



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV VÝROBNÍCH STROJŮ, SYSTÉMŮ A ROBOTIKY

INSTITUTE OF PRODUCTION MACHINES, SYSTEMS AND ROBOTICS

**VÝVOJ TESTOVACÍHO PŘÍPRAVKU DÉLKOVÉHO
SNÍMAČE**

DEVELOPMENT OF THE TESTING DEVICE FOR LENGTH MEASUREMENT

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Jan Kirchner

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Ondřej Andrš, Ph.D.

BRNO 2018

Zadání diplomové práce

Ústav:	Ústav výrobních strojů, systémů a robotiky
Student:	Bc. Jan Kirchner
Studijní program:	Strojní inženýrství
Studijní obor:	Výrobní stroje, systémy a roboty
Vedoucí práce:	Ing. Ondřej Andrš, Ph.D.
Akademický rok:	2017/18

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma diplomové práce:

Vývoj testovacího přípravku délkového snímače

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Cílem práce bude provést návrh a sestavení měřicího přípravku pro testování délkového snímače. Předpokládané snímače budou využívat tenzometrického měření pro stanovení délkových rozměrů. Uvažovaný měřicí přípravek bude obsahovat nutnou senzorku pro měření elektrických i mechanických veličin. Dále bude vybaven pohonem pro zajištění automatického průběhu testování.

Cíle diplomové práce:

1. Provést rešeršní studii aktuálního problému včetně specifikace požadavků.
2. Provést návrh testovacího přípravku.
3. Implementovat navržené řešení.
4. Ověřit a otestovat implementované řešení.

Seznam doporučené literatury:

HAVLÍČEK Josef, VLACH Jaroslav, VLACH Martin, VLACHOVÁ Viktorie: Začínáme s LabVIEW, BEN - technická literatura, 2008, ISBN / EAN 978-80-7300-245-9 / 9788073002459

LACKO, Ľuboslav: Mistrovství v SQL Server 2012, COMPUTER PRESS, ISBN: 978-80-251-3773-4

OXER, Jonathan. a Hugh. BLEMININGS. Practical Arduino: cool projects for open source hardware. New York, NY: Distributed by Springer-Verlag, c2009. Technology in Action Press book. ISBN 1430224770.

VODA, Zbyšek. Průvodce světem Arduina. Bučovice: Martin Stříž, 2015. ISBN 9788087106907.

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2017/18

V Brně, dne

L. S.

doc. Ing. Petr Blecha, Ph.D.
ředitel ústavu

doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.
děkan fakulty

ABSTRAKT

Práce se zabývá možností měřit polohu v malém rozsahu pomocí snímače pracujícího na principu tenzometru. Pro testovací účely byla navržena vyhodnocující jednotka obsahující analog / digitální převodník, LCD a umožňuje motoricky posouvat měřicí rovinou. Jednotka zpracovaná data ukládá na SD kartu a zároveň je zobrazuje na displej. Dále se práce zabývá testováním prototypového snímače využívajícího navařovaného tenzometru na navrženém přípravku a vyhodnocuje výsledky jednotlivých měření, kterým je měření linearity, časové stálosti a opakovatelnosti. Na základě výsledků provedených měření byla potvrzena možnost použití tohoto typu snímače pro měření délky.

ABSTRACT

Aim of this thesis is a verification of possibility to measure displacement in small range using sensor based on the principle of strain gauge. For testing purpose, an evaluating unit was designed, made and assembled. This unit contains analog/digital converter, LCD and it has an ability to move measuring plane using stepper motor. Next part of this thesis is about testing new prototype of strain gauge sensor, including evaluation of results of measuring. The performed measurements were measuring linearity, time stability and repeatability. Based on the results of the measurements, the possibility of using this type of length measuring device was confirmed for further development.

KLÍČOVÁ SLOVA

tenzometrický snímač délky, indukčnostní snímač délky, měření délky arduino UNO, HX711, řízení krokového motoru, vyhodnocování tenzometru, Mesing

KEYWORDS

Strain gauge based length sensor, inductance length transducer, length measuring, arduino UNO, HX711, stepper motor control, tensometer evaluation, Mesing

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

KIRCHNER, J. Vývoj testovacího přípravku délkového snímače, Brno, Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství. 2018, 48 s., Vedoucí diplomové práce Ing. Ondřej Andrš, Ph.D.

ČESTNÉ PROHLÁŠ ENÍ

Prohlašuji, že tato práce je mým původním dílem, zpracoval jsem ji samostatně pod vedením Ing. Ondřeje Andrše, Ph.D a s použitím literatury uvedené v seznamu.

V Brně dne 24.5.2018

.....

Jan Kirchner

OBSAH

2.1	Tenzometry.....	11
2.1.1	HBM (Darmstadt, Germany).....	11
2.1.2	LCT (Xiamen, China)	14
2.1.3	Hua lan hai (Dongguan, China).....	15
2.1.4	BCM sensor technologies (Antwerpen, Belgium).....	17
2.1.5	Nanolike (Labage, France)	20
3.1	Vznik zadání.....	23
3.2	Testování nanočásticového tenzometru firmy Nanolike.....	23
3.2.1	Specifikace zadání	23
3.2.2	Provedená měření	25
3.2.3	Navržená měření.....	28
3.3	Testování navařovaného typu tenzometru.....	29
4.1	Mechanika	31
4.2	Referenční indukčnostní snímač a převodník Imeco EDK 93	33
4.3	Elektronika	34
4.3.1	Vyhodnocovací jednotka – Arduino Uno	34
4.3.2	A/D modul.....	35
4.3.3	LCD display 20x4 znaků.....	37
4.3.4	Teplotní a vlhkostní snímač DHT 22.....	38
4.3.5	Modul SD karty	38
4.3.6	Modul reálného času	39
4.3.7	Driver krokového motoru L293D.....	39
4.4	Software	40
5.1	Základní definice	50
5.1.1	Základní pojmy.....	50
5.1.2	Nejistota měření.....	51
5.1.3	Chyby měření	54
5.1.4	Odstraňování chyb měření	54
5.1.5	Přesnost měření.....	55
5.1.6	Jakost měřidla	56
5.2	Navržená metodika testů	57

5.3	Úvodní měření linearity	59
5.3.1	Měření	59
5.3.2	Vyhodnocení.....	60
5.3.3	Závěr z úvodního měření	61
5.4	Měření časové stálosti	62
5.4.1	Měření	62
5.4.2	Vyhodnocení měření	63
5.4.3	Závěr měření.....	63
5.5	Měření opakovatelnosti.....	64
5.5.1	Měření	64
5.5.2	Vyhodnocení měření.....	65
5.5.3	Závěr měření opakovatelnosti	72

1 ÚVOD

V současnosti je k dispozici celá řada snímačů umožňujících snímání polohy s dostatečnou přesností s rozsahy do 10 mm, použitelných ve strojírenství pro kontrolu kvality. Nejrozšířenější možností v tomto průmyslovém odvětví jsou indukčnostní snímače, které poskytují širokou škálu měřících zdvihů (nejčastěji snímače umožňují měřit v rozsahu $\pm 1\text{ mm}$ až $\pm 5\text{ mm}$) při opakovatelnosti běžně $0,01\text{ }\mu\text{m}$ a linearitě pohybující se kolem $0,25\%$ na $\pm 1\text{ mm}$ při 20°C . Jelikož jsou tyto snímače konstrukčně poměrně sofistikované, skládají se z poměrně velkého množství dílů a pro vyhodnocování je zapotřebí poměrně komplikovaná elektronika, je použití indukčnostních snímačů finančně poměrně nákladné, obzvláště když se ve většině případů průmyslového použití měří celá řada rozměrů pomocí odpovídajícího počtu snímačů. Snižovat výrobní cenu indukčnostních snímačů je problematické a snižování výrobních nákladů se musí zákonitě projevit na snížení kvality, které v metrologické oblasti není přípustné.

Finanční aspekt je hlavním důvodem hledání alternativního způsobu měření délky. O využití tenzometrů pro realizaci snímače délky bylo uskutečněno několik pokusů. Většina tenzometrických snímačů polohy pracuje s vloženým mechanickým převodem. Tento převod je obvykle realizován pomocí axiálně pohyblivého doteku, který má na straně v těle snímače nabroušenou šikmou plochu, o kterou se opírá samotný měřící člen. Měřící člen převádí mechanické napětí vznikající deformací měřící prvku na elektrické napětí, které je následně pomocí mikrokontroleru přepočítáno na změnu polohy. Tyto snímače pracují obvykle ve větších rozsazích a s nižšími přesnostmi, než aby je bylo možné použít pro metrologické účely v oblasti strojírenství, kdy se běžně pracuje s rozměry pod $1\text{ }\mu\text{m}$.

Iniciačním krokem pro započetí vývoje tenzometrického snímače bylo představení nového typu tenzometru, pracujícího s nově vyvinutým nanočásticovým odporovým materiálem. Tento tenzometr byl představen francouzskou firmou Nanolike v roce 2015. výrobce sliboval vysoký nominální odpor a ten znamenal vyšší citlivost. S použitím takto citlivého měřícího prvku jsme považovali za možné dosáhnout uspokojivých výsledků. Bohužel během testování se ukázalo že francouzský výrobce vlastnosti snímače značně nafoukl a výsledky byly jednoznačně negativní. Tento typ tenzometru se ukázal, díky své vysoké časové nestabilitě, jako nevhodný pro použití při konstrukci délkového snímače.

Tento neúspěch znamenal odložení vývoje na dlouhou dobu k ledu. Dalším impulzem pro pokračování vývoje bylo představení tenzometru německé produkce, který je vyroben přímo na ocelové planžetě a k měřenému místu se navažuje pomocí elektronového svazku. Navíc tento nový měřicí prvek je full bridge provedení což znamená menší citlivost na teplotní výkyvy.

Pro usnadnění práce během vývoje snímače pracujícího s tímto novým tenzometrem, vyrobeným ve špičkové německé kvalitě, bylo zapotřebí zhotovit testovací přípravek, který by umožňoval automatické provádění jednotlivých testů a ukládal by naměřená data včetně informací o parametrech okolí.

2 PŘEHLED NABÍDKY TENZOMETRŮ

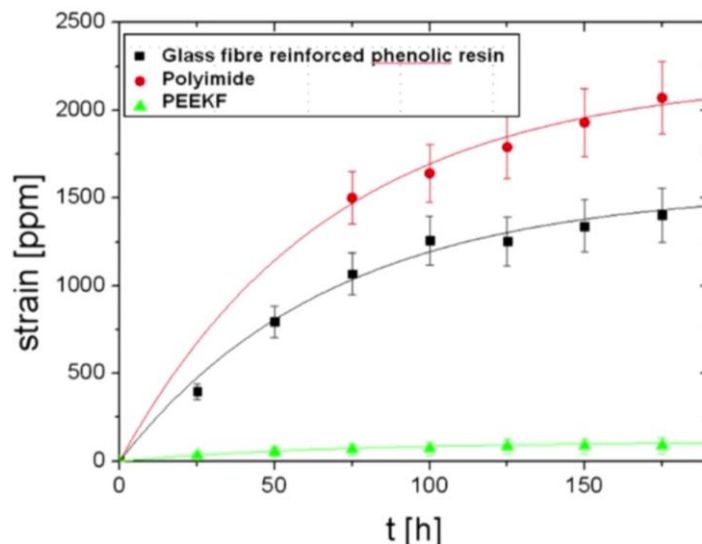
2.1 Tenzometry

Tenzometr je pasivní elektrotechnický prvek určený pro snímání mechanického napětí na povrchu testovaného dílu. Dnes nejrozšířenějším typem tenzometrů jsou polovodičové tenzometry využívané například pro konstrukci akcelometrů, které jsou dnes v každém telefonu či sportovních hodinkách. Další variantou jsou optické nebo nanočásticové tenzometry, u kterých se využívá částic na bázi zlata nebo uhlíku.

Nejstarším typem jsou tenzometry fóliové fungující na principu Hookova zákona, který popisuje jev, jehož následkem roste u napínaného vodiče elektrický odpor v důsledku zmenšení průřezu vodiče díky zákonu o zachování objemu. Tenzometry tohoto typu tvořené vodičem, který je pro výraznější změnu odporu, vyroben do tvaru mřížky a cílem je udělat mřížku co nejjemnější, aby zahrnovala co největší délku zatěžovaného vodiče. Tento vodič je dnes vyráběn pomocí napařování odporového materiálu na podklad, který je tvořen nejčastěji polyamidem či různými typy pryskyřice.

2.1.1 HBM (Darmstadt, Germany)

Firma HBM patří ke světové špičce, co se týče produkce tenzometrů. Běžně pracují s poměrně běžnými materiály jako je Constantan a polyamid či různé fenolové pryskyřice. Jejich nejnovější tenzometry využívají jejich vlastní speciální nikl-chromové slitiny a jako podkladový materiál začínají používat PEEKF, který je mnohem odolnější než, například nejběžnější polyamid, a také velmi výrazně méně váže vlhkost což zaručuje minimální drift nulového bodu následkem změny vlhkosti v okolním prostředí. Zmíněnou závislost znázorňuje níže uvedený graf.



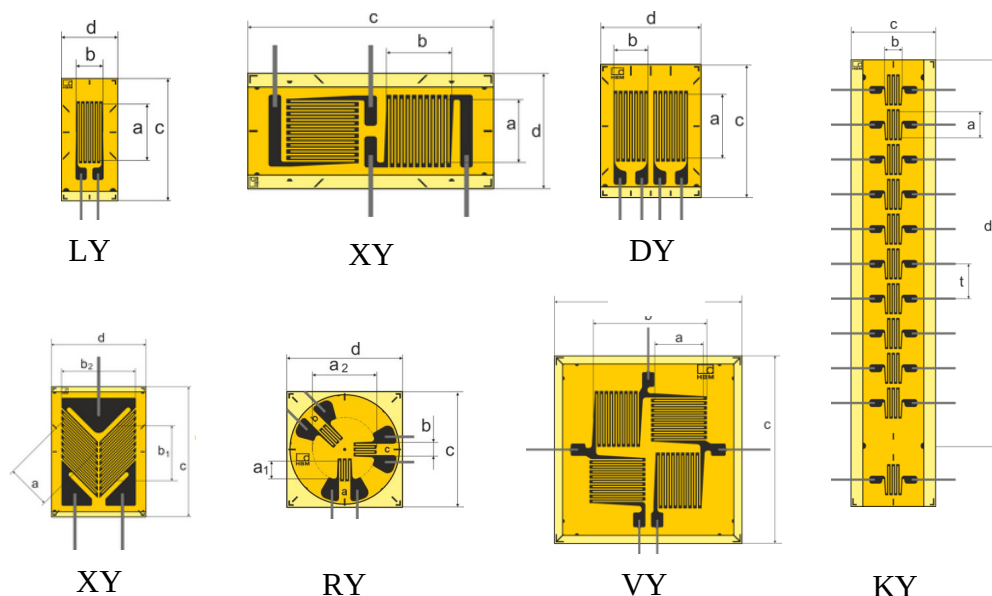
Obr. 1) Vliv vlhkosti na polohu nulového bodu[2]

Série Y

Produktová řada zaměřená především na velkou škálu různých uspořádání měřících mřížek. Dostupné jsou v odporových variantách 120 Ω , 350 Ω , 700 Ω a 1 k Ω . Materiálem mřížky je Constantan a podkladem je polyamid. Constantan je slitina mědi (55%) a niklu (45%) význačná nízkou citlivostí změny odporu na změně teploty a podobně jako Manganin (84 % Cu, 12 % Mn, 4 % Ni) oba vyvinuty Edvardem Westonem (Constantan 1887 a Manganin 1892).[2]

Typy dle uspořádání mřížky:

- LY – pouze jedna lineární mřížka, pro měření pouze v jednom směru
- XY – dvě lineární navzájem kolmé mřížky, pro měření ve dvou směrech
- XY2/4 – dvě lineární navzájem kolmé mřížky, pro měření ve dvou směrech 45° od osy
- DY – dvě rovnoběžné lineární mřížky
- RY – mřížky ve třech různých směrech (po 45° nebo po 120°)
- VY – čtyři mřížky zapojené jako celý wheatstoneův můstek
- KY – řetězce lineárních mřížek pro měření průběhu napětí

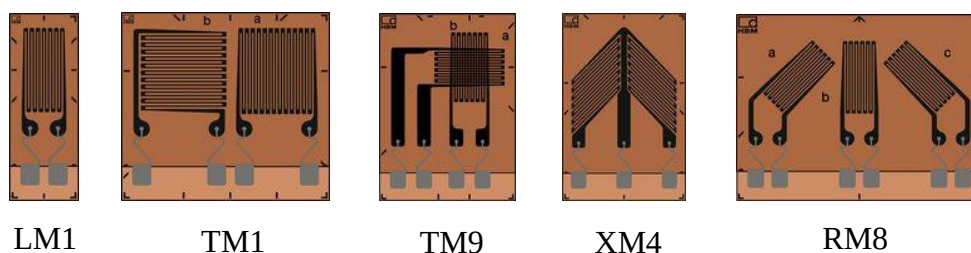


Obr. 2) Tenzometry firmy HBM – série Y [2]

Série M

Produktová řada zaměřena na velké teplotní rozmezí $-200\text{ }^{\circ}\text{C}$ až $+300\text{ }^{\circ}\text{C}$ při extrémně vysokých frekvencích zatěžování. Materiál měřicí mřížky je speciální nikl-chromová slitina a její délka je od 1,5mm do 6 mm.

Mřížka je nanesená na sklo-vláknu, které je posílené fenolovou pryskyřicí. Dostupné jsou ve dvou odporových variantách a to $350\text{ }\Omega$ a $1\text{ k}\Omega$. Životnost je 10^7 cyklů při zatěžování



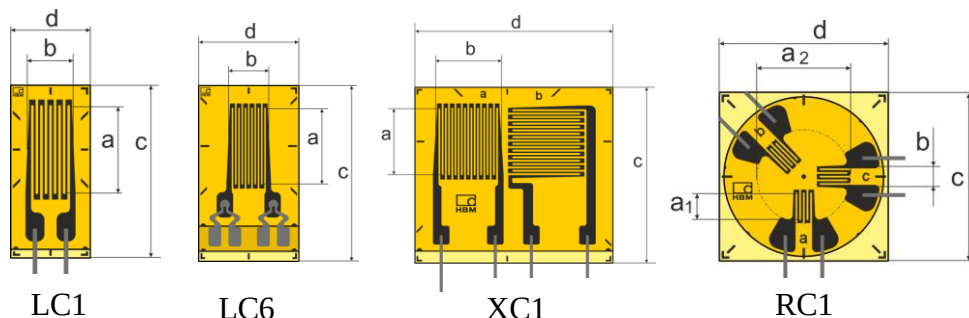
maximálně $\pm 2000\text{ }\mu\text{m/m}$. Tato řada obsahuje 36 standartních typů tenzometru. [2]

Obr. 3) Tenzometry firmy HBM – série M [2]

Série C

Produktová řada zaměřená především na měření při velmi nízkých teplotách až do $-269\text{ }^{\circ}\text{C}$. Horní teplotní hranicí je teplota $250\text{ }^{\circ}\text{C}$. Dostupné jsou ve dvou odporových variantách a to

120 Ω a 350 Ω . Materiál měřicí mřížky je speciální nikl-chromová slitina a její délka je od 1,5mm do 10mm. Mřížka je nanesená na polyamid. [2]



Obr. 4) Tenzometry firmy HBM – série C [2]

2.1.2 LCT (Xiamen, China)

Firma LCT dodává tenzometry, které využívají jako odporový materiál Constantan, a nebo folie z materiálu Evanohm. Evanohm (někdy označován jako „Karma“ [8]) je slitina Ni75Cr20Al2.5Cu2.5 se stabilním přesně daným odporem a je patentována firmou CRS Holdings (Washington, US). Jako podklad používá firma LCT materiály jako je polyamid a fenolová nebo epoxidová pryskyřice. Rozdíl mezi těmito dvěma pryskyřicemi je především v teplotní odolnosti, kde vyniká epoxidová pryskyřice zvládající dlouhodobé teplotní zatěžování a odolává silně žíravému chemickému prostředí. Fenolová pryskyřice je oproti epoxidové lépe zpracovatelná. [1][3][4]

Základní řada

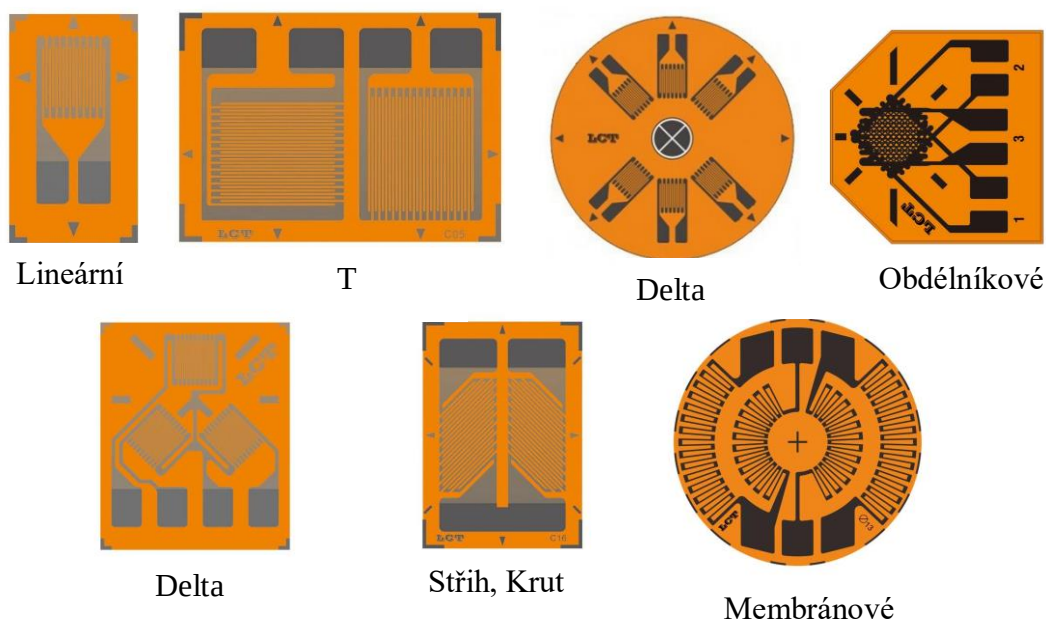
Produktová řada obsahuje tenzometry lineární z pravidla vícenásobné buď rovnoběžné, nebo s mřížkami navzájem kolnými. Materiálem mřížky je Constantan a podklad tvoří fenolová pryskyřice. Tenzometry jsou dostupné v odporových variantách 120 Ω , 350 Ω , 750 Ω a 1 k Ω . [3]

Řada pro měření zbytkového napětí

Produktová řada obsahuje tenzometry pro měření ve více směrech. Materiálem mřížky je Constantan a podklad tvoří fenolová pryskyřice. Tenzometry jsou dostupné v odporových variantách 120 Ω , 350 Ω , 650 Ω , 1 k Ω , 2.5 k Ω , 3 k Ω . [3]

Typy dle uspořádání mřížky

- Lineární uspořádání
- T – uspořádání
- Obdélníkové uspořádání
- Delta uspořádání
- Uspořádání pro stříh, krut
- Membránové uspořádání



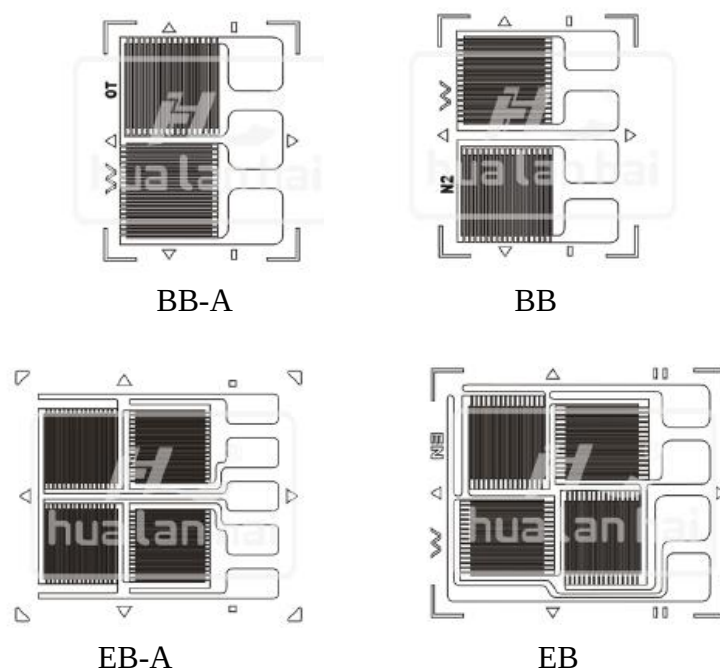
Obr. 5) Tenzometry firmy LCT [3]

2.1.3 Hua lan hai (Dongguan, China)

Celým názvem se firma jmenuje „Guangdong SouthChinaSea Electronic Measuring Technology Co., Ltd.“. Firma poskytuje podrobnější informace ke svým produktům pouze v čínštině tak pouze shrnu typové řady dodávané tímto dodavatelem. Na stránkách neuvádí ani odpor jednotlivých provedení.

BB&EB Série

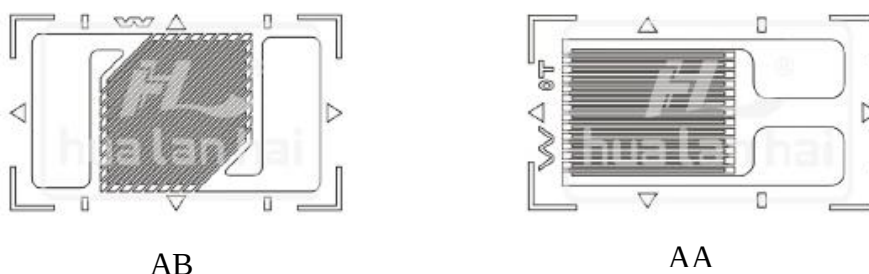
Tato produktová řada je zaměřena na lineární tenzometry a možná uspořádání jsou do T, T half bridge nebo full bridge (celý wheatstoneův můstek), který má dvě odporové vinutí ve směru zatěžování a dvě kolmé na směr zatěžování sloužící pro teplotní kompenzaci.



Obr. 6) Tenzometry firmy Hua lan hai - Série BB&EB[5]

AA&AB Série

Tato produktová řada je zaměřena na lineární tenzometry s pouze jedním odporovým vnutím. Tato série obsahuje 0° a 45° variantu.



Obr. 7) Tenzometry firmy Hua lan hai - Série AA&AB[5]

FD&FG Série

Tato produktová řada je zaměřena na tenzometry skládající se ze 2 nebo 4 odporových vinutí ve stejném směru. Toto uspořádání je vhodné pro měření průběhu napětí. Typy FB disponují dvěma mřížkami a typy FG čtyřmi mřížkami se shodnou orientací.

KA série

Tato produktová řada zahrnuje membránové typy tenzometrů. Jejich provedení je velice podobné prvnímu membránovému tenzometru na (Obr. 13).

HA série

Tato produktová řada zahrnuje tenzometry pro snímání krutu a smyku v 5 různých provedeních. Kdy každé disponuje dvěma mřížkami, které jsou pootočené o 45° k hlavnímu směru zatěžování a jsou vzájemně kolmé.

GB série

Tato produktová řada zahrnuje vícenásobné lineární tenzometry v 6-ti různých provedeních. Kdy každé disponuje dvěma rovnoběžnými mřížkami a liší se pouze jejich vzájemnou pozicí a provedením kontaktů.

