

**ČESKÁ ZEMĚDĚLSKÁ UNIVERZITA
V PRAZE**

TECHNICKÁ FAKULTA

KATEDRA ELEKTROTECHNIKY A AUTOMATIZACE

Optimalizace konstrukce plošných taktilních snímačů

DISERTAČNÍ PRÁCE

Školitel: Prof. Ing. Jaromír Volf, DrSc.

Doktorand: Ing. Aleš Trinkl

Praha 2011

Poděkování

Děkuji především Prof. Ing. Jaromír Volfovi, DrSc. za cenné rady, připomínky a odborné vedení, které mi pomáhaly při zpracování disertační práce. Dále bych rád poděkoval Ing. Pavlu Dědovi, PhD., Gunnaru Künzelovi za cenné rady a připomínky a v neposlední řadě celé katedře Elektrotechniky a automatizace.

I.	ÚVOD	1
II.	PŘEHLED SOUČASNÉHO STAVU	2
1.	Taktilní snímače	2
1.1.	Účelové rozdělení taktilních snímačů	3
1.2.	Příklady konstrukcí taktilních senzorů	4
1.2.1.	Senzory založené na změně mechanických vlastností	4
1.2.2.	Senzory založené na změně odporu	4
1.2.3.	Senzory pracující se změnami magnetického pole	8
1.2.4.	Piezoelektrické senzory	10
1.2.5.	Optovláknové senzory	14
1.2.6.	Kapacitní senzory	18
1.2.7.	Maticové taktilní senzory	20
1.2.8.	Zhodnocení senzorů pro použití v maticovém taktilním snímači	21
1.3.	Praktické využití taktilní informace	22
1.3.1.	Využití v biomedicíně a biomechanice – příklady zařízení pro biomechanická měření	22
1.3.2.	Užití taktilní informace pro komunikaci mezi lidmi	33
1.3.3.	Taktilní informace jako dodatečný informační zdroj	33
1.3.4.	Užití taktilní informace v automobilovém průmyslu	34
1.3.5.	Netradiční užití taktilní informace	36
1.4.	Zpracování taktilní informace	36
1.4.1.	Průběh zpracování taktilní informace	37
III.	CÍLE DISERTAČNÍ PRÁCE	38
IV.	ZVOLENÉ METODY ZPRACOVÁNÍ	39
1.	Sestavení měřicího pracoviště pro měření jednotlivých bodů snímací matice	40
1.1.	Popis a funkce robotizovaného pracoviště s robotem Turbo Scara SR60	40
1.2.	Prostorové uspořádání měřicího pracoviště v pracovním prostoru robota Turbo Scara SR60	43
2.	Speciální modulární systém pro měření taktilních snímačů	45
2.1.	Základní technické parametry modulárního systému	48
2.2.	Software modulárního systému pro měření taktilních snímačů	49
3.	Zjištění přesné polohy jednotlivých měřicích bodů v taktilní matici	53
3.1	Zjištění souřadnic středů měřicích bodů v taktilní matici	53
3.1.1.	Snímací kamera	54
3.1.2.	Image Grabber DT 3155	55
3.1.3.	Metody pro zjištění středů objektů	55
3.1.4.	Vybraná metoda pro zjištění středů objektů – popis skriptu	61

3.1.5.	Převedení středů měřicích bodů do souřadnicového systému robota Turbo Scara SR60.....	63
4.	Statistické vyhodnocení naměřených hodnot pomocí modulárního systému na měření taktilních snímačů	65
4.1.	Základní charakteristika nejistot měření	65
4.2.	Výpočty jednotlivých druhů nejistot	67
4.2.1.	Postup výpočtu standardní nejistoty typu A u_A – přímé měření jedné veličiny.....	67
4.2.2.	Postup výpočtu standardní nejistoty typu B u_B – přímé měření jedné veličiny.....	68
4.2.3.	Postup výpočtu standardní nejistoty typu C u_C – přímé měření jedné veličiny.....	69
5.	Plošné taktilní snímače typu PLANTOGRAF	69
5.1.	Převod působící síly na elektrický signál	69
5.2.	Plantograf V05	72
5.3.	Plantograf V07 – vývojová verze β	76
5.3.1.	Měření Plantografu V07 – vývojové verze β	78
5.4.	Plantograf V08	82
5.4.1.	Orientační měření Plantografu V08.....	84
V.	VÝSLEDKY DISERTAČNÍ PRÁCE S UVEDENÍM NOVÝCH POZNATKŮ	86
1.	Nový systém elektroniky pro měření a zpracování signálu z matice senzorů	86
1.1.	Princip funkce elektronického obvodu pro vyhodnocení informací ze snímačů s variabilním elektrickým odporem.....	86
1.2.	Určení hodnoty odporu R_1	88
2.	Zjištění optimálních rozměrů měřicích elektrod u vybrané konstrukce Plantografu V08.....	92
2.1.	Oběcný postup při měření všech konstrukcí elektrod	94
2.2.	Měření elektrod – označení „LH“	94
2.3.	Měření elektrod – označení „PH“	97
2.4.	Měření elektrod – označení „LD“	99
2.5.	Měření elektrod – označení „PD“	101
2.6.	Měření elektrod – označení „OB“	103
2.7.	Měření elektrod – označení „SB“	105
3.	Vyhodnocení všech měřených typů elektrod.....	107
4.	Aproximace naměřených hodnot u jednotlivých druhů elektrod.....	110
4.1.	Aproximace naměřených hodnot elektrod – označení „LH“	110
4.2.	Aproximace naměřených hodnot elektrod – označení „PH“	111
4.3.	Aproximace naměřených hodnot elektrod – označení „LD“	112
4.4.	Aproximace naměřených hodnot elektrod – označení „PD“	113
4.5.	Aproximace naměřených hodnot elektrod – označení „OB“	114

4.6.	Aproximace naměřených hodnot elektrod – označení „SB“	115
5.	Měření ovlivnění nezatížených bodů v okolí bodu zatíženého	116
6.	Vyhodnocení citlivosti jednotlivých druhů elektrod v závislosti na ploše měřicích elektrod.....	118
VI.	ZÁVĚRY A DOPORUČENÍ PRO VYUŽITÍ POZNATKŮ V PRAXI	122
VII.	ZÁVĚR.....	126
	POUŽITÁ LITERATURA:.....	127
	SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ:.....	134
	SEZNAM OBRÁZKŮ:	136
	SEZNAM GRAFŮ:	140
	SEZNAM TABULEK:	141
	PŘÍLOHY.....	142

I. ÚVOD

Práce je zaměřena na taktilní snímače, jejich konstrukci, funkci, využití a měření.

V úvodní teoretické části práce je uveden podrobný popis jednotlivých druhů taktilních snímačů, jejich výhody, nevýhody, funkce a účelové rozdělení. Dále jsou uvedeny konkrétní příklady sériově vyráběných taktilních snímačů používaných v praxi a příklady jejich využití. První část práce uzavírá popis zpracování taktilní informace.

Po vytyčení cílů a zvolených metod zpracování je práce zaměřena již na praktické úkoly, kde prvním úkolem je sestavení měřicího pracoviště schopného měřit jednotlivé měřicí body snímací matice taktilního snímače v požadovaném rozpětí tlaku působícího na měřicí bod od 25,5 kPa do 500 kPa. Toto měřicí pracoviště je realizováno pomocí školního robotizovaného pracoviště Turbo Scara SR60 a speciálního modulárního systému pro měření taktilních snímačů. Dalším úkolem je zjištění přesné polohy jednotlivých měřicích bodů ve snímací matici za pomoci obrazové analýzy snímku vrchní části snímací matice, která zjistí středy jednotlivých měřicích bodů a převede je zpět do souřadnicového systému v pracovním prostoru robota. Po sestavení měřicího pracoviště je práce věnována popisu konstrukce jednotlivých typů snímače Plantograf, a to jak staré konstrukci Plantograf V05, tak i dalším typům konstrukce, jež jsou vyvinuty tak, aby se minimalizovaly nevýhody staré konstrukce Plantografu V05.

Po sestavení nové konstrukce snímací matice, která minimalizuje největší nevýhody Plantografu V05 a zároveň je schopná měřit požadované rozpětí působícího tlaku na měřicí bod v rozpětí od 25,5 kPa do 500 kPa, je přistoupeno k měření, optimalizaci rozměrů a vyhodnocení měřicích elektrod, které zajistí co nejlepší měřicí vlastnosti. Další části práce se věnují podrobnému popisu nového systému elektronických obvodů pro vyčítání naměřených hodnot ze snímací matice včetně výpočtu velikosti jednotlivých součástek tohoto obvodu. Dalším úkolem se stal matematický popis závislosti počtu pulzů naměřených čítačem na tlaku, který působí na měřicí bod, což je zapotřebí pro další případné elektronické zpracování naměřených dat. V závěru této práce jsou uvedeny dvě důležité kapitoly, kde je uvedeno zhodnocení měření ovlivnění nezatížených bodů v okolí bodu zatíženého a vyhodnocení citlivosti jednotlivých druhů elektrod v závislosti na ploše měřicích elektrod.

II. PŘEHLED SOUČASNÉHO STAVU

1. Taktilní snímače

Taktilní senzory jsou prvky, které jsou schopné snímat informaci o dotyku s určitým předmětem vnějšího prostředí a tuto informaci převádět na elektrický signál. Taktilním snímačem je obvykle definováno maticové nebo jiné geometrické uspořádání taktilních senzorů, jimiž je možné na určité ploše měřit tlak.

K měření tlaku na určité ploše je možné použít několik různých principů, které se liší podle toho, jaká je měřena fyzikální veličina (mění se s působením tlaku). Obecně se dají tyto senzory rozdělit do dvou velkých skupin. První skupina primárně měří neelektrické veličiny (optické, tlakově senzitivní filmy, vzduchové balóanky), druhá skupina primárně měří elektrické veličiny (odporové, kapacitní, piezoelektrické, indukční).

Na taktilní snímače jsou kladeny různé požadavky. Mezi nejdůležitější patří, že senzor nesmí měnit měřené rozložení tlaku a musí potlačit hysterezi senzoru, a dále musí být schopen měřit statické i dynamické zátěže a poskytovat přesné a spolehlivé údaje po celé své ploše [1].

Největší výhody taktilních systémů (v porovnání s vizuálními systémy):

- taktilní snímače jsou většinou malé a lehké zařízení (mohou být integrovány v úchopné hlavici robota)
- mohou měnit pracovní prostor (díky umístění v hlavici robota)
- umožňují využívat paralelní registraci údajů a jejich rychlý paralelní přenos
- jsou do značné míry odolné proti vlivu okolního prostředí v porovnání s vizuálními systémy (na vizuální systémy mohou dopadat stíny, a to vede k závažným chybám, tento problém se musí řešit správným osvětlením vyhodnocovaného předmětu)
- z taktilních snímačů lze snadno získat výstupní signál v číslicové formě
- je možné je využít pro řízení robota v reálném čase

Největší nevýhody taktilních systémů (v porovnání s vizuálními systémy):

- mají omezenou rozlišovací schopnost, která je způsobená mechanickými vlivy konstrukce
- musí být minimální úchopná síla
- je nutné sledovat opotřebení

1.1. Účelové rozdělení taktilních snímačů

Taktilní snímače je možné rozdělit podle účelu jejich použití do čtyř kategorií:

- 1) Taktilní senzory nebo jednoduché snímače, které jsou umístěné na aktivní úchopné hlavici robota – slouží k verifikaci (tj. identifikaci správného uchopení předmětu), používají se k vyhodnocení síly stisku čelistí úchopné hlavice (generují jen dotykovou informaci).
- 2) Taktilní snímače, které slouží k rozpoznávání tvaru a rozměrů předmětů. Tato skupina se dělí do dvou kategorií podle toho, kde je umístěn taktilní snímač:
 - a) Taktilní snímač je na aktivní úchopné hlavici robota – zde se taktilní informace získává z primárních nebo sekundárních senzorů taktilního snímače při uchopení předmětu hlavicí. Primární senzory se dostávají do bezprostředního fyzického kontaktu s uchopeným objektem. Sekundární senzory do fyzického kontaktu s objektem nepřicházejí a měří taktilní informaci nepřímou. Např. měří úhel mezi dvěma členy úchopné hlavice (po uchopení) a tím je možné získat informace o globálních vlastnostech objektu.
 - b) Taktilní snímač je umístěn na zařízení, které vykonává postupné ohmatávání předmětu. Taktilní snímač se posouvá po povrchu rozpoznávaného předmětu a získává tak taktilní informaci o lokálních vlastnostech povrchu zkoumaného objektu (v oblasti dotyku taktilního snímače).
- 3) Taktilní senzory a snímače, které generují informaci pro řízení pohybu robotů, nebo jiných automatických mechanismů (pro usnadnění jejich orientace v prostoru).

- 4) Taktilní senzory, vhodně umístěné na exponovaných místech ramene robota, které slouží k bezpečnostním účelům (např. vydávají signál pro zastavení ramene robota, když narazí na neočekávaný předmět) [1].

1.2. Příklady konstrukcí taktilních senzorů

Ve vývoji dotykových senzorů již bylo využito mnoho fyzikálních principů. Protože vyvíjené technologie jsou velmi odlišné, jsou v této kapitole uvažovány pouze obecné základy vyvíjených technologií. Ve většině případů se vývoj dotykových senzorů řídí podle konkrétního druhu použití senzoru, protože činnost uchopovacích nebo dotykových senzorů je velice závislá na materiálu uchopovaného předmětu. Senzory uvedené v této kapitole mohou pracovat jen s tuhými předměty. S pružnými materiály by mohly vzniknout problémy (nepřesnosti). Pro použití těchto senzorů pro uchopování pružných materiálů, je nutná jejich konstrukční obměna.

1.2.1. Senzory založené na změně mechanických vlastností

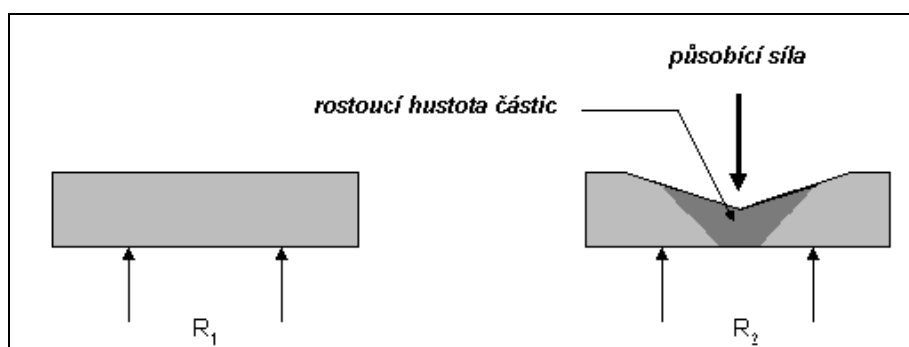
Nejjednodušší tvar dotykových senzorů je takový, že síla působí na mechanický mikropřínač (binární dotykový senzor). Požadovaná síla pro ovládání přepínače se určí podle ovládacích vlastností a vnějšími omezujícími podmínkami. Druhou skupinu tvoří analogové senzory. Zde je síla převedena na mechanický pohyb po přímce, kružnici nebo spirále [9].

1.2.2. Senzory založené na změně odporu

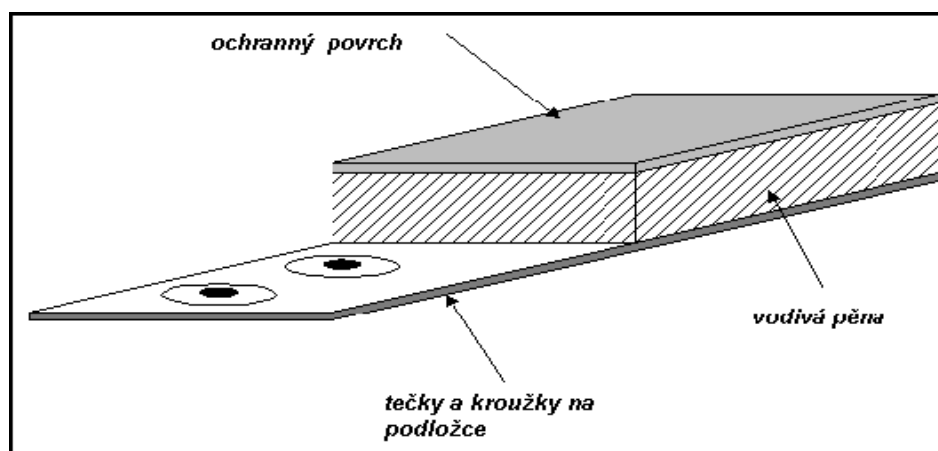
Nejrozšířenější je používání vhodného materiálu se změnou odporu při působení síly. Měřicí body snímače jsou tvořeny vodivým elastomerem nebo vodivou pěnou. Vodivost elastomeru je zajištěna přidáním zrněk grafitu rovnoměrně do celé jejich struktury. Při působení síly se elastomer deformuje – jednotlivá zrnka grafitu se k sobě přiblíží a zvýší se vodivost (sníží se odpor) elastomeru. Tím je zajištěn převod působící síly na elektrický signál. Schéma a princip senzoru je uveden na *obr. 2.1, obr. 2.2*.

Velkou předností čidel vyrobených na tomto principu je snadné vyhodnocení působící síly, jelikož se jedná o mechanicko-elektrický převodník, jehož výstup je odpor v rozsahu

stovek až tisíců ohmů. Další kladnou vlastností je relativně velká citlivost vhodně navrženého senzoru. Naopak negativními vlastnostmi vodivého polymeru jsou: nelineární charakteristika, teplotní závislost a dlouhá ustalovací doba měření [8].



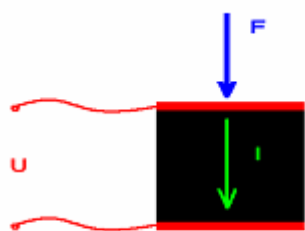
Obr. 2.1 Struktura senzoru I



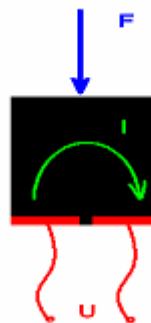
Obr. 2.2 Struktura senzoru II

Elektrody u senzorů založených na změně odporu je možné uspořádat dvěma způsoby:

- a) **Axiální uspořádání**, zde proud protéká pouze ve směru působení tlaku (viz *Obr. 2.3*).
- b) **Radiální uspořádání**, zde proud teče kolmo na směr působení tlaku (viz *Obr. 2.4*).



*Obr. 2.3 Axiální umístění
připojení elektrod*



*Obr. 2.4 Radiální umístění
připojení elektrod*

Srovnání axiálního a radiálního uspořádání elektrod:

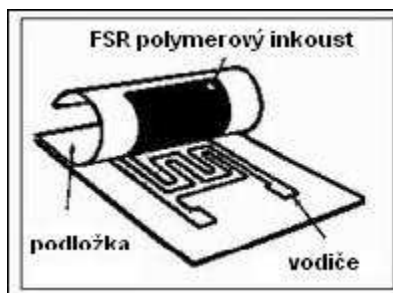
Axiální uspořádání – měřená síla působí v ose toku proudu, a je tedy využíván celý aktivní objem čidla, z toho vyplývá vyšší citlivost. Další vhodnou vlastností, v porovnání s radiálním typem uspořádání, je menší plocha průřezu senzoru, jelikož elektrody jsou umístěné přímo nad sebou. Naopak nevýhodou axiálního uspořádání je reakce na ohyb, protože horní a spodní elektroda má při ohybu rozdílný rádius, a tím vzniká vnitřní pnutí a stlačování polymeru, což zanáší do měření chybu.

Radiální uspořádání – měřená síla působí částečně kolmo na tok proudu. Čím více je senzor zatěžován, tím se zvětšuje vodivost elastomeru a „smyčky“ proudu se uzavírají blíže k elektrodám. Tzn., že s rostoucí vzdáleností od elektrod bude menší proudová hustota a tím ve výsledku i menší citlivost. Výhodou radiálního uspořádání je snadná aplikace elektrod, které jsou umístěné vedle sebe na jedné podkladové vrstvě. Senzory také mohou být umístěny na ohebném plošném spoji, kde při ohybu nevzniká velké vnitřní pnutí senzorů, které negativně působí na přesnost měření [8].

Příklad konstrukce senzorů na bázi piezorezistivních elastomerů:

Odporový senzor síly (FSR Force Sensitive Resistor) – Působící síla působí kolmo na povrch senzoru a se zvyšující se silou odpor klesá. Senzory, založené na tomto principu se používají pro spínače nebo i jednoduché lineární převodníky ve spotřební elektronice.

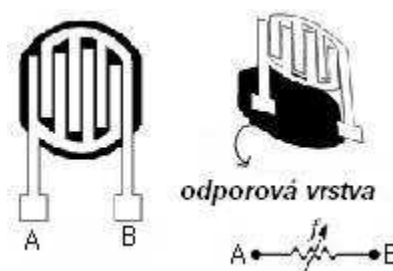
Obvykle je typický senzor dimenzován tak, aby změna působící síly z 0.1N na 10N, změnila odpor z 1M Ω na 1k Ω .



Obr. 2.5 Základní vrstvy FSR senzoru

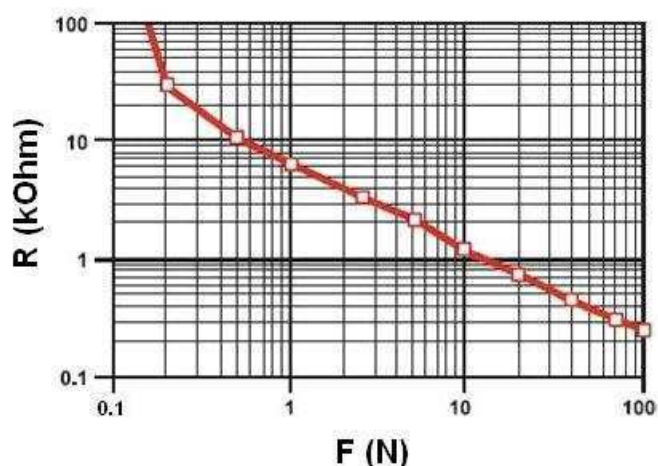
Struktura samotného FSR senzoru se skládá z:

- odporové polymerové vrstvy
- kontaktních vodičů a plošek
- případně distanční vložky



Obr. 2.6 Zjednodušená struktura senzoru

Základem odporového senzoru síly *Obr. 2.5* a *Obr. 2.6* je tedy rezistivní (odporový) element, vyrobený technologií tlustých vodivých polymerových vrstev (Polymer Thick Film – PTF) tzv. „polymerový inkoust“. Vrstva je složena z elektricky vodivých a nevodivých částic. Působením síly na povrchu vrstvy se částice vzájemně dotýkají a vytvářejí tak paralelně působící vodivé dráhy (tzv. můstky), z tohoto důvodu odpor vrstvy s rostoucí silou klesá. Výhodou je SFR senzorů je možnost výroby v různých tvarech nebo ve velkých sensorových polích. Kontaktní vodiče a plošky vytváří propojení vodičů s rezistivní vrstvou. Distanční vložka se převážně užívá v senzorech, které pracují jako spínače, aby se zvýraznila změna odporu při sepnutí. Ve stavu nesepnutí se pak kontaktní vodiče vůbec nedotýkají a odpor senzoru je řádově $M\Omega$ (zatímco po sepnutí klesne na hodnotu jednotek $k\Omega$) viz *Obr. 2.7*).



Obr. 2.7 Závislost odporu na působící síle senzoru FSR

1.2.3. Senzory pracující se změnami magnetického pole

Senzorů pracujících s magnetickým polem je celá řada, v této kapitole jsou uvedeny pouze nejpoužívanější konstrukce.

Senzory založené na změně magnetických vlastností

Ke konstrukci taktilních senzorů lze využít změn magnetických vlastností feromagnetických materiálů. Často se používá jejich magnetoelastických (magnetostrikčních) vlastností. Je to fyzikální jev, kdy při změně mechanického napětí ve feromagnetickém materiálu (jeho rozměrů) se mění jeho permeabilita. Daný jev je popsán rovnicí

$$\frac{\Delta\mu}{\mu} = \frac{2\lambda_s\mu^2\sigma}{B_{2s}} = K \cdot \frac{\Delta l}{l} \quad [-] \quad (1)$$

kde

λ_s činitel magnetostrikce při nasycení [T^{-2}]

B_s magnetická indukce při nasycení [T]

$\mu = \mu_0\mu_r$ permeabilita [Hm^{-1}]

σ mechanické napětí [Nm^{-2}]

K konstanta.

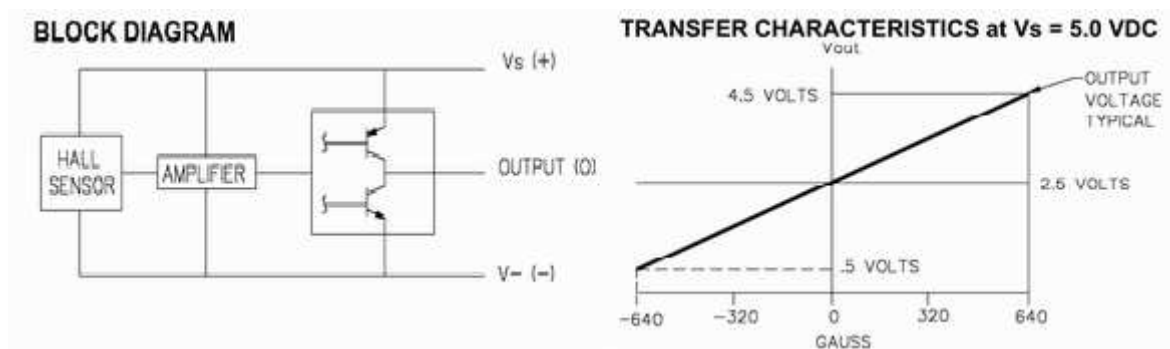
Hallův senzor

Senzor pracující se změnami magnetického pole je Hallův senzor. Jeho základní částí je polovodičová destička, na kterou jsou připojeny dva páry elektrod. První pár elektrod přivádí proud, druhý pár elektrod snímá výsledné napětí. V klidovém stavu je proud protékající senzorem rovnoměrně rozprostřen po celé ploše senzoru. Když začne působit magnetické pole, kolmo na tečení proudu v senzoru, je elektrický proud stlačován k jedné straně destičky, tím vzniká rozdílový potenciál na snímacích elektrodách – Hallovo napětí. Napětí je úměrné velikosti magnetické indukce B , proudu I v senzoru a konstantě senzoru K_h a je vyjádřeno vzorcem:

$$U_h = K_h \cdot B \cdot I \quad [V] \quad (2)$$

Hallovy senzory mají nejčastěji citlivost v jednotkách až desítkách mT. Hallovo napětí je pro další zpracování relativně nízké, a proto se musí toto napětí před dalším zpracováním zesílit pomocí podpůrné elektroniky, obvykle se tato elektronika integruje do jednoho pouzdra společně se senzorem [42], [43].

Jako příklad v praxi používaného senzoru pracujícího na principu Hallova jevu je možné uvést jednoduchý a široce užívaný senzor SS495 od firmy Honeywell. Senzor je umístěn v malém třívývodovém pouzdře, které obsahuje senzor i vyhodnocovací elektroniku (zesilovač) a výstupní obvody. Měřicí rozsah senzoru je ± 670 Gauss, citlivost má 3.125 mV/G a přesnost obvodu je cca 3 %. Blokové schéma a charakteristika senzoru je uvedena na obr. 2.8 [8].



Obr. 2.8 Blokové schéma Hallova senzoru a jeho převodní charakteristika

Hallův senzor může také sloužit pro indikaci přiblížení, např. permanentních magnetů. Umístí-li se mezi magnet a senzor pružná podložka, potom se dá použít jako senzor síly.

Avšak výše uvedený senzor je k tomuto účelu méně vhodný, jelikož má menší odolnost proti rušení. Avšak existují jiné senzory pracující na velmi podobném principu (např.: senzor 2SA-10 firmy Sentron), které obsahují vysoce sofistikovanou měřicí elektroniku a jsou k tomuto účelu vhodnější, [44], [45], [46].

Feromagnetické rezistory

Tyto senzory jsou založeny na jevu gigantické magnetorezistence a jsou citlivé v rovině čipu. Působící magnetické pole vychyluje dráhu náboje proudícího v tělese senzoru, a tím se zvětšuje jeho odpor. Feromagnetické rezistory mají zhruba cca 10x vyšší citlivost než Hallovy senzory, naopak nevýhodou je, že charakteristika senzoru může být ovlivněna nežádoucím působením magnetického pole s vysokou intenzitou. Tomuto se v senzorech zabráňuje integrovanou přemagnetovací cívkou [8].

1.2.4. Piezoelektrické senzory

Piezoelektrické senzory využívají principu piezoelektrického jevu. Ten vznikne, pokud působí na piezoelektrický krystal síla, která ho deformuje v daném směru. Díky deformaci vznikne dipólový elektrický moment objemového elementu a tyto elektrické momenty všech objemových elementů způsobí polarizaci krystalu. Velikost polarizace číselně odpovídá fiktivnímu vázanému náboji na jednotkové ploše povrchu, který je kolmý ke směru vektoru polarizace. Pokud se na povrch krystalu přiloží elektrody, vznikne indukce volného náboje a tento náboj lze měřit. Velikost elektrického náboje Q je přímo úměrná síle F_x , která působí ve směru elektrické osy x :

$$Q = d \cdot F_x \quad [C] \quad (3)$$

$Q[C]$ – náboj na elektrodách výbrusu; $d [CN^{-1}]$ – piezoelektrická konstanta, pro SiO_2 je $d = 2,3 \cdot 10^{-12} [C.N^{-1}]$; $F_x[N]$ – síla působící na výbrus krystalu (působí-li síla např. na krystal křemene, jehož podélná osa souhlasí s mechanickou a příčná s elektrickou).

Jestliže působí síla F_y ve směru mechanické osy y krystalu, potom je náboj Q dán vztahem:

$$Q = d \cdot F_y \frac{b}{a} \quad [C] \quad (4)$$

Proti předchozímu případu zde záleží na rozměrech výbrusu (a , b).

V minulosti byl jako materiál piezokrystalu používán výbrus krystalu křemene, dnes jej nahrazují spíše materiály jako je piezoelektrická keramika (titaničitan barnatý BaTiO₃, titaničitan olovnatý PbTiO₃, zirkonát olova PbZrO₃ a niobáty) nebo polyvinylidenfluorid (PVDF₂) atd. [47], [8].

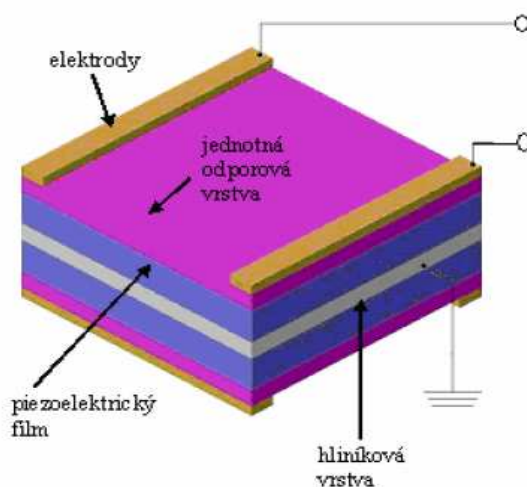
Neuvažuje-li se zapouzdření senzoru, pak jsou Piezoelektrické senzory konstrukčně jednoduché. Výhoda těchto sensorů je jejich malý rozměr, naopak nevýhodou je jejich velký vnitřní odpor, který vyžaduje minimální svod vstupních obvodů zesilovače, proto vstupní odpor vyhodnocovacích obvodů musí být v řádu 10¹² Ω. Pokud se snímají statické síly, pak musí být použit nábojový zesilovač.

Další metodou, založenou na piezoelektrickém jevu je získání informace o působící síle z měření rezonančních vlastností piezoelementu.

Příklady konstrukcí piezoelektrických sensorů

Příkladem senzoru pracujícím na základě piezoelektrického jevu je senzor vyvinutý v Automation Research Laboratory na Kjotské univerzitě, kde byla vyvíjena čidla pro robotické úchopové zařízení.

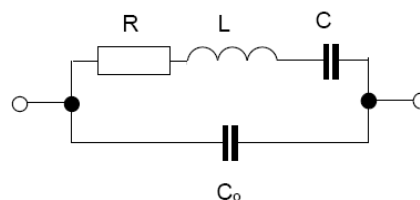
Čidlo je sendvičového uspořádání (viz obr. 2.9), uprostřed je hliníková folie s nulovým potenciálem, kolem ní je vrstva polymerového filmu s piezoelektrickými vlastnostmi. Film má tloušťku 6 μm a je kryt odporovou vrstvou, na které jsou elektrody umístěné na vrchní i dolní straně senzoru. Elektrody jsou připojeny k nábojovým zesilovačům [6], [49].



Obr. 2.9 Piezoelektrický senzor síly

Dalším příkladem konstrukce je senzor měřící změny rezonančních vlastností piezoelementu, které mění působící síla.

Výzkumem a inovací konstrukce senzoru pracujícím na výše uvedeném principu se zabývalo pracoviště na FS-ČVUT. Cílem toho výzkumu bylo řešení, které by eliminovalo využívání složitého nábojového zesilovače pro snímání náboje, jenž se vytváří na piezoelementu při působení síly. Princip měření využívá rezonančních vlastností piezoelektrického krystalu. Piezoelektrický element je vřazen do elektronického rezonančního obvodu, kde začne oscilovat na své rezonanční frekvenci. Rezonanční frekvence je dána, mimo jiné, také pnutím na povrchu piezoelementu. Změnu pnutí může vyvolávat působící síla. Při působení síly se začnou měnit elektrické vlastnosti krystalu, viz náhradní schéma na obr. 2.10, které lze vyhodnotit [16], [50].



Obr. 2.10 Náhradní schéma piezoelektrického elementu

*L – dynamická indukčnost, C – dynamická kapacita,
R – ekvivalentní odpor a C_o – statická kapacita.*

Tyto parametry jsou určeny těmito vztahy:

$$C = \frac{8bl}{\pi^2 a} \frac{d_{13}^2}{s_{33}} \quad [F] \quad (5)$$

$$L = \rho \frac{al}{8b} \frac{(s_{33}^E)^2}{d_{13}^2} \quad [H] \quad (6)$$

$$R = \frac{\pi^2 a}{4bl} \frac{(s_{33}^E)}{d_{13}^2} \quad [\Omega] \quad (7)$$

$$C_o = \epsilon_{11}^s \frac{bl}{a} \quad [C] \quad (8)$$

ρ [kgm^{-3}]-hustota materiálu; a, b, l [m] – rozměry piezokrystalu;

d_{13} [mV^{-1}] – piezoelektrický koeficient;

s_{33}^E [m^2N^{-1}] – složka tenzoru elastického napětí při $E = \text{konst.}$;

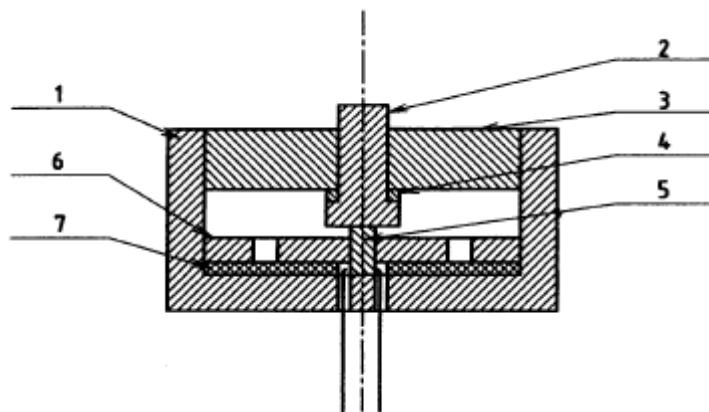
ε_{11}^s [-] – složka tenzoru permitivity při konstantní deformaci.

Z mechanického hlediska rezistor o odporu R odpovídá ztrátám v piezokrystalu, cívka o indukčnosti $L \equiv$ hmotnosti piezokrystalu a kondenzátor o kapacitě $C \equiv$ poddajnosti. Velikost R se mění podle mechanického zatížení vlivem působící měřené zatěžovací síly. Amplituda kmitů piezorezonátoru je nepřímo úměrná velikosti odporu R a velikosti zatížení. Čím více je senzor zatížen, tím více se snižuje činitel jakosti a zvyšuje se tlumení oscilátoru. Na amplitudu kmitů také působí okolní prostředí, jako např. uchycení piezorezonátoru, tlumící guma atd., a právě tyto parametry mají vliv i na celkové vlastnosti senzoru.

Dále jsou vlastnosti rezonátoru dány:

- piezoelektrickými koeficienty
- elastickými koeficienty
- geometrickými rozměry rezonátoru
- umístění piezoelektrického rezonátoru v senzoru

Pokud není rezonátor uchycen v místě uzlů rezonančních kmitů, dochází k dodatečnému tlumení rezonátoru. Tuto podmínku je velice obtížně splnit, ale optimalizací uchycení je možné dodatečné tlumení minimalizovat. Aby senzor pracoval s co nejlepšími parametry, musí být vhodně „zapouzďen“. Konstrukce senzoru viz *Obr. 2.11* je technologicky náročná. Toto řešení sice využívá jednoduché snímací elektroniky (oproti nábojovým zesilovačům), ale podmínkou správného fungování je složité zapouzďení senzoru.



Obr. 2.11 Řez zapouzdření piezoelektrického elementu
pouzdro-1; přítlačný kolík-2; víko-3; podložka-4;
mosazná elektroda-5,7; pružný kloub-6; piezokeramika-8.

