

České vysoké učení technické v Praze
Fakulta strojní
Ústav mechaniky, biomechaniky a mechatroniky
Laboratoř biomechaniky člověka

Bakalářská práce

na téma

VLIV TUHOSTI PODKLADU NA KALIBRAČNÍ
KŘIVKY SENZORŮ TEKSCAN

Veronika FELLNEROVÁ

Vedoucí bakalářské práce:

doc. RNDR. Matej Daniel, Ph.D.

2015

Praha



ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

Fakulta strojní, Ústav mechaniky, biomechaniky a mechatroniky

Technická 4, 166 07 Praha 6

Akademický rok: 2014/2015

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

pro: Veroniku Fellnerovou

program: Teoretický základ strojního inženýrství

obor: bez oboru

Název tématu:

Vliv tuhosti podkladu na kalibrační křivky senzorů Tekscan

Title:

Effect of substrate stiffness on Tekscan sensors calibration curve

Zásady pro vypracování:

1. Naměřit kalibrační křivky senzoru TekScan v celém poli
2. Zhodnotit vliv tuhosti substrátu
3. Určit chybu měření a porovnat s analytickým modelem
4. Zformulovat doporučení pro využití senzoru Tekscan pro měření poddajných materiálů

Rozsah grafických prací: 15 stran

Rozsah průvodní zprávy: 35 stran

Seznam odborné literatury:

1. Macintyre L. New calibration method for I-scan sensors to enable the precise measurement of pressures delivered by 'pressure garments'. Burns. 2011 Nov;37(7):1174-81
2. Brimacombe JM, Wilson DR, Hodgson AJ, Ho KC, Anglin C. Effect of calibration method on Tekscan sensor accuracy. J Biomech Eng. 2009 .
3. Hartmann JM, Rudert MJ, Pedersen DR, Baer TE, Goreham-Voss CM, Brown TD. Compliance-dependent load allocation between sensing versus non-sensing portions of a sheet-array contact stress sensor. Iowa Orthop J. 2009;29:43-7.

Vedoucí bakalářské práce: doc. RNDr. Matěj Daniel, Ph.D

Konzultant: Ing. Hynek Chlup

Datum zadání bakalářské práce: 30. 4. 2015


Datum odevzdání bakalářské práce: 19. 6. 2015

Neodevzdá-li student bakalářskou nebo diplomovou práci v určeném termínu, tuto skutečnost předem písemně zdůvodnil a omluva byla děkanem uznána, stanoví děkan studentovi náhradní termín odevzdání bakalářské nebo diplomové práce. Pokud se však student řádně neomluvil nebo omluva nebyla děkanem uznána, může si student zapsat bakalářskou nebo diplomovou práci podruhé

Diplomant bere na vědomí, že je povinen vypracovat diplomovou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je třeba uvést v diplomové práci.

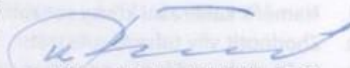
Zadání diplomové práce převzal dne:


.....
diplomant


.....
prof. Ing. Milan Růžička, CSc.

vedoucí Ú 12 105




.....
prof. Ing. Michael Valášek, DrSc.

děkan FS ČVUT v Praze

V Praze dne 30. 4. 2015

Anotační list

Jméno autora: Veronika FELLNEROVÁ

Název bakalářské práce: Vliv tuhosti podkladu na kalibrační křivky senzorů Tekscan

Anglický název: Effect of substrate stiffness on Tekscan sensors calibration curve

Rok: 2015

Obor studia: *Teoretický základ strojího inženýrství*

Ústav/odbor: *Ústav mechaniky, biomechaniky a mechatroniky / Laboratoř biomechaniky člověka*

Vedoucí: *doc. RNDR. Matej Daniel, Ph.D.*

Konzultant: *Ing. Hynek Chlup*

Bibliografické údaje: počet stran 52

počet obrázků 33

počet tabulek 8

počet příloh 0

Klíčová slova: *kontaktní tlak; Hertzovy tlaky; měření sil; kalibrace*

Keywords: *contactpressure; Hertz pressure; forcemeasurement; calibration*

Anotace:

Tato práce se zabývá kalibrací senzorů Tekscan, které se běžně používají v praxi pro měření kontaktních tlaků biomateriálů. Naším úkolem bylo provést kalibraci vážního čidla v kalibrátoru kontaktních tlaků a pomocí navržené metodiky provést měření kontaktních tlaků v případě dural – dural a dural – pryž. Pro navržený kalibrátor, který se skládal z válce a rovné podložky, jsme určili velikost kontaktní plochy použitím Hertzových vztahů.

Abstract:

This thesis deals with calibration of Tekscan sensors, which are widely used for biomaterial contact stresses measurements. Our task consisted of a calibration of a pressure sensor used for our work and measure contact stresses for these material combinations: dural – dural and dural – rubber using specific methods. Using Hertzian contact stress forms we determined contact area for contact of cylinder and plane surface.

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci vypracovala samostatně s použitím odborné literatury a pramenů uvedených na konci této práce.

.....

místo a datum

.....

podpis

Poděkování

Děkuji doc. RNDR. Matěji Danielovi, Ph.D. za odborné vedení v průběhu tvorby bakalářské práce v akademickém roce 2014/15 a také odbornému asistentovi Ing. Hynku Chlupovi za asistenci při experimentálních měřeních. Poděkování také náleží mé rodině, která mě plně podporovala po celou dobu studia.

Obsah:

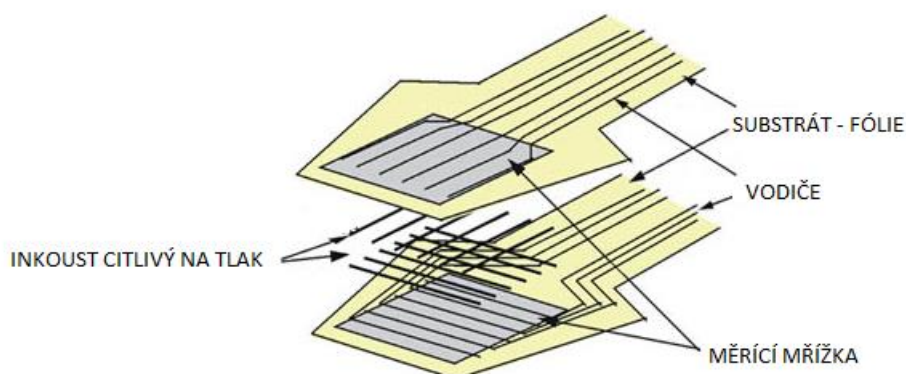
1	ÚVOD	2
2	METODY MĚŘENÍ A VÝPOČTU KONTAKTNÍCH TLAKŮ	3
2.1	VÝPOČTOVÉ METODY	3
2.1.1	<i>Analytická metoda - Hertzovy kontaktní tlaky</i>	3
2.1.2	<i>Numerická metoda - Metoda konečných prvků</i>	6
2.2	EXPERIMENTÁLNÍ METODY	7
2.2.1	<i>Neelektrické metody</i>	7
2.2.2	<i>Elektrické metody</i>	11
2.2.3	<i>Tekscan filmy</i>	13
3	CÍL PRÁCE	15
4	POUŽITÉ METODY A ZPRACOVÁNÍ	16
	TEKSCAN FILM	16
	KALIBRÁTOR	17
	ZPRACOVÁNÍ	20
4.1	KALIBRACE VÁŽNÍHO ČIDLA	20
4.2	STATICKÁ METODA ZATĚŽOVÁNÍ	23
4.3	DYNAMICKÁ METODA ZATĚŽOVÁNÍ	23
5	VÝSLEDKY	30
5.1	VÝSLEDKY KALIBRACE VÁŽNÍHO ČIDLA	30
5.2	VÝSLEDKY STATICKÉ METODY ZATĚŽOVÁNÍ	31
5.3	VÝSLEDKY DYNAMICKÉ METODY ZATĚŽOVÁNÍ	38
6	DISKUZE	41
7	ZÁVĚR	45
8	LITERATURA	46

1 ÚVOD

Piezorezistivní senzory se běžně používají v ortopedických výzkumech pro stanovení rozložení kontaktních tlaků napříč povrchu kloubů. Široce využívané tlakové senzory vyvinuté společností Tekscan (Boston, MA) byly vyvinuty pro relativně jednoduché měření kontaktních tlaků mezi povrchy dvou těles. Tekscan Inc. vyvinul taktilní silový senzor založený na vodivém inkoustu, který je vložen mezi tenkou ohebnou polyesterovou folii [2].

Tyto filmy mohou být tenké až 0,1 mm, jsou flexibilní a přizpůsobivé různým tvarům povrchu. Skládají se maticového rozložení z vodivých proužků v řadách a sloupcích, které jsou natištěny v jednotlivých vrstvách filmu. Řádky piezorezistivního inkoustu jsou aplikovány přes každý vodivý proužek a je mezi nimi ponechán viditelný prostor bez inkoustu [7]. Inkoust poskytuje elektrické spojení mezi horními a spodními vodiči. Odpor tohoto spojení se mění s aplikovanou tlakovou silou. Tudíž, senzor Tekscan obsahuje mřížku silových snímacích senzorů (senselů), které jsou od sebe vzájemně elektricky izolovány. Díky znalosti prostorových rozměrů a rozložení senselů, naměřená silová data můžou být převedena na tlakový profil [2].

Tyto tlakové senzory jsme použili pro náš experiment, ve kterém jsme provedli měření pro materiály s různými moduly pružnosti v tahu/tlaku.



Obr. 1 Tlakový senzor

2 METODY MĚŘENÍ A VÝPOČTU KONTAKTNÍCH TLAKŮ

Při kontaktu dvou pevných povrchů vždy dochází ke vzájemné deformaci. Tyto deformace mohou být čistě elastické, ale i s přídavkem plastické deformace, která vyvolá trvalou změnu tvaru povrchu [3].

Při kontaktních procesech je třeba uvažovat základní tvarové a materiálové vlastnosti dotýkajících se těles, ale také jejich vzájemnou vazbu a reakce mezi nimi. Jelikož může docházet k mnoha různým situacím kontaktu, je třeba zvažovat i jiné aspekty [1]:

- Fyzikální, chemické a mechanické vlastnosti těles.
- Makrogeometrii a mikrogeometrii kontaktních těles.
- Charakteristický druh deformace mezi jednotlivými tělesy.
- Počet těles zúčastňujících se kontaktního procesu.

Při řešení problémů v praxi má velký význam skutečná plocha styku. Pro určení kontaktních tlaků se používají metody výpočtové a experimentální [1].

2.1 Výpočtové metody

2.1.1 Analytická metoda - Hertzovy kontaktní tlaky

Při styku dvou těles o různých poloměrech se zakřivenými povrchy dochází z počátku k dotyku bodovému – v případě dvou koulí, nebo podél čáry – v případě dvou válců. S použitím nejmenšího zatížení se elastická deformace zvětšuje a dochází tak i ke zvětšení kontaktní plochy, přes kterou je zatížení distribuováno jako tlak.

První analýza provedena Heinrichem Hertzem v roce 1881 byla založena na těchto předpokladech [3]:

- Povrchy těles jsou spojité, hladké.
- Velikost styčné plochy je malá ve srovnání s velikostí dotýkajících se objektů.
- Každé těleso může být považováno za lineárně elastické v dostatečně velkém okolí kontaktu.
- Mezeru h mezi nedeformovanými povrchy lze aproximovat výrazem

$$h = Ax^2 + By^2, \quad (1)$$

kde x a y jsou kolmé souřadnice ležící na společné tečně obou povrchů.

Idealizace posledního bodu vyžaduje parabolický profil povrchu, a proto je Hertzova analýza relevantní pro kontakt koulí, válců a elipsoidů [3].

Kontakt dvou válců

Jsou-li dva válce o poloměrech R_1 a R_2 stlačovány k sobě silou na jednotku délky o velikosti P a jsou-li osy válců rovnoběžné, jak je zobrazeno na obrázku 2, pak bude výsledná kontaktní plocha tvořena vzorcem [3]:

$$b = [2PR/\pi E^*]^{1/2} \quad (2)$$

kde b je polovina šířky kontaktní plochy,

E^* je kontaktní modul tvořený vztahem:

$$\frac{1}{E^*} = \frac{1-\nu_1^2}{E_1} + \frac{1-\nu_2^2}{E_2} \quad (3)$$

a R je redukovaný poloměr, který se vypočte podle vztahu:

$$\frac{1}{R} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \quad (4)$$

Rozložení kontaktního tlaku je dáno vztahem [3]:

$$p(x) = p_0 \left\{ 1 - \frac{x^2}{b^2} \right\}^{1/2} \quad (5)$$

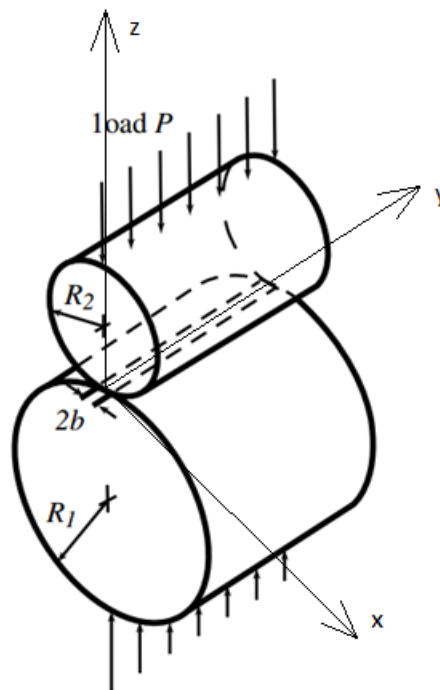
kde maximální tlak je:

$$p_0 = \left\{ \frac{PE^*}{\pi R} \right\}^{1/2} \quad (6)$$

a souřadnice x je měřena kolmo na osy válců.

Střední tlak p_m je roven $P/2b$ a je dán vztahem[3]:

$$p_m = \pi p_0 / 4 \quad (7)$$



Obr. 2 Kontakt rovnoběžných válců [3].