2.1.4 BCM sensor technologies (Antwerpen, Belgium)

Tato firma se zabývá sensorikou v oblastech měření tlaku, hladiny, průtoku, tíhy, síly, momentu a teploty. V oblasti tenzometrů nabízí klasické foliové nebo polovodičové tenzometry. [7]

Fóliové tenzometry

Firma BCM sensor využívá pro odporovou mřížku u svých fóliových tenzometrů Constantan nebo Evanohm (karma). Tenzometry výrobce dodává v odporové řadě 350Ω - 3kΩ. Jako podkladový materiál slouží modifikovaná fenolová pryskyřice (F), modifikovanou polyamidovou pryskyřici (I), vrstvený polyetherketon (B), vylepšený vrstvený polyamid (A), vrstvený polyamid (L)(písmena v závorkách jsou značení daných podkladových materiálů dle katalogu výrobce). Rozdíly mezi zmíněnými materiály jsou především v teplotní odolnosti. [7][8][9][4]

Teplotní odolnost jednotlivých materiálů:

- F - -30 ÷ +80°C
- I - -85 ÷ +150°C
- B - -45 ÷ +150°C
- A - -195 ÷ +200°C
- L - -55 ÷ +150°C

Lineární tenzometry

Jsou primárně vyvinuty pro aplikaci na siloměrech. Tenzometry umožňují kompenzaci teploty i tečení. Tečení je pomalá spojitá deformace probíhající v čase. Deformace ε je funkcí napětí σ , času t a teploty T . [10][7]

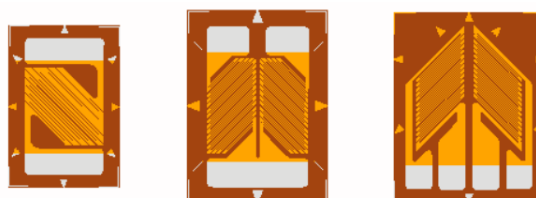
$$\varepsilon = f(\sigma, t, T)$$



Obr. 8) Lineární tenzometry firmy BMC sensor [7]

Tenzometry pro měření smyku

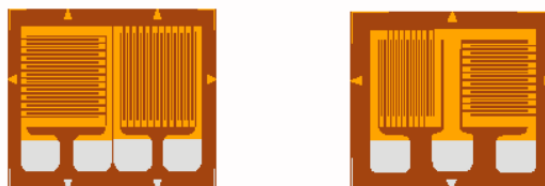
Jsou primárně vyvinuty pro použití na snímačích momentu a síly. Tenzometry umožňují kompenzaci teploty i tečení.[7]



Obr. 9) Tenzometry pro měření smyku firmy BMC sensor [7]

90° tenzometry (uspořádání T)

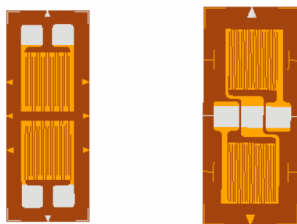
Jsou primárně vyvinuty pro použití na snímačích momentu a síly. Tenzometry umožňují kompenzaci teploty i tečení. Pro tuto kompenzaci se využívá mřížka, která je kolmá ke směru zatěžování.[7]



Obr. 10) 90° typ firmy BMC sensor [7]

Polomůstkové tenzometry

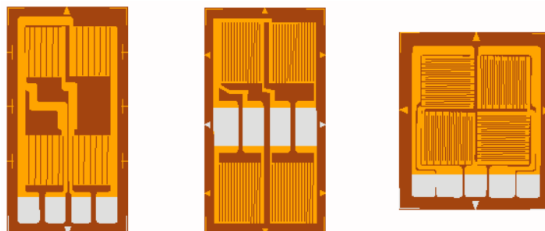
Jsou primárně vyvinuty pro použití na precizních snímačích síly. Tenzometry umožňují kompenzaci teploty i tečení. Používají se v případech, kde má deformační člen omezenou délku.[7]



Obr. 11) Polomůstkové tenzometry firmy BMC sensor [7]

Celomůstkové tenzometry

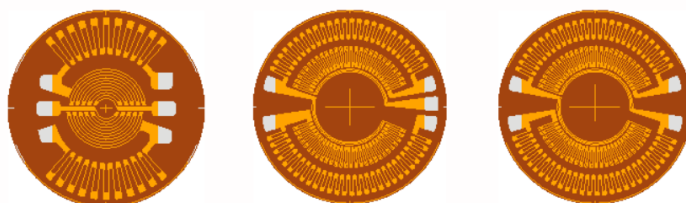
Jsou primárně vyvinuty pro použití na precizních snímačích síly. Tenzometry umožňují kompenzaci teploty i tečení. Oproti polo-můstkovému provedení mají dvojnásobnou citlivost, jelikož dochází díky vhodnému zapojení na obou stranách Wheatsonova můstku k opačnému úbytku napětí. [7]



Obr. 12) Celo-můstkové tenzometry firmy BMC sensor [7]

Membránové tenzometry série KA

Jsou primárně vyvinuty pro použití na precizních snímačích tlaku. Tenzometry umožňují kompenzaci teploty i tečení. [7]



Obr. 13) Membránové tenzometry série KA firmy BMC sensor [7]

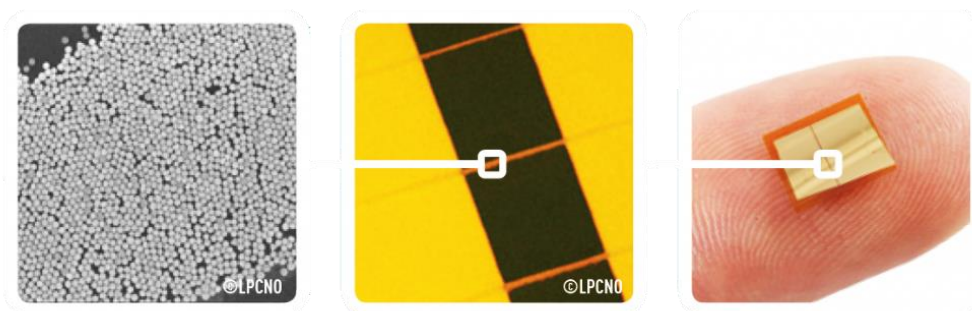
Polovodičové tenzometry

Jsou založeny na piezorezistivním jevu, v jehož důsledku použitý polovodič (křemík, germanium) mění svůj odpor v závislosti na mechanickém napětí na kterém je zatěžován. Jejich význačnou vlastností je mnohonásobně vyšší deformační citlivost (až 60x). Ovšem nevýhodou

je vyšší citlivost na teplotu a citlivost na světlo. Matriály těchto tenzometrů jsou poměrně snadno modifikovatelné pomocí příměsí v daném monokrystalu. Jejich nejširší pole uplatnění je v oblastech, kde je zapotřebí měřit přímo elektrickou veličinu (akcelerometry, barometry, snímače síly...) Firma HBM produkuje polovodičové tenzometry v délkách $1.3 \div 5 \text{ mm}$ o nominálních odporech $15 \div 1000 \Omega$ a mohou pracovat v prostředí $-70 \div +160 \text{ }^{\circ}\text{C}$ [11][12][13]

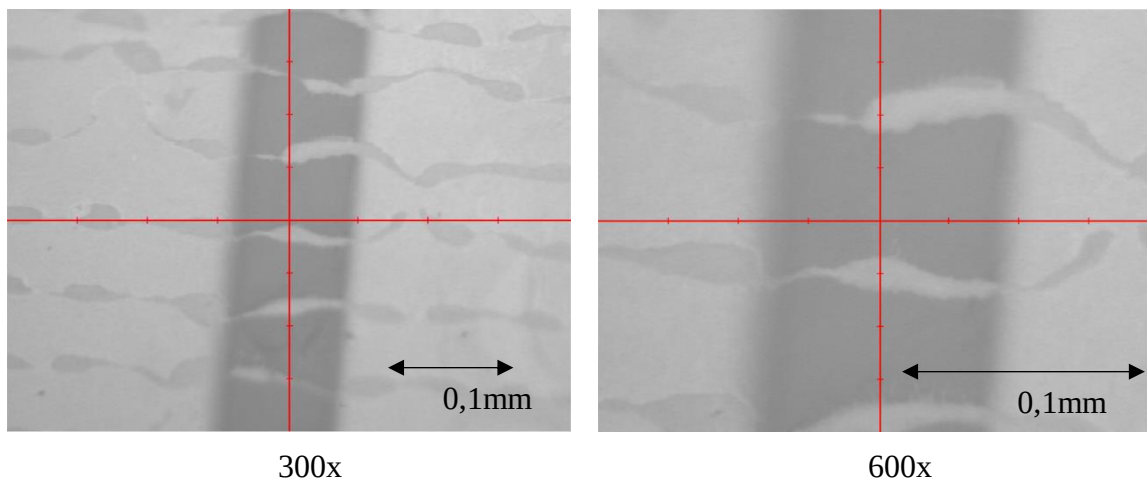
2.1.5 Nanolike (Labage, France)

Firma Nanolike založená jako startup přišla s řešením tenzometru, který využívá jako rezistivní vrstvu nanočástice nanesené v řádcích ve směru zatěžování. Tato technologie je poměrně mladá, a tudíž ještě není zcela vyladěná, to se odráželo na výsledcích mé práce s těmito tenzometry. V současnosti se lze o nanočásticových tenzometrech na stránkách dočíst jen okrajově a odkaz směřující na podrobnější informace ohledně zmíněného produktu je nefunkční.



Obr. 14) Znáznornění technologie nanočásticových tenzometrů [14]

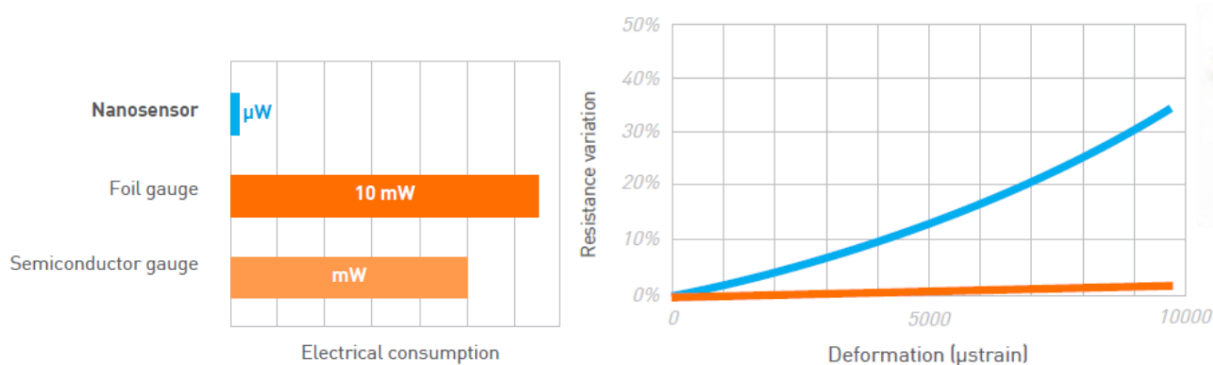
Tenzometr samotný tvoří polyamidový podklad, na němž jsou nanesené zlaté elektrody, které mezi sebou mají zhruba $0,1 \text{ mm}$ mezeru. V oblasti této mezery dochází k zatěžování řad nanočástic, které dle výrobce mají mít poměrně přesnou lineární strukturu (Obr. 14) uprostřed. Při zkoumání pod optickým mikroskopem jsem se přesvědčil, že jde pouze o klamnou informaci. Ve skutečnosti jsou částice nanesený v rozložení, které sice připomíná lineární strukturu, ale nanesení je dost náhodné. (Obr. 15).



Obr. 15) Nanovlákna tenzometru (300x a 600x zoom)

Firma Nanolike dodává tenzometry ve dvou odporových variantách, kterými jsou $200\text{k}\Omega$ a $1\text{M}\Omega$. Vysoké hodnoty nominálního odporu jsou jejich hlavní předností (vztaženo na poměry běžných fóliových tenzometrů, které se pohybují v řádu stovek Ω). Dle výrobního protokolu od výrobce se mnou testovanou $1\text{M}\Omega$ variantu dařilo vyrobít o nominálním odporu pouze $750\text{k}\Omega$ pro rozměr $5 \times 10\text{mm}$. [14]

Dle výrobce má být hlavní výhodou tohoto produktu několika násobně vyšší deformační citlivost a velmi nízká spotřeba v řádu μW (Obr. 16). Podrobnější hodnocení vlastností tohoto nového typu tenzometru budou probrány později, bude také ve zkratce shrnuto na co se v této práci navazuje a co bylo cílem a výstupem z mé bakalářské práce, během které jsem spolupracoval s firmou Nanolike.



Obr. 16) Poměr mezi spotřebou a citlivostí různých typů tenzometrů [14]

Další výrobci

Jelikož se další dohledání výrobci, už se svými produkty nijak více neliší, od již zmíněných produktů budou zmíněny jen velmi stručně.

- Cedrat Technologies (Meylan, France) – pouze 350 Ω foliové tenzometry
- Kyowa electronic (Tokio, Japan) – poměrně rozsáhlá nabídka
- Celmi S.r.l (Buccinasco, Italy) – cca 35 provedení, katalog včetně teorie

3 SPECIFIKACE POŽADAVKŮ

3.1 Vznik zadání

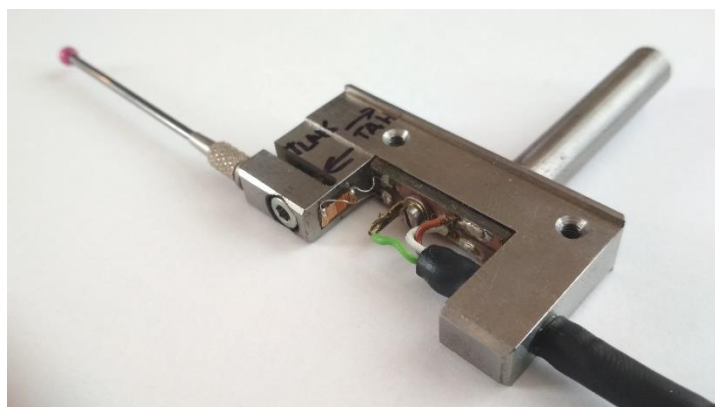
V roce 2015 firma Mesing navázala kontakt s firmou Nanolike a zakoupila pár vzorků z vývoje nanočásticových tenzometrů. Během roku jsem byl osloven firmou Mesing zda bych se nechtěl věnovat vývoji délkového snímače fungujícího na principu zmíněného tenzometru. Pro tuto iniciativu bylo několik důvodů, kdy hlavním důvodem bylo výrobcem inzerované velmi lineární chování tohoto nanočásticového tenzometru. Dalším důvodem byl velmi vysoký nominální odpor, který sliboval poměrně malou spotřebu v důsledku malého proudu a vysokou citlivost prvku.

3.2 Testování nanočásticového tenzometru firmy Nanolike

Této diplomové práci předcházely testy, které byly cílem mé bakalářské práce. Úkolem bylo potvrdit či vyvrátit možnost použití tenzometru firmy Nanolike využívajícím nanočástice, pro konstrukci mechanicko-elektrického převodníku, kde na vstupu bylo posunutí a na výstupu elektrické napětí (odchylkoměr).

3.2.1 Specifikace zadání

Na základě informací získaných z materiálů od výrobce byl budoucí vývoj tenzometrického snímače délky považovaný za smysluplný. Pro ověření možnosti snímání délky tímto způsobem bylo zapotřebí provést řadu testů jejichž vznik a průběh je popsán níže.



Obr. 17) Zkušební snímač pro testování nanočásticového tenzometru

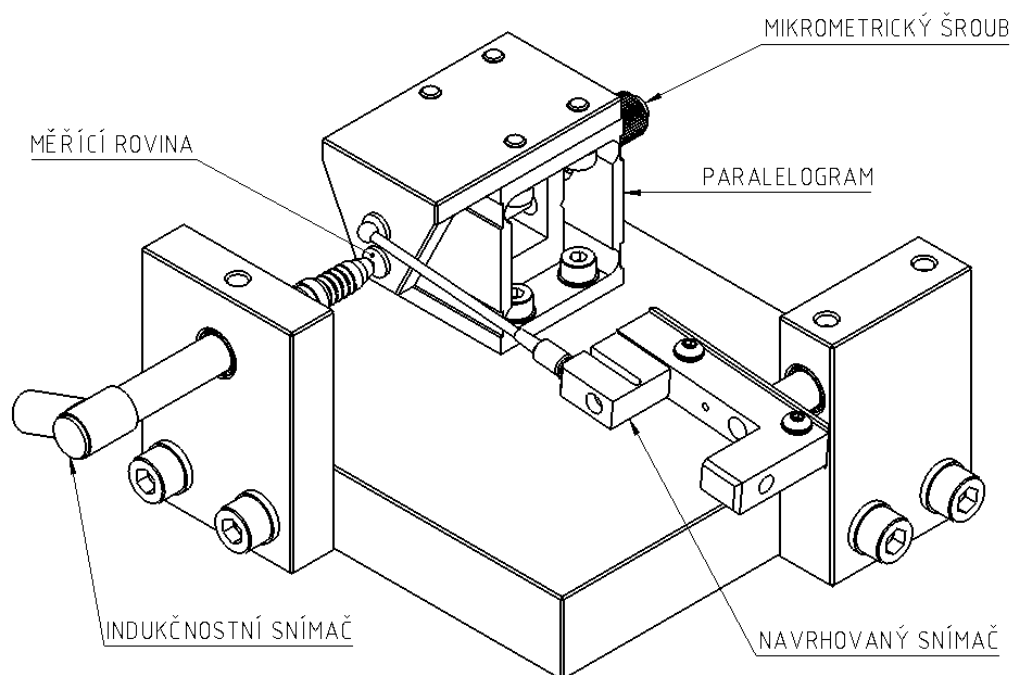
Pro toto měření byl navrhnout testovací snímač, na který byl nalepen testovaný tenzometr. Pro lepení bylo, na doporučení firmy HBM, použito kyanoakrylátové lepidlo značky Loctite.

Snímač byl osazen 57 mm dlouhým dotekem zakončeným rubínovou kuličkou o průměru 4 mm, malým tištěným spojem pro připojení výstupního stíněného tří-žilového kabelu, dvěma dorazy (po jednom pro každý směr) a upínací osou o standardním rozměru 8 mm (Obr. 17). Pro čtení dat z tenzometru jsem použil 16-ti bitový A/D převodník dodávaný výrobcem přímo pro danou odporovou variantu. Výkonnou jednotkou tohoto převodníku je Arduino Nano, a umožňuje připojit až 6 tenzometrů a 2 kompenzační termistory. (Obr. 18)



Obr. 18) A/D převodník firmy Nanolike

Pro testování tohoto zkušební snímače byl zhotoven testovací přípravek (Obr. 19) disponující pohyblivou měřicí rovinou, umístěnou na paralelogramu, jako referenční snímač byl použit indukčnostní snímač firmy Mesing s převodníkem firmy Imeco, pracující na principu lineárního diferenciálního transformátoru. K referenčnímu snímači byla použita vyhodnocovací jednotka EDK 93. Tato sestava je schopná měřit s přesností 1 μm v rozsahu 3 mm.



Obr. 19) Přípravek pro testování zkušebního snímače

3.2.2 Provedená měření

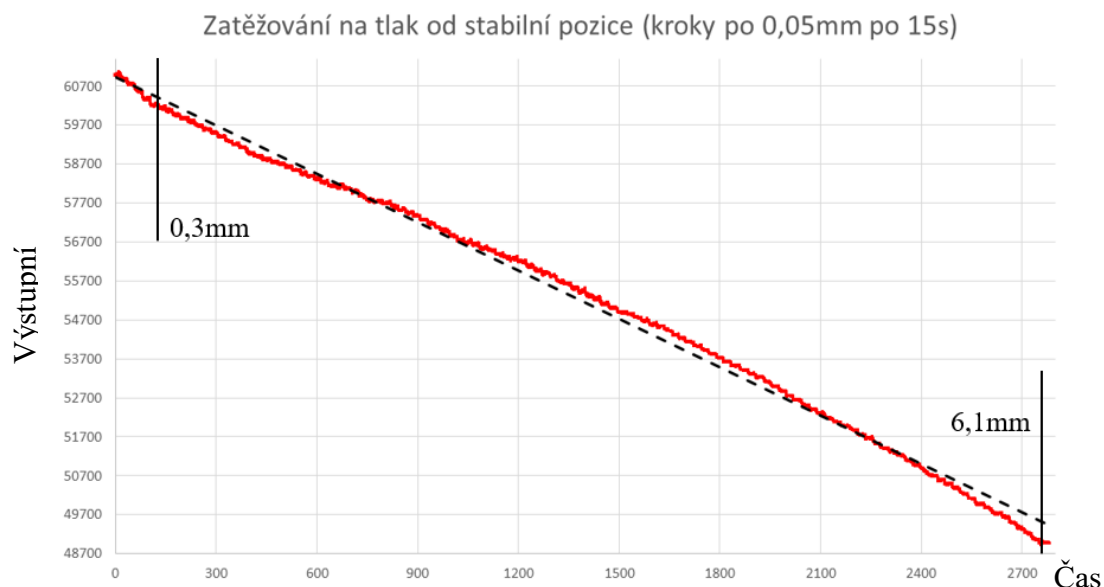
První měření bylo měření linearity z důvodu zjištění, v jakém deformačním rozsahu lze pracovat s lineárním chováním tenzometru. Vstupním předpokladem pro toto měření byl fakt, že běžné fóliové tenzometry vykazují nejcitlivější chování při zatěžování v tahu, proto byl první smysl zatěžování zvolen tak aby nalepený tenzometr byl zatěžovaný tahem. Vyhodnocována byla výstupní hodnota [mV/V] v závislosti na poloze (Obr. 20). Měření bylo provedeno po krocích 50 μm . V každém bodě byla hodnota zaznamenávána 30 vteřin.



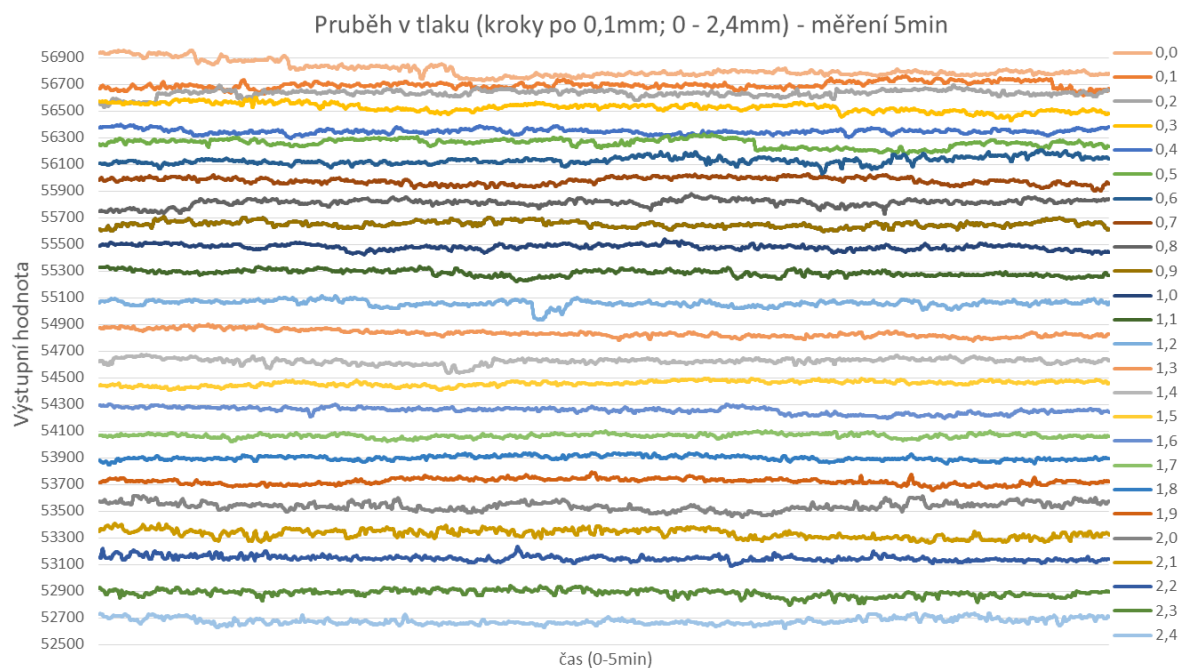
Obr. 20) Závislost výstupní hodnoty na poloze (tah)

Výsledky byly v rozporu s předpokladem lineárního chování a lineární chování se projevilo jenom pouze v krátkém prostoru mezi odchylkou $0,4 \div 0,95\text{mm}$. Zbytek testovaného rozsahu byl pro jakékoliv další testování zcela nepoužitelný.

Druhé v pořadí bylo měření v druhém smyslu, na tlak. Toto měření probíhalo také po krocích $50\text{ }\mu\text{m}$ pouze doba měření v jednotlivých bodech byla z časových důvodů zkrácena na polovinu. Výsledky tohoto měření byly překvapivě pozitivnější, jelikož byly předpokládány lepší vlastnosti v oblasti zatěžování tahem. Byla nalezena rozsáhlá oblast poměrně lineárního chování mezi posunutím $0,3 \div 6,1\text{mm}$ (Obr. 20). Pro všechny další úvahy a pokusy byla varianta zatěžování na tah zcela vyřazena.



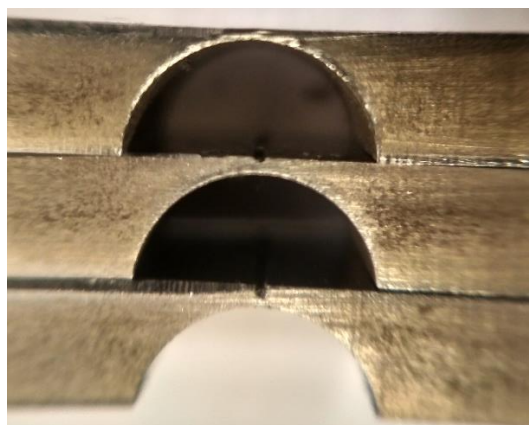
Takto lineární chování by bylo již použitelné pro další měření a dalo by se po namapování poměrně jednoduše softwarově kompenzovat. Pro postoupení do této fáze bylo důležité znát časovou stálost tenzometru. Pro sledování tohoto parametru bylo navrženo měření, během kterého byla odečítána hodnota v každém bodě po dobu 5 min a byl proměřen rozsah 0÷2,4mm po krocích 100 μm .



Výstupem z tohoto měření je graf (Obr. 22) závislosti výstupní hodnoty [mV/V] na čase. Z grafu vyplývá, že měření je časově velmi nestálé. V některých případech byla naměřena téměř shodná hodnota pro pozice vzdálené 100 μm . Na základě tohoto měření lze vyvodit, že tento typ tenzometrů je nevhodný pro aplikaci na snímačích délky, jelikož na takovéto snímače jsou kladeny vysoké požadavky na opakovatelnost měření. Měření opakovatelnosti, na základě negativních výsledků časové stálosti, nebylo provedeno a další měření se již na tomto přípravku nekonaly.

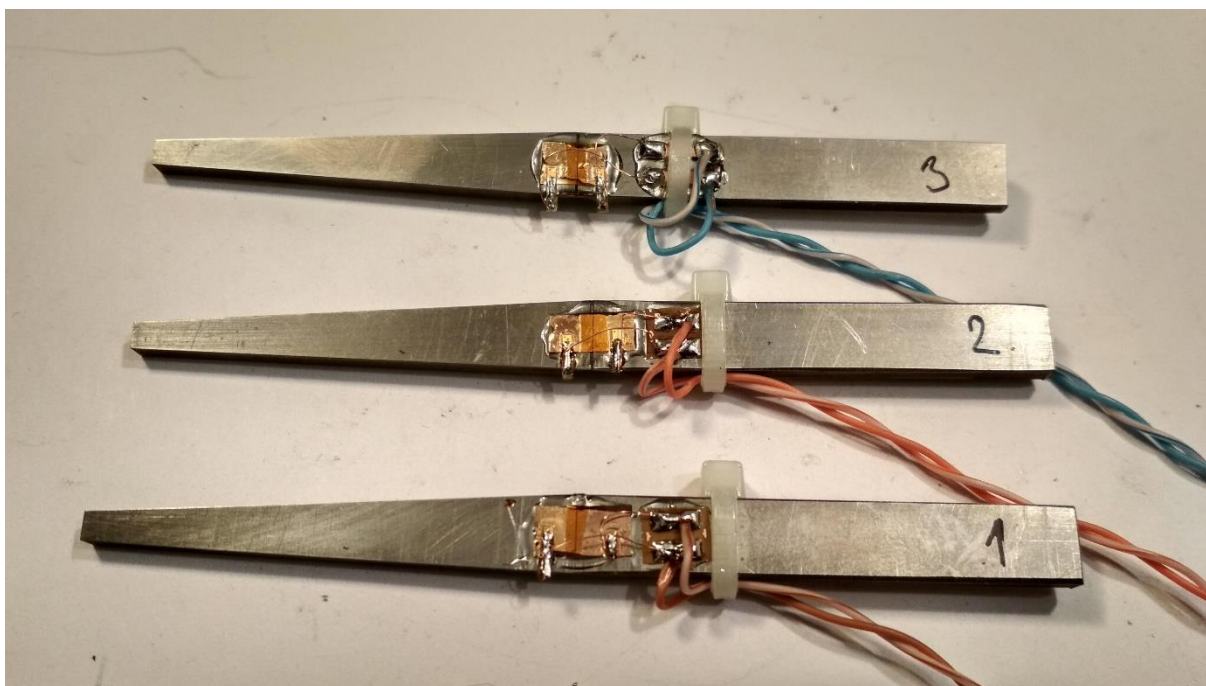
3.2.3 Navržená měření

Dále bylo ještě naplánované měření vlivu vzdálenosti středového vlákna deformovaného členu od plochy, na které je tenzometr umístěn. Motivací pro toto měření byla snaha dosáhnout vyšší citlivosti snímače při zachování měřicí síly. Pro toto měření byly navrženy přípravky (Obr. 24), které měly v ploše pro nalepení tenzometru vybroušenou drážku o hloubce 0 μm , 100 μm a 200 μm . (Obr. 23) Pro toto měření měly být také použity nanočásticové tenzometry firmy Nanolike.



Obr. 23) Testovací přípravky (detail drážky v ploše pro nalepení tenzometru)

Při prvním sestavení a zapojení této konfigurace (Obr. 24) bylo zjištěno, že nanočásticové tenzometry firmy Nanolike mají pouze omezenou životnost. Zhruba po roce od jejich zakoupení, byly tenzometry shledány jako nevodivé. Stárnutím muselo docházet k zvyšování odporu až do meze, že se již nedá naměřit ani kvalitním multimetrem značky Escort. Tímto zjištěním byla kapitola nanočásticových tenzometrů značky Nanolike zcela uzavřena, pro jejich nevhodnost v aplikacích měření délky.

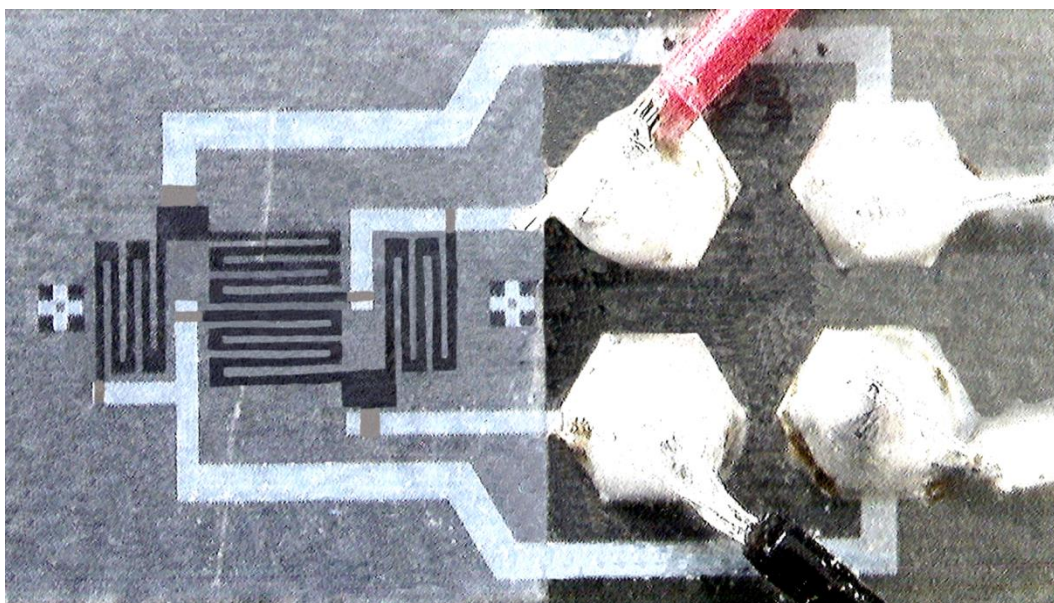


Obr. 24) Osazené testovací přípravky (pohled shora)

Potenciál uplatnit se tyto nanočásticové tenzometry mají v aplikacích sledujících krátkodobě dynamické chování mechanických veličin, kdy by jejich dlouhodobá časová nestálost nemusela mít rozhodující vliv.