Další konstrukce senzoru, která využívá podobný princip jako senzor vyvinutý na FS – ČVUT, je konstrukce firmy Yokogawa, zde piezoelement rozmítávají podélné akustické vlny. Senzor je založen na principu křemíkové membrány, na kterou jsou umístěny dva rezonátory ve tvaru H. Vlastní kmitočet těchto rezonátorů se mění s mechanickým napětím působícím na senzor. Rezonátory jsou rozkmitávány magnetickým polem, a to tak, aby byly při působení tlaku namáhány mechanickým napětím, které má různou polaritu. Rozdílová frekvence rozmítače a rezonátoru je přímo úměrná působícímu tlaku [42].

Výhody této konstrukce senzoru je:

- nízká hystereze
- teplotní koeficient citlivosti 10 ppm/K
- vysoká přesnost nepřesahující 0,1%

1.2.5. Optovláknové senzory

Optický vláknový senzor je tvořen optickým vláknem, ve kterém dochází vlivem vnějších podmínek k modulaci procházejícího světla. Je možné měnit amplitudu, fázi, polarizaci nebo spektrální vlastnosti světla, procházejícího světlovodem. Optický senzor je napájen zdrojem světla – laser, laserová dioda, popř. LED. Velikost změny, která je způsobená měřenou veličinou, je analyzována detektorem. Optické vláknové senzory nejsou citlivé na vnější elektromagnetická pole, umožňují přenášet informaci mezi objekty

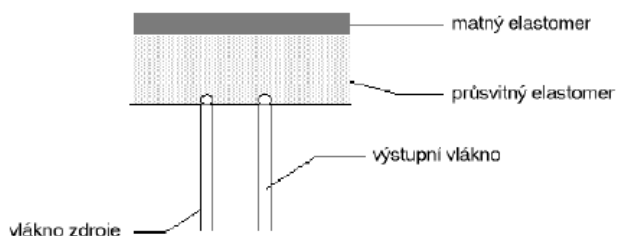
s rozdílnými potenciály a mohou ji přenášet ve velkém kmitočtovém intervalu na dlouhé vzdálenosti [37].

Pro taktilní čidla se nejvíce používá změna amplitudy procházejícího světla. Tu je možné ovlivnit několika způsoby:

- změnou přechodu a odrazu světla
- změnou okrajových podmínek šíření světla v optickém prostředí (např. mikroohyb)
- změnou tlumení
- změnou vzájemné optické vazby

Optovláknové senzory se změnou přechodu a odrazu světla

Tyto senzory využívají změny odražené energie od reflexní vrstvy [33]. Základ senzoru tvoří fotopropustné a fotoreflexní vrstvy, které jsou umístěny na sobě a zároveň tvoří deformační člen. Zdroj světla vyzařuje paprsek přes fotopropustnou vrstvu na reflexní vrstvu, od které je odražen. Síla působící na sensor mění vzdálenost reflexní vrstvy, a tím se mění i intenzita odraženého paprsku, *obr. 2.12*. Odražený paprsek má se zvětšující se vzdáleností reflexní vrstvy větší rozptyl, a tedy jen malá část dopadajícího paprsku splňuje požadavek pro limitní úhel vstupu do vlákna.



Obr. 2.12 Optický senzor pracující se změnou odrazu

Senzory měřící mikroohyb optického vlákna

Pokud působí síla na vhodně upevněné optické vlákno, potom se toto vlákno začne ohýbat a v ohybu vlákna vzniká útlum světla, který se vyhodnocuje.

Optické vlákno pracuje na principu totálního odrazu paprsku na rozhraní dvou prostředí, které mají rozdílné indexy lomu. Paprsek dopadající z oblasti optického prostředí s vyšším indexem lomu na rozhraní optického prostředí s nižším indexem lomu (chování paprsku se řídí Snellovými zákony odrazu a dopadu). Aby při vedení signálu optickým

vlákem byl jen minimální útlum, paprsku musí vzniknout totální odraz. Totální odraz vznikne tehdy, pokud paprsek nepřekročí tzv. kritický úhel dopadu (α_c). Při menším úhlu dopadu paprsku než je úhel kritický dochází tedy k totálnímu odrazu a veškeré světlo se odráží od rozhraní a žádné neprosteupí do pláště vlákna. Pokud je úhel dopadu větší, než je úhel kritický, potom část světelné energie přejde přes rozhraní do pláště vlákna [38], [51], [52].

Podmínka úplného vnitřního odrazu je dána vztahem:

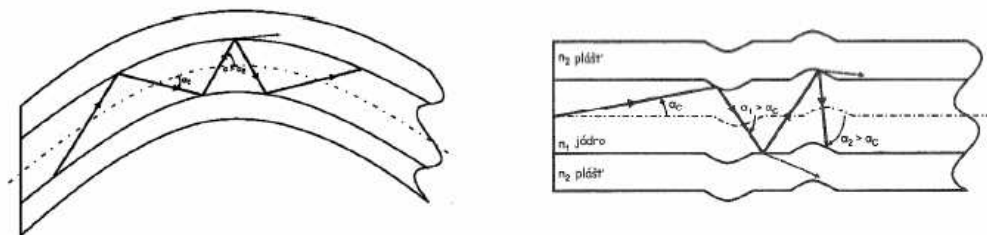
$$\Theta \geq \arcsin \frac{n_2}{n_1} \quad (9)$$

$\theta_c [^\circ]$ - úhel dopadu; $n_1 [-]$ - index lomu jádra; $n_2 [-]$ - index lomu pláště

U ohybových senzorů je využíváno porušení podmínky úplného vnitřního odrazu na rozhraní mezi jádrem a pláštěm optického vlákna. Porušení této podmínky lze dosáhnout, pokud je optické vlákno ohnuto o vyšší úhel než kritický. Při ohnutí optického vlákna pod kritický poloměr nastane porušení podmínky pro vidy vyšších řádů a ty se mohou dále šířit podél optického vlákna jako plášťové vidy, nebo mohou uniknout do okolního prostředí. Tímto se sníží intenzita světla, které probíhá jádrem optického vlákna. Další jev, který může zvyšovat ztráty v optickém vlákně, je fotoelastický jev, avšak zde záleží na materiálových vlastnostech vlákna. Index lomu ve vlákně je funkcí tlaku, a tedy není konstantní. Při ohybu vlákna vznikne na vnitřní straně tlakové a na vnější straně tahové napětí, a tím dochází ke změně indexu lomu v jádře i plášti.

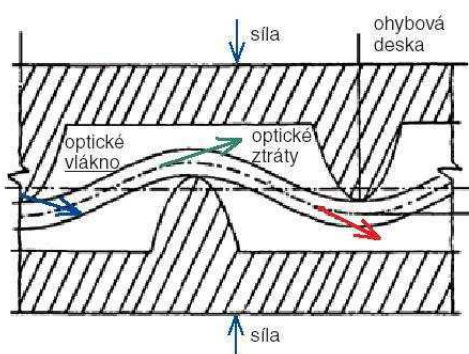
Ohybové ztráty lze rozdělit na:

- Makroohybové
- Mikroohybové



Obr. 2.13 Makroohyb a mikroohyb optického vlákna

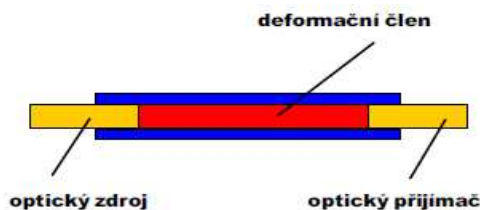
Makroohyb vlákna nastává, pokud je rádius zakřivení větší než průměr jádra vlákna (Obr. 2.13). Mikroohyb vlákna naopak nastává, pokud rádius zakřivení je menší než průměr jádra vlákna. Obecně lze říci, že čím více je světlo vedeno středem vlákna, tím je útlum světla méně závislý na ohybu. Z tohoto důvodu jsou použity v ohybových senzorech multimódová vlákna, kde oproti ostatním typům vláken vznikají při ohybu větší ztráty, a z toho vyplývá i lepší citlivost senzoru. Dalším důvodem je, že mikroohyb vlákna může mít (např. proti jednobodovým vláknům) takový rádius, který je bezpečně nad mezí pevnosti materiálu vlákna.



Obr. 2.14 Příklad sestaveného makroohybového senzoru s optickým vláknem

Optovláknové senzory se změnou tlumení

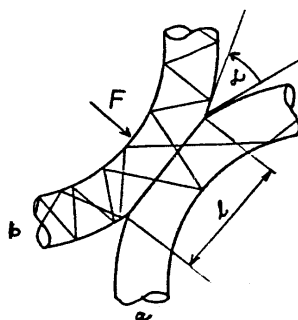
Tyto senzory obsahují průsvitný člen, umístěný mezi rozdělené optické vlákno, který vlivem působící síly mění své optické vlastnosti [38], [51], [52]. V tomto případě optické vlákno slouží pouze k vedení světelné energie, obr. 2.15.



Obr. 2.15 Optický senzor se změnou tlumení v defomačním členu

Optovláknové senzory se změnou vzájemné vazby

Senzor pracuje na principu vzájemné optické vazby, mezi dvěma jádry vláken. Na zdroj světla je připojeno jedno optické vlákno a k detektoru vlákno druhé. U obou vláken je v místě dotyku odstraněn ochranný polyuretanový plášť *Obr. 2.16*. V případě, že na tento senzor začne působit síla, vznikne ohyb a těsná vzájemná vazba, kterou poté přechází úměrná část světelné energie z prvního vlákna do druhého v závislosti na velikosti působící síly (viz podmínka úplného vnitřního odrazu) [51], [52].



Obr. 2.16 Uspořádání optických vláken v senzoru se změnou vzájemné vazby

1.2.6. Kapacitní senzory

Hlavní součástí kapacitních senzorů je elektrický kondenzátor. Konstrukce senzorů je navržena tak, aby se při působení síly měnil jeden z parametrů, který určuje kapacitu. Kapacita deskového kondenzátoru deskového je dána vztahem:

$$C = \epsilon_o \epsilon_r \frac{S}{d} \quad (10)$$

$C [F]$ – kapacita senzoru; $\epsilon_o [Fm^{-1}]$ – permitivita vakua; $\epsilon_r [-]$ – relativní permitivita;

$S [m^2]$ – plocha společných elektrod; $d [m]$ – vzdálenost elektrod.

U kapacitních senzorů se nejčastěji využívá změny vzájemného postavení elektrod. Měnit se může jak plocha společných elektrod S , tak i vzdálenost elektrod d . Ve výjimečných případech se využívá změny proměnné permitivity ϵ . Elektrody kondenzátoru mohou mít složité tvary a může se měřit změna několika parametrů soušasně [42], [47].

Elektrody se umísťujú na deformačný člen (nosič) a ten určuje tuhosť senzoru. Na materiál deformačného člena jsou kladeny:

- 1) mechanické požiadavky (mechanická odolnosť, stála tuhosť, atd.),
- 2) elektrotechnické požiadavky (stála permitivita, minimálna svod, atd.) jsou požadovány pouze, pokud deformačný člen tvorí súčasne dielektrikum.

Způsoby měření výsledné kapacity vycházejí z faktu, že proud procházející kondenzátorem je vyjádřen jako podíl změny napětí ku změně času při stálé kapacitě:

$$i = C \cdot \frac{du}{dt} [A] \quad (11)$$

Pro vyhodnocení změn velikosti kapacity se především užívá: měření času nabíjení, měření frekvence rezonančního obvodu, nebo měření útlumu (pro danou frekvenci) [43].

V praxi se kapacitní senzory užívají pro spojitá nebo nespojitá (dvoupolohová) měření. Pokud mají provedení tzv. "makrosenzorů", používají se pouze určitá měření, kde okolní prostředí negativně nepůsobí na parametry senzoru, jež jsou ukazatelem působící síly. Zato jsou hojně využívané tzv. "Mikrosenzory" na kapacitním principu, jelikož u těchto senzorů není problém vykompenzovat či odstínit rušivé vlivy, neboť vyhodnocovací elektronika je v těsné blízkosti čidla.

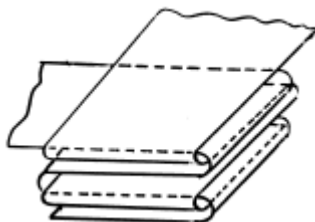
Příklady konstrukce kapacitních senzorů

U nespojitých měření (dvoupolohové měření – náhrada mech. kontaktu) se využívá pouze elektrod, které jsou vyleptané na plošném spoji a tvorí kondenzátor. Pokud se přiblíží k tomuto kondenzátoru sledované těleso, změní se jeho permitivita, a tím i kapacita. Tuto změnu kapacity je možné snadno vyhodnotit specializovaným obvodem, jako je např. obvod MPR084 od firmy Freescale, který převádí informaci o přiblížení předmětu k senzoru do digitální podoby. Takto je možné získat taktilní matici, která pouze vyhodnotí polohu tělesa vůči měřicí ploše [53].

Takovéto typy konstrukcí kapacitních senzorů se nejčastěji využívají k měření tlaku a zrychlení jako příklad zařízení, kde se může použít kapacitní senzor, je obvod MPXY8300 od firmy Freescale [54], [55], [56]. Obvod MPXY8300 je primárně určen k měření tlaku v pneumatikách, ale obsahuje i senzory zrychlení a teploty. Základním prvkem tohoto obvodu je čidlo absolutního tlaku, které je složeno z integrované kapacitní měřicí buňky a řídicí a vyhodnocovací elektroniky. Převod měřené síly na elektrický signál je zajištěn pomocí

pružné křemíkové membrány (elektroda kondenzátoru o ploše cca 1 mm^2) – působením tlaku na tuto membránu je měněna kapacita kondenzátoru. Současně je součástí senzoru integrováný i druhý referenční kondenzátor s pevnými elektrodami, jenž kompenzuje parazitní vlivy (např. teplotu). Integrovaná elektronika vyhodnocuje výsledný tlak, který je vztažený k hodnotě podtlaku ve vnitřní komoře senzoru. Senzor umí měřit absolutní tlak v rozsahu 100 až 1500 kPa, [8].

Spojitým měřením síly pomocí kapacitních senzorů se zabývalo pracoviště ČVUT-FS, kde byl navržen konstrukčně jednoduchý kapacitní senzor. Uspořádání tohoto senzoru je uvedeno na *obr. 2.17*. Mezi elektrodami je umístěn izolant, který zároveň zastává funkci deformačního členu. Elektrody jsou hliníkové pásky široké 1 mm. Síla, která působí na senzor, mění vlivem stlačování vzdálenosti elektrod, a tím se mění i výsledná kapacita [15].



Obr. 2.17 Sestavený kapacitní senzor síly

Technické parametry vyvinutého čidla: kapacita nezatíženého senzoru – 6 pF; kapacita zatíženého senzoru – 27 pF ($F = 5 \text{ N}$); normálová síla – 6 N; rozměry – 2 x 2 x 1 mm.

1.2.7. Maticové taktilní senzory

Při stavbě maticových taktilních senzorů (MTS) se v současné době využívá několika základních fyzikálních principů. Základem MTS je vždy maticové uspořádání citlivých prvků, a to od několika málo až po tisíce kusů. Hlavní složkou informace, kterou MTS poskytuje, je rozložení normálových složek sil působících na jednotlivé citlivé prvky snímacího pole. Vývoj jde neustále kupředu a MTS nyní mají široké pole uplatnění také v lékařství, při rozpoznávání „obrazů“ apod. MTS mohou zjišťovat, jak geometrické, tak i dynamické vlastnosti jako jsou: velikost, tvar, rozložení tlaku, rozložení sil, tření apod. [9].

1.2.8. Zhodnocení senzorů pro použití v maticovém taktilním snímači

Jelikož se tato práce dále primárně zabývá maticovými taktilními senzory, je nutné zhodnocení výše uvedených typů senzorů (*viz kapitoly 2.2.1. až 2.2.6*) a zvolení co možná nejvhodnějšího typu senzoru pro použití v maticových taktilních senzorech.

Teoreticky všechny senzory, pracující na výše uvedených principech, je možné použít jako převodník působící síly na elektrický signál i v maticových taktilních senzorech, avšak jednotlivé typy senzorů se od sebe dosti výrazně liší jak konstrukcí, tak i svými vlastnostmi. Z tohoto důvodu je nezbytné vyhodnocení nejvhodnějšího typu senzoru podle kritérií, které zohledňují vhodnost použití jednotlivých typů senzorů v maticových taktilních senzorech.

Je nutné vybrat takový typ senzoru, který bude mít nejvýhodnější kombinaci následujících parametrů:

- rozměry senzoru
- náročnost vyhodnocování signálu
- náročnost výroby mantice senzorů
- rozsah měřicí frekvence (při jaké frekvenci měření je daný typ senzoru schopen spolehlivě převádět působící sílu na elektrický signál)
- přesnost převodu měřené síly na elektrický signál
- rozsah měřících tlaků (citlivost senzoru)
- odolnost proti rušení vnějšími vlivy (teplota, vlhkost, atd.)
- finanční náročnost (cena)

Hledaným typem senzoru je sensor, který je použitelný pro biomechanická měření, má minimální technologickou a vyhodnocovací náročnost a v neposlední řadě má co možná nejlepší poměr „výkon/cena“. Konkrétně by sensor měl mít přesnost výstupního signálu do $\pm 5\%$ z měřicího rozsahu tlaků, měl by být schopen měřit rychlostí 0 – 50 kHz, měl by mít rozsah měřících tlaků cca 25 – 500 kPa a musí mít takové rozměry, aby rozteč jednotlivých senzorů v matici mohla být od 2 do 5 mm. Sensor, který nejlépe vyhovuje výše uvedeným kritériím, bude, od *kapitoly IV dále* uvažován jako převodník působící síly na elektrický signál v maticových taktilních senzorech.

Vhodnost jednotlivých typů senzorů pro použití v maticových taktilních senzorech, podle výše uvedených parametrů seřazené od nejméně vhodných po ty nejvíce vhodné:

- Piezoelektrické senzory a senzory založené na změně mechanických vlastností (tenzometry) – oba dva typy senzorů mají pro požadované rozměry a použití vysokou technologickou a vyhodnocovací náročnost.
- Kapacitní senzory – nejsou pro daný typ použití vhodné pro svoji velkou rozměrovou náročnost, jelikož, aby spolehlivě převáděly působící sílu na elektrický signál (změna kapacity vyvolána působící silou musí být řádově vyšší než kapacity parazitní), musí mít určité rozměry, které ovšem neodpovídají výše uvedenému požadavku 2 – 5 mm a také mají poměrně velkou technologickou a měřicí náročnost.
- Senzory pracující se změnami magnetického pole – jsou dalším typem senzoru, který není úplně vhodný pro použití v taktilní matici, jelikož má oproti ostatním vysokou technologickou náročnost a také poměrně velké rozměrové požadavky
- Optovláknové senzory – tento typ senzorů se v některých případech v taktilních maticích používá, nicméně má stále dosti vysokou technologickou náročnost výroby a je citlivý na elektromagnetické rušení
- Senzory založené na změně odporu – tyto senzory jsou v taktilních maticích nejvíce rozšířeny, jelikož mají oproti ostatním typům senzorů nízkou technologickou a měřicí náročnost, je možné je vyrobit v požadovaných rozměrech a nejsou při vhodné konstrukci matice příliš náchylné na okolní rušení

Ze zhodnocení vyplývá, že pro použití v matici senzorů, podle výše uvedených parametrů nejlépe svými vlastnostmi vyhovují senzory založené na změně odporu.

1.3. Praktické využití taktilní informace

1.3.1. Využití v biomedicině a biomechanice – příklady zařízení pro biomechanická měření

Při náhradě lidského hmatu je snaha využít co nejlépe taktilní informaci, a z tohoto důvodu je nutné popsat chování lidského hmatu. Taktilní informace je dále využívána ve sportovním lékařství a ortopedii – v těchto oborech se především zkoumá rozložení tlaků na

ploskách chodidel a jejich časový průběh, diagnostika poruch motoriky, ortopedických vad a dalších onemocnění.

Měřicí systémy firmy Aetrex

Jako příklad zařízení pro demonstraci jednoduché aplikace je výrobek nazývaný iStep. Jedná se o jednoúčelové zařízení, které slouží především v ortopedii a obuvnictví k vhodnému výběru obuvi viz *Obr. 2.18* [59].

Tento výrobek je navržen tak, aby byl cenově co nejdostupnější, proto dvě snímací plochy odpovídají pouze velikosti lidského chodidla a statické měření je prováděno malou měřicí rychlostí. Dalšími senzory, kromě tlakových senzorů na vodorovné ploše měřicí desky, jsou senzory měřicí boční profil chodidla (nárt, kotníky, atd.) – tyto senzory však fungují na optickém principu (jako optozávora).



Obr. 2.18 Měřicí systém iStep

Měřicí systémy firmy RSscan

Firma RSscan nabízí především produkty, které slouží k měření v oblasti medicínské diagnostiky [8], [57], [58].

Hardware používající pro měřicí zařízení

Základní typ systému pro měření se nazývá „Footscan USB plate“. Skládá se z měřicí desky, jejíž součástí je vyhodnocovací elektronika, ze které vede USB kabel do PC, kde je vyhodnocovací software. Systém je vyráběn ve třech různých rozměrových provedeních:

- deska o rozměrech 500 x 400 mm obsahující 4096 měřicích bodů (viz Obr. 2.19)
- deska se zvětšenou délkou o rozměrech 1000 x 400 mm obsahující 8192 měřicích bodů
- deska s maximální délkou o rozměrech 2000 x 400 mm s obsahující 16 984 měřicích bodů.

Desky se zvětšenou délkou jsou pouze násobkem velikosti základního provedení senzoru o rozměru 500 x 400 mm a nejsou zde žádné změny v konstrukci senzoru a ani ve vyhodnocovací elektronice. Velikost jednoho měřicího bodu je 5 mm x 7 mm. Výrobce udává u systému „Footscan USB plate“ maximální rychlost měření je 500 snímků za sekundu.



Obr. 2.19 Měřicí systém Footscan USB plate

Nejmenším typem senzoru od firmy RSscan je produkt nazývaný „Insole system“, který se používá pro měření rozložení tlaku přímo v obuvi.

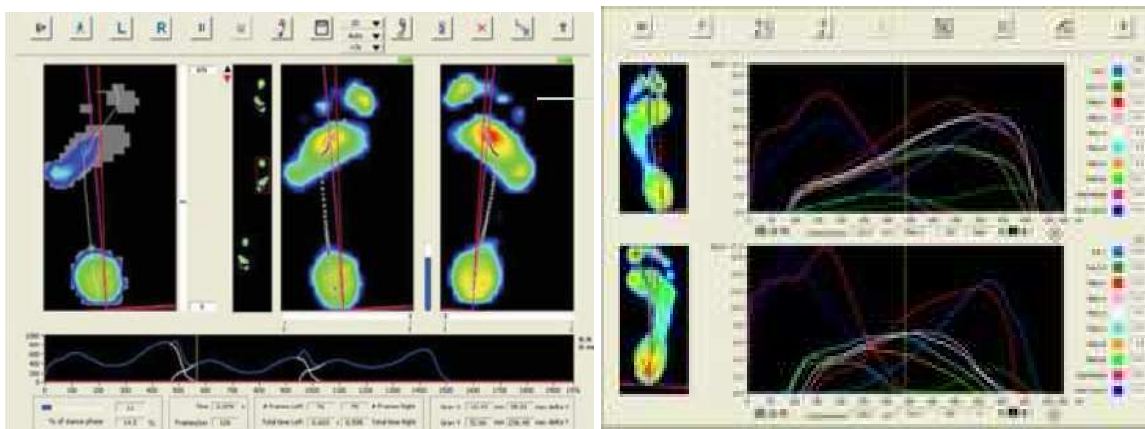
Obslužný software

Primární funkcí obslužného softwaru je zobrazení, interpretace a uchování vzniklých prostorových grafů. Program dále obsahuje nadstavbové funkce pro interpretaci dat, které sloužící jako podpora při diagnóze chodidla pacienta. Program obsahuje např. funkce typu:

- tvorba databází o jednotlivých měřeních,
- zobrazování centra tlaku,
- porovnávání jednotlivých měření,
- tvorba řezů z 3D grafu, atd.

Shrnutí použitelnosti systému

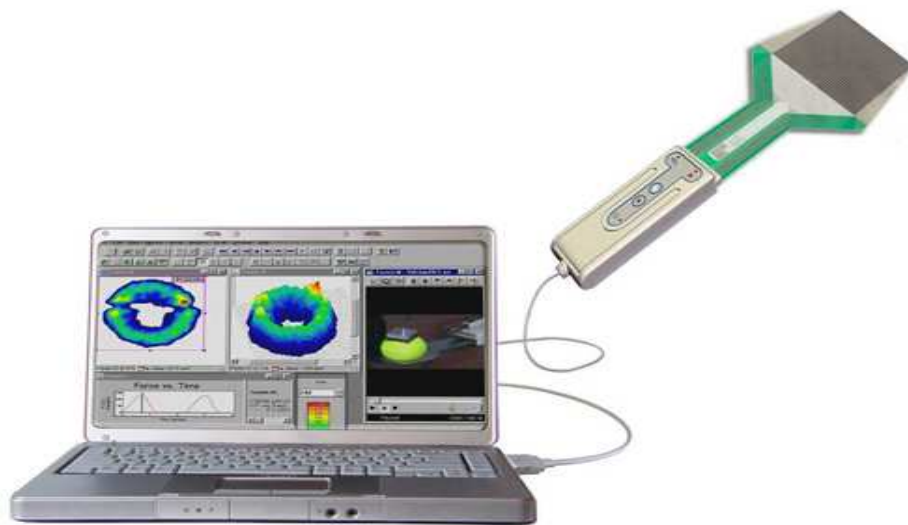
Jedná se ve své podstatě o jednoúčelové zařízení, kde se oblast aplikací vztahuje jen na měření kontaktních tlaků a jehož výstupem je diagnóza pohybového ústrojí člověka. Data ze systému nelze získat v „surovém“ stavu, uvnitř počítačového programu jsou přepočítávána dle neznámých postupů.



Obr. 2.20 Výstup z systému Rsscan

Měřicí systémy firmy Tekscan

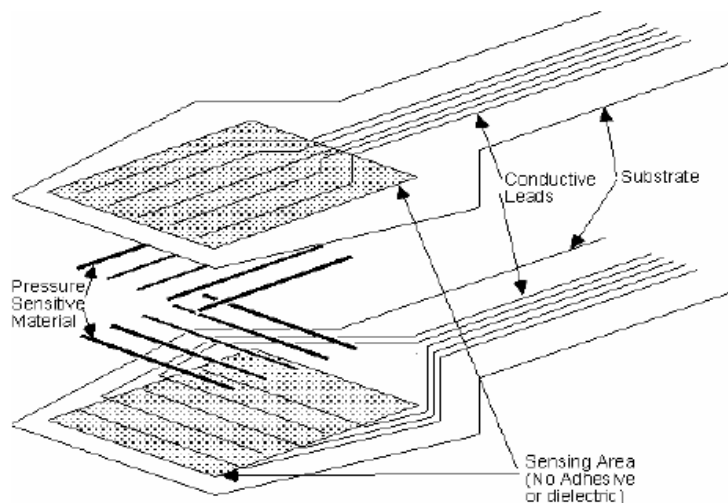
Firma Tekscan se specializuje na systémy k měření rozložení tlaku a na trhu poskytuje nejširší sortiment těchto produktů [60]. Zaměřuje své produkty k využití jak v oblasti medicíny, tak v oblasti průmyslu. V medicínských aplikacích je stěžejní ortopedický měřicí systém s označením *I-Scan*[®] System. Tento systém je složen ze tří základních součástí: senzorové matice, snímací elektroniky a vyhodnocovacího programu v PC viz *Obr. 2.20*. Sensorové matice jsou vyráběny v mnoha rozměrech a provedeních, např. matice typu 7101E má rozměry 487 x 447 mm a obsahuje 8448 měřicích bodů s velikostí bodu 5,1 x 5,1 mm. Jednotlivé snímací elektrody mají vyvedení do jednoho bodu, ke speciálnímu konektoru pro připojení měřicí elektroniky. Měřicí elektronika je připojena kabelem USB, který se používá jak pro sběr dat, tak i pro napájení. Maximální snímací rychlost je 185 Hz, což je pro tento typ matice cca rychlost 1,5 MHz na měřicí bod.



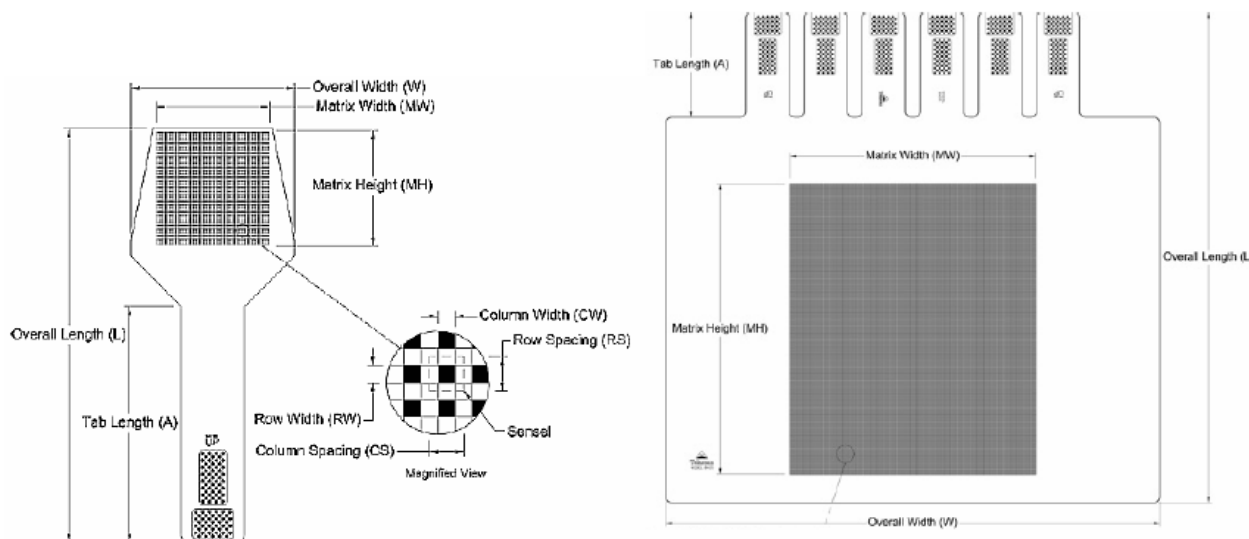
Obr. 2.21 Měřicí systém „I-Scan[®] System“ firmy Tekscan

Jak již bylo uvedeno matice senzorů společnosti Tekscan se vyrábějí v široké škále velikostí, tvarů i citlivostí, z čehož vyplývá, že mohou být používány pro nejrůznější aplikace, jako jsou např.: měření tlaku na chodidlech a velkých kloubech, měření skusu zubů, měření úchopu ruky, atd. Společnost Tekscan se nezaměřuje pouze na zařízení pro biomechanická měření, ale i na zařízení pro použití v průmyslu, jako např.: měření rozložení tlaku u běhounu pneumatiky, měření rozložení tlaku stěrače na okně automobilu, atd.

Základem sensorových matic používajících ve všech výše zmíněných aplikacích je vodivý polymer (PTF), který je nanesen na elektrodách (příčných i podélných) ve tloušťce 0,1 mm, viz obr. 2.22. Jako nosný materiál pro elektrody se používá polyamid. Takovéto uspořádání matice senzorů má několik výhod, např. je zabráněno protékání proudu mezi souběžnými elektrodami a tím je minimalizováno nežádoucí ovlivňování sousedních měřicích bodů, uspoří se poměrně drahý vodivý polymer, atd. Všechny elektrody jsou vyvedeny na podkladovou folii na speciální konektor pro připojení elektroniky, viz obr. 2.23. Tyto konektory mají unifikovaný rozměr, což umožňuje vzájemně zaměňovat měřicí elektroniku a jednotlivé druhy taktilních matic.



Obr. 2.22 Konstrukce taktilní matice firmy Tekscan



Obr. 2.23 Taktálních matice různých velikostí se stejnými konektory

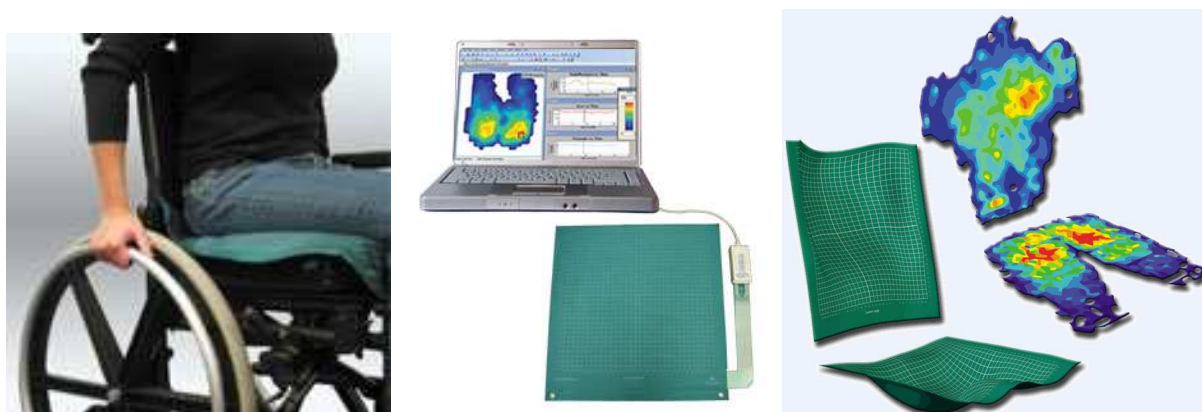
V závislosti na aplikaci, kde se senzor používá, se rozsahy měřicích tlaků pohybují v rozmezí 0 – 14 kPa a 0 – 207 MPa. Výrobce udává linearitu čidla $\pm 3\%$, hysterezi menší než 5,4% z měřicího rozsahu a opakovatelnost $\pm 3,5\%$.

Hardware používaný pro měřicí zařízení

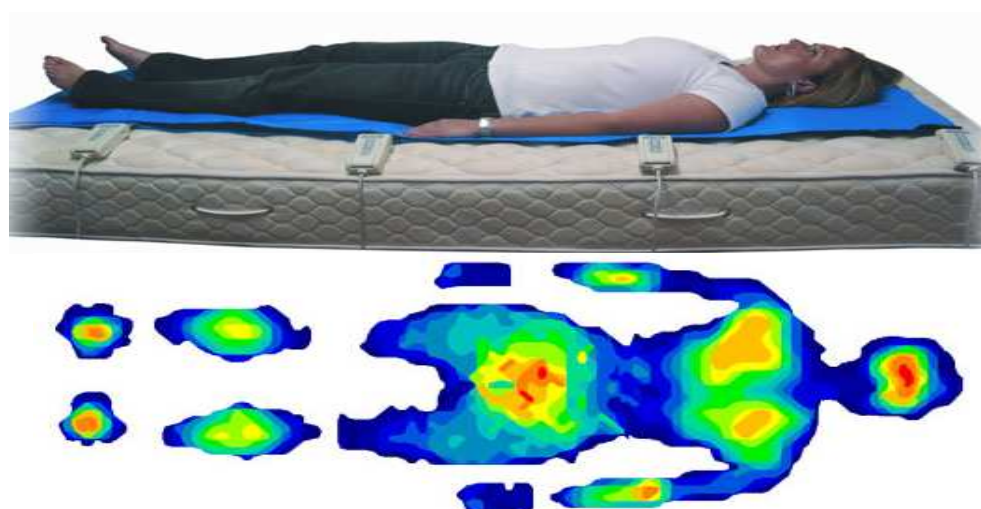
Měřicí elektronika je vložena do samostatného pouzdra a je díky jednotnému výstupnímu konektoru ze sensorových matic používána jako univerzální měřicí modul pro všechny vyráběné typy senzory. Elektronika je (ve většině aplikací) napájena proudem 200 mA při napětí 5 V pomocí připojovacího portu USB v. 1.1 nebo 2.0, nebo je použito

externí napájejí přes speciální HUB (max. 12 V, 5 A). Měření pracuje na principu postupného připojování napájecích elektrod ke zdroji napětí, potom je signál přiveden z připojené elektrody na převodník proud/napětí a OZ. Signál z OZ je přiveden na osmi bitový A/D převodník a naměřená data jsou poslána přes USB do PC nebo PDA.

Pokud je potřeba měřit velké plochy senzorů např. pro snímání rozložení tlaků při sedu nebo lehu člověka viz *Obr. 2.24 a Obr. 2.25* [67], je nutné několik modulů propojit paralelně, jelikož je měřicí elektronika určena pouze pro omezený počet měřených bodů. S tím se u větších měřicích matic počítá už při výrobě, a proto měřicí matice mají vyvedené konektory pro připojení dvou nebo více modulů, viz *obr. 2.23*. Díky unifikaci elektroniky dochází k velkým úsporám při výrobě a je také možné zákazníkovi nabídnout velké spektrum produktů při malých nákladech na vývoj nových typů zařízení.



