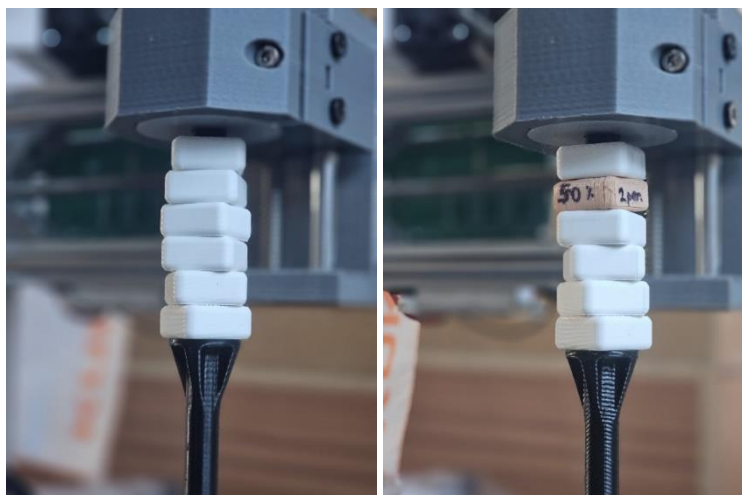
Obr. 37 Finálna podoba meracích pružných elementov pre experiment

Pre tuhé segmenty typu Hard bol navrhnutý a použitý materiál PETG (PETG White 1,75mm). V tomto prípade sa navrhoval materiál s vysokou tuhosťou tak, aby sme zamedzili možným deformáciám a vytvorili optimálne prostredie pre testovanie merania s pružnými segmentmi bez vedľajšieho prepruženia ostatných materiálov. Tento materiál bol použitý aj pre výrobu ostatných dielov špecializovaného prípravku. Parametre aditívnej výroby sú uvedené v tabuľke 3.

Tabuľka 3 Parametre aditívnej výroby meracích segmentov

Typ segmentu	Hrúbka steny	Výplň	Orientácia modelu	Teplota hrotu	Tok materiálu
Typ A	0,8mm	10%	horizontálne	230°C	110%
Typ B	0,8mm	50%	vertikálne	230°C	110%
Typ C	0,8mm	50%	horizontálne	230°C	110%
Typ D	1,2mm	50%	horizontálne	225°C	110%
Typ E	1,2mm	50%	horizontálne	230°C	115%

Špecializovaný prípravok (Obr. 38) obsahuje hlavné časti ako je tlačný hrot, driek, funkčná časť a kotviaca hlava. Funkčná časť pozostáva z jednoduchšej konštrukcie vrátane valcového úseku, na ktorý sú integrované meracie segmenty. Tieto segmenty tvoria praktickú materiálovú časť experimentu, nakoľko experiment disponuje dvoma typmi materiálu meracích segmentov. Segmenty sú v rámci experimentu obmieňané samostatne a jednotlivo tak, aby vznikla postupnosť merania v logickom slede.

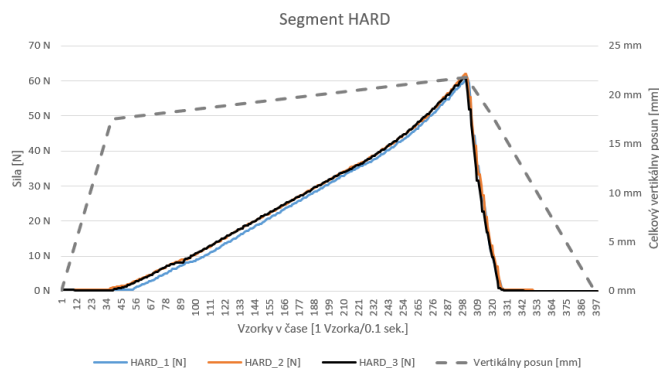


Obr. 38 Zobrazenie meracích elementov v diagnostickom zariadení

Vhodnou vizuálnou interpretáciou je znázorniť postup pomocou grafov (Obrázok č. 39 až 41) v slede, ktorý opisuje kroky spracovania dát. Začiatok spracovania dát prebieha špecifickým spracovaním, kde v prvom medzikroku prebehne zarovnanie kriviek (celých stôp merania) na spoločný bod, ktorý som ustanovil na základe charakteru merania na spoločné maximum vrátane korekcie dát. Pri zarovnaní prebehlo ešte redukovanie dát od zbytočných častí merania s nulovými hodnotami, ako aj stanovenie metodiky merania a vyhodnocovania. Dôležitým pravidlom bolo stanovenie rozsahu merania pre každé meranie, t.j. definovanie

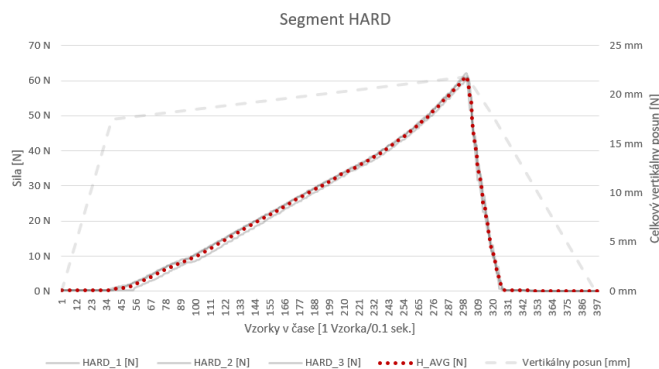
začiatku a konca. Koniec sa určil pre spomenuté merané maximum. Začiatok je vhodné určiť tak, aby bolo pásmo dát čo najväčšie, zároveň ale aby boli dáta relevantné. Z toho dôvodu som definoval začiatok meracieho pásma od 10N, kde o tejto hranice boli všetky meracie segmenty stabilné a charakter merania bol vhodný pre analýzu.

Prvým krokom je zber údajov každého segmentu separátne v troch samostatných meraniach za dodržania rovnakých podmienok, ako sú hodnota vertikálneho pohybu, alebo dodržanie okolitej teploty a podobne. V grafe je možné vidieť pôsobenie vertikálneho pohybu na meranie vo všetkých troch meraniach jednotlivých segmentov.



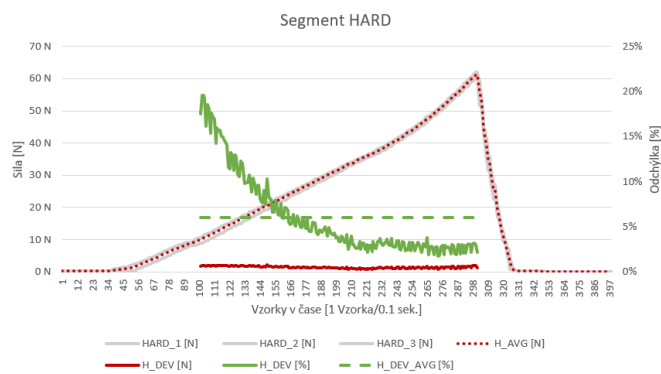
Obr. 39 Získavanie všetkých dát do podoby grafu

Druhým krokom spracovania dát je vytvorenie priemernej sily z troch meraní, ktorú je možné vidieť v grafe nižšie. Vypočítaná priemerná sila zodpovedá charakteru kriviek a preto je možné ju legitímne počítať ako finálny výsledok merania. Nakoľko aj pri vizuálnej kontrole súhlasí priemerná sila všetkým krivkám s malými odchýlkami.