3.3 Testování navařovaného typu tenzometru

V roce 2017 přišla nejmenovaná firma pocházející z Německa s řešením tenzometru (Obr. 25), který je konstrukčně zcela odlišný od doposud popisovaných fóliových tenzometrů. Tenzometr celo-můstkového provedení o rozměrech 5x9 mm je napařen přímo na nerezové planžetě, která je elektronovým svazkem navařena k snímanému prvku. Aby bylo docíleno odizolování měřící mřížky, vývodům z ní a plošek pro připájení vodičů, od kovového podkladu, je zde použita izolační vrstva z oxidu hlinitého (Al_2O_3). Na tuto vrstvu jsou napařeny vodiče z hliníku (Al) a na ně je následně nanесena vrstva obsahující odporovou mřížku. Mřížka je z odporového materiálu na bázi chromu a niklu (CrNi, 50/50), jejich vzájemný poměr je zhruba rovný jedné. Celá mřížka se skládá z čtyř menších, které jsou zapojeny do celého Wheatstoneova můstku. Jsou zde dvě měřící mřížky a dvě kompenzační ve směru kolmém na směr zatěžování. Plošky pro připájení vodičů jsou z materiálu na bázi železa a niklu (FeNi). Prostor odporové mřížky je následně překryt ještě jednou izolační vrstvou. [17]



Obr. 25) Tenzometr německé produkce

Oxid Hlinitý

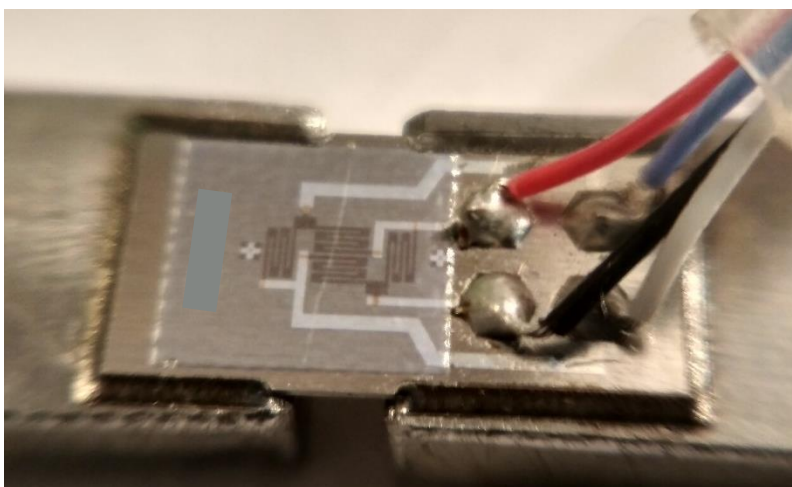
Oxid hlinitý je pro použití jako izolant na tenzometru vhodný materiál, především pro své velmi dobré izolační vlastnosti. Mezi další významné vlastnosti tohoto materiálu patří jeho poměrně vysoká mechanická pevnost (300÷630 MPa), pro toto použití důležitá vysoká chemická odolnost i odolnost proti opotřebení dále pak třeba velmi vysoká pevnost v tlaku (2000÷4000 MPa). Výchozím materiálem pro výrobu oxidu hlinitého je bauxitová ruda. Další použití Al_2O_3 je například při výrobě jader rezistorů, balistické ochrany, těsnících a regulačních disků vodovodních baterií. [16]

4 TESTOVACÍ PŘÍPRAVEK

Pro testování navařovaného tenzometru bylo zapotřebí navrhnout a zhotovit přípravek, na kterém bude možné zkoumat a ověřovat vlastnosti tohoto snímače. Přípravek musí být v první řadě schopný odečítat hodnotu z tenzometru a umožnit následné zpracování dat. Další vlastností by měla být schopnost řídit krokový motor, pro zajištění automatizovaného měření a vyloučení lidské chyby, která při pilotních měřeních prováděných manuálně nebyla zanedbatelná.

4.1 Mechanika

Výrobce nám pro testovací účely navařil tenzometr elektronovým svazkem na kovové testovací kostky o rozměru 6x10mm (Obr. 26). Kostka na straně, kde jsou vyvedeny vodiče slouží pro upnutí k přípravku a druhá kostka slouží k upnutí doteku. Dotyk umožňuje rychlé přestavení pomocí povolení svorné rotační vazby (Obr. 27).



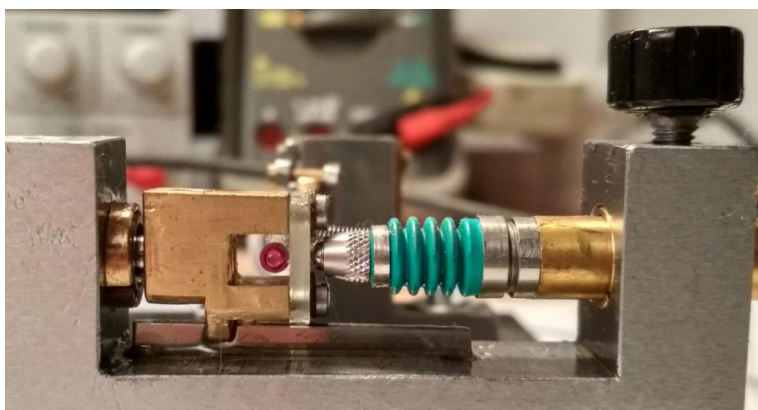
Obr. 26) Tenzometr navařený na testovacích kostkách

Toto přestavení je velice důležité, jelikož testovaný prvek je schopný měřit v širším rozsahu než umožňuje 7 mm posuv mikrometrického šroubu. Z tohoto důvodu pak měření procházející celým rozsahem jsou ručně skládána, z více měření zabírajících menší rozsah.



Obr. 27) Montáž testovaného prvku v testovacím přípravku

Dotyk je v místě středu rubínové kuličky vzdálený od zatěžovaného úseku tenzometru 60 mm. Rubínová kulička průměru 4 mm se dotýká skleněné měřicí roviny. Skleněná destička (Obr. 28) jako měřicí rovina pro testovaný i referenční snímač byla zvolena z důvodu snahy co nejvíce omezit teplotní vlivy. Tato skleněná destička je upevněna na mosazném bloku, do kterého je upevněna lineární osa. Pro zamezení rotace kolem kruhové lineární osy je přípravek vybaven ještě jedním pomocným vedením, které zamezuje tomuto pohybu. Osa je uložena ve valivém pouzdru a vůle jsou vymezeny pomocí předeprnutí tažnou pružinou.



Obr. 28) testovaný snímač; skleněná měřicí rovina; indukčnostní snímač

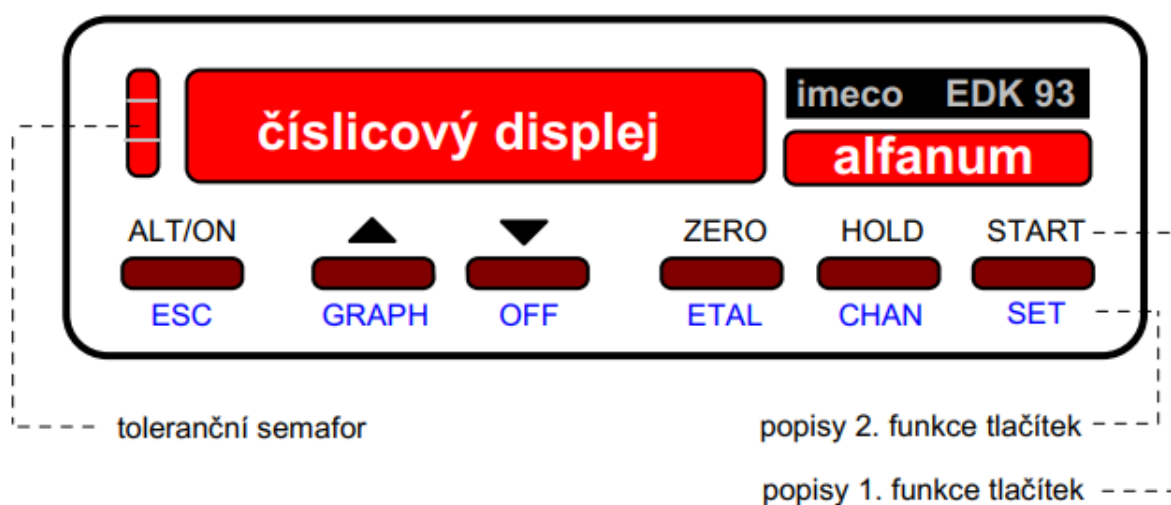
Pohyb měřicí roviny je zajištěn mikrometrickým šroubem se stoupáním 500 μm a rozsahem 7 mm. Mikrometrický šroub tlačí přes přírubu na osu lineárního vedení a posouvá ji v jednom směru. Zpětný pohyb zajišťuje tlačná pružina, která přitlačuje přírubu směrem na mikrometrický šroub. Požadavek na automatizovaný posuv měřicí roviny byl vyřešen připojením krokového motoru na mikrometrický šroub pomocí spojky vytištěné na 3D tiskárně. Přípravek je dále vybaven otvorem pro upínací pouzdro indukčnostních snímačů a malou

deskou tištěného spoje pro napojení výstupních vodičů z tenzometru a kabelu vedoucím k 24-bit A/D převodníku.

4.2 Referenční indukčnostní snímač a převodník Imeco EDK 93

Přístroj je určen pro statická a dynamická měření ve stojancích a přípravcích s 1÷4 indukčnostními snímači. Princip měření spočívá v použití frekvenčního převodu délkových změn na délku časového intervalu podle původního patentu AO 265463. Základ elektroniky tvoří frekvenční převodník zhotovený technologií SMD a umístěný do konektoru snímačů, jednotka EDK 93 (Obr. 29) je již pouze počítač. Číslicový měřicí princip přináší vůči klasickému analogovému zapojení obecně lepší metrologické vlastnosti. Elektronika nemá žádný nastavovací prvek, což zvyšuje spolehlivost a dlouhodobou stabilitu. K převodníku lze připojit indukčnostní snímače od různých výrobců, s různými rozsahy (0,1÷10 mm). Pro úspěšné připojení snímače je nutná jeho diferenciální konstrukce.

Linearizace těchto snímačů probíhá kalibrací vůči referenčnímu zařízení, díky které je zjištěn průběh chyby linearity snímače a průběh je následně aproximován polynomem 3. stupně. Koeficienty tohoto polynomu jsou zapsány do elektroniky v konektoru snímače a při připojení si jednotka EDK automaticky načte tyto hodnoty. Pomocí přepočtu je naměřená hodnota neustále zpřesňována. Vzorkovací frekvence závisí na přesnosti použitého snímače. Pro standardně dodávané indukčnostní snímače firmy Mesing s rozlišitelností 1 μm 100 Hz, pro 0,1 μm 50Hz a pro 0,01 μm 10Hz. [18]



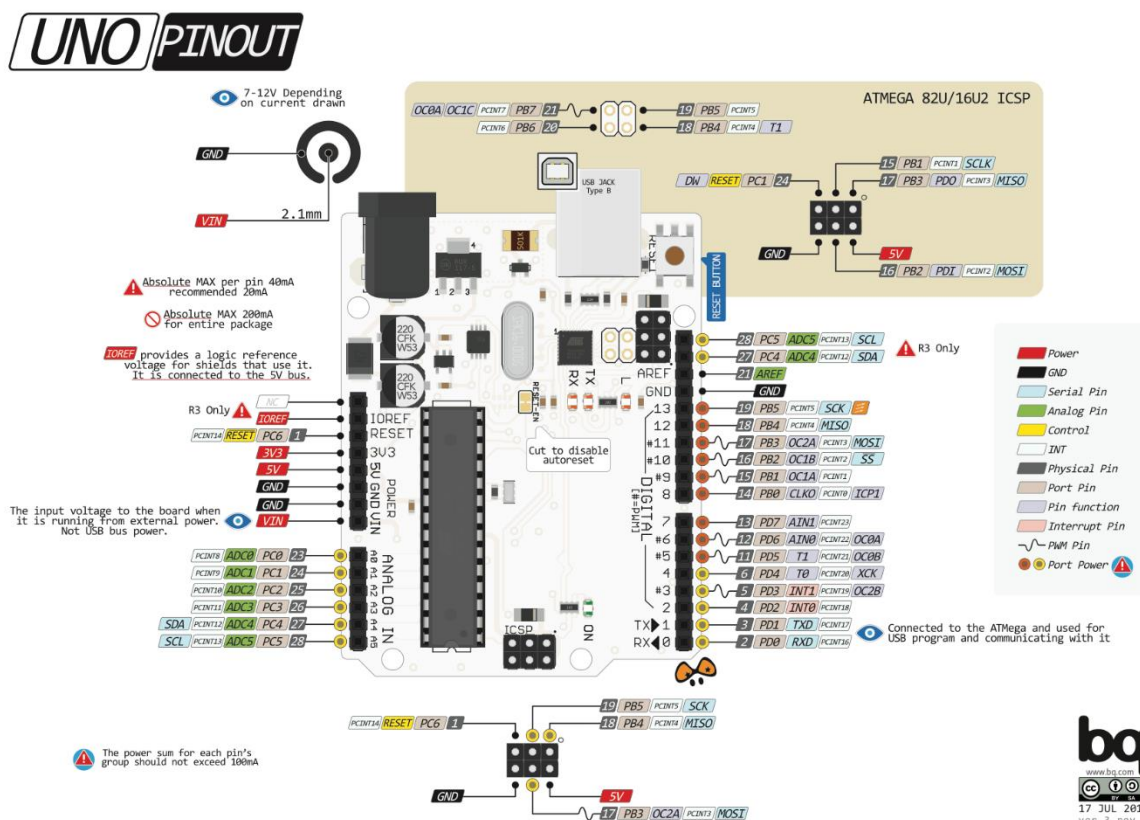
Obr. 29) Vyhodnocovací jednotka EDK 93 [18]

Pro toto testování byl zvolen snímač s rozlišitelností 1 μm . Tato rozlišitelnost by měla zcela postačovat na úvodní testování tenzometru, kdy není vyžadována přesná kalibrace, ale cílem je zmapovat chování tenzometru a navrhnout další postup testování a případně i jinou geometrii těla doteku.

4.3 Elektronika

4.3.1 Vyhodnocovací jednotka – Arduino Uno

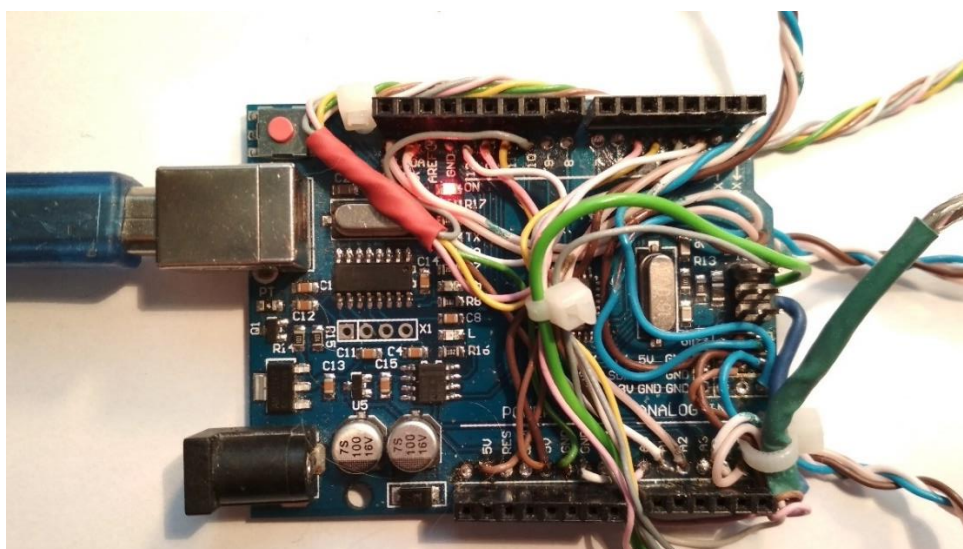
Arduino Uno je mikrokontrolérová vývojová deska fungující na čipu ATmega328 (0. Deska disponuje 6-ti analogovými vstupy, 14-ti digitálními I/O vstupy a 6 z nich se dá použít jako PWM výstup, 16 MHz krystalem, USB 2 typ B konektorem, napájecím konektorem a rozhraním ICSP. Vývojovou desku lze napájet pomocí USB portu nebo externím stejnosměrným zdrojem o napětí 6÷12 V. Maximální proud na jeden konektor pracující na napětí 5 V je 40 mA a 50 mA pro 3,3 V piny. Celkový maximální proud odebíraný z pinů připojených na napájecí větev 5 V by neměl překročit 800 mA.



Obr. 30) Pinout Arduino Uno [20]

Pro toto měření bylo použit čínský klon originálního Arduina, který je ovšem funkčně zcela identický s originálem. Jediným rozdílem je fakt, že čínské klony bývají osazeny odlišným čipem CH340 / CH341. Tento čip zprostředkovává komunikaci pomocí USB a ovladač pro něj není běžně zahrnut ve Windows, a proto uživatelé tohoto operačního systému nejdříve musí driver ručně doinstalovat.

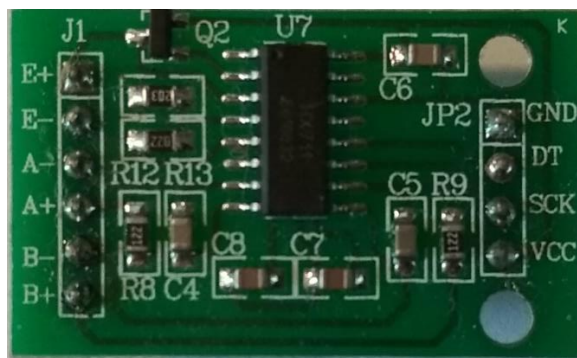
Stanovenými požadavky navrhovaného přípravku byla stanovena schopnost měřit vlhkost a teplotu v místě měření, odečítat rozdíl napětí vznikající na navařovaném tenzometru, ovládat motor řídící lineární posuv měřicí roviny, data ukládat na SD kartu a zároveň je zobrazovat na LCD. Přípravek by měl být vybaven i modulem reálného času pro možnost ukládání data měření. Po připojení níže popsanych periférií byly téměř zcela využity maximální možnosti Arduina UNO (Obr. 31) a to jako po hardwarové stránce tak i po stránce kapacity paměti (více v kapitole věnující se softwaru).



Obr. 31) Klon Arduina Uno včetně kabeláže nutné pro připojení modulů

4.3.2 A/D modul

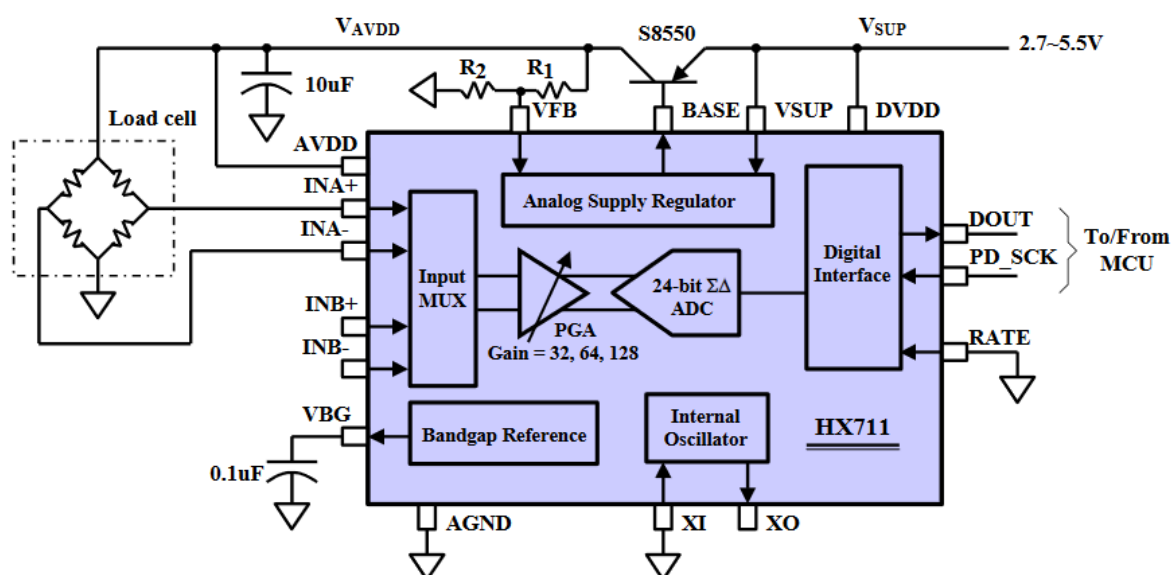
Pro vyhodnocování celo můstkového tenzometru byl použit A/D modul fungující na čipu HX711 (Obr. 32). Tento modul byl zvolen z důvodu cenové dostupnosti a dostačujícímu rozlišení 24 bitů při vzorkování maximálně 80 Hz je pro průvodní měření dostačující a během měření se modul velice osvědčil. Modul je určen pro přesné měření analogového diferenciálního signálu. Měří rozdíl dvou potenciálů (napětí) vznikajících na wheatstoneově můstku. Disponuje dvěma analogovými vstupy a vnitřní programovatelným zesilovačem se zesílením 32, 64 nebo 128 krát a nízkou hladinou šumu. Komunikuje po sériovém rozhraní. Prvek lze napájet napětím $2,6 \div 5,5$ V a během provozu odebírá proud 1,5 mA.



Obr. 32) A/D převodník s čipem HX 711

Zapojení modulu je shodné se zapojením doporučeným výrobcem (Obr. 33) v katalogovém listu. Bohužel v tomto zapojení je pin RATE číslo 15, sloužící k přepínání mezi 10 Hz a 80 Hz vzorkovací frekvencí, přímo připojen k zemi (logická nula) a tudíž není možné bez zásahu do hardwaru modulu jej používat v 80 Hz režimu. Pro frekvenci 80 Hz je potřeba na pin 15 přivést 5 V. tohoto bylo docíleno odpájením pinu RATE a připojením jej pomocí krátkého vodiče se sousedním pinem DVDD číslo 16. Komunikace probíhá prostřednictvím dvou pinů, kdy pin PD_SCK číslo 11 slouží pro časování datového přenosu a pro probrání modulu ze standby módu a pin DOUT číslo 12 je určen pro sériový výstup dat. [19]

Vstup A (piny INA+ a INA-) je možné softwarově nastavit na zesílení 32 nebo 128 a vstup B (piny INB+ a INB-) má dané zesílení 64 a nelze jej změnit.



Obr. 33) Schéma zapojení tenzometru s modulem HX711 [19]

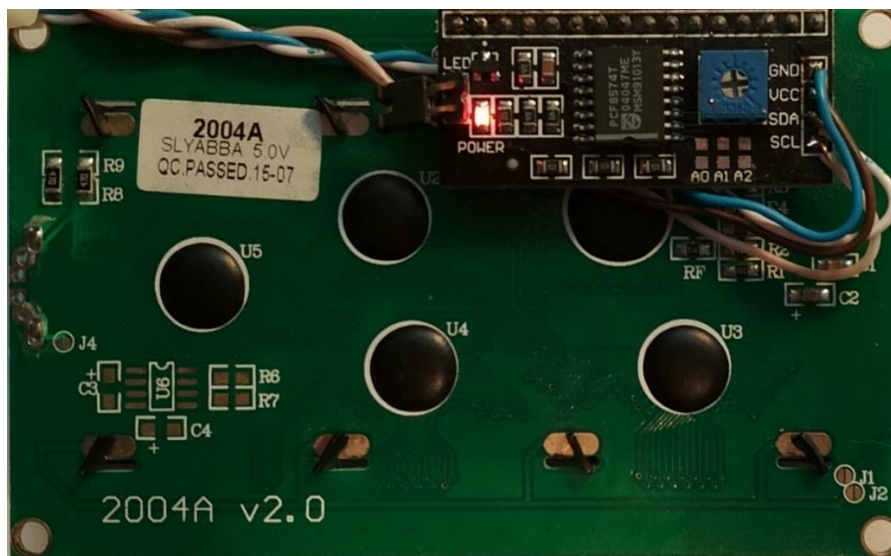
4.3.3 LCD display 20x4 znaků

Pro zobrazování průběžných informací byl použit LCD modul od firmy Distar Technology Limited (Shenzhen, China) s výrobním označením DS-C2004A3-BTSSWE-NAA (Obr. 34). Tento displej využívá technologii STN a má modré podsvícení. Technologie STN má například oproti technologii TFT nižší výrobní náklady a mají nižší spotřebu energie. [21]



Obr. 34) Zapojený LCD modul od firmy Distar (zepředu)

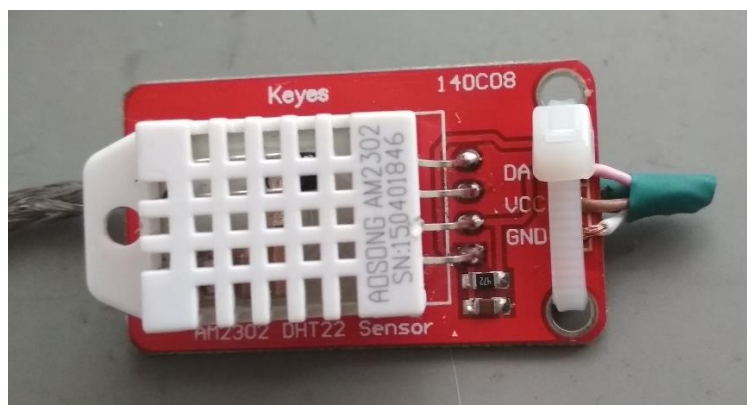
Provozní napětí displeje je 5 V při proudu 1 mA, a i podsvícení je napájeno 5 V ale díky odebíranému proudu 60 mA tvoří podsvícení naprostou většinu spotřebované energie tohoto modulu. Pro připojení slouží 16 pájecích plošek. Displej umožňuje využít čtyřech řádků po dvaceti znacích a při využití modulu pracujícím na principu čipu PCF8574 (Obr. 35), umožňující sériovou komunikaci využívající I²C stačí na připojení pouze dva datové vodiče a dva napájecí.



Obr. 35) Zapojený LCD modul od firmy Distar (modul PCF8574)

4.3.4 Teplotní a vlhkostní snímač DHT 22

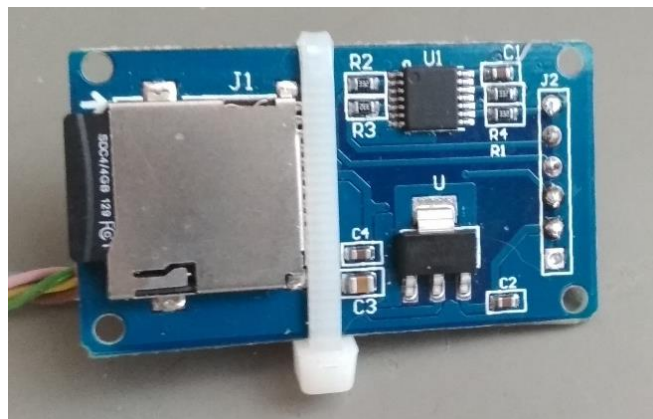
Pro měření teploty a vlhkosti byl zvolen snímač DHT 22 který je velmi jednoduchý poměrně levný a při frekvenci 0,5 Hz je schopný odečítat teplotu v rozsahu $-40 \div 80^{\circ}\text{C}$ s přesností $0,1^{\circ}\text{C}$ a vlhkost v rozsahu $0 \div 100\%$ s přesností 2%. Vlastnosti tohoto snímače jsou pro účely tohoto přípravku zcela dostačující. Tento snímač lze pořídit již jako modul kde je již připojený rezistor mezi datovým a napájecím pinem. Tento modul lze připojit pomocí jednoho datového vodiče a dvou napájecích.



Obr. 36) Modul se snímačem teploty a vlhkosti DHT 22

4.3.5 Modul SD karty

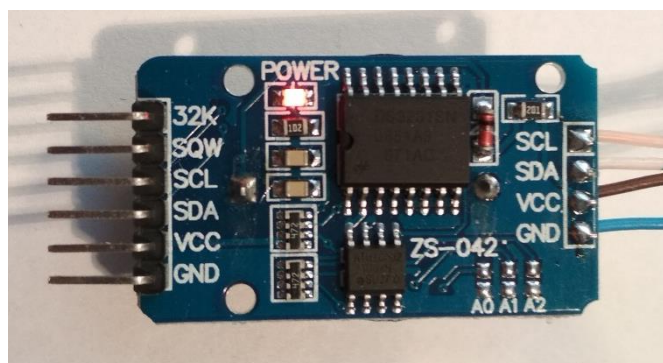
Pro ukládání dat byl zvolen modul pro micro SD kartu využívající komunikaci pomocí SPI sběrnice (Obr. 37). Tento modul lze provozovat jak na 3,3 V tak i na 5 V. Komunikace probíhá pomocí dvou datových portů a napájení samozřejmě.



Obr. 37) Modul SD karty

4.3.6 Modul reálného času

Z důvodu přehlednosti naměřených dat je zapotřebí znát datum a čas měření. K tomuto účelu slouží modul reálného času (Obr. 38), který disponuje baterií a je schopný udržet hodnotu reálného času po dobu desítek měsíců (záleží na kvalitě a kapacitě baterie). Tento modul komunikuje po sběrnici I²C a tudíž stačí k připojení jen 4 vodiče, dva datové a napájení. Konstrukčně je modul připraven na řetězení v sérii více I²C zařízení (kontakty po obou stranách).