Obr. 2.24 Měřicí systém „CONFORMAT[®] System“ firmy Tekscan



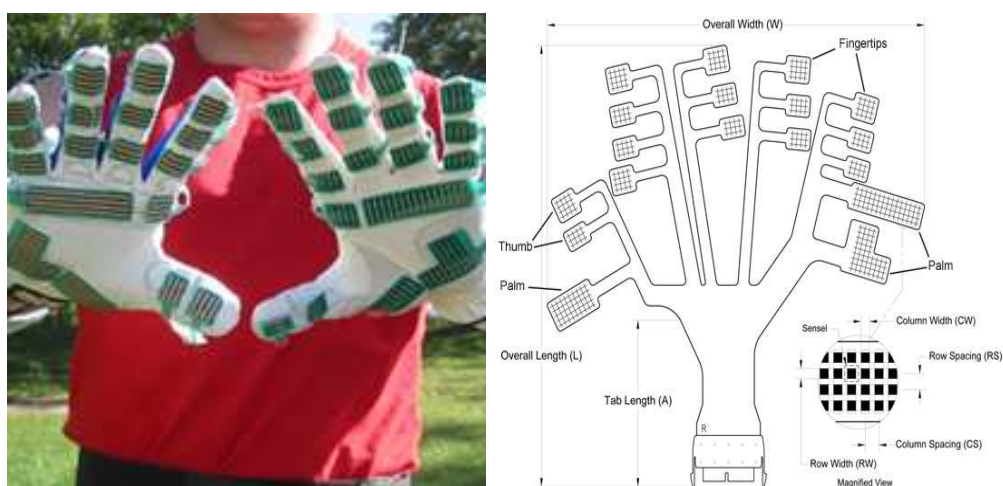
Obr. 2.25 Měřicí systém „BPMS[™]“ firmy Tekscan

Programové vybavení měřicích systémů firmy Tekscan

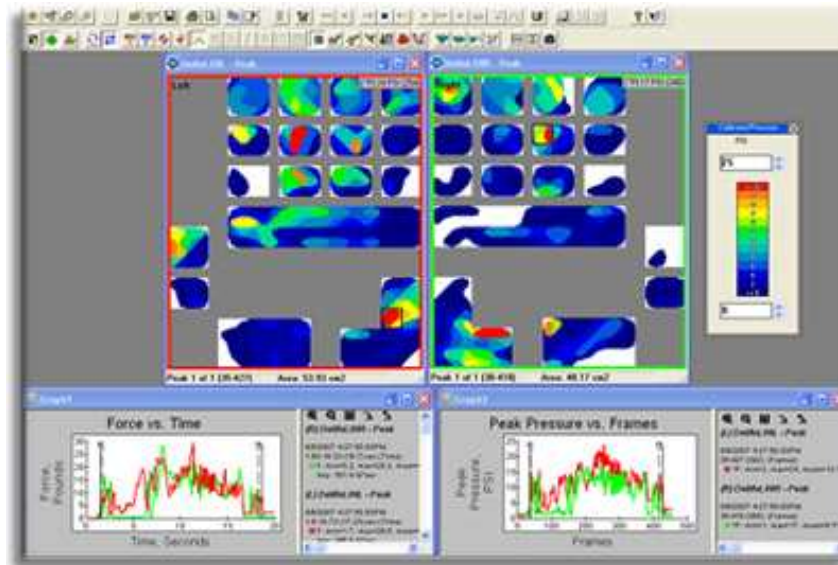
Programové vybavení je určeno, stejně jako u zařízení ostatních společností, pro zobrazení naměřených dat např. formou prostorových grafů, dále pro uchování a interpretaci naměřených dat. Pro každý typ senzoru je dodáván speciální softwarový balíček, který obsahuje podprogram, co zajistí správnou interpretaci dat. Podpůrné programové vybavení pro diagnózu je obdobné jako u předchozích typů měřicích systémů, tzn., že data ze systému nelze získat v „surovém“ stavu, uvnitř počítačového programu jsou přepočítávána dle neznámých postupů.

Shrnutí použitelnosti systému firmy Tekscan

Jelikož je měřicí systém firmy Tekscan velmi dobře zpracován z hlediska modularity, může být k němu přistupováno jako ke stavebnici, toto je možné díky jednotné měřicí elektronice, jednotných konektorů a podobných výstupních parametrů senzorů. Vzhledem k takto nastaveným parametrům je možné dosáhnout velké rozmanitosti nabídky, a tím firma Tekscan může zákazníkovi nabídnout produkt, který bude přesně vyhovovat jeho požadavkům. Matici senzorů je možné snadno a levně sériově vyrobit, a to i s možností uspořádání do různých tvarů. Za těchto podmínek je měření možné prakticky všude, kde se podaří „umístit“ plošku elektrody. Jako příklad náročnější konstrukce taktilního snímače je uveden produkt firmy Tekscan nazývaný **Grip™ System** pro měření kontaktních tlaků na ruce viz *Obr. 2.26 a Obr. 2.27* [64].



Obr. 2.26 Měřicí systém „Grip™ System“ firmy Tekscan



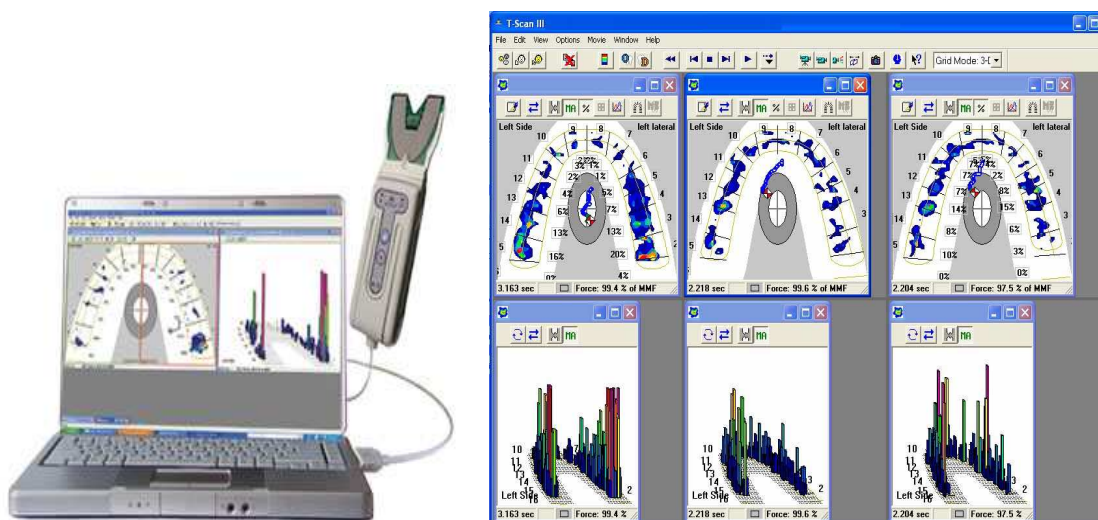
Obr. 2.27 Vyhodnocovací software měřicího systému „Grip™ System” firmy Tekscan

Dalším zajímavým zařízením od společnosti Tekscan je systém nazývaný K-Scan™, který slouží pro měření rozložení tlaků mezi kostmi přímo ve velkých kloubech člověka. Matice senzorů se vkládá do spáry mezi kosti přímo v kloubu člověka, viz Obr. 2.28, díky tomu je systém schopen přesně změřit, jakým způsobem na sebe působí kosti v kloubu a jaké části kloubu jsou při zátěži nejvíce namáhány. Na základě tohoto měření je možné individuálně určit tvar umělých kloubů pro pacienta a tím zajistit lepší funkčnost i zvýšit jejich životnost [60].



Obr. 2.28 Měřicí systém „K-Scan™ System” firmy Tekscan

Poslední systém od společnosti Tekscan, který je zde uveden, je systém používaný ve stomatologii s názvem *T-Scan[®] III*, který snímá a analyzuje, zda jsou rovnoměrně rozloženy kontaktní síly mezi zuby při skousnutí pacienta. Na základě tohoto měření je možné zjistit, zda jsou zuby (např. po výplni zubu, nebo tvarování zubních protéz) správně upraveny a nevznikají zde ničivé síly při skusu pacienta. Systém umožňuje analýzu lidského chrupu najednou jako celku.



Obr. 2.29 Měřicí systém „T-Scan[®] III System” firmy Tekscan

Měřicí systémy firmy Xsensor

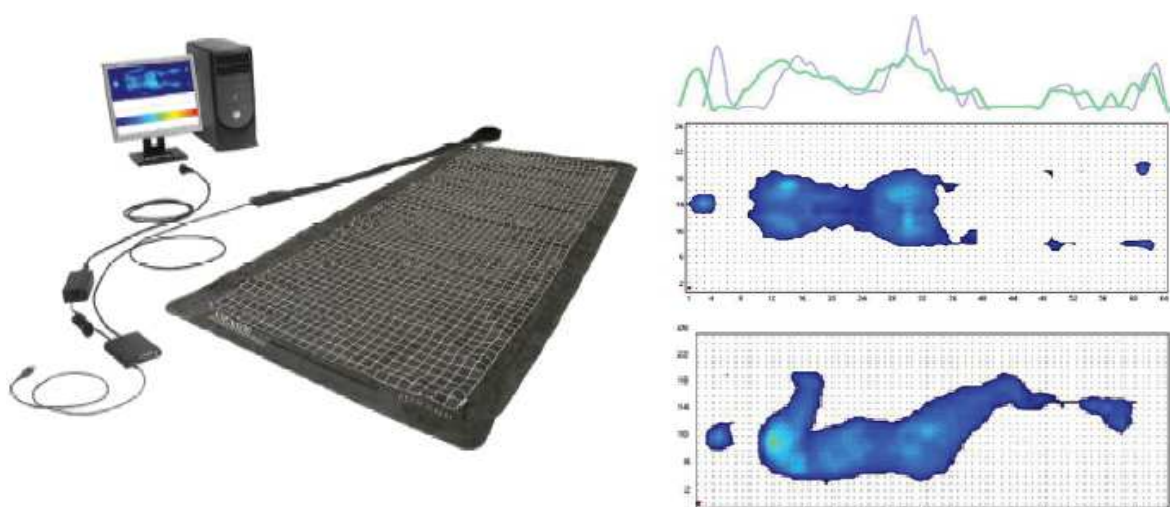
Základem všech systémů společnosti Xsensor je matice senzorů která je vyráběna v různých rozměrech (od 32,5 x 32,5 cm do 81,28 x 203,2 cm) a s různou hustotou senzorů (od několika set po desetitisíce senzorů na plochu) viz *Obr. 2.30* [79].



Obr. 2.30 Příklad matice senzorů společnosti Xsensor

Společnost Xsensor vyrábí systémy pro použití v lékařství, průmyslu a pro výrobky určené pro maloobchodní prodej, konkrétně se zaměřuje na tři oblasti použití taktálních snímačů:

- **Spánek** – měření rozložení tlaků mezi lidským tělem a postelovou matrací během spánku člověka. Tento systém používají prodejci matrací v běžných maloobchodních řetězcích a slouží jim pro vybrání optimální matrace pro konkrétního zákazníka (viz *Obr. 2.31*). Zde slouží jak pro zjištění jakým způsobem tělo člověka působí na matraci, tak i jako inovativní prodejní nástroj.



Obr. 2.31 Systém měření rozložení tlaku na matraci společnosti Xsensor

- **Bezpečnost a pohodlí pacientů** – slouží lékařům a rehabilitačním odborníkům při zabránění vzniku proleženin, dále napomáhá při výběru optimálního tvaru sedadla (invalidního vozíku) nebo tvaru postelové matrace při nutnosti dlouhodobého uvázaní na lůžko.
- **Použití v automobilovém průmyslu** – zde se společnost zaměřuje především na měření rozložení tlaku při styku pneumatiky automobilu s podložkou a měření rozložení tlaku při styku stěrače na předním skle automobilu podobně jako společnost Tekscan (*podrobnější popis viz kapitola 1.3.4.*).

Měřicí systémy firmy Otto Bock

Jako poslední je zde uvedena firma Otto Bock, která vyrábí protézu lidské ruky s názvem „Senzor HandTM Speed“. Tato protéza je řízená EMG signály ve svalech pahýlu ruky. S touto protézou je možné proporcionální řízení uchopovací síly v rozmezí 0–100 N a proporcionální řízení rychlosti sevření 15 – 300 mm/s. S touto protézou je díky výše uvedeným parametrům možné zachytit i relativně rychle letící předměty, a pokud předmět začne při úchopu prokluzovat, tak umožňuje automatické zvýšení uchopovací síly.

1.3.2. Užití taktilní informace pro komunikaci mezi lidmi

Užití taktilní komunikace mezi lidmi je jedinou možností u jedinců, kteří jsou současně postiženi poruchou sluchu a zraku, tzv. hluchoslepotou. Jde o znakový jazyk, kdy se oba komunikační partneři drží vzájemně za ruce a mohou tak i přes ztrátu zraku vnímat jednotlivé znaky. Problematika vzdělávání osob se současným postižením sluchu a zraku je jednou z oblastí, které jsou v České republice zatím na začátku cesty vedoucí k vytvoření životních podmínek umožňujících začlenění těchto osob do společnosti.

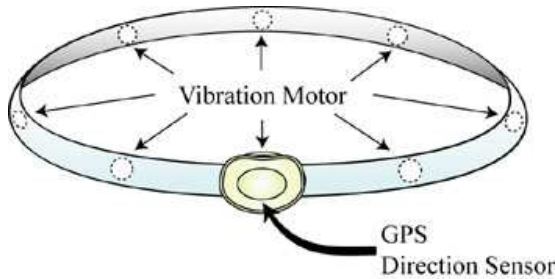
Postižení sluchu, k němuž je přidruženo zrakové postižení, představuje problémy především v komunikační sféře. To pak významně ovlivňuje vývoj jedince se současným sluchovým a zrakovým postižením po stránce emocionální, intelektuální i sociální a vede k nedostatečnému naplnění jeho potenciálních možností především v oblasti kognitivních funkcí.

Byla navržena deskripce českého znakového jazyka do taktilní podoby, která by měla vyústit v soubor znaků, které budou jedinci schopni používat. Taktilní forma znakového jazyka by tak mohla představovat spolehlivé dorozumívací médium. Tato forma komunikace však zapříčiňuje určitou sociální izolaci, neboť používání individuálního komunikačního módu znesnadňuje dorozumět se s těmi, kteří s ním nejsou obeznámeni.

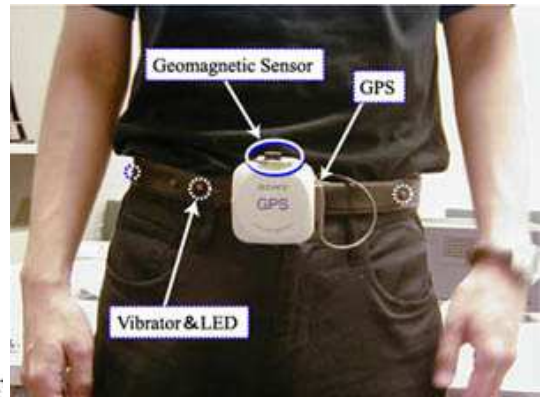
1.3.3. Taktilní informace jako dodatečný informační zdroj

Jako dodatečný zdroj informace se taktilní informace může využívat u lidí, u kterých došlo k nějakému postižení. Na *Obr. 2.32* je zobrazeno schéma vibračního opasku pro slepé. Opasek je spojen s modulem GPS, kde je uživatelem nastavena adresa. Strana, na kterou se

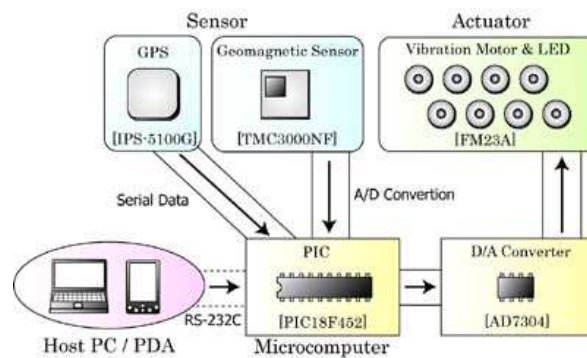
má uživatel vydat je charakterizována vibracemi příslušného vibračního motoru. Skutečné provedení ukazuje *Obr. 2.33*. Funkce je pak patrná z blokového schématu na *Obr. 2.33*.



Obr. 2.32 Opasek s vibračními motory



Obr. 2.33 Reálné provedení vibračního opasku

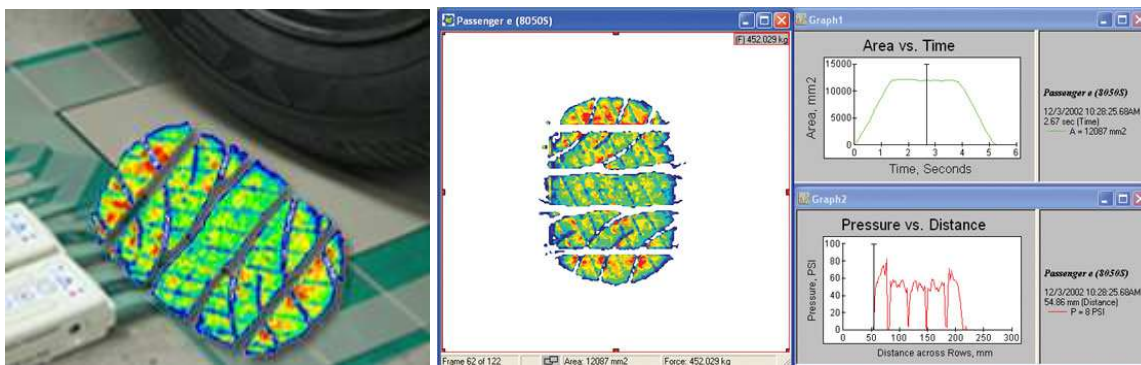


Obr. 2.34 Blokové schéma opasku

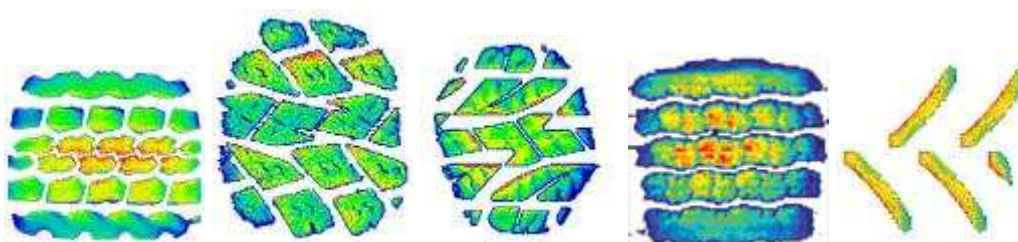
1.3.4. Užití taktilní informace v automobilovém průmyslu

Měření rozložení tlaku při styku pneumatiky automobilu s podložkou

Společnost Tekscan vyvinula systém s názvem TireScan™, který se používá pro statické a dynamické měření otisku libovolných pneumatik viz *Obr. 2.35* a *Obr. 2.36*. Tento systém se využívá v automobilovém průmyslu pro kontrolu jakosti a analýzu profilů pneumatik. Může se používat jak v laboratorních podmínkách, tak i přímo během praktického použití na silnici nebo na poli, důvodem je možnost tento systém umístit na měřicí stoličce v laboratoři, na vozovku nebo i pod zem pro měření tlaků v půdě [63], [65].



Obr. 2.35 Systém TireScan™



Obr. 2.36 Různé profily pneumatik naměřené systémem TireScan™

Měření rozložení tlaku při styku stěrača na předním skle automobilu

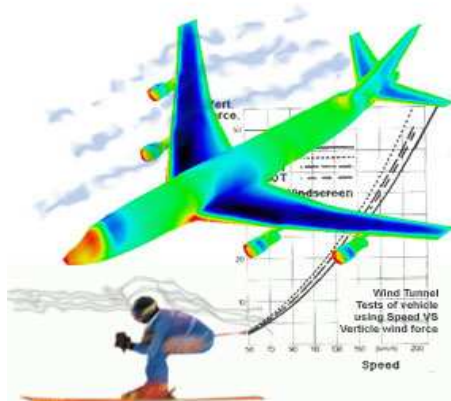
Systém s názvem Wiper™ slouží pro měření rozložení tlaku na stykové ploše mezi stěračem a sklem automobilu. Na základě tohoto měření je možné zjistit, zda má stěrač optimální tvar a přesně kopíruje povrch skla, což umožní správné stírání po celé ploše stěrača. Systém se skládá z dlouhé snímací matice, která se umístí přesně pod stěrač, vyhodnocovací elektroniky a zobrazovacího softwaru viz Obr. 2.37 [60].



Obr. 2.37 Systém Wiper™

1.3.5. Netradiční užití taktilní informace

Taktilní informace se využívá i v oblastech, kde by její použití nikdo nečekal. Zde se taktilní informace využívá při aerodynamických zkouškách různých objektů, např. konstrukce letadel nebo při testování správného posazení lyžařů, viz *Obr. 2.38*, či jezdců na kolech, jak ukazuje *Obr. 2.39*. Ve všech těchto ukázkách obtékající vzduch vytváří tlak na povrch. Tento tlak odpovídá příslušnému obtékání [37].



Obr. 2.38 Užití taktilní informace při aerodynamice letadel



Obr. 3.39 Užití taktilní informace při aerodynamice cyklistů

1.4. Zpracování taktilní informace

Termínem *taktilní informace* je míněna informace získaná taktilním snímačem. Ze způsobu získávání taktilní informace plyne i podstatný rozdíl metod, které zpracovávají taktilní otisk nebo vizuální snímek a vytvářejí jeho obraz. Signál z kamery obsahuje velké množství redundantních dat, naproti tomu signál z taktilních snímačů obsahuje podstatně menší množství informací o uchopeném předmětu. Z tohoto důvodu metody zpracovávající vizuální snímek, data redukuje, kdežto metody, zpracovávající taktilní otisk, musí data doplnit.

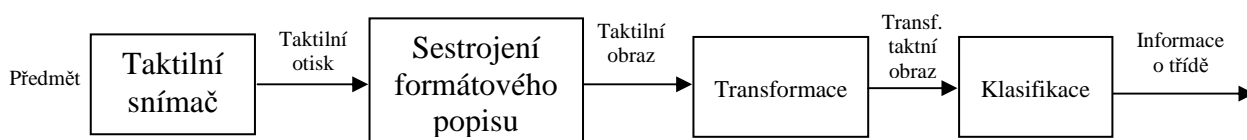
Rozpoznávání objektů hmatem je možné rozdělit do dvou skupin:

1. osaháváním předmětu – snímač postupně osahává jeho povrch nebo se po něm definovaným způsobem pohybuje
2. uchopením – předmět je rozpoznán jeho uchopením

Člověk užívá obou způsobů (taktilního, vizuálního) podle okolního prostředí, způsobu orientace a zájmu o objekt.

1.4.1. Průběh zpracování taktilní informace

Proces zpracování informace je znázorněné v blokovém schématu na *Obr. 2.40*.



Obr. 2.40 Průběh zpracování taktilní informace

V prvním bloku (taktilní snímač) dochází ke snímání taktilní informace. Výsledkem je taktilní otisk, který je pouze neformálním popisem (ve vizuální informaci odpovídá snímku z kamery) a z tohoto důvodu nelze činnost prvního bloku formálně popsat. Obraz zkoumaného předmětu je získán tak, že na taktilním otisku je vybrána jistá množina elementárních vlastností, jejichž způsob popisu je apriorně zvolen. Z těchto elementárních popisů je vhodným uspořádáním získán obraz předmětu. Dále může být tento obraz podroben určité transformaci, kterou je vytvořena vhodná reprezentace předmětu. Nakonec je z klasifikátoru získána informace o třídě [1].

Metody tvorby taktilního obrazu

Úkolem těchto metod je nalézt vhodný popis taktilního otisku, vytvořit taktilní obraz a v tomto obrazu se zaměřit na části, které nesou největší informaci o rozpoznávaném předmětu. K nejdůležitějším metodám tvorby taktilního obrazu patří např.: interaktivní metoda určení vrcholů, metoda řetězových kódů, metoda tolerančního pásma a jiné.

III. CÍLE DISERTAČNÍ PRÁCE

- Sestavení měřicího pracoviště pro měření jednotlivých bodů snímací matice Plantografu, aby bylo možné současné měření zatížení a elektrického odporu měřeného bodu.
- Návrh a konstrukce měřicího systému, který bude schopen současně měřit zatížení a odpor jednotlivých bodů taktilního snímače.
- Optimalizace konstrukce Plantografu potlačující nevýhody starších konstrukcí.
- Vyhledávání středů měřicích bodů pomocí obrazové analýzy.
- Optimalizace a měření tvaru a velikosti měřicích elektrod, jež zajistí co nejlepší měřicí vlastnosti senzorů.
- Matematický popis naměřených hodnot jednotlivých tvarů měřicích elektrod.
- Zjištění míry negativního ovlivnění okolních měřicích bodů při zatížení určitého měřicího bodu.

První dva uvedené dílčí cíle zajistí vhodné podmínky a nástroje pro splnění hlavních cílů této disertační práce. Jedním z nich je navrhnout optimální konstrukci Plantografu, která bude minimalizovat největší nevýhody starší verze Plantografu V05. Na této konstrukci budou poté uskutečněna níže popsaná měření.

Dále bude u optimalizované konstrukce provedeno měření, které určí optimální tvar a velikost měřicích elektrod v matici senzorů taktilního snímače, a to na základě měření několika typů měřicích elektrod s různými tvary a rozměry. Na tomto základě bude také možný matematický popis změřených závislostí.

IV. ZVOLENÉ METODY ZPRACOVÁNÍ

Pro dosažení cílů disertační práce byly zvoleny následující kroky metodiky zpracování:

- Sestavení měřicího pracoviště pro měření matice senzorů taktilního snímače za pomoci robotizovaného pracoviště s robotem Turbo Scara SR60.
- Konstrukce měřicího systému pro současné měření zatížení a odporu měřeného senzoru.
- Zajištění přesné vzájemné polohy snímače a měřicího hrotu.
- Zjištění polohy středů měřicích bodů pomocí obrazové analýzy a převedení do souřadnicového systému robota Turbo Scara SR60.
- Zmapování a podrobný popis jednotlivých typů Plantografu, výhody a nevýhody jejich konstrukce.
- Nová konstrukce Plantografu, která odstraňuje největší nevýhody předešlých konstrukcí.
- Změření a analýza senzorů s různými rozměry měřicích elektrod.
- Vyhodnocení optimálního tvaru elektrod.
- Aproximace naměřených hodnot pro různé rozměry měřicích elektrod.
- Měření a analýza ovlivňování nezatížených bodů v okolí bodu zatíženého.

1. Sestavení měřicího pracoviště pro měření jednotlivých bodů snímací matice

Aby bylo možné splnit další cíle této práce, je nejprve nutné sestavit měřicí pracoviště, na kterém bude možné měření jednotlivých senzorů ve snímací matici. Vychází se z úvodního předpokladu, že měřicí pracoviště je realizováno pomocí robotizovaného pracoviště s robotem Turbo Scara SR60.

Pracoviště pro měření jednotlivých senzorů ve snímací matici, které bude schopné spolehlivě měřit závislost odporu na velikosti tlaku působícího na měřený bod, se skládá z těchto důležitých částí:

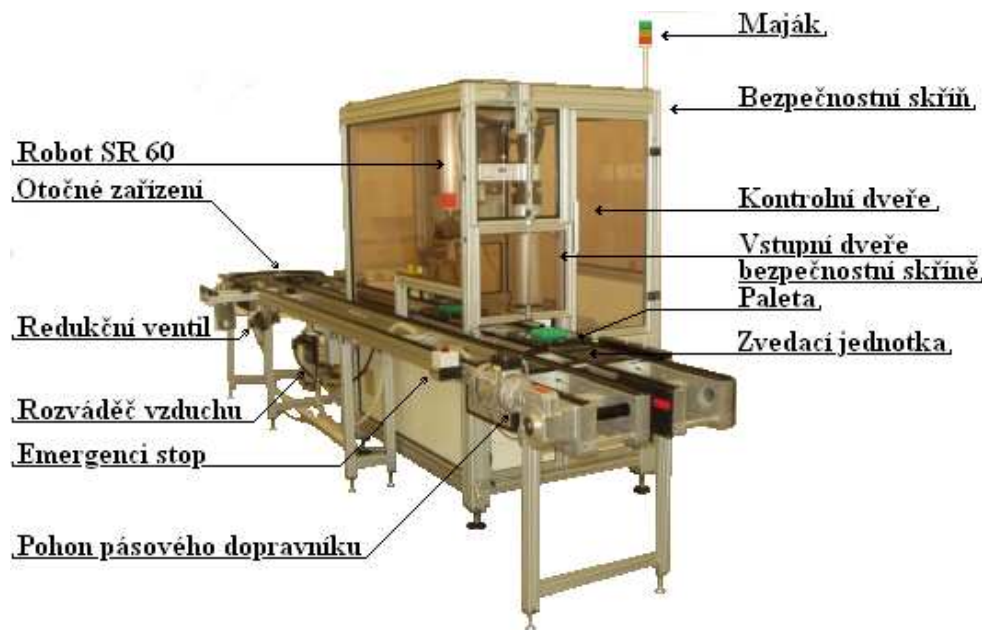
- robotizovaného pracoviště s robotem Turbo Scara SR60
- modulárního systému pro měření taktilních snímačů
- kamery a externího PC se softwarem pro vyhodnocení vzájemné polohy matice senzorů a měřicího hrotu modulárního systému
- podložky fixující polohu snímací matice v pracovním prostoru robota
- externího PC se softwarem pro vizualizaci a ukládání naměřených hodnot na snímací matici

Podrobný popis a funkčnost výše uvedených částí měřicího pracoviště jsou dále uvedeny v následujících kapitolách této práce.

1.1. Popis a funkce robotizovaného pracoviště s robotem Turbo Scara SR60

Jedním ze základních prvků měřicího pracoviště pro měření senzorů ve snímací matici je robotizované pracoviště, proto je nezbytné toto robotizované pracoviště alespoň stručně popsat spolu s jeho základními vlastnostmi a technickými parametry.

Hlavními součástmi robotizovaného pracoviště vyrobeného společností BOSCH (ve vlastnictví katedry elektrotechniky a automatizace, Technické univerzity na České zemědělské univerzitě v Praze), jsou robot Turbo Scara SR60 společně s dopravní linkou viz *Obr. 4.1*. Zařízení má univerzální využití jak pro výuku a různá laboratorní měření, tak i v průmyslu (v průmyslu se dá použít pro kontrolu kvality, manipulaci s objekty, atd.).



Obr. 4.1 Robotizované pracoviště s robotem Turbo Scara SR60

Nosná konstrukce robotizovaného pracoviště je sestavena z hliníkových profilů. Kolem pracovního prostoru robota SR60 byla vybudována bezpečnostní skříň, která zamezuje vniknutí do pracovního prostoru při chodu robota, a tím vzniku úrazu nebo poškození ramene robota. Do pracovního prostoru robota je možné vstoupit pouze přes kontrolní dveře, a to pouze pokud není robot v chodu programu. Tyto dveře mají spínací kontakt, a pokud dojde k otevření dveří během činnosti robota, tento vyšle signál pro okamžité zastavení ramene robota. Pro vkládání objektů do pracovního prostoru při chodu robota slouží dopravní linka v kombinaci s vstupními dveřmi. Dopravní linka a vstupní dveře jsou ovládány PLC Bosch CL150.

Dopravní linka není z hlediska cílů této práce důležitá, jelikož při měření matice senzorů (při chodu robota) nebudou do pracovního prostoru vkládány žádné nové předměty. Dopravní linka je nedílnou součástí robotizovaného pracoviště, a proto je zde alespoň stručně uvedeno, z čeho se dopravní linka skládá:

- řada pneumatických zarážek – sloužící k zastavení pohybu palety pásového dopravníku
- pneumatická zvedací jednotka – umožňující vracet palety z výstupní části pásu na vstupní část
- otočná vodící kladka
- čtyři asynchronní motory o výkonu dvakrát 0,37kW, 0,09 kW, a 0,18 kW

Další důležitou částí robotizovaného pracoviště je maják (viz Obr. 4.1), který informuje obsluhu, v jakém stavu se robotizované pracoviště nachází. Dokáže signalizovat tři stavy robotizovaného pracoviště:

- zhasnutý maják – informuje, že je automatický režim neaktivní
- červená barva – informuje, že došlo k nějaké poruše a není možné aktivovat automatický režim
- zelená barva – signalizuje, že robot pracuje v automatickém režimu

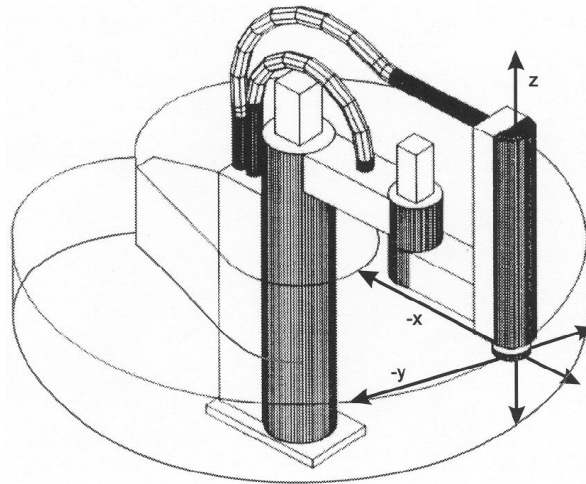
Bezpečnostní tlačítka „Emergency stop“ jsou součástí robotizovaného pracoviště, která slouží k okamžitému (nouzovému) zastavení ramene robota i dopravní linky. Po zamáčknutí kteréhokoli tlačítka „Emergency stop“ okamžitě dochází k přerušení signálu „READY“, což okamžitě zablokuje servomotory a rameno robota i dopravní linka se zastaví, tento stav také vyvolá rozsvícení červené barvy na majáku.

Softwarové vybavení robotizovaného pracoviště:

Jak dopravní linka, tak i robot jsou řízeny samostatnými PLC. Tyto programové automaty včetně softwaru jsou produkty firmy Bosch. PLC dopravní linky je programován ve vývojovém prostředí WinSPS. Řídicí systém robota je programován pomocí editoru programovacího jazyka BAPS. Jelikož je použitý systém řazen mezi pružné výrobní systémy, pro změnu činnosti postačuje pouze jednoduchá změna programu. Program je tvořen na externím PC, ze kterého je následně kabelem prostřednictvím sériového rozhraní RS 232 přenášen do EEPROM PLC. V době nahrávání programu z PC do PLC nesmí být systém v chodu. Programové prostředí pracuje na platformě Windows.

Rameno robota Turbo Scara SR60

Popisovaný robot má kinematickou strukturu SCARA. Pokud by robotizované pracoviště nebylo opatřeno bezpečnostní skříní, potom by pracovní prostor robota byl shodný jako u všech robotů s kinematikou SCARA viz Obr. 4.2. Vlivem instalace bezpečnostní skříně (a zadáním omezujících podmínek, aby rameno robota do této skříně nenarazilo) na tomto pracovišti přišel robot Turbo Scara SR60 pouze o svoji zadní část pracovního prostoru, což však žádným způsobem požadované měření v této práci neomezuje. Robot disponuje čtyřmi stupni volnosti, konkrétně třemi rotačními a jedním translačním pohybem.



Obr. 4.2 Pracovní prostor robota Turbo Scara SR60

Pohon pro pohyb ramene robota zajišťují servomotory o výkonech 0.15 a 0.95 kW. Robot obsahuje čtyři pohybové bloky (3 x rotační, 1 x translační), přičemž pohybový blok je tvořen harmonickou převodovkou spolu s elektromotorem a je opatřen elektromagnetickou brzdou a inkrementálním čidlem.