2.1.2 Numerická metoda - Metoda konečných prvků

Pro některé kontaktní problémy nespádající do předcházející kategorie je potřeba použít metodu modelování pomocí numerických prostředků. Běžné problémy tohoto druhu jsou ty, které zahrnují tření a částečný skluz, komplexní geometrii, nelineárnost elastických vlastností nebo plasticitu [3].

V případě, kde kontaktní procesy zahrnují nelineární povahu materiálu, jako je plasticita, nebo když předpoklad poloprostoru není splněn (to znamená, když rozměry tělesa nejsou mnohonásobně větší v porovnání s kontaktní oblastí), je pro výpočet možné použít metodu konečných prvků [3].

Tělesa v kontaktu jsou rozdělena na dvourozměrné osově symetrické prvky, planární prvky nebo na trojrozměrné elementy. Dvojice kontaktních prvků je definována mezi povrchovými uzly, které přijdou po zatížení do styku. Pro tento kontakt může být definován koeficient tření. Jsou také specifikovány vhodné vlastnosti materiálu, okrajové podmínky a zatížení uzlů. Moderní programy mají grafické rozhraní na pomoc při vytváření sítí [3].

Kontaktní problémy zahrnují zatížení rozložené na malé oblasti kontaktu. Tohle má za důsledek rapidní změny napětí v prvcích kolem kontaktu. Z toho důvodu, síť v této oblasti musí být znovu definována adekvátně tak, aby popsala tyto vysoké gradienty napětí. I tak jednoduchá metoda, jako je Hertzova kontaktní analýza, potřebuje jemnou síť pro přesné výsledky. Nelinearity spojené s kontaktem, prokluzování kontaktu a plasticita znamenají, že výsledek je závislý na průběhu zatěžování. To vyžaduje rozdělení aplikace zátěže do pár kroků a nalezení výsledku při každé iteraci [3].

2.2 Experimentální metody

2.2.1 Neelektrické metody

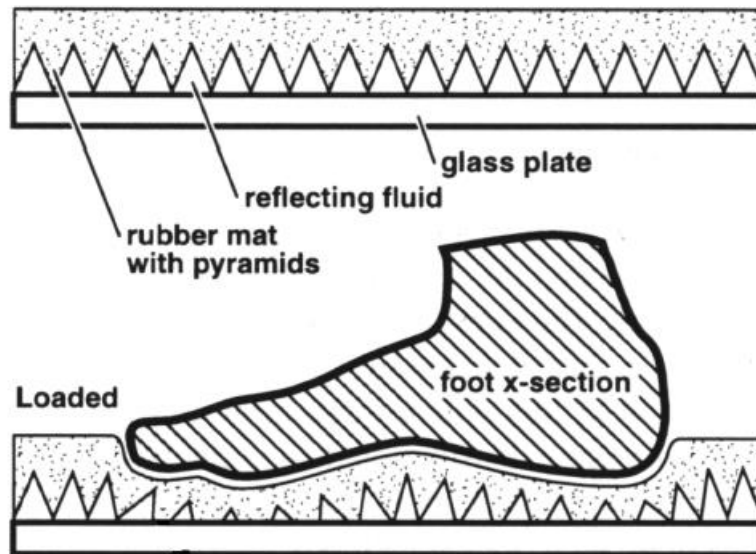
Tradiční metody měření rozložení tlaku

Mezi tradiční metody určení rozložení tlaku a tvaru kontaktní plochy v medicíně se řadí podoskopie a podografie.

- Podoskop se skládá z dřevěné skříňky se skleněným vrchem, kde se snímá tvar kontaktní plochy (Obr. 3). Po úpravě kontaktní plochy je možné stanovit velikost působícího tlaku. Nejjednodušším uspořádáním je tzv. „jehlanový systém“ (Obr. 4). Na vrchní plochu podoskopu se umístí podložka, která je z vnější strany hladká a na vnitřní straně má množství malých jehlanů. V případě zatížení, dochází k deformaci jehlanů, která je úměrná síle působící na základnu daného jehlanu. Deformace vede ke zvětšení kontaktní plochy mezi jehlanem a skleněnou plotnou, která může být určena opticky, např. změnou odrazu světla. Výsledek měření je možné opticky zaznamenat a dále ho zpracovat [5].



Obr. 3 Podoskop [5].



Obr. 4 Znárodnění metody na určení rozložení kontaktního tlaku pomocí jehlanového systému [5].

- Podograf slouží k získání otisku. Skládá se ze začerněného papíru umístěného začerněnou stranou na bílém papíře. Tlakem na začerněný papír se na bílém papíře objeví otisk – podogram (Obr. 5). Intenzita zabarvení je úměrná tlaku. Podogram je možné digitalizovat a dále ho zpracovat [5].



Obr. 5 Podogram[5]

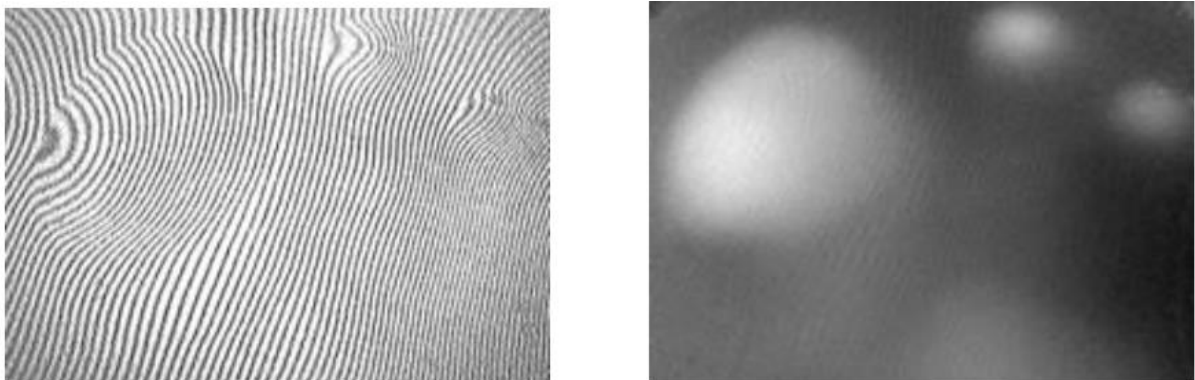
Optické metody

Využití interference

Tato metoda stanovuje rozložení kontaktního tlaku s využitím jevu interference světla. Jako zdroj se používá laser, který poskytuje monochromatické a koherentní záření. Laser osvětluje průsvitnou plotnu a odrazem od spodní a vrchní roviny plotny vzniká interferenční obraz (interferogram). Při nedeformované plotně se interferogram skládá ze soustavy světlých a tmavých proužků. Interferogram se snímá kamerou a použitím Fourierovy analýzy je možné získat deformaci plotny [5].



Obr. 6 Interferogram a schéma zatížení [5].



Obr. 7 Interferogram před zatížením a výsledek zpracování obrazu, výsledná síla je znázorněna ve stupních šedi [5].

Detekce pomocí tlakově-senzitivních filmů

Tyto filmy se podle výrobců označují jako FUJI filmy a metoda měření jako „prescale method“ [5]. Těmito filmy lze měřit tlaky a jejich rozložení. Tyto filmy jsou extrémně tenké a přesné. Různé druhy filmů jsou určeny pro měření různých tlaků v rozsahu 0,2 – 300 MPa [8].

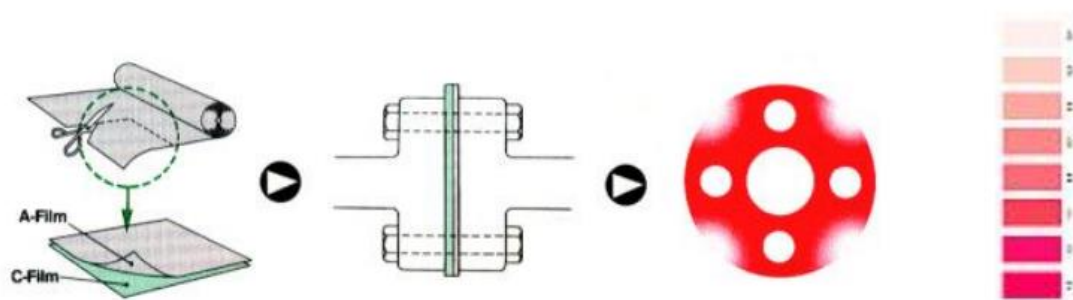
FUJI film se skládá ze dvou vrstev. V první vrstvě jsou uzavřené mikroskopické bublinky obsahující tekutinu. Po stlačení této vrstvy dochází k prasknutí bublinek a uvolnění tekutiny. Tekutina reaguje s materiálem druhé vrstvy a výsledkem je zbarvení druhé vrstvy. Intenzita zbarvení je úměrná množství tekutiny, která se vylila na druhou vrstvu, a tedy je úměrná tlaku. Tlak se určí jednoduše porovnáním zbarvení s barevnou škálou (Obr. 9) [5].

Podle uspořádání rozlišujeme tyto dva typy FUJI filmů (Obr. 8) [8]:

- Dvouvrstvý film - skládá se z A-filmu, který je pokrytý mikrokapslemi s barevnou tekutinou, a C-filmu, který je pokrytý citlivým materiálem. Tento film je určen pro velmi nízké až střední tlaky.
- Jednovrstvý film - na polyesterové podložce je nanesená citlivá vrstva, kterou pokrývají mikrokapsle s tekutinou. Tento film je určen pro střední až vysoké tlaky.



Obr. 8 Dvouvrstvý a jednovrstvý FUJI film[5]



Obr. 9 Vyhodnocení FUJI filmu[5].

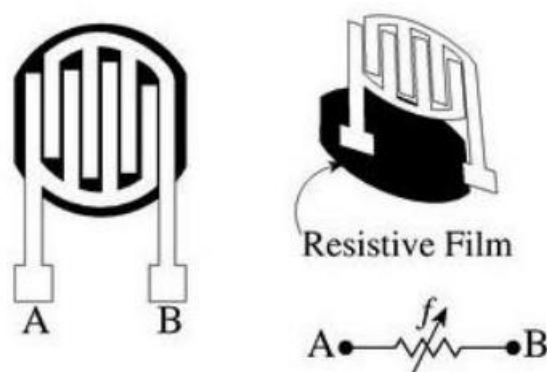
2.2.2 Elektrické metody

Rezistivní metody

Rezistivní metody využívají změny odporu materiálu při jeho deformaci. V technické praxi pracují na tomto principu tenzometry nebo tlakově-závislé rezistory [5].

Tlakově závislé rezistory

Na měření síly a tlaku se používají senzory, které jsou označovány jako FSR – force sensing resistors. Tyto senzory využívají změny vodivosti v důsledku síly (tlaku působícího na senzor). Silově-přeměnný rezistor se obvykle skládá ze dvou částí. První částí je tenká vrstva odporového materiálu a druhou částí jsou kontakty (Obr. 10). Deformací odporové vrstvy, elastomeru, se mění její elektrické vlastnosti. Odporový elastomer může mít různé složení. Může se skládat z polovodiče, který má piezorezistivní vlastnosti. Při jeho stlačení se zvýší počet volných nábojů v polovodiči, a tím se sníží jeho odpor. Druhou možností je využít nevodivý elastomer, ve kterém se nachází vodivé oblasti. Po jejich deformaci dojde k přiblížení vodivých oblastí, čím se změní odpor oblasti [5].



Obr. 10 Základní schéma FSR senzoru [5].

Kapacitní metody

Podobně jako rezistivní senzory fungují i kapacitní. Nejjednodušší je vysvětlit princip kapacitního senzoru na jednoduchém plotnovém kondenzátoru. Jeho kapacita C závisí na ploše desek S , na jejich vzdálenosti d a permitivitě materiálu mezi deskami ε [5].

$$C = \varepsilon \frac{S}{d} \quad (8)$$

Jak se elektrody přiblíží, změní se i kapacita kondenzátoru. Existuje více typů kapacitních detektorů tlaku, které se liší svojí konstrukcí. Výhodami kapacitních senzorů oproti rezistivním senzorům jsou vyšší citlivosti, vyšší linearita, nižší hystereze a menší citlivosti na změny teploty. Nevýhodou je jejich menší citlivost při dynamických měřeních (kapacitance senzoru) a menší prostorové rozlišení v porovnání s rezistivními senzory [5].

Piezelektrické senzory

Piezelektrický jev bychom mohli charakterizovat jako přeměnu mechanické energie na energii elektrickou. Působíme-li tlakem na polarizovaný krystal, výsledná mechanická deformace vede ke vzniku náboje na povrchu krystalu. Permanentní polarizaci pozorujeme hlavně u krystalů. Povrchový náboj je však kompenzovaný volnými náboji, které se vyskytují ve vzduchu. Působením dostatečnou silou na krystal dochází k jeho deformaci. V důsledku této deformace se naruší orientace elektrických dipólů a výsledkem je náboj pozorovatelný na povrchu krystalu. Náboj se projeví jako napětí na krystalu.

Abychom tento efekt mohli využít, musíme změřit napětí na krystalu. Dvě kovové plotny slouží k odvodu náboje z povrchu krystalu. Externí síla F způsobí vznik náboje Q_F na povrchu krystalu. Velikost náboje na povrchu je přibližně úměrná působící síle. Tento náboj způsobí vznik napětí:

$$V = \frac{Q_F}{C}, \quad (9)$$

kde C je kapacita krystalu. Abychom mohli změřit vzniklý náboj, je nutné mít voltmetr s dostatečnou vstupní impedancí.

2.2.3 Tekscan filmy

Jednou z elektrických rezistivních metod pro měření kontaktních tlaků jsou Tekscan filmy, které jsme použili pro naše experimentální měření.

Tekscan tlakové senzory byly vyvinuty pro relativně jednoduché měření kontaktních tlaků mezi povrchy dvou těles. Tekscan Inc. vyvinul taktilní silový senzor založený na vodivém inkoustu, který je vložen mezi tenkou ohebnou polyesterovou folii [2].