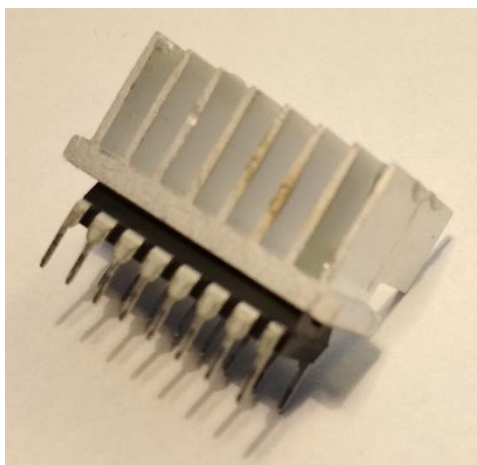


Obr. 38) Modul reálného času

4.3.7 Driver krokového motoru L293D

Pro řízení krokového motoru byl vybrán integrovaný obvod L293D (Obr. 39) z produkce firmy Texas Instruments Incorporated (Dallas, Texas). Tento čtyřnásobný poloviční H-můstek je určen pro řízení dvou DC motorů nebo jednoho bipolárního krokového motoru. Můstek je navržený pro napětí 4,5 ÷ 36 V při proudovém odběru max 1200 mA. Integrovaný obvod byl umístěn do pájivého pole, kde byly jednotlivé výstupy propojeny s výstupním konektorem a na

vstupní straně připojeny k Arduino Uno. Obvod musel být z důvodu chlazení při lehkém přetěžování osazen chladičem a během provozu byl aktivně chlazen. [23]



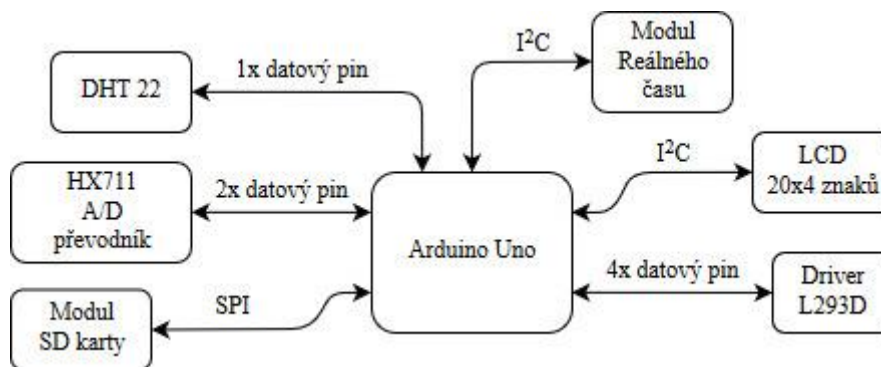
Obr. 39) L293D Quadraple Half-H Driver

4.4 Software

Pro splnění funkcí bylo zapotřebí napsat program umožňující spolupráci všech prvků sestavy. Pro ulehčení práce byla použita pro každý modul knihovna umožňující snadné a rychlé připojení periférie bez větších problémů. Největším problémem bývá najít funkční knihovnu a jelikož se jedná o open source záležitost je k dispozici obrovská škála různých upravených verzí a ne zcela vždy musí knihovna fungovat dle představ. Komunikační rozhraní mezi jednotlivými moduly je znázorněno na (Obr. 40).

Použité knihovny stažené z portálu GitHub [24]:

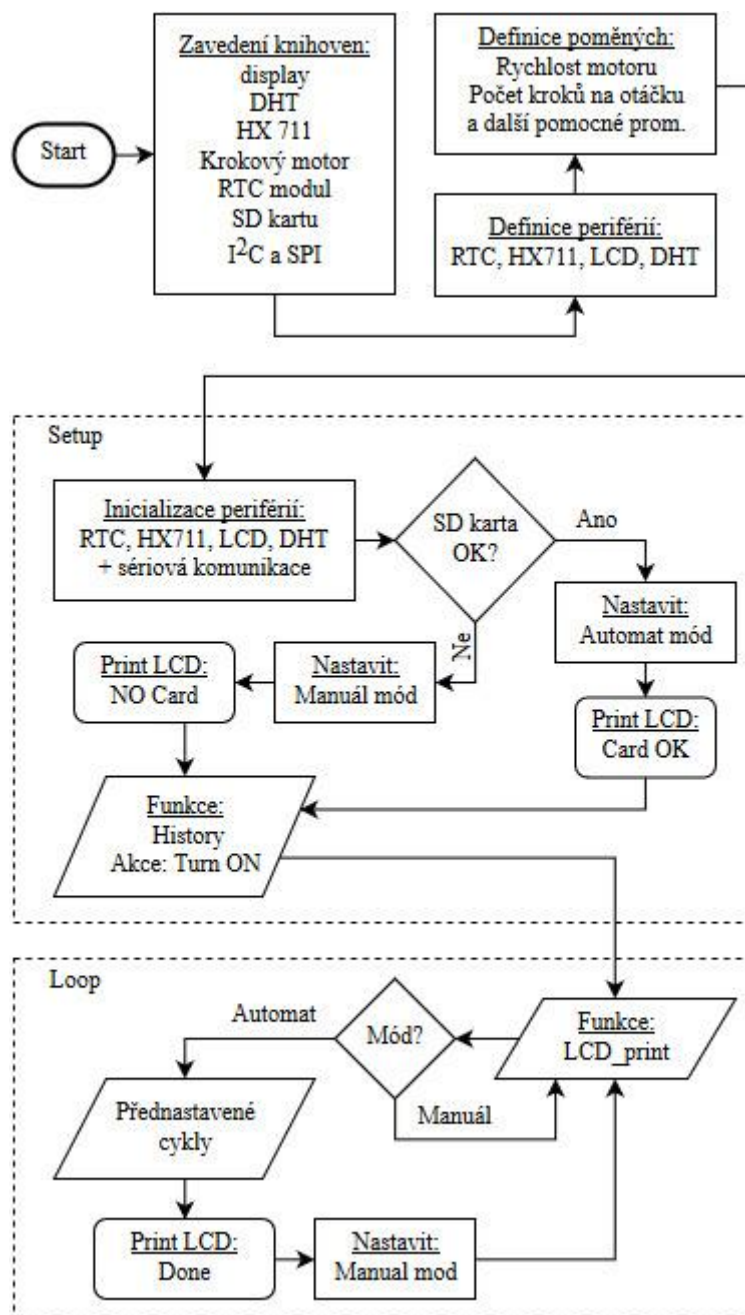
- DHT.h – čtení teploty [°C] a vlhkosti [%] z čidla DHT 22
- DS3231.h – čtení a nastavení RTC modulu
- HX711.h – čtení z A/D převodníku s čipem HX711
- LiquidCrystal_I2C.h – ovládání LCD displeje s 4 řádky po 20-ti znacích, pomocí čipu PCF8574 přes I²C
- Stepper.h – ovládání krokových motorů, řídí přímo driver L293D
- SD.h – Zápis a čtení z SD karty
- SPI.h – komunikace pomocí SPI
- Wire.h – komunikace pomocí I²C



Obr. 40) Komunikace mezi jednotlivými moduly

Hlavní program

Na začátku programu je jako vždy potřeba načíst veškeré potřebné knihovny (viz Použité knihovny stažené z portálu GitHub [24]:). Dále jsou v první části také definovány globální proměnné jako jsou například čísla pinů na, než jsou připojené periférie nevyužívající rozhraní I²C nebo SPI, dále pak třeba rychlost krokového motoru nebo proměnná „calm_down“ [ms]. Tato proměnná definuje čas, který uplyne mezi dokončením pohybu motoru a odečtením první hodnoty a pro většinu měření byla zvolena 250 ms. Toto zpoždění je zde z důvodu minimalizování vlivu dynamických jevů na průběh měření.



Obr. 41) Flow chart hlavního programu

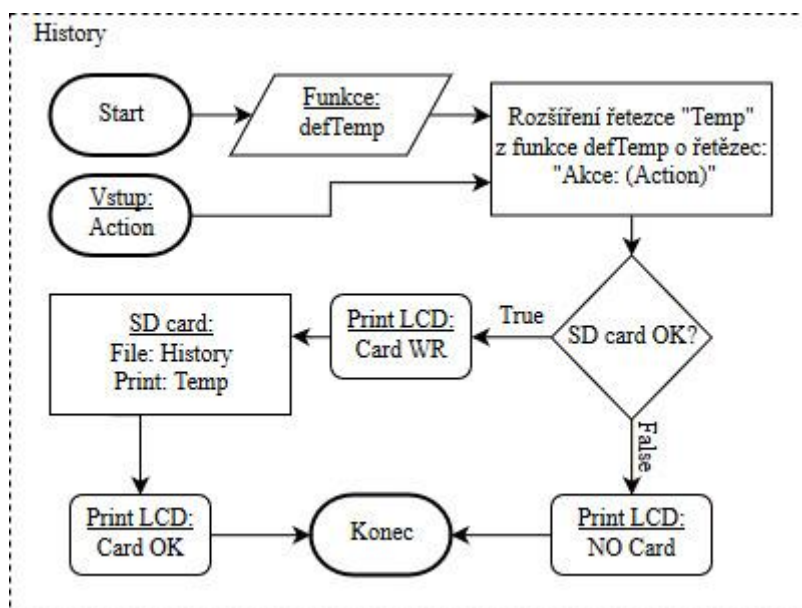
Hlavní program se skládá ze dvou hlavních smyček (Obr. 41), kdy první je smyčka „setup“ která proběhne pouze jednou po startu a jejím úkolem je inicializovat periférie, nastavit výchozí rychlost krokového motoru, zapnout podsvícení na displeji, přečíst z RTC modulu aktuální čas a definovat které digitální porty budou vstupní a které výstupní. Dalším jejím úkolem je zkontrolovat stav SD karty a informaci zobrazit na LCD displeji. V případě její přítomnosti nastavit proměnou definující mód, ve kterém jednotka poběží, na hodnotu

pro automatický režim. Na konci smyčky „setup“ je ještě spuštěn podprogram „History“ s hlavičkou „Turn ON“. Více o funkci „History“ v kapitole, která je jí níže věnována.

Druhou smyčkou je hlavní do nekonečna se opakující smyčka programu na jejímž začátku se vždy provede funkce „LCD_print“. Více o funkci „LCD_print“ v kapitole, která je jí níže věnována. Dále se na základě proměnné určující, či bude měření probíhat v automatickém či manuálním módu rozhodne, zda bude do restartu Arduina probíhat pouze odečítání všech snímaných hodnot a jejich vypisování na LCD displej pomocí funkce „LCD_print“. Nebo v případě že je SD karta správně načtena bude zapnut automatický režim měření. V tomto případě budou postupně provedeny všechny předem naprogramované měřicí cykly, kdy každý z nich může mít zcela jiné parametry a jejich maximální počet záleží pouze na dostupné paměti Arduina. Cykly se díky mechanickému omezení mohou provádět pouze v rozsahu 7 mm. Pro větší rozsahy je potřeba měření rozdělit po 7 mm úsecích, snímač pak ručně přestavit a data pak ručně spojit. Po provedení všech požadovaných přednastavených cyklů se měření přepne do manuálního režimu, ve kterém pokračuje do restartu.

Funkce „History“

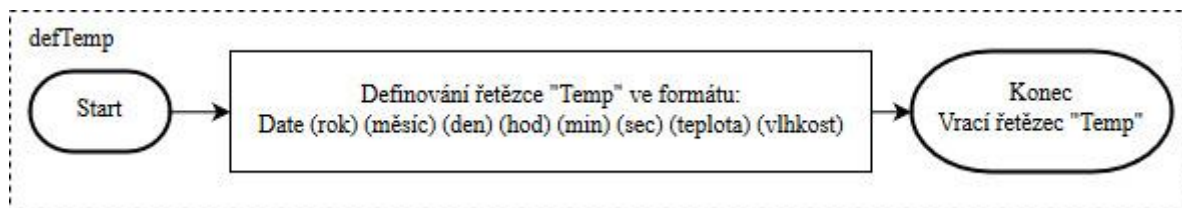
Tato funkce slouží k mapování používání jednotky. Funkce vytvoří soubor „History.txt“ do kterého ukládá datum, čas, teplotu, vlhkost (řetězec „temp“ vrácený funkcí „history“) a pak hlavičku právě prováděné aktivity tak aby bylo zaznamenáno kdy a jaké měření s jakým nastavením probíhalo (Obr. 42). Tento soubor je určen pouze pro přehled naměřených dat.



Obr. 42) Flow chart funkce „History“

Funkce „defTemp“

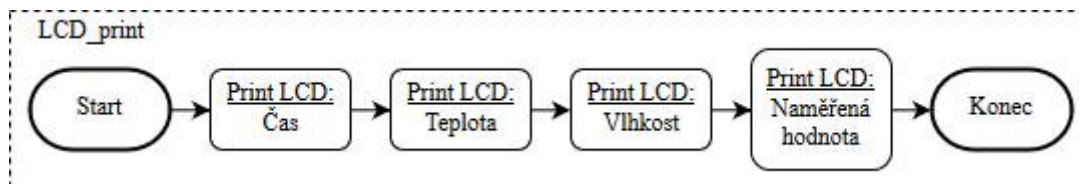
Úkolem této funkce je definovat řetězec „temp“, který nese informaci o čase a prostředí. Řetězec začíná slovem „Date“ a pak je dále rozšiřován o rok, měsíc, den, hodinu, minutu, vteřinu, teplotu a vlhkost (Obr. 43). Tato funkce se používá při zapisování do souboru historie měření a pak vždy při nové poloze snímače, kdy se ukládá tento řetězec pak číslo polohy, následně prodleva od posledního měření v milisekundách, a nakonec naměřené hodnoty.



Obr. 43) Flow chart funkce „defTemp“

Funkce „LCD_print“

Funkce „LCD_print“ slouží pro vypisování aktuálních dat na LCD displej (Obr. 44). I když tato funkce není nijak sofistikovaná je potřeba tuto operaci opakovat často v různých částech programu bylo výhodné pro ni napsat vlastní funkci.



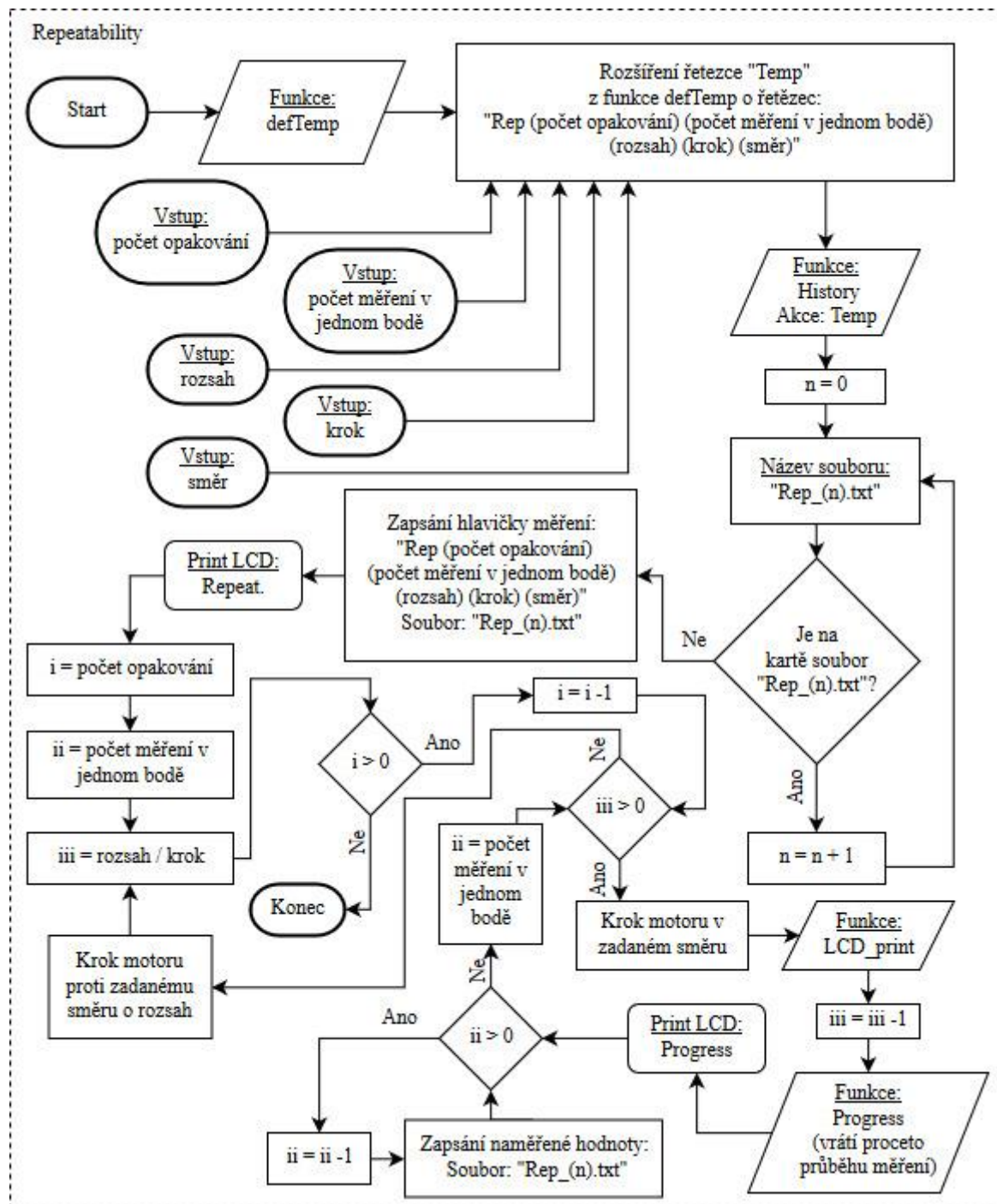
Obr. 44) Flow chart funkce „LCD_print“

Měřicí cyklus

V případě že je SD správně načtena dojde ke spuštění automatického módu, kdy budou provedeny měřicí cykly s takovými vstupními parametry, jaké byly zadány při volání funkce měřicího cyklu. Takto volaných cyklů může být velmi mnoho za sebou v sérii. Po dokončení posledního cyklu zůstane jednotka v manuálním režimu.

Zpočátku byly vytvořeny různé měřicí cykly pro různé průběhy měření, ale během vylepšování původního kódu a tvoření dalších cyklů bylo zjištěno, že všechna požadovaná měření se dají realizovat pomocí vhodně zadaných parametrů při volání nejnovější funkce cyklu. Tato verze (Obr. 45) umožňuje provést, jak měření linearity, kdy je stanoven rozsah a krok v každé poloze můžete odečítat libovolný počet hodnot, tak měření opakovatelnosti,

kdy lze definovat kolikrát se má přistavení do dané pozice opakovat. Dalším možným cyklem nastavitelným jenom pomocí vstupních parametrů této funkce je měření časové stálosti v bodech napříč rozsahem.



Obr. 45) Flow chart měřicího cyklu

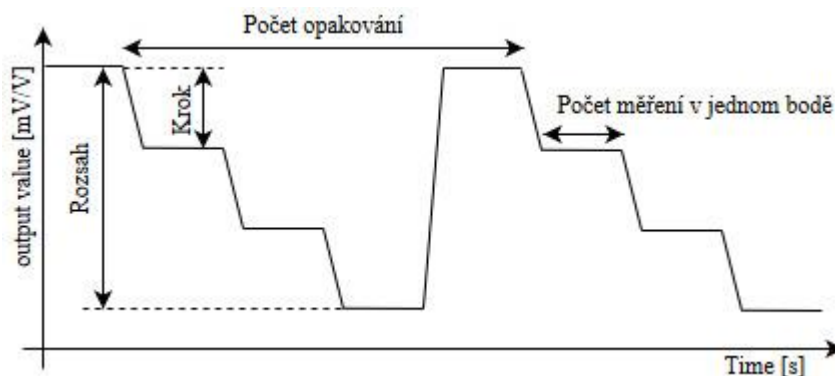
Poté co je funkce inicializována v průběhu vykonávání hlavní smyčky programu kde jsou zadány vstupní parametry, je zapotřebí povést mapování historie používání. Pro tuto činnost,

při které je volána funkce „History“, je zapotřebí rozšířit řetězec „Temp“ získaný použitím funkce „defTemp“ o vstupní parametry měření, kterými je počet opakování celého průběhu měření, počet hodnot naměřených v jednom bodě. Dalším parametrem je rozsah v μm maximálně však 7000 μm z důvodu mechanických omezení, k rozsahu je důležité znát ještě krok který je dalším parametrem. Krok určuje v μm vzdálenost mezi jednotlivými body měření, pro přesnost měření je důležité, aby byla hodnota kroku dělitelná 1,25 μm což je vzdálenost o kterou se měřicí rovina posune při pootočení krokového motoru o jeden krok (použitý krokový motor má 400 kroků na otočku a mikrometrický šroub má stoupání 500 μm). Posledním parametrem je směr, ve kterém má zatěžování probíhat. Ten se zadává v binární hodnotě (1/0) a skutečný směr se odvíjí od zapojení motoru.

Následným krokem programu je generování dynamického názvu souboru, do kterého budou ukládat hodnoty získané během měřicího cyklu. Během této činnosti program prochází SD kartu a hledá nejnižší číslo souboru, které ještě nebylo použito. Program začíná s pořadovým číslem měření 0 a zkontroluje přítomnost souboru na kartě, v případě že soubor je již na kartě zvýší pořadové číslo o jedna a znovu je provedena kontrola přítomnosti. Tato činnost končí v momentě, kdy je nalezeno pořadové číslo, které ještě není na kartě. Nevýhodou této metody hledání nového názvu souboru je zvyšující se časová náročnost při vyšším počtu měření uložených na jednu SD kartu. Další nevýhodou, za kterou může použitá knihovna pro komunikaci s SD kartou, je nutnost použít název souboru ve formátu maximálně 8/3. To znamená, že název souboru může mít maximálně 8 znaků a přípona maximálně 3 znaky. Tento fakt je poměrně limitující při tvorbě dynamického názvu souboru. Původní myšlenkou bylo ukládat do názvu souboru datum měření, nastavení měření, pořadové číslo pro případ více shodných měření provedených v jedné minutě. Od této varianty muselo být prozatím upuštěno z důvodu omezené délky názvu. Program následně zapíše do souboru měření hlavičku obsahující datum a nastavení měření a vypíše na LCD displej aktuální údaje pomocí funkce „LCD_print“.

Toto měření pak probíhá dle schéma (Obr. 46), kdy před prvním krokem vložené posunutí proti směru zatěžování o jeden krok měření a navrácení zpět do původní polohy. Toto posunutí je zde zajištění podmínek opakovatelnosti i pro první pozici, jelikož bez tohoto opatření by nastavení do první pozice proběhlo z opačného směru a měření by bylo ovlivněno vůlí posuvu lineární osy. Další činností je odečtení hodnoty tenzometru a posunutí o další krok měření. Tato sekvence se opakuje tolikrát, aby došlo k posuvu skrze celý rozsah. Po provedení odečtení hodnoty ve všech bodech měření se měřicí rovina vrátí do výchozí pozice a je

provedena se kontrola, zda nejsou vyžadovány další opakování. V případě, že je vstupní hodnota „počet opakování“ větší, než nula provede se další sekvence kroků měření a proměnná „počet opakování“ je zmenšena o jedna a znovu se provede kontrola požadovaného počtu opakování.



Obr. 46) Obecné schéma testovacího cyklu

Samotné odečítání hodnoty v jednom bodě probíhá následovně. Jako první je na nový řádek příslušného souboru zapsáno datum ve formátu „rok měsíc den“ dále aktuální čas „hodina minuta vteřina“, dále hodnoty prostředí „teplota a vlhkost“, aktuální poloha v μm od počátku měření, číslo kroku, prodleva mezi jednotlivými kroky, a nakonec hodnoty odečítané z obvodu HX711 vyhodnocující navařovaný celo-můstkový tenzometr. Tyto hodnoty se zapisují frekvencí 100 Hz za sebe do počtu daného hodnotou proměnné „počet měření v jednom bodě“.

Ukázka kódu programu

Pro úplnost jsou zde uvedeny malé části z celkem 420 řádků dlouhého kódu. Jako první je zde uvedena část kódu pro stanovení pořadového čísla měření (Obr. 47), kde je nejdříve definována pevná část názvu souboru, která je následně rozšířena o plovoucí člen. Tento plovoucí člen je proměnná začínající s hodnotou 0, k níž je přičten inkrement velikosti 1 pokud se již takovýto název nachází na kartě (Obr. 45).

```

while ( x == 0) {
    String filename = "Rep";
    filename += String("_");
    filename += String(count);
    filename += String(".txt");
    filename.toCharArray(file, sizeof(file));
    if (SD.exists(file) == 1) {
        count = count + 1 ;
    }
    else {
        x = 1;
    }
}

```

Obr. 47) Generování názvu souboru

Další ukázkou kódu (Obr. 48) je část z podprogramu měřicího cyklu. Kde v první části řádku je sestavení řetězce obsahující hlavičku každého řádku měření. Následně je otevřen soubor měření a zapsán řetězec s hlavičkou řádku. Navazující činností je cyklický pohyb měřicí roviny a následné ustálení pro zamezení měření dynamických vlivů. Poslední akcí tohoto úryvku kódu je navrácení se do původní polohy, tedy o celý rozsah. Celý kód programu najdete v příloze 2.


```

delay(calm_down);
int counter = 1;
for (int c = 0; c < how_many_times; c++) {
    motor.step(-step_size);
    for (int i = 0; i <= step_count; i++) {
        now = rtc.getTime();
        motor.step(step_size);
        LCD_print();
        Progress( ((c)*step_count + i), step_count * how_many_times);
        String temp = defTemp(1);
        temp += String(" Pos ");
        temp += String(step_size_um * i);
        temp += String(" ");
        temp += String(counter);
        temp += String(" ");
        counter = counter + 1;
        char line[temp.length() + 1];
        temp.toCharArray(line, sizeof(line));
        Long time_old;
        Serial.print(line);
        Serial.print(millis() - time_old);
        Serial.print(" ");

        myFile = SD.open(file, FILE_WRITE);
        myFile.print(line);
        myFile.print(" Dur ");
        myFile.print(millis() - time_old);
        myFile.print(" ");
        time_old = millis();
        delay(calm_down);
        for (int cc = 0; cc < how_many_points; cc++) {
            float q = (scale.read_average(1)) / 100;
            myFile.print(q, 0);
            myFile.print(" ");
            Serial.print(q, 0);
            Serial.print(" ");
        }
        Serial.println();
        myFile.println(" ");
        myFile.close();
    }
    lcd.setCursor(15, 1);
    if (up_down == 0) {
        lcd.setCursor(15, 1);
        lcd.print("READY");
        motor.step(-step_size * step_count);
    }
}

```

Obr. 48) Část kódu měřicího cyklu

5 MĚŘENÍ

Hlavní funkcí navrženého přípravku je otestovat vlastnosti experimentálních prototypů snímačů délky fungujících na principu nového typu tenzometrů. Jako první zkoušená vlastnost byla zvolena linearita, z důvodu nejvyšší významnosti během dalšího navrhování rozsahů které budou dále testovány.

5.1 Základní definice

Základní termíny související s vyjadřováním přesnosti měření jsou definovány v mezinárodním slovníku termínů v metrologii TNI 01 0115. Tento dokument je zpracován příliš exaktně, a je tudíž často těžko srozumitelný. Proto je v této kapitole použita spíše forma srozumitelné interpretace těchto pojmů.

5.1.1 Základní pojmy

Pravá hodnota

Tato hodnota se nedá přesně zjistit, jelikož nemáme absolutně přesné měřidlo a také nejsme schopni zajistit ideální podmínky. V praxi se používá termín konvenční hodnota.

Konvenční hodnota

Je získána měřením dané veličiny za pomoci etalonu a měřidla z pravidla o řád přesnějším, než je požadované měření. Pro kalibrační účely se konvenční hodnota nazývá referenční hodnotou. Tato hodnota je přiřazena k měřené veličině pomocí stanovení intervalu, ve kterém se nachází s danou pravděpodobností (nejčastěji 95%). Tento interval se nazývá nejistota měření.

Naměřená hodnota

Tato hodnota veličiny získaná měřením. Naměřená hodnota se získá měřením, zpravidla jako aritmetický průměr ze série měření provedených za podmínek opakovatelnosti. V případě nepřímých měření se jednotlivé hodnoty získají výpočtem ze vstupních veličin.

Výsledek měření

Výsledkem je soubor hodnot měřených veličin kde každá hodnota má přiřazený interval, ve kterém se průměr naměřených hodnot pohybuje s danou pravděpodobností (Nejistota měření).

Podmínky opakovatelnosti měření:

- stejné měřidlo

- stejný postup měření
- stejný obslužný personál
- stejné pracovní podmínky a stejné místo měření
- opakování měření na stejném nebo podobných objektech v krátkém časovém úseku

Podmínky reprodukovatelnosti měření:

Vychází z podmínek opakovatelnosti, kdy došlo ke změně alespoň jednoho parametru. Hodnocení preciznosti za podmínek reprodukovatelnosti je možné pouze pro měřicí systémy podobných parametrů.

- různé postupy měření
- různý obslužný personál
- různý měřicí systém
- různá místa měření
- opakování měření na stejném nebo podobných objektech

5.1.2 Nejistota měření

Nejistota měření je parametr charakterizující rozptyl hodnot měřené veličiny a tento parametr nemůže nabýt záporné hodnoty. Označíme-li naměřenou korigovanou hodnotu jako „A“ a výslednou rozšířenou nejistotu měření jako „B“, pak platí tvrzení, že pravá hodnota je prvkem intervalu $\langle A - B; A + B \rangle$, s pravděpodobností 95%.

Nejistoty se dělí na nejistoty typu A, které se získávají opakovanými měřeními jako směrodatná odchylka aritmetického průměru, a nejistoty typu B, které se získávají jinými způsoby.