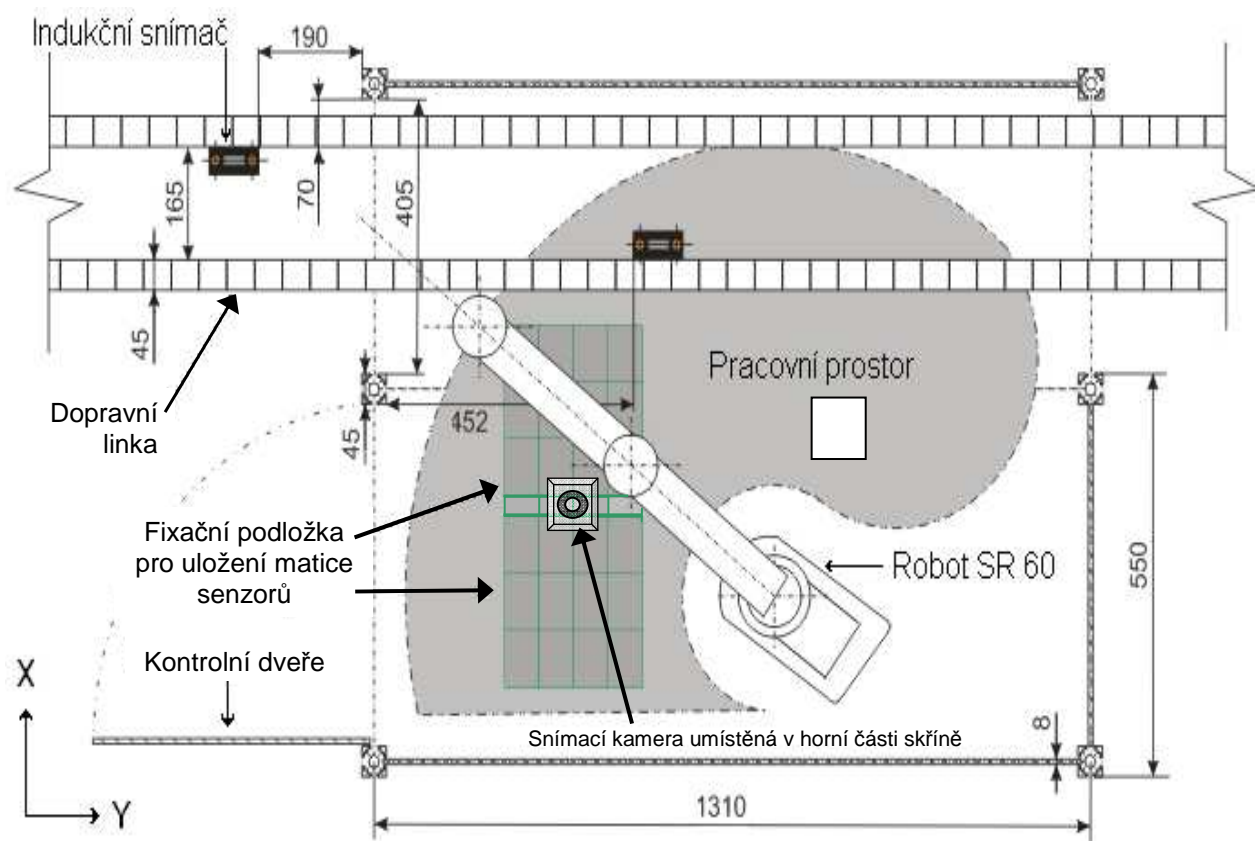
Důležitá technická data [80]:

- Maximální délka ramene je 600 mm
- Přesnost polohování $\pm 0,03$ mm
- Maximální zatížení 50 N
- Maximální zdvih v ose „Z“ 200 mm
- Maximální zrychlení $999999,99 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-2}$
- Minimální zrychlení $0,01 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-2}$

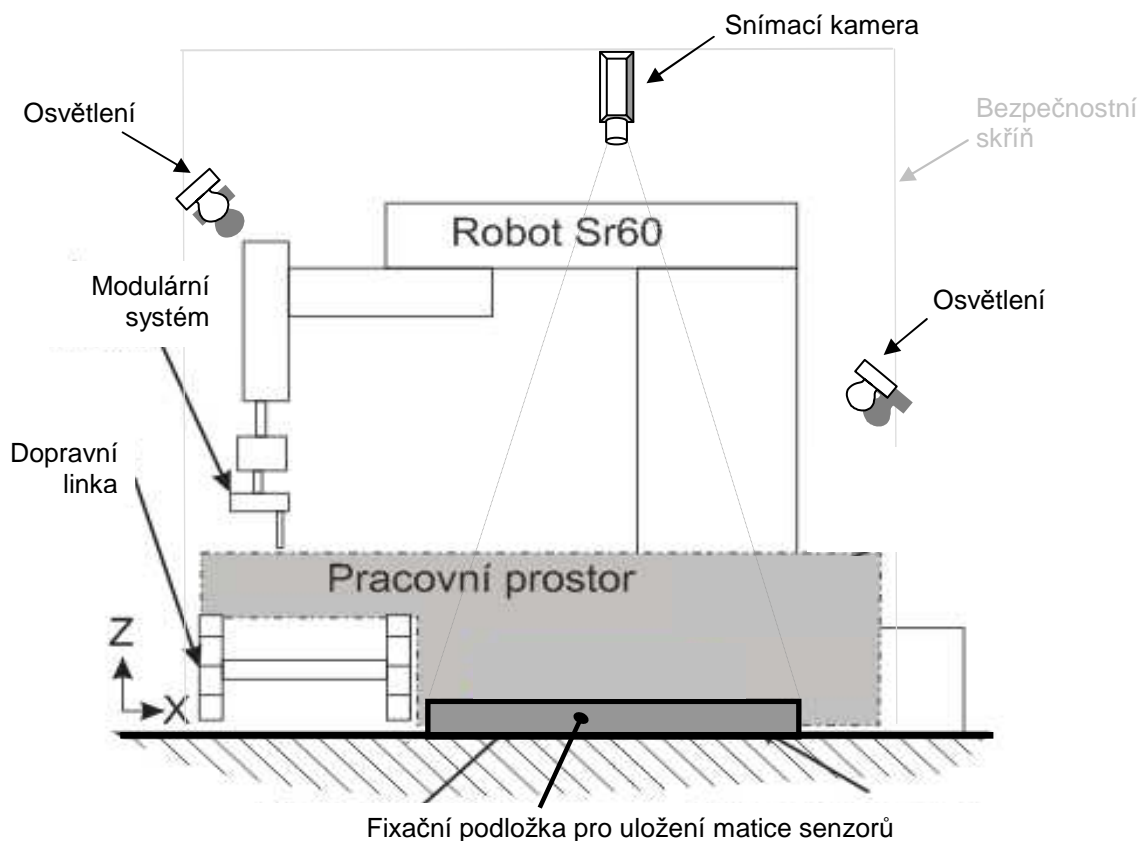
1.2. Prostorové uspořádání měřicího pracoviště v pracovním prostoru robota Turbo Scara SR60

Z hlediska prostorové náročnosti umístění snímací matice senzorů systému Plantograf bylo možné jen jedno řešení prostorového uspořádání. Prakticky lze říci, že vše vycházelo od zvolení největší souvislé plochy v jedné rovině, pro pevné a přesné uložení podložky fixující polohu snímací matice senzorů v pracovním prostoru robota. Až od tohoto se vyvíjelo

uspořádání dalších součástí, jelikož kromě modulárního systému, umístěného na hlavici robota, a kamery na stropě bezpečnostní skříň, byly všechny části mimo bezpečnostní skříň, proto nebyla důležitá jejich poloha v rámci měřicího pracoviště. Poloha těchto součástí byla limitována pouze délkou propojovacích kabelů, dostupností a bezpečností jejich uložení mimo bezpečnostní skříň robota. Prostorové uspořádání měřicího pracoviště, které nezobrazuje součásti umístěné mimo bezpečnostní skříň a je zaměřené na pracovní prostor robota, je znázorněno na *Obr. 4.3 a Obr. 4.4*.



Obr. 4.3 Půdorys prostorového uspořádání v pracovním prostoru robota Turbo Scara SR60



Obr. 4.4 Pohled z boku na prostorové uspořádání pracovního prostoru

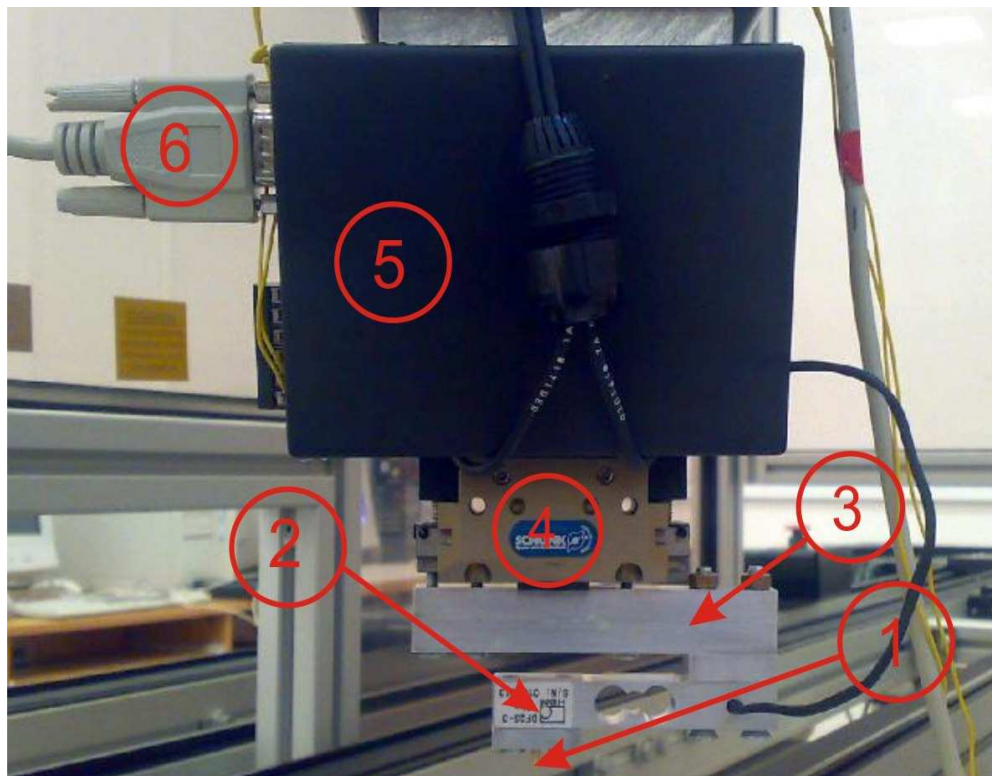
2. Speciální modulární systém pro měření taktilních snímačů

Pro měření jednotlivých měřicích bodů snímací matice je nezbytné zkonstruovat zařízení, které bude umožňovat měření velikosti tlaku, kterým je působeno na jednotlivé měřicí body snímací matice a zároveň bude možné měřit měnicí se odpor těchto bodů. Z tohoto měření lze následně zjistit závislost odporu měřicího bodu na velikosti tlaku, který na tento bod působí. Zkonstruované zařízení dostalo pracovní název „*Speciální modulární systém pro měření taktilních snímačů*“ (dále jen „modulární systém“), na toto zařízení byl autorovi práce uznán prototyp, funkční vzorek viz [76], [77].

Pozn.: v celé této práci „*měřicí bod*“ = *jeden senzor taktilního snímače, který má určitou plochu.*

Při návrhu modulárního systému se vycházelo z těchto základních požadavků:

- provedení modulárního systému musí umožňovat upevnění na hlavici robota Turbo Scara SR60
- modulární systém musí umožňovat zatěžování jednotlivých senzorů taktilní matice pomocí měřicího hrotu
- měřicí hrot modulárního systému musí být jednoduše vyměnitelný, z důvodu potřeby různých rozměrů a tvarů měřicího hrotu pro měření různých rozměrů bodů snímačů taktilní matice
- modulární systém musí umožňovat zadání konstant na základě kalibrace a použitým rozměru měřicího hrotu tak, aby systém zobrazoval a měřil přesně a v požadovaných jednotkách (N, kPa)
- modulární systém musí zobrazovat okamžitou hodnotu tlaku, kterým měřicí hrot právě působí na měřicí bod taktilní matice
- modulární systém musí dokázat zpracovat a uložit naměřená data

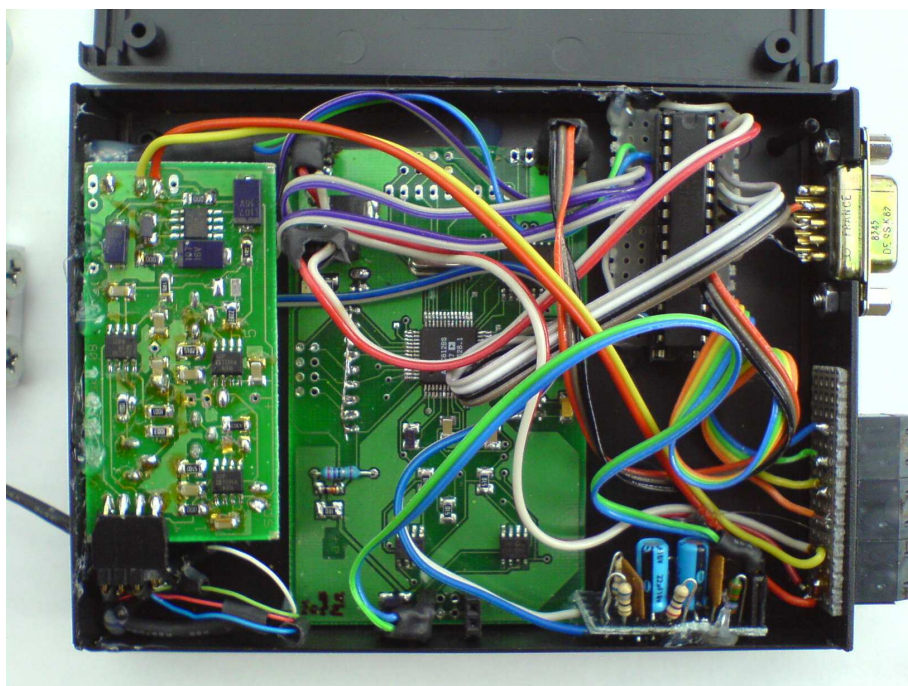


Obr. 4.5 Speciální modulární systém pro měření taktilních snímačů

(1 – měřicí hrot; 2 – tenzometrický člen; 3 – držák tenzometrického členu; 4 – hlavice robota;
5 – elektronické obvody; 6 – sériová linka (výstup do PC))

Na základě výše uvedených požadavků byl sestrojen speciální modulární systém pro měření taktilních snímačů (viz *Obr. 4.5*), který se skládá z:

- měřicího hrotu (1), který přichází do přímého kontaktu s měřicími body snímací matice
- tenzometrického členu (2), z něhož vychází signál, mění se podle velikosti tlaku, kterým měřicí hrot (1) působí na měřicí bod snímací matice
- držáku tenzometrického členu (3), který umožňuje ohyb tenzometrického členu (2) a zároveň i uchycení k hlavici robota
- hlavice robota (4), ke které se uchytí celý modulární systém
- obsluhujících elektrických obvodů (5), viz *Obr. 4.6*, které zpracovávají a zesilují elektrický signál z tenzometrického členu (mění se podle zatížení měřicího bodu) a posílají ho na výstupní sériový konektor a odtud je pomocí sériové linky (6) poslán do PC, kde se zpracovává a ukládá



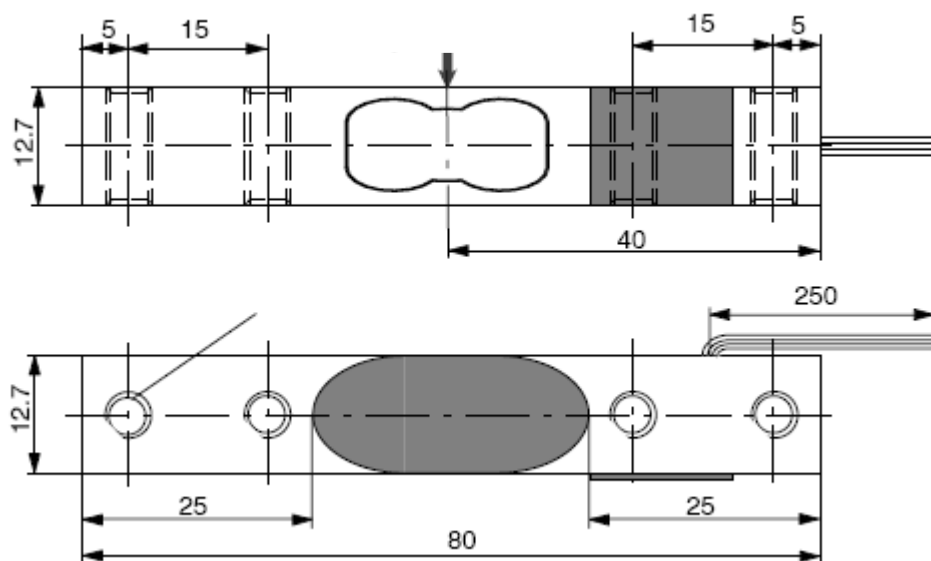
Obr. 4.6 Obsluhující elektronické obvody tenzometrického členu

2.1. Základní technické parametry modulárního systému

Elektronické obvody jsou napájeny laboratorním zdrojem $U = 12V$ s odběrem $I = 70mA$. Zatížení, které je možné vyvinout na měřicí bod, zaleží na použitém tenzometrickém členu. Zde je využit tenzometrický člen (viz tabulka č. 1 a Obr. 4.7), kterým je možné vyvinout zatížení od 0 N do 200 N, což je při rozměrech použitých měřicích hrotů ($\varnothing 3 - 6 \text{ mm}$) pro měření taktilních snímačů dostačující. Připojení modulárního systému k PC je realizováno sériovou linkou RS232. Touto sériovou linkou se přenášejí naměřené hodnoty zatížení do PC a pomocí softwaru je možné zobrazit tyto hodnoty v reálném čase a případně je uložit do vytvořeného textového souboru.

Rekapitulace technických parametrů modulárního systému:

Napájení.....	12V
Odběr.....	70mA
Tenzometrický člen.....	DF2S – 5 (viz Obr. 4.6 a Tabulka č. 1)
Připojení k PC.....	Verze Modul B přes UART (RS232)
Přesnost měření.....	$\pm 0,01 \text{ N}$
Rozsah zatížení.....	0 – 200N



Obr. 4.7 Rozměry tenzometrického snímače síly DF2S-5 použitého v modulárním systému

[82]

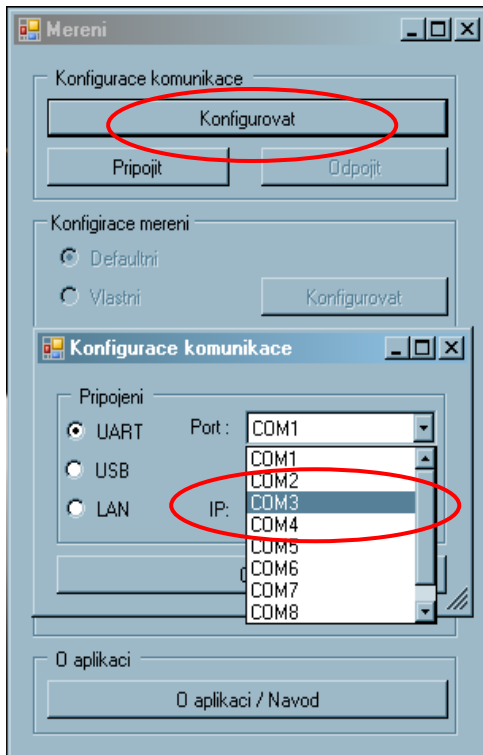
Parametry tenzometru použitého v modulárním systému

Typ		DF2S-5
Max.zatížení (E _{max})	kg	1-20
Max. rozměry	mm	150 x 150
Citlivost (C _n)	mV/VmV/V	2 ± 10 % (1 kg:1.8 ± 10 %)
Vyrovnnání nuly		0 ± 0.5
Vliv teploty Na vyrovnnání nuly (TK0)	% z C _n % of C / 10 K	± 0.5000
Vliv teploty Na citlivost (TKC)		± 0.1000
Chyba hystereze (dhy)	% z C _n % z C	± 0.0500
Nelinearita (dlin)		± 0.0500
Měření (dcr) nad 5 min.		± 0.0500
Vstupní odpor (RLC)	Ω	1000 ± 10
Výstupní odpor (R0)		1000 ± 10
Referenční budící napětí (Uref)	V	5
Nominální rozsah budícího napětí (BU)		5 ...15
Izolační odpor (Ris)	GΩ	> 2
Nominální rozsah teplot (BT)	°C [°F]C [°F]	-10... +40 [+14 ... +104]
Servisní rozsah teplot (Btu)		-20... +50 [-4 ... +122]
Skaldovací rozsah teplot (Btl)	% z E _{of} E _{max}	-30 ... +70 [-22 ... +158]
Mezní zatížení (EL)		150
Boční meze zatížení (Elq), statické	mm	300
Breaking zatížení (Ed)		150
Odchylka (snom), approx.		< 0.4
Váha (G), approx.	g	30
Třída ochrany dle EN60529 (IEC529)		IP54
Materiál: Měřicí člen		Hliník
Povrchový nátěr		Silikonová guma

Tabulka č. 1 Technická data tenzometru použitého v modulárním systému [82]

2.2. Software modulárního systému pro měření taktilních snímačů

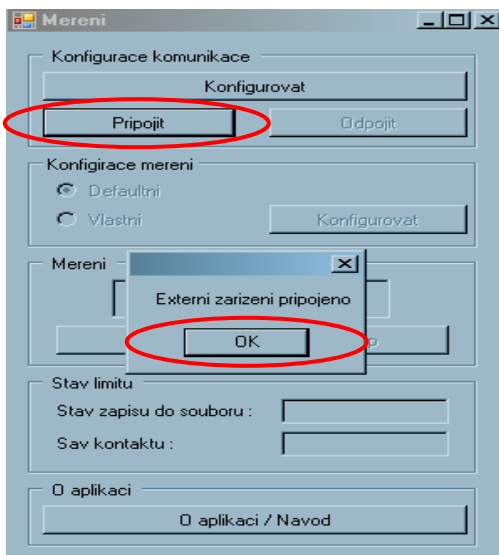
Software modulárního systému pro měření taktilních snímačů zajišťuje komunikaci mezi modulárním systémem a počítačem po sériové lince, kalibraci tenzometrického členu, vizualizaci naměřených dat (z tenzometrického členu) a jejich uložení na pevný disk. Všechny tyto funkce a postup, jak se softwarem pracovat, jsou dále podrobně popsány.



Obr. 4.8 Nastavení portu komunikace

Nastavení portu komunikace:

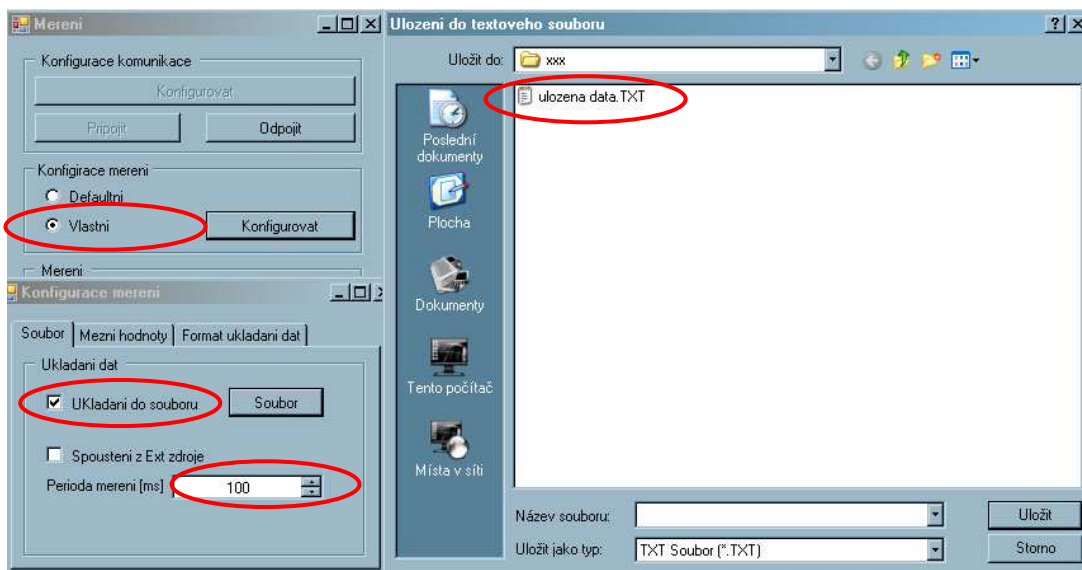
- Pro správné fungování softwaru je nutné nainstalování ovladačů ze souboru *dotnetfx.exe* (pokud už na PC nejsou nainstalovány).
- Po otevření souboru *modul.exe* se objeví okno programu (viz. Obr. 4.8).
- Nejprve je nutné zvolit způsob připojení externího zařízení k počítači (po kliknutí na tlačítko „**Konfigurovat**“), na výběr jsou tři možnosti: sériová linka, USB a LAN.
- Pro propojení modulárního systému a počítače se používá sériová linka UART a na výběr je i konkrétní port COM.



Obr. 4.9 Připojení modulárního systému

Připojení externího zařízení:

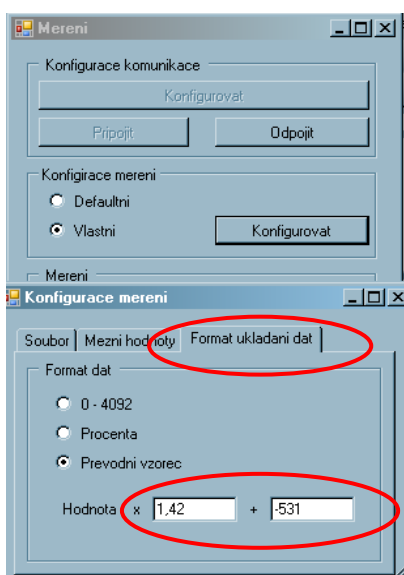
- Po výběru režimu připojení je možné modulární systém pomocí sériové linky připojit.
- Pokud je zařízení správně připojeno zobrazí se okno „**Externí zařízení připojeno**“. V tomto případě je vše v pořádku a je možné přistoupit k dalšímu bodu nastavení (viz Obr. 4.9).
- Pokud zařízení není správně připojeno, zobrazí se okno „**Chyba komunikace**“ a je nutné chybu odstranit.



Obr. 4.10 Nastavení souboru pro ukládání naměřených dat

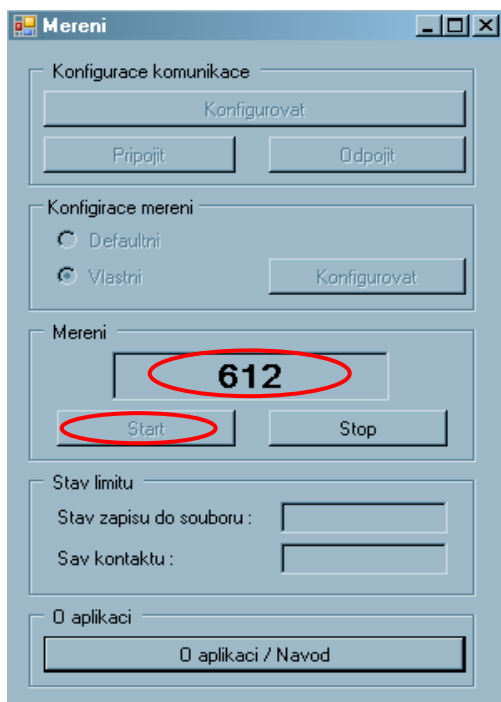
- Dalším krokem je nastavení textového souboru, do kterého bude možné ukládat naměřená data (pokud je to vyžadováno).
- V části „**Konfigurace měření**“ je potřebné zvolit možnost „**Vlastní**“ a „**Konfigurovat**“ a záložku „**Soubor**“, zde označíme možnost „**Ukládání do souboru**“ a klikneme na tlačítko „**Soubor**“, poté se vybere textový soubor (s příponou *.txt*), do kterého se budou ukládat naměřená data (tento soubor musí být na disku nejprve vytvořen).
- V této záložce je možné nastavit i periodu měření v milisekundách.

Kalibrace snímače:



- Aby software zobrazoval a ukládal naměřená data přesně v jednotkách, které jsou požadovány, musí se modulární systém kalibrovat. Kalibrace probíhá tak, že nezkalibrovaný tenzometr upevněný v hlavici robota je zatěžován a odlehčován kalibračními závažími od 1 do 1000 gramů, tím se vytvoří síla 0,01 – 10 N. Výstupem z této kalibrace je převodní vzorec, který je zadán do softwaru (viz Obr. 4.11) v části „**Konfigurace měření**“ v záložce „**Formát ukládání dat**“.

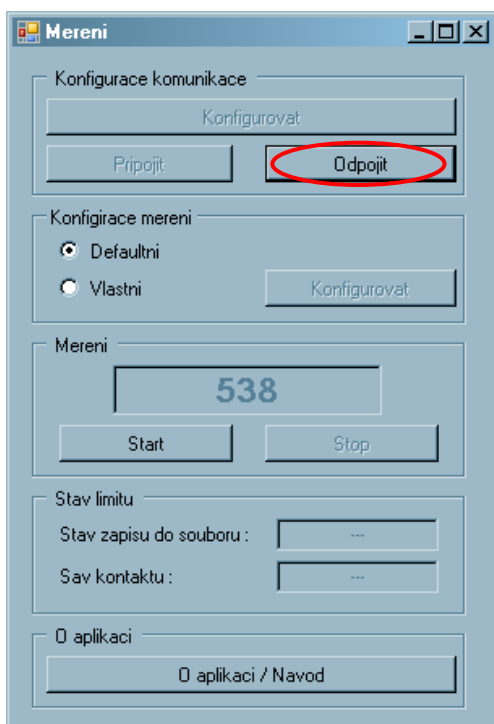
Obr. 4.11 Kalibrace snímače (vlození převodního vzorce)



Obr. 4.12 Vlastní měření

Vlastní měření:

- Po nastavení všeho potřebného je možné přistoupit k vlastnímu měření, viz *Obr. 4.12*.
- Po stisknutí tlačítka „**Start**“ probíhá měření.
- Aktuální hodnota (v gramech) se zobrazuje nad tlačítkem „**Start**“
- Během celého měření se (s nastavenou periodou měření) ukládají data do předem vybraného souboru na disku počítače.
- Pro ukončení měření je nutné stisknout na tlačítko „**Stop**“.



Obr. 4.13 Vypnutí programu

Vypnutí programu:

- Před vypnutím programu je nutné kliknout tlačítko „**Odpojit**“ a až po té program vypnout. V opačném případě zůstanou jednotlivé piny sériové linky otevřeny a opětovné spuštění programu bez restartu počítače nebude možné.

3. Zjištění přesné polohy jednotlivých měřicích bodů v taktilní matici

Aby měření závislosti odporu na velikosti působícího tlaku na měřicí bod probíhalo správně, je nutné zajistit, aby měřicí hrot modulárního systému působil na celou plochu právě měřeného bodu. Toto lze zajistit dvěma způsoby:

- hrot má podstatně větší rozměr než měřený bod v taktilní matici, a proto není nutné přesné nastavení polohy měřicího hrotu nad měřicím bodem – toto je možné pouze v případě, pokud je malá hustota měřicích bodů a měřicí hrot i při větších rozměrech nepůsobí na okolní body, anebo pokud úkolem měření není zjištění ovlivnění okolních bodů, a tudíž je ovlivnění těchto bodů nepodstatné
- hrot má podobné nebo dokonce stejné rozměry jako měřený bod v taktilní matici, a proto musí být zajištěna relativně přesná poloha měřicího hrotu nad měřicím bodem – toto je důležité pro měření taktilní matice, kde mají měřicí body větší hustotu a měří se ovlivnění okolních bodů při zatížení pouze jednoho bodu

Realizace měření podle prvního způsobu, kdy má hrot podstatně větší rozměr než měřený bod, není náročná. Zde naprosto dostačuje navedení robota podle subjektivního uvážení obsluhy. Problém nastává u druhého způsobu měření, kdy hrot má podobné nebo dokonce stejné rozměry jako měřený bod. V tomto případě je nutné zajistit relativně přesnou polohu měřicího hrotu a bodu, který je měřen, což prakticky znamená zjištění souřadnic středů měřicích bodů taktilní matice, jejich přenesení do souřadnicového systému robota a poté navedení robota na tyto souřadnice.

3.1 Zjištění souřadnic středů měřicích bodů v taktilní matici

Zjištění souřadnic středů měřicích bodů v taktilní matici je možné na základě obrazové analýzy. Za předpokladu, že na vrchní části snímací matice je zobrazena přesná poloha měřených bodů vyobrazena přímo při výrobě taktilní matice. Snímací kamera (podrobněji popsána v kapitole IV/3.1.1.) umístěná v pracovním prostoru robota snímá taktilní matici a obraz posílá koaxiálním kabelem na vstup Image grabberu DT 3155 (podrobněji popsán v kapitole IV/3.1.2.). Image grabber DT 3155 obraz převede do digitální podoby a odtud se

načte do proměnné v programu MATLAB, kde je zpracován a vyhodnocen. Výstupem této analýzy jsou souřadnice středů jednotlivých měřicích bodů v taktilní matici.

3.1.1. Snímací kamera

Ke snímání taktilní matice byla použita digitální kamera s vysokým rozlišením typu KC-381CG od firmy KAMPRO [81].

Tato kamera obsahuje:

- obrazový prvek typu CCD Sony 1/3"
- rozlišení 600 TV řádek
- počet obrazových bodů 795(H) x 596 (V)
- kompenzace protisvětla umožňující umístění kamery proti přejasněnému pozadí, citlivost na osvětlení od 0,02 Luxu
- automatická elektronická závěrka s možností manuální předvolby času
- volitelná synchronizace videosignálu – interní nebo externí (generátorem synchronizace)

Nastavení kamery:

Kamera je nastavena v režimu expoziční automatiky – režim AES. Expoziční automatika je zajišťována elektronickou závěrkou a automatickým řízením zisku (AGC). Standardně je AGC nastavováno na nezbytnou minimální úroveň a expozice je řízena převážně elektronickou závěrkou. V případě, že ani nejdelší expoziční čas (1/50 s) nezajistí dostatečnou expozici, je zesilován zisk (AGC). Naopak, pokud je scéna přeexponována (přejasněna), nejprve se sníží zisk (AGC). V případě, že ani snížení zisku na minimální hodnotu nedostačuje, je zkracován expoziční čas.

Osvětlení snímané plochy:

Jelikož je snímaná plocha matice senzorů plochá a nehrozí tedy ovlivnění snímaného obrazu nežádoucími stíny, je řešení osvětlení snímané plochy jednoduché a je řešeno pomocí dvou zdrojů umělého světla (dvě zářivky). Tyto zdroje světla zajistí, aby snímaná plocha měla řádově vyšší osvětlení, než je osvětlení v okolním prostoru laboratoře. To zajistí, že vnější vlivy kolísání osvětlení v laboratoři nebudou mít na kvalitu snímaného obrázku vliv.

3.1.2. Image Grabber DT 3155

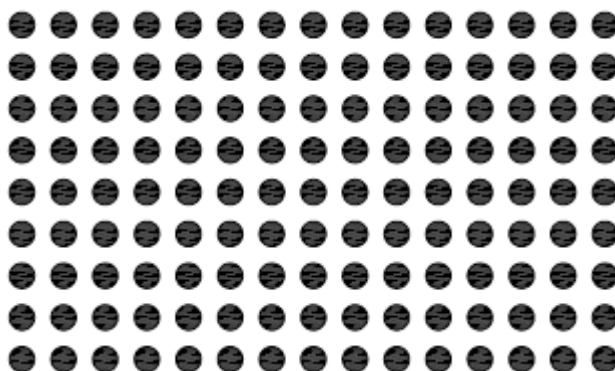
Pro převod videosignálu ze snímací kamery do digitální podoby, která bude vhodná pro zpracování počítačem, se dá použít karta pro digitalizaci videosignálu (tzv. image grabber). V tomto případě byl použit image grabber DT 3155 firmy Data Translation, jelikož je součástí vybavení katedry elektrotechniky a automatizace a svými parametry zcela vyhovuje pro použití v této aplikaci.

Vlastnosti této karty:

- jeden vstup videosignálu
- frekvence vzorkování 15 MHz v normě PAL, 12,5 MHz v normě NTSC
- maximální rozlišení převedeného digitálního snímku 768 x 576 pixelů v normě PAL, 640 x 480 pixelů v normě NTSC
- možnost spouštění převodu externím signálem nebo softwarově
- možnost ukládání digitalizovaných dat do operační paměti počítače nebo přímo do paměti grafické karty pro zobrazování v reálném čase
- provedení image grabberu pro sběrnici PCI osobního počítače

3.1.3. Metody pro zjištění středů objektů

Aby bylo možné určit středy jednotlivých měřicích bodů, je nutné zjistit souřadnice jednotlivých pixelů, které jsou uprostřed těchto objektů. Jak je vidět na *Obr. 4.14*, je poloha jednotlivých měřicích bodů znázorněna černou barvou. Dalším úkolem je tedy určit pixely, které jsou uprostřed těchto černých objektů. Tyto pixely lze zjistit pomocí vzdálenostní transformace.



Obr. 4.14 Snímek malé vrchní části taktilní matice s vyznačenou polohou měřicích bodů

Vzdálenostní transformace je matematická operace pracující s dvojrozměrnou maticí a její hodnoty nabývají hodnot 0 a 1. Tato transformace vyhodnocuje pixely následovně:

- pixely mající hodnotou 0 jako „pozadí“
- pixely mající hodnotou 1 jako „objekty“ (v tomto případě měřicí body)

Pixely, které jsou součástí „objektu“, sousedící s pozadím jsou považovány za hranu a hodnota jednotlivých pixelů je transponována opět na hodnotu 1. Pixel sousedící s dalšími pixely, které mají hodnotu 1 a reprezentují „objekt“, je považován za vnitřní objekt a jeho hodnota je transponována na hodnotu větší než 1. Velikost hodnoty transponovaného pixelu (reprezentující vnitřní „objekt“) je určena na základě toho, jaký druh vzdálenostní transformace je použit, a jak je tento pixel vzdálen od hrany objektu.

Z výše uvedeného vyplývá, že pokud je cílem zjištění geometrického středu plného „objektu“ (v tomto případě měřicího bodu), je zapotřebí, po transponování všech pixelů, zjištění pixelu v jednotlivých „objektech“ (měřicích bodech), který má maximální hodnotu.