Elektricky vodivé cesty jsou natištěny na polyesterových listech a vodivý inkoust je uložen mezi horní a spodní listy v místech, ve kterých se cesty protínají. Inkoust poskytuje elektrické spojení mezi horními a spodními vodiči. Odpor tohoto spojení se mění s aplikovanou tlakovou silou. Tudiž, senzor Tekscan obsahuje mřížku silových snímacích senzorů (senselů), které jsou od sebe vzájemně elektricky izolovány. Díky znalosti prostorových rozměrů a rozložení senselů, naměřená silová data mohou být převedena na tlakový profil. Změnou vzdálenosti a vzorů vodivých cest Tekscan vyvinul řadu senzorů různých tvarů, velikostí a rozlišení [2].

Tekscan systém nabízí výhodnou metodu pro měření kontaktních tlaků mezi dvěma protilehlými plochami. Senzory jsou velmi tenké a flexibilní a přizpůsobivé různým tvarům povrchu. Tento systém je dodáván s hardwarem a softwarem k měření změny odporu s aplikovanou silou rozloženou na senselech, k digitalizaci naměřených signálů, k přenosu digitálních dat do PC a zobrazení naměřených údajů jako dynamický tlakový profil [2].

Je tu ovšem několik faktorů, které ovlivňují výstupní hodnoty Tekscan senzoru, a v důsledku toho přesnost měření. Mezi tyto faktory patří [2]:

- Změny citlivosti napříč jednotlivými sensely.
- Creep ve výstupních hodnotách s konstantním aplikovaným tlakem v závislosti na čase, což vede k hysterezi v dynamickém výstupu.
- Teplota.
- Zakřivení kontaktních ploch.

Postup kalibrace Tekscan senzorů podle výrobce spočívá ve vytvoření kalibrační křivky pouze ze dvou bodů, které se proloží lineární křivkou. Tato metoda je vhodná pro použití materiálů s vyšším modulem pružnosti v tahu/tlaku, kde deformace materiálu vzhledem k deformaci filmu je malá. Jelikož se kalibrační křivka pro měkké materiály používané v biomechanice mění, je potřeba ověřit průběh těchto křivek.

3 CÍL PRÁCE

Cílem této práce bylo ověřit metodiku kalibrace senzorů Tekscan doporučenou výrobcem v závislosti na vlastnostech měřeného materiálu.

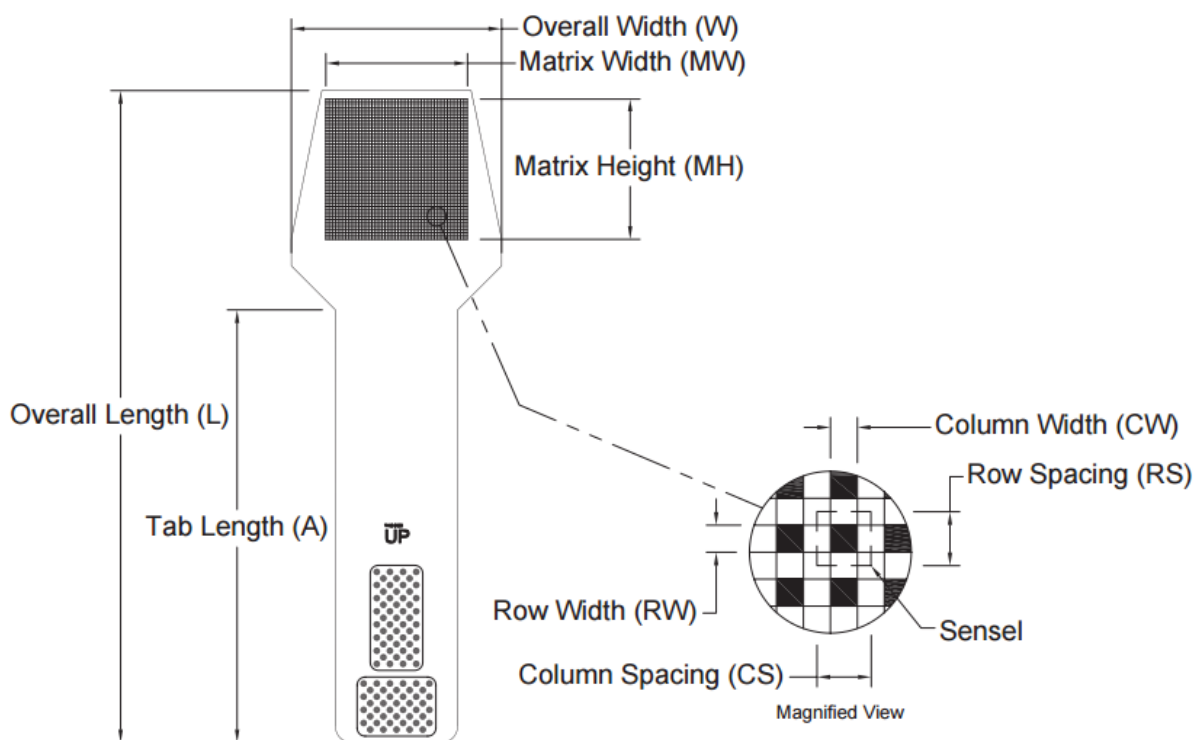
Specifické cíle práce byly:

1. Kalibrace vážního čidla v kalibrátoru kontaktních tlaků.
2. Navržení metodiky statického a dynamického měření.
3. Provést měření kontaktních tlaků v případě kontaktu dural – dural.
4. Provést měření kontaktních tlaků v případě kontaktu pryžová podložka – dural.
5. Vyhodnocení naměřených dat.

4 POUŽITÉ METODY A ZPRACOVÁNÍ

Tekscan film

K našemu měření jsme použili tlakové snímací filmy 5051 s označením 1,200 PSI (8,274 MPa) a 5,000 PSI (34,475 MPa).



Obr. 11 Popis Tekscan filmu 5051 [4].

Parametry a rozměry jsou uvedeny v následující tabulce:

General Dimensions			Sensing Region Dimensions						Summary			
Overall Length <i>L</i>	Overall Width <i>W</i>	Tab Length <i>A</i>	Matrix Width <i>MW</i>	Matrix Height <i>MH</i>	Columns			Rows			Total No. of Sensels	Sensel Spatial Resolution
					<i>CW</i>	Pitch <i>CS</i>	<i>Qty.</i>	<i>RW</i>	Pitch <i>RS</i>	<i>Qty.</i>		
(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)		(mm)	(mm)			(sensel per sq-cm)
252.5	81.3	166.2	55.9	55.9	0.8	1.3	44	0.8	1.3	44	1,936	62.0
(in)	(in)	(in)	(in)	(in)	(in)	(in)		(in)	(in)			(sensel per sq-in)
9.94	3.20	6.54	2.20	2.20	0.030	0.050	44	0.030	0.050	44	1,936	400.0

Pressure Ranges										
kPa	48	345	1,034	2,413	3,448	8,274	17,238	34,475	68,950	172,375
psi	7	50	150	350	500	1,200	2,500	5,000	10,000	25,000

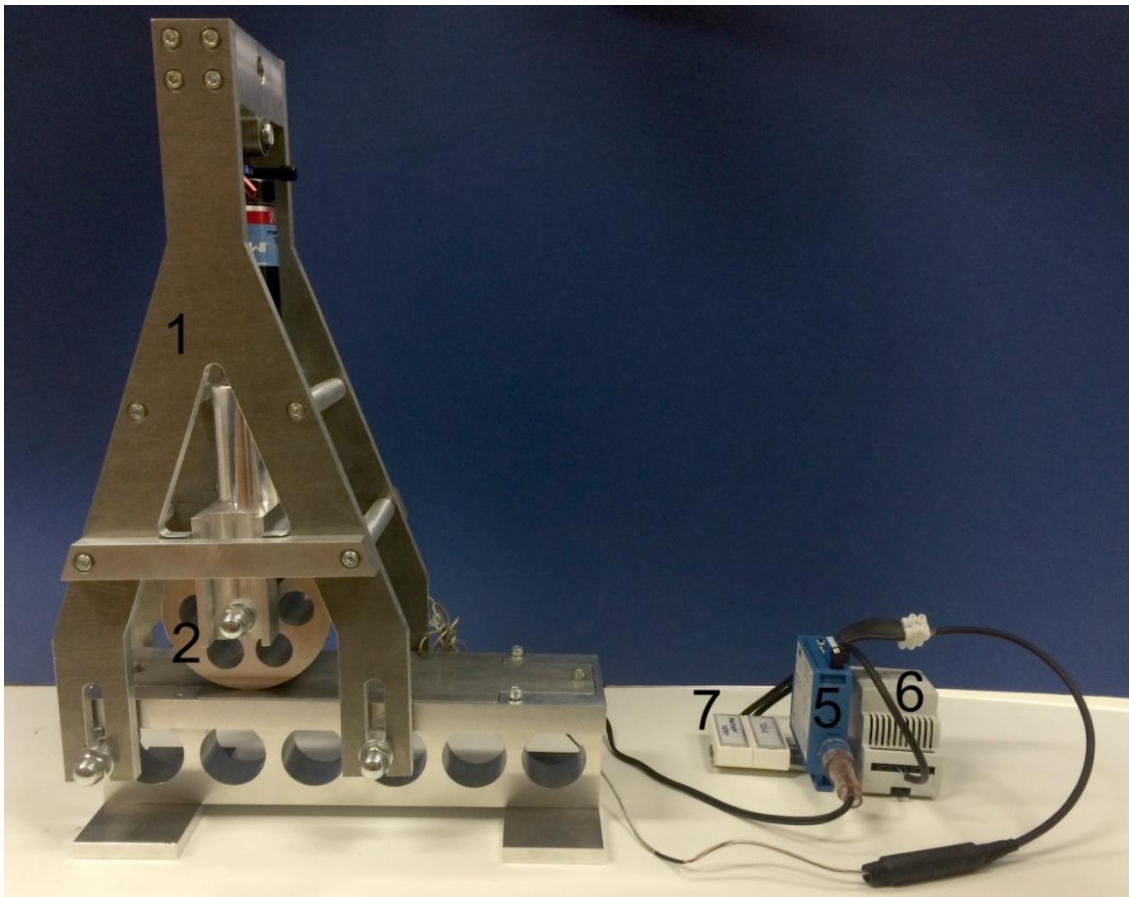
Tab. 1 Parametry Tekscan filmu 5051 [4].

Kalibrátor

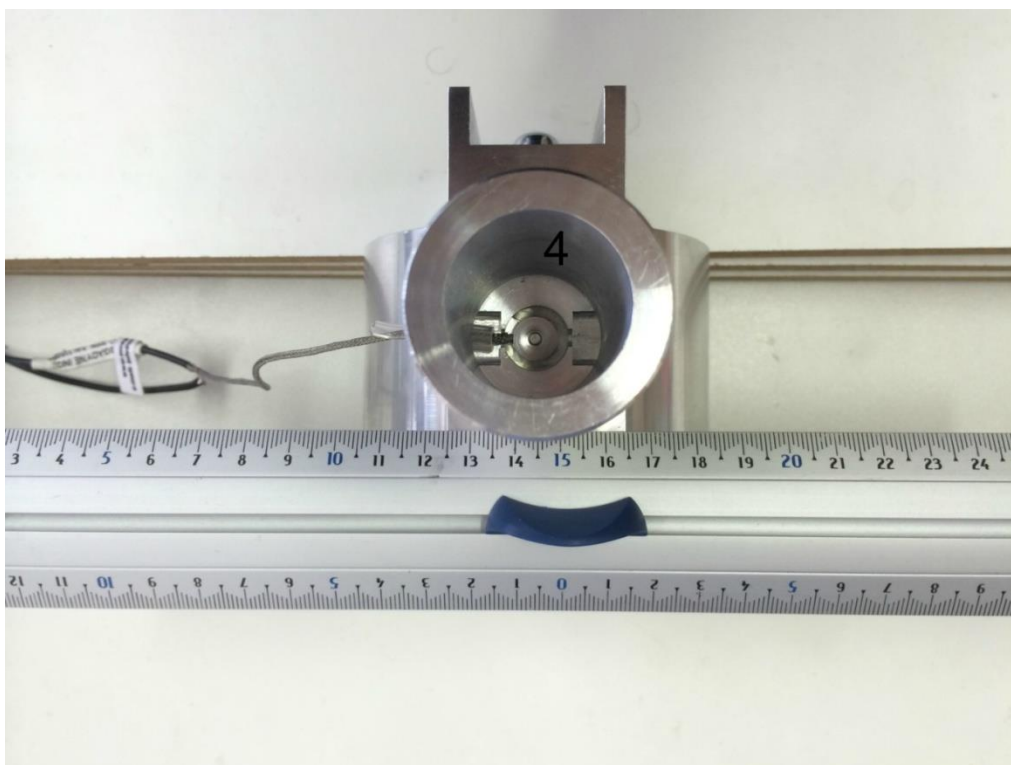
Jako zařízení pro měření jsme použili kalibrátor vyvinutý v Ústavu mechaniky, biomechaniky a mechatroniky, Fakulta strojní, České vysoké učení technické v Praze.