Nejistota typu A

Nejistota u_a se stanoví z vícenásobného měření (n = počet naměřených hodnot) za podmínek opakovatelnosti a spočítá se jako hodnota směrodatné odchylky aritmetického průměru dle následujícího vzorce:

$$u_a = s_{\bar{x}} = \frac{s_x}{\sqrt{n}} = \sqrt{\frac{1}{n \cdot (n - 1)} \sum_{i=1}^n (\bar{x} - x_i)^2}$$

(2)

Kde hodnota s_x je výběrovou směrodatnou odchylkou vypočtenou v případě této práce snadno pomocí MS Excel dle vzorce:

$$s_x = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (\bar{x} - x_i)^2} \quad (3)$$

V případech kdy je změřeno méně než 10 hodnot je zapotřebí nejistotu typu A korigovat použitím koeficientu k_s jenž je určen dle následující tabulky. (Pracovat s méně než 6-ti hodnotami měření se nedoporučuje)[26]

Tab 1) Hodnoty koeficientu k_s

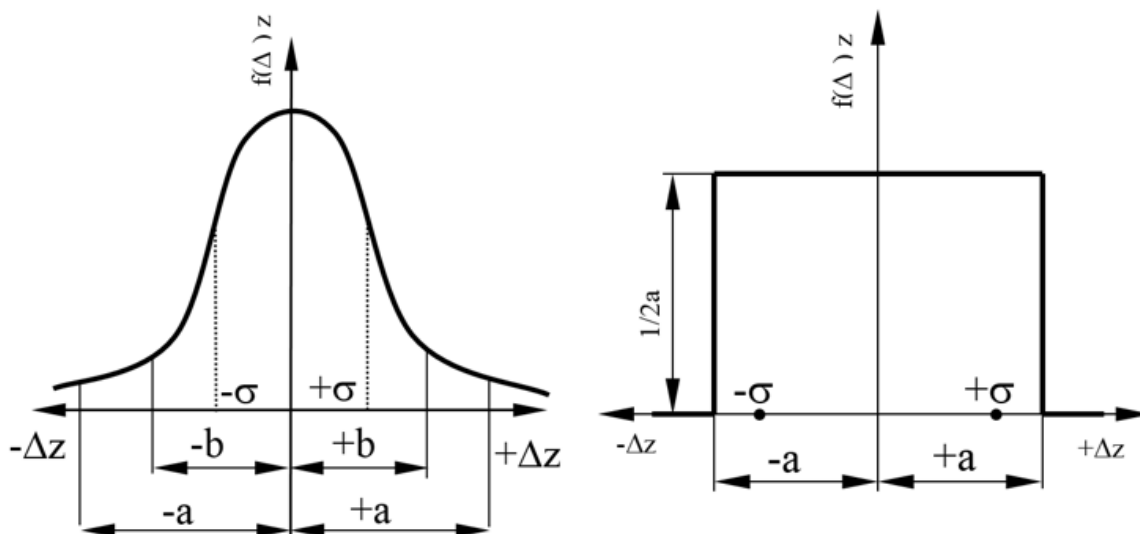
n	9	8	7	6
k_s	1,2	1,2	1,3	1,3

Nejistota typu B

Prvním krokem pro určení nejistoty typu B je vytipování možných zdrojů nejistot $Z_1, Z_2, \dots, Z_j$. Dále je třeba určit nejistotu u_{bz_i} pro každý možný zdroj. Tento údaj je nejčastěji k nalezení v technické dokumentaci zdroje.

Postup pro určení nejistoty typu B

Pro danou sledovanou veličinu se stanoví její maximální rozsah neboli maximální chyba $\pm R_{max}$. Tento rozsah se volí tak aby pravděpodobnost jeho překročení byla malá. Dále je zapotřebí zvolit pravděpodobnostní rozdělení, které nejvíce odpovídá rozdělení sledované veličiny a dle zvoleného rozdělení určit koeficient K . Gaussovo rozdělení $K = 3$ pro $\pm a$, $K = 2$ pro $\pm b$ a rovnoměrné rozdělení $K = \sqrt{3}$.



Obr. 49) normální (Gaussovo) rozdělení; rovnoměrné rozdělení

Dále pak spočítáme nejistotu typu B dle vztahu:

$$u_{b_i} = \frac{R_{max}}{K} \quad (4)$$

Celková nejistota je pak dána geometrickým součtem dílčích nejistot typu B.

$$u_b = \sqrt{\sum_{i=1}^n u_{b_i}^2} \quad (5)$$

Zdroje nejistot typu B

Typickými zdroji nejistot typu B v případě měření délky jsou nejčastěji chyby měřidla, tepelné a pružné deformace, chyby operátora a další. V případě použití moderních snímačů, které měří především elektrické veličiny a ty jsou dále zpracovány analog-digitálním převodníkem lze uvažovat i tyto následující zdroje nejistot:

- nejistota kalibrace
- stabilita (časová stálost) přístrojů
- systematické chyby
- rozlišitelnost přístrojů (v některých případech může nahradit standardní nejistotu u_a)
- hystereze, mrtvý chod

Dále tuto nejistotu ovlivňují změny v okolí jako je změna teploty, relativní vlhkosti, tlaku, elektrického pole, tepelného záření od osvětlení atd.[26]

5.1.3 Chyby měření

Chyba měření je rozdíl hodnoty naměřené a hodnoty referenční získané o řád přesnějším měřicím přístrojem. Relativní chyba je pak podíl chyby měření a referenční hodnoty. Chyby měření se stejně jako výsledky minimálně pětikrát opakovaného měření řídí zpravidla Gaussovým rozdělením.

Typy chyb

- **Celková chyba** – zahrnuje systematickou i náhodnou chybu
- **Náhodná chyba** – rozdíl mezi výsledkem jednoho měření a hodnotou získanou jako průměr z velkého počtu měření za podmínek opakovatelnosti
- **Systematická chyba** – rozdíl hodnoty vzniklé jako průměr z velkého počtu měření provedeného za podmínek opakovatelnosti a hodnoty referenční získané přesnějším přístrojem

5.1.4 Odstraňování chyb měření

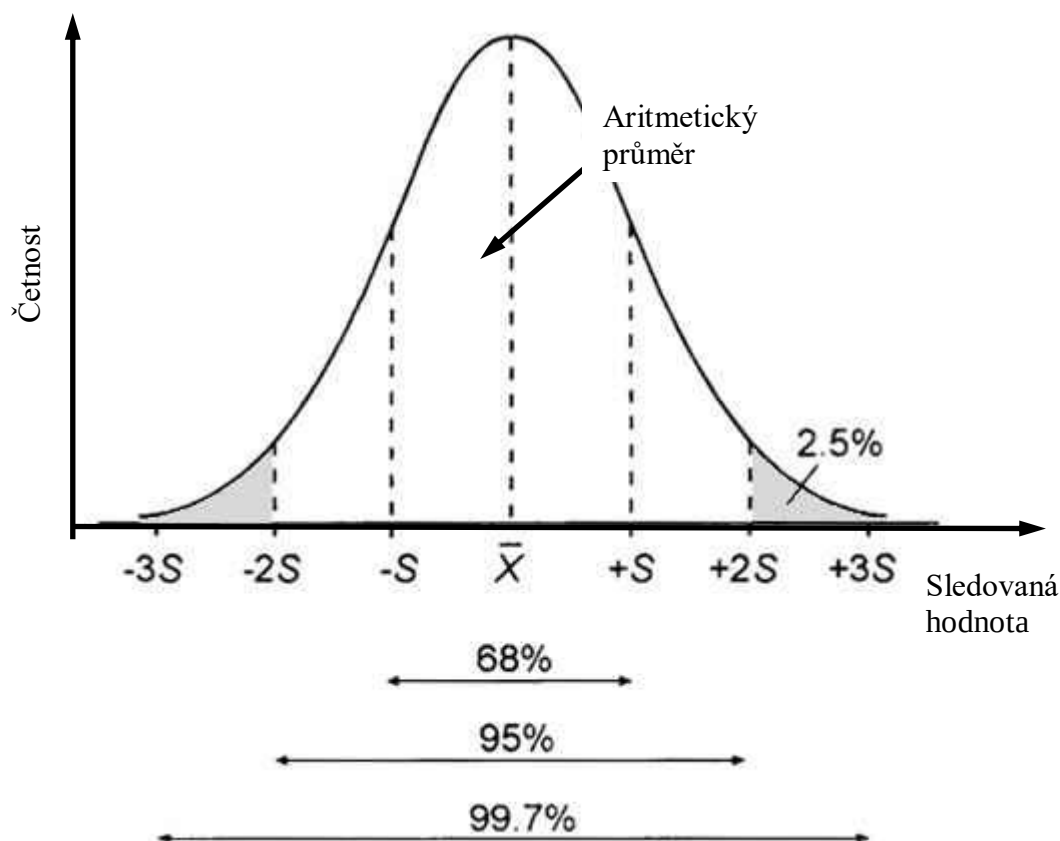
Kompenzace systematické chyby

Systematickou chybu lze kompenzovat pomocí korekce jenž je přičtena k nekorigovanému výsledku měření. Hodnota korekce je rovna hodnotě systematické chyby s opačným znaménkem.

Stanovení odhadu systematické chyby probíhá z n měření provedených za podmínek opakovatelnosti, kdy výsledek měření se spočítá běžně jako aritmetický průměr a od této hodnoty se odečte hodnota referenční získána přístrojem o řád přesnějším (případně se používá místo referenčního přístroje etalon jehož rozměr přesně známe) za podmínek opakovatelnosti. Korekcí lze snadno dosáhnout přesnějších výsledků.

Kompenzace náhodné chyby

Náhodná chyba měření se může pro pravděpodobnost 95% pohybovat v rozsahu $\pm 2s_{\bar{x}}$ a pro pravděpodobnost 99,7% $\pm 3s_{\bar{x}}$ viz (Obr. 50) Tuto chybu můžeme snížit buď zvolením nižší pravděpodobnosti (v praxi se nejčastěji používá pravděpodobnost 95%), nebo zvýšením počtu měření, kdy pak počítáme aritmetický průměr a směrodatnou odchylku aritmetického průměru dle rovnice (2). Čím nižší je směrodatná odchylka tím menší je maximální velikost náhodné chyby.



Obr. 50) Rozsah a četnost směrodatné odchylky [27]

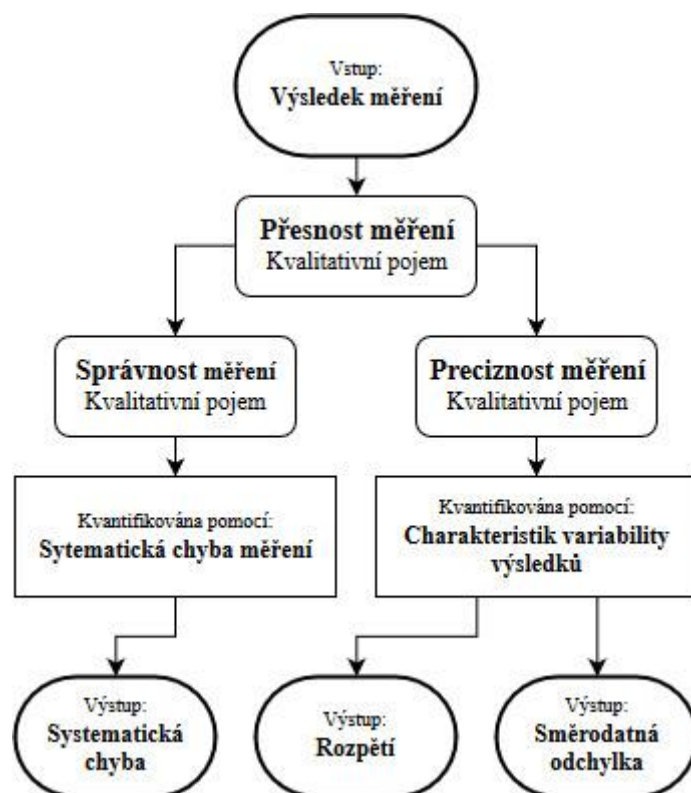
5.1.5 Přesnost měření

Tento termín označuje těsnost shody výsledku měření s konvenčně pravou hodnotou (referenční hodnotou). Přesnost měření je pojem kvalitativní a lze kvantifikovat pomocí nejistoty měření a výsledku měření. K hodnocení přesnosti měření slouží dvě charakteristiky viz (Obr. 51), kterými jsou správnost a preciznost.

Správnost je informace o pravdivosti a popisuje ji těsnost shody mezi průměrem nekonečného počtu naměřených hodnot a referenční hodnotou, v praxi se jedná o systematickou chybu, která je korigována korekcí (viz výše).

Preciznost je vlastnost, o které vypovídá těsnost shody mezi naměřenými hodnotami z měření opakovaných na stejném prvku za podmínek opakovatelnosti nebo reprodukovatelnosti. Pro popis preciznosti se používají parametry variability, jenž jsou rozpětí R viz (6) a směrodatná odchylka s_x viz (3).

$$R = x_{max} - x_{min} \quad (6)$$



Obr. 51) Hodnocení přesnosti měření

5.1.6 Jakost měřidla

Pokud chceme hodnotit jakost měřidla pomocí nejistoty měření je zapotřebí eliminovat chyby vzniklé vlivem prostředí a vlivem operátora. Tento fakt je jedním z důvodů tvorby automatizovaného měřicího přípravku, který je předmětem této práce.

Dalšími parametry, kterými lze charakterizovat jakost měřidla jsou: strannost, stabilita, linearita, opakovatelnost a reprodukovatelnost.

Strannost

Strannost měření je rozdílem mezi hodnotou referenční a střední hodnotou provedeného měření. Odpovídá systematické chybě.

Stabilita

Stabilita je schopnost odolávat vnějším rušivým vlivům, které by mohli zanášet do měření chyby. Takovýmito vlivy může být například změna teploty, vlhkosti nebo tlaku, opotřebení, změna intenzity či směru vnějšího elektromagnetického pole, mechanické vibrace atd.

Linearita

Linearita je charakterizována rozdílem mezi naměřenými hodnotami napříč celým rozsahem a odpovídajícími referenčními hodnotami. Tato hodnota je běžně udávána v procentech na zdvih (např. 0,6% na $\pm 1\text{ mm}$ při 20°C [28]).

Opakovatelnost měření

Opakovatelnost popisuje míru shody mezi měřeními provedenými v krátkém časovém intervalu na stejném prvku za podmínek opakovatelnosti. Tato hodnota se obvykle udává v μm (např. 0,01 μm)

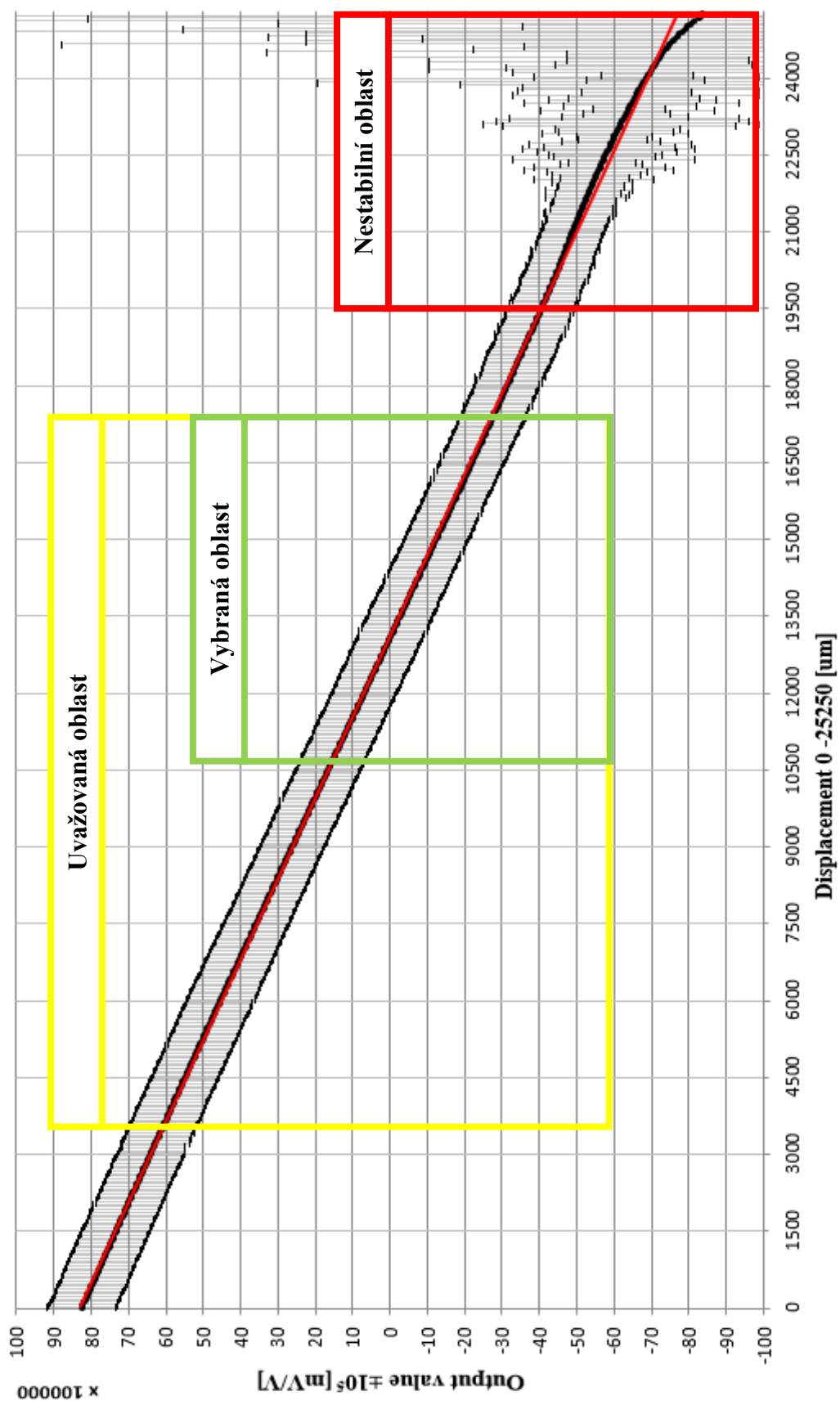
Reprodukovatelnost

Reprodukovatelnost popisuje míru shody mezi měření provedených v krátkém časovém intervalu na stejném prvku za změněných podmínek měření. Tato vlastnost se většinou používá pro stanovení variability výsledků měření způsobené operátory.

5.2 Navržená metodika testů

Pro efektivně provedený celkový test je zapotřebí stanovit pořadí provedení jednotlivých testů. Jako nejvhodnější test pro stanovení dále zkoumaného rozsahu bylo zvoleno měření linearity, jehož cílem je stanovení intervalu ležícím v celkovém rozsahu testovaného snímače, který vykazuje nelepší lineární vlastnosti případně je na něm výrazně nižší hodnota směrodatné odchylky. Tento rozsah pak bude zvolen pro další podrobnější testování snímače. Podrobnější testování zahrnuje měření opakovatelnosti, kdy snímač snímá body vzdálené o daný krok nad a pod testovaným bodem. Zmenšováním kroku do míry jeho bezpečné rozpoznatelnosti po zpracování výsledku. Tento test je proveden ve více bodech zkoumaného rozsahu pro zjištění závislosti opakovatelnosti na poloze. Dalším testem spadajícím pod podrobnější testování snímače je test časové stálosti v jednotlivých bodech napříč rozsahem. Během měření je snímač nastaven do dané polohy a zde je odečtený daný počet hodnot s co nejkratším čase, který je omezen pouze možnostmi vyhodnocovací elektroniky. Posledním podrobnějším testováním je měření hysterezního chování snímače. Během tohoto testu je snímač nastavován po jednom kroku v rámci limitu daného nastaveným rozsahem. Rozsah snímač proměří ve směru jak nahoru, tak dolů a po vyhodnocení testu je sledován rozdíl mezi hodnotami pro jeden a druhý směr ve stejném bodě. Toto měření by mělo být provedeno pro více různých kombinací kroků a rozsahů v rámci zkoumaného rozsahu, pro zjištění závislosti hystereze na poloze a velikosti kroku.

Linearity across entire range (including 300x amplified uncertainty of measurement)



Obr. 52) Výstup měření linearity (graf závislosti polohy na výstupní hodnotě)

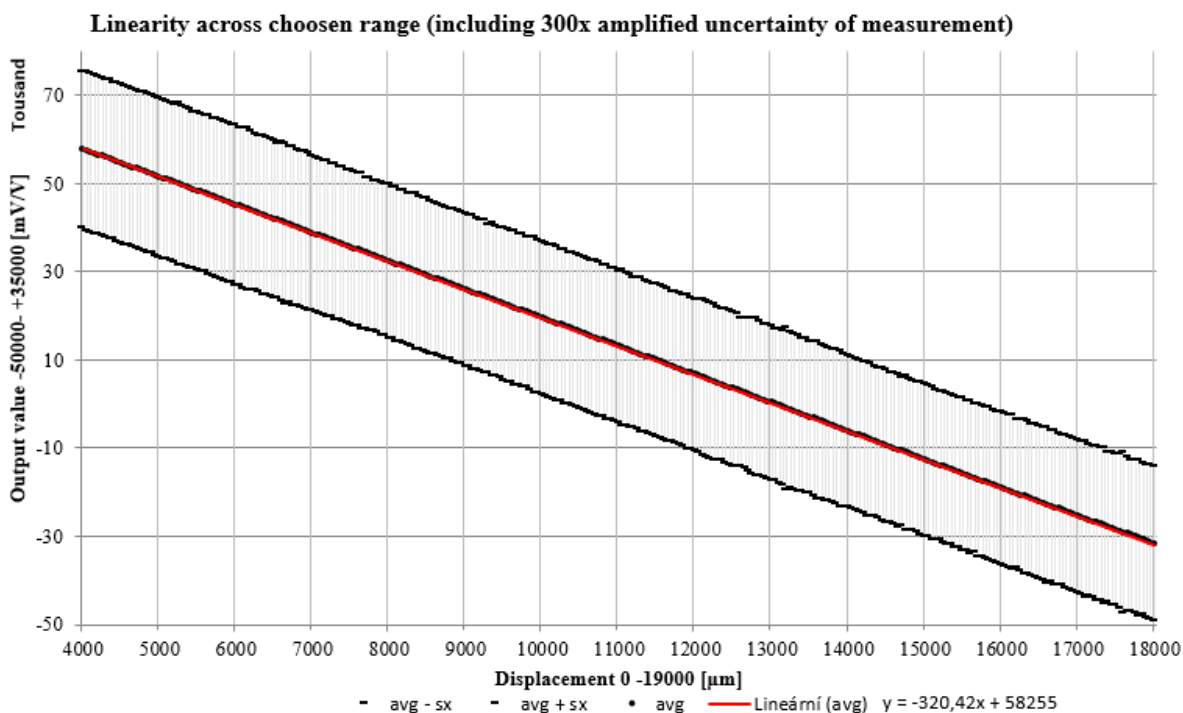
5.3 Úvodní měření linearity

Vstupní informací pro jakékoliv další testování snímače je míra jeho lineárního chování a rozptyl hodnot při nastavení snímače do poloh napříč rozsahem. Znat chování snímače je důležité z důvodu zvolení oblasti zatěžování a dalšího zkoumání mimo oblasti s velkou nejistotou a oblasti vykazující nelineární chování.

Díky automatizovanému testovacímu přípravku bylo možné nastavit vstupní test na poměrně jemné krokování po kroku 50 μm . Jelikož testovací snímač v kombinaci s použitou vyhodnocovací elektronikou umožňuje zdvih kolem 25 mm bylo nutné měření rozdělit do úseků daných maximálním zdvihem testovacího přípravku, který je 7 mm. Po každém kroku je nutné snímač ručně přestavit do další pozice, která odpovídá poslední pozici minulého kroku a měření pokračuje. Měření bylo provedené v rozsahu, který byl limitovaný rozsahem A/D převodníku, jenž byl maximálně využit.

5.3.1 Měření

První měření bylo nastavené s již zmíněným krokem 50 μm , s rozsahem 7000 μm , pouze jedním opakováním a v každém bodě bylo odečteno 100 hodnot. Tato měření byla prováděna do doby, dokud nebylo dosaženo limitu A/D převodníku. Tyto hodnoty byly ručně spojeny tak aby tvořili jeden soubor dat popisující chování v celém rozsahu. Podařilo se proměřit rozsah 25250 μm který odpovídá intervalu výstupních hodnot -83500 mV/V až 82500 mV/V. Z tohoto souboru dat byl pro každý bod spočten aritmetický průměr a výběrová směrodatná odchylka naměřených hodnot (Obr. 52). Na pravé straně grafu, od posunutí 19500 μm a dál v kladném směru, je výstupní hodnota více nestálá, jedná se o nestabilní oblast, ve které je snímač zatěžován na hranici svých mechanických možností. Po podrobném prozkoumání byl pro další zkoumání zvolen interval, jenž ohraničují hodnoty posunutí 11 mm a 18 mm. Tento interval odpovídá intervalu výstupních hodnot -31500 mV/V až 13000 mV/V.

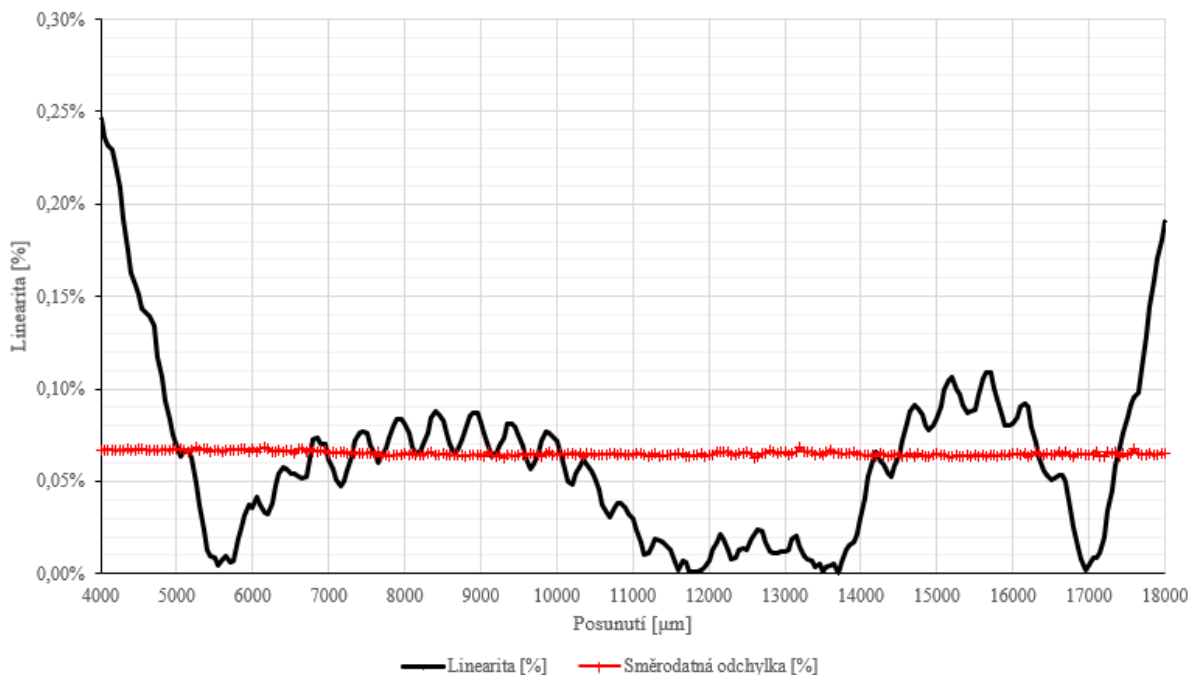


Obr. 53) Uvažovaná oblast pro testování (závislost výstupní hodnoty na poloze)

Jako uvažovaná oblast byl zvolen interval ohraničený hodnotami posunutí 4000 μm až 18000 μm , jelikož dle grafu (Obr. 52) zde snímač vykazuje nejlineárnější chování. Pro tento interval byla vyhodnocena linearita jako procentuální podíl vzdálenosti hodnoty aritmetického průměru od ideální hodnoty dané aproximační přímkou danou funkcí $y = -320,42 \cdot x + 58255$ na celkovém zkoušeném rozsahu (Obr. 53). Na (Obr. 53) je vynesena aritmetický průměr naměřené výstupní hodnoty v závislosti na poloze měřící roviny. Graf obsahuje pro názornost 300x zvětšenou nejistotu měření v každém bodě. Červeně je zde pak vyznačena přímka popisující ideálně lineární chování. Dále byla vyhodnocena poměrná směrodatná odchylka daná jako podíl směrodatné odchylky s_x na měřeném rozsahu.

5.3.2 Vyhodnocení

Po výstupem měření linearity na rozsahu uvažovaném jako rozsah vhodný pro použití snímače je graf (Obr. 54) ze, kterého lze vyčíst, že při neuvažování extrémních hodnot nacházející se na intervalech cca 4 ÷ 5 mm a 17,5 ÷ 18 mm linearita nedosahuje ani hodnoty 0,1 % při rozsahu $\pm 9,5$ mm což je na pilotní test vynikající hodnota v porovnání s běžnými indukčními snímači, které dosahují maximálně hodnoty 0,25 % při rozsahu ± 1 mm. (při hodnocení linearity znamená menší hodnota lepší vlastnosti).



Obr. 54) Poměrná odchylka od linearity a poměrná směrodatná odchylka

Hodnota poměrné nejistoty typu A zastoupené směrodatnou odchylkou nepřesahuje hodnotu 0,07 % což pro uvažovaný rozsah 14 mm znamená maximální odchylku $\pm 9,8 \mu\text{m}$, která je v porovnání s běžně vyráběnými indukčnostními snímači dosahuje velmi vysoké hodnoty, pokud ji bereme absolutně ale pokud budeme hodnotit přesnost z poměrného hlediska jedná se o hodnotu odpovídající nižším standardům dnešních indukčnostních snímačů (např. pro snímač o rozsahu 1000 μm odpovídá hodnota linearity 0,07% rozsahu maximální odchylky $\pm 0,7 \mu\text{m}$).

5.3.3 Závěr z úvodního měření

Během úvodního měření se podařilo naměřit nelinearitu maximálně 0,07 % na $\pm 7 \text{ mm}$ při 23,2°C. Tato hodnota linearity odpovídá teoreticky maximální odchylce od ideální přímky 9,8 μm . Průměrná hodnota směrodatné odchylky byla 9,1 μm a její maximální hodnota během provedeného měření pak 9,6 μm . Z úvodního měření vyplývá fakt, že během dalšího vývoje snímače bude zapotřebí věnovat pozornost především snížením nejistoty měření typu A a naopak pravděpodobně parametrem, kterému se nebude třeba až tolik věnovat je linearita, jelikož již teď dosahuje hodnot přesahující dnešní standardy.