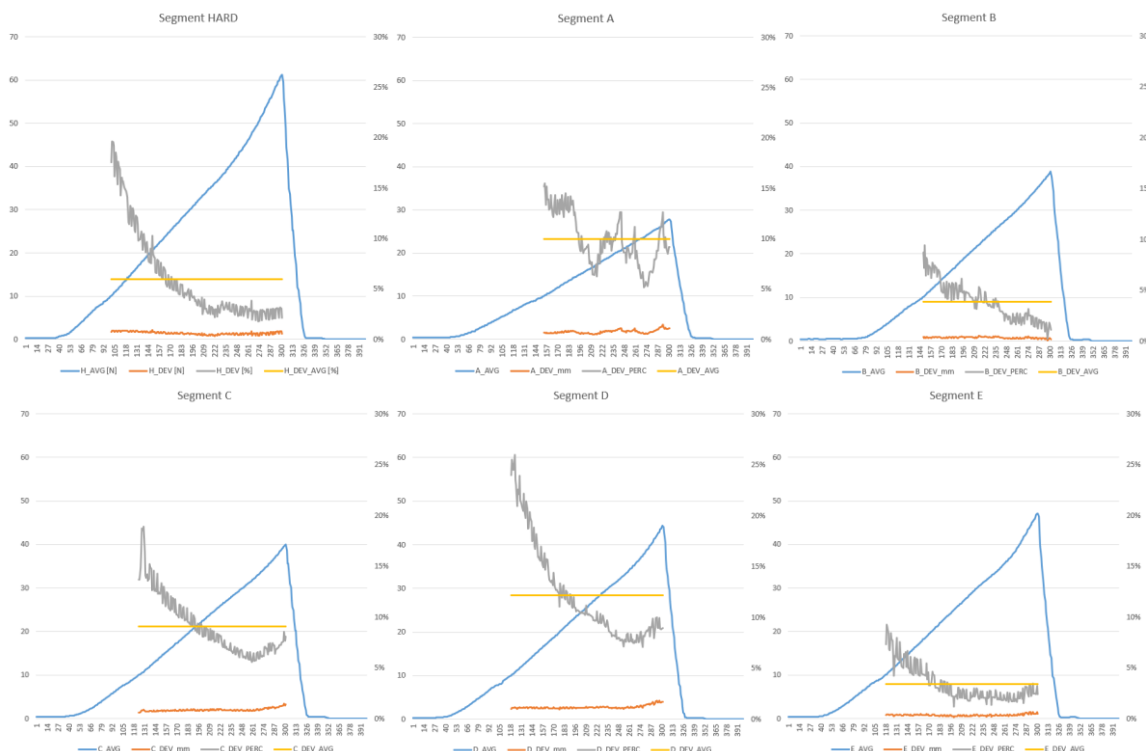
Obr. 40 Vytvorenie priemerovej krivky z troch meraní na základe spoločného bodu

Posledným matematickým krokom je výpočet niekoľkých parametrov odvodených od priemernej sily. Ide o parametre priemernej hodnoty odchýlky v newtonoch, v percentách ako aj celkový priemer z celého merania. Tieto posledné parametre dokážu určiť charakter merania ako kombináciu zvoleného materiálu voči vertikálnemu pôsobeniu sily. Na výpočet potrebných hodnôt sa používa predovšetkým kalkulácia aritmetickým priemerom pre veľké množstvo údajov (v tomto prípade vzoriek merania).



Obr. 41 Spracované hodnoty grafu pre prvý typ segmentu „Hard“

Následné získané údaje pokračujú k postupnému spracovaniu, pre každé meranie samostatne. Všetky získané výsledky musia zodpovedať spoločnému štandardu a pravidlám tak, aby odrážali logiku a úmysel štatistického vyhodnotenia. Výsledné spracované hodnoty meraní prešli tzv. zarovnaním na spoločný bod, ktorý je v tomto prípade určený ako maximálna sila, ku ktorej sa sústredili všetky merania. Následne sa vyhodnotili všetky premenné. Z veľkého množstva výsledkov sa vyberajú cieľové hodnoty, ako sú priemerná a maximálna sila merania, priemerná odchýlka sily ako aj celková priemerná odchýlka. Grafy vo výsledku (Obr. 42) znázorňujú charakter materiálu.



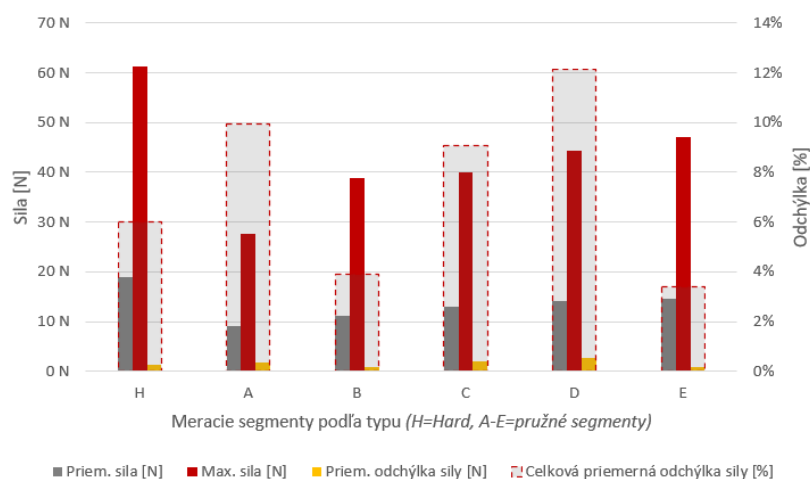
Obr. 42 Grafy vyhodnotenia meraní jednotlivých segmentov

Vyhodnotenie experimentu je znázornené v tabuľke 4. Na základe všetkých hodnôt je vhodné sa sústrediť na celkovú odchýlku v meraní (posledný riadok tabuľky), kde sú vhodné dva varianty s nízkou hodnotou odchýlky. Z nich sa následne vyberá vhodný segment s väčšou dosiahnuteľnou silou (riadok Maximálna sila). Pre náš experiment teda vychádza najvhodnejší typ pružného segmentu ako typ E, nakoľko má dostatočnú maximálne dosiahnuteľnú silu v meraní a najmenšiu odchýlku merania. Je dokonca vhodnejší ako segment

Hard, nakoľko bol pri meraní menšou odchýlkou stabilnejší, čo priaznivo pôsobí na celkový proces diagnostiky (Obr. 43).

Tabuľka 4 Záver merania experimentu pružných segmentov vyjadrený numericky

Cieľové premenné	Typ H	Typ A	Typ B	Typ C	Typ D	Typ E
Priemerná sila	18,9 N	9,1 N	11,3 N	13,0 N	14,2 N	14,7 N
Maximálna sila	61,2 N	27,8 N	38,9 N	40,0 N	44,4 N	47,1 N
Priem. odchýlka sily	1,4 N	1,8 N	0,8 N	2,0 N	2,8 N	0,8 N
Celková priem. odchýlka	6,0%	9,9%	3,9%	9,1%	12,2%	3,4%



Obr. 43 Výsledný graf interpretujúci záver experimentu

Výskumná otázka – stanovanie výsledku

- Implementácia elastického materiálu sa v procese merania preukázala ako efektívna. Pružný materiál bol schopný požadovanej deformácie, ktorá eliminovala nepresnosti a vedľajšie vplyvy. Práve vhodná kombinácia zvoleného materiálu a vhodnej výroby je kľúčová pre optimálne vyžadované vlastnosti.

Metodologický test - testovanie hypotézy

Na základe merania bolo preukázateľne zvýšená presnosť a repetitívnosť merania zvolením vhodného pružného flexi materiálu. Znížila sa odchýlka merania výraznejším spôsobom.