Měřicí soustava se skládá z těchto prvků:

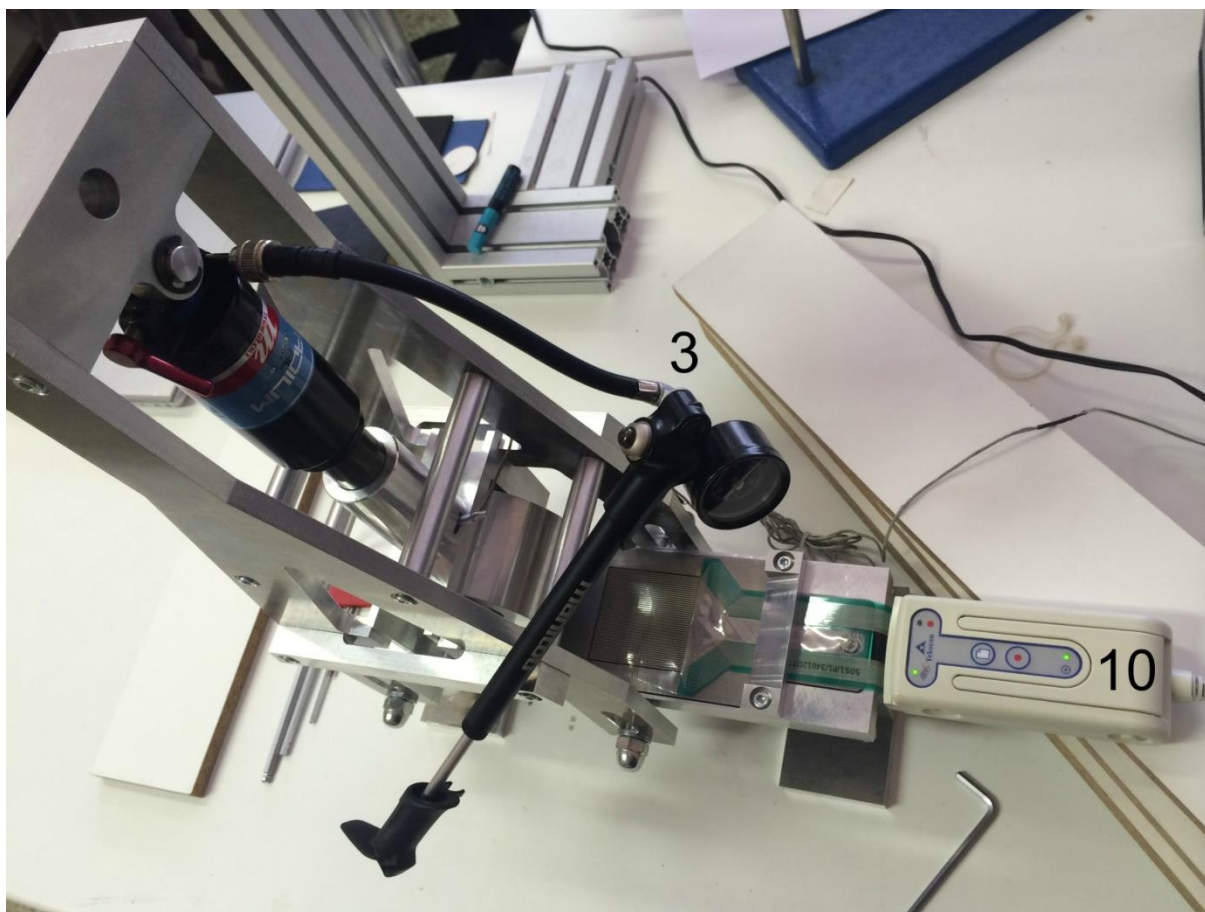
1. kovová konstrukce s rovnou podložkou vyrobená z duralu
2. pneumatický válec
3. pumpička pro tlakování vzduchem
4. vážní čidlo
5. programovatelný převodník s tenzometrickým můstkem
6. regulovatelný zdroj stejnosměrného napětí
7. vyvážení tenzometrického můstku
8. napájecí kabely
9. kabely spojující měřicí jednotku a PC pro zaznamenání výstupních dat
10. zařízení zaznamenávající data z Tekscan filmu do PC



Obr. 12 Měřicí soustava s kalibrátorem.



Obr. 13 Detail vážního čidla.



Obr. 14 Ukázka připojení Tekscan snímače.

Součástí kalibrátoru je pneumatický válec, který přitlačnou silou působí na rovnou podložku. Mezi válec a rovnou podložku je vložen snímací film Tekscan, který zaznamenává měřené hodnoty do PC v bezrozměrných jednotkách v rozsahu 0-256 v matici stejné jako je rozložení jednotlivých sensel tohoto filmu. Na válec je aplikována shora přitlačná síla, která působí na vážení čidlo umístěné nad válcem. Vážní čidlo zaznamenává data v milivoltech, ta jsou vedena pomocí kabelu do programovatelného zesilovače, který obsahuje tenzometrický můstek a je napájen regulovatelným zdrojem stejnosměrného napětí. Převodník převede data z milivoltů na volty a pomocí kabelu jsou přenesena do AD převodníku.

Technické parametry:

Přítlačný válec:

Materiál válce a rovné podložky: dural (Youngův modul pružnosti $E = 73\,000\text{ MPa}$, Poissonovo číslo $\nu = 0,33$ [-])

- Průměr $D = 100\text{ mm}$
- Šířka $L = 60\text{ mm}$

Vážní čidlo model LCMKD-200N (OMEGADYNE INC, Ohio):

- silový rozsah $0.000 - 200.000\text{ N}$
- excitace čidla 5ti volty
- měřící rozsah - citlivost 1.515 mV/V

Zpracování

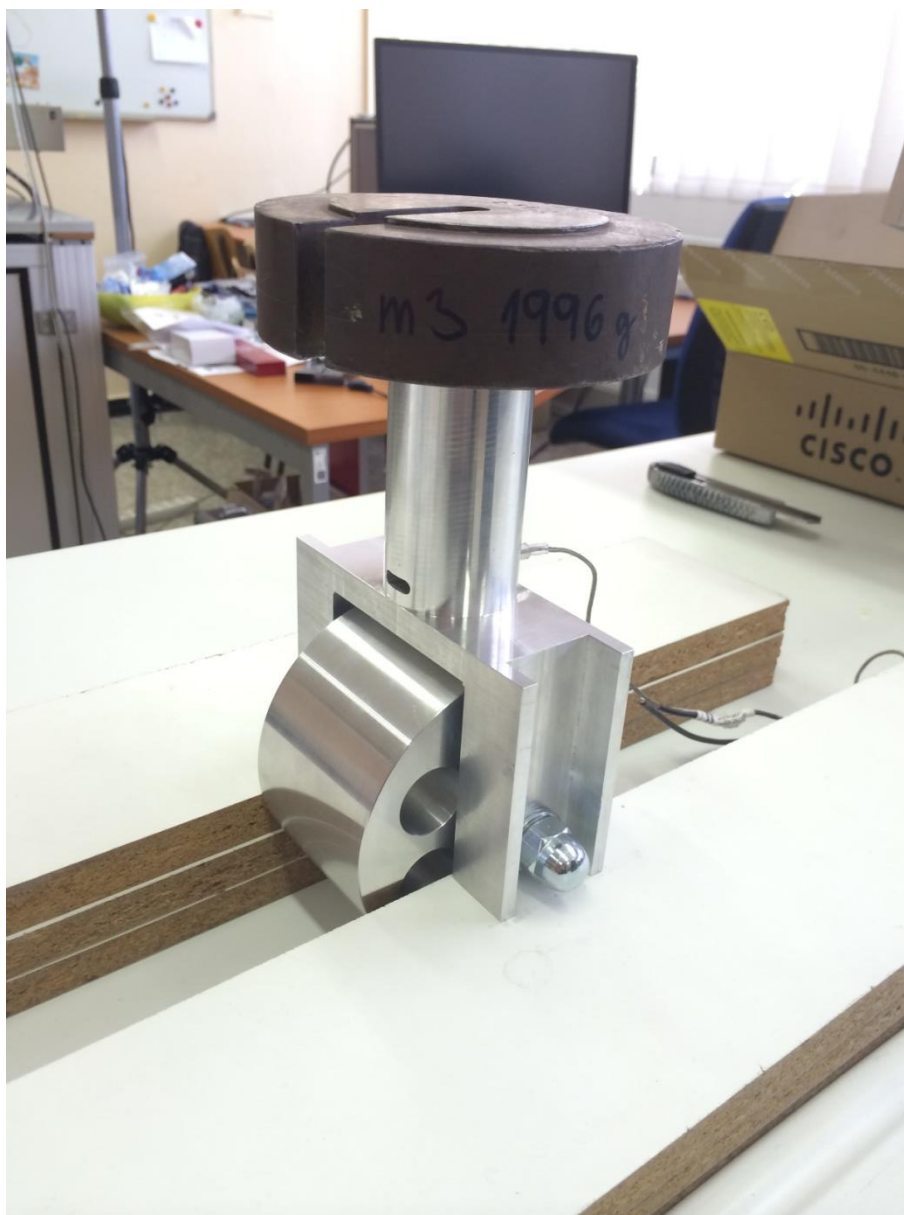
4.1 Kalibrace vážního čidla

Nejprve jsme provedli měření pro zjištění kalibrační křivky vážního čidla. Měření spočívalo v zatěžování vážního čidla závažími o známých hmotnostech. Výstupní hodnoty byly zaznamenávány ve voltech. Poté jsme vynesli do grafu závislost síly na voltech a tato data jsme aproximovali lineární křivkou. Tím vznikla kalibrační křivka silového čidla. Předpokládali jsme lineární chování po celém průběhu, a tento předpoklad jsme ověřili.

Měření probíhalo zatěžováním po 9 měřeních, a poté postupným ubíráním závaží, také po 9 měřeních. Hmotnosti a postup zatěžování je uveden v tab. 2. Vzorkovací frekvence při kalibraci byla 200 Hz a čas snímání 2 s . Z každého měření tedy vyšlo 400 hodnot [V], ze kterých jsme spočítali průměrné hodnoty a směrodatné odchylky.

	Data	Závaží	Hmotnost závaží [g]
Hmotnosti jednotlivých závaží:			
$m_1 = 39 \text{ g}$			
$m_2 = 1995 \text{ g}$			
$m_3 = 1996 \text{ g}$			
$m_4 = 1998 \text{ g}$			
$m_5 = 5000 \text{ g}$			
$m_6 = 10\,000 \text{ g}$			
Zatěžování	0	-	0
	1	$m_1 + m_2$	2 034
	2	$m_1 + m_2 + m_3$	4 030
	3	$m_1 + m_2 + m_5$	7 034
	4	$m_1 + m_6$	10 039
	5	$m_1 + m_2 + m_6$	12 036
	6	$m_1 + m_5 + m_6$	15 039
	7	$m_1 + m_3 + m_5 + m_6$	17 035
	8	$m_1 + m_2 + m_3 + m_4 + m_5 + m_6$	21 028
Odlehčování	9	$m_1 + m_3 + m_4 + m_5 + m_6$	19 033
	10	$m_1 + m_3 + m_5 + m_6$	17 035
	11	$m_1 + m_5 + m_6$	15 039
	12	$m_1 + m_3 + m_6$	12 035
	13	$m_1 + m_6$	10 039
	14	$m_1 + m_4 + m_5$	8 037
	15	$m_1 + m_5$	5 039
	16	$m_1 + m_3$	2 035
	17	-	0

Tab. 2 Hmotnosti použitých závaží a postup zatěžování.



Obr. 15 Ukázka zatěžování vážního čidla.

Pro výpočet působící síly F jsme použili následující vztah:

$$F = m * g, \tag{10}$$

kde m je součet hmotností použitých pro jednotlivé zatěžování a g je gravitační konstanta.

4.2 Statická metoda zatěžování

Po kalibraci vážního čidla jsme mohli provést měření s použitím Tekscan filmů, abychom zjistili průběh kalibračních křivek pro jednotlivé senzory s podložkami z různých materiálů.

Pro měření jsme použili tlakové snímací filmy 5051 s označením 1,200 PSI a 5,000 PSI. Provedlo se měření pro zatěžování válce na rovnou podložku, bez jakéhokoliv přídavného materiálu.

Postup měření:

Pod válec jsme vložili snímací filtr Tekscan a válec zatížili konstantní silou. Nastavovali jsme hodnoty 0-3 volty s krokem 0,5 V. Měřili jsme po dobu 10 vteřin. Dostali jsme 4 soubory dat, pro každý snímací film hodnoty z Tekscan přístroje a hodnoty pro vážní čidlo.

Tato data vyžadovala zpracování v programu Matlab, abychom následně mohli provést výpočet maxim, středních hodnot a směrodatných odchylek pro každé měření.

4.3 Dynamická metoda zatěžování

Pro měření jsme použili tlakové snímací filmy 5051 s označením 1,200 PSI a 5,000 PSI. Nejprve se provedlo měření pro zatěžování válce na rovnou podložku, bez jakéhokoliv přídavného materiálu. Poté se provedlo měření s pryžovou podložkou, aby se zjistilo, jak se změní její kalibrační křivka při použití přídavného měkkého materiálu.

Postup měření:

Před zahájením měření jsme pod válec vložili snímací film a válec zatížili silou. Po spuštění měření jsme kontinuálně snižovali sílu snižováním tlaku vzduchu v pneumatickém válci. Měření bez přídavného materiálu probíhalo zhruba po 20 vteřinách a záznam dat probíhal každých 0,005 vteřin. Měření se provedlo pro oba filmy. Měření s přídavnou pryžovou

podložkou probíhalo necelou minutu a záznam dat byl po 0,01 vteřinách. Měřilo se pouze pro film s označením 1,200. Z těchto měření jsme opět získali hodnoty v maticovém tvaru pocházející z Tekscan snímače a hodnoty času a voltů získané pro vážní čidlo. Tyto hodnoty vyžadovaly úpravu a zpracování v programu Matlab. Vyneseme-li tato data do grafu, dostaneme křivky na Obr. 16. Naším záměrem bylo najít na každé z těchto dvou křivek bod, kde křivka začne klesat. Do těchto dvou bodů jsme aplikovali nový počátek souřadnic, abychom tyto křivky mohli sjednotit. Tyto body jsme našli tak, že jsme nejprve křivku očistili od šumu pomocí Savitzky-Golay filtrovací metodou [6] (Obr. 17) a provedli jsme druhou derivaci pro identifikaci bodu, kde křivky začínají klesat. Vynesli jsme do grafu závislosti napětí na hodnotách z Tekscan filmu. Tyto hodnoty napětí jsme převedli pomocí regresní rovnice kalibrační křivky pro vážní čidlo (provedeno v bodě 4.1) na sílu. Vznikne tak graf závislosti hodnot z Tekscan filmu na síle.