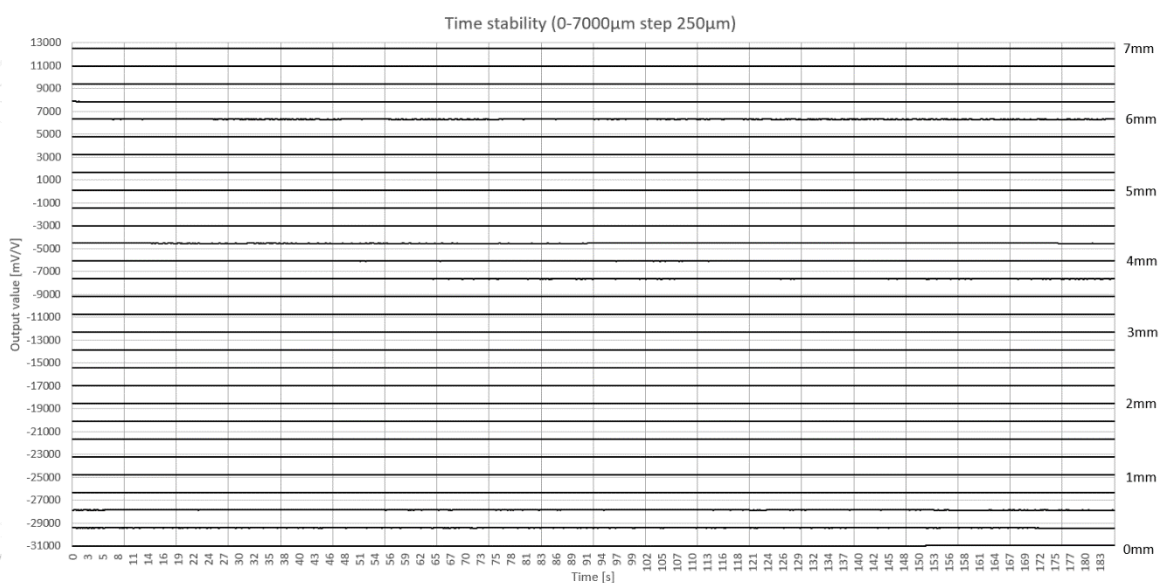
Z praktického důvodu, kterým je jen 7 mm rozsah měřícího přípravku, je zvolen pro další testování rozsah 11 mm ÷ 18 mm. Později bych se rád věnoval proměření rozsahu 7 mm ÷ 14 mm, jelikož jak vyplývá z grafu linearity a poměrné směrodatné odchylky (Obr. 54) rovnoměrně lineární chování vykazuje snímač v rozsahu zhruba 5 mm ÷ 17,5 mm.

5.4 Měření časové stálosti

Dalším testem snímače je prověření jeho časové stálosti. Tento parametr je důležitý především pro delší měření, kde by chyba zanesená vlivem změn okolních podmínek a samovolného driftu, mohla mít významný vliv. Při špatném výsledku testu časové stálosti by již nemělo význam dále v testování pokračovat. Na tento test mají, velký vliv parametry okolního prostředí, jelikož měření probíhá poměrně dlouhou dobu a změny vnějších podmínek mají delší čas se projevit. Měření probíhá na stejném měřicím přípravku, a tudíž by muselo být rozděleno po 7 mm, kdybychom chtěli proměřit celý rozsah. Ale jelikož bylo rozhodnuto dále zkoumat přednostně rozsah $11 \div 18$ mm není již rozdělení intervalu do úseků po 7 mm potřeba.

5.4.1 Měření

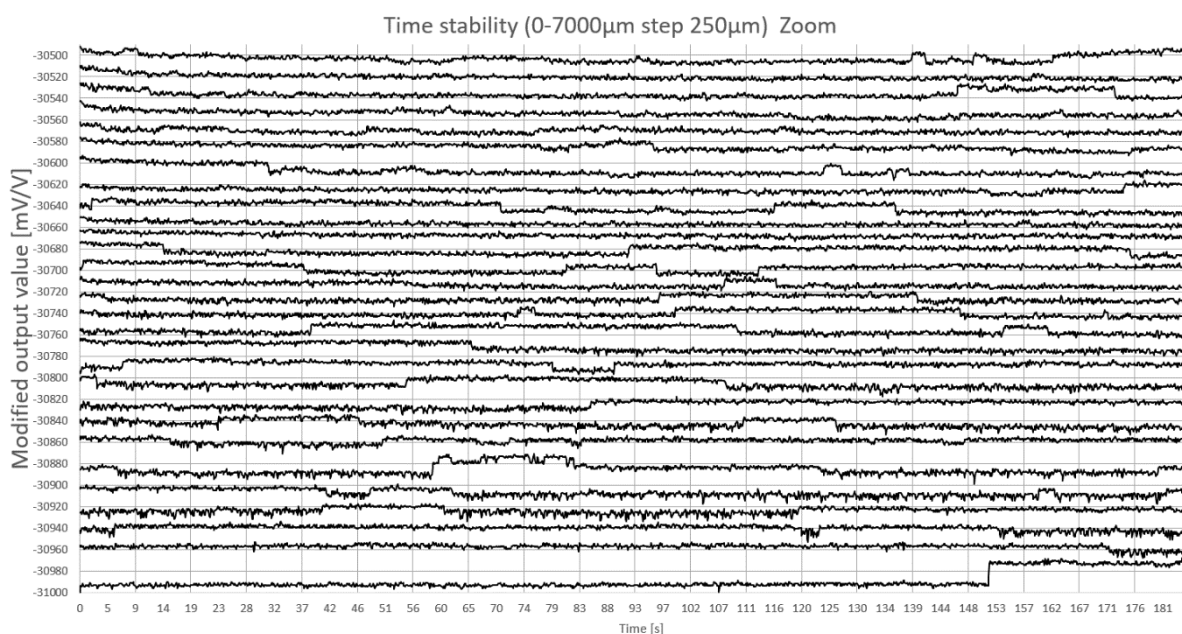
Pro toto měření byl nastaven inkrement vzdálenosti $250 \mu\text{m}$, počáteční poloha $18000 \mu\text{m}$, rozsah $7000 \mu\text{m}$, počet cyklů 1, směr zatěžování v záporném smyslu, počet hodnot odečítaných v jednom bodě byl nastaven na 10000 a měření probíhalo při teplotě $23,8^\circ\text{C}$ a relativní vlhkosti 38,7 %. Vysoká hodnota počtu odečtených hodnot v jednom bodě byla nastavena z důvodu možnosti využít pro toto měření stejný programový cyklus jako pro měření linearitu nebo měření opakovatelnosti. V praxi měření probíhalo úplně shodně jako měření linearitu jen s tím rozdílem že v jedné pozici místo 100 hodnot jako u měření linearitu naměří hodnot 10000. Naměřit tento počet hodnot trvá přibližně 3 minuty což znamená že proměření celého rozsahu 7 mm zabere kolem 1,5 hodiny. Po tomto čas je potřeba zajistit co nejstálější podmínky opakovatelnosti. Naměřené hodnoty viz (Obr. 55) byly zpracovány v programu MS Excel.



Obr. 55) Závislost výstupní hodnoty v závislosti na čase (krok $250 \mu\text{m}$)

5.4.2 Vyhodnocení měření

Protože pro vyhodnocení testu časové stálosti pouze vykreslená naměřená data do grafu nestačí, jelikož jsou časové změny příliš malé a nelze z něj vyčíst nějaký závěr. Bylo zapotřebí data matematicky upravit tak aby byly odečteny jednotlivé vzdálenosti mezi kroky, tak že minimální hodnota následujícího měření odpovídá maximální hodnotě kroku minulého viz (Obr. 56). Po vynesení těchto hodnot do grafu z něj lze vyčíst, že stabilita hodnoty pro různé polohy napříč rozsahem je přibližně stejná. Jsou zde místy skokové změny jejichž přítomnost má na svědomí pravděpodobně mechanické rušení z okolí, které nebylo dostatečně dobře eliminováno.

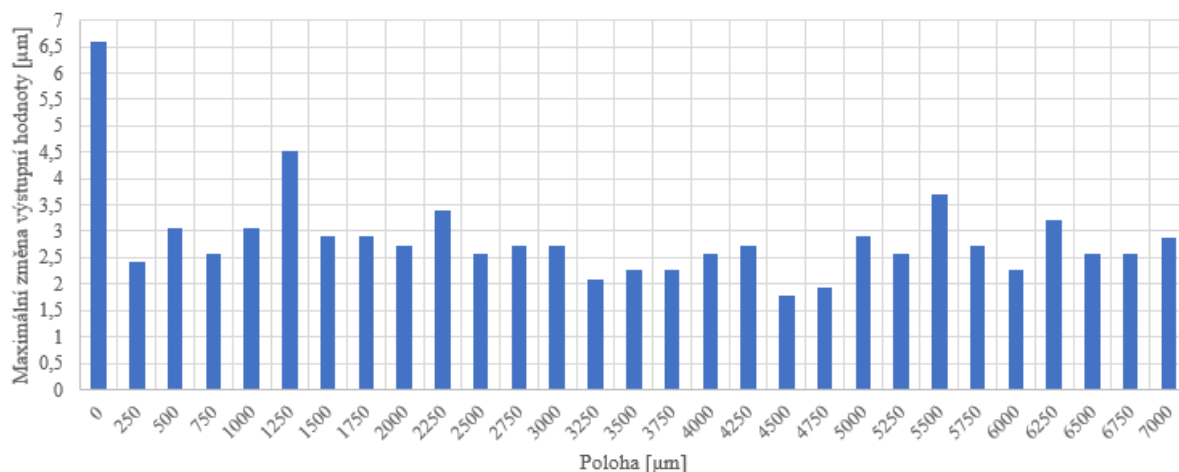


Obr. 56) Upravená data měření časové stálosti

Pro kvantifikování časové stálosti byl použit parametr drift, který popisuje, o jakou maximální hodnotu se výstupní hodnota posunula za daný čas. Hodnota driftu byla získána odečtením minimální od maximální výstupní hodnoty, tento rozdíl pak udává velikost maximální změny během měření v jednom bodě.

5.4.3 Závěr měření

Výstupem z tohoto měření je závislost hodnoty maximálního driftu na poloze kdy průměrná hodnota dosáhla 2,87 μm a maximální hodnota pak dosáhla 6,6 μm . Tato maximální hodnota je však z velké části tvořena skokovou změnou výstupní hodnoty, která je příkládána vnějšímu mechanickému rušení, a tudíž ji nelze považovat za příliš vypovídající.



Obr. 57) Hodnoty maximálního driftu během měření časové stálosti

Chování snímače lze považovat za dostatečně stálé, a proto má význam pokračovat v testování. Stabilní chování je předpokladem pro následující měření opakovatelnosti.

5.5 Měření opakovatelnosti

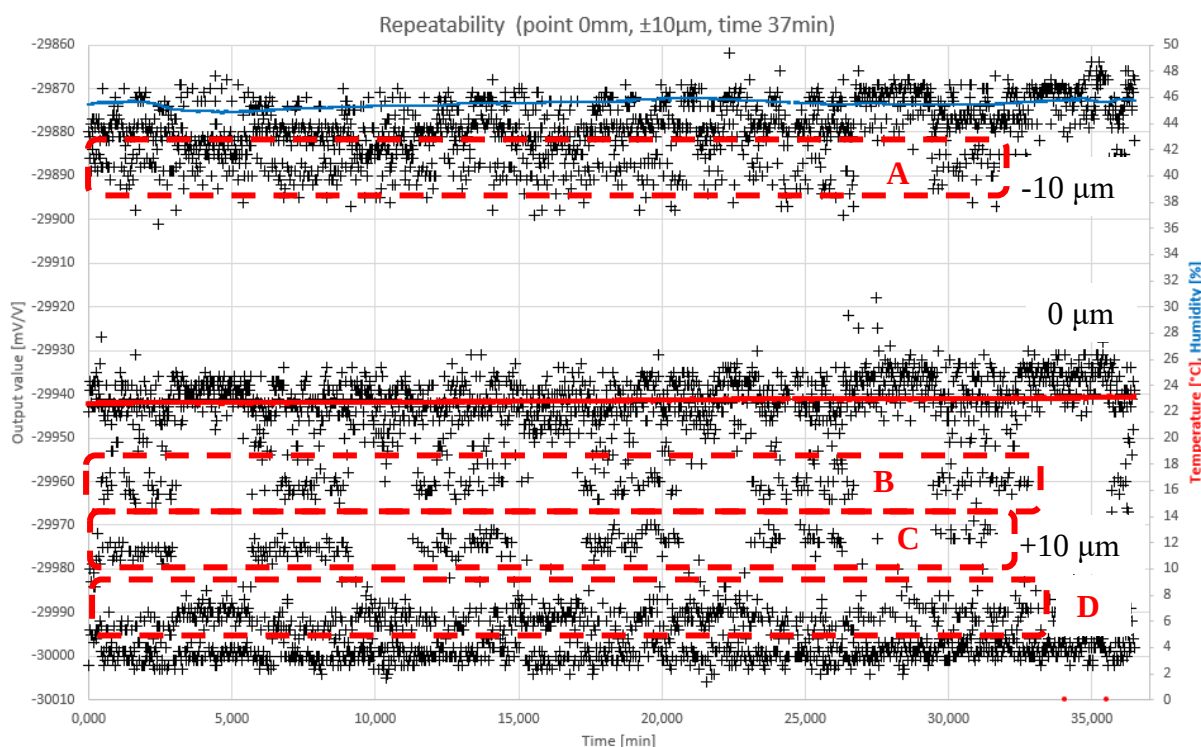
Opakovatelnost je jedním ze základních parametrů pro hodnocení jakosti snímačů. Popisuje těsnost shody mezi výsledky vícenásobného měření téže hodnoty za dodržení podmínek opakovatelnosti. Jako test opakovatelnosti bylo navrženo měření třech bodů vzdálených od sebe danou vzdálenost, do kterých je nastavena měřicí rovina vždy z jednoho směru.

5.5.1 Měření

Test opakovatelnosti byl proveden opět pomocí základního programu na automatizovaném přípravku, kde bylo nastaveno 2000 opakování, rozsah 20 μm, krok 10 μm, směr zatěžování v záporném smyslu a v každém bodě byla odečtena pouze jedna hodnota. Jelikož toto měření probíhalo v podmínkách, kde bylo nesnadné zajistit stálé podmínky měření, byla teplota a vlhkost měřena v průběhu celého měření trvajícího 37 minut. Celkem byly prozkoumány tři body vzdálené 7 mm odpovídající bodům posunutí 4 mm, 11 mm a 18 mm viz (Obr. 52) kdy tyto body mají označení pro účely tohoto měření 14 mm, 7 mm a 0 mm (jelikož jako první bod byl měřen bod v posunutí 18 mm a od něj se pokračovalo po kroku -7 mm). V každém cyklu začíná měření o hodnotu kroku nad bodem +10 μm (tzn. začíná v bodě +20 μm) a následně se vrátí do bodu +10 μm. Tento pohyb je proveden pro zajištění nastavení do snímaného bodu ze stejného směru pro zamezení zanášení chyby vznikající následkem hysterezního chování. Dále pak již probíhá cyklování po kroku -10 μm (střídají se body +10 μm, 0 μm a -10 μm).

5.5.2 Vyhodnocení měření

Výstupem z měření opakovatelnosti je rozptyl hodnot pro daný bod při opakovaném měření. Tento rozptyl udává interval mezi maximální a minimální hodnotou v daném bodě. Pro znázornění rozložení velikosti chyb byl použit histogram. Histogram je vhodný pro odhalení systematických chyb, jelikož pokud by výsledky měření nezatěžovala systematická chyba měl by se histogram velikosti chyb podobat pravé polovině Gaussovy křivky. Intervaly chyb, které mají formu nějakého peaku v histogramu a neodpovídají předpokládanému průběhu dle Gausse lze předpokládat, že se jedná o hodnoty výrazně zatížené systematickou chybou. Takto odhadnuté oblasti systematických chyb jsou pro přehlednost vyznačeny jak v histogramech (Obr. 59),(Obr. 60),(Obr. 61),(Obr. 63),(Obr. 64), (Obr. 65) ,(Obr. 67), (Obr. 68) a (Obr. 69) tak i v grafech naměřených hodnot (Obr. 58),(Obr. 62) a (Obr. 66) červenou čárkovanou čarou.

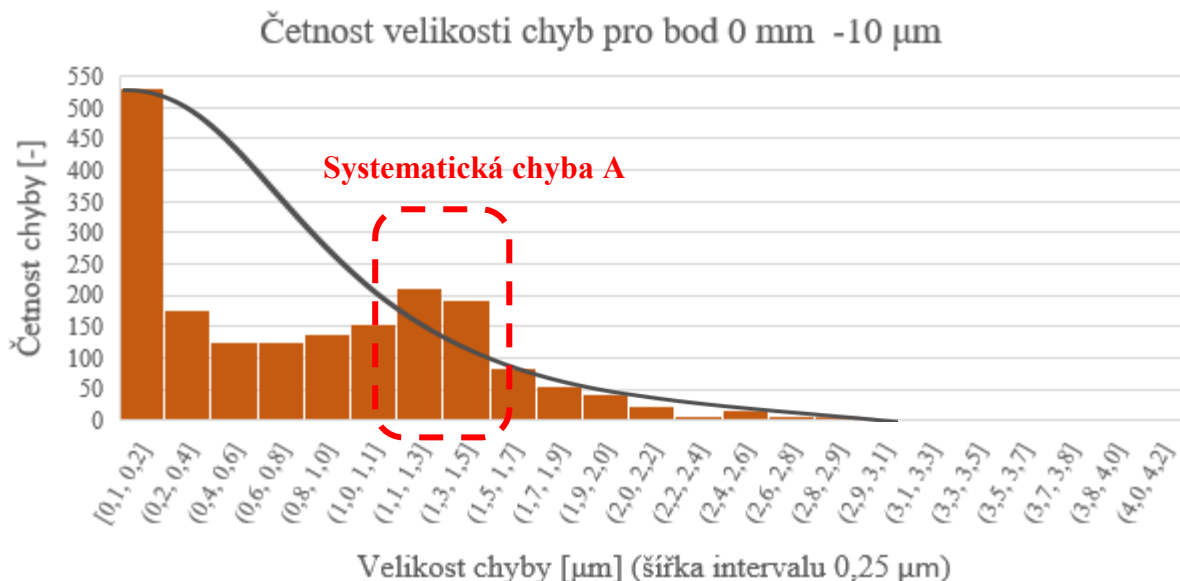


Obr. 58) Naměřené hodnoty pro bod v poloze 0 mm

Bod 0 mm $\pm 10 \mu\text{m}$

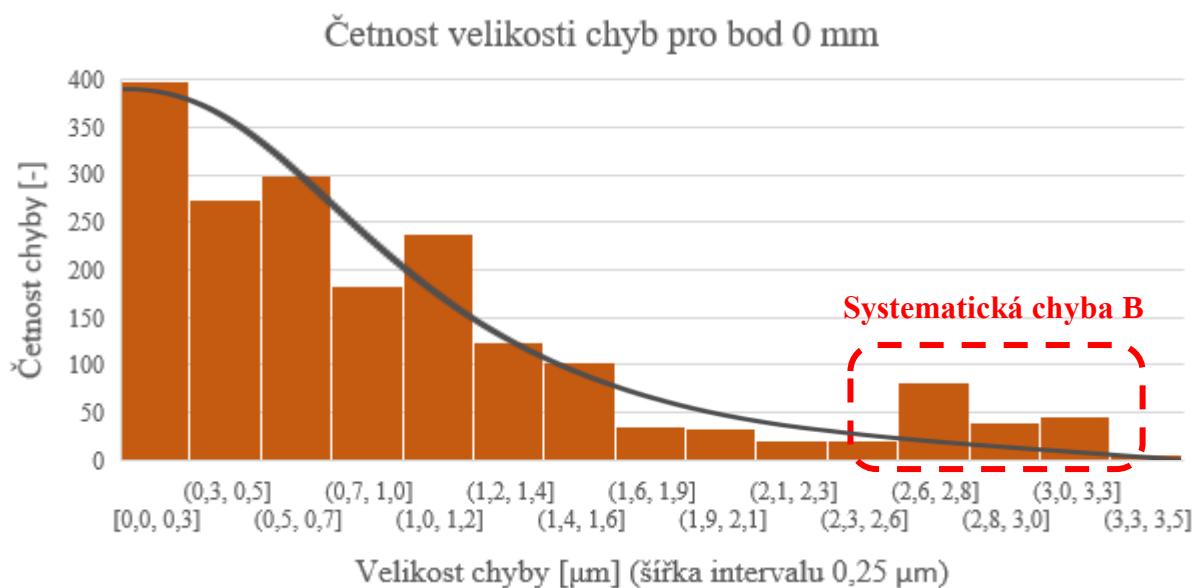
V bodě 0 mm snímač během testování opakovatelnosti vykazoval stálé chování (během měření dlouhého 37 minut nevykazoval žádný významný drift výstupní hodnoty). V grafu naměřených hodnot (Obr. 58) je patrné, že jsou hodnoty zatížené systematickými chybami a je zapotřebí vyjádřit jejich významnost. Pro tento účel byl použit histogram, jak je zmíněno v úvodu této

kapitoly. Významnost chyby představuje poměr peaku ku předpokládanému tvaru Gaussovy křivky (jedná se o poměr plochy nad křivkou ku ploše pod křivkou).



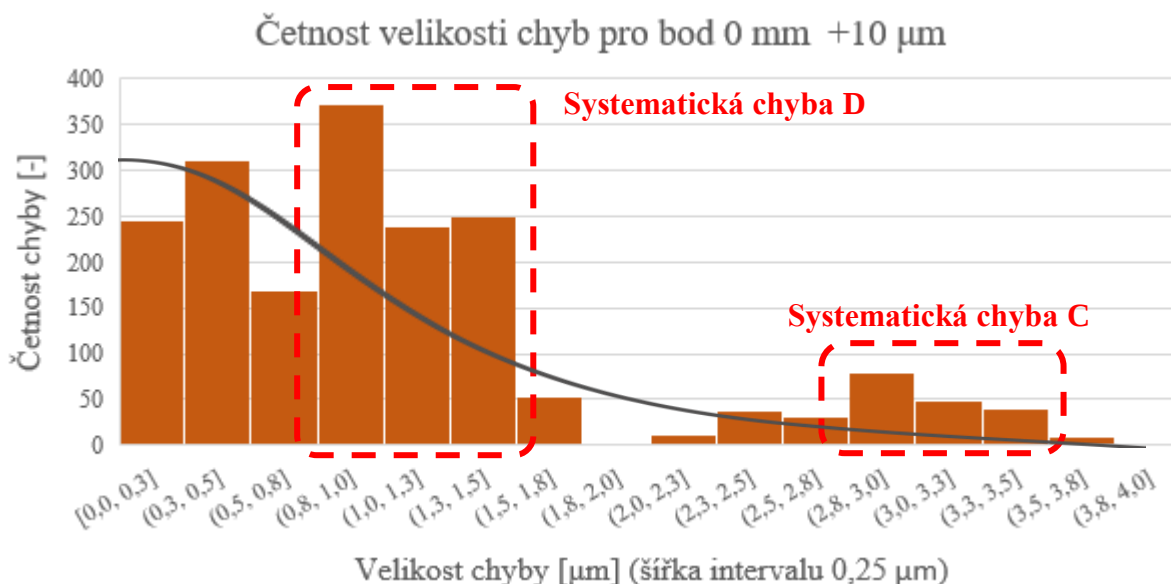
Obr. 59) Četnost velikosti chyb pro bod 0 mm -10 μm

Dle tohoto pravidla lze říct, že nejvýznamnější chybou je chyba C (Obr. 61) a jen o něco méně významná je chyba B (Obr. 60). I když se může zdát že chyba A (Obr. 59) a D (Obr. 61) je výraznější než C a B ale je potřeba uvážit, že se již tolik neodklánějí od průběhu Gaussova rozložení. V oblastech chyb C a B kde by křivka Gaussova rozložení měla stále klesat k nule je i zdánlivě malý peak významnější než větší peak v oblasti jejího maxima.



Obr. 60) Četnost velikosti chyb pro bod 0 mm

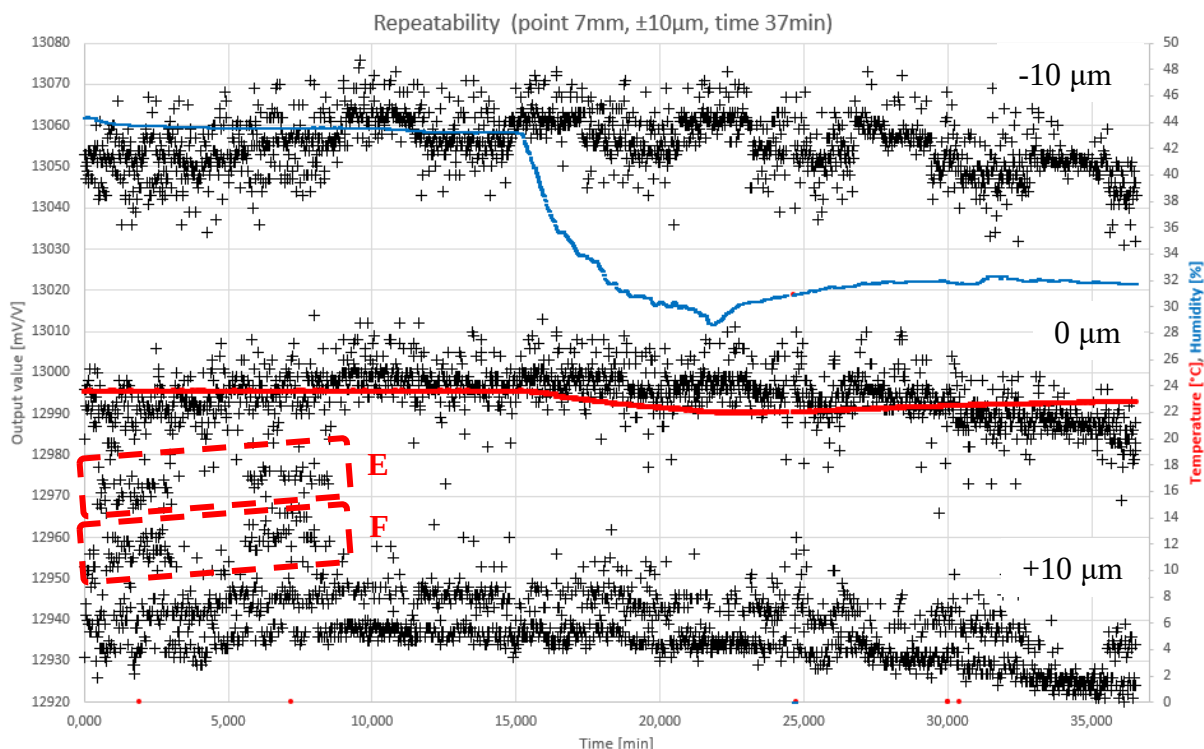
V bodě 0 mm -10 μm dosahoval rozptyl maximální hodnoty 7,4 μm a průměrná chyba hodnoty 1,1 μm . V bodě 0 mm dosahoval naměřený rozptyl maximální hodnoty 7,4 μm a průměrná chyba hodnoty 1,0 μm . V bodě 0 mm +10 μm dosahoval rozptyl maximální hodnoty 7,5 μm a průměrná chyba hodnoty 0,8 μm .



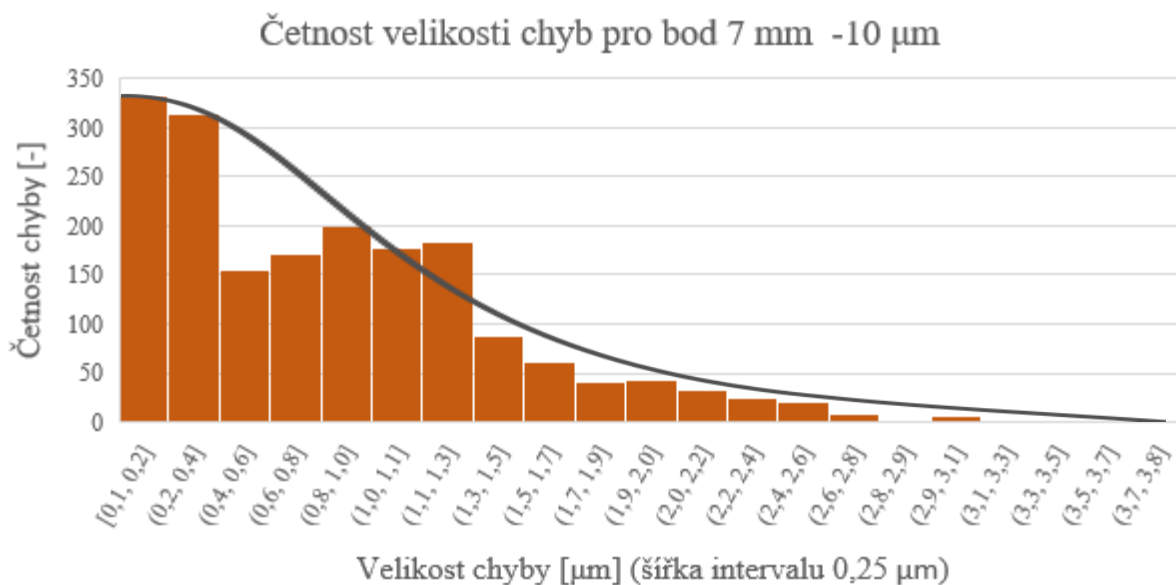
Obr. 61) Četnost velikosti chyb pro bod 0 mm +10 μm

Bod 7 mm $\pm 10 \mu\text{m}$

V bodě 7 mm se již začíná více projevovat nestálost snímače, a to formou výraznějšího driftu. Ten je nejvíce patrný z grafu naměřených hodnot (Obr. 62), kde se projevuje jako obloukové zakřivení naměřených hodnot. Měření v tomto bodě nevykazuje tak vysoké zatížení systematickými chybami jako měření v bodě 0 mm a kdybychom zkoumali kratší interval na kterém se tolik neprojeví drift vykazoval by tento bod vhodnější chování než bod 0 mm. Během tohoto měření se nepodrželo udržet stálé podmínky okolí a zhruba v půlce měření došlo k výraznému poklesu vlhkosti, který ovšem jak je z grafu patrné neměl tento pokles výrazný vliv na výsledek měření.