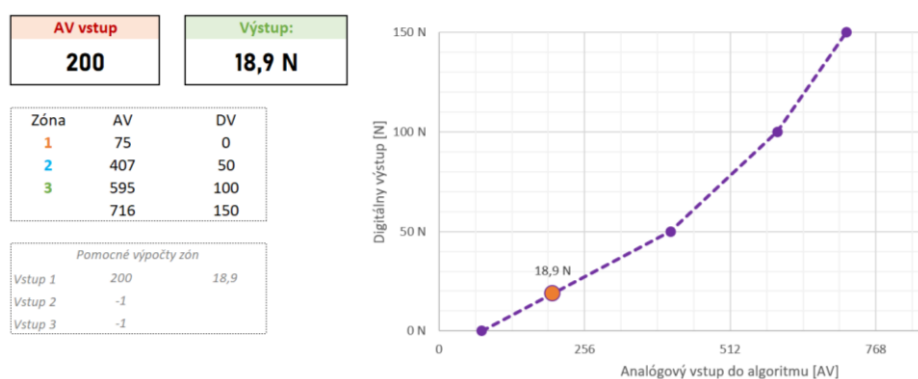
- “Hypotéza bola potvrdená”

5.2 Softvérové nástroje pre verifikáciu nastavenia kalibrácie a diagnostiky

Pre účely verifikácie nastavenia tlakových senzorov v rámci kalibračných procesov bol vyvinutý špecializovaný softvérový nástroj v programe MS Excel. Ide o prepočtový kalkulátor so zobrazovaním profilu senzora v reálnom čase. Základným vstup (zo strany užívateľa) je AV vstup. Po ručnom zadaní akejkoľvek hodnoty nástroj prepočíta na základe dát profilu senzora analógovú hodnotu na digitálnu hodnotu

v Newtonoch. V grafe na pravej časti obrázku je možné vidieť pomarančovo sfarbený krúžok, ktorý lokalizuje hodnotu sily senzora na grafe. Každá zmena hodnôt je postupne animovaná a užívateľ má tak interaktívny pohľad na adaptáciu zmien.

Druhým nemenej dôležitým benefitom nástroja je možnosť meniť samotný profil v priebehu práce s nástrojom a modifikovať tak krivku profilu senzora. Nástroj má definitívne nastavené 3 silové hladiny (FL_0 , FL_1 , FL_2 a FL_3). V prípade potreby úpravy hodnôt profilu senzora na aktuálne dáta sa menia hodnoty v tabuľke pod „AV vstupom“ v stĺpci „AV“. Profil sa aktualizuje a hodnoty sú naďalej správne prepočítavané. Pre prípad kalibrácie a diagnostiky ide teda o jedinečný, vysoko efektívny interpretačný nástroj (obr. 44).



Obr. 44 Nástroj pre kalkuláciu a vizuálnu interpretáciu hodnôt profilu senzora

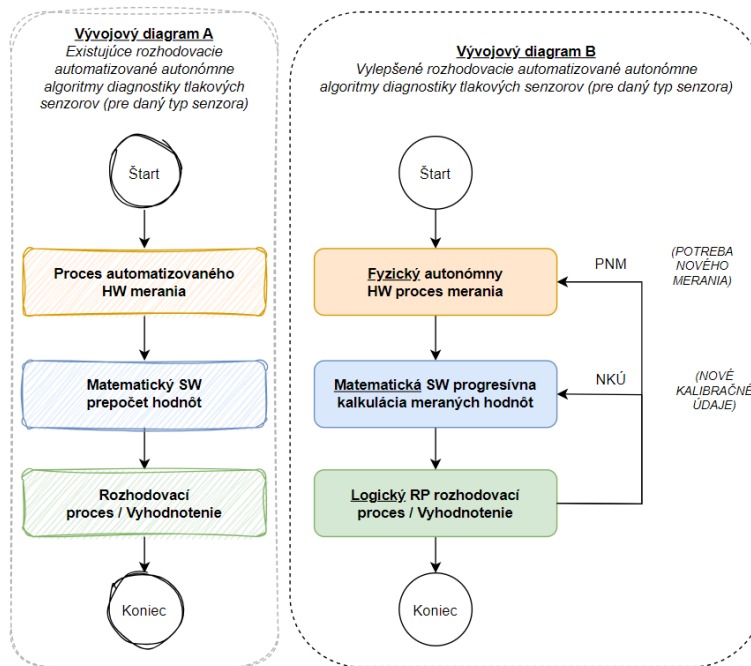
6 PRÍNOS VÝVOJA A VÝSKUMU KALIBRAČNÝCH PROCESOV V OBLASTI AUTONÓMNYCH ALGORITMOV DIAGNOSTIKY

Súčasný algoritmy kalibračných procesov vo všeobecnosti pozostávajú z troch hlavných krokov. Prvým je proces automatizovaného hardvérového merania, ktoré môže prebiehať aj na autonómnej úrovni. Druhým krokom v algoritme je matematický softvérový prepočet hodnôt, ktorý kalkuluje namerané hodnoty z prvého kroku až do číselného vyhodnotenia merania. Posledným tretím krokom je rozhodovací proces, ktorý obsahuje jednoduchú logiku pre rozhodovanie sa ďalšieho postupu a následného vyhodnotenia. Absolútnym štandardom v rámci diagnostiky a kalibrácie je v tomto poslednom kroku logicky rozhodovať o funkčnosti senzora a jeho schopnosti kalibrácie. Celý algoritmus v súčasnej podobe v praxi je zobrazený zjednodušene, realita ale môže byť pre každý jeden krok detailnejšia v závislosti na použitých senzoch a samozrejme v závislosti od know-how firmy, ktorá disponuje takýmto diagnostickým procesom.

6.1 Súčasný verzus vylepšený algoritmy kalibrácie a autonómnosť diagnostiky

Vlastné riešenie autonómneho algoritmu (zobrazené tiež na obrázku 57 napravo) prináša špecifické vylepšenia a do značnej miery vlastné úpravy ako aj výraznú detailizáciu algoritmu. Na prvý pohľad prvým vylepšením je priamy postoj ku každému z troch hlavných krokov. Napríklad v prvom kroku sa prejavuje snaha o vyššiu úroveň autonómnosti od štandardnej automatizácie. V druhom kroku je možné si všimnúť matematický prepočet už v progresívnejšej kalkulačnej podobe, a taktiež tretí krok disponuje vylepšeným logickým procesom so systémom rozhodovania a riadenia. Rozhodovanie prebieha na matematickej a logickej úrovni, kde sa isté technické otázky spätne vracajú do predošlých krokov, aby proces mohol zvýšiť svoju kvalitu, presnosť, vyhodnotenie ako aj znovu kalibrovať meraný senzor.

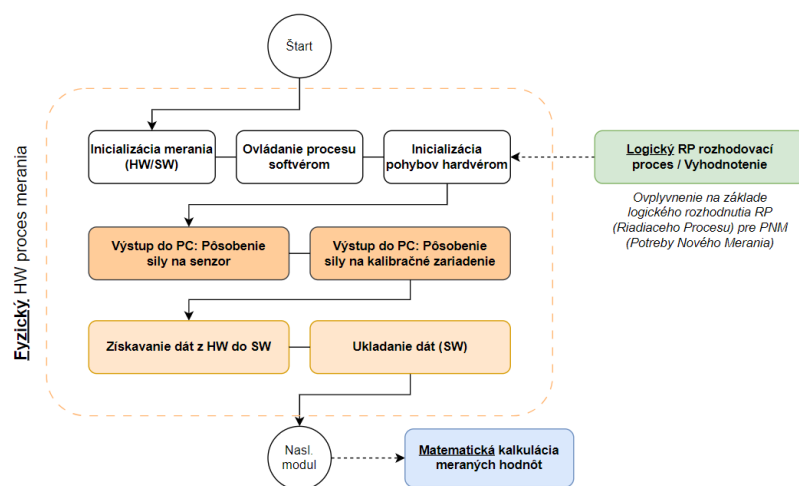
Logický rozhodovací proces RP („RP“ ako aj riadiaci proces) sa dokáže vrátiť v rozhodovaní o krok späť k matematickej kalkulácii nameraných hodnôt pri rozhodovaní premennej NKÚ. NKÚ je skratkou zápisu Nových Kalibračných Údajov. V prípade úspešného merania a rozhodnutia o kalibrácii sa nové kalibračné údaje zapíšu v predošlom module do profilu senzora a následne logický rozhodovací proces vyhodnotí senzor ako s kalibrovaný s novými aktualizovanými hodnotami a novým profilom senzora. Druhý rozhodovací proces nastáva v prípade nepresnosti alebo neistoty merania. Na základe nekorektných alebo nepresných údajov môže logický rozhodovací proces rozhodnúť o Potrebe Nového Merania (PNM), čo opäť naštartuje fyzický autonómny proces získania nových údajov a po matematickej kalkulácii hodnôt sa bude rozhodovací proces logicky rozhodovať o novom stave senzora a schopnosti jeho kalibrácie, alebo prípadnom opotrebení. Na obrázku 45 je možné vidieť zľava súčasne využívané algoritmy, napravo vylepšená vypracovaná verzia obohatená o vyskúšané prvky.