Zpracování dat

Následující program nejdříve upraví data odstraněním mezer a písmen. Načte naměřené hodnoty, které následně filtruje. Provede první a druhou derivaci naměřených hodnot pro nalezení charakteristického bodu. Následně provede synchronizaci dat a identifikaci odpovídajících hodnot signálu z vážního čidla a senzoru Tekscan. Převede napětí na sílu a vykreslí vybrané závislosti do grafů.

```
1;
%Vymaže všechny proměnné z předchozích výpočtů.
clearall; closeall;
%Upraví data pomocí programu ,sed` - vymaže mezery a písmena.
system("sed '/^[A-X]/ d' Movie0_M.csv >m.csv");
pause(1);
system("sed '/^\s*$/d' m.csv > m2.csv");

%Načte soubor hodnot oddělených čárkou do proměnné „I“.
I = csvread('m4.csv');

%Načte proměnné z uloženého souboru.
load'data_4.txt'
%Uloží načtená data do proměnné „data“.
data = data_4;
%Vytvoří řádkový vektor „time“ s hodnotami od 0 po 0.01 do 19.99.
time = [0:0.01:19.99];
```

```

%Do matice „timeV“ uloží první sloupeček z matice „data“.
timeV = data(:,1);
%Do matice „V“ uloží druhý sloupeček z matice „data“.
V = data(:,2);

%Nalezne sloupeček s nejvyšší hodnotou a jeho index uloží do
proměnné „idxMax“.
idxMax = find(max(I)==max(max(I)));
%Do proměnné „j“ uloží hodnotu 0.
j=0;
%Začátek cyklu for, kde se postupně mění hodnota proměnné „i“ od
1 po 44 až do hodnoty počet řádků matice „I“-44.
for i=1:44:(size(I,1)-44)
%K hodnotě proměnné „j“ se přičte 1.
    j=j+1;
%Do buňky matice „Isum“ s indexem j vloží součet všech hodnot
matice „I“ z řádků i až i+43 a ze všech sloupečků.
    Isum(j) = sum(sum(I(i:i+43,:)));
%Do matice „TMP“ uloží i-tý až i+43-tý řádek matice „I“.
    TMP = I(i:i+43,:);
%Do buňky matice „Imax“ s indexem j vloží maximální hodnotu
matice „TMP“ ze sloupečku s indexem idxMax.
    Imax(j) = max(TMP(:,idxMax));
%Konec cyklu for.
end

%Do matice "Vfilter" uloží Savitzky-Golay filtrovací metodou
filtrované hodnoty matice "V".
Vfilter = sgolayfilt(V,1,51);
%Do matice "Ifilter" uloží Savitzky-Golay filtrovací metodou
filtrované hodnoty matice "I".
Ifilter = sgolayfilt(Imax,1,51);

%Do proměnné "x5" uloží hodnotu 10.
x5 = 10;
%Do matice "I5" uloží první a následně každou x5-tou hodnotu
matice "Ifilter".
I5 = Ifilter(1:x5:end);
%Do matice "time5" uloží první a následně každou x5-tou hodnotu
matice "time".
time5 = time(1:x5:end);
%Do matice "diff1" uloží rozdíly sousedních hodnot matice "I5".
diff1 = diff(I5);
%Do matice "diff1F" uloží Savitzky-Golay filtrovací metodou
filtrované hodnoty matice "diff1".
diff1F = sgolayfilt(diff1,1,13);
%Do matice "diff2" uloží rozdíly sousedních hodnot matice
"diff1F".
diff2 = diff(diff1F);
%Do matice "diff2F" uloží Savitzky-Golay filtrovací metodou
filtrované hodnoty matice "diff2".

```



```

diff2F = sgolayfilt(diff2,1,13);
%Nalezne index buňky s nejnižší hodnotou matice "diff2F" a uloží
ho do proměnné "idxSI".
idxSI = find(diff2F==min(diff2F));

%Do proměnné "x5" uloží hodnotu 10.
x5 = 10;
%Do matice "V5" uloží první a následně každou x5-tou hodnotu
matice "Vfilter".
V5 = Vfilter(1:x5:end);
%Do matice "timeV5" uloží první a následně každou x5-tou hodnotu
matice "timeV".
timeV5 = timeV(1:x5:end);
%Do matice "diffV1" uloží rozdíly sousedních hodnot matice "V5".
diffV1 = diff(V5);
%Do matice "diffV1F" uloží Savitzky-Golay filtrovací metodou
filtrované hodnoty matice "diffV1".
diffV1F = sgolayfilt(diffV1,1,13);
%Do matice "diffV2" uloží rozdíly sousedních hodnot matice
"diffV1F".
diffV2 = diff(diffV1F);
%Do matice "diffV2F" uloží Savitzky-Golay filtrovací metodou
filtrované hodnoty matice "diffV2".
diffV2F = sgolayfilt(diffV2,1,13);
%Nalezne index buňky s nejnižší hodnotou matice "diffV2F" a uloží
ho do proměnné "idxSV".
idxSV = find(diffV2F==min(diffV2F));

%Od menší z hodnot "idxSI" a "idxSV" odečte 1 a výsledek uloží
do proměnné "count".
count = min(idxSI,idxSV)-1;

%Převede napětí na sílu.
F=67.37*V5;

%Vytvoří obrázek s názvem figure1.
figure(1)
%Vynese do grafu závislost „timeV“ na „V“ v modré barvě a
závislost „timeV5“ na „V5“ v červené barvě.
plot(timeV,V,'b',timeV5,V5,'r')
%Popíše x-ovou osu „t [s]“.
xlabel('t [s]');
%Popíše y-ovou osu „U [V]“.
ylabel('U [V]');
%Zobrazí mřížku do pozadí grafu.
grid on

figure(2)
plot(timeV5(2:end),diffV1,'b',timeV5(2:end),diffV1F,'r')
xlabel('t [s]');
ylabel('dU [V]');

```

```

grid on

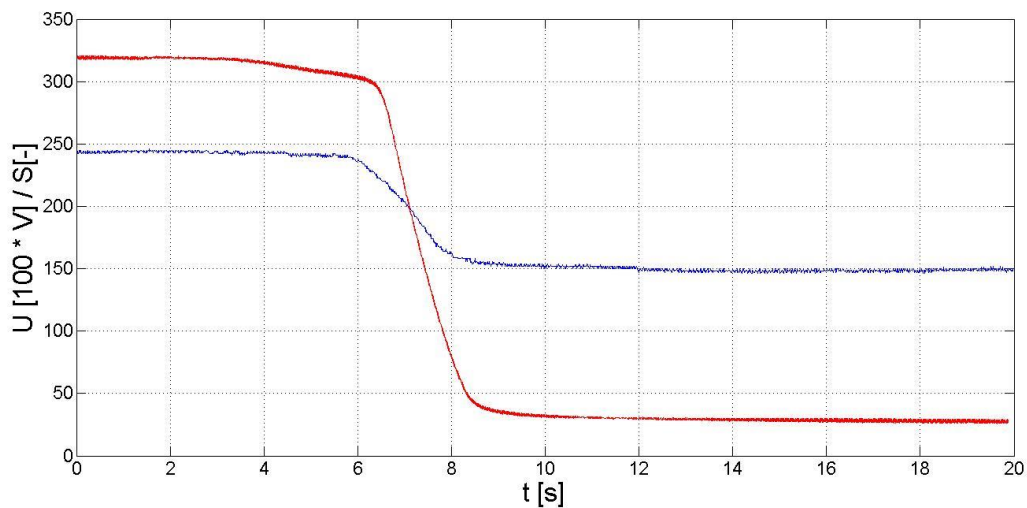
figure(3)
plot(timeV5(3:end),diffV2,'b',timeV5(3:end),diffV2F,'r')
xlabel('t [s]');
ylabel('d^2U [V]');
grid on

figure(4)
surf(I(1:100:end,:))

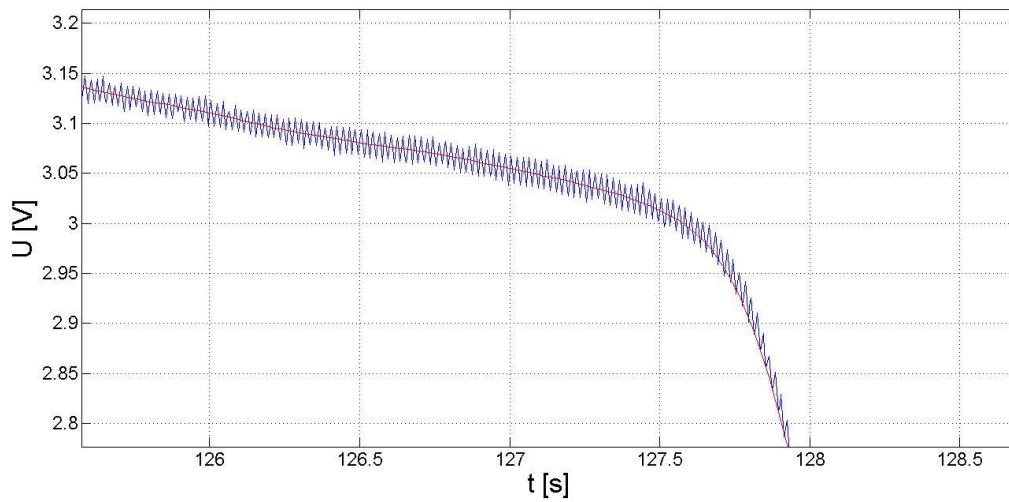
figure(5)
plot(F(idxSV-count:idxSV+100),I5(idxSI-count:idxSI+100),'x')
xlabel('F [V]');
ylabel(' - ');
grid on

figure(6)
plot(time(1:end-1),Imax,'b',timeV-timeV(1),V*100,'r')
xlabel('t [s]');
ylabel('U [100 * V] / S[-]');
grid on

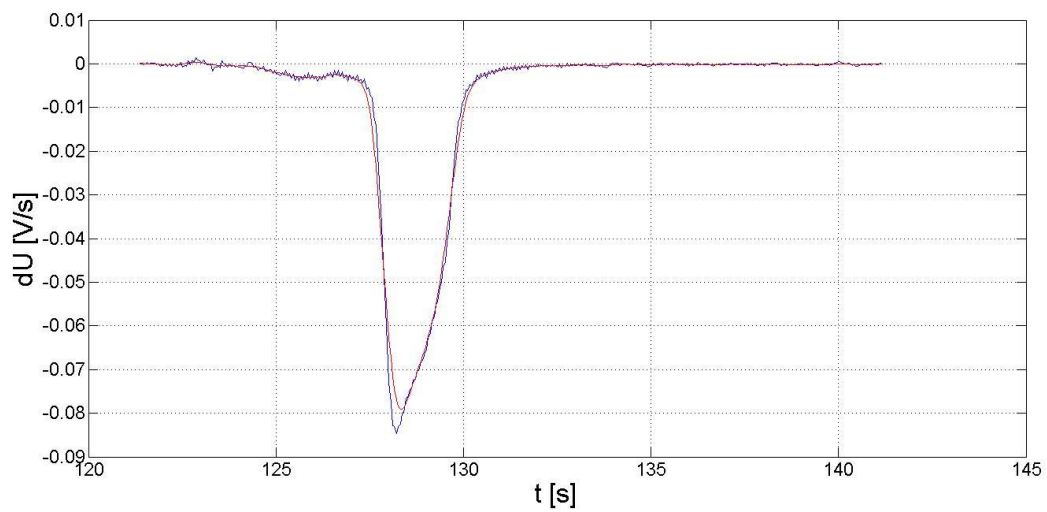
```



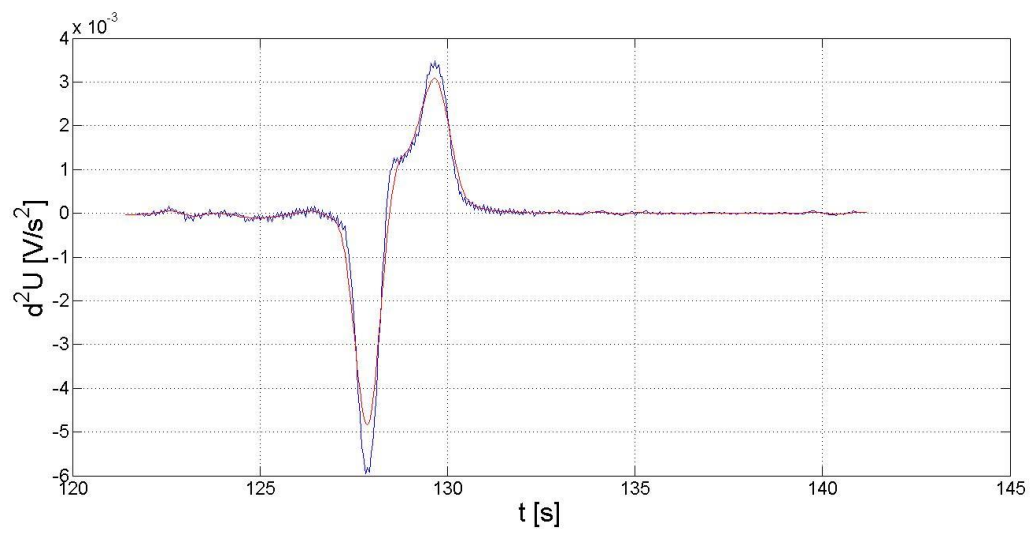
Obr. 16 Závislost měřených signálů na čase. Červená křivka znázorňuje závislost napětí vynásobené x100 na čase. Modrá křivka znázorňuje závislost hodnot signálu z Tekscanu na čase.



Obr. 17 Detail vyhlazení křivky pomocí Savitzky-Golay filtrovací metodou. Modrá křivka znázorňuje původní zašuměná data. Červená křivka znázorňuje vyhlazení.



Obr. 18 První derivace a vyhlazení.



Obr. 19 Druhá derivace a vyhlazení.