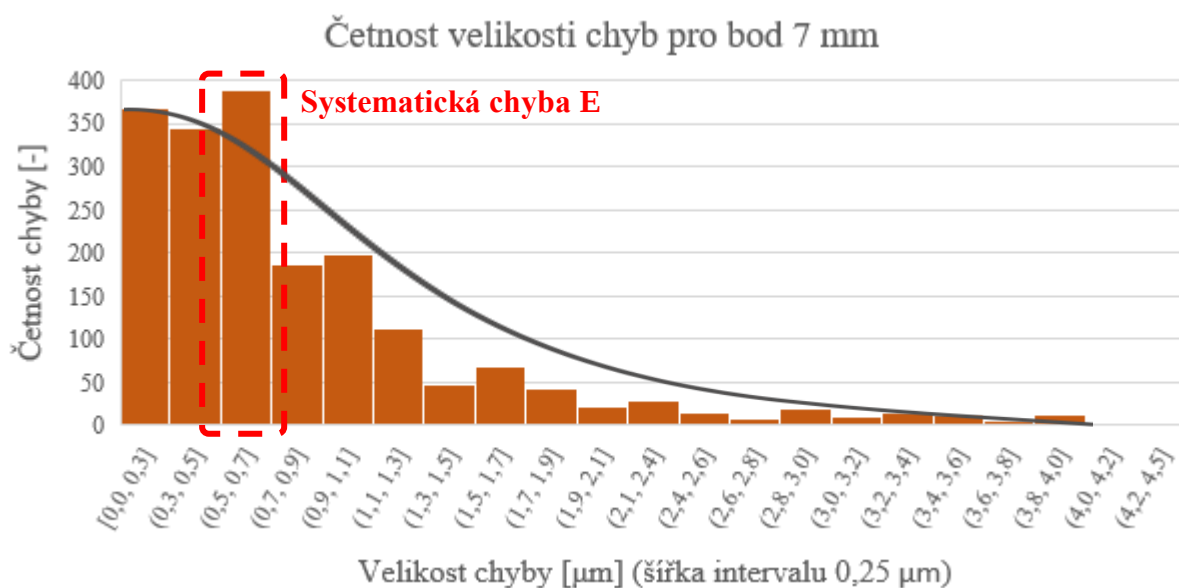
Obr. 62) Naměřené hodnoty pro bod v poloze 7 mm



Obr. 63) Četnost velikosti chyb pro bod 7 mm -10 μm

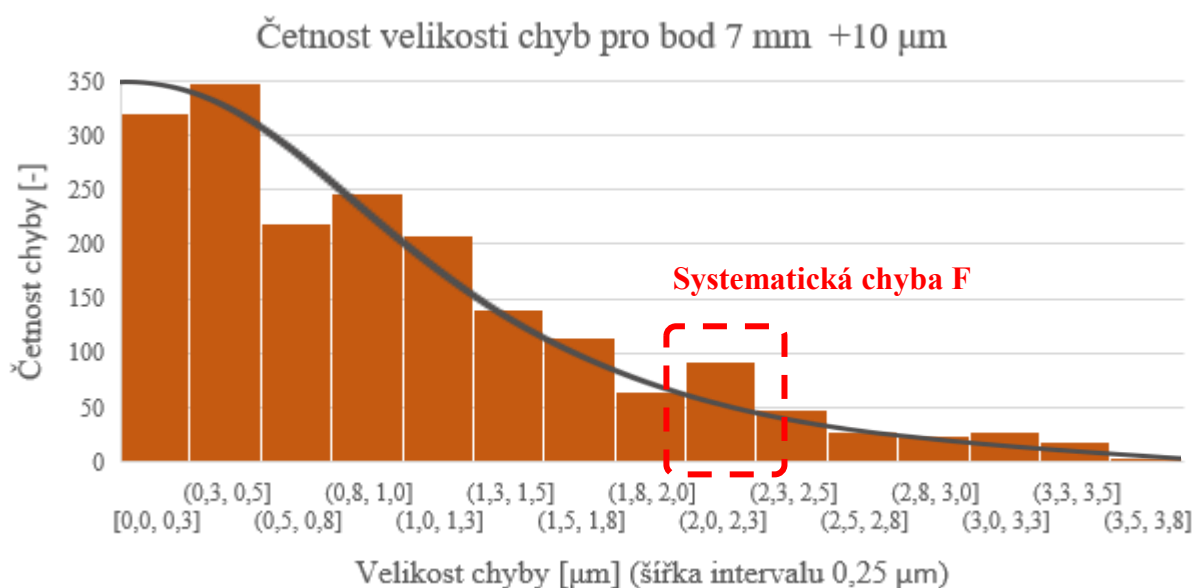
Drift tohoto měření je dostatečně velký, aby snížil vypovídací hodnotu histogramů pro odhalení systematických chyb. Zakřivením dat dochází k „normalizování“ rozložení dat kolem průměrné hodnoty (přímky) pro vyšší vypovídací hodnotu (snížení vlivu driftu) by bylo zapotřebí počítat chybu pomocí klouzavého průměru. Tato komplikovanější metoda by měla význam při testech pokročilejší verze snímače, ovšem pro toto pilotní testování tohoto prototypu snímače nemá

význam provádět zbytečně pokročilé zpracování dat. Výstupem těchto testů má být orientační zmapování chování snímače, sloužící jako vstup pro návrh dalších designů a testů snímače.



Obr. 64) Četnost velikosti chyb pro bod 7 mm

Pro bod 7 mm +10 μm měl rozptyl maximální hodnotu 6,5 μm a průměrná chyba dosáhla hodnoty 1,0 μm . V bodě 7 mm byl naměřen rozptyl 7,2 μm a průměrná chyba byla 0,8 μm . V posledním bodě 7 mm -10 μm dosahoval rozptyl maximální hodnoty 7,0 μm a průměrná chyba hodnoty 0,8 μm .

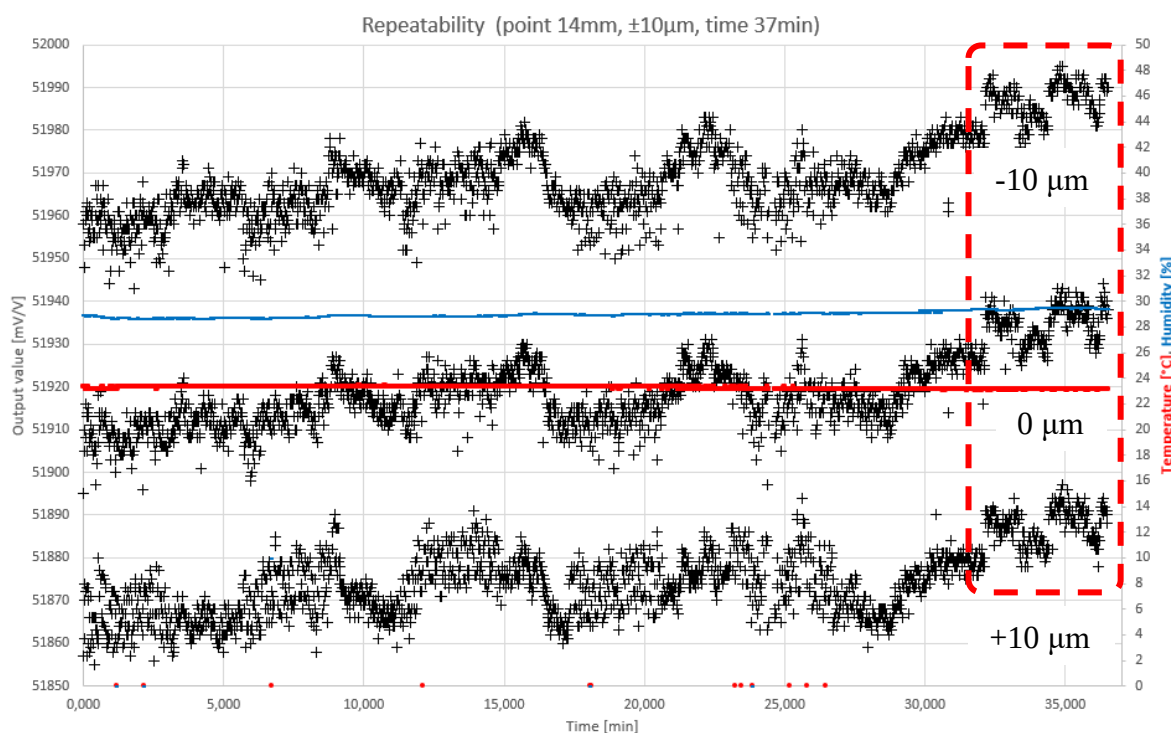


Obr. 65) Četnost velikosti chyb pro bod 7 mm +10 μm

Jak lze vidět na (Obr. 62) tak menší oblasti systematických chyb se i méně projeví při vynesení naměřených chyb do histogramů. Největší chybou je F a dále pak chyba E. Tyto chyby na (Obr. 62) vypadají poměrně stejně významně ale na histogramech (Obr. 64),(Obr. 65) má chyba F mnohem větší poměr části nad grafem ku části pod grafem. Toto je způsobeno driftem výstupních hodnot. Jelikož se chyba F se nachází vně oblouku vzniklým driftem a tudíž je „dál“ od průměrné hodnoty, na rozdíl od chyby E, která je uvnitř oblouku a je tedy mnohem blíže průměrné hodnotě.

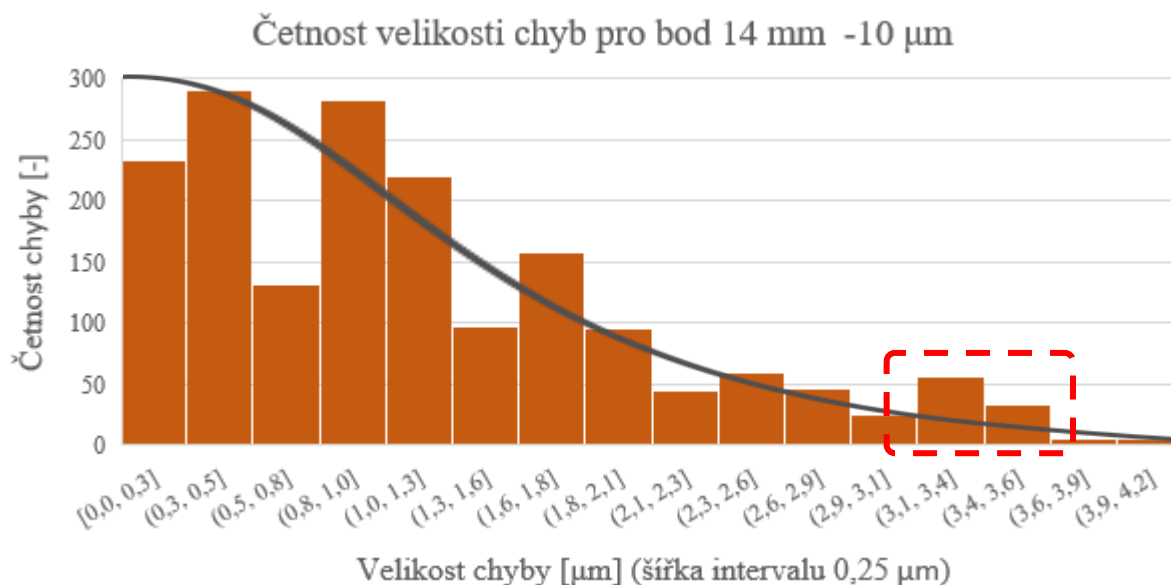
Bod 14 mm $\pm 10 \mu m$

Po vynesení naměřených hodnot do grafu (Obr. 66) je evidentní, že měření je v tomto bodě značně nestálé ale nevykazuje chování, které by mohlo být označeno jako zatížení systematickou chybou. Příčina takto nestálého chování (v porovnání s bodem v poloze 0 mm) není zřejmá, jelikož vlivem změny teploty nebo vlhkosti tyto změny být způsobeny nemůžou a parametry okolního prostředí se podařilo během měření udržet ve velmi úzkém intervalu.



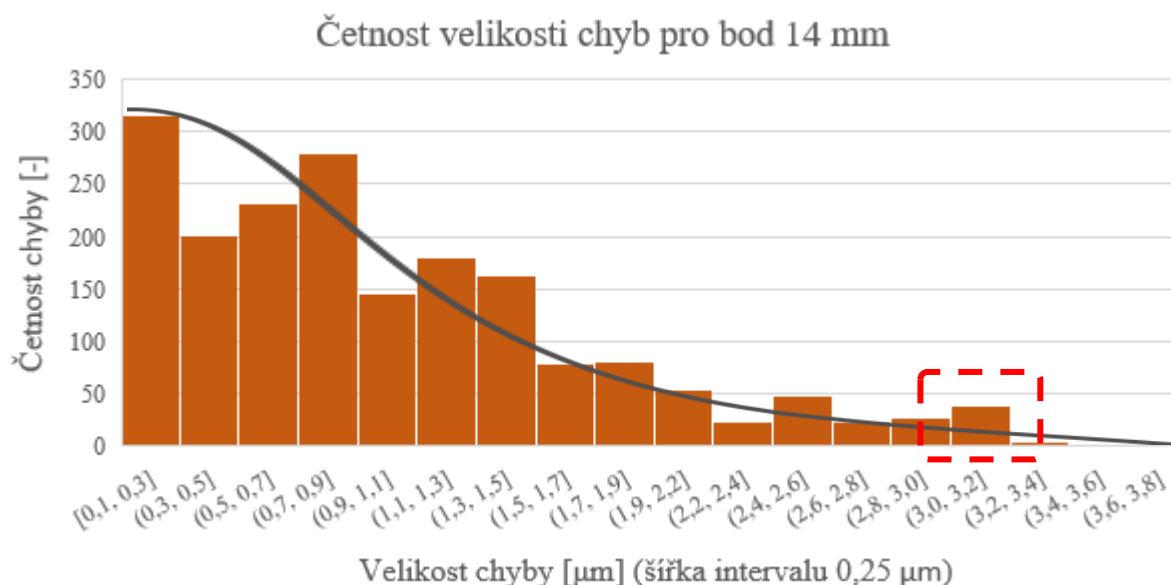
Obr. 66) Naměřené hodnoty pro bod v poloze 14 mm

Dle prvního posouzení grafu (Obr. 66), lze předpokládat, že histogramy velikosti chyb budou pravděpodobně poměrně odpovídat normálnímu rozložení. Příčinou nízké vypovídací hodnoty je nestálé chování výstupní hodnoty, které „normalizuje“ rozložení kolem průměrné hodnoty.



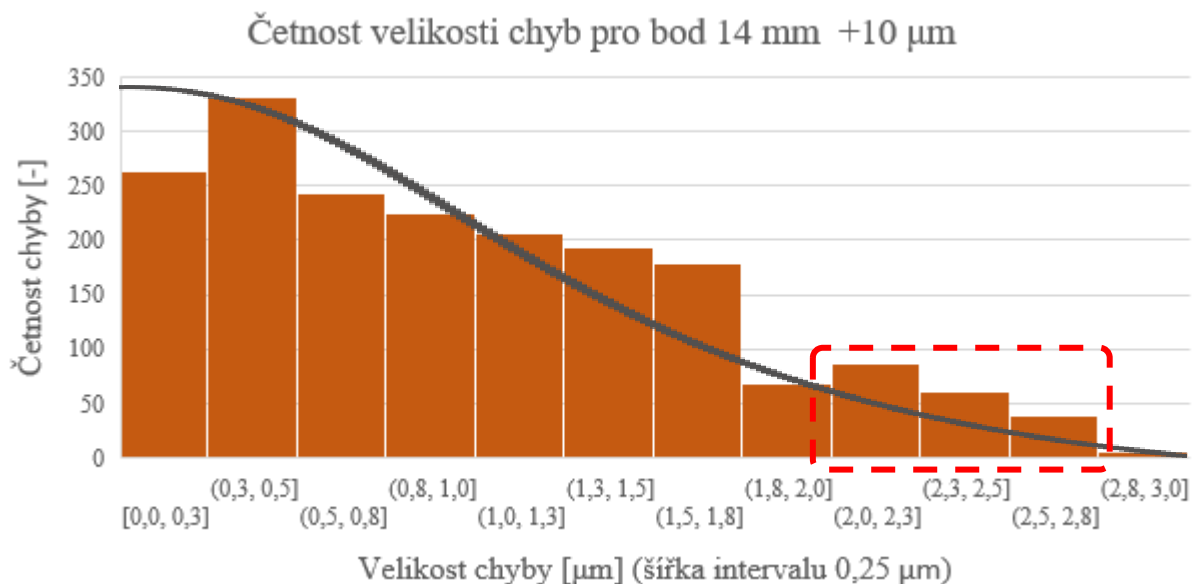
Obr. 67) Četnost velikosti chyb pro bod 14 mm -10 μm

V bodě, který odpovídá posunutí 14 mm se snímač choval ve všech třech bodech velice podobně. Jediný patrný rozdíl je stoupající citlivost na neznámý rušivý vliv v záporném směru (v bodě 14 mm -10 μm nejvyšší citlivost), způsobující drift měřené veličiny. Pokud bychom hodnotili toto měření po kratších časových intervalech mohli bychom říct, že snímač v poloze 14 mm vykazuje nejlepší opakovatelnost, jelikož je poměrně málo zatížen systematickými chybami. Naopak vykazuje nejnestálější chování.



Obr. 68) Četnost velikosti chyb pro bod 14 mm

Na výsledcích měření všech tří bodů je patrná stejná skoková změna výstupní hodnoty. Tato chyba se projevila na všech histogramech tohoto bodu. Příčina této rázové změny je neznámá a není vyloučené, že se jedná o stejný zdroj chyby jako je zdroj ovlivňující nestálé chování v tomto bodě.

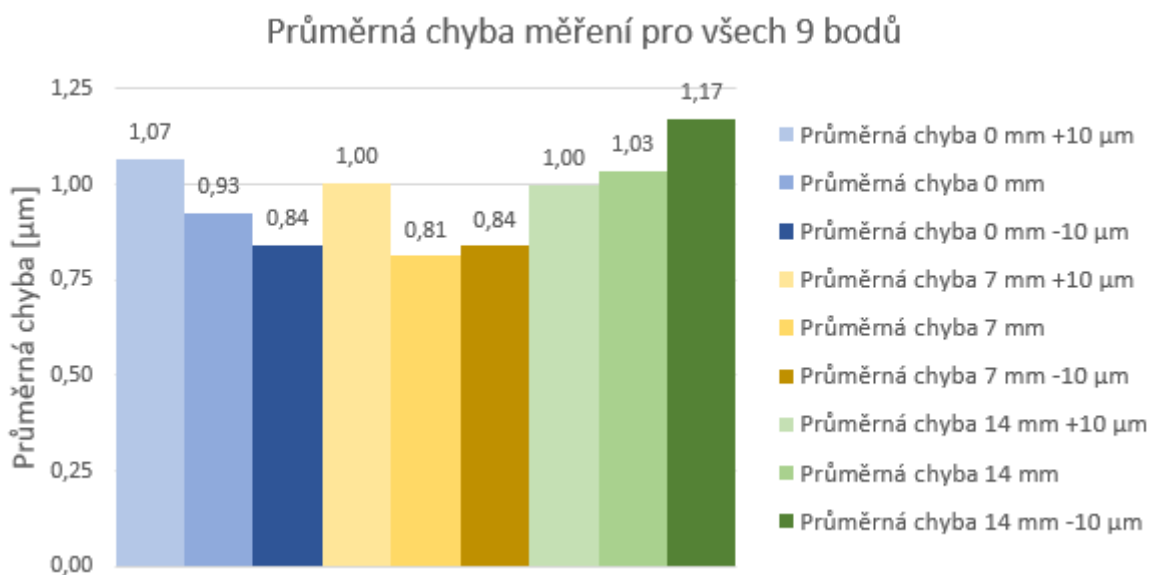


Obr. 69) Četnost velikosti chyb pro bod 14 mm +10 μm

Pro bod 14 mm +10 μm měl rozptyl maximální hodnotu 5,8 μm a průměrná chyba dosáhla hodnoty 1,0 μm. V bodě 14 mm byl naměřen rozptyl 7,1 μm a průměrná chyba byla 1,0 μm. V posledním bodě 14 mm -10 μm dosahoval rozptyl maximální hodnoty 8,2 μm a průměrná chyba hodnoty 1,2 μm.

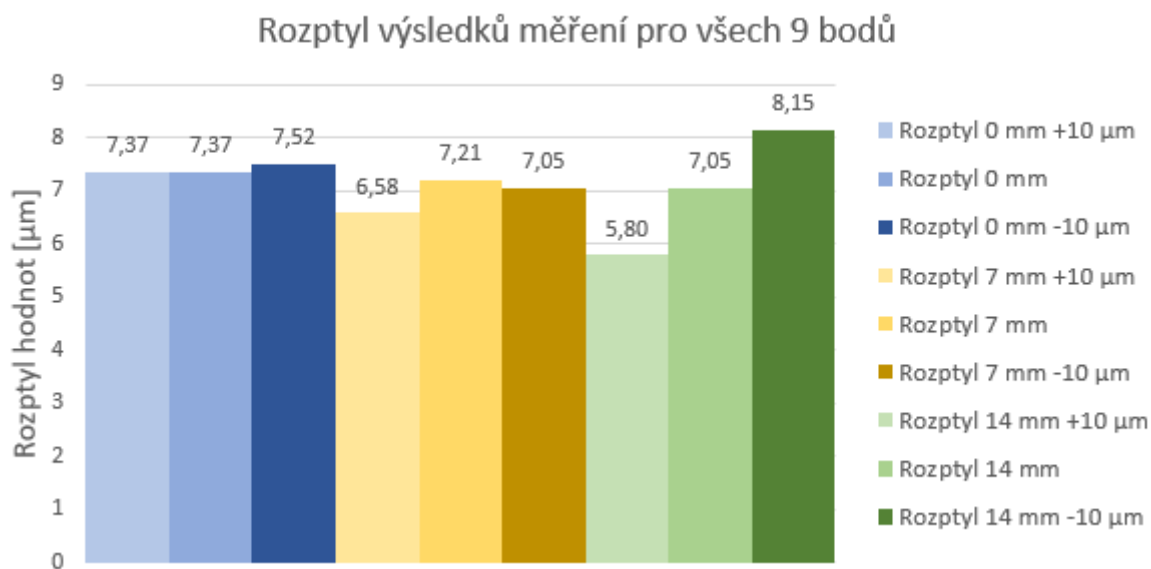
5.5.3 Závěr měření opakovatelnosti

Pokud znázorníme výsledky dílčích měření vedle sebe, je zřejmé že nejmenší průměrnou chybu (Obr. 70) a nejmenší rozptyl (Obr. 71) mají body 0 mm a 7 mm. Bod 0 mm vykazoval nestabilnější chování, zároveň byly výsledky nejvíce zatížené systematickou chybou. Parametry bodu 7 mm byly svými hodnotami mezi body 0 mm a 14 mm. Projevila se zde rostoucí nestabilita a bylo zde méně systematických chyb. V bodě 14 mm byly hodnoty výsledků nejméně zatížené systematickými chybami ale také nejvíce nestálé.



Obr. 70) Průměrná chyba měření pro všech 9 bodů

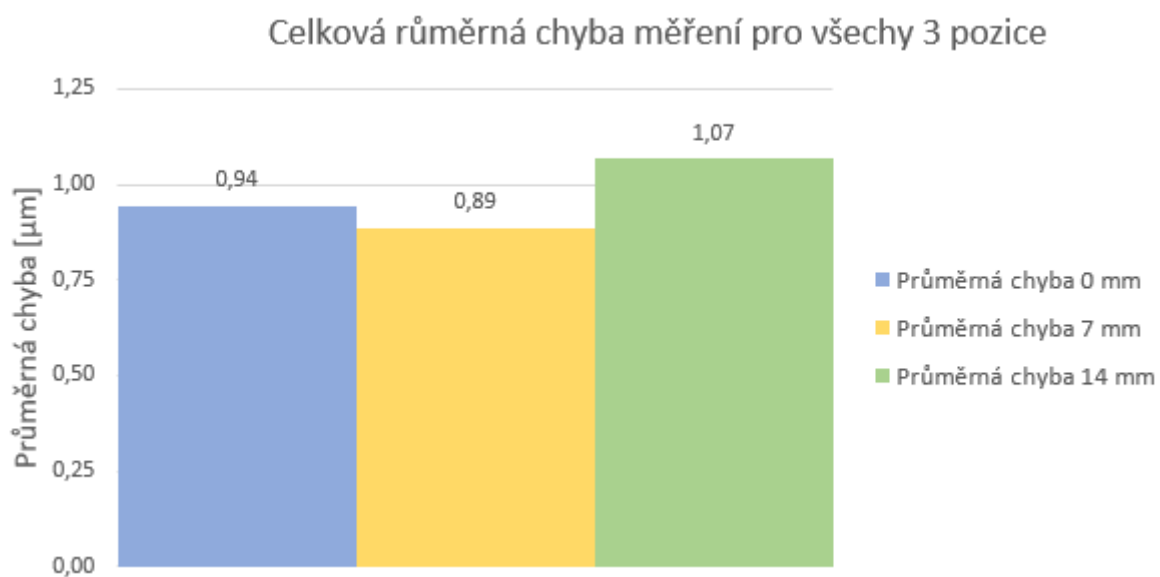
Celkové průměrné chyby byly nejmenší pro body 0 mm a 7 mm (Obr. 72). I když tyto dva body byly více zatížené systematickými chybami je pro potvrzení vybraného rozsahu pro další práci se snímačem více důležitá stálost v dané oblasti, jelikož je stálost parametrem, který je hůř potlačitelný během dalšího vývoje než systematická chyba, kterou je možné po nalezení její příčiny částečně či kompletně potlačit.



Obr. 71) Průměrný rozptyl výsledků měření pro všech 9 bodů

Výsledky měření opakovatelnosti potvrdili volbu oblasti, ve které je vhodné snímač dále testovat, navržené v kapitole 5.3.3.. Jako nejvhodnější byla zvolena část rozsahu odpovídající

posunutí $11 \div 18$ mm, jenž odpovídá rozsahu výstupních hodnot - 31500 mV/V až 13000 mV/V při použití AD převodníku HX 711.



Obr. 72) Průměrná chyba měření pro body 0 mm, 7 mm a 14 mm

6 ZHODNOCENÍ A DISKUZE

Podařilo se zhotovit měřicí přípravek umožňující posuv pouze v omezeném rozsahu 7 mm. Jelikož má prototypový snímač záměrně sníženou citlivost a zvýšený rozsah, což je dáno jeho geometrií, bylo by vhodnější použít pro posuv měřicí roviny mikrometrický šroub větší délky. Další slabou stránkou navrženého měřicího přípravku je axiální posuv krokového motoru vlivem axiálního posuvu mikrometrického šroubu. Tento nedostatek je možné řešit použitím spojky umožňující axiální posuv. Možným řešením by bylo použití ozubené hřídele na straně motoru a ozubeného náboje na mikrometrickém šroubu. Další možnou variantou je použití převodu ozubeným řemenem. Toto řešení by umožňovalo zvýšení přesnosti měřicího přípravku pomocí převodu do pomala, musel by se ovšem řešit problém vzniklý radiální silou od řemenu která by zatěžovala mikrometrický šroub a mohla by být zdrojem nepřesností.

Napsaný software postrádá možnost měnit nastavení cyklů bez použití PC. V aktuální verzi SW je nutné vždy přehrát program jednotky. Nutnost PC by bylo možné řešit pomocí základního vstupního rozhraní, kterým by například mohla být numerická klávesnice. Dalším vylepšením, na kterém jsem již pracoval a bohužel neúspěšně, je upravení knihovny pro SD kartu aby bylo možné do názvu souboru s naměřenými daty dát místo pořadového čísla údaje o nastavení měření včetně data. Tato funkce je se stávající knihovnou nerealizovatelná, jelikož knihovna umožňuje používat formát názvu souboru maximálně 8/3.

7 ZÁVĚR

Práce se zabývá problematikou realizace snímače délky pomocí využití tenzometru. Navazuje vývoj snímače pracujícího na principu nanočásticového tenzometru francouzské produkce, jenž byl předmětem mé bakalářské práce. Nanočásticový tenzometr se ukázal jako nevhodný, a proto byla hledána jiná možná varianta tenzometru, vykazující dostatečně citlivé a stálé chování. Další potencionální řešení bylo nalezeno na německém trhu, v podobě tenzometru určeného k přímému navařování k měřenému místu. Tento tenzometr je full bridge provedení díky němuž, jde očekávat chování méně citlivé na vlivy okolí.

Pro uvedení kontextu byla provedena rešerše oblasti tenzometrů a analog / digitálních převodníků umožňujících vyhodnocování full bridge tenzometrů.

Úspěšně se podařilo navrhnout analog / digitální převodník sloužící pro vyhodnocování prototypu snímače pracujícího na principu navařovaného tenzometru ve full bridge provedení, který nahradil dříve testovaný nanočásticový tenzometr.

Tento převodník se podařilo zrealizovat a tato realizace umožňuje ovládání posuvu měřicí roviny v rozsahu 7 mm s teoretickou přesností 1,25 μm a ověřenou reálnou přesností 5 μm . Teoretická přesnost je velikost posuvu pro jeden krok krokového motoru a nebyla ověřena, jelikož referenční snímač umožňuje měřit s přesností pouze 1 μm . Dále převodník umožňuje automaticky provádět měření dle přeprogramovaných cyklů a ukládat naměřená data na SD kartu včetně údajů o reálném čase, relativní vlhkosti a teplotě. Data se ukládají do souborů s dynamicky generovaným názvem.