Matematická definice vzdálenostní transformace:

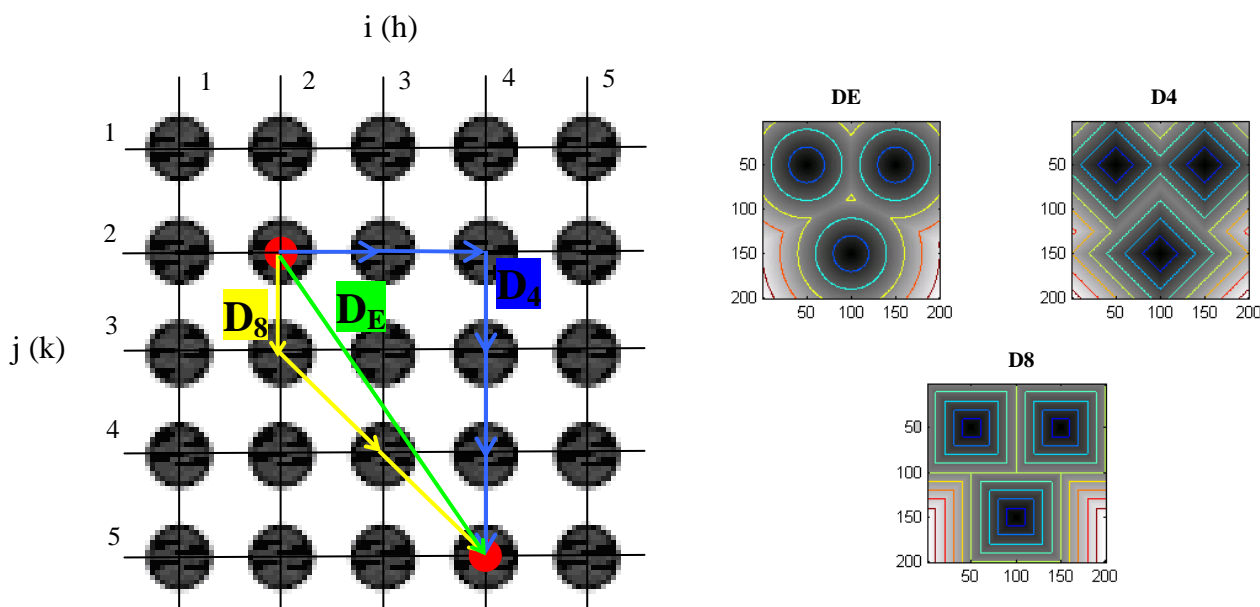
- je dána bodová množina X
- vzdálenostní transformace pro každý bod $p \in X$ přiřazuje číslo, které odpovídá vzdálenosti bodu p od pozadí X^c
- existuje morfologický postup výpočtu vzdáleností transformace (funkce) $dist_X(p)$, který přiřadí každému pixelu p z množiny X velikost první eroze množiny, která už neobsahuje pixel p , tj. $\forall p \in X$,

$$dist_X(p) = \min\{n \in \mathbb{N}, p \text{ not in } (X \ominus nB)\}$$
- $dist_X(p)$ je nejkratší vzdálenost mezi pixelem p a doplňkem množiny X^c

Vzdálenostních transformací, které se rozlišují podle principu výpočtu nejkratší cesty daného pixelu k „pozadí“ (doplňku množiny X^c), je několik druhů. Nejpoužívanější transformace jsou uvedeny níže a jsou na zpracovávaném obrázku provedeny pomocí programu MATLAB.

Euklidovská vzdálenostní transformace

Euklidovská vzdálenostní transformace má za výstup tzv. Euklidovskou vzdálenost, označovanou jako D_E . Je to geometricky nejkratší možná vzdálenost od daného pixelu k pixelu hrany (od hranice mezi „objektem“ a „pozadím“). Euklidovská vzdálenostní transformace určuje vždy nejkratší možnou vzdálenost dvou pixelů. Výpočet Euklidovské vzdálenosti je dle vzorce (12), kde (i,j) jsou souřadnice vyhodnocovaného pixelu a (h,k) jsou souřadnice pixelu nejbližší hrany. Grafické znázornění principu výpočtu Euklidovské vzdálenosti (D_E) je zobrazeno na Obr. 4.14 zelenou barvou. Na tomto obrázku je znázorněna matice o rozměru 5 x 5 pixelu, kde černé body znázorňují jednotlivé pixely. Na pozici $i,j = (2,2)$ je výchozí pixel, ze kterého je měřena vzdálenost k pixelu, který reprezentuje hranici mezi „objektem“ a „pozadím“ na pozici $h,k = (4,5)$.



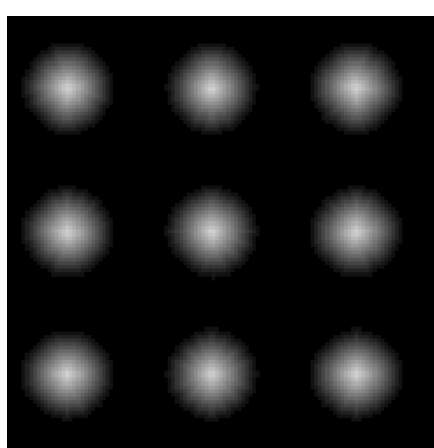
Obr. 4.15 Tři různé výpočty vzdálenostních transformací

$$D_E[(i, j), (h, k)] = \sqrt{(i-h)^2 + (j-k)^2} = \sqrt{(2-4)^2 + (2-5)^2} = \underline{3.606} \quad (12)$$

Hlavní nevýhodou této transformace je její matematická náročnost díky druhé odmocnině a také výstupní hodnota Euklidovské vzdálenostní transformace má charakter reálného čísla. V programu MATLAB je Euklidovská vzdálenostní transformace realizována pomocí příkazu:

D1=bwdist (bw,'euclidean');

Výstupem této transformace je matice, kde každá pozice reprezentuje právě jeden pixel ve snímaném obrázku. Na *Obr. 4.16 a)* je pro ilustraci grafické znázornění výsledku vzdálenostní transformace části snímací matice (3 x 3 snímací body). Černou barvou je znázorněno „pozadí“ a světlejší barvou pixely, které náleží „objektu“. Čím je barva světlejší, tím má daný pixel vyšší hodnotu a je více vzdálen od hrany mezi „objektem“ a „pozadím“, tzn., že je blíže středu objektu. Z toho vyplývá, že každý pixel s maximální hodnotou v daném „objektu“ reprezentuje jeho střed, který je hledán. Na *Obr. 4.16 b)* je číselné znázornění jednoho měřicího bodu po euklidovské transformaci. Střed, který je hledán, zde reprezentuje tučně ohraničený bod s hodnotou „4,2426“. Celý zdrojový kód programu, který zajistí vypočtení vzdálenostní transformace včetně označení a výpisu souřadnic jednotlivých pixelů, které reprezentují středy jednotlivých měřicích bodů, je uveden v příloze L.



a)

0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	1	1	1	1	0	0	0
0	0	0	1	1.4142	2	2.1.4142	1	0	0	0
0	0	1	1.4142	2.2361	2.8284	2.8284	2.2361	1.4142	1	0
0	1	1.4142	2.2361	2.8284	3.6056	3.6056	2.8284	2	1	0
0	1	2	2.8284	3.6056	4.2426	4.1231	3.1623	2.2361	1.4142	1
0	1	1.4142	2.2361	3.1623	4.1231	4.1231	3.1623	2.2361	1.4142	1
0	0	1	2	2.8284	3.1623	3.1623	2.8284	2	1	0
0	0	1	1.4142	2	2.2361	2.2361	2	1.4142	1	0
0	0	0	1	1	1.4142	1.4142	1	1	0	0
0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

b)

Obr. 4.16 Grafické znázornění části snímací matice po Euklidovské vzdálenostní transformaci a číselné vyjádření reprezentace jednoho bodu

Šachovnicová vzdálenostní transformace

Výstup šachovnicové vzdálenostní transformace reprezentuje, tzv. šachovnicová vzdálenost, která se označuje jako D_8 . Při této transformaci v pravoúhlé vzorkovací mřížce je uvažováno ke každému vyhodnocovanému pixelu osm sousedů. Hodnota Šachovnicové vzdálenosti z počátečního do cílového pixelu odpovídá nejnižšímu počtu tahů krále po šachovnici z bodu jedna do bodu dva. Matematicky je Šachovnicová vzdálenost vyjádřena vzorcem (13), kde (i,j) jsou souřadnice vyhodnocovaného pixelu a (h,k) jsou souřadnice

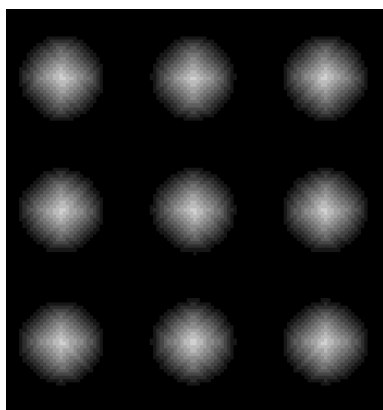
pixelu nejbližší hrany. Grafické znázornění principu výpočtu Šachovnicové vzdálenosti (D_8) je zobrazeno na Obr. 4.14 žlutou barvou.

$$D_8 = [(i, j), (h, k)] = \max\{|i - h|, |j - k|\} = \max\{|2 - 4|, |2 - 5|\} = 3 \quad (13)$$

Na Obr. 4.17 a) je grafické znázornění výsledku vzdálenostní transformace části snímací matice (3 x 3 snímací body). Na Obr. 4.17 b) je číselné znázornění jednoho měřicího bodu po D_8 vzdálenostní transformaci. Z tohoto vyplývá, že střed reprezentuje pixel s hodnotou „3“, která je ovšem stejná hned pro několik pixelů v jednom měřicím bodě, což zapříčiní vnímání těchto pixelů jako potencionálních středů měřicích bodů. Celý zdrojový kód programu, který zajistí vypočtení vzdálenostní transformace včetně označení a výpisu souřadnic jednotlivých pixelů reprezentujících středy jednotlivých měřicích bodů, je uveden v příloze M.

V programu MATLAB je Šachovnicová vzdálenostní transformace realizována pomocí příkazu:

D8=bwdist (bw,'chessboard');



a)

0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	1	1	1	1	1	0	0	0
0	0	1	1	2	2	2	1	1	0	0
0	1	1	2	2	3	2	2	1	1	0
0	1	2	2	3	3	3	2	2	1	0
0	1	2	2	3	3	3	2	2	1	0
0	1	1	2	2	3	2	2	1	1	0
0	0	1	1	2	2	2	1	1	0	0
0	0	0	1	1	2	1	1	0	0	0
0	0	0	0	1	1	1	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

b)

Obr. 4.17 Grafické znázornění části snímací matice po D_8 vzdálenostní transformaci a číselné vyjádření reprezentace jednoho bodu

Metoda Cityblock vzdálenostní transformace

Výstup vzdálenostní transformace Cityblock reprezentuje, tzv. Cityblock vzdálenost, která se označuje D_4 . Jde o podobný princip jako u vzdálenostní transformace D_8 , rozdíl je v principu vnímání sousedních pixelů. U vzdálenostní transformace D_8 má pixel v pravoúhlé

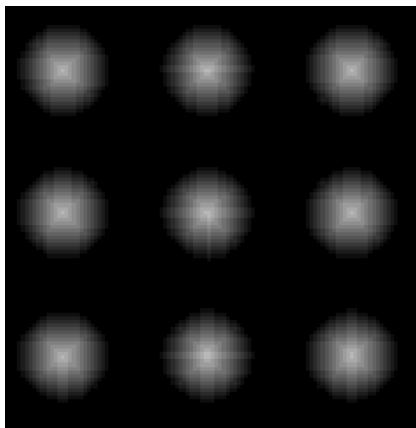
vzorkovací mřížce 8 susedů, Cityblock vzdálenostní transformace D_4 má pro daný pixel pouze 4 sousedy, tzn., že povolený pohyb od jednoho pixelu k druhému je pouze horizontálním nebo vertikálním směrem. Cityblock se tato transformace se nazývá proto, že pohyb po jednotlivých pixelech obrazu odpovídá pohybu mezi dvěma místy ve městě s pravoúhlými ulicemi. Matematicky je Cityblock vzdálenost vyjádřena vzorcem (14), kde (i,j) jsou souřadnice vyhodnocovaného pixelu a (h,k) jsou souřadnice pixelu nejbližší hrany. Grafické znázornění principu výpočtu Cityblock vzdálenosti (D_4) je zobrazeno na Obr. 4.14 modrou barvou.

$$D_4[(i, j), (h, k)] = |i - h| + |j - k| = |2 - 4| + |2 - 5| = 5 \quad (14)$$

Na Obr. 4.18 a) je grafické znázornění výsledku vzdálenostní transformace části snímací matice (3 x 3 snímací body). Na Obr. 4.18 b) je číselné znázornění jednoho měřicího bodu po D_4 vzdálenostní transformaci, tedy, že střed reprezentuje pixel s hodnotou „5“, která je ovšem stejná hned pro dva pixely v jednom měřicím bodě, což zapříčiní vnímání těchto pixelů jako potencionálních středů měřicích bodů. Celý zdrojový kód programu, jenž zajistí vypočtení vzdálenostní transformace včetně označení a výpisu souřadnic jednotlivých pixelů, které reprezentují středy jednotlivých měřicích bodů, je uveden v příloze N.

V programu MATLAB je Cityblock vzdálenostní transformace realizována pomocí příkazu:

D4=bwdist (bw, 'cityblock');



a)

0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	1	1	1	1	0	0	0	0
0	0	0	1	2	2	2	2	1	0	0	0
0	0	1	2	3	3	3	3	2	1	0	0
0	1	2	3	4	4	4	4	3	2	1	0
0	1	2	3	4	5	5	4	3	2	1	0
0	1	2	3	4	4	4	4	3	2	1	0
0	0	1	2	3	3	3	3	2	1	0	0
0	0	0	1	2	2	2	2	1	0	0	0
0	0	0	0	1	1	1	1	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

b)

Obr. 4.18 Grafické znázornění části snímací matice po D_4 vzdálenostní transformaci a číselné vyjádření reprezentace jednoho bodu

3.1.4. Vybraná metoda pro zjištění středů objektů – popis skriptu

Z metod uvedených v předchozí kapitole byla vybrána Euklidovská vzdálenostní transformace – D_E . Tato metoda byla vybrána na základě testu, při kterém byla hodnocena přesnost polohy zjištěných středů objektů a skutečnost, zda v jednom objektu nebyl nalezen jeho střed vícekrát. Nejlepších výsledků dosáhla Euklidovská vzdálenostní transformace, i když je její výpočet oproti ostatním metodám výpočetně a tedy i časově náročnější, to ale pro tuto aplikaci není rozhodující.

Popis důležitých částí skriptu pro zjištění středů jednotlivých objektů pomocí programu MATLAB (celý skript viz Příloha L):

- Po Euklidovské vzdálenostní transformaci upraveného snímku vrchní části snímače je vytvořena matice, jejíž část je znázorněna na *Obr. 4.16 b*) a je uložena do proměnné „D1“.

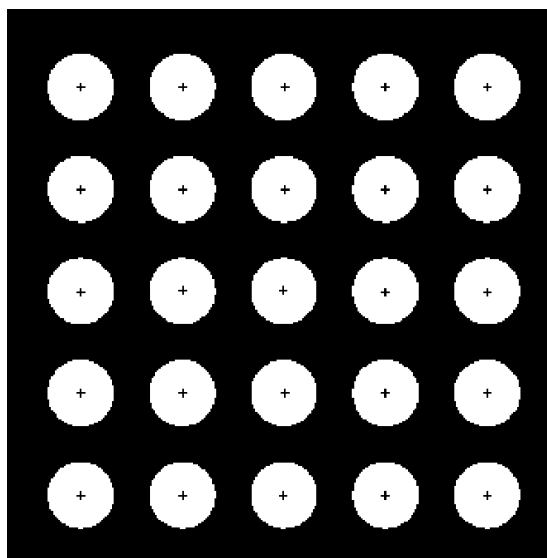
$$D1 = bwdist (maticeInv, 'euclidean');$$

- Všechny vyhodnocované objekty nemají přesnou velikost, tzn., že maximální hodnota D_E pro všechny vyhodnocované objekty, nebude úplně stejná. Z tohoto důvodu nestačí pro určení polohy středů všech objektů zjistit pouze maximální hodnotu D_E v celé matici, protože by nebyly řešeny středy těch objektů, které by měly být jen nepatrně menší průměr než největší objekt v celém obrázku. Z tohoto důvodu je nutné po zjištění maximální hodnoty D_E v celé matici zahrnout do výpočtu i pixely, které mají o něco nižší hodnotu D_E . V tomto případě jsou do řešení zahrnuty všechny pixely s hodnotou 90% maximální hodnoty D_E a vyšší.

$$UUU = \max(\max(D1));$$

$$prS = 0.90;$$

- Pro všechny dále vyhodnocované pixely, tzn. pixely, které mají hodnotu D_E minimálně 90% z hodnoty maximální je určeno jejich těžiště, a tím jejich geometrický střed. Celý postup včetně označení středů jednotlivých vyhodnocovaných je popsán v příloze L. Na *Obr. 4.19* je znázorněna část snímací matice (5 x 5 měřicích bodů) s vyznačenými středy jednotlivých objektů.



Obr. 4.19 Grafické znázornění části snímací matice po označení jednotlivých středů

- Nejdůležitější výstup z celé analýzy je však matice se souřadnicemi středů (na Obr. 4.19 jsou reprezentovány křížkem) jednotlivých měřicích bodů viz Tabulka č. 2. Pro přehlednost jsou zde uvedeny souřadnice středů pouze 25 měřicích bodů odpovídajících vyznačeným středům na Obr. 4.19.

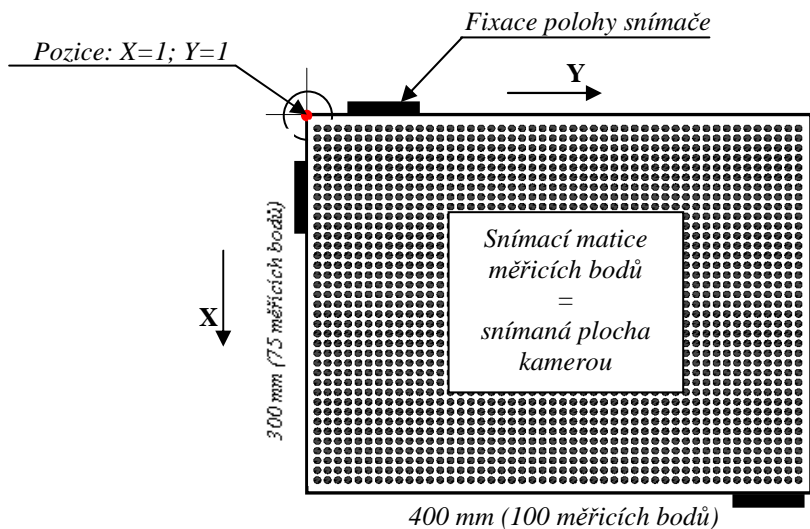
Souřadnice X	Souřadnice Y	Souřadnice X	Souřadnice Y
49	46	65	70
49	54	65	78
49	62	73	46
49	70	73	54
49	78	73	62
57	46	73	70
57	54	73	78
57	62	81	46
57	70	81	54
57	78	81	62
65	46	81	70
65	54	81	78
65	62		

Tabulka č. 2 Výpis XY souřadnic středů jednotlivých objektů

3.1.5. Převedení středů měřicích bodů do souřadnicového systému robota Turbo Scara SR60

Aby se souřadnice středů, které byly získány analýzou v předchozí kapitole, daly použít k přesnému nastavení hrotu robota nad měřicí bod snímací matice, musí se tyto souřadnice převést do souřadnicového systému robota. To je možné pouze jestliže je přesně zajištěna poloha snímače v pracovním prostoru robota a také poloha snímací kamery. To bylo provedeno pomocí pevných držáků, které fixovaly jak snímač v pracovním prostoru robota, tak i snímací kameru na bezpečnostní skříni robota.

Levý horní roh snímaného obrazu kamerou, tzn., pixel se souřadnicemi $X=1$ a $Y=1$ je totožný s levým horním rohem snímače. Tento bod je brán jako výchozí bod pro analýzu popsanou v předchozí kapitole, takže souřadnice středů vypsané v *Tabulce č. 2* odpovídají počtu pixelů právě od levého horního rohu snímače (viz *Obr. 4.20*).



Obr. 4.20 Fixace snímací matice v pracovním prostoru robota

Přepočítání velikosti jednoho pixelu na vzdálenost v souřadnicovém systému robota:

- Kamera snímá prostor o velikosti: 400 mm x 300 mm
- Rozlišení použité kamery (viz kapitola IV/3.1.1.): 795(H) x 596 (V)

Velikost v ose X: 300 mm = 596 pixelů \longrightarrow 1 mm = 1,986 pixelů

1 pixel = 0,503 mm

Velikost v ose Y: 400 mm = 795 pixelů \longrightarrow 1 mm = 1,986 pixelů

$$1 \text{ pixel} = 0,503 \text{ mm}$$

Z výše uvedeného vyplývá, že jeden pixel ve snímaném obrazu, jak v ose X, tak v ose Y, odpovídá vzdálenosti 0,503 mm v souřadnicovém systému robota Turbo Scara SR60.

Levý horní roh snímače (pozice $X = 1$, $Y = 1$) viz Obr. 4.19 je reprezentován v souřadnicovém systému robota Turbo Scara SR60 (vztaženo k referenčnímu bodu robota) souřadnicemi:

$$x_0 = 473,000 \text{ mm}$$

$$y_0 = -310,470 \text{ mm}$$

$$z_0 = 81,29 \text{ mm}$$

Podle výše uvedených skutečností je možné přepočíst pozice středů ve snímaném obrazu do souřadnicového systému robota Turbo Scara SR60.

Příklad přepočtu pozice středu do souřadnicového systému robota Turbo Scara SR60:

$$x = x_0 + X \cdot 0,503 = 473 + 49 \cdot 0,503 = \underline{497,647 \text{ mm}}$$

$$y = y_0 + Y \cdot 0,503 = -310,47 + 46 \cdot 0,503 = \underline{-287,332 \text{ mm}}$$

$$z = z_0 = \underline{81,29 \text{ mm}}$$

Souřadnice x [mm]	Souřadnice y [mm]	Souřadnice z [mm]	Souřadnice x [mm]	Souřadnice y [mm]	Souřadnice z [mm]
497,647	-287,332	81,290	505,695	-275,260	81,290
497,647	-283,308	81,290	505,695	-271,236	81,290
497,647	-279,284	81,290	509,719	-287,332	81,290
497,647	-275,260	81,290	509,719	-283,308	81,290
497,647	-271,236	81,290	509,719	-279,284	81,290
501,671	-287,332	81,290	509,719	-275,260	81,290
501,671	-283,308	81,290	509,719	-271,236	81,290
501,671	-279,284	81,290	513,743	-287,332	81,290
501,671	-275,260	81,290	513,743	-283,308	81,290
501,671	-271,236	81,290	513,743	-279,284	81,290
505,695	-287,332	81,290	513,743	-275,260	81,290
505,695	-283,308	81,290	513,743	-271,236	81,290
505,695	-279,284	81,290			

Tabulka č. 3 Výpis xyz souřadnic středů jednotlivých objektů převedených do souřadnicového systému robota Turbo Scara SR60

Vzhledem k přesnosti obrazové analýzy pro určení středů měřicích bodů je nutné použít měřicí hrot s průměrem minimálně o 1 mm větším, než je průměr měřicího bodu, aby bylo zajištěno, že hrot působí na celou plochu měřicího bodu.

Tato přesnost je pro dané měření dostačující, avšak vyšší přesnost určení polohy středů měřicích bodů lze zajistit dvěma způsoby:

- výměnou snímací kamery za kameru s vyšším rozlišením
- přiblížením kamery ke snímané ploše a snímáním menší části matice senzorů

4. Statistické vyhodnocení naměřených hodnot pomocí modulárního systému na měření taktilních snímačů

Je důležité říci, že v praxi neexistují žádná absolutně přesná měření, žádný přístroj ani žádná měřicí metoda. Různé typy negativních vlivů, vyskytujících se v reálném procesu měření, zapříčiní odchylku mezi naměřenou a skutečnou hodnotou sledované veličiny. Z tohoto důvodu se výsledek měření vždy pohybuje v jistém „poli tolerance“ kolem skutečné hodnoty, ale prakticky nikdy nenastane ideální ztotožnění obou hodnot. Výsledný rozdíl mezi oběma hodnotami je tvořen kombinací dílčích faktorů. V minulosti se při vyhodnocování souborů naměřených hodnot pracovalo s chybami. V současné době se vyhodnocování souborů naměřených hodnot provádí pomocí vyjádření nejistot měření.

4.1. Základní charakteristika nejistot měření

Nejistoty měření se stanovují při vyhodnocování různých měření, a to jak ve výzkumu, tak i v technické praxi. Stanovení nejistot měření má smysl především při experimentálním ověřování fyzikálních zákonů, definičních měřeních, reprodukci jednotek fyzikálních a technických veličin, kalibraci sekundárních etalonů a pracovních (provozních) měřidel i ostatních přesných a závazných měření v technické praxi.

Nejistota měření určuje rozsah naměřených hodnot kolem výsledku měření, které je možné odůvodněně přiřadit k hodnotě měřené veličiny. Nejistota měření zahrnuje nejen nepřesnost výsledku měření, ale i nepřesnosti měřicích přístrojů, hodnot použitých konstant, korekcí, atd. Ke správnému určování nejistot měření je nezbytný statistický přístup, který

předpokládá určité rozdělení pravděpodobnosti, jež popíše pravděpodobnost, s jakou se v intervalu daném nejistotou může nacházet skutečná hodnota.

Základní veličinou, která je mírou nejistoty měření, je směrodatná odchylka udávané veličiny. Nejistota vyjádřená pomocí směrodatné odchylky se označuje jako **standardní nejistota -u** a představuje rozsah hodnot okolo naměřené hodnoty a dělí se na:

- **Standardní nejistoty typu A – u_A** jsou způsobovány náhodnými chybami. Příčiny náhodných chyb se považují všeobecně za neznámé. Stanovují se z opakovaných měření stejné hodnoty měřené veličiny za stejných podmínek. Nejistoty typu A se při stoupajícím počtu opakovaných měření zmenšují. Při výpočtu se předpokládá existence náhodných chyb s normálním rozdělením.
- **Standardní nejistoty typu B – u_B** jsou způsobovány známými příčinami vzniku anebo takovými příčinami vzniku, které se dají odhadnout. Jejich identifikaci a základní hodnocení provádí experimentátor, který prováděl měření. Určování těchto nejistot měření nebývá vždy jednoduché. Vycházejí z různých zdrojů nepřesnosti měření a výsledná nejistota typu B je dána jejich součtem – přitom nezávisí na počtu opakovaných měření. Tento typ nejistoty není v této práci počítán, jelikož to není cílem této práce a nemá pro tento případ vypovídající hodnotu.
- **Kombinovaná standardní nejistota – u_C** je součtem nejistot typu A a B. Při hodnocení výsledku měření tímto typem nejistoty, není potřeba rozlišovat nejistoty typu A a B. Tato standardní nejistota s poměrně velkou pravděpodobností udává interval, ve kterém se může vyskytovat skutečná hodnota měřené veličiny. V praxi se tento typ nejistoty využívá nejvíce. Jelikož není v této práci počítána standardní nejistota typu B, není vyjadřována ani standardní nejistota typu C.
- **Rozšířená standardní nejistota U** se používá pouze v případě, že je zapotřebí zajistit ještě větší pravděpodobnost správného výsledku měření. Výpočet tohoto typu nejistoty se získá tak, že se kombinovaná standardní nejistota u_C vynásobí součinitelem $ku = 2$.

Zdroje nejistot

Jako zdroje nejistot jsou označovány všechny jevy, které nějakým způsobem ovlivňují nebo mohou ovlivnit neurčitost jednoznačného stanovení výsledku měření, a tím zvyšují rozdíl naměřené hodnoty od hodnoty skutečné. Na nejistoty výrazně působí i výběr měřicích přístrojů (analogových nebo číslicových), použití různých vzorkovačů, filtrů a dalších

prostředků na celé trase přenosu a úpravy měřicího signálu. V neposlední řadě na nejistoty působí nejrůznější rušivé vlivy prostředí. Mezi velkým množstvím zdrojů nejistot je jako nejčastěji se vyskytující možno označit:

- nevhodný výběr měřicího přístroje
- nevhodný postup při měření
- nedokonalá nebo neúplná definice měřené veličiny
- nevhodný výběr rozložení vzorků měření
- neznámé nebo nekompenzované vlivy prostředí
- nepřesnost etalonů a referenčních materiálů
- subjektivní vlivy obsluhy
- nedodržení shodných podmínek při opakovaných měřeních

Některé zdroje nejistot se projevují pouze, nebo z velké části v nejistotách typu A, jiné při použití nejistoty typu B. Velká část zdrojů nejistot může být příčinou obou skupin nejistot, poté je však důležité neopomenout ani jednu ze složek nejistoty, jinak to může mít výrazně zkreslující účinek.

4.2. Výpočty jednotlivých druhů nejistot

V této kapitole je uveden podrobný teoretický postup výpočtu standardních nejistot. Tento postup výpočtu byl použit ve statistickém vyhodnocení v *kapitolách IV/5.2.2, IV/6.1., IV/6.2., IV/6.3., IV/6.4., IV/6.5. a IV/6.6.*

4.2.1. Postup výpočtu standardní nejistoty typu A u_A – přímé měření jedné veličiny

Odhad skutečné hodnoty y měřené veličiny je určen **výběrovým průměrem** \bar{y} z n -naměřených hodnot y_i a je dán vztahem:

$$\bar{y} = \frac{\sum_{i=1}^n y_i}{n} \quad (15)$$

Odhad rozptylu naměřených hodnot, který se označuje, jako **výběrový rozptyl** $s^2(y_i)$ je určen vztahem:

$$s^2(y_i) = \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}{n-1} \quad (16)$$

Výběrová **směrodatná odchylka** $s(y_i)$ se získá odmocninou výběrového rozptylu a charakterizuje rozptyl naměřených hodnot kolem výběrového průměru \bar{y} .

Rozptyl výběrových průměrů $s^2(\bar{y})$ je určen vztahem:

$$s^2(\bar{y}) = \frac{s^2(y_i)}{n} \quad (17)$$

Směrodatná odchylka výběrových průměrů $s(\bar{y})$ je zvolena za standardní nejistotu typu A, je dána vztahem:

$$u_A \equiv s(\bar{y}) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}{n \cdot (n-1)}} \quad (18)$$

4.2.2. Postup výpočtu standardní nejistoty typu B u_B – přímé měření jedné veličiny

Nejprve je nutné určit možné zdroje nejistot Z_j (např. nedokonalé měřicí přístroje, použité měřicí metody, nepřesné hodnoty konstant, způsob vyhodnocování a také malé zkušenosti pracovníků v laboratoři). Poté se odhadne rozsah odchylek $\pm \Delta Z_{max}$ od jmenovité hodnoty tak, aby překročení rozsahu bylo co nejméně pravděpodobné. Dále se odhadne, jakému rozdělení pravděpodobnosti odpovídají odchylky ΔZ v intervalu $\pm \Delta Z_{max}$ a určí nejistoty u_z ze vztahu $u_z = \Delta Z_{max} / m$. Hodnota m závisí na druhu rozdělení: $m = 2$ pro normální, $m = 1,73$ pro rovnoměrné a $m = 2,45$ pro trojúhelníkové rozdělení. Stanoví se standardní nejistoty u_z těchto zdrojů (např. převzetím hodnot nejistot z technické dokumentace jako jsou

certifikáty, kalibrační listy, technické normy, údaje výrobců, technické tabulky apod.) a přepočítají na složky nejistoty měřené veličiny - u_{zj} ,

$$u_B = \sqrt{\sum_{j=1}^m u_{zj}^2} \quad (19)$$

4.2.3. Postup výpočtu standardní nejistoty typu C u_C – přímé měření jedné veličiny

Standardní nejistota typu C je počítána ze standardních nejistot typu A a B a to podle následujícího vztahu:

$$u_C = \sqrt{(u_A^2 + u_B^2)} \quad (20)$$

5. Plošné taktilní snímače typu PLANTOGRAF

Tato část práce podrobně analyzuje jednotlivé typy plošného taktilního snímače, vyvíjeného ve spolupráci Fakulty strojní ČVUT a Technické fakulty ČZU v Praze, nazývané PLANTOGRAF.

5.1. Převod působící síly na elektrický signál

Jak již bylo uvedeno v podrobném vyhodnocení vhodnosti jednotlivých typů senzorů pro použití v maticových taktilních snímačích, byly vybrány senzory založené na změně elektrického odporu. Konkrétně ve snímačích typu PLANTOGRAF je pro převod působící (měřené) síly na elektrický signál použita tenká fólie vodivé silikonové pryže japonského výrobce Yokohama Rubber Co. s označením CS57-7RSC. Jedná se o elastický materiál na bázi polysiloxanu (tedy silikonové pryže) a vodivých částic práškového grafitu. Jako příměsí se v materiálu objevují oxid železitý (Fe_2O_3) a oxid křemičitý (SiO_2) [14]. Materiál je chemicky stabilní (netečný vůči vodě, metanolu a etanolu), má poměrně stálou elektrickou vodivost, tloušťku a elasticitu.



Obr. 4.21 Zvětšená struktura elastomeru

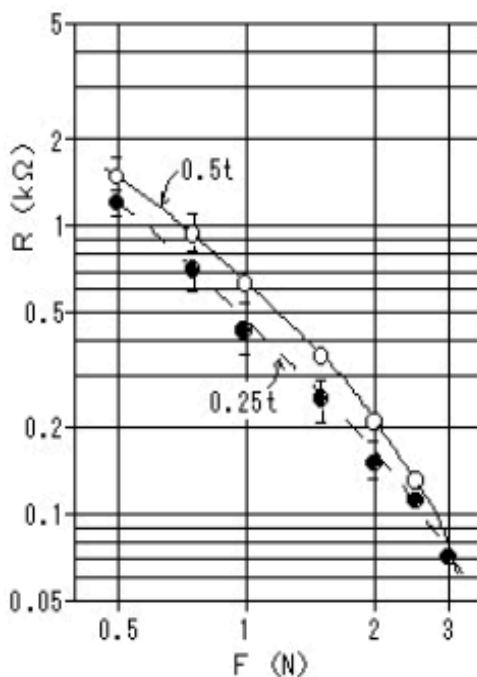
Základní technické parametry, jak je uvádí výrobce:

Tloušťka materiálu	0,5 mm nebo 0,25 mm
Barva	šedočerná
Pevnost v tahu	1,86 MPa
Opakované maximální zatížení pro 107 cyklů	1,5 MPa
Doporučená pracovní teplota	-30 °C až +100 °C
Prodloužení při přetržení	220%
Dodávaný rozměr	A4 (0,5x209x296 mm) nebo 0,5x220x500 mm
Tvrдость	50 Sh

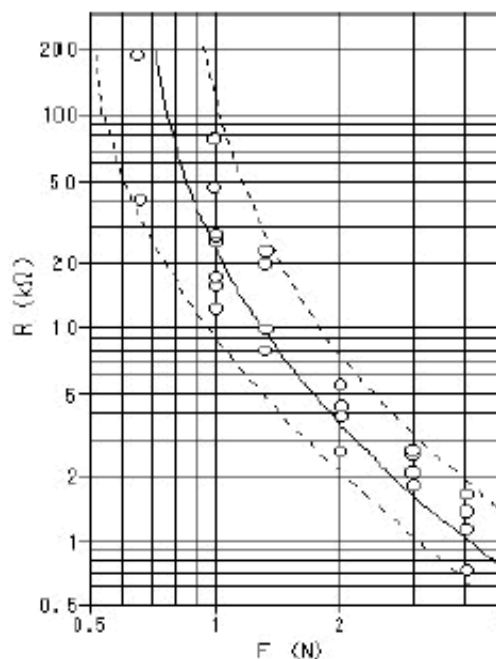
Velkým nedostatkem tohoto materiálu v některých aplikacích může být značná hystereze hodnoty odporu při odlehčování a nízká dlouhodobá stabilita citlivosti. V řešené aplikaci nejsou tyto negativní vlastnosti příliš na závadu vzhledem k nárokům na přesnost a periodickému zatěžování [14].

Důležité charakteristiky materiálu CS57-7RSC převzaté z technické dokumentace k danému materiálu od společnosti Yokohama Rubber Co. [79]:

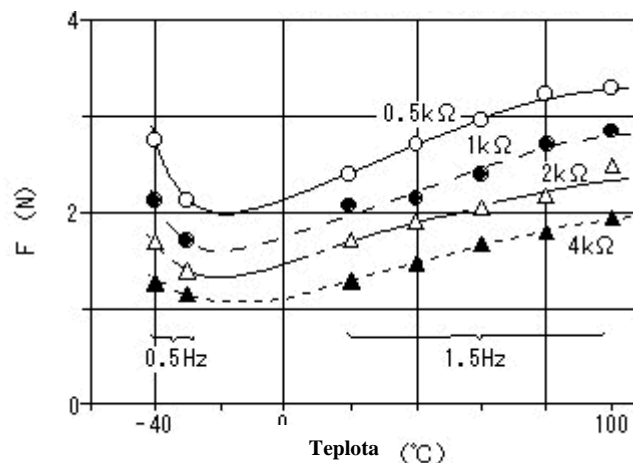
- Závislost odporu na působící síle – radiální uložení elektrod viz *Obr. 4.22* – zde byl měřen materiál o tloušťce 0,5 mm, sílu přenášel gumový disk o průměru 20 mm a je zde znázorněn i rozptyl naměřených hodnot
- Závislost odporu na působící síle – axiální uložení elektrod viz *Obr. 4.23* – zde byl měřen materiál o tloušťce jak 0,5 mm, tak i 0,25 mm, sílu přenášel gumový disk o průměru 20 mm
- Teplotní závislost materiálu viz *Obr. 4.24* – materiál elastomeru byl měřen v rozpětí teplot od -40°C do $+100^{\circ}\text{C}$, z naměřených hodnot vyplývá, že materiál při teplotách nižších jak -30°C ztrácí elasticitu a začínají se projevovat poruchy vodivosti. Pokud se materiál zahřeje zpátky na pokojovou teplotu, jeho vlastnosti se vrátí do původních hodnot beze změny.