5 VÝSLEDKY

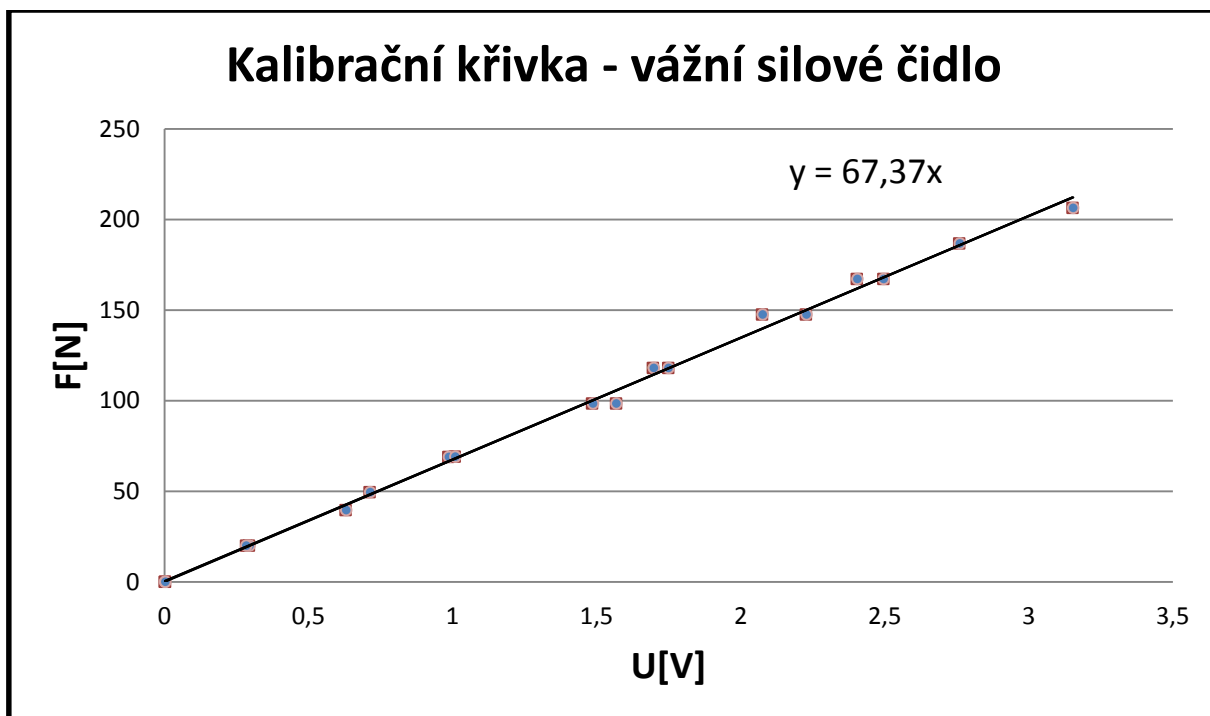
5.1 Výsledky kalibrace vážního čidla

Vyhodnocení těchto dat jsme provedli v programu Excel, kde jsme vynesli do grafu závislost měřeného signálu $U[V]$ na síle $F[N]$.

Tuto závislost jsme aproximovali lineární křivkou a popsali jí regresní rovnicí. Výstupem zpracování těchto dat je kalibrační křivka s regresní rovnicí:

$$F = 67,37 U \quad (11)$$

Do tohoto grafu (Obr. 20) jsme vynesli i hodnoty směrodatných odchylek a aproximovali je lineárními křivkami.



Obr. 20 Kalibrační křivka vážního čidla.

5.2 Výsledky statické metody zatěžování

Výsledkem měření byla matice o velikosti 44 x 44, kde každý řádek odpovídá řádku rozložení senzelů a každý sloupec odpovídá sloupci rozložení senzelů. V tabulce 3-5 jsou uvedeny maximální hodnoty, střední hodnoty a směrodatné odchylky naměřené pro senzor s označením 1.200 při statické kalibraci. V tabulce 6-8 jsou uvedeny maximální hodnoty, střední hodnoty a směrodatné odchylky naměřené pro senzor s označením 5.000 při statické kalibraci. V grafech na obrázcích 21-28 jsou vyneseny závislosti síly na hodnotách z Tekscanu, nejedná se proto o kalibrační křivky.

Tyto grafy ukazují viditelné rozdíly, které značí nepřesnost a chybnost měření. Povahu křivek jsme předpokládali lineární, při správném měření. Chybnost měření spočívala v zakřivení špatně vyrobené rovné podložky, na kterou válec působil.

Z grafu na Obr. 21 je prokazatelná saturace senzoru, kdy při dosažení hodnoty signálu z Tekscan o velikosti 250 [-] senzor přestane reagovat. Z grafu na Obr. 22 pozorujeme lineární závislost. V grafu na Obr. 23 je prokazatelné, že senzor zpočátku nereaguje na malé zatížení. Z grafu na Obr. 24 vidíme nejprve lineární průběh, který postupně přechází v konstantní.

Závislosti na obrázcích 25-28 prokazují větší linearitu kvůli většímu rozsahu použitého senzoru s označením 5.000.

Tabulky a grafy pro film s označením 1,200 pro statickou kalibraci

U[V]	F[N]	1	6	11	16	23	29	34	39	44
0	7,1	92	6	0	0	0	0	0	4	170
0,5	29,8	179	40	6	5	4	0	0	13	164
1	72,2	212	46	7	5	4	0	4	44	255
1,5	104,7	223	48	13	10	12	11	8	68	255
2	140,9	248	68	19	15	14	13	14	86	255
2,5	174,6	255	74	26	21	18	16	17	86	255
3	210,9	255	86	35	26	22	18	19	88	255

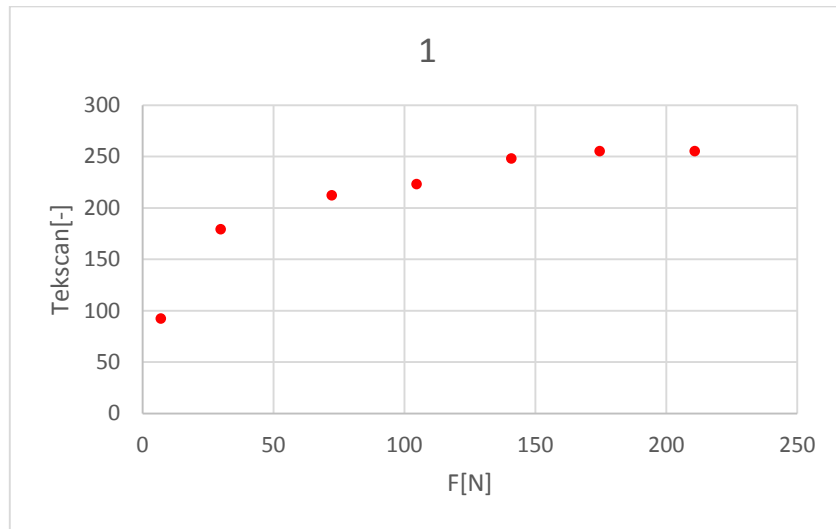
Tab. 3 Maximální hodnoty naměřené pro Tekscan senzor s označením 1.200 při statické kalibraci.

U[V]	F[N]	1	6	11	16	23	29	34	39	44
0	7,1	79,8	4,5	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	4,0	116,0
0,5	29,8	177,6	38,7	4,4	4,1	4,0	0,0	0,0	8,4	133,4
1	72,2	115,9	24,8	5,5	4,1	4,0	0,0	4,0	42,9	143,0
1,5	104,7	222,4	46,0	11,8	8,1	10,0	9,0	6,5	66,2	142,2
2	140,9	237,4	60,3	17,5	13,6	12,9	11,7	11,4	69,1	163,4
2,5	174,6	255,0	72,7	24,7	19,3	17,0	14,3	15,3	50,2	214,2
3	210,9	255,0	84,8	33,8	24,8	20,8	13,6	17,2	59,9	237,4

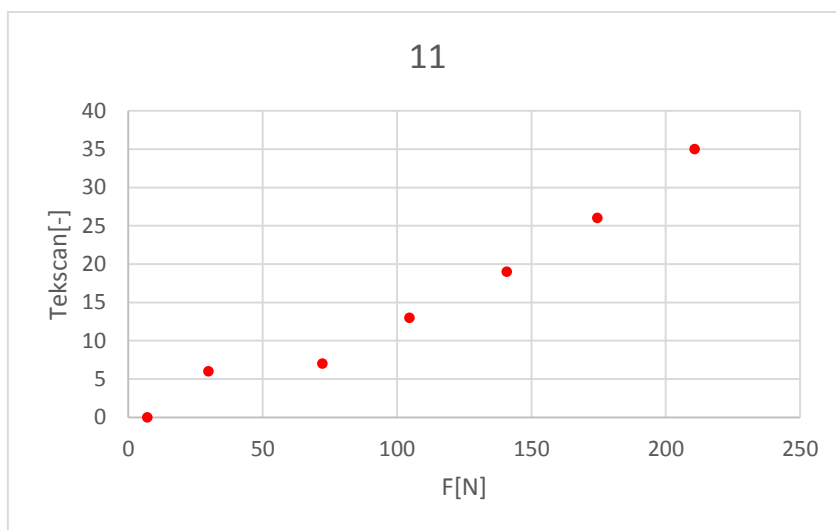
Tab. 4 Střední hodnoty naměřené pro Tekscan senzor s označením 1.200 při statické kalibraci.

U[V]	F[N]	1	6	11	16	23	29	34	39	44
0	7,1	10,5	0,6	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	53,2
0,5	29,8	0,9	0,8	0,6	0,2	0,0	0,0	0,0	3,6	29,0
1	72,2	94,2	19,6	0,8	0,3	0,0	0,0	0,0	0,9	112,3
1,5	104,7	0,5	0,7	0,7	0,8	0,7	0,8	0,8	0,9	113,1
2	140,9	2,3	1,4	0,8	0,7	0,8	0,7	0,8	29,7	91,9
2,5	174,6	0,0	0,8	0,7	0,7	0,8	0,8	0,8	33,8	40,9
3	210,9	0,0	0,8	0,7	0,8	0,8	5,1	3,4	26,8	17,6

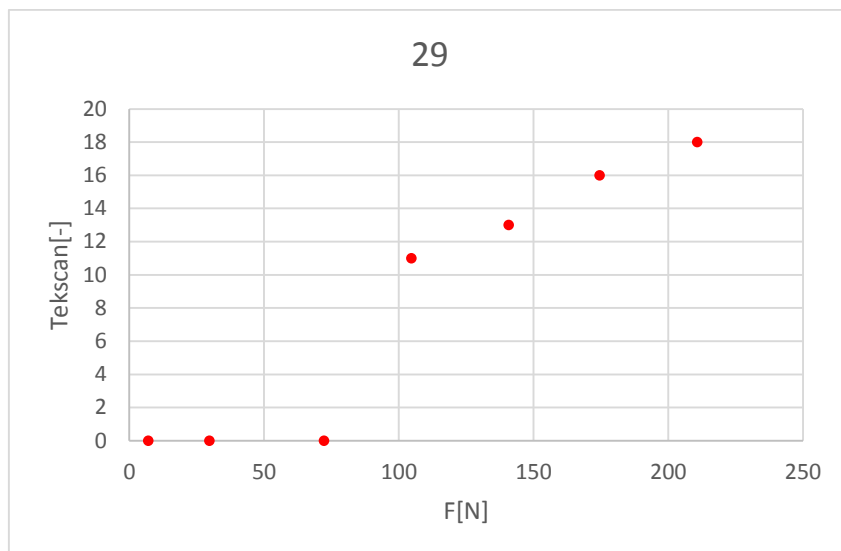
Tab. 5 Směrodatné odchylky naměřené pro Tekscan senzor s označením 1.200 při statické kalibraci.



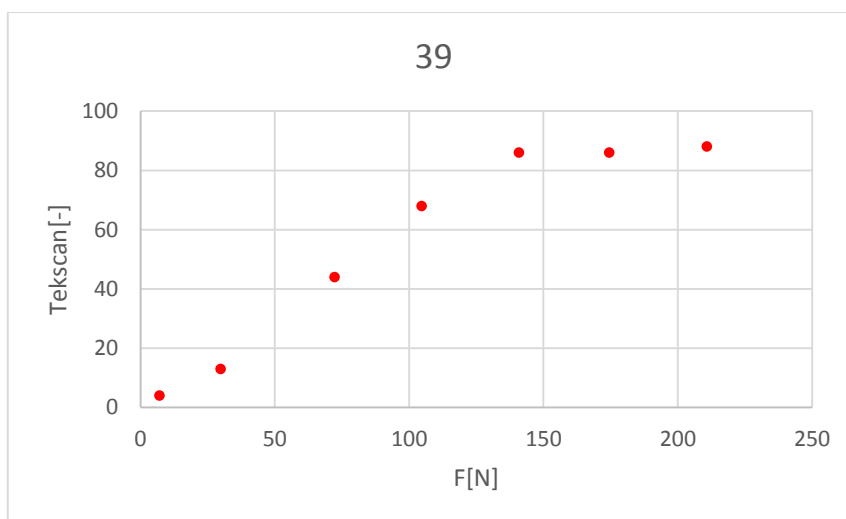
Obr. 21 Závislost mezi zatěžující silou a maximální hodnotou naměřeného signálu pro senzor s označením 1.200 v 1. sloupci senzelů.



Obr. 22 Závislost mezi zatěžující silou a maximální hodnotou naměřeného signálu pro senzor s označením 1.200 v 11. sloupci senzelů.



Obr. 23 Závislost mezi zatěžující silou a maximální hodnotou naměřeného signálu pro senzor s označením 1.200 ve 29. sloupci senzelů.



Obr. 24 Závislost mezi zatěžující silou a maximální hodnotou naměřeného signálu pro senzor s označením 1.200 ve 39. sloupci senzelů.

Tabulky a grafy pro film s označením 5,000 pro statickou kalibraci

U[V]	F[N]	1	6	11	16	22	29	34	39	44
0	0,0	48	0	0	0	0	0	0	4	42
0,5	39,5	53	35	0	0	0	0	4	7	59
1	67,8	58	38	0	0	0	0	5	9	63
1,5	106,1	63	41	0	4	0	0	7	12	70
2	140,4	68	45	4	5	0	0	9	14	79
2,5	167,3	72	47	5	5	0	0	10	15	85
3	200,2	88	17	8	6	5	0	11	20	106

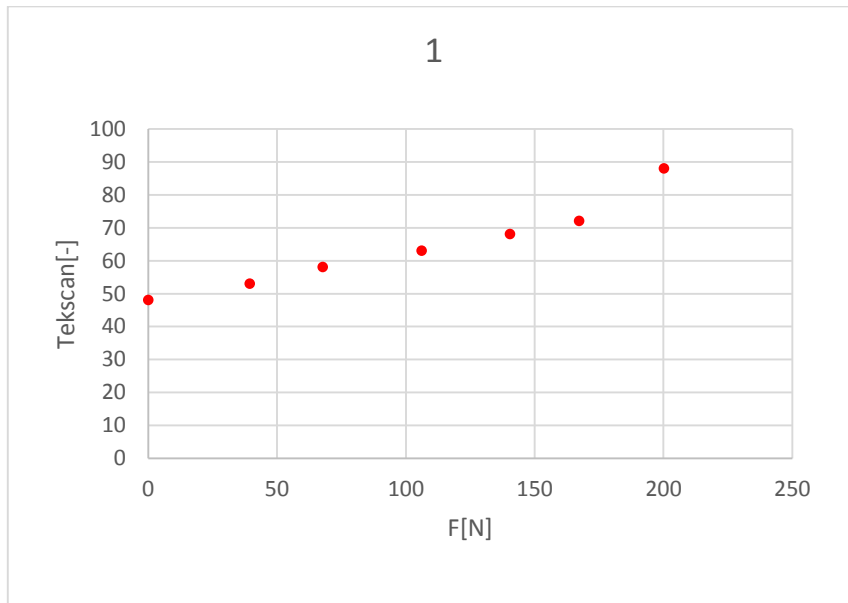
Tab. 6 Maximální hodnoty naměřené pro Tekscan senzor s označením 5.000 při statické kalibraci.