Přesnost přípravku byla ověřena referenčním indukčnostním snímačem a následně bylo provedeno pilotní testování prototypového snímače. Byl proveden vstupní test linearity v rozsahu 25,25 mm na jehož základě byla vybrána oblast 11 ÷ 18 mm pro další zkoumání. Dále byl proveden test časové stálosti a test opakovatelnosti. V těchto testech obstál prototypový snímač v porovnání se standardy běžně používaných indukčnostních a sériově vyráběných snímačů délky.

Provedené testy potvrdily vhodnost použití tohoto typu tenzometru pro realizaci délkového snímače. Silnou stránkou testovaného prvku je linearita, kde bylo dosaženo nadprůměrných vlastností v porovnání s indukčnostními typy snímačů. Parametry jako je stálost a opakovatelnost měření jsou oblastí které by měla být věnována pozornost při dalším vývoji.

8 SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

- [1] Phenolic vs Epoxy resin [online]. 2016 [cit. 2018-03-14]. Dostupné z: <http://resources.workstationindustries.com/blog/phenolic-vs-epoxy-resin-work-surface-which-one-is-best>
- [2] HBM [online]. [cit. 2018-03-08]. Dostupné z: <https://www.hbm.com/en/>
- [3] LCT [online]. [cit. 2018-03-08]. Dostupné z: http://www.lctxm.com/page1?_l=en
- [4] Evanohm® - precision resistance alloy [online]. 2018 [cit. 2018-03-14]. Dostupné z: <https://www.sigmaaldrich.com/catalog/product/aldrich/gf41979358?lang=en&ion=CZ>
- [5] Guangdong SouthChinaSea Electronic Measuring Technology Co., Ltd. [online]. [cit. 2018-03-14]. Dostupné z: <http://www.chinesesensor.com/>
- [6] Direct Industry [online]. [cit. 2018-03-14]. Dostupné z: <http://www.directindustry.com/>
- [7] BCM sensor technologies [online]. [cit. 2018-03-14]. Dostupné z: <https://www.bcmsensor.com/>
- [8] Resistance wire [online]. [cit. 2018-03-14]. Dostupné z: https://en.wikipedia.org/wiki/Resistance_wire
- [9] Polyetherketonová vlákna [online]. [cit. 2018-03-14]. Dostupné z: https://cs.wikipedia.org/wiki/Polyetherketonov%C3%A1_vl%C3%A1kna
- [10] CREEP a LOM PŘI CREEPU [online]. [cit. 2018-03-14]. Dostupné z: www.zam.fme.vutbr.cz/~vlach/6ms/prednasky/creep.doc
- [11] Piezoresistive Sensors -Principles, Materials, Fabrication and Applications [online]. [cit. 2018-03-15]. Dostupné z: https://www.google.cz/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=3&ved=0ahUKEwiK2ujliu_ZAhUpKsAKHWTzDNAQFgg9MAI&url=http%3A%2F%2Fhome.sogang.ac.kr%2Fsites%2Fmemslab%2F%25EC%259E%2590%25EB%25A3%258C%25EC%258B%25A4%2FLists%2Fb49%2FAttachments%2F5%2F06-piezoresistor.ppt&usg=AOvVaw3HunyeORyYDyROdCj5Mzuk
- [12] Piezoresistive Effect [online]. [cit. 2018-03-15]. Dostupné z: <https://www.comsol.com/multiphysics/piezoresistive-effect>

- [13] *Polovodičové tenzometry* [online]. [cit. 2018-03-17]. Dostupné z: <https://automatizace.hw.cz/clanek/2006111601>
- [14] *Nanolike* [online]. Labège, France, 2015 [cit. 2018-03-18]. Dostupné z: <http://www.nanolike.com/en/>
- [15] *Celmi S.r.l* [online]. Italy, 2018 [cit. 2018-03-18]. Dostupné z: <http://www.celmi.com/>
- [16] *Oxidová keramika – oxid hlinitý (Al₂O₃)* [online]. [cit. 2018-03-22]. Dostupné z: <https://www.ceramtec.cz/ceramic-materials/aluminum-oxide/>
- [17] *Siegert Thinfilm Technology GmbH* [online]. [cit. 2018-03-22]. Dostupné z: www.siegert-tft.de
- [18] IMECO SPOL. S.R.O. *NÁVOD NA OBSLUHU délkoměru standardního provedení* [online]. In: . s. 30 [cit. 2018-04-01].
- [19] Datasheet HX711 AVIA Semiconductor. Xiamen (China): 2012
- [20] PIGHIXXX. *Arduino UNO Pinout Diagram* [online]. In: . [cit. 2018-04-02]. Dostupné z: <http://forum.arduino.cc/index.php?topic=146315.0>
- [21] *Distar Technology Limited* [online]. Shenzhen, China, 2017 [cit. 2018-04-05]. Dostupné z: <http://www.distarltd.com/index.asp>
- [22] *Arduino* [online]. 2018 [cit. 2018-04-05]. Dostupné z: <https://www.arduino.cc/>
- [23] *Texas Instruments Incorporated* [online]. 2018 [cit. 2018-04-05]. Dostupné z: <http://www.ti.com/>
- [24] *GitHub* [online]. 2018 [cit. 2018-04-08]. Dostupné z: <https://github.com/>
- [25] Vyroubal, D., A circuit for lead resistance compensation and complex balancing of the strain gauge bridge, IEEE Trans. Inst. & Meas. Vol. 42 No. 1, Feb. 1993, pp. 44-48
- [26] Brož J. a kol.: *Základy fyzikálních měření I*. SPN, Praha 1967
- [27] *6 BASIC STATISTICAL TOOLS* [online]. [cit. 2018-04-26]. Dostupné z: <http://www.fao.org/docrep/W7295E/w7295e08.htm>
- [28] *Mesing* [online]. [cit. 2018-05-01]. Dostupné z: <http://www.mesing.cz/>

9 SEZNAM SYMBOLŮ

k_s	koeficient korekce malého počtu měření
K	koeficient rozdělení
n	počet naměřených hodnot
$s_{\bar{x}}$	výběrová směrodatná odchylka aritmetického průměru
s_x	výběrová směrodatná odchylka
u_a	nejistota typu A
u_b	nejistota typu B
x_{max}	maximální naměřená hodnota
x_{min}	minimální naměřená hodnota
x_i	naměřená hodnota
$\bar{x}$	průměr naměřených hodnot
Z_i	zdroj nejistot
z_{max}	maximální rozptyl

10 SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1)	Vliv vlhkosti na polohu nulového bodu[2].....	12
Obr. 2)	Tenzometry firmy HBM – série Y [2].....	13
Obr. 3)	Tenzometry firmy HBM – série M [2].....	13
Obr. 4)	Tenzometry firmy HBM – série C [2].....	14
Obr. 5)	Tenzometry firmy LCT [3].....	15
Obr. 6)	Tenzometry firmy Hua lan hai - Série BB&EB[5]	16
Obr. 7)	Tenzometry firmy Hua lan hai - Série AA&AB[5]	16
Obr. 8)	Lineární tenzometry firmy BMC sensor [7]	18
Obr. 9)	Tenzometry pro měření smyku firmy BMC sensor [7].....	18
Obr. 10)	90° typ firmy BMC sensor [7]	18
Obr. 11)	Polomůstkové tenzometry firmy BMC sensor [7]	19
Obr. 12)	Celo-můstkové tenzometry firmy BMC sensor [7].....	19
Obr. 13)	Membránové tenzometry série KA firmy BMC sensor [7].....	19
Obr. 14)	Znázornění technologie nanočásticových tenzometrů [14]	20
Obr. 15)	Nanovlákná tenzometru (300x a 600x zoom).....	21
Obr. 16)	Poměr mezi spotřebou a citlivostí různých typů tenzometrů [14]	21
Obr. 17)	Zkušební snímač pro testování nanočásticového tenzometru.....	23
Obr. 18)	A/D převodník firmy Nanolike	24
Obr. 19)	Přípravek pro testování zkušebního snímače.....	25
Obr. 20)	Závislost výstupní hodnoty na poloze (tah).....	26
Obr. 21)	Závislost výstupní hodnoty na poloze (tlak).....	27
Obr. 22)	Časová stálost nanočásticového tenzometru (tlak)	27
Obr. 23)	Testovací přípravky (detail drážky v ploše pro nalepení tenzometru)	28
Obr. 24)	Osazené testovací přípravky (pohled shora).....	29
Obr. 25)	Tenzometr německé produkce	30
Obr. 26)	Tenzometr navařený na testovacích kostkách	31
Obr. 27)	Montáž testovaného prvku v testovacím přípravku	32
Obr. 28)	testovaný snímač; skleněná měřicí rovina; indukčnostní snímač	32
Obr. 29)	Vyhodnocovací jednotka EDK 93 [18]	33
Obr. 30)	Pinout Arduino Uno [20].....	34
Obr. 31)	Klon Arduina Uno včetně kabeláže nutné pro připojení modulů	35
Obr. 32)	A/D převodník s čipem HX 711	36

Obr. 33)	Schéma zapojení tenzometru s modulem HX711 [19].....	36
Obr. 34)	Zapojený LCD modul od firmy Distar (zepředu)	37
Obr. 35)	Zapojený LCD modul od firmy Distar (modul PCF8574)	38
Obr. 36)	Modul se snímačem teploty a vlhkosti DHT 22	38
Obr. 37)	Modul SD karty.....	39
Obr. 38)	Modul reálného času	39
Obr. 39)	L293D Quadruple Half-H Driver.....	40
Obr. 40)	Komunikace mezi jednotlivými moduly	41
Obr. 41)	Flow chart hlavního programu.....	42
Obr. 42)	Flow chart funkce „History“.....	43
Obr. 43)	Flow chart funkce „defTemp“	44
Obr. 44)	Flow chart funkce „LCD_print“	44
Obr. 45)	Flow chart měřicího cyklu.....	45
Obr. 46)	Obecné schéma testovacího cyklu	47
Obr. 47)	Generování názvu souboru	48
Obr. 48)	Část kódu měřicího cyklu.....	49
Obr. 49)	normální (Gaussovo) rozdělení; rovnoměrné rozdělení	53
Obr. 50)	Rozsah a četnost směrodatné odchylky [27]	55
Obr. 51)	Hodnocení přesnosti měření	56
Obr. 52)	Výstup měření linearity (graf závislosti polohy na výstupní hodnotě)	58
Obr. 53)	Uvažovaná oblast pro testování (závislost výstupní hodnoty na poloze)....	60
Obr. 54)	Poměrná odchylka od linearity a poměrná směrodatná odchylka	61
Obr. 55)	Závislost výstupní hodnoty v závislosti na čase (krok 250 μm).....	62
Obr. 56)	Upravená data měření časové stálosti	63
Obr. 57)	Hodnoty maximálního driftu během měření časové stálosti	64
Obr. 58)	Naměřené hodnoty pro bod v poloze 0 mm.....	65
Obr. 59)	Četnost velikosti chyb pro bod 0 mm -10 μm	66
Obr. 60)	Četnost velikosti chyb pro bod 0 mm.....	66
Obr. 61)	Četnost velikosti chyb pro bod 0 mm +10 μm	67
Obr. 62)	Naměřené hodnoty pro bod v poloze 7 mm.....	68
Obr. 63)	Četnost velikosti chyb pro bod 7 mm -10 μm	68
Obr. 64)	Četnost velikosti chyb pro bod 7 mm.....	69
Obr. 65)	Četnost velikosti chyb pro bod 7 mm +10 μm	69
Obr. 66)	Naměřené hodnoty pro bod v poloze 14 mm.....	70

Obr. 67)	Četnost velikosti chyb pro bod 14 mm -10 μm	71
Obr. 68)	Četnost velikosti chyb pro bod 14 mm.....	71
Obr. 69)	Četnost velikosti chyb pro bod 14 mm +10 μm	72
Obr. 70)	Průměrná chyba měření pro všech 9 bodů.....	73
Obr. 71)	Průměrný rozptyl výsledků měření pro všech 9 bodů.....	73
Obr. 72)	Průměrná chyba měření pro body 0 mm, 7 mm a 14 mm	74

11 SEZNAM PŘÍLOH

Příloha 1 – Protokol o linearizaci referenčního snímače

Příloha 2 – Protokol o kontrole referenčního snímače

Příloha 3 – kód programu

Příloha 1 – Protokol o linearizaci referenčního snímače

PROTOKOL O LINEARIZACI SNÍMAČE

Snímač T10x 1.5mm /50

Max. odchylka
[μm]

na zdvíhu
[μm]

Datum:
4.11.2013

Číslo 1307J966

max +0.22

+1495.28

Rozsah ± 1500 μm

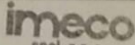
min -0.12

+1198.35

imeco
spol. s r. o.
Mariánské nám. 1
817 00 Brno

zdvih [μm]	chyba [μm]		zdvih [μm]	chyba [μm]		zdvih [μm]	chyba [μm]	
	linea rizovaný	nelinea rizovaný		linea rizovaný	nelinea rizovaný		linea rizovaný	nelinea rizovaný
1500.82	+0.03	-0.03	+848.50	+0.08	-0.87			
1450.99	+0.01	-0.24	+898.98	+0.06	-1.13			
1400.64	-0.01	-0.43	+949.46	+0.03	-1.42			
1350.85	-0.00	-0.56	+998.43	+0.01	-1.69			
1300.29	-0.01	-0.68	+1049.13	-0.02	-1.99			
1250.56	-0.01	-0.77	+1098.34	-0.04	-2.29			
1200.95	-0.01	-0.83	+1149.14	-0.10	-2.64			
1150.43	-0.02	-0.87	+1198.35	-0.12	-2.95			
1100.41	-0.00	-0.88	+1247.34	-0.12	-3.25			
1050.18	-0.00	-0.88	+1297.47	-0.12	-3.55			
1000.07	+0.02	-0.84	+1347.21	-0.09	-3.83			
949.69	+0.00	-0.82	+1397.69	-0.04	-4.09			
901.48	+0.01	-0.76	+1446.46	+0.07	-4.29			
850.52	+0.02	-0.69	+1495.28	+0.22	-4.46			
802.08	+0.02	-0.62						
751.36	+0.03	-0.53						
702.18	+0.01	-0.45						
651.72	+0.02	-0.35						
600.55	+0.00	-0.26						
551.47	-0.02	-0.18						
501.21	-0.01	-0.06						
451.43	-0.02	+0.04						
401.39	-0.00	+0.17						
350.77	+0.00	+0.28						
300.24	+0.00	+0.38						
250.88	-0.00	+0.46						
200.82	+0.01	+0.57						
150.72	+0.01	+0.64						
99.83	+0.01	+0.71						
49.69	+0.01	+0.76						
1.14	+0.01	+0.80						
+49.83	-0.03	+0.81						
+98.98	-0.04	+0.83						
+149.16	-0.09	+0.80						
+198.57	-0.10	+0.77						
+247.72	-0.08	+0.75						
+297.69	-0.09	+0.69						
+347.84	-0.06	+0.65						
+397.97	-0.04	+0.58						
+448.33	-0.00	+0.50						
+497.94	-0.00	+0.38						
+547.85	+0.04	+0.28						
+597.92	+0.06	+0.14						
+648.95	+0.06	-0.05						
+698.55	+0.08	-0.22						
+749.17	+0.09	-0.41						
+799.56	+0.08	-0.64						

Příloha 1 – Protokol o linearizaci referenčního snímače

PROTOKOL O LINEARIZACI SNÍMAČE								
Snímač T10x 1.5mm /50			Max. odchylka [μm]		na zdvihu [μm]		Datum: 11. 1.2018	
číslo	1307J966		max	+0.20	+1499.38		 spol. s r. o. Mariánské nám. 1 617 00 Brno	
rozsah	± 1500 μm		min	-0.12	+1200.17			
zdvih[μm]	chyba [μm]		zdvih[μm]	chyba [μm]		zdvih[μm]	chyba [μm]	
	linea- rizovaný	nelinea- rizovaný		linea- rizovaný	nelinea- rizovaný		linea- rizovaný	nelinea- rizovaný
-1499.40	+0.02	+0.09	+850.52	+0.08	-0.84			
-1448.94	+0.01	-0.12	+900.02	+0.10	-1.06			
-1398.24	+0.01	-0.28	+949.32	+0.06	-1.35			
-1348.61	-0.02	-0.45	+999.29	+0.00	-1.67			
-1299.31	-0.01	-0.54	+1049.55	-0.02	-1.97			
-1248.68	-0.02	-0.65	+1101.19	-0.05	-2.29			
-1198.62	-0.01	-0.70	+1149.79	-0.08	-2.61			
-1149.26	-0.00	-0.74	+1200.17	-0.12	-2.95			
-1098.82	-0.01	-0.78	+1249.89	-0.11	-3.26			
-1050.21	-0.01	-0.78	+1300.98	-0.11	-3.59			
-999.04	-0.01	-0.78	+1350.83	-0.08	-3.88			
-948.97	-0.01	-0.75	+1399.35	-0.04	-4.17			
-898.33	+0.02	-0.69	+1448.29	+0.06	-4.40			
-850.04	+0.03	-0.63	+1499.38	+0.20	-4.61			
-799.28	+0.02	-0.57						
-749.54	+0.02	-0.50						
-698.71	+0.02	-0.43						
-649.86	+0.01	-0.35						
-599.79	+0.01	-0.26						
-549.33	-0.00	-0.17						
-498.14	-0.01	-0.08						
-448.20	-0.00	+0.03						
-397.79	-0.02	+0.11						
-349.54	-0.00	+0.22						
-298.66	-0.01	+0.31						
-249.35	+0.00	+0.41						
-198.40	-0.00	+0.49						
-149.23	-0.02	+0.56						
-99.21	+0.02	+0.66						
-49.27	+0.01	+0.71						
+0.73	+0.02	+0.78						
+50.55	-0.02	+0.79						
+100.77	-0.03	+0.82						
+150.18	-0.09	+0.76						
+199.54	-0.07	+0.78						
+250.26	-0.08	+0.74						
+301.08	-0.06	+0.71						
+350.03	-0.07	+0.63						
+400.96	-0.01	+0.60						
+449.96	-0.01	+0.50						
+501.06	+0.03	+0.41						
+550.66	+0.02	+0.26						
+602.06	+0.04	+0.12						
+650.88	+0.05	-0.03						
+701.16	+0.04	-0.23						
+750.47	+0.07	-0.40						
+801.29	+0.07	-0.63						

Příloha 2 – Protokol o kontrole referenčního snímače

PROTOKOL O KONTROLE SNÍMAČE

Snímač T10x 1.5mm /50

Max. odchylka
[μm]

na zdvihu
[μm]

Datum:
11. 1.2018

číslo 1307J966

max

+2.97

-1499.40

rozsah ± 1500 μm

min

-2.68

+1448.29

imeco
spol. s r.o.
Mladinské nám. 1
447 03 Bno

zdvih [μm] chyba [μm]
linea- nelinea-
rizovaný rizovaný

zdvih [μm] chyba [μm]
linea- nelinea-
rizovaný rizovaný

zdvih [μm] chyba [μm]
linea- nelinea-
rizovaný rizovaný

-1499.40	+2.97	+2.86
-1448.94	+2.86	+2.56
-1398.24	+2.77	+2.31
-1348.61	+2.65	+2.05
-1299.31	+2.57	+1.86
-1248.68	+2.46	+1.66
-1198.62	+2.37	+1.51
-1149.26	+2.28	+1.38
-1098.82	+2.17	+1.26
-1050.21	+2.07	+1.16
-999.04	+1.96	+1.07
-948.97	+1.86	+1.00
-898.33	+1.78	+0.98
-850.04	+1.69	+0.95
-799.28	+1.58	+0.91
-749.54	+1.47	+0.88
-698.71	+1.36	+0.87
-649.86	+1.25	+0.85
-599.79	+1.15	+0.85
-549.33	+1.03	+0.85
-498.14	+0.92	+0.84
-448.20	+0.82	+0.86
-397.79	+0.71	+0.85
-349.54	+0.63	+0.87
-298.66	+0.52	+0.87
-249.35	+0.44	+0.88
-198.40	+0.34	+0.86
-149.23	+0.24	+0.84
-99.21	+0.18	+0.85
-49.27	+0.09	+0.80
+0.73	+0.02	+0.78
+50.55	-0.11	+0.70
+100.77	-0.21	+0.63
+150.18	-0.36	+0.49
+199.54	-0.43	+0.41
+250.26	-0.52	+0.28
+301.08	-0.60	+0.15
+350.03	-0.69	-0.02
+400.96	-0.72	-0.14
+449.96	-0.80	-0.33
+501.06	-0.85	-0.51
+550.66	-0.95	-0.75
+602.06	-1.02	-0.99
+650.88	-1.09	-1.24
+701.16	-1.19	-1.53
+750.47	-1.25	-1.79
+801.29	-1.35	-2.11

+850.52	-1.42	-2.41
+900.02	-1.50	-2.72
+949.32	-1.63	-3.10
+999.29	-1.78	-3.51
+1049.55	-1.90	-3.90
+1101.19	-2.03	-4.32
+1149.79	-2.16	-4.73
+1200.17	-2.30	-5.16
+1249.89	-2.40	-5.56
+1300.98	-2.52	-5.98
+1350.83	-2.59	-6.37
+1399.35	-2.66	-6.75
+1448.29	-2.68	-7.07
+1499.38	-2.66	-7.37

Příloha 3 – kód programu

```
#include <LiquidCrystal_I2C.h>
#include "DHT.h"
#include "HX711.h"
#include <Stepper.h>
#include "Wire.h"
#include <SD.h>
#include <SPI.h>
#include <DS3231.h>

DS3231 rtc(SDA, SCL); // Init the DS3231 using the hardware interface
Time now; // Init a Time-data structure

#define DS3231_I2C_ADDRESS 0x68

int pinCS = 10; // Pin 10 on Arduino Uno
File myFile;
HX711 scale(A2, A1); // (DOUT, CLK)
LiquidCrystal_I2C lcd(0x27, 20, 4);
DHT DHT_env(A0, DHT22);

const int stepsPerRevolution = 200; // change this to fit the number of steps per revolution
Stepper motor(stepsPerRevolution, 2, 3, 4, 5);
int motorsetSpeed = 120;
int q1;
int calm_down = 250;
void setup()
{
  Serial.begin(9600);
  DHT_env.begin();
  Wire.begin();
  motor.setSpeed(motorsetSpeed);
  pinMode(pinCS, OUTPUT);
  lcd.init();
  lcd.backlight();
  rtc.begin();
  now = rtc.getTime();
  if (SD.begin()) {
    lcd.setCursor(12, 3);
    lcd.print("Card: OK");
    q1 = 1;
  }
  else {
    lcd.setCursor(12, 3);
    lcd.print("Card: NO");
    q1 = 0;
  }
  History("Turn ON");
}

int xx = 0; //XXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXX

void loop() {
  now = rtc.getTime();
  LCD_print();
  if (xx == 0 && q1 == 1) {
    xx = 1;
    Repeatability(1, 100, 7000, 50, 1, 0);
    //Repeatability(int how_many_points, int range_um, int step_size_um, byte motor_dir)
  }
}

void Repeatability(int how_many_times, int how_many_points, int range_um, int step_size_um, byte motor_dir, byte up_down) {
  String temp3;
  temp3 += String("Rep ");
  temp3 += String(how_many_times); temp3 += String(" ");
  temp3 += String(how_many_points); temp3 += String(" ");
  temp3 += String(range_um); temp3 += String(" ");
  temp3 += String(step_size_um); temp3 += String(" ");
  temp3 += String(motor_dir); temp3 += String(" ");
  History(temp3);
  char file [15];
  int count = 1;
  byte x = 0;
  while ( x == 0) {
    String filename = "Rep"; // název souboru XXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXX
    filename += String("_");
    filename += String(count);
    filename += String(".txt");
    filename.toCharArray(file, sizeof(file));
  }
}
```



```
while ( x == 0 ) {
    String filename = "Rep"; // název souboru
    filename += String(" ");
    filename += String(count);
    filename += String(".txt");
    filename.toCharArray(file, sizeof(file));
    if (SD.exists(file) == 1) {
        count = count + 1 ;
    }
    else {
        x = 1;
    }
}
Serial.print("file loop main ");
Serial.println(file);
myFile = SD.open(file, FILE_WRITE);
myFile.print(" how_many_times ");
myFile.print(how_many_times);
myFile.print(" how_many_points ");
myFile.print(how_many_points);
myFile.print(" range_um ");
myFile.print(range_um);
myFile.print(" step_size_um ");
myFile.print(step_size_um);
myFile.print(" motor_dir ");
myFile.print(motor_dir);
myFile.print(" up_down ");
myFile.println(up_down);
myFile.close();
lcd.setCursor(0, 3);
lcd.print("Repeat.");
lcd.setCursor(15, 1);
lcd.print(" ");
int step_size = step_size_um / 2.5;
int step_count = range_um / step_size_um;
delay(calm_down);
int counter = 1;
for (int c = 0; c < how_many_times; c++) {
    motor.step(-step_size);
    for (int i = 0; i <= step_count; i++) {
        now = rtc.getTime();
        motor.step(step_size);
        LCD_print();
        Progress( ((c)*step_count + i), step_count * how_many_times);
        String temp = defTemp(1);
        temp += String(" Pos ");
        temp += String(step_size_um * i);
        temp += String(" ");
        temp += String(counter);
        temp += String(" ");
        counter = counter + 1;
        char line[temp.length() + 1];
        temp.toCharArray(line, sizeof(line));
        Long time_old;
        Serial.print(line);
        Serial.print(millis() - time_old);
        Serial.print(" ");
        myFile = SD.open(file, FILE_WRITE);
        myFile.print(line);
        myFile.print(" Dur ");
        myFile.print(millis() - time_old);
        myFile.print(" ");
        time_old = millis();
        delay(calm_down);
        for (int cc = 0; cc < how_many_points; cc++) {
            float q = (scale.read_average(1)) / 100;
            myFile.print(q, 0);
            myFile.print(" ");
            Serial.print(q, 0);
            Serial.print(" ");
        }
        Serial.println();
        myFile.println(" ");
        myFile.close();
    }
    lcd.setCursor(15, 1);
    if (up_down == 0) {
        lcd.setCursor(15, 1);
        lcd.print("READY");
        motor.step(-step_size * step_count);
    }
    else if (up_down == 1) {
        int counter = 1;
        step_size = step_size * (-1);
    }
}
```



```

for (int c = 0; c < how_many_times; c++) {
    motor.step(-step_size);
    for (int i = 0; i <= step_count; i++) {
        now = rtc.getTime();
        motor.step(step_size);
        LCD_print();
        Progress(((c)*step_count + i), step_count * how_many_times);
        String temp = defTemp(1);
        temp += String(" Pos ");
        temp += String(step_size_um * i);
        temp += String(" ");
        temp += String(counter);
        temp += String(" ");
        counter = counter + 1;
        char line[temp.length() + 1];
        temp.toCharArray(line, sizeof(line));
        Long time_old;
        Serial.print(line);
        Serial.print(millis() - time_old);
        Serial.print(" ");

        myFile = SD.open(file, FILE_WRITE);
        myFile.print(line);
        myFile.print(" Dur ");
        myFile.print(millis() - time_old);
        myFile.print(" ");
        time_old = millis();
        delay(cal_m_down);
        for (int cc = 0; cc < how_many_points; cc++) {
            float q = (scale.read_average(1)) / 100;
            myFile.print(q, 0);
            myFile.print(" ");
            Serial.print(q, 0);
            Serial.print(" ");
        }
        Serial.println();
        myFile.println(" ");
        myFile.close();
    }
}

lcd.setCursor(0, 3);
lcd.print("Done ");
}
}

void Progress(int c, int step_count) {
    int progress;
    progress = ((c * 100) / step_count);
    lcd.setCursor(16, 1);
    if (progress < 100) {
        lcd.print(" ");
    }
    if (progress < 10) {
        lcd.print(" ");
    }
    lcd.print(progress, 1);
    lcd.print(" ");
    lcd.setCursor(19, 1);
    lcd.print("%");
} //%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

void LCD_print() {
    lcd.setCursor(15, 0);
    if (now.hour <= 9) {
        lcd.print(" ");
    }
    lcd.print(now.hour);
    if (now.min <= 9) {
        lcd.print(":0");
    }
    else {
        lcd.print(":");
    }
    lcd.print(now.min);
    lcd.setCursor(0, 0);
    lcd.print(DHT_env.readTemperature(), 1);
    lcd.setCursor(4, 0);
    lcd.print(" C");
    lcd.setCursor(0, 1);
    lcd.print(DHT_env.readHumidity(), 1);
    lcd.setCursor(4, 1);
    lcd.print(" %");
    lcd.setCursor(0, 2);
    lcd.print("A/D:");
}

```

```

    lcd.setCursor(6, 2);
    float q = (scale.read_average(1)) / 100;
    lcd.print(q, 0);
    lcd.print(" ");
} //XXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXX

string defTemp(int dec) {
    String temp;
    // temp.reserve(25);
    temp = String("Date ");
    temp += String(now.year);
    temp += String(" ");
    temp += String(now.mon);
    temp += String(" ");
    temp += String(now.date);
    temp += String(" ");
    temp += String(now.hour);
    temp += String(" ");
    temp += String(now.min);
    temp += String(" ");
    temp += String(now.sec);
    temp += String(" ");
    temp += String(DHT_env.readTemperature(), dec);
    temp += String(" ");
    temp += String(DHT_env.readHumidity(), dec);
    return temp;
} //XXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXX

void History(String Activity) {
    String temp = defTemp(1);
    temp += String(" Action: ");
    char datalog[temp.length() + 1];
    temp.toCharArray(datalog, sizeof(datalog));
    temp = String(Activity);
    temp += String(" ");
    char datalog1[temp.length() + 1];
    temp.toCharArray(datalog1, sizeof(datalog1));
    if (q1 == 1) {
        lcd.setCursor(12, 3);
        lcd.print("Card: WR");
        myFile = SD.open("History.txt", FILE_WRITE);
        myFile.print(datalog);
        myFile.println(datalog1);
        myFile.close();
        lcd.setCursor(12, 3);
        lcd.print("Card: OK");
    }
    else {
        lcd.setCursor(12, 3);
        lcd.print("Card: NO");
    }
}
}

```