Obr. 4.22 Závislost odporu na působící síle – radiální uspořádání elektrod



Obr. 4.23 Závislost odporu na působící síle – axiální uspořádání elektrod

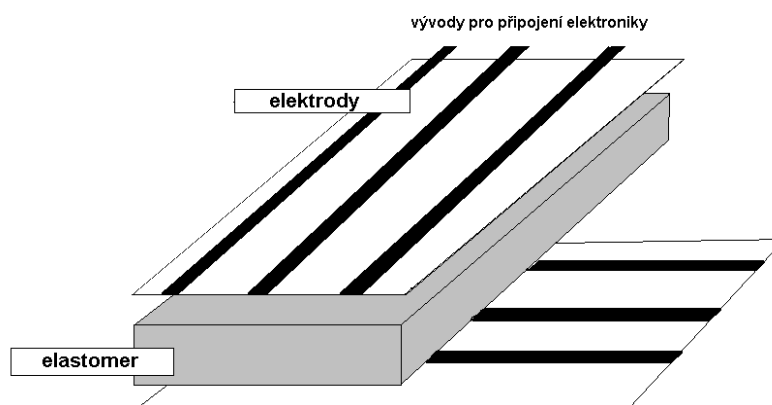


Obr. 4.24 Teplotní závislost materiálu

5.2. Plantograf V05

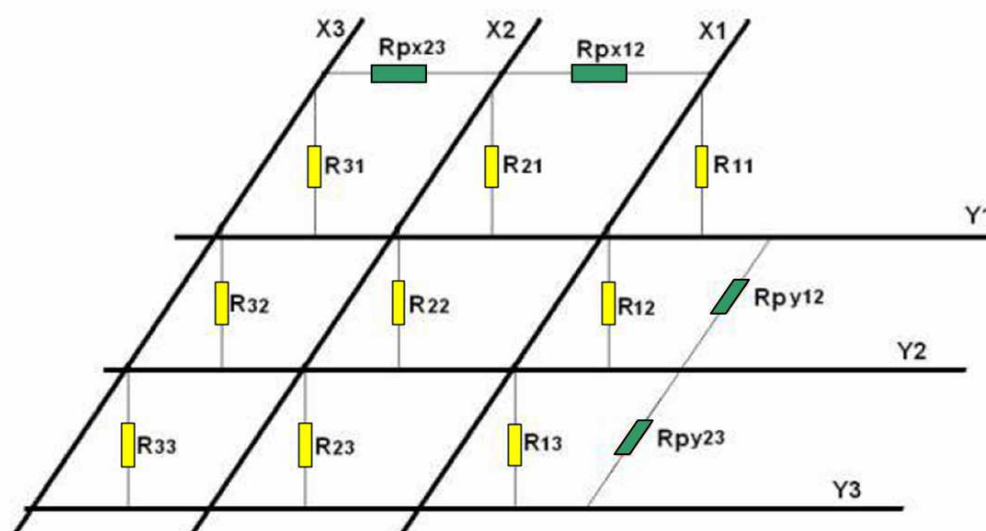
Jako první typ konstrukce byl navržen **Plantograf V05**. Snímací matice tohoto snímače má sendvičovou konstrukci, skládající se ze dvou cuflexových fólií (na kterých jsou vyleptány elektrody), vodivého elastomeru a krycí vrstvy vně elektrod. Mezi příčně a podélně orientovanými elektrodami je vložen vodivý elastomer (Obr. 4.25), měřicí body jsou v místech, kde se elektrody kříží. Měřicí část plošného taktilního snímače se skládá ze 7500 senzorů a má aktivní plochu 300 mm x 400 mm. Sensory jsou maticově rozmístěny s roztečí 2 mm a mají rozměr 2 mm x 2 mm. Snímač má měřicí rozsah uváděn od 0 kPa do 414 kPa a je ho možné přetížit až do 1,4 MPa bez poškození. Celou matici senzorů je možné vyčítat až 300 x za sekundu. Z výše uvedených parametrů vyplývá i praktické použití tohoto zařízení a to je:

- měření rozložení tlaků na ploškách chodidel včetně dynamických měření
- neinvazivní diagnostika ortopedických vad a poruch motoriky
- zjišťování případných patologických tlaků na lidském těle při dlouhodobém upoutání na lůžko (zamezení vzniku proleženin)
- měření stability člověka
- měření napomáhající ke zvolení optimálního tvaru sedáků a opěradel pro invalidy nebo sedaček v automobilovém průmyslu
- měření rozložení tlaku mezi pneumatikou a vozovkou (obecně: všude tam, kde je zapotřebí měřit rozložení tlaku mezi předmětem a podložkou)



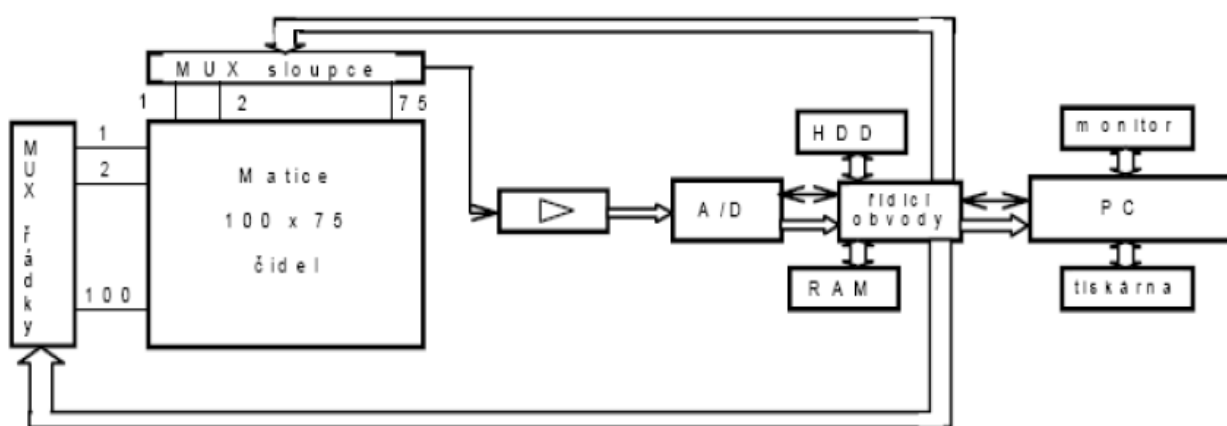
Obr. 4.25 Konstrukce snímací matice u Plantografu V05

Na Obr. 4.26 je zobrazeno náhradní elektrické schéma snímací matice senzorů Plantografu V05, žlutou barvou jsou znázorněny odpory jednotlivých měřicích bodů, které vzniknou v místech křížení podélných a příčných elektrod. Působením síly se odpor těchto bodů mění (v závislosti na velikosti působící síly). Zelenou barvou jsou zobrazeny nežádoucí parazitní svodové odpory, které mohou vznikat mezi sousedními měřicími body. Tyto parazitní odpory mohou vznikat díky tomu, že vodivý elastomer je po celé ploše snímací matice a při působení síly na měřicí body se vytváří vodivé cesty nejen mezi příčnými a podélnými elektrodami v místech měřicích bodů, ale také mezi jednotlivými měřicími body. Vznik těchto nežádoucích vodivých cest se výrazněji projevuje při vyšších působících silách na měřicí body.



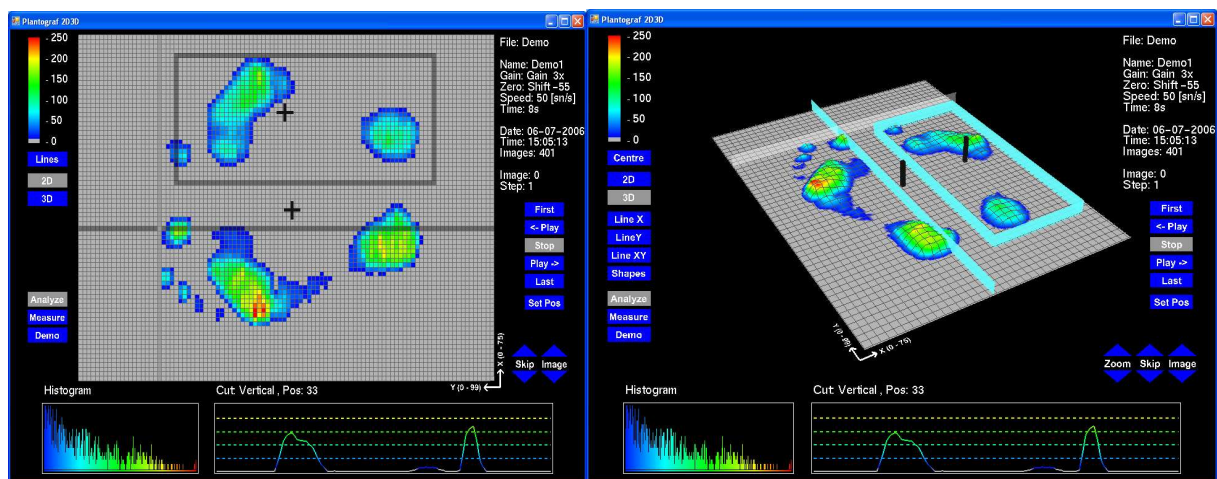
Obr. 4.26 Náhradní elektrické schéma plošné snímací matice Plantografu V05

Elektronické obvody, obsluhující senzory maticového snímače, pomocí kterých lze získat hodnotu tlaku z jednotlivých měřicích bodů, jsou v této práci popsány jen stručně, jelikož nejsou jejím předmětem. Podrobný popis lze najít v [11] a [12]. Základem zařízení je sloupcový multiplexer a řádkový multiplexer. Řádkový multiplexer „připíná“ napájecí napětí k řádku. Ten je připojený k napájecímu napětí po celou dobu měření napětí na sloupcových elektrodách. Přepínání mezi nimi zajišťuje sloupcový multiplexer. Poté je příslušný řádek odpojen od napájecího napětí, připojen na další řádek snímače a celý proces se cyklicky opakuje. Naměřené a zesílené napětí se přivádí na osmi bitový A/D převodník a poté další části elektroniky zajišťují komunikaci s PC ukládání naměřených dat. Blokové schéma celého systému Plantograf V05 je znázorněno na *Obr. 4.27*.



Obr. 4.27 Blokové (princiální) schéma systému Plantograf V05 [8]

Programové vybavení v PC – Celý měřicí systém Plantograf je možné ovládat pomocí softwaru nainstalovaného v PC. Tento software umožňuje měření hodnot ve dvou režimech a to v online režimu – naměřená data jsou v reálném čase zobrazována na monitoru. Druhý možný je režim offline, kdy měřená data nejsou přímo zobrazována, ale jsou rovnou ukládána na harddisk v systému a až po skončení měření je možné je přenést a zobrazit v PC. Snímač v režimu offline je schopen vyčítat data z matice senzorů s podstatně větší rychlostí, než v režimu online, což je zapotřebí při měření rychlých dynamických jevů. Dále je možné výsledky měření zobrazit jak ve 2D, tak i 3D znázornění. Obrazovka softwaru nainstalovaného v PC, je zobrazena na *Obr. 4.28*.



Obr. 4.28 Obrazovka softwaru (2D a 3D zobrazení)

Nevýhody snímače Plantograf V05:

1. Elastomer zajišťující převod působící síly na elektrický signál o rozměrech 300 x 400 mm je obtížně výrobitelný tak, aby splňoval podmínku odporové homogenity. Takovýto materiál dokáže vyrobit jen několik firem na světě, z těchto důvodů je cena tohoto elastomeru poměrně vysoká.
2. Vytváření vodivých cest mezi jednotlivými měřicími body – vodivý elastomer je po celé ploše snímací matice, a proto dochází k nežádoucímu elektrickému svodu mezi elektrodami, což negativně ovlivňuje výsledky měření. Tento efekt se ve větší míře projevuje při velkých zátěžích nebo v případě, jsou-li elektrody umístěny blízko sebe.
3. Parazitní kapacita měřících elektrod – netvarované elektrody (pouze pruhy pozlacené měděné folie) musí mít určitou dotekovou plochu s vodivým elastomerem (musí mít určitou šířku, zde konkrétně 2 mm), aby bylo docíleno požadované citlivosti v měřicím bodě, avšak tím se zvětšuje jejich kapacita, což při rychlých měřeních může způsobit problémy.
4. Opakující se vyčítání celé matice senzorů – obsluhující elektronické obvody neustále zpracovávají informace z celé měřicí matice, i když je zatížená třeba jen v jednom měřicím bodě, což celý proces zatěžuje nepotřebnými daty a výrazně ho zpomaluje.

5.3. Plantograf V07 – vývojová verze β

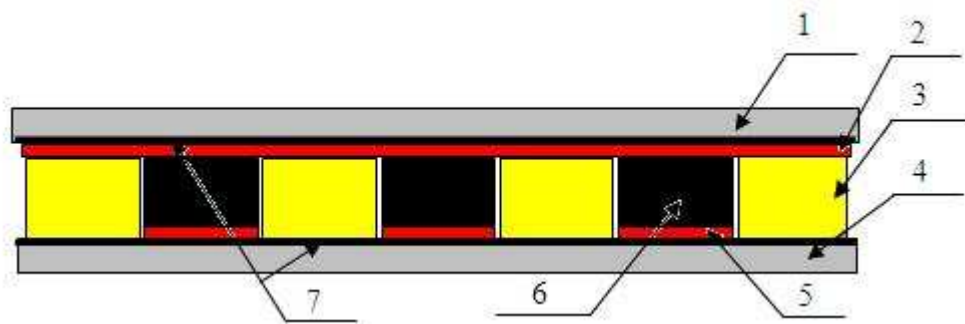
Z důvodu výše uvedených nevýhod (viz kapitola IV/5.2.) konstrukce Plantografu V05 bylo zapotřebí navrhnout konstrukci snímací matice senzorů (případně i elektronické obvody) takovým způsobem, aby tyto nevýhody Plantografu V05 co nejvíce minimalizovala, nebo v ideálním případě úplně odstranila.

První takovou konstrukcí, je pracovní nazývaná verze *Plantograf V07 – vývojová verze β* , tato verze jako celek vychází z konstrukce PLANTOGRAFU V05, avšak je zde podstatným způsobem upravena konstrukce snímací matice senzorů tak, aby odstranila nevýhody č. 1 až 3 uvedené v předcházející kapitole.

Byla navržena nová konstrukce snímací matice senzorů, která má opět sendvičovou konstrukci, ale podstatně se od Plantografu V5 liší (viz Obr. 4.29).

Měřicí část snímací matice senzorů, která zajišťuje převod působící síly na elektrický signál, se skládá:

- ze dvou polí podélně a příčně orientovaných měřicích elektrod, vyleptaných na cuxlexové folii
- z nevodivé elastické vložky
- z elementů vodivého elastomeru



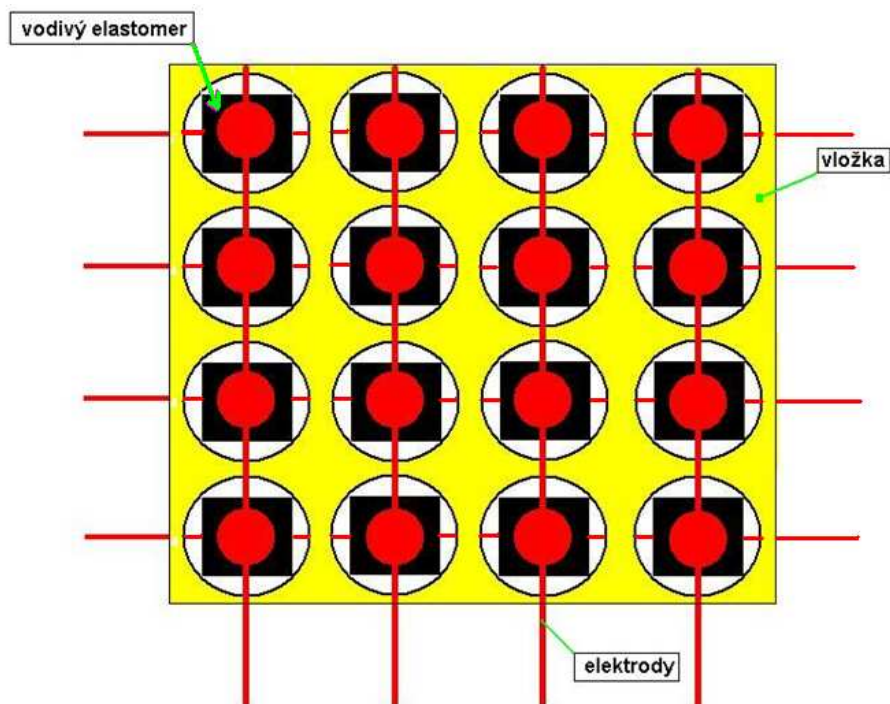
Obr. 4.29 Nová konstrukce snímací matice

(1 – vrchní pružná ochranná vrstva, 2 – podélně orientovaná elektroda, 3 – distanční vložka, 4 – základní tuhá ochranná deska, 5 – příčně orientovaná elektroda, 6 – element vodivého elastomeru, 7 – cuxlexové folie, na kterých jsou vyleptány elektrody)

Nová konstrukce snímací matice senzorů *Plantografu V07 – vývojové verze β* se od *Plantografu V05* liší ve dvou podstatných bodech:

- elastomer není po celé ploše snímací matice – elementy elastomeru jsou pouze v měřicích bodech (místa křížení elektrod)
- příčné a podélné elektrody jsou tvarovány – v místě měřicích bodů jsou rozšířeny a naopak mezi měřicími body jsou zúženy

Na *Obr. 4.29 a 4.30* je konkrétně zobrazena konstrukce snímací matice senzorů *Plantografu V07 – vývojové verze β* : mezi cuflexové folie (7), přesně do míst, kde se kříží podélně a příčně orientované elektrody (2,5), jsou vloženy elementy vodivého elastomeru (6) o rozměru 2,5 x 2,5 mm (případně \varnothing 2,5 mm). Polohu těchto elementů dále udržuje nevodivá distanční vložka (3), která zajišťuje i jejich galvanické oddělení, což také zabrání elektrickému svodu mezi elektrodami. Na distanční vložce (3) je z obou stran nanesena speciální vrstva lepidla, která drží pohromadě celý „sendvič“ (části 2, 3, 4, 6, 7). Ten je tak schopen odolávat mechanickému namáhání v jiném než axiálním směru (dle osy elastomeru). Citlivost matice senzorů je funkcí plochy elektrod a tuhosti vložky. Tuhosti vložky a elementu vodivého elastomeru se sčítají (za předpokladu rovnoměrného zatížení). Nejlepším řešením je užít vložku o tuhosti blízkou tuhosti elementu elastomeru. Konkrétně byla ve snímací matici jako distanční vložka použita nevodivá silikonová pryž o tloušťce 0,5 mm a tvrdosti 50 Sh.



Obr. 4.30 Vrchní pohled na novou konstrukci snímací matice (bez vrchní ochranné vrstvy)

5.3.1. Měření Plantografu V07 – vývojové verze β

Nejprve je nutné zdůraznit, že byla měřena pouze zkušební matice o rozměru 4 x 4 senzory bez podpůrných elektronických obvodů, cílem měření bylo zjištění závislosti odporu měřicího bodu na měnícím se tlaku. K měření jednotlivých měřicích bodů snímací matice byl použit speciální modulární systém pro měření taktilních snímačů, viz kapitola IV/2. Tento systém je nainstalovaný na hlavici robota Turbo Scara SR60 a propojen sériovou linkou s PC, v němž se ukládají naměřená data. Hrot modulárního systému působil (vyvíjel tlak) vždy pouze na jeden měřicí bod taktilní matice senzorů a současně byl měřen měnící se odpor právě měřeného bodu. Hrot modulárního systému měl průměr 6 mm, takže dostatečně přesahoval i mimo měřicí bod a tím pádem měření (citlivost senzoru) ovlivňovala i distanční vložka.

Byly provedeny dva způsoby měření:

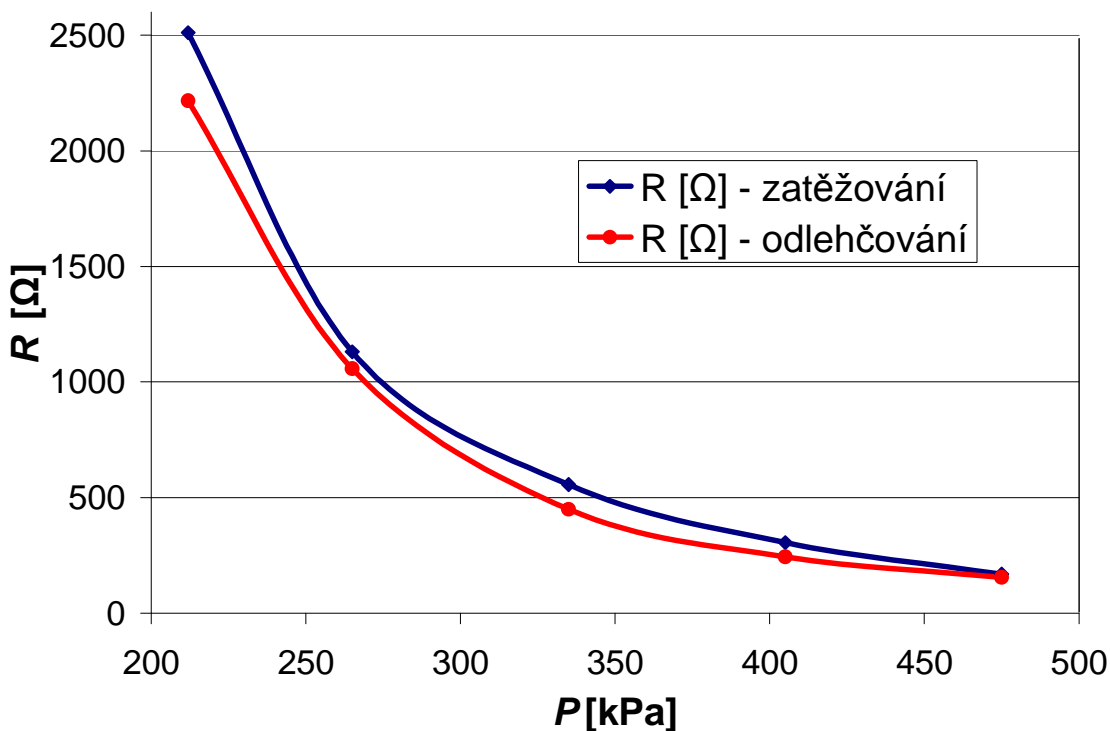
a) Měření osmi různých měřicích bodů matice senzorů

První způsob měření taktilního snímače probíhal tak, že hrot modulárního systému působil (pomocí robota) přímo na jeden měřicí bod a jeho těsné okolí tlakem v rozmezí od 0 kPa do 475 kPa. Zároveň byl měřen měnící se odpor právě zatěžovaného bodu, a to při zatížení i odlehčení. Toto měření se opakuje dvakrát pro každý z osmi různých bodů snímací matice. Podrobný výpis naměřených hodnot je v Příloze B. Průměrné naměřené hodnoty a jejich statistické vyhodnocení z měření jednotlivých bodů jsou zobrazeny v Tabulce č. 4, snížení odporu měřeného bodu je patrné až od zatížení cca 212 kPa, proto je tato hodnota uvedena v tabulce jako první. Až od tohoto tlaku začíná senzor na působení měřicího hrotu reagovat změnou odporu. V grafu č. 1, kde jsou znázorněny průměrné hodnoty odporu z jednotlivých bodů při různém tlaku a je vidět, že charakteristika exponenciálně klesá. Tímto měřením bylo dále zjištěno, že se liší hodnoty odporu jednotlivých bodů pro stejné zatížení, a to dosti výrazně (při malém zatížení o více než 50%). To způsobují různé vlivy na odchylky měření, a to zejména nehomogenita elastomeru (vodivý elastomer, ze kterého jsou nařezány elementy, není dokonale homogenní a odpor jednotlivých elementů se může při stejném zatížení výrazně lišit, což se nejvýrazněji projevuje při malých zatíženích). Dále to jsou nepřesnosti v nastavení působícího tlaku ($\pm 0,13$ kPa). Proto byla vypočtena poměrně vysoká

standardní nejistota typu A (viz *Tabulka č. 4*), která byla maximální při minimálním tlaku na měřicí bod (212 kPa) a to 422,12 Ω . Při maximálním tlaku 475 kPa na měřicí bod nejistota typu A výrazně klesla, a to až na 28,47 Ω . Z toho vyplývá, že přesnost měření je lepší při vyšších zatíženích, kde charakteristika není tak strmá.

Zatěžování bodu					
P [kPa]	212	265	335	405	475
R [Ω] – průměr	2511,25	1130,62	556,87	305,93	168,75
Nejistota U_A [Ω]	351,77	193,41	109,1	44,05	24,69
U_A - korigovaná [Ω]	422,12	232,09	130,92	52,86	29,63
Výběrový rozptyl [Ω^2]	989941,07	299260,3	95228,13	15524,89	4878,57
Směr. odchylka [Ω]	994,95	547,04	308,59	124,59	69,84
Odlehčování bodu					
P [kPa]	212	265	335	405	475
R [Ω] – průměr	2216,87	1057,5	450	243,75	155,62
Nejistota U_A [Ω]	338,27	199,10	86,16	44,10	23,72
U_A - korigovaná [Ω]	405,92	238,93	103,39	52,93	28,47
Výběrový rozptyl [Ω^2]	915421,43	317154	59391,52	15564,4	4503,57
Směr. odchylka [Ω]	956,77	563,16	243,70	124,75	67,10

Tabulka č. 4 Průměrné hodnoty z měření osmi různých bodů a statistické vyhodnocení



Graf č. 1 Průměrný odpor osmi různých měřicích bodů (zatěžování a odlehčování)

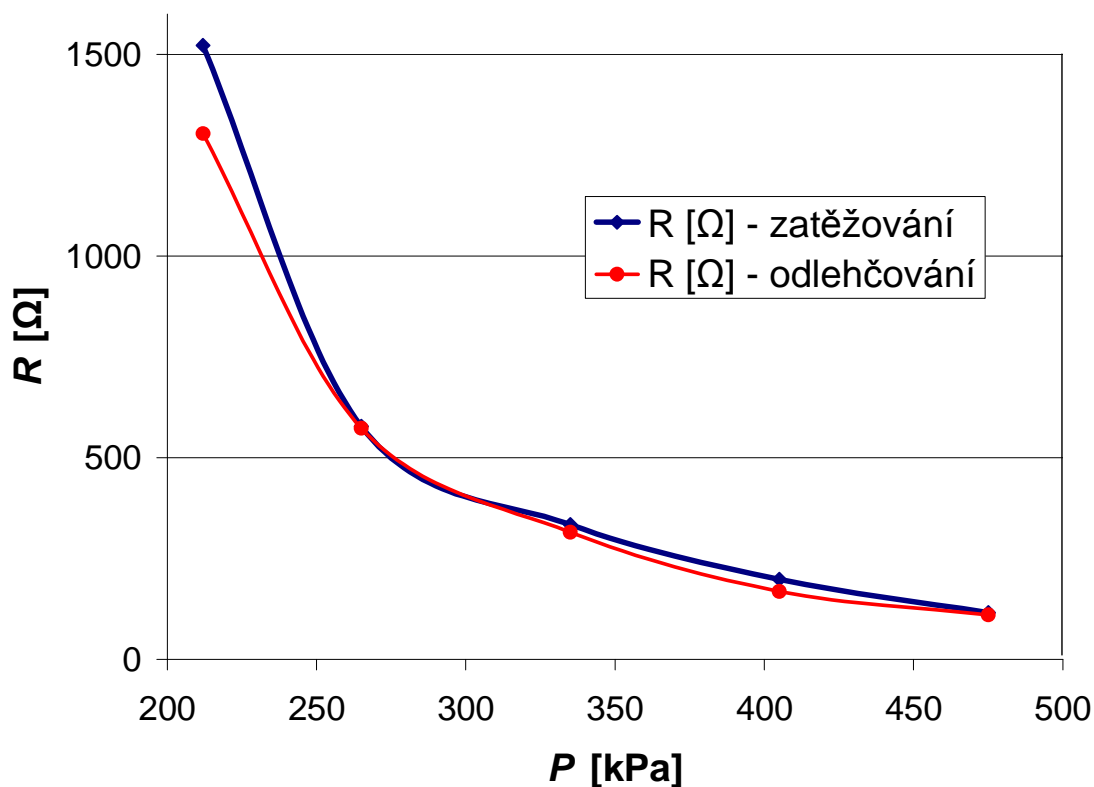
b) Osm po sobě jdoucích měření stejného bodu v matici senzorů

Druhý způsob měření probíhá podobně jako způsob první s tím rozdílem, že je měřen pouze jeden z vybraných bodů, ale osmkrát za sebou. Z tohoto měření je vidět opakovatelnost měření stejného bodu (*Tabulka č. 2*). Podrobný výpis naměřených hodnot je v *Příloze C*. Závislost odporu na velikosti tlaku, který působí na měřený bod, exponenciálně klesá. U tohoto způsobu měření je standardní nejistota typu A 2 – 5 x nižší, než v prvním měření (viz *Tabulka č. 4 a Tabulka č. 5*). Je to tím, že byl opakovaně měřen stejný bod a neuplatňuje se nehomogenita elastomeru.

Zatěžování					
P [kPa]	212	265	335	405	475
R [Ω] – průměr	1522,5	577,5	333,75	198,125	115,625
Nejistota U_A [Ω]	150,16	41,39	20,34	14,01	7,87
U_A – korigovaná [Ω]	180,19	49,67	24,41	16,81	9,44
Výběrový rozptyl [Ω^2]	180392,85	13707,14	3312,5	1570,98	495,98
Směr. odchylka [Ω]	424,72	117,07	57,55	39,63	22,27
Odlehčování					
P [kPa]	212	265	335	405	475
R [Ω] - průměr	1303,75	573,12	315	168,12	110
Nejistota U_A [Ω]	76,92	34,65	14,01	7,61	7,5
U_A – korigovaná [Ω]	92,31	41,58	16,81	9,13	9
Výběrový rozptyl [Ω^2]	47341,07	9606,69	1571,42	463,83	450
Směr. odchylka [Ω]	217,58	98,01	39,64	21,53	21,21

Tabulka č. 5 Průměrné hodnoty z osmi měření stejného bodu a statistické vyhodnocení

Nejdůležitější závěr z těchto měření je však ten, že odpor měřicích bodů začne klesat až od tlaku cca 212 kPa. Až od tohoto tlaku začíná senzor na působení měřicího hrotu reagovat změnou odporu. Standardní nejistota typu A (viz *Tabulka č. 5*), je opět maximální při minimálním tlaku na měřicí bod (212 kPa) a to 180,19 Ω a naopak minimální 9,44 Ω při maximálním tlaku 475 kPa na měřicí bod. Z toho tedy vyplývá, že přesnost měření je lepší při vyšších zatíženích, kde charakteristika není tak strmá.



Graf č. 2 Průměrný odpor z osmi různých měření stejného bodu (zatěžování a odlehčování)

Shrnutí použití verze Plantografu V07 – vývojové verze β:

I když takto navržená konstrukce řeší největší nevýhody konstrukce snímací matice Plantografu V05, měření dolní hranice požadovaného rozpětí tlaků (okolo 25 kPa) není možné. Jelikož bylo měřením zjištěno, že vložení distanční vložky mezi jednotlivé měřicí body, výrazně klesne citlivost senzoru. Z tohoto důvodu není možné použít tuto konstrukci v aplikacích, pro které je systém typu Plantograf přednostně určen (pro měření tlaků v rozmezí od 25 kPa do 500 kPa s vyšším důrazem na spodní hranici intervalu). Další velkou nevýhodou této konstrukce je její velká technologická náročnost výroby. U velkých snímacích matic, kde jsou řádově tisíce senzorů, není prakticky možné s odpovídající přesností takto uspořádanou matici vyrobit. Tato konstrukce snímací matice senzorů je vhodná pouze pro aplikace, kde se měří rozložení tlaků vyšších hodnot (cca od 200 kPa) a není potřeba měřit rozložení tlaku na velké ploše, případně s velkým rozlišením (snímací matice má maximálně řádově stovky senzorů).

Pozn.: Výsledky měření a popis konstrukce Plantografu byly také uveřejněny autorem práce, viz [13] a [75].

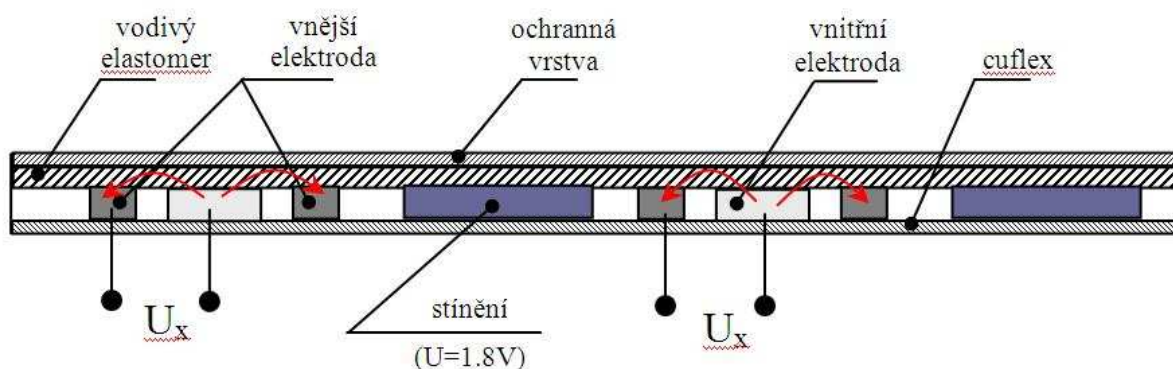
5.4. Plantograf V08

Jelikož bylo měřením zjištěno, že se u konstrukce Plantografu V07 snížila citlivost díky vložené distanční vložce. Byla navržena nová konstrukce snímací matice tak, aby řešila nevýhody Plantografu V05 a současně její citlivost zůstala stejná. Nově navržená konstrukce se nazývá Plantograf V08.

Konstrukce snímací matice Plantografu V08

Konstrukce Plantografu V08 byla navržena tak, aby docházelo k co nejmenšímu ovlivňování měřicích bodů ve snímací matici, citlivost jednotlivých měřicích bodů byla co nejvyšší a konstrukce snímací matice byla co možná nejjednodušší na výrobu.

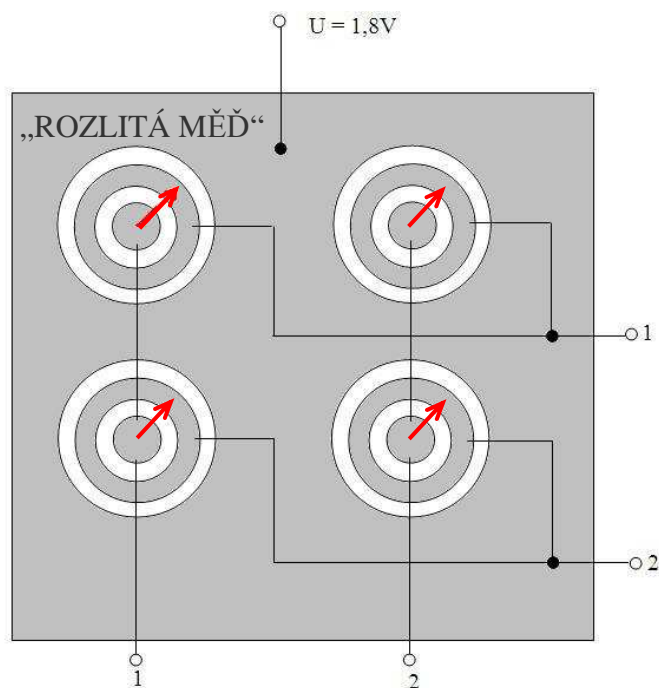
Na *obr. 4.31* je zobrazen příčný řez části snímací matice Plantografu V08. Nepodstatnější změnou od výše uvedených konstrukcí je, že elektrody, mezi kterými jsou měřeny změny odporu elastomeru (proměnlivý úbytek napětí), jsou obě vyleptány na jedné folii cuflexu (na spodní části snímací matice). Na tyto elektrody je po celé ploše snímací matice přiložen vodivý elastomer, tím je oproti Plantografu V07 výrazně zjednodušena konstrukce snímací matice (podobně jako u Plantografu V05). Na vodivém elastomeru je přiložena ochranná vrstva v podobě nevodivého pružného materiálu. Tato vrstva zabrání poškození vodivého elastomeru.



Obr. 4.31 Příčný řez Plantografem V08

V takovéto konstrukci snímací matice, kde jsou elektrody vyleptány na stejné straně matice a tvarovány jako vnitřní a vnější elektroda (*viz. Obr. 4.31 a 4.32*), teče proud, kterým

je měřen odpor senzoru (ve směru červené šipky znázorněné na *Obr. 4.31 a 4.32*). Tzn., že proud teče z vnitřní elektrody přes vodivý elastomer do vnější elektrody.



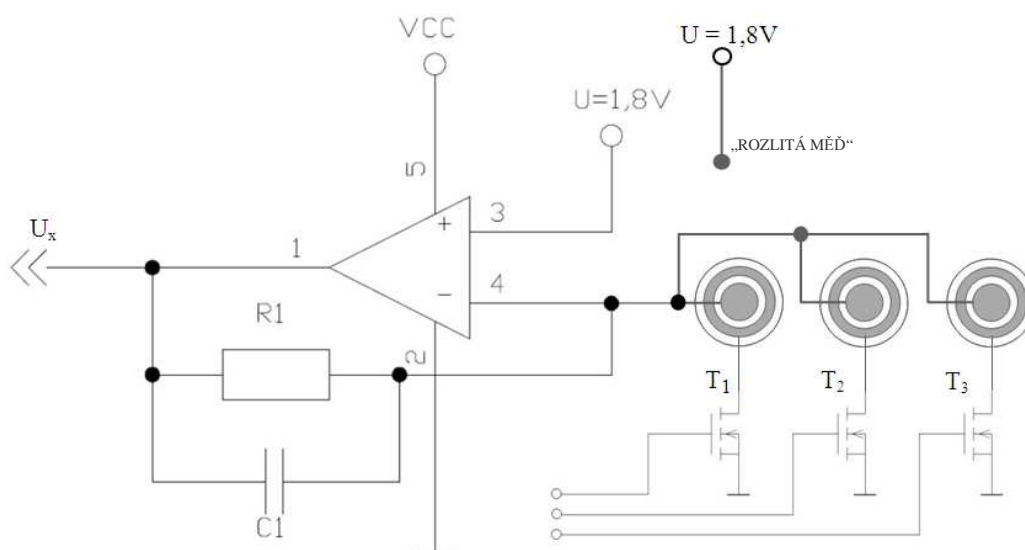
Obr. 4.32 Vrchní (principiální) pohled na část matice senzoru Plantografem V08

Měřicí část Plantografu V08

Jedná se o výkonové budiče ovládající adresování senzoru snímače a vstupních obvodů, které převádí elektrické signály z adresovaných senzorů na signál, zpracovatelný řídicím jednočipovým mikroprocesorem, resp. jeho interním A/D převodníkem.