U[V]	F[N]	1	6	11	16	22	29	34	39	44
0	0,0	47,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	4,0	23,8
0,5	39,5	38,2	21,8	0,0	0,0	0,0	0,0	4,0	5,2	56,0
1	67,8	43,1	24,2	0,0	0,0	0,0	0,0	4,2	6,2	61,2
1,5	106,1	48,5	26,7	0,0	4,0	0,0	0,0	6,1	8,3	67,5
2	140,4	53,4	29,6	4,0	4,0	0,0	0,0	7,4	10,4	73,5
2,5	167,3	57,3	31,5	4,2	4,4	0,0	0,0	6,8	11,7	77,4
3	200,2	64,3	10,1	6,5	4,9	4,2	0,0	10,1	19,2	60,7

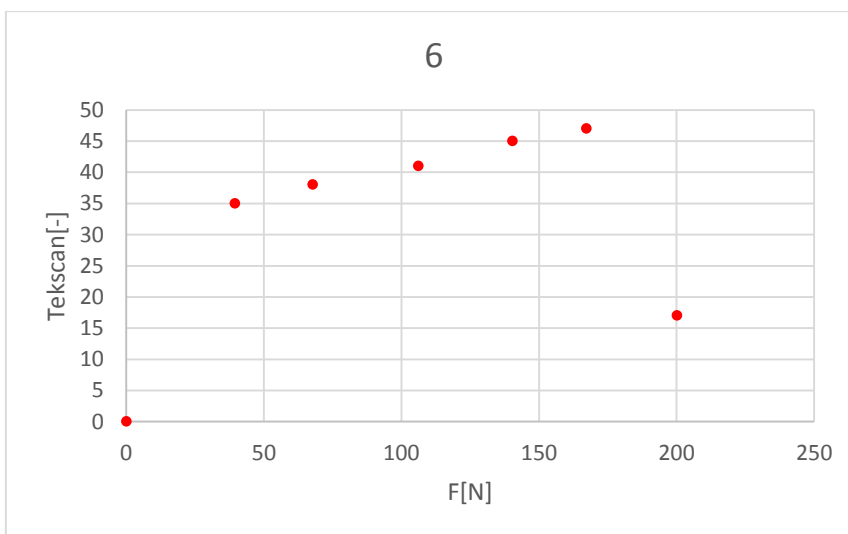
Tab. 7 Střední hodnoty naměřené pro Tekscan senzor s označením 5.000 při statické kalibraci.

U[V]	F[N]	1	6	11	16	22	29	34	39	44
0	0,0	0,8	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	16,4
0,5	39,5	13,5	12,3	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	1,1	1,7
1	67,8	13,3	12,7	0,0	0,0	0,0	0,0	0,4	1,7	0,9
1,5	106,1	13,4	13,2	0,0	0,0	0,0	0,0	0,7	2,0	2,2
2	140,4	13,2	14,1	0,0	0,2	0,0	0,0	1,2	2,3	4,4
2,5	167,3	12,8	14,6	0,4	0,5	0,0	0,0	2,4	2,2	6,5
3	200,2	22,9	5,5	0,6	0,7	0,4	0,0	0,6	0,7	44,4

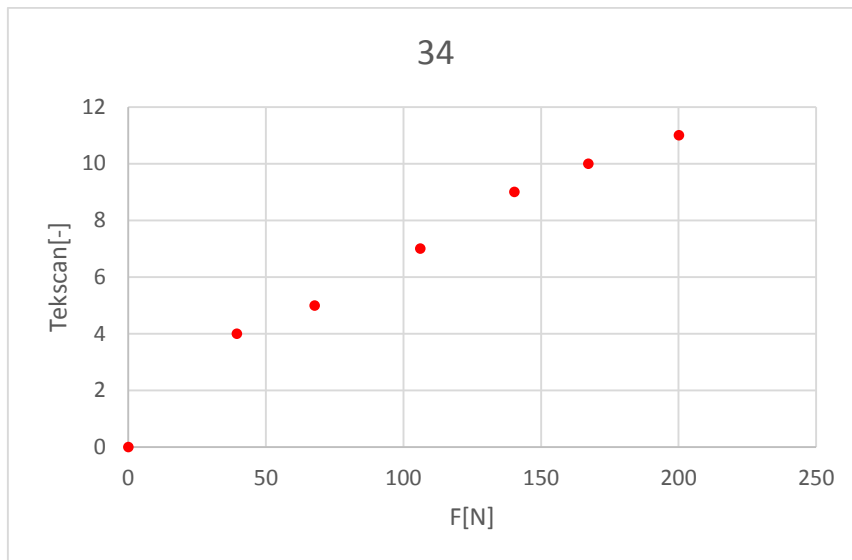
Tab. 8 Směrodatné odchylky naměřené pro Tekscan senzor s označením 5.000 při statické kalibraci.



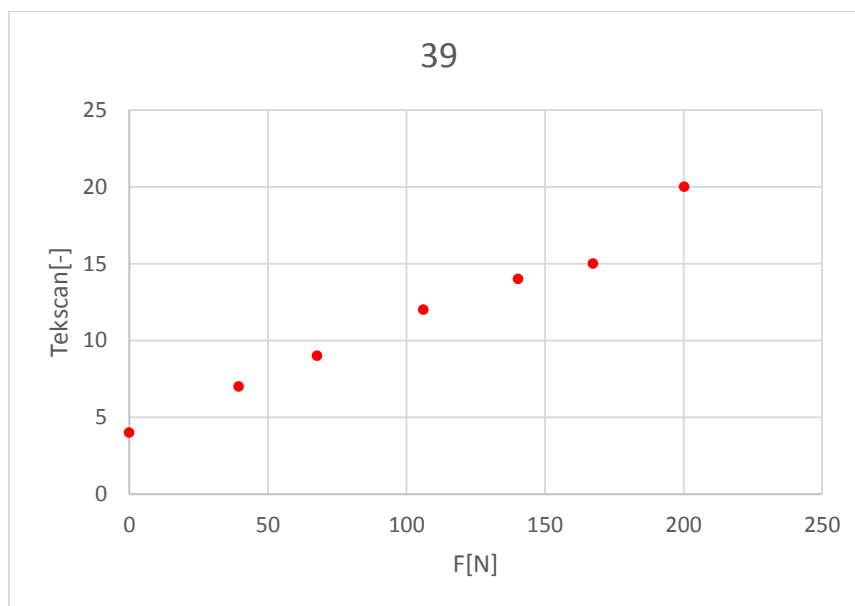
Obr. 25 Závislost mezi zatěžující silou a maximální hodnotou naměřeného signálu pro senzor s označením 1.200 v 1. sloupci senzelů.



Obr. 26 Závislost mezi zatěžující silou a maximální hodnotou naměřeného signálu pro senzor s označením 1.200 v 6. sloupci senzelů.



Obr. 27 Závislost mezi zatěžující silou a maximální hodnotou naměřeného signálu pro senzor s označením 1.200 ve 34. sloupci senzelů.



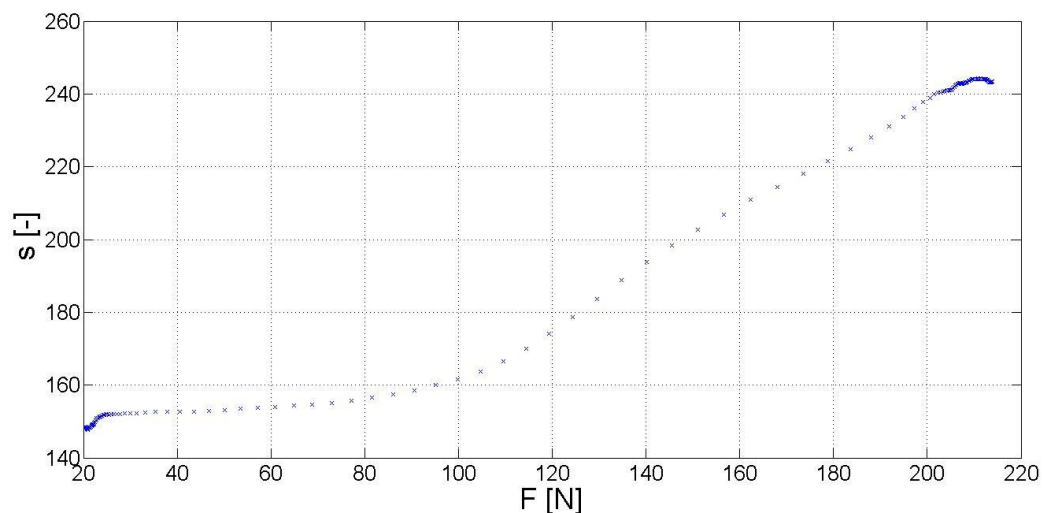
Obr. 28 Závislost mezi zatěžující silou a maximální hodnotou naměřeného signálu pro senzor s označením 1.200 ve 39. sloupci senzelů.

5.3 Výsledky dynamické metody zatěžování

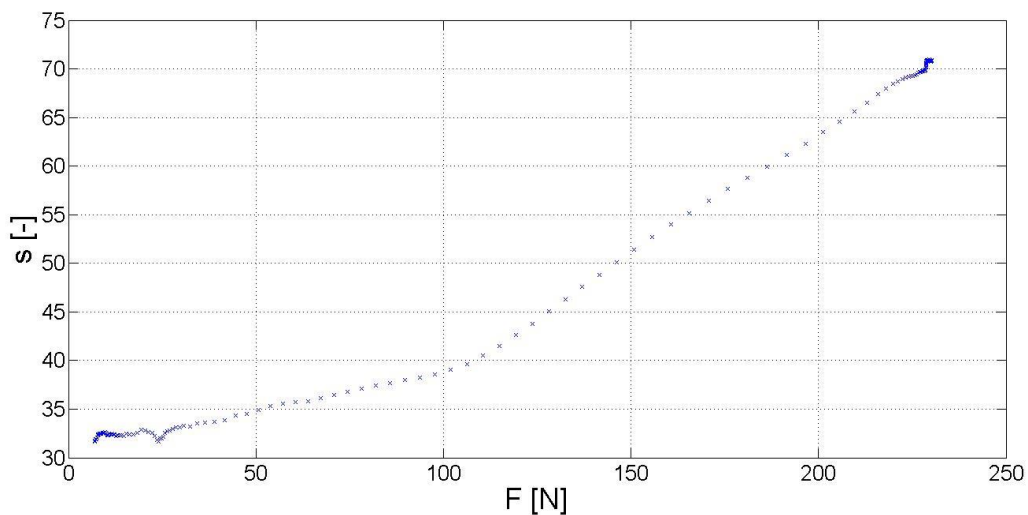
Ze závislostí na obrázcích 29 a 30 je viditelný nejprve konstantní průběh a teprve při větších zatíženích křivky začínají nabývat lineárního průběhu.

Průběh závislosti na obrázku 31 značí, že pryžová podložka snižuje výstup signálu z Tekscanu.

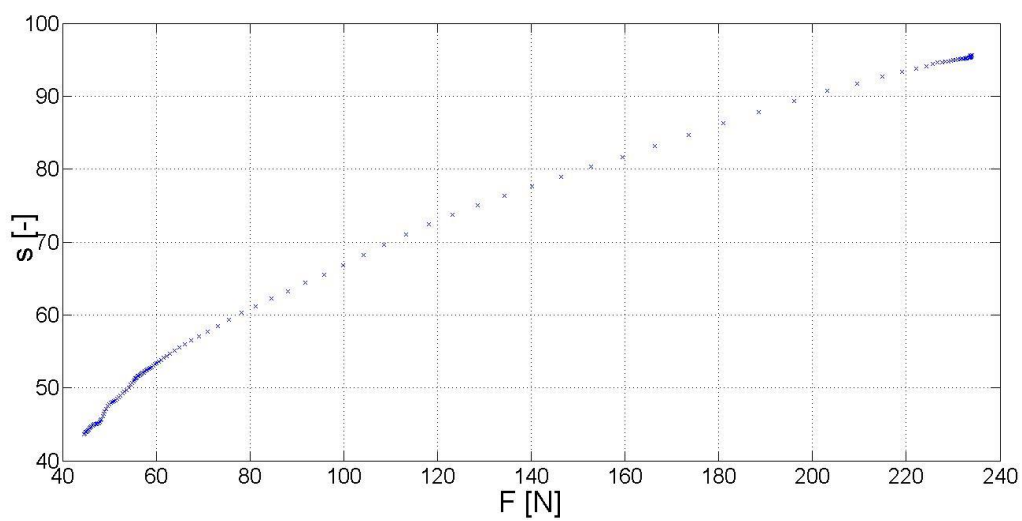
Pro tuto závislost s použitím pryžové podložky a senzoru s označením 1.200 jsme provedli přepočít pomocí Hertzových vztahů, a vynesli závislost maximálního tlaku na signálu z Tekscan (Obr. 32).