Obr. 45 Vývojový diagram autonómnych algoritmov

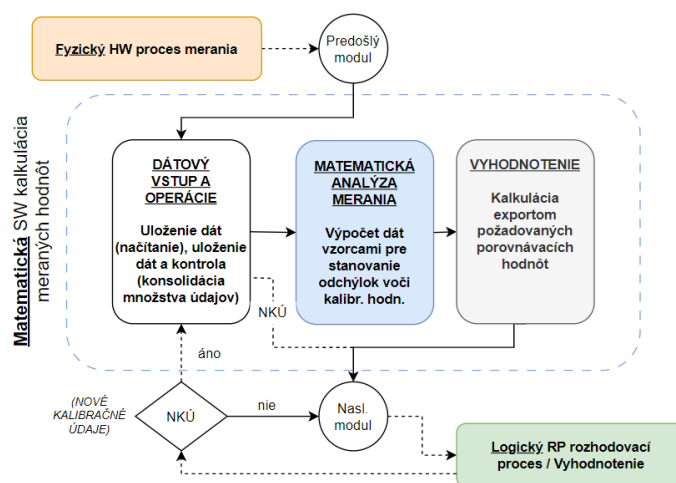
6.2 Originálne autonómne moduly algoritmov kalibračných procesov

Modul algoritmu vývojovým diagramom: Fyzický hardvérový proces merania (Obr. 46) začína prvými tromi operáciami ako je inicializácia merania. Ide o inicializáciu hardvérových a softvérových vstupných premenných. Nasleduje ovládanie procesu softvérom, ako aj hardvérová inicializácia všetkých pohybových aktivít diagnostického zariadenia. Hlavné operácie tohoto modulu sú výstup do počítača z pohľadu pôsobenia sily na senzor a z pohľadu pôsobenia sily na kalibračné zariadenie. Nasleduje získavanie dát z hardwaru do softvéru a následné spracovanie veľkého množstva dát s následným uložením do počítača. Práve RAW dáta sú koncom a výstupom v tejto časti modelov a je možné nasledovať do ďalšej časti.



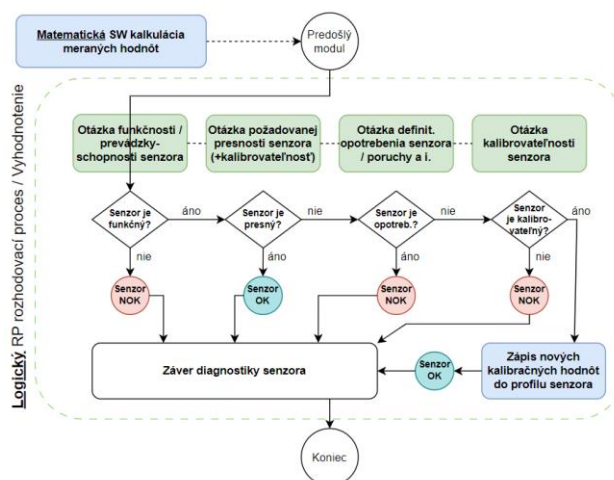
Obr. 46 Vývojový diagram: Fyzický HW proces merania

Matematická softvérová kalkulácia meraných hodnôt (Obr. 47) je výpočtový modul algoritmu v podobe vývojového diagramu rovnako ako v predošlom prípade. Pozostáva z troch hlavných operácií po sebe nasledujúcich. Prvá operácia je dátový vstup a prislúchajúce operácie, ktoré zahŕňajú uloženie a načítanie dát, ako aj kontrola a konsolidácia všetkých údajov. Druhou operáciou je tá najdôležitejšia operácia z celého modulu, a teda matematická analýza merania. Pozostáva z výpočtu dát pomocou vzorcov pre stanovenie odchýlok voči kalibračným hodnotám. V tejto časti prebieha kalkulácia všetkých hodnôt tak, aby sa zistila buď potreba novej kalibrácie alebo celková odchýlka v percentách týkajúca sa stavu senzora a jeho presnosti. Zároveň v tomto elemente daného modulu prebiehajú aj prislúchajúce výpočty, ktoré dokážu odhaliť rôzne chyby a nepresnosti opotrebenia senzora. Poslednou časťou tohto modelu je vyhodnotenie, kde sa vykonáva súhrn kalkulácie exportom požadovaných porovnávacích hodnôt, ktorý môžeme definovať ako výstupný protokol matematickej rekalkulácie. Do tejto časti modulu tiež vstupuje logický rozhodovací proces, ktorý má vplyv na potrebu nových kalibračných údajov a ich zápisu, uloženia, kontroly a konsolidácie údajov.



Obr. 47 Vývojový diagram: Matematická SW kalkulácia meraných hodnôt

Posledným tretím modulom algoritmu v podobe vývojového diagramu je logický rozhodovací proces, respektíve riadiaci proces vrátane vyhodnotenia (Obr. 48). Logické rozhodovanie už na začiatku prebieham formou jednoduchých a základných otázok týkajúcich sa senzora, pričom každá otázka môže zahŕňať vlastný pod-modul. Každý pod-modul disponuje širšími vnútornými operáciami a schémami. Ide o síce základné, ale veľmi dôležité otázky nevyhnutné ku kvalitnej diagnostike. Ide o otázky funkčnosti, presnosti, opotrebenia ako aj kalibrovateľnosti senzora. Zodpovedanie každej otázky vedie k priamej odpovedi, či je senzor v poriadku, resp. OK, alebo sa jedná o opotrebený senzor vhodný pre vyradenie, označený ako NOK (not OK). Vyhodnotenie o stave senzora a podrobných informáciách vykonáva posledná operácia tohto modelu pod názvom Záver diagnostiky senzora. Na základe tejto operácie je možné sa pri konci diagnostického procesu dozvedieť stav senzora, ako aj očakávať, že je senzor nakalibrovaný a prevádzkyschopný, alebo v opačnom prípade je možné sa dozvedieť o problematike týkajúcej sa presnosti alebo funkčnosti senzora.



Obr. 48 Vývojový diagram: Logický RP rozhodovací proces / Vyhodnotenie

Schéma operácií:

Schému operácií je možné vnímať ako postupnosť rôznych aktivít súvisiacich s diagnostikou a príbuznými operáciami. Schéma operácií je v rámci návrhu algoritmu neštandardné riešenie. Navrhuje sa z dôvodu kvalitnej vizualizácie a interpretácie hlavnej logiky systému. Algoritmus hlavného správania z metodického hľadiska bude znázornený po správnosti vývojovým diagramom. Operácie a moduly diagnostiky budú navrhnuté schémou operácií. Metodiku je najvhodnejšie zrealizovať ako zoznam pravidiel, podmienok a informácií k spomenutým výstupom.