Pro adresování senzorů je pro zjednodušení konstrukce využito polem řízených tranzistorů MOSFET s vodivým kanálem typu N, jejichž vodivý kanál lze ovládat snížením napětí. V tomto případě jsou řídicí hradla tranzistorů propojena přímo s výstupními porty mikroprocesoru. Každému adresovacímu vodiči potom přísluší jeden tranzistor. Vstupní obvody jsou tvořeny vždy jedním operačním zesilovačem zapojeným jako zesilovač, pro každý vstupní kanál.

Napětí ze vstupních obvodů je potom přivedeno na vstupy A/D převodníku, který je součástí použitého jednočipového mikroprocesoru [14].



Obr. 5.33 Elektrické schéma senzoru Plantografu V08

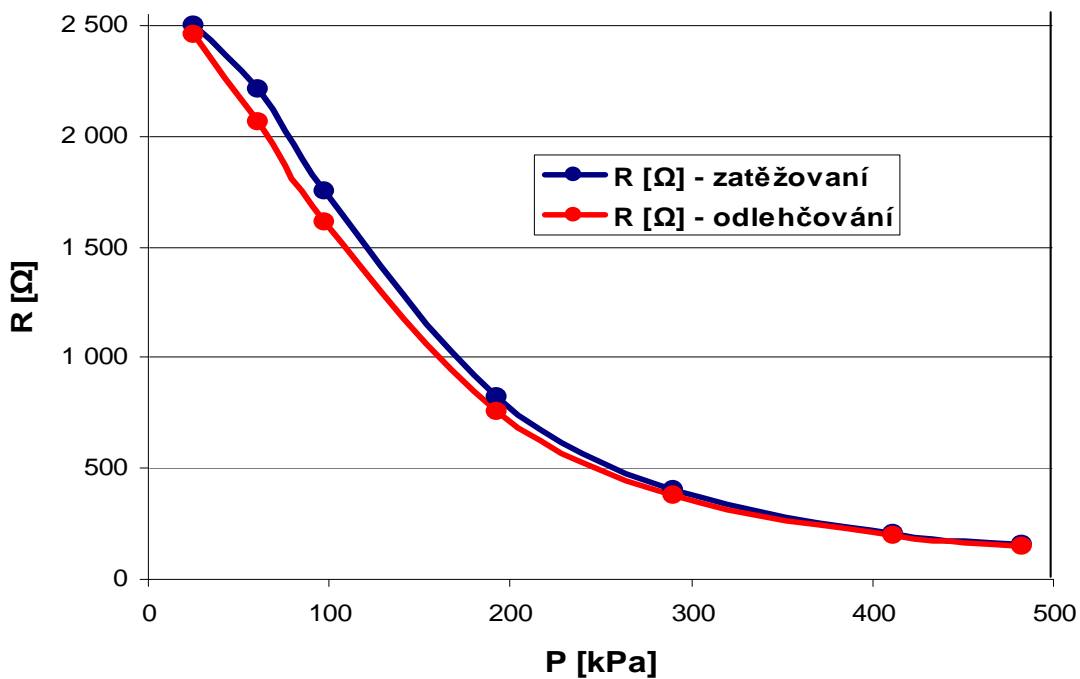
Na příkladu je vysvětlen princip měření jednoho senzoru snímače. Procesor adresuje senzor sepnutím tranzistoru v žádaném sloupci. Je tedy například předpokládáno, že je sepnut tranzistor T_2 . Aktivní řádek je určen nastavením kanálu A/D převodníku uvnitř mikroprocesoru. Proud, kterým je měřen odpor senzoru, tedy poteče z výstupu operačního zesilovače, přes zpětnou vazbu na řádkovou osnovu matice a dále na střední elektrodu měřeného senzoru. Odtud proud teče přes vodivý elastický materiál, na jehož odporu se vytvoří snímaný úbytek napětí, k druhé elektrodě – vnějšímu mezikruží. Následně je proud odváděn sepnutým tranzistorem adresového budiče. Mikroprocesor potom snímá zesílené napětí na výstupu operačního zesilovače, odpovídající odporu adresovaného senzoru. Jsou-li tranzistory v neadresovaných sloupcích rozepnuty, odpor senzorů v těchto sloupcích matice se neuplatní. „Rozlitá měď“ (viz. Obr. 4.33) je připojená na napětí 1,8V a tím brání vzájemnému ovlivňování sousedních elektrod [14].

5.4.1. Orientační měření Plantografu V08

Aby bylo možné zjistit, zda konstrukce Plantografu V08 byla správně navržena a tedy je s ní možné měřit tlaky v požadovaném rozpětí od 25 kPa do 500 kPa, bylo nutné orientační měření několika bodů snímací matice (viz Tabulka č. 6). Byly měřeny tři různé měřicí body snímací matice pětikrát za sebou pomocí stejného modulárního systému jako v kapitole IV/4.3.1. Podrobný výpis naměřených hodnot je v Příloze D.

P [kPa]	25	61	97	193	290	412	483
R [Ω] - zatěžování	2 497,1	2 215,8	1 755,1	821,9	398,9	208,2	156,4
R [Ω] - odlehčování	2 462,5	2 064,9	1 614,5	753,8	377,2	195,9	151,4

Tabulka č. 6 Průměrné hodnoty z orientačního měření Plantografu V08



Graf č. 3 Orientační měření Plantografu V08

Z orientačních měření konstrukce Plantografu V08 bylo zjištěno, že odpor klesá již při působení tlaku 25,5 kPa. Měření potvrdilo (viz Graf č. 3), že Plantograf V08 je schopen měřit rozložení tlaků již od cca 25 kPa, z čehož vyplývá, že tato konstrukce je vhodná pro měření požadovaného rozpětí tlaků.

V. VÝSLEDKY DISERTAČNÍ PRÁCE S UVEDENÍM NOVÝCH POZNATKŮ

1. Nový systém elektroniky pro měření a zpracování signálu z matice senzorů

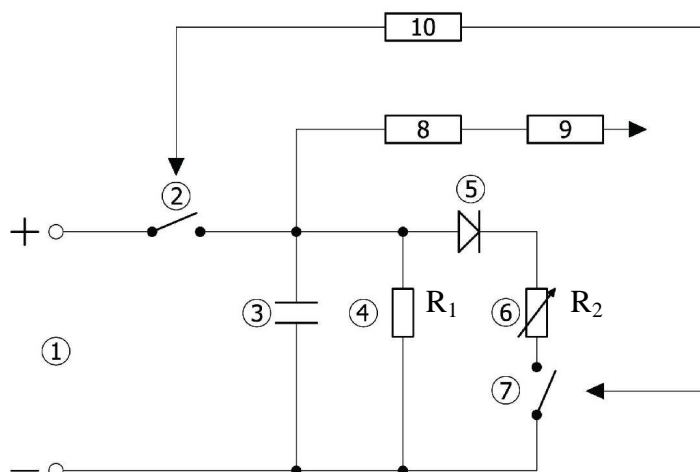
Nový systém elektroniky pro měření a zpracování signálu z nové konstrukce matice senzorů, která je schopná měřit rozložení tlaků v požadovaném intervalu 25 kPa – 500 kPa (viz. kapitola IV.5.4.1.), potlačuje největší nevýhody elektronických obvodů používaných u Plantografu V05 popsaných v kapitole IV/5.2. jako je nutnost použití multiplexoru pro přepínání měřeného kanálu, malá rychlost snímání rozložení kontaktního tlaku, velká spotřeba elektrické energie, vysoká cena elektroniky (cena velmi rychlého analogově-digitálního převodníku).

Na tento nový systém elektroniky byly uděleny dva patenty, přičemž autor této práce je spoluautorem jednoho z nich [83] a [84].

1.1. Princip funkce elektronického obvodu pro vyhodnocení informací ze snímačů s variabilním elektrickým odporem

Základem systému je elektronický obvod umožňující vysokorychlostní vyhodnocení informací ze snímačů s variabilním elektrickým odporem.

Tedy v tomto konkrétním případě: z měřících bodů, kterým se působením tlaku mění jejich odpor – matice měřících bodů snímačů typu Plantograf.



Obr. 5.1 Obvod pro vysokorychlostní vyhodnocení informací ze snímačů s variabilním elektrickým odporem

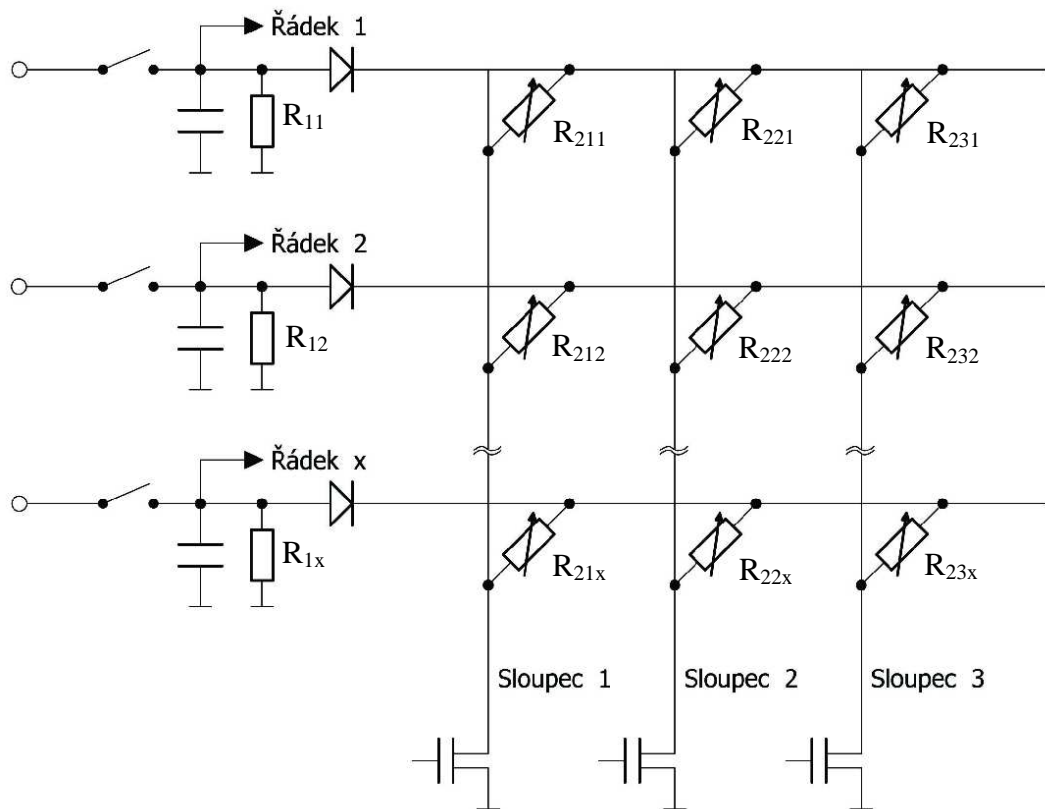
Na *Obr. 5.1* je znázorněno elektrické schéma obvodu pro vysokorychlostní vyhodnocení informací ze snímačů s variabilním elektrickým odporem. Skládá se ze zdroje elektrické energie (1), řádkového spínače (2), kondenzátoru (3), rezistoru (4), diody (5), proměnného elektrického odporu (6), sloupcového spínače (7), tvarovacího odvodu (8), čítače (9) a bloku časování (10).

Jako řádkový spínač (2) a sloupcový spínač (7) je použit tranzistor s vodivostí P nebo N a tvarovací obvod (8) je realizován integrovaným Schmittovým klopným obvodem. Dioda (5) slouží pro ochranu obvodu před vnějšími vlivy přicházejícími směrem od snímače s proměnným elektrickým odporem. Blok časování (10) řídí pracovní cyklus obvodu, který je rozdělen do dvou fází. V obvodu znázorněný proměnný elektrický odpor (6) reprezentuje měnící se odpor jednoho měřícího bodu v matici senzorů v závislosti na tlaku.

V první fázi je sepnutý řádkový spínač (2), sloupcový spínač (7) je rozepnutý. Z napájecího zdroje (1) dochází k nabíjení kondenzátoru (3), ke kterému je paralelně připojený rezistor (4). Tato paralelní kombinace zajišťuje vybíjení kondenzátoru (3) i v případě práce s odpojeným nebo vadným snímačem s proměnným elektrickým odporem (6).

V druhé fázi je řádkový spínač (2) rozepnutý, sloupcový spínač (7) je sepnutý. Přes proměnný elektrický odpor (6) dochází k vybíjení kondenzátoru (3), přičemž rychlost jeho vybíjení je závislá právě na aktuální velikosti proměnného odporu (6). Aktuální velikost proměnného odporu snímače (6) je tak převedena na dobu vybíjení kondenzátoru (3). Z paralelní kombinace kondenzátoru (3) a rezistoru (4) je odebírán signál do tvarovacího obvodu (8), který zajišťuje převod analogového signálu na logické úrovně nula nebo jedna a zvyšuje odolnost proti rušení. Doba periody takto vzniklého signálu je měřena čítačem (9) a z něj odesílána pro další zpracování.

Pokud tento obvod bude připojen ke každému řádku (případně sloupci) matice senzorů taktilního snímače (*viz Obr. 5.2*) lze vyčítat všechny měřící body ve sloupci (případně v řádku) najednou, a tím podstatně zvýšit rychlost snímání dat z matice senzorů. Díky této konstrukci je možné snížit náklady na vyhodnocovací elektroniku ve srovnání s použitím více paralelních analogově-digitálních převodníků.



Obr. 5.2 Zapojení obvodu na každý řádek matice senzorů

1.2. Určení hodnoty odporu R_1

Nastavení hodnoty odporu R_1 v elektronickém obvodu popsaném v předchozí kapitole (viz Obr. 5.1) tak, aby nebylo negativně ovlivněno měření R_2 při nízkém působícím tlaku, vychází z následujících předpokladů:

$$f_{\text{čítače}} = 250\text{MHz}$$

$$T_{\text{čítače}} = 4 \cdot 10^{-9}\text{ s}$$

$$U = 3,3\text{V}$$

$$u_c(t) = 0,8\text{V}$$

$$C = 250\text{pF} = 2,5 \cdot 10^{-10}\text{ F}$$

Aby bylo možné správně určit hodnotu odporu R_1 , je nutné zvolit hodnotu odporu měřicího bodu R_2 , při které je již možné říci, že měřicí bod reaguje na změnu tlaku změnou svého odporu. Tato hodnota byla zjištěna na základě měření, při kterém bylo zatěžováno deset

různých měřicích bodů třikrát za sebou (viz *Tabulka č. 7*) a vždy, jakmile došlo ke snížení odporu na „měřitelnou“ hodnotu, byla tato hodnota zaznamenána.

Měřicí bod	Odpor [Ω]	Odpor [Ω]	Odpor [Ω]
1	2359	2147	2366
2	1983	1874	1914
3	1953	1966	1807
4	5354	5411	5218
5	2219	2198	2307
6	2431	2331	2479
7	1876	1901	1987
8	4168	4354	4119
9	2678	2687	2611
10	1968	2018	2107

Tabulka č. 7 Hodnoty odporu měřicího bodu při první reakci na zvyšující se zatížení

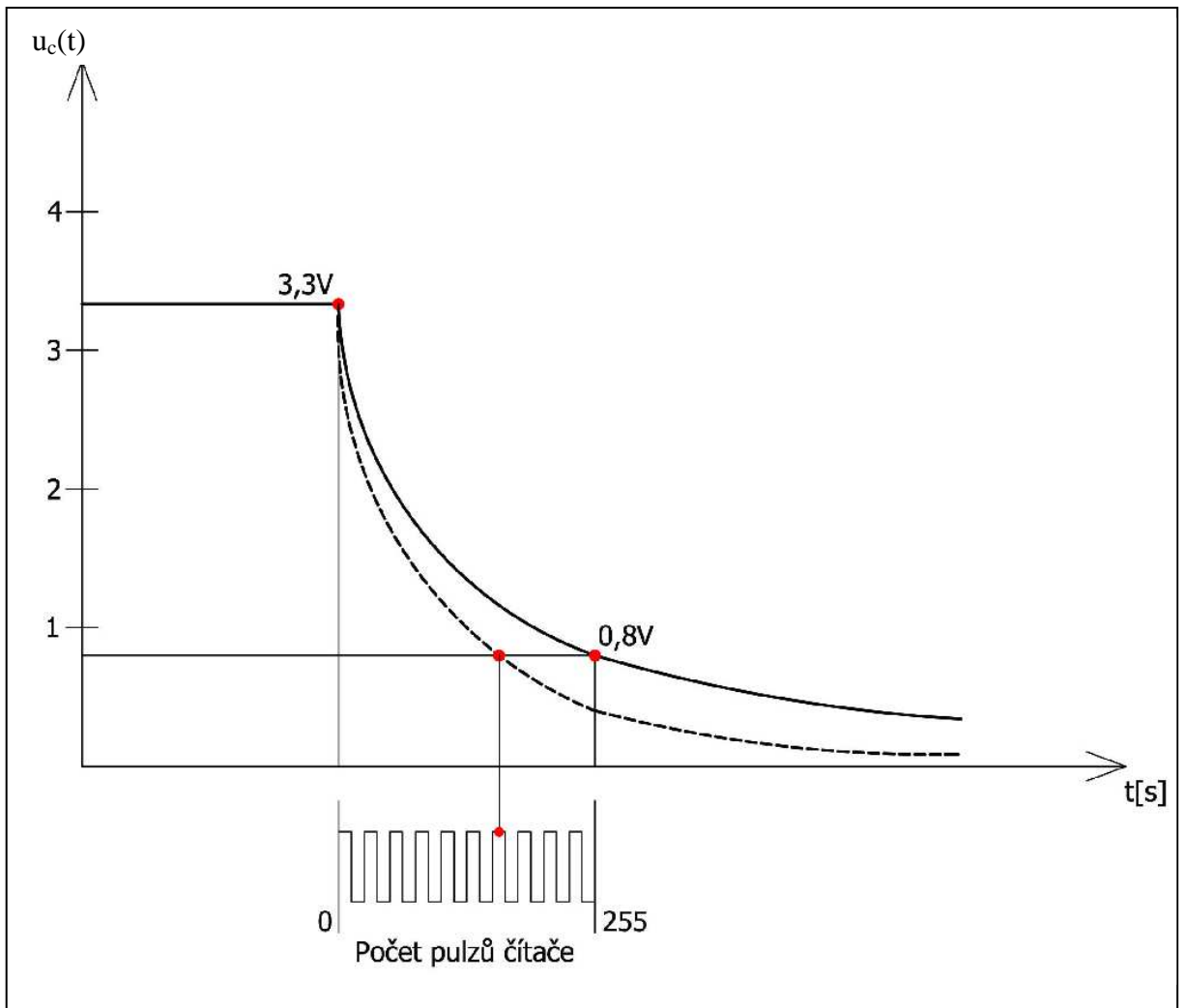
Z *Tabulky č. 7* vyplývá, že hodnota odporu měřicího bodu, který lze při postupném zatěžování změřit, je maximálně 5411 Ω.

Pro výpočet hodnoty odporu R_1 musí být hodnota odporu měřicího bodu R_2 zvolena tak, aby negativně neovlivňovala výsledky měření (nebyla příliš nízká). Aby byla zachována určitá rezerva, byla zvolena hodnota odporu měřicího bodu $R_2 = 7500\Omega$. Toto je hodnota odporu měřicího bodu, při které klesne hodnota napětí $u_c(t) = 0,8V$ a čítač napočítá přesně 255 pulzů. Pokud hodnota odporu R_2 bude vyšší, jak zvolených 7500Ω, čítač vždy napočítá 255 pulzů, což bude elektronickým obvodem vyhodnoceno tak, že se odpor měřicího bodu vlivem malého působícího tlaku nezačal snižovat – měřicí bod není zatížen.

Výpočet hodnoty odporu R_1 tedy vychází z předpokladu, že při napětí $u_c(t) = 0,8V$ (viz *Obr. 5. 3*) je hodnota odporu $R_2 = 7500\Omega$. Z principu funkce elektronického obvodu, který je vysvětlen v kapitole *V/1.1.* vyplývá, že vyhodnocované napětí $u(t)$ klesá v závislosti na rychlosti vybíjení kondenzátoru C (viz *Obr. 5. 1*) a to podle rovnice (22):

$$y = A_1 \cdot e^{-k \cdot x} \quad (21)$$

$$u_c(t) = U \cdot e^{-\frac{t}{R_c \cdot C}} \quad [V] \quad (22)$$



Obr. 5.3 Orientačně znázorněný průběh napětí na kondenzátoru

Z rovnice (23) je nutné vyjádření výsledného odporu R_c , který je paralelní kombinací odporů R_1 a R_2 .

$$\ln u_c(t) = \ln(U \cdot e^{-\frac{t}{R_c \cdot C}}) \quad [\text{V}] \quad (23)$$

$$\ln u_c(t) = \ln U + \ln e^{-\frac{t}{R_c \cdot C}} \quad [\text{V}] \quad (24)$$

$$\ln u_c(t) = \ln U + \left(-\frac{t}{R_c \cdot C}\right) \cdot \ln e \quad [\text{V}] \quad (25)$$

$$\ln u_c(t) = \ln U - \frac{t}{R_c \cdot C} \quad [\text{V}] \quad (26)$$

$$\frac{1}{R_C \cdot C} = \frac{\ln U - \ln u_c(t)}{t} \quad (27)$$

$$R_C = \frac{t}{C \cdot (\ln U - \ln u_c(t))} \quad [\Omega] \quad (28)$$

Jelikož je nutné vypočítat hodnotu odporu R_C , právě když je $u_c(t) = 0,8V$ a čítač načte přesně 255 pulzů, je dána poslední neznámá v rovnici (29), a to čas t .

$$t = 255 \cdot 4 \cdot 10^{-9} = 1,02 \cdot 10^{-6} s \quad (29)$$

Po dosazení do rovnice (28) lze vypočítat hodnotu celkového odporu R_C

$$R_C = \frac{1,02 \cdot 10^{-6}}{2,5 \cdot 10^{-10} \cdot (\ln 3,3 - \ln 0,8)} = \underline{2879\Omega} \quad (30)$$

Jelikož je znám výsledný odpor R_C , je možné z rovnice (32) vypočíst hodnotu odporu R_1 tak, aby hodnota odporu $R_2 = 7500\Omega$.

$$R_C = \frac{R_1 \cdot R_2}{R_1 + R_2} \quad [\Omega] \quad (31)$$

$$R_C \cdot (R_1 + R_2) = R_1 \cdot R_2$$

$$R_1 \cdot R_C + R_2 \cdot R_C = R_1 \cdot R_2$$

$$R_1 \cdot R_2 - R_C \cdot R_1 = R_2 \cdot R_C$$

$$R_1(R_2 - R_C) = R_2 \cdot R_C$$

$$R_1 = \frac{R_2 \cdot R_C}{R_2 - R_C} = \frac{7500 \cdot 2879}{7500 - 2879} = 4673\Omega \quad (32)$$

Dle vypočtené hodnoty byla zvolena hodnota odporu R_1 4,7 k Ω .

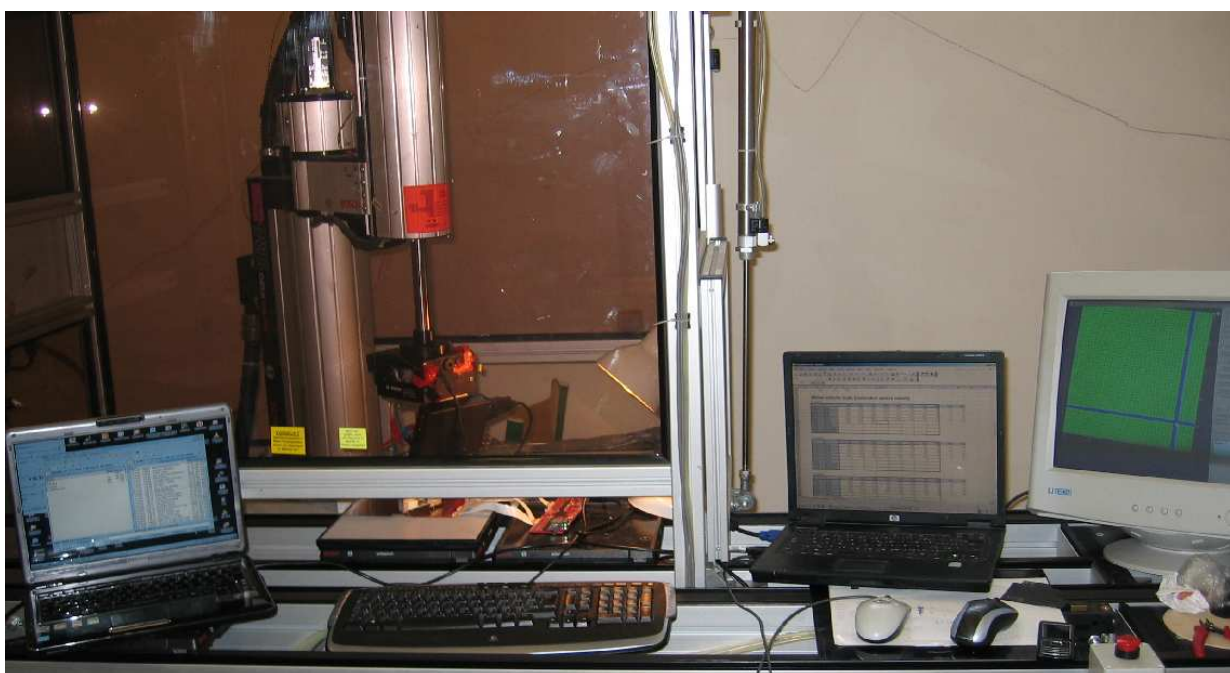
2. Zjištění optimálních rozměrů měřicích elektrod u vybrané konstrukce Plantografu V08

Základním úkolem tohoto měření bylo určit rozměry elektrod, při kterých budou mít měřicí body snímací matice nejlepší měřicí vlastnosti a to především nejvyšší citlivost měření. Vysoká citlivost měření taktilního snímače je důležitá při využití v biomechanice, kde se měří poměrně malé tlaky (od desítek kPa).

K měření jednotlivých měřicích bodů snímací matice byl použit speciální modulární systém pro měření taktilních snímačů (viz kapitola č. IV/2), který měří zatížení měřicího bodu v reálném čase. Tento systém je nainstalovaný na hlavici robota Turbo Scara SR60 a propojen sériovou linkou s PC, kde se ukládají naměřená data (viz kapitola IV/2). Zároveň je pomocí elektronických obvodů a softwarového vybavení (popsáno v kapitole č. V/1) měřen měnící se počet pulzů čítače, který může nabývat hodnot od 0 do 255, což reprezentuje měření proměnného odporu měřicích bodů.

Při tomto měření nebylo použito přímé měření měnícího se odporu měřicího bodu, ale měření počtu pulzů čítače elektronického obvodu, jelikož je důležité, jak se chová celý systém jako celek, a byly tak eliminovány případné nelineární závislosti v elektronických obvodech.

Celé měřicí pracoviště pro zjištění optimálního tvaru elektrod je zobrazeno na *Obr. 5.4*

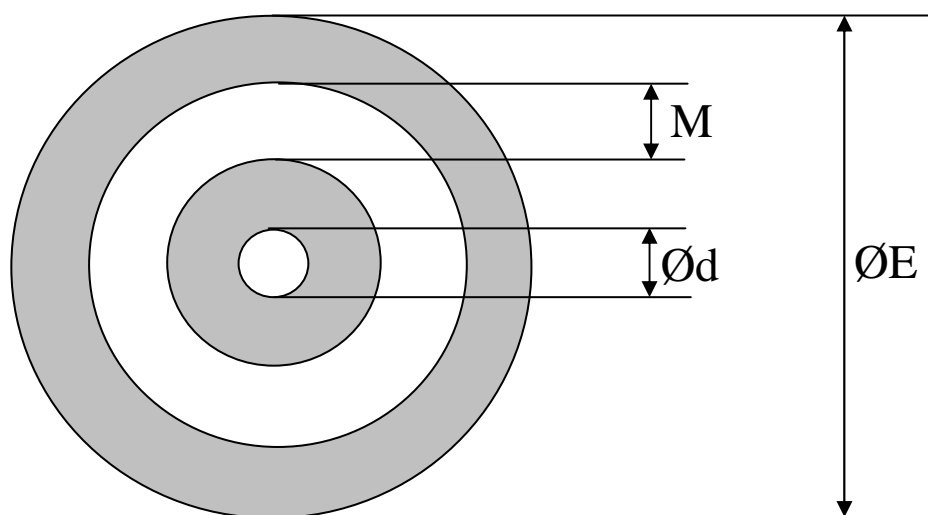


Obr. 5.4 Měřicí pracoviště pro zjištění optimálních rozměrů měřicích elektrod

Při určování optimálních rozměrů elektrod bylo změřeno dohromady šest různých konstrukcí snímací matice, a to o rozměrech:

1. $\varnothing E=2\text{mm}$, $\varnothing d=0,4\text{mm}$, $M=0,1\text{mm}$ – označení „**LH**“
2. $\varnothing E=2\text{mm}$, $\varnothing d=0,1\text{mm}$, $M=0,1\text{mm}$ – označení „**PH**“
3. $\varnothing E=2,5\text{mm}$, $\varnothing d=0,4\text{mm}$, $M=0,25\text{mm}$ – označení „**LD**“
4. $\varnothing E=2,5\text{mm}$, $\varnothing d=0,1\text{mm}$, $M=0,25\text{mm}$ – označení „**PD**“
5. $\varnothing E=3,5\text{mm}$, $\varnothing d=0,4\text{mm}$, $M=0,25\text{mm}$ – oddělené měřicí body – označení „**OB**“
6. $\varnothing E=3,5\text{mm}$, $\varnothing d=0,4\text{mm}$, $M=0,25\text{mm}$ – spojené měřicí body – označení „**SB**“

Rozměry jsou popsány na *Obr. 5.5*.



Obr. 5.5 Rozměry měřících elektrod

U konstrukce SB a OB jsou rozměry elektrod stejné. Liší se v tom, že konstrukce OB má vodivý elastomer, pomocí kterého se převádí působící síla na změnu odporu, pouze přímo v měřících bodech a konstrukce SB má vodivý elastomer po celé ploše snímací matice.

2.1. Obecný postup při měření všech konstrukcí elektrod

Měření všech typů elektrod probíhal tak, že hrot modulárního systému o průměru 5 mm za pomoci robota působil přímo na jeden měřicí bod a jeho těsné okolí tlakem v rozmezí od 25,5 kPa do 493,5 kPa. Zároveň byl měřen měnící se počet pulzů čítače právě zatěžovaného bodu, a to při zatížení i odlehčení. Hodnota tlaku 25,5 kPa je hodnota, od které se u většiny konstrukcí začal snižovat počet naměřených pulzů čítače (vysvětlení viz kapitola V/1).

Je zapotřebí zdůraznit, že v následujících měřeních (popsaných v dalších kapitolách) snižování počtu naměřených pulzů snímače vlastně reprezentuje snižující se elektrický odpor měřicího bodu.

Každá konstrukce byla proměřena tímto způsobem:

- u každé konstrukce byly změřeny tři různé měřicí body
- každý bod byl změřen 5 x za sebou v rozsahu tlaků 25,5 kPa – 493,5 kPa (v tomto rozsahu byl změřen počet pulzů čítače pro 10 hodnot tlaku) – zatížení
- každý bod byl změřen 5 x za sebou v rozsahu tlaků 25,5 kPa – 493,5 kPa (v tomto rozsahu byl změřen počet pulzů čítače pro 10 hodnot tlaku) – odlehčení

2.2. Měření elektrod – označení „LH“

Obecný postup měření elektrod s označením „LH“ je popsán v kapitole V/2.1. Podrobný výpis naměřených hodnot je uveden v Příloze E. Po výpočtu průměrných naměřených hodnot a jejich statistickém vyhodnocení z měření jednotlivých bodů (Tabulka č. 9) je patrné, že při působení tlaku 25,5 kPa na měřicí bod ke snížení počtu načtených kmitů čítače (pokles odporu měřicího bodu pod 7500 Ω) u této konstrukce ještě nedochází, a to ani u jednoho z měřených bodů. K významnému snížení počtu pulzů načtených čítačem dochází až při tlaku 61,1 kPa, kdy počet načtených kmitů čítače klesl až na hodnotu 227,1.

V grafu č. 4, kde jsou znázorněny průměrné hodnoty počtu kmitů čítače z jednotlivých bodů při různém působícím tlaku a je vidět, že charakteristika exponenciálně klesá. Hodnoty naměřené při zatěžování a odlehčování se při stejném působícím tlaku nijak výrazně neliší.

Tímto měřením bylo zjištěno, že se liší hodnoty odporu jednotlivých bodů i jednotlivých měření pro stejné zatížení, avšak tyto odchylky nejsou nijak zásadního charakteru (viz. Příloha E). Tyto odchylky měření způsobují různé vlivy, a to zejména nehomogenita elastomeru (vodivý elastomer není dokonale homogenní a odpor jednotlivých měřicích bodů se může při stejném zatížení lišit, což se nejvýrazněji projevuje při malých zatíženích) a nepřesnosti v nastavení působícího tlaku ($\pm 0,13$ kPa).

Statistické vyhodnocení naměřených hodnot

Při statistickém vyhodnocení naměřených hodnot byly vypočteny nejistoty měření typu A, B a C, dle postupu uvedeného v kapitole IV/4.2.

Zde je uveden konkrétní příklad výpočtu statistického vyhodnocení naměřených hodnot, pro působící tlak 61,1 kPa při zatěžování.