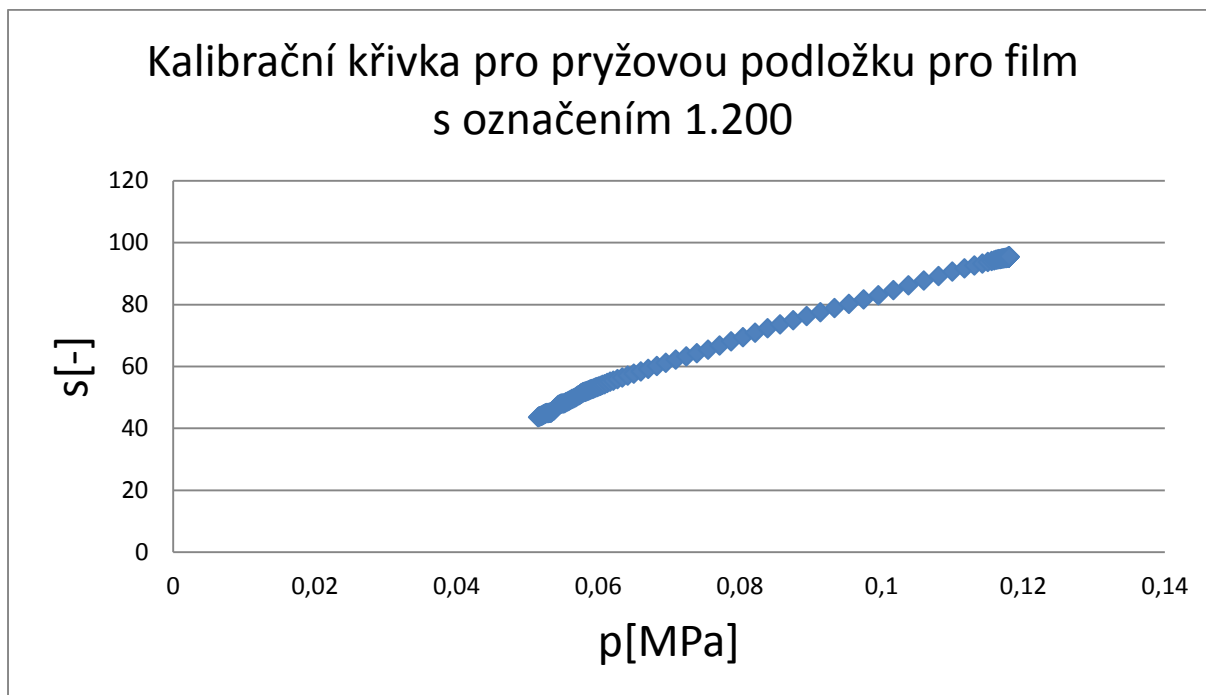
Obr. 29 Křivka závislosti zatěžující síly na maximálních hodnotách signálu z Tekscan pro senzor s označením 1.200 pro dynamickou kalibraci.



Obr. 30 Křivka závislosti zatěžující síly na maximálních hodnotách signálu z Tekscan pro senzor s označením 5.000 pro dynamickou kalibraci.



Obr. 31 Závislost zatěžující síly na maximálních hodnotách signálu z Tekscan pro senzor s označením 1.200 pro pryžovou podložku.



Obr. 32 Kalibrační křivka – závislost maximálního tlaku na signálu z Tekscan pro senzor s označením 1.200 pro pryžovou podložku.

6 DISKUZE

Kvůli zakřivení rovné podložky, které bylo konkávní vzhledem k válci, došlo k záznamu dat pouze na krajích senzoru, jak je vidět v bodě 4.2 při statickém zatěžování podložky. Z daného důvodu jsme pro výpočty kontaktních tlaků nemohli použít Hertzovy vztahy, které předpokládají lineární kontakt. Grafy (Obr. 21-28) tak mohou sloužit pouze pro hodnocení linearity výstupních hodnot senzorů Tekscan v závislosti na zatížení. Z grafů je patrné, že pro senzor s označením 1.200 křivky nejsou lineární, protože dochází k překročení rozsahu senzoru. U senzoru s označením 5.000 vykazují body s největším zatížením lineární odezvu na zatěžující sílu. Tento průběh odezvy je v souladu s charakterem kalibračních křivek, které pro daný senzor udává výrobce.

Pro další měření, které probíhalo dynamicky, jsme zakřivenou podložku otočili, abychom získali hodnoty měřené uprostřed podložky pod válcem. Konstrukce kalibrátoru ale i tak nebyla zcela korektní, a tak, jak naznačuje například průběh na Obr. 29, senzor začne reagovat až při větším zatížení.

Určení velikosti kontaktní plochy

Pro tento experiment jsme provedli výpočet pomocí Hertzových vztahů, abychom zjistili, jak se mění kontaktní plocha při změně zatížení.

Použili jsme hodnoty Youngova modulu pružnosti a Poissonovy konstanty pro dural, z kterého jsou válec a rovná podložka vyrobeny. Dále jsme do grafu vynesli průběhy při různých modulech pružnosti v tahu. Výpočet hodnoty b , což je polovina šířky kontaktní plochy, jsme provedli v programu Excel. Hodnota $2b$ tedy odpovídá celé šířce kontaktní plochy.

Pro výpočet jsme použili následující vztah:

$$b = \sqrt{\frac{4DF}{\pi L} * \frac{1-\nu^2}{E}} \quad (12)$$

F [N] - přitlačná síla

b [mm] – polovina šířky kontaktní plochy

D = 100 mm – průměr válce

L = 60 mm – délka válce

E = 73 000 MPa – Youngův modul pružnosti

$\nu = 0,33$ [-] – Poissonovo číslo

Do grafu jsme vynesli závislost velikosti kontaktní plochy na síle při modulu pružnosti v tahu pro dural (E = 73 000MPa), dále pro E = 1, 10, 100a 1 000 MPa. Dále jsme v grafu vyznačili hodnotu velikosti jednoho senselu (1,3mm x 1,3mm), pro srovnání velikosti senselu s velikostí šířky kontaktní plochy.

V grafu na obrázku 33 jsou vyneseny závislosti velikosti kontaktní plochy na zatěžující síle. Z těchto závislostí je vidět, že při použití tvrdých materiálů (pro naše měření např. dural) vzniká při zatížení nedostatečně velká plocha styku, která je výrazně menší než velikost jednoho senselu Tekscan filmů, a tudíž měření nelze považovat za správné.

V případě použití pryžové podložky o hodnotě E \approx 1 MPa měření proběhlo v pořádku, díky menšímu modulu pružnosti daného materiálu – kontaktní plocha tak mnohonásobně přesáhla velikost jednoho senselu.

Z toho nám tedy plyne, že takto vyrobený kalibrátor je proto možné použít jen pro materiály s dostatečně malým modulem pružnosti v tahu/tlaku. Abychom mohli správně provést kalibraci pro tuhé materiály, kalibrátor by vyžadoval konstrukční úpravy. Válec by se měl

nahradit kvádrem či válcem s takovou plochou, aby byla schopna pokrýt alespoň celý jeden sensel.

Pro výpočet této plochy A jsme použili následující vztah:

$$\sigma = \frac{F}{A}, \quad (13)$$

kde σ je hodnota maximálního napětí, kterou udává výrobce senzorů a F je maximální zatěžující síla o hodnotě 220 N.

Pro senzor s označením 1.200 je $\sigma = 8,27$ MPa, velikost plochy pak bude $A = 26,59$ mm².

Pro senzor s označením 5.000 je $\sigma = 34,48$ MPa, velikost plochy pak bude $A = 6,38$ mm².

Pro čtvercový průřez platí:

$$A = a^2 \quad (14)$$

Strana čtverce a , který tvoří plochu průřezu, pro senzor s označením 1.200 bude $a = 5,16$ mm a pro senzor s označením 5.000 bude $a = 2,53$ mm.

Pro kruhový průřez platí:

$$A = \frac{\pi d^2}{4} \quad (15)$$

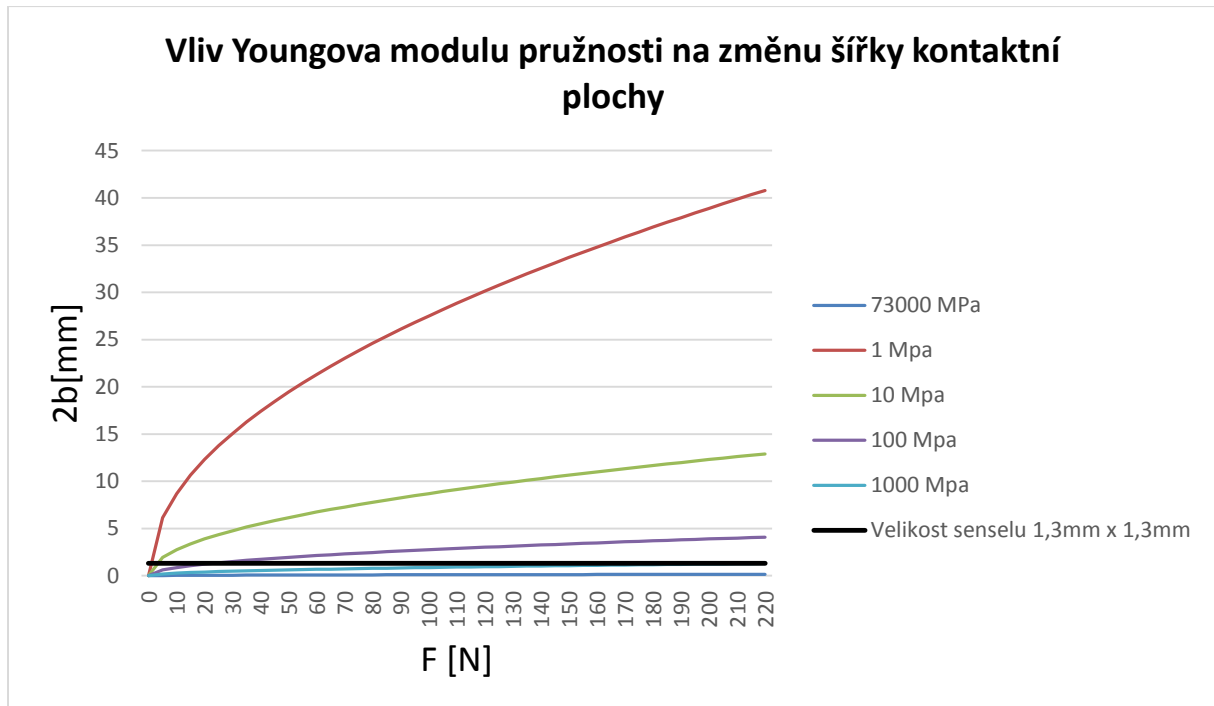
Průměr d plochy průřezu pro senzor s označením 1.200 bude $d = 5,82$ mm a pro senzor s označením 5.000 bude $d = 2,85$ mm.

Všechny tyto varianty jsou použitelné vzhledem k velikosti úhlopříčky u jednoho senselu, která se vypočte podle Pythagorovy věty:

$$u = \sqrt{x^2 + x^2}, \quad (16)$$

kde x je velikost strany senselu pro kterou platí $x = 1,3$ mm. Pak bude úhlopříčka $u = 1,84$ mm.

Podobných výsledků co se týče určení velikostí kontaktních ploch, dosáhli při experimentu na Universitě v americkém státě Iowa, kde se zabývali stejnou problematikou pro materiály s moduly pružnosti v tahu/tlaku v rozsahu od 12 MPa do 10 GPa [7].



Obr. 33 Vliv Youngova modulu pružnosti na změnu šířky kontaktní plochy

7 ZÁVĚR

Cílem práce bylo provést kalibraci vážního čidla za použití několika závaží o různých známých hmotnostech. Vyhodnocením v programu Excel vznikla kalibrační křivka pro vážní čidlo.

Statické zatěžování jsme provedli zatížením válce na rovnou podložku konstantní silou a zaznamenali jsme výstupní hodnoty. Ty jsme následně zpracovali v programu Matlab.

Dynamické zatěžování probíhalo postupným odlehčováním válce, který působil nejprve na rovnou podložku z duralu, a poté na pryžovou podložku. Výstupní hodnoty jsme vyhodnotili v programu Matlab a vynesli do grafů závislosti signálů na čase.

Došli jsme k závěru, že z konstrukčního hlediska je kalibrátor použitelný v případě měření s podložkami vyrobenými z měkkých materiálů. Vzhledem k chybně vyrobené podložce z duralu kalibrátor nelze použít pro kontakt materiálů s velkým modulem pružnosti v tahu/tlaku.

8 LITERATURA

- [1] Technická univerzita v Liberci, Katedra strojírenské technologie: *Studijní materiály k předmětu TTV*, [online], listopad 2008, [cit. 13. 5. 2015],
<http://www.ksp.tul.cz/cz/kpt/obsah/vyuka/stud_materialy/ttv/tribologie.pdf>.
- [2] Morin, E.L., Bryant, J.T., Reid, S.A., Whiteside, R.A. *Calibration Issues of Tekscan Systems For Human Pressure Assessment*. RTO-MP-056 - Soldier Mobility: Innovations in Load Carriage System Design and Evaluation, 2001.
- [3] Bhushan, B., *Modern Tribology Handbook, Two Volume Set*, Florida: CRC Press, 2000. ISBN 0-8493-8403-6.
- [4] Tekscan: *Pressure Mapping Sensor 5051*, [online], [cit. 20. 5. 2015],
<<https://www.tekscan.com/products-solutions/pressure-mapping-sensors/5051>>.
- [5] Daniel, M., *Experimentální metody biomechaniky* (2002), Laboratoř biomechaniky člověka.
- [6] Internetová dokumentace Matlab: *sgolayfilt*. [cit.: 20. 5. 2015],
<<http://www.mathworks.com/help/signal/ref/sgolayfilt.html>>.
- [7] Hartmann, J.M., Rudert, M.J., Pedersen, D.R., Baer, T.E., Goreham-Voss, C.M., Brown, T.D.: Compliance-dependent load allocation between sensing versus non-sensing portions of a sheet-array contact stress sensor. Department of Orthopaedics and Rehabilitation, University of Iowa.
- [8] Fujifilm: *Prescale Measurement Film*, [online], [cit. 25. 6. 2015],
<http://www.fujifilm.eu/eu/products/industrial-products/prescale/prescale-measurement-film/>.