Predpokladané operácie diagnostiky:

1. Analýza (Prvotné „orientačné“ meranie)
2. Meranie (Meranie hlavnej stopy dát)
3. Spracovanie (Po tento bod vrátene ide o kalibráciu)
4. Prepočet (Kalibrácia vrátene matematickej kalkulácie - justáž)
5. Testovanie (Meranie s cieľom preverenia medzivýsledkov justáže)
6. Vyhodnocovanie (Protokolizácia)

Vedľajšie operácie (pod-operácie) diagnostického zariadenia:

1. Riadenie bezpečnosti zariadenia ako celku
2. Vyhodnotenie medzivýsledkov meraní
3. Samo-diagnostika celého zariadenia
4. Preverenie funkčnosti všetkých komponentov / zariadení v laboratóriu
5. Spúšťacie a vypínacie sekvencie
6. Prídavné (doplňkové) pod-operácie diagnostiky (akustické a svetelné informácie priebehu)

Základná metodika kalibrácie:

Kalibrácia je do veľkej miery otvorenou tematikou v tomto bode vypracovania zadania, nakoľko sa kalibrácia aktuálne nerealizuje v plnom rozsahu a teda je možné očakávať isté zmeny v rozsahoch merania a podobne. Po viacerých praktických meraniach bolo zistené, aké údaje je možné očakávať od merania. Metodika kalibrácie

je spojením matematických prepočtov hodnôt kalibračného zariadenia a senzora spolu s použitím spomenutej lineárnej interpolácie údajov pre spresnenie dátovej stopy „pomalšieho“ zariadenia z meraní.

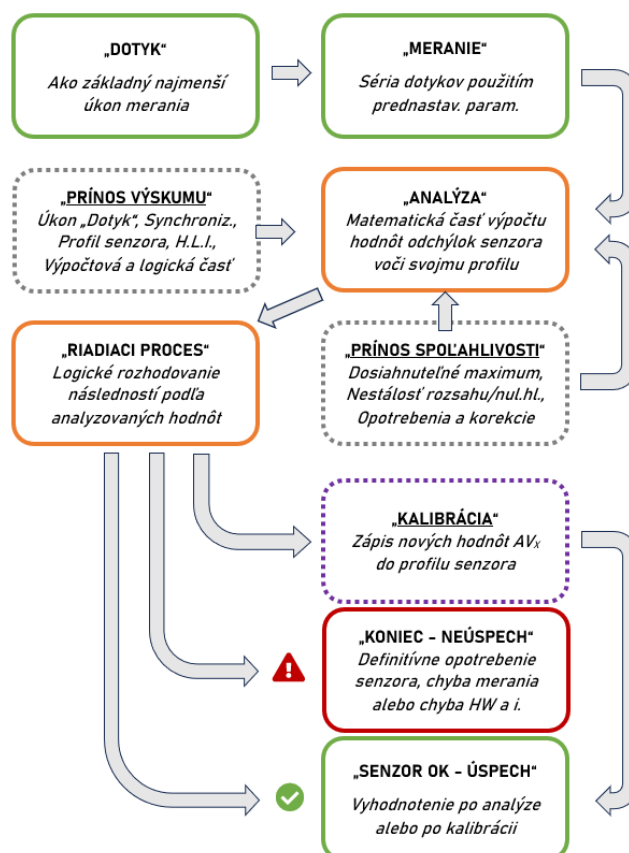
V rámci bezpečnosti a ochrany zdravia pri práci je možné implementovať do algoritmu v budúcnosti množstvo veľmi dôležitých údajov, s ktorými sa uvažovalo už od začiatku návrhu algoritmu, kedy však neboli plnohodnotne implementované. Ide o informácie z pohľadu ovládania procesu a jeho rýchleho fyzického zastavenia pomocou tlačidla Emergency Stop alebo implementácia pohybových alebo iných senzorov pre zabezpečenie miesta vykonávania diagnostiky pre ochranu človeka. Taktiež sa rátalo pri návrhu diagnostického zariadenia s jeho kompletným zakrytovaním pre zabezpečenie miesta diagnostiky.

V jednoduchosti je možné definovať pre tento prípad že: „Kalibrácia je softvérové nahradenie (prepísanie) súčasných hodnôt profilu senzora novými hodnotami na základe aktuálneho fyzického merania hodnôt senzora voči kalibračnému zariadeniu.“

Pre diagnostiku platí: „Diagnostika je automatizovaný a autonómny proces analýzy, kalibrácie a verifikácie merania senzora s detegovaním opotrebení, presnosti senzora a komplexným prehľadom o stave senzora a následnom použití.“

6.3 Bloková schéma Metodiky autonómnej diagnostiky tlakových senzorov

Bloky s čiarkovaným vyznačením obvodovej čiary patria medzi vlastný priamy prínos práce v oblasti kalibrácie tlakových senzorov. Zvyšujú tak kvalitu (spojenie rýchlosti, presnosti a spoľahlivosti) všetkých procesov súvisiacich s diagnostikou senzorov (Obr. 49).



Obr. 49 Bloková schéma Metodiky autonómnej diagnostiky senzorov

ZÁVER

Záverom tejto práce možno zhrnúť využitie všetkých nadobudnutých poznatkov do rozsiahlej metodiky určenej pre kalibráciu a diagnostiku tlakových senzorov.

Cieľom práce bolo realizovanie odborného výskumu v oblasti vývoja algoritmov konfigurácie tlakových senzorov v procese kalibrácie a diagnostiky. Výskum pozostával z meraní, nadobudnutých vedecko-odborných poznatkov a vykonaných expertíz správania sa snímačov v procesoch merania. Dôležitým prínosom publikácie bolo zameranie sa na vysvetlenie vedeckosti teórie a aplikačných možností metodiky z oblasti progresívnej diagnostiky.

Výstup práce disponuje matematickými kalkuláciami pre získavanie nových kalibračných dát, ako aj vyhodnocovacími logickými metódami analýzy stavu spoľahlivosti senzora. Splnenie cieľov práce možno zhrnúť ako splnenie výskumno-vývojových aktivít uvedených v práci, medzi ktoré patrí: vymedzenie metodiky merania (úkon Dotyk), optimalizácia meraných dát redukciou vzoriek, vyriešenie problematiky synchronizácie merania a na záver najhlavnejšie ciele, ako sú: kalibračné parametre, profil senzora, logika kalibrovania, hladinová lineárna interpolácia, až po výpočtovú, vyhodnocovaciu a verifikačnú časť práce. Metodiku diagnostiky podporuje následný metodický blok informácií venovaný vlastnému výskumu a súhrnu metód zvyšovania spoľahlivosti poznaním možností opotrebenia senzora. Ide najmä o vlastnosti ako dosiahnuteľné maximum senzora, nestálosť daného rozsahu, nestálosť silovej hladiny a nestálosť nulovej hladiny. Metodika spoľahlivosti je podporená výpočtovou etapou pre korekciu nulovej hladiny ako aj dvoma metódami pre výpočet opotrebenia senzora matematickým spôsobom.

Prínos výsledkov práce je určený nielen pre vedecko-výskumnú obec ako vedecký metodický materiál vo forme práce, taktiež sa očakáva významný prínos práce pre adaptáciu v odbornej praxi. Práca disponuje novými, doposiaľ nepublikovanými aspektmi cennými pre zvyšovanie kvality nastavenia tlakových snímačov v kalibračných zariadeniach.

Zároveň sa naskytá možnosť kompletnej implementácie metodiky do skutočného kalibračného systému, ktorý dokáže adaptovať výsledky do praxe a verifikovať tak obsah práce v dlhodobom časovom spektre. Výsledky práce boli v odbornej praxi priebežne verifikované v postupných krokoch. Celková implementácia môjho navrhovaného algoritmu by si vyžadovala výrazný zásah programátora, pričom z hľadiska realizácie metodiky sa nevyžadovalo funkčné IT riešenie. Napriek tomu môže byť kompletizácia autonómnosti a zavedenie do praxe v budúcnosti ďalším krokom v realizácii laboratória diagnostiky tlakových senzorov.

Obsah práce bol smerovaný kapitolami od teoretického rozboru a štúdia, cez aplikáciu výskumno-vývojových aktivít budovania diagnostického laboratória pre vykonávanie rozsiahlych meraní hodnôt senzorov, až po kreovanie metodiky na základe nadobudnutých poznatkov. Kapitoly boli vzájomne naviazané chronologickou postupnosťou vypracovania práce počas celého štúdia.