Zatěžování – působící tlak 61,1 kPa			
i	$PP\check{C}_i$	$(PP\check{C}_i - \overline{PP\check{C}})$	$(PP\check{C}_i - \overline{PP\check{C}})^2$
1	229	1,87	3,48
2	233	5,87	34,42
3	221	-6,13	37,62
4	228	0,87	0,75
5	227	-0,13	0,02
6	230	2,87	8,22
7	231	3,87	14,95
8	219	-8,13	66,15
9	227	-0,13	0,02
10	231	3,87	14,95
11	229	1,87	3,48
12	232	4,87	23,68
13	219	-8,13	66,15
14	226	-1,13	1,28
15	225	-2,13	4,55
n = 15	$\Sigma = 3407$	$\Sigma = 0$	$\Sigma = 279,73$

Tabulka č. 8 Naměřené hodnoty při zatěžování – působící tlak 61,1 kPa elektrody „LH“

Vysvětlivky: $PP\check{C}_i$ - počet kmitů načtených čítačem při jednom konkrétním měření
 $\overline{PP\check{C}}$ – aritmetický průměr počtu kmitů načtených snímačem ze všech 15 měření

Výpočet průměrné hodnoty odporu:

$$\overline{PP\check{C}} = \frac{\sum_{i=1}^n y_i}{n} = \frac{\sum_{i=1}^{15} PP\check{C}_i}{15} = \frac{3407}{15} = \underline{227,133} \quad [-] \quad (33)$$

Výběrový rozptyl naměřených hodnot:

$$s^2(y_i) = \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}{n-1} = \frac{\sum_{i=1}^{15} (PP\check{C}_i - \overline{PP\check{C}})^2}{n-1} = \frac{279,73}{14} = \underline{19,98} \quad [-] \quad (34)$$

Rozptyl výběrových průměrů:

$$s^2(\bar{y}) = \frac{s^2(y_i)}{n} = \frac{19,98}{15} = \underline{1,332} \quad [-] \quad (35)$$

Směrodatná odchylka výběrových průměrů – Standardní nejistota typu A:

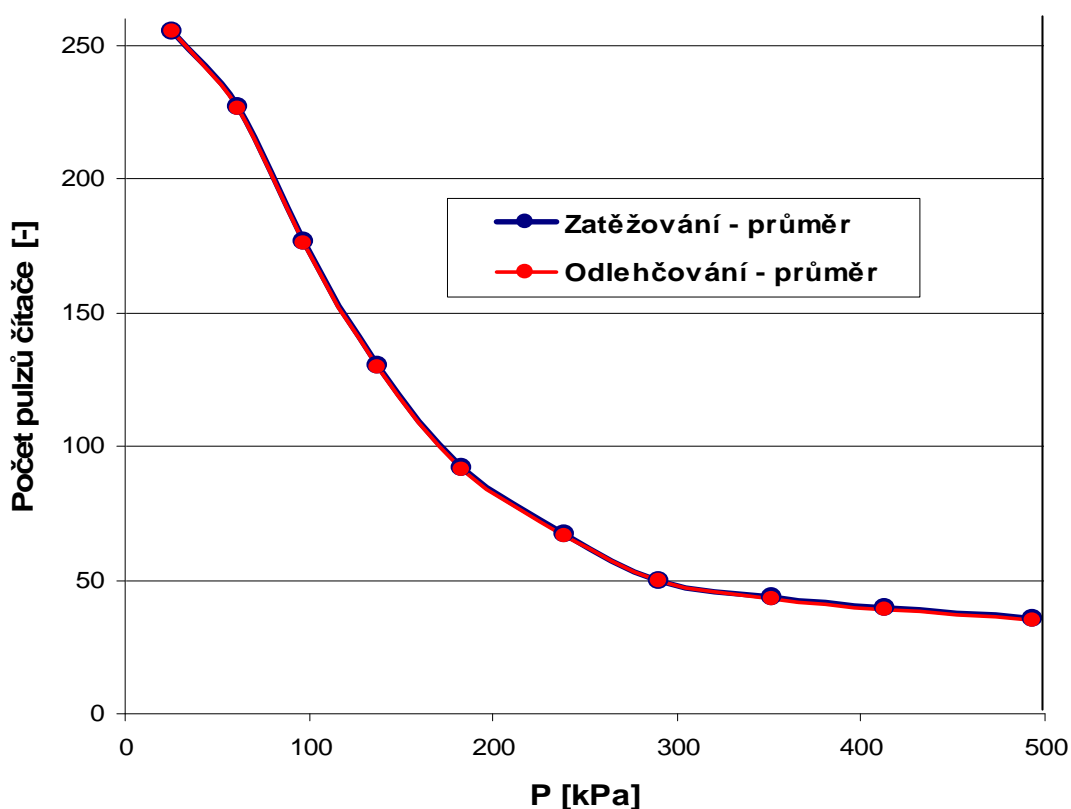
$$u_A \equiv s(\bar{y}) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}{n \cdot (n-1)}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{15} (PP\check{C}_i - \overline{PP\check{C}})^2}{n \cdot (n-1)}} = \sqrt{\frac{279,73}{15 \cdot 14}} = \underline{1,15} \quad [-] \quad (36)$$

Zatěžování										
P [kPa]	25,5	61,1	96,77	137,5	183,3	239,3	290,3	351,4	412,5	493,5
PPČ - průměr [-]	255,00	227,13	176,73	130,13	91,73	67,14	50,00	43,53	39,67	35,53
Nejistota U _A [-]	0,00	1,15	1,46	1,88	1,42	1,11	1,49	1,60	0,89	0,89
Výběrový rozptyl [-]	0,00	19,98	31,78	53,27	30,21	18,39	33,29	38,55	11,95	11,84
Výběr. směr. odch. [-]	0,00	4,47	5,64	7,30	5,50	4,29	5,77	6,21	3,46	3,44

Odlehčování										
P [kPa]	25,5	61,1	96,77	137,5	183,3	239,3	290,3	351,4	412,5	493,5
PPČ - průměr [-]	255,00	226,60	176,20	129,60	91,20	66,61	49,47	43,00	39,13	35,00
Nejistota U _A [-]	0,00	1,05	1,28	1,69	1,27	1,18	1,22	1,54	0,85	0,77
Výběrový rozptyl [-]	0,00	16,42	24,62	42,99	24,05	20,93	22,43	35,45	10,86	8,88
Výběr. směr. odch. [-]	0,00	1,09	1,64	2,87	1,60	1,40	1,50	2,36	0,72	0,59

Tabulka č. 9 Průměrné hodnoty z měření elektrod „LH“ a statistické vyhodnocení

Po statistickém vyhodnocení byla vypočtena maximální standardní nejistota typu A 1,88 pulzů čítače při „zatěžování“ a působícím tlaku 137,5 kPa na měřicí bod (viz Tabulka č. 9). Při zvyšování působícího tlaku měřicí bod nejistota typu A až na výjimky postupně mírně klesala, z toho vyplývá, že přesnost měření je lepší spíše při vyšších zatíženích, kde charakteristika není tak strmá a neuplatňuje se takovým způsobem nehomogenita elastomeru, jako u nižších hodnot působícího tlaku.



Graf č. 4 Grafické znázornění průměrných hodnot z měření elektrod „LH“

2.3. Měření elektrod – označení „PH“

Obecný postup měření elektrod s označením „PH“ je popsán v kapitole V/2.1. Podrobný výpis naměřených hodnot je uveden v Příloze F. Z naměřených hodnot vyplývá, že při působení tlaku 25,5 kPa na měřicí bod ke snížení počtu načtených kmitů čítačem došlo pouze u jednoho měřicího bodu, a to pouze čtyřikrát z deseti měření. U ostatních měřicích bodů došlo ke snížení počtu kmitů až při tlaku 61,1 kPa, takže tento typ konstrukce měřicích elektrod je schopen spolehlivě měřit tlak až okolo 60 kPa. Po výpočtu průměrných

naměřených hodnot a jejich statistickém vyhodnocení z měření jednotlivých bodů (*Tabulka č. 10*) je patrné, že při dalším zvyšování tlaku na měřicí body začne počet pulzů načtených čítačem až při působícím tlaku 137,5 kPa. Hodnoty naměřené při zatěžování a odlehčování při stejném působícím tlaku se zásadněji lišily pouze do tlaku 183,3 kPa. Do tohoto tlaku je vidět mezi zatížením a odlehčením mírná hystereze (*viz Graf č 5*), od tlaku 239,3 kPa do 493,5 kPa je hystereze mezi zatížením a odlehčením zanedbatelná.

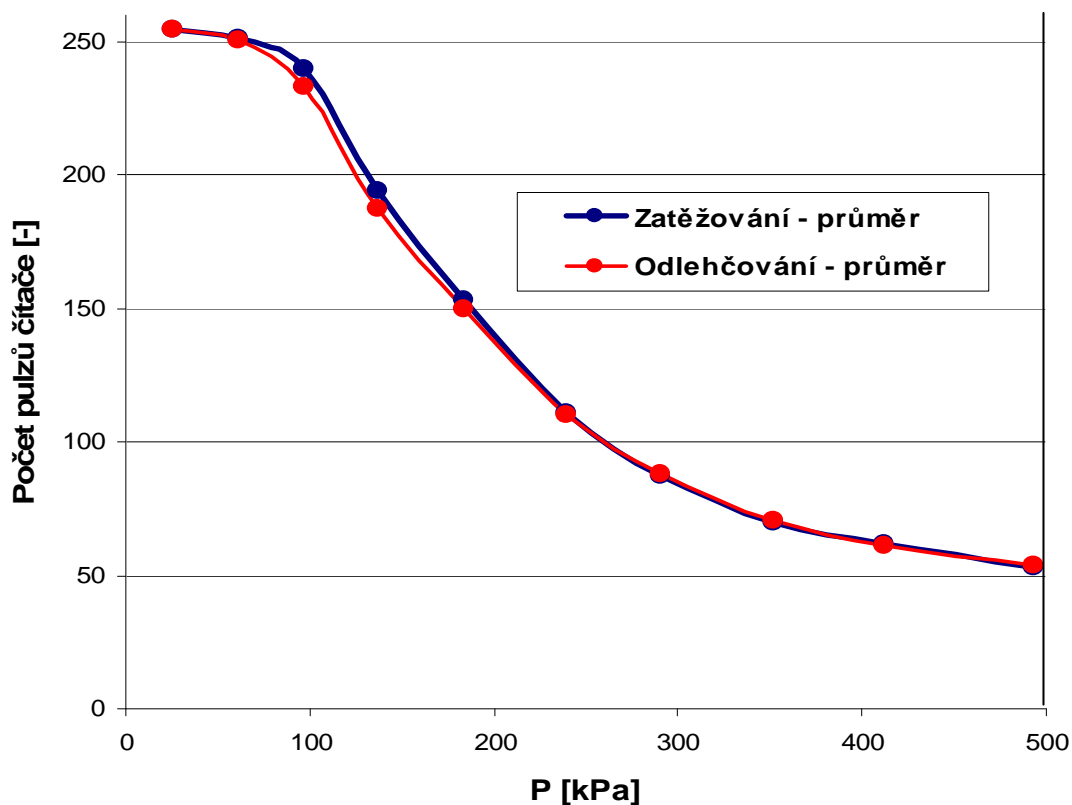
Tímto měřením bylo zjištěno, že se liší hodnoty odporu jednotlivých bodů i jednotlivých měření pro stejné zatížení, avšak tyto odchylky nejsou nijak zásadního charakteru (*viz. Příloha F*). Tyto odchylky měření způsobují různé vlivy, a to zejména nehomogenita elastomeru (vodivý elastomer není dokonale homogenní a odpor jednotlivých měřicích bodů se může při stejném zatížení lišit, což se nejvýrazněji projevuje při malých zatíženích) a nepřesnosti v nastavení působícího tlaku ($\pm 0,13$ kPa).

Zatěžování										
P [kPa]	25,5	61,1	96,77	137,5	183,3	239,3	290,3	351,4	412,5	493,5
PPČ - průměr [-]	254,7	251,1	239,6	194,5	152,9	111,0	87,7	70,2	61,6	53,3
Nejistota U_A [-]	0,15	0,97	2,80	4,31	3,35	2,09	2,16	1,65	2,05	1,95
Výběrový rozptyl [-]	0,35	14,09	117,35	278,68	167,98	65,29	69,98	40,88	63,09	57,22
Výběr. směr. odch. [-]	0,59	3,75	10,83	16,69	12,96	8,08	8,37	6,39	7,94	7,56

Odlehčování										
P [kPa]	25,5	61,1	96,77	137,5	183,3	239,3	290,3	351,4	412,5	493,5
PPČ - průměr [-]	254,93	250,33	233,34	187,20	149,86	110,33	88,06	70,47	61,00	53,67
Nejistota U_A [-]	0,09	1,51	5,04	6,17	5,13	1,89	2,02	1,67	2,12	1,99
Výběrový rozptyl [-]	0,11	34,26	380,34	571,05	394,74	53,71	61,12	41,92	67,36	59,14
Výběr. směr. odch. [-]	0,01	2,28	25,36	38,07	26,32	3,58	4,07	2,79	4,49	3,94

Tabulka č. 10 Průměrné hodnoty z měření elektrod „PH“ a statistické vyhodnocení

Statistické vyhodnocení bylo provedeno stejným způsobem jako v kapitole V/2.2. všechny vypočtené hodnoty jsou uvedeny v příloze F. Z tabulky č. 10 vyplývá, že maximální standardní nejistota typu A je 6,17 pulzů čítače při „odlehčování“ a působícím tlaku 137,5 kPa na měřicí bod. Při zvyšování působícího tlaku měřicí bod nejistota typu A postupně mírně klesá, z toho vyplývá, že přesnost měření je lepší spíše při vyšších zatíženích, kde charakteristika není tak strmá a neuplatňuje se takovým způsobem nehomogenita elastomeru, jako u nižších hodnot působícího tlaku.



Graf č. 5 Grafické znázornění průměrných hodnot z měření elektrod „PH“

2.4. Měření elektrod – označení „LD“

Obecný postup měření elektrod s označením „LD“ je popsán v kapitole V/2.1. Podrobný výpis naměřených hodnot je uveden v Příloze G. Z naměřených hodnot vyplývá, že při působení tlaku 25,5 kPa na měřicí bod u tohoto typu elektrod dochází ke snížení počtu načtených kmitů čítačem sice u všech měřicích bodů, ale zdaleka ne u všech jednotlivých měření. Z toho vyplývá, že tato konstrukce měřicích elektrod sice reaguje na působící tlak 25,5 kPa už u všech měřicích bodů, ale není schopna tento tlak měřit úplně spolehlivě. Po výpočtu průměrných naměřených hodnot a jejich statistickém vyhodnocení z měření jednotlivých bodů (*Tabulka č. 11*) je vidět, že při dalším zvyšování tlaku na měřicí body se počet pulzů načtených čítačem dále snižuje. Hodnoty naměřené při zatěžování a odlehčování při stejném působícím tlaku se zásadněji lišily opět pouze do tlaku 183,3 kPa, do tohoto tlaku je vidět mezi zatížením a odlehčením mírná hystereze (*viz Graf č. 6*). Od tlaku 239,3 kPa do 493,5 kPa je hystereze mezi zatížením a odlehčením zanedbatelná.

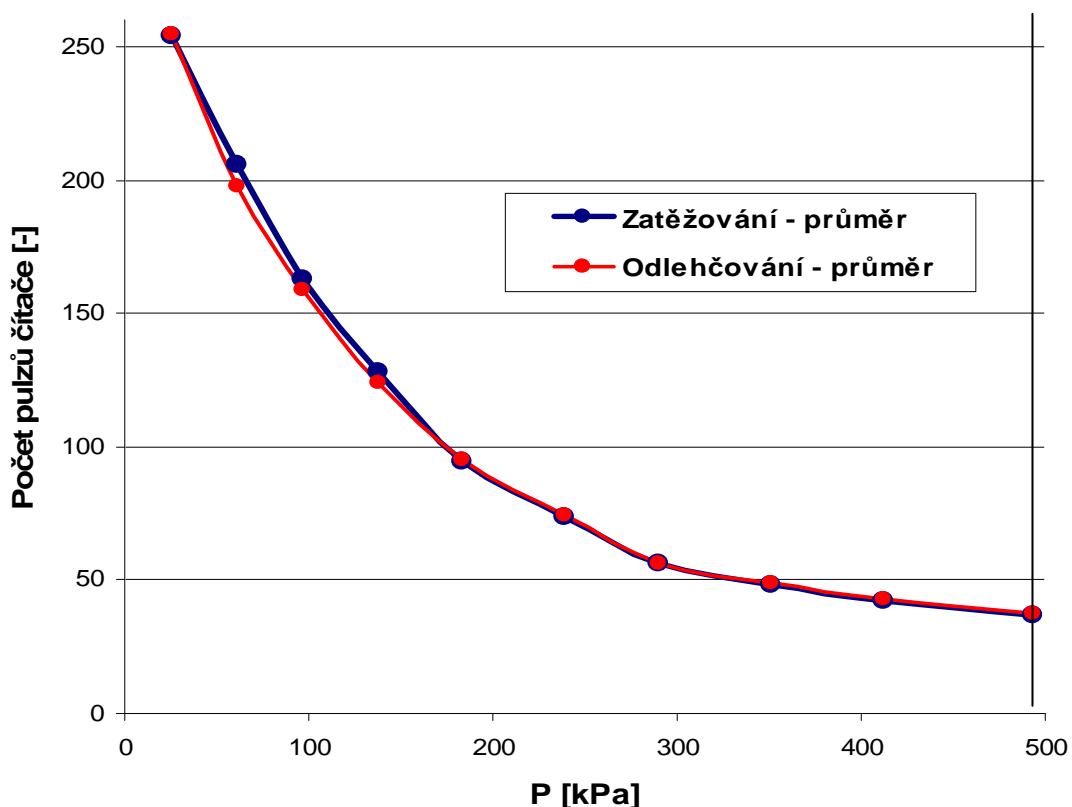
Tímto měřením bylo opět zjištěno, že se liší hodnoty odporu jednotlivých bodů i jednotlivých měření pro stejné zatížení, avšak tyto odchylky nejsou nijak zásadního charakteru (viz. Příloha G). Tyto odchylky měření způsobují různé vlivy, a to zejména nehomogenita elastomeru (vodivý elastomer není dokonale homogenní a odpor jednotlivých měřicích bodů se může při stejném zatížení lišit, což se nejvýrazněji projevuje při malých zatíženích) a nepřesnosti v nastavení působícího tlaku ($\pm 0,13$ kPa).

Zatěžování										
P [kPa]	25,5	61,1	96,77	137,5	183,3	239,3	290,3	351,4	412,5	493,5
PPČ - průměr [-]	254,0	205,6	162,7	128,3	94,6	73,5	56,5	48,0	42,1	36,8
Nejistota U_A [-]	0,37	2,24	3,16	1,81	3,69	3,63	2,59	2,58	1,83	1,11
Výběrový rozptyl [-]	2,00	75,40	149,67	48,94	203,83	198,12	100,84	100,00	50,49	18,46
Výběr. směr. odch. [-]	1,41	8,68	12,23	7,00	14,28	14,08	10,04	10,00	7,11	4,30

Odlehčování										
P [kPa]	25,5	61,1	96,77	137,5	183,3	239,3	290,3	351,4	412,5	493,5
PPČ - průměr [-]	254,47	197,67	158,93	123,80	95,46	74,47	56,47	49,13	42,60	37,60
Nejistota U_A [-]	0,23	4,44	5,08	4,27	4,15	4,55	2,97	2,42	1,84	1,29
Výběrový rozptyl [-]	0,79	295,96	387,85	273,54	258,50	311,05	132,41	87,50	50,71	24,80
Výběr. směr. odch. [-]	0,05	19,73	25,86	18,24	17,23	20,74	8,83	5,83	3,38	1,65

Tabulka č. 11 Průměrné hodnoty z měření elektrod „LD“ a statistické vyhodnocení

Statistické vyhodnocení bylo provedeno stejným způsobem jako v kapitole V/2.2. všechny vypočtené hodnoty jsou uvedeny v příloze G. Z tabulky č. 11 vyplývá, že maximální standardní nejistota typu A je 5,08 pulzů čítače při „odlehčování“ a působícím tlaku 96,77 kPa. Při zvyšování působícího tlaku měřicí bod nejistota typu A postupně mírně klesá, z toho vyplývá, že přesnost měření je lepší při vyšších zatíženích, kde charakteristika není tak strmá a neuplatňuje se takovým způsobem nehomogenita elastomeru, jako u nižších hodnot působícího tlaku.



Graf č. 6 Grafické znázornění průměrných hodnot z měření elektrod „LD“

2.5. Měření elektrod – označení „PD“

Obecný postup měření elektrod s označením „PD“ je popsán v kapitole V/2.1. Podrobný výpis naměřených hodnot je uveden v Příloze H. Z naměřených hodnot vyplývá, že při působení tlaku 25,5 kPa na měřicí bod u tohoto typu elektrod dochází ke snížení počtu načtených kmitů čítačem u všech měřicích bodů a několikrát i pod hodnotu 250, avšak u třech jednotlivých měření z patnácti zůstala hodnota počtu pulzů načtených čítačem na hodnotě 255, takže tato konstrukce je sice schopna měřit působící tlak 25,5 kPa, ale spolehlivost měření ještě není úplně stoprocentní. Po výpočtu průměrných naměřených hodnot a jejich statistickém vyhodnocení z měření jednotlivých bodů (Tabulka č. 12) je vidět, že při dalším zvyšování tlaku na měřicí body se počet pulzů načtených čítačem dále snižuje (i když ne tak razantně jako u elektrod typu „LH“). Hodnoty naměřené při zatěžování a odlehčování při stejném působícím tlaku se zásadněji lišily opět pouze do tlaku 183,3 kPa. Do tohoto tlaku je vidět mezi zatížením a odlehčením mírná hystereze, od tlaku 239,3 kPa do 493,5 kPa je hystereze mezi zatížením a odlehčením zanedbatelná (viz Graf č. 7).

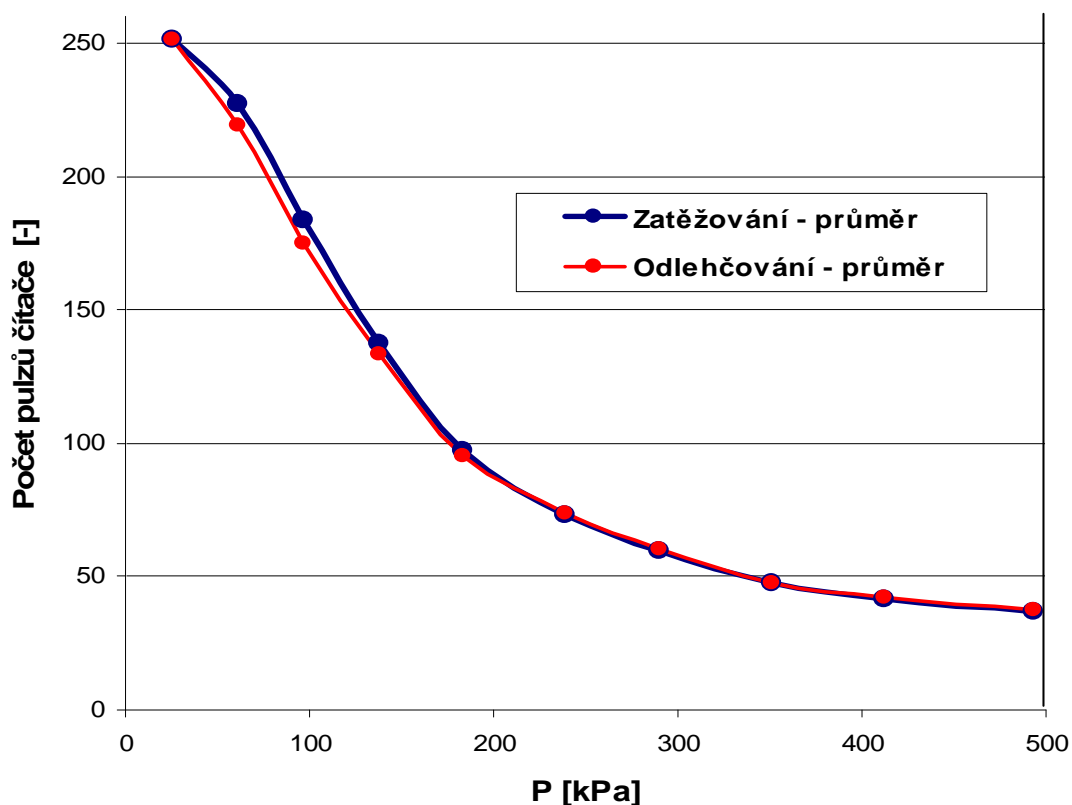
Tímto měřením bylo zjištěno, že se liší hodnoty odporu jednotlivých bodů i jednotlivých měření pro stejné zatížení, avšak tyto odchylky nejsou nijak zásadního charakteru (viz. Příloha H). Tyto odchylky měření způsobují různé vlivy, a to zejména nehomogenita elastomeru (vodivý elastomer není dokonale homogenní a odpor jednotlivých měřicích bodů se může při stejném zatížení lišit, což se nejvýrazněji projevuje při malých zatíženích) a nepřesnosti v nastavení působícího tlaku ($\pm 0,13$ kPa).

Zatěžování										
P [kPa]	25,5	61,1	96,77	137,5	183,3	239,3	290,3	351,4	412,5	493,5
PPČ - průměr [-]	251,5	226,9	183,5	137,5	97,1	73,0	59,7	47,5	41,7	36,7
Nejistota U_A [-]	0,61	2,71	2,86	2,37	1,63	2,06	1,37	1,17	0,99	0,52
Výběrový rozptyl [-]	5,55	110,55	122,99	84,56	39,98	63,57	28,21	20,69	14,81	4,06
Výběr. směr. odch. [-]	2,36	10,51	11,09	9,20	6,32	7,97	5,31	4,55	3,85	2,02

Odlehčování										
P [kPa]	25,5	61,1	96,77	137,5	183,3	239,3	290,3	351,4	412,5	493,5
PPČ - průměr [-]	251,53	219,13	175,13	133,07	94,87	73,67	60,00	47,60	42,00	37,20
Nejistota U_A [-]	0,70	3,35	3,94	2,77	2,08	1,52	1,45	1,24	1,05	0,54
Výběrový rozptyl [-]	7,27	168,20	233,23	115,29	65,06	34,57	31,65	23,12	16,69	4,41
Výběr. směr. odch. [-]	0,48	11,21	15,55	7,69	4,34	2,30	2,11	1,54	1,11	0,29

Tabulka č. 12 Průměrné hodnoty z měření elektrod „PD“ a statistické vyhodnocení

Statistické vyhodnocení bylo provedeno stejným způsobem jako v kapitole V/2.2. Všechny vypočtené hodnoty jsou uvedeny v příloze H. Z tabulky č. 12 vyplývá, že maximální standardní nejistota typu A je 3,94 pulzů čítače při „odlehčování“ a působícím tlaku 96,77 kPa. Při zvyšování působícího tlaku měřicí bod nejistota typu A postupně mírně klesá, z toho vyplývá, že přesnost měření je lepší při vyšších zatíženích, kde charakteristika není tak strmá a neuplatňuje se takovým způsobem nehomogenita elastomeru, jako u nižších hodnot působícího tlaku.



Graf č. 7 Grafické znázornění průměrných hodnot z měření elektrod „PD“

2.6. Měření elektrod – označení „OB“

Obecný postup měření elektrod s označením „OB“ je popsán v kapitole V/2.1. Podrobný výpis naměřených hodnot je uveden v Příloze I. Z naměřených hodnot vyplývá, že při působení tlaku 25,5 kPa na měřicí bod u tohoto typu elektrod dochází ke snížení počtu načtených kmitů čítačem vždy alespoň na hodnotu 254, což znamená, že tento typ elektrod je schopen spolehlivě měřit tlak o hodnotě 25,5 kPa. Po výpočtu průměrných naměřených hodnot a jejich statistickém vyhodnocení z měření jednotlivých bodů (Tabulka č. 13) je vidět, že při dalším zvyšování tlaku na měřicí body se počet pulzů načtených čítačem dále snižuje, i když do tlaku 61,1 kPa je pokles volnější. Jelikož jsou při tomto měření (elektrody „OB“) umístěny na měřicích bodech pouze elementy elastomeru a elastomer není po celé ploše matice senzorů, dá se tento volnější pokles vysvětlit tím, že při nízké hodnotě působícího tlaku nebyl element elastomeru přesně umístěn přes celou plochu měřicího bodu a tím byla negativně ovlivněna jeho citlivost. Při zvyšujícím se tlaku na měřicí bod se elastomer „roztáhl“ na celou plochu měřicího bodu a citlivost již nebyla tímto ovlivňována.

Hodnoty naměřené při zatěžování a odlehčování se při stejném působícím tlaku se v celém měřicím rozsahu tlaků nijak výrazně neliší (viz Graf č. 8).

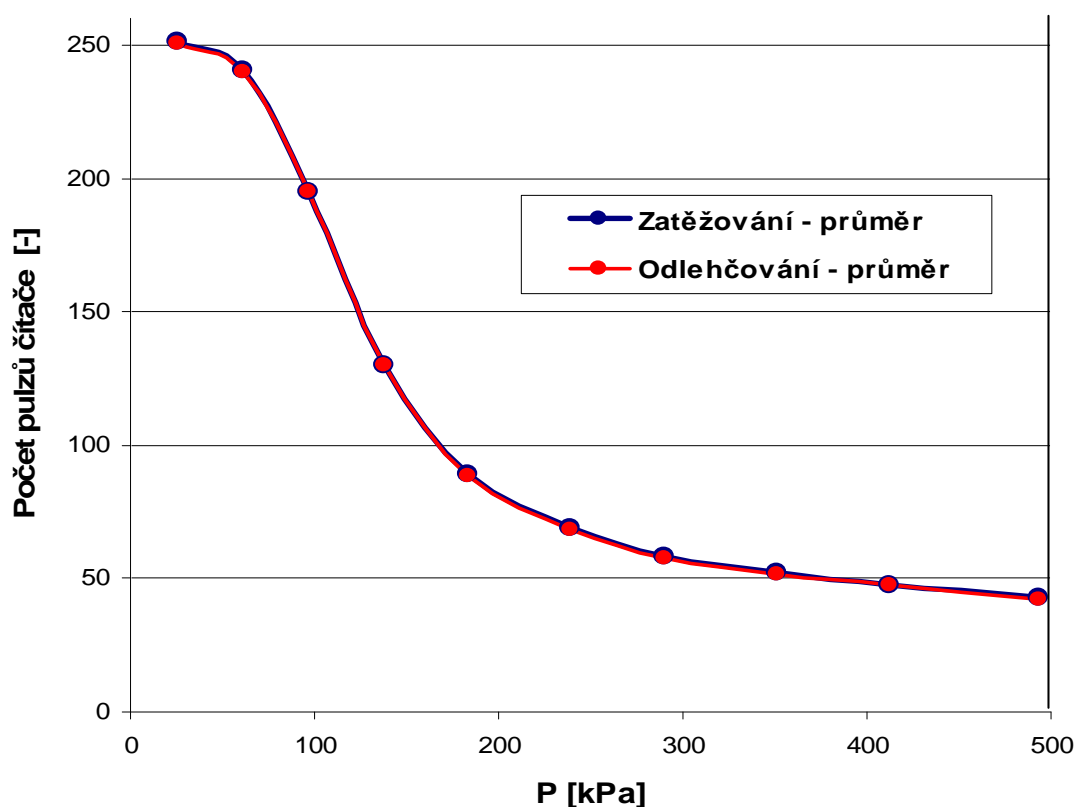
Tímto měřením bylo zjištěno, že se liší hodnoty odporu jednotlivých bodů i jednotlivých měření pro stejné zatížení, avšak tyto odchylky nejsou nijak zásadního charakteru (viz. Příloha D). Tyto odchylky měření způsobují různé vlivy, a to zejména nehomogenita elastomeru (vodivý elastomer, ze kterého jsou nařezány elementy, není dokonale homogenní a odpor jednotlivých měřicích bodů se může při stejném zatížení lišit, což se nejvýrazněji projevuje při malých zatíženích) a nepřesnosti v nastavení působícího tlaku ($\pm 0,13$ kPa).

Zatěžování										
P [kPa]	25,5	61,1	96,77	137,5	183,3	239,3	290,3	351,4	412,5	493,5
PPČ - průměr [-]	251,0	240,3	195,3	130,3	88,9	68,7	58,2	51,9	47,8	42,8
Nejistota U_A [-]	0,79	1,44	1,89	2,28	1,86	1,26	2,18	1,22	0,73	0,76
Výběrový rozptyl [-]	9,29	30,92	53,50	78,21	52,12	23,92	71,31	22,50	8,03	8,60
Výběr. směr. odch. [-]	3,05	5,56	7,31	8,84	7,22	4,89	8,44	4,74	2,83	2,93

Odlehčování										
P [kPa]	25,5	61,1	96,77	137,5	183,3	239,3	290,3	351,4	412,5	493,5
PPČ - průměr [-]	250,47	239,73	194,73	129,73	88,33	68,20	57,67	51,40	47,27	42,27
Nejistota U_A [-]	0,74	1,25	1,82	1,81	1,65	1,55	2,03	1,12	0,85	0,71
Výběrový rozptyl [-]	8,14	23,51	49,94	48,94	40,97	36,19	62,11	18,70	10,80	7,66
Výběr. směr. odch. [-]	0,54	1,57	3,33	3,26	2,73	2,41	4,14	1,25	0,72	0,51

Tabulka č. 13 Průměrné hodnoty z měření elektrod „OB“ a statistické vyhodnocení

Statistické vyhodnocení bylo provedeno stejným způsobem jako v kapitole V/2.2. Všechny vypočtené hodnoty jsou uvedeny v příloze I. Z tabulky č. 13 vyplývá, že maximální standardní nejistota typu A je 2,28 pulzů čítače při „zatěžování“ a působení tlakem 137,5 kPa. Při zvyšování působícího tlaku měřicí bod nejistota typu A až na dvě výjimky postupně mírně klesá, z toho vyplývá, že přesnost měření je lepší při vyšších zatíženích, kde charakteristika není tak strmá a neuplatňuje se takovým způsobem nehomogenita elastomeru, jako u nižších hodnot působícího tlaku.



Graf č. 8 Grafické znázornění průměrných hodnot z měření elektrod „OB“

2.7. Měření elektrod – označení „SB“

Obecný postup měření elektrod s označením „SB“ je popsán v kapitole V/2.1. Podrobný výpis naměřených hodnot je uveden v Příloze J. Z naměřených hodnot vyplývá, že při působení tlaku 25,5 kPa na měřicí bod u tohoto typu elektrod dochází ke snížení počtu načtených kmitů čítačem vždy alespoň na hodnotu 254 jako u elektrod „OB“ – mají stejné rozměry. Po výpočtu průměrných naměřených hodnot a jejich statistickém vyhodnocení z měření jednotlivých bodů (Tabulka č. 14) je vidět, že při dalším zvyšování tlaku na měřicí body se počet pulzů načtených čítačem ihned razantně snižuje, ne jako u elektrod „OB“. Při tomto měření byl elastomer po celé ploše matice senzorů, takže jeho poloha byla vždy bezpečně přes celou plochu měřicího bodu a neovlivňovala jeho citlivost.

Hodnoty naměřené při zatěžování a odlehčování se při stejném působícím tlaku v celém měřicím rozsahu tlaků nijak výrazně neliší (viz Graf č. 9).

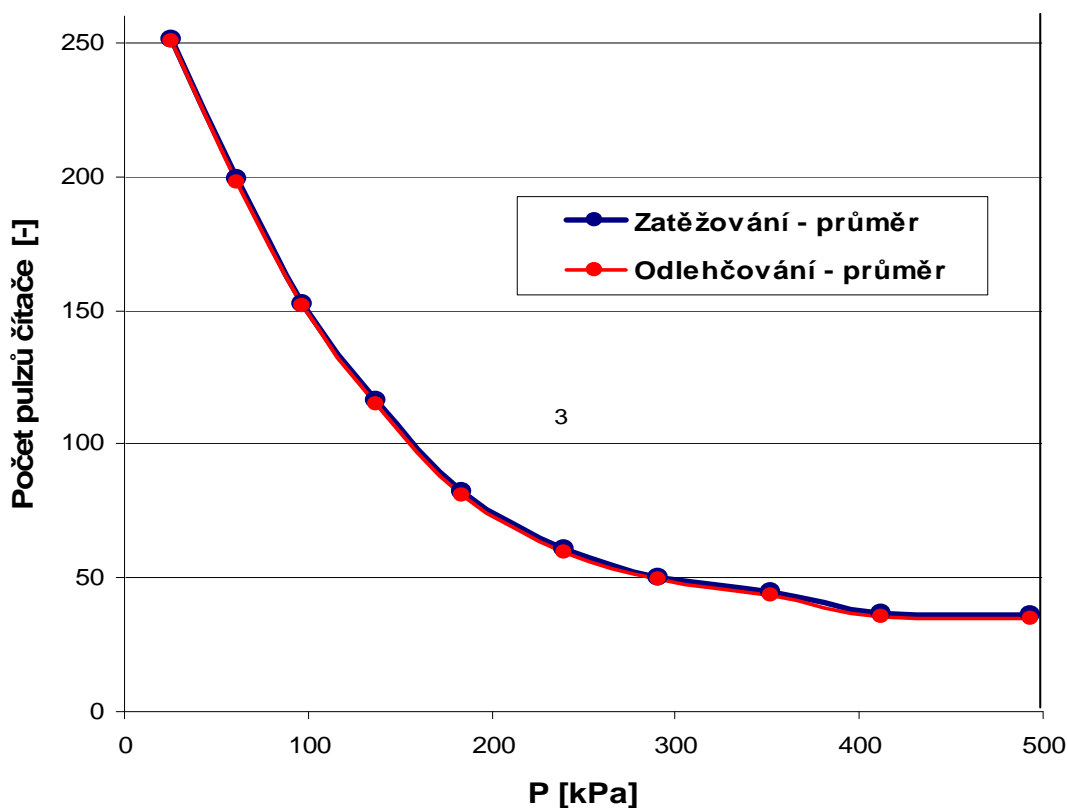
Tímto měřením bylo zjištěno, že se liší hodnoty odporu jednotlivých bodů i jednotlivých měření pro stejné zatížení, avšak tyto odchylky nejsou nijak zásadního

charakteru (viz. Příloha J). Tyto odchylky měření způsobují různé vlivy, a to zejména nehomogenita elastomeru (vodivý elastomer není dokonale homogenní a odpor jednotlivých měřicích bodů se může při stejném zatížení lišit, což se nejvýrazněji projevuje při malých zatíženích) a nepřesnosti v nastavení působícího tlaku ($\pm 0,13$ kPa).

Zatěžování										
P [kPa]	25,5	61,1	96,77	137,5	183,3	239,3	290,3	351,4	412,5	493,5
PPČ - průměr [-]	251,6	199,1	152,6	116,1	82,4	60,7	50,3	44,7	36,8	35,8
Nejistota U_A [-]	0,72	1,45	1,33	1,89	1,47	1,29	1,31	1,05	1,01	1,14
Výběrový rozptyl [-]	7,69	31,55	26,54	53,41	32,54	25,10	25,81	16,64	15,31	19,60
Výběr. směr. odch. [-]	2,77	5,62	5,15	7,31	5,70	5,01	5,08	4,08	3,91	4,43

Odlehčování										
P [kPa]	25,5	61,1	96,77	137,5	183,3	239,3	290,3	351,4	412,5	493,5
PPČ - průměr [-]	250,40	197,93	151,40	114,93	81,20	59,47	49,13	43,53	35,60	34,60
Nejistota U_A [-]	0,76	1,53	1,42	1,95	1,40	1,30	1,24	1,21	1,20	1,19
Výběrový rozptyl [-]	8,66	35,32	30,37	57,32	29,43	25,24	22,95	21,95	21,66	21,37
Výběr. směr. odch. [-]	0,58	2,35	2,02	3,82	1,96	1,68	1,53	1,46	1,44	1,42

Tabulka č. 14 Průměrné hodnoty z měření elektrod „SB“ a statistické vyhodnocení



Graf č. 9 Grafické znázornění průměrných hodnot z měření elektrod „SB“

Statistické vyhodnocení bylo provedeno stejným způsobem jako v kapitole V/2.2. Všechny vypočtené hodnoty jsou uvedeny v příloze J. Z tabulky č. 14 vyplývá, že maximální standardní nejistota typu A je 1,95 pulzů čítače při „odlehčování“ a působení tlakem 137,5 kPa. Při zvyšování působícího tlaku měřicí bod nejistota typu A postupně mírně klesá, z toho vyplývá, že přesnost měření je lepší při vyšších zatíženích, kde charakteristika není tak strmá a neuplatňuje se takovým způsobem nehomogenita elastomeru, jako u nižších hodnot působícího tlaku.

3. Vyhodnocení všech měřených typů elektrod