Dôležitou časťou mojej práce bolo vizuálne interpretovať svoje výsledky, ktoré som zobrazoval vo forme grafov, ktoré tvoria vizualizačný nástroj objasnenia zložitých javov, meraní, logických a matematických záverov. Zároveň sa použili pri tvorbe technických zariadení aj konštrukčno-technologické postupy,

matematické a analytické metódy hľadania riešení, ako aj celkový vedecký výskumno-vývojový prístup k vypracovaniu práce.

Konečným efektívnym prínosom práce je metodika kalibračných procesov, pozostávajúca z troch iterácií. Prvou iteráciou je kapitola Originálny vývoj diagnostického laboratória vrátane špecializovaných prípravkov, definovaný ako hardvérová etapa. Druhá iterácia disponuje rozsiahlou metodickou etapou pomenovanou ako Výskum v oblasti nastavenia tlakových snímačov, obsah kapitoly obsahuje tiež nové závery a je najdôležitejšou časťou metodiky. Tretia iterácia uzatvára výstupy kapitolou Prínos vývoja a výskumu kalibračných procesov v oblasti autonómnych algoritmov diagnostiky.

Závery a výsledky práce boli overené spätne v procesoch merania a verifikácie, ako vykonanie skúšky správnosti riešenia všetkých publikovaných návrhov a výsledkov. Na základe overenej verifikácie je možné potvrdiť vhodnosť priamej následnej adaptácie metodiky do praxe a využiť tak všetok potenciál podľa očakávania.

ZOZNAM BIBLIOGRAFICKÝCH ODKAZOV

- ABRAMOV, I., ET AL. Diagnostics of electrical drives. In The 18th International Conference on Electrical Drives and Power Electronics. EDPE 2015, The High Tatras, Slovakia, 2015, pp. 364-367.
- ABRAMOV, I., ET AL. Monitoring of technical condition of motors and bearings of woodworking equipment. Acta Facultatis Xylogiae Zvolen, 2014, Vol. 56, Issue 2, pp. 97-104.
- ARAVIND, R., ET AL. 2018. A Case Study of 3D Printed PLA and Its Mechanical Properties, Materials. Today: Proceedings. Volume 5. ISSN 2214-7853. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2018.01.146>
- ARAVIND, R., ET AL. 2018. A Case Study of 3D Printed PLA and Its Mechanical Properties, Materials. Today: Proceedings. Volume 5. ISSN 2214-7853. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2018.01.146>
- Autodesk Fusion 360. ©2022 [cit. 2022-13-04]. Dostupné na internete: <https://www.autodesk.cz/products/fusion-360/overview?term=1-YEAR&tab=subscription>
- Automatizácia v priemysle I - Základy lineárnej techniky, 2019 [cit. 2022-07-25]. Dostupné na internete: <https://www.haberkorn.cz/sk/detail/579/automatizacia-v-priemysle-i-zaklady-linearnej-techniky/>
- BABJAK, Š. Základy navrhovania výrobkov pre automobilový priemysel. 1. vyd., Technická univerzita v Košiciach, 2010, ISBN 978-80-553-0564-6.
- BAJRACHARYA, S., SASAKI, E. Investigation of effect of stress on eddy current response using phase diagram. Structure and Infrastructure Engineering, 2020, Vol. 16, No. 9, pp. 1276-1285.
- BALÁŽ, I. STN EN 1999-1-1/NA. 2010 (73 1501), Eurokód 9. Navrhovanie Hliníkových Konštrukcií. Bratislava: Slovenský ústav technickej normalizácie.
- BISHOP, P., POVYAKALO, A. A conservative confidence bound for the probability of failure on demand of a software-based system based on failure-free tests of its components. Reliability Engineering and System Safety, 2020, Vol. 203.
- BOZEK, P., ET AL. Diagnostics of Mechatronic Systems. Springer, Series: Studies in Systems, Decision and Control, 2021, Vol. 345.
- BOZEK, P., NIKITIN, Y. The Development of an Optimally-Tuned PID Control for the Actuator of a Transport Robot. In Actuators. Vol. 10, iss. 8 (2021), pp. 1-13. DOI: 10.3390/act10080195
- BUCINSKAS, V., ET AL. Research of the New Type of Compression Sensor. Automation, 2018, Vol. 743, pp. 561-573.
- Daily Automation: Indukčné snímače. 04/2013. [cit. 2023-12-16] Dostupné na internete: <https://www.dailyautomation.sk/indukcne-snimace>
- DAO, A.T. Wireless laptop-based phonocardiograph and diagnosis. PeerJ, 2015, Vol. 3. DOI: 10.7717/peerj.1178.
- DAUS, H., ET AL. Development of an Emotion-Sensitive mHealth Approach for Mood-State Recognition in Bipolar Disorder. JMIR Mental Health, 2020, Vol. 7, No. 7.
- DODOK, T., CUBONOVÁ, N., KURIC, I. Workshop programming as a part of technological preparation of production. ADVANCES IN SCIENCE AND TECHNOLOGY-RESEARCH JOURNAL. Volume 11, Issue 1, Page 111-116. DOI: 10.12913/22998624/66504
- DRÁPALA, J., KURSA, M. 2012. Elektrotechnické materiály. VŠB - Technická univerzita Ostrava. učebné texty. ISBN 978-80-248-2570-0
- FABIAN, Michal. – SPIŠÁK, Emil. 2009. Navrhování a výroba s pomocí CA.. 1. vyd. Brno: CCB. 398 s. ISBN 978-80-8582-565-7.
- FARHAT, A., ET AL. Impacts of wireless sensor networks strategies and topologies on prognostics and health management. Journal of Intelligent Manufacturing, 2019, Vol. 30, No. 5, pp. 2129-2155.
- FRADEN, J. 2016. Handbook of modern sensors: physics, designs, and applications. New York, USA, SPRINGER. ISBN 978-3-319-19302-1

FRANKOVSKY, P., ET AL. Experimental analysis of stress fields of rotating structural elements by means of reflection photoelasticity. Applied optics, 2017, Vol.56, Issue 11, pp 3064-3070.

Hliníkové profily Bosch Rexroth. ©2021 Dostupné na internete: <https://www.boschrexroth.com/>

Hliníkový profil 20x20 drážka 5. ©2021. Dostupné na internete: <https://eshop.sharplayers.sk/p/hlinikovy-profil-20x20-cele-kusy>

CHRISTIANSEN, J. M., SMITH, G. E. Development and Calibration of a Low-Cost Radar Testbed Based on the Universal Software Radio Peripheral. IEEE Aerospace and Electronic Systems Magazine, December 2019, Vol. 34, No. 12., pp. 50-60.

CHUDZIKIEWICZ, A., SOWINSKI, B. Simulation method of selection of diagnostic parameters in the process of monitoring the rail vehicle's conditions. Structural health monitoring, 2011, Vol. 1, pp. 1103-1110.

CHVÁLA, B., VOTAVA, J. 1988. Přípravky. Praha: Nakladatelství technické literatury Alfa, 1988. 276 s.

JAGADEESH, K. 2017. Sensors and Their Characteristics. Smart Sensors, Measurement and Instrumentation. Springer. Volume 25. Dostupné na internete: https://doi.org/10.1007/978-3-319-55369-6_1

KADIYALA, E., ET AL. Global industrial process monitoring through IoT using Raspberry pi. International conference on nextgen electronic technologies, 2017, pp. 260-262.

Kalibrácia – Definícia, návod a význam. 2021. Dostupné na internete: <https://www.conrad.sk/o-nas/sprievodca-technikou-radca/kalibracia-definicia-navod-a-vaznam>

Kapacitné snímače M18, M30. ©2021. Dostupné na internete: <https://www.oemautomatic.sk/produkty/elektricke-stroje/snimace/>

KELENTEV, E. ET AL. Numerical analysis of the stress-strain state of a rope strand with linear contact under tension and torsion loading conditions. In Advances in Science and Technology Research Journal. Vol. 11, iss. 2 (2017), pp. 231-239. DOI: 10.12913/22998624/71181

Kontrolné prípravky. ©2022. Dostupné na internete: <https://mesing.cz/?page=kontrolni-pripravky&lang=sk>

KOVÁČ, J., LEŠKOVÁ, A. 2000. Modernizácia výrobných základne na báze využívajúce stavebníckych systémov. Košice. Dostupné na internete: <https://www.sjf.tuke.sk/transferinovaci/pages/archiv/transfer/2-2000/pdf/81-84.pdf>

KRIVOULYA, G., ET AL. Expert diagnosis of computer systems using neuro-fuzzy knowledge base. Proceedings of 2016 IEEE East-West design & test symposium, 2016.

KURIC, I., ET AL. Analytical intelligence tools for multicriterial diagnostics of CNC machines. ADVANCES IN SCIENCE AND TECHNOLOGY-RESEARCH JOURNAL, Volume 10, Issue 32, Page 59-64. DOI10.12913/22998624/65105

LI, J., ET AL. A Remote Monitoring and Diagnosis Method Based on Four-Layer IoT Frame Perception. IEEE Access, 2019, Vol. 7, pp. 144324-144338.

LOPEZ ALCALA, J. M., ET AL. User-Printable Three-Rate Rain Gauge Calibration System. Frontiers in Earth Science, 2019, Vol.7.

ĽUBIŠČÁK, J., ET AL. 1991. Přípravky, obrábacie a tvárniace nástroje, Bratislava: Alfa. ISBN 8005007892

Magnetické okružle skľučovadlo. ©2021 [cit. 2021-12-08]. Dostupné na internete: <https://www.toolzone.sk/produkt/magneticke-okruhle-sklucovadlo-permanentne-magnety-rnf-08-flaig-50785.htm>

MASLAKOVA, K., ET AL. Applications of the strain gauge for determination of residual stresses using Ring-core method. Procedia Engineering, 2012, Vol. 48, pp. 396-400.

MODELLING AND SIMULATIONS (MMS 2018), Vol. 254, DOI10.1051/mateconf/201925401018.

MONKA, P., PAULIKOVÁ, A. 2007. Top trendy v obrábání: IV část- Upínanie, prípravky a meradlá. Žilina: MEDIA/ST, s.r.o., 2007 168 s. ISBN 80-968954-2-7.

MULLER, R., ET AL. Data or interpretations: Impacts of information presentation strategies on diagnostic processes. Human Factors and Ergonomics In Manufacturing, 2020, Vol. 4, No. 4., pp. 266-281.

NÁPRSTKOVÁ, N., HRICOVÁ, J. 2012. Přípravky a nástroje: programování výrobních strojů. 1. vyd. Ústí nad Labem: Univerzita J.E. Purkyně v Ústí nad Labem. ISBN 978-80-7414-500-1.

NIKITIN, Y., ET AL. Logical–Linguistic Model of Diagnostics of Electric Drives with Sensors Support. Sensors, 2020, Vol. 20, No. 16., pp. 1-19.

NOVOTNÝ, K., ZEMČÍK, O. 2002. Nástroje a přípravky, Dostupné na internete: http://ust.fme.vutbr.cz/tvareni/img/opory/fpn_pripravky_a_nastroje_novotny_zemcik.pdf

PILC, J., et al. 1990. Přípravky a nástroje. Návod na cvicenia. Praha: Nakladatelství dopravy a spojů. ISBN 80-7100-014-0

PILC, J., PODKONICKÝ, M. 1991. Přípravky a nástroje. Žilina: Vysoká škola dopravy a spojov v Žiline, 1991, 361 s. ISBN 80-7100-03-4.

PLA vs ABS vs Nylon, ©2022. Dostupné na internete: <https://markforged.com/resources/blog/pla-abs-nylon>

Poháňané upínače. ©2021. Dostupné na internete: <https://www.trigon.sk/produkty/nastroje/nastrojove-systemy/pohanane-upinace/>

POLÁČEK, T. 3D printing of a functional pistol sample, Bachelor thesis, Brno University Of Technology

Použitie prípravkov v automobilovej výrobe. Transfer inovácií 42/2020. Dostupné na internete: <https://www.sjf.tuke.sk/transferinovaci/pages/archiv/transfer/42-2020/pdf/036-039.pdf>

Přípravky pre výrobu automobilov. ©2021. Dostupné na internete: <https://www.slaviaps.eu/24766-pripravky-pre-vyrobu-automobilov>

Převodníky a snímače tlaku. ©2020. Dostupné na internete: <https://www.jakar.cz/advisor/prevodnik-a-snimac-tlaku>

Rozdelenie Snímačov. 2013, Košice. Katedra leteckej technickej prípravy (KLTP) Technickej univerzity v Košiciach. Dostupné na internete: <http://www.senzorika.leteckafakulta.sk>

ŘASA, J., HANEK, V., KAFKA, J. 2003. Strojírenská technologie 4. : Návrhy nástrojů, přípravků a měřidel. Zásady montáže. 1.vyd. Praha : SCIENTIA. 505 s. ISBN 80-7183-284-7

Siemens Digital Industries Software. Products NX [online]. [cit. 2023-12-14]. Dostupné na internete: <https://plm.sw.siemens.com/en-US/nx/>

SRAVANI, V., et al. 2021. An improved capacitance pressure sensor with a novel electrode design, Sensors and Actuators Physical, Volume 332. [cit. 2021-11-19], ISSN 0924-4247. Dostupné na internete: <https://www.sciencedirect.com/science/article/>

Stavebnicové upínací přípravky. ©2021 [cit. 2021-12-08]. Dostupné na internete: <http://www.galatech.cz/produkty/>

Stavebnicový systém – Hliníkové konštrukčné profily. ©2022 [cit. 2022-01-24]. Dostupné na internete: <https://www.marek.eu/sk/hlinikove-profil/>

STEPANOV, P., NIKITIN, Y. Diagnostics of Mechatronic Systems on the Basis of Neural Networks with High-Performance Data Collection. MECHATRONICS: RECENT TECHNOLOGICAL AND SCIENTIFIC ADVANCES Page 433-440, DOI10.1007/978-3-319-02294-9_55

Strojár Inovátor. ©2021 [cit. 2021-11-19]. Dostupné na internete: <http://www.strojar-inovator.sk/sutaz-2015/79-2-rocnik-2015/89-projekt-1-lisovacia-stanica>

Systémy hliníkových profilov. ©2022 [cit. 2022-01-05]. Dostupné na internete: <https://www.haberkorn.cz/sk/systemy-hlinikovych-profilov/>

Tenzometrické snímače sily. ©2022 [cit. 2022-01-18]. Dostupné na internete: <http://www.techpark.sk/technika-102009/tenzometricke-snimace-sily.html>

TLACH, V., ET AL. Determination of the Industrial Robot Positioning Performance. 13th International Conference on Modern Technologies in Manufacturing (MTeM-AMaTUC), Cluj Napoca, Romania, MATEC, 2017, Vol. 137.

Valčekový dopravník. ©2022 [cit. 2022-01-05]. Dostupné na internete: <https://www.b2bpartner.sk/valcekovy-dopravnik-plastove-valceky-1700-4240-mm/>

VARTOSIS, A., SIMON, I. ©2022. What is FDM (Fused Deposition Modeling) 3D printing? Explained by Hubs. [cit. 2022-27-04]. Dostupné na internete: <https://www.hubs.com/knowledge-base/what-is-fdm-3d-printing/>

VASKO, M., ET AL. Impact Toughness of FRTP Composites Produced by 3D Printing. Materials, 2020. Vol. 13, Issue 24, DOI10.3390/ma13245654

Výškovo nastaviteľný otočný zvärací stôl. ©2021 [cit. 2021-12-08]. Dostupné na internete: <https://formica.sk/produkt/vyskovo-nastavitelny-otocny-stol/>

What are different types of sensors, classification, their applications?. Deepblue. ©2022 [cit. 2021-11-20]. Dostupné na internete: <https://www.deepbluembedded.com>

WILSON, S. 2004. Sensor technology handbook. Elsevier, Oxford. ISBN: 0-7506-7729-5

YAN, L., ET AL. Shock tube-based calibration installation for dynamic pressure transducers and performance testing. Journal of Engineering - JOE, 2019, Vol. 2019, Issue 23, pp. 8577-8582.

Základné konštrukčné rady hliníkových profilov. ©2021 [cit. 2021-11-20]. Dostupné na internete: <https://www.haberkorn.cz/sk/material-a-prislusenstvo/>

ZELNÍK, R., et al., Research and diagnostics for the laboratory of pressure resistant sensors, MM Science Journal, Volume 2021. DOI: 10.17973/MMSJ.2021_10_2021041

Zveráky ručné pod vŕtačky. ©2022 [cit. 2021-12-08]. Dostupné na internete: <https://panas.sk/chemia/produkt/zveraky-rucne-pod-vtacky>

ZOZNAM PUBLIKAČNEJ ČINNOSTI**V2 Vedecký výstup publikačnej činnosti ako časť editovanej knihy alebo zborníka**

- V2_01 ZELNÍK, Roman. Diagnostics of actuators in automated and technical systems. In *Technological Forum 2023 : 14th International technical conference*, 27. - 29.06. 2023, Hluboký Dvůr, Czech Republic. 1. vyd. Jaroměř : Ing. Jan Kudláček, 2023, S. 66-72. ISBN 978-80-87583-40-1. [Vnútrofakultná kategória: M].
Typ výstupu: príspevok z podujatia; Výstup: zahraničný; Kategória publikácie do 2021: AFC
- V2_02 SITA, Marek - ZELNÍK, Roman - BOŽEK, Pavol. Rozdelenie prípravkov z hľadiska rozdelenia a významu. In *Mechatronika, Výrobná technika, Digitálny podnik: najnovšie úspechy, výzvy, trendy : Medzinárodná vedecká konferencia (online)*, Trnava 14.4.2021. 1. vyd. Ostrava : Ámos, 2021, S. 178-183. ISBN 978-80-87691-36-6. [Vnútrofakultná kategória: M*B].
Typ výstupu: príspevok z podujatia; Výstup: domáci; Kategória publikácie do 2021: AFD
- V2_03 ŠALÁT, Jozef - ZELNÍK, Roman - BOŽEK, Pavol. Návrh a vývoj diagnostického zariadenia kalibrácie riadené počítačom. In *Mechatronika, Výrobná technika, Digitálny podnik: najnovšie úspechy, výzvy, trendy : Medzinárodná vedecká konferencia (online)*, Trnava 14.4.2021. 1. vyd. Ostrava : Ámos, 2021, S. 184-191. ISBN 978-80-87691-36-6. [Vnútrofakultná kategória: M*B].
Typ výstupu: príspevok z podujatia; Výstup: domáci; Kategória publikácie do 2021: AFD
- V2_04 ZELNÍK, Roman - BOŽEK, Pavol. Diagnostika a korigovanie výstupných parametrov tlakových rezistívnych senzorov. In *Mechatronika, Výrobná technika, Digitálny podnik: najnovšie úspechy, výzvy, trendy : Medzinárodná vedecká konferencia (online)*, Trnava 14.4.2021. 1. vyd. Ostrava : Ámos, 2021, S. 192-198. ISBN 978-80-87691-36-6. [Vnútrofakultná kategória: M*B].
Typ výstupu: príspevok z podujatia; Výstup: domáci; Kategória publikácie do 2021: AFD

V3 Vedecký výstup publikačnej činnosti z časopisu

- V3_01 ZELNÍK, Roman - BOŽEK, Pavol - KAMENSZKÁ, Adriana. Research and Diagnostics Laboratory of Pressure Resistive Sensors for Composites. In *Vestnik Iževskogo gosudarstvennogo techničeskogo universiteta*. Vol. 24, iss. 4 (2021), s. 11-16. ISSN 1813-7903. V databáze: DOI: 10.22213 / 2413-1172-2021-4-11-16. [Vnútrofakultná kategória: M].
Typ výstupu: článok; Výstup: zahraničný; Kategória publikácie do 2021: ADE
- V3_02 BOŽEK, Pavol - ZELNÍK, Roman. Diagnostics of an electric motor based on a state-space model. In *MM Science Journal*. October (2022), s. 5870-5875. ISSN 1803-1269(P) (2022: 0.700 - IF, 0.239 - SJR, Q3 - SJR Best Q). V databáze: DOI: 10.17973/MMSJ.2022_10_2022085 ; SCOPUS: 2-s2.0-85139127453 ; WOS: 000859786600001. [Vnútrofakultná kategória: M].
Typ výstupu: článok; Výstup: zahraničný; Kategória publikácie do 2021: ADM
- V3_03 ZELNÍK, Roman - KAMENSZKÁ, Adriana - BOŽEK, Pavol. Research and diagnostics for the laboratory of pressure resistant sensors. In *MM Science Journal*. 2021, October (2021), s.4853-4856. ISSN 1803-1269(P) (2021: 0.235 - SJR, Q3 - SJR Best Q). V databáze: DOI: 10.17973/MMSJ.2021_10_2021041 ; WOS: 000708285400022 ; SCOPUS: 2-s2.0-85120703505. [Vnútrofakultná kategória: M].
Typ výstupu: článok; Výstup: zahraničný; Kategória publikácie do 2021: ADM

P1 Pedagogický výstup publikačnej činnosti ako celok

- P1_01 KOŠTÁL, Peter - DELGADO SOBRINO, Daynier Rolando - SÁGOVÁ, Zuzana - MATÚŠOVÁ, Miriam - ZELNÍK, Roman. *Bezpečnosť prevádzkovania a údržba výrobných systémov*. 1. vyd. Jaroměř Ing. Jan Kudláček 2024. 258 s. ISBN 978-80-87583-45-6. [Vnútrofakultná kategória: M].
Typ výstupu: učebnica pre vysoké školy; Výstup: zahraničný; Kategória publikácie do 2021: ACA

O3 Odborný výstup publikačnej činnosti z časopisu

O3_01 ZELNÍK, Roman - BOŽEK, Pavol. Diagnostika a korigovanie výstupných parametrov tlakových rezistívnych senzorov. In *Strojárstvo - Strojírenství*. Roč. 25, č. 1-2 (2021), s. 1-5. ISSN 1335-2938. [Vnútrofakultná kategória: M*D].
 Typ výstupu: článok; Výstup: domáci; Kategória publikácie do 2021: BDF

Štatistika: kategória publikačnej činnosti od 2022

V2	Vedecký výstup publikačnej činnosti ako časť editovanej knihy alebo zborníka	4
V3	Vedecký výstup publikačnej činnosti z časopisu	3
P1	Pedagogický výstup publikačnej činnosti ako celok	1
O3	Odborný výstup publikačnej činnosti z časopisu	1
Súčet		9

Štatistika: kategória publikačnej činnosti do 2021

ACA	Vysokoškolské učebnice vydané v zahraničných vydavateľstvách	1
ADE	Vedecké práce v ostatných zahraničných časopisoch	1
ADM	Vedecké práce v zahraničných časopisoch registrovaných v databázach Web of Science alebo SCOPUS	2
AFC	Publikované príspevky na zahraničných vedeckých konferenciách	1
AFD	Publikované príspevky na domácich vedeckých konferenciách	3
BDF	Odborné práce v ostatných domácich časopisoch	1
Súčet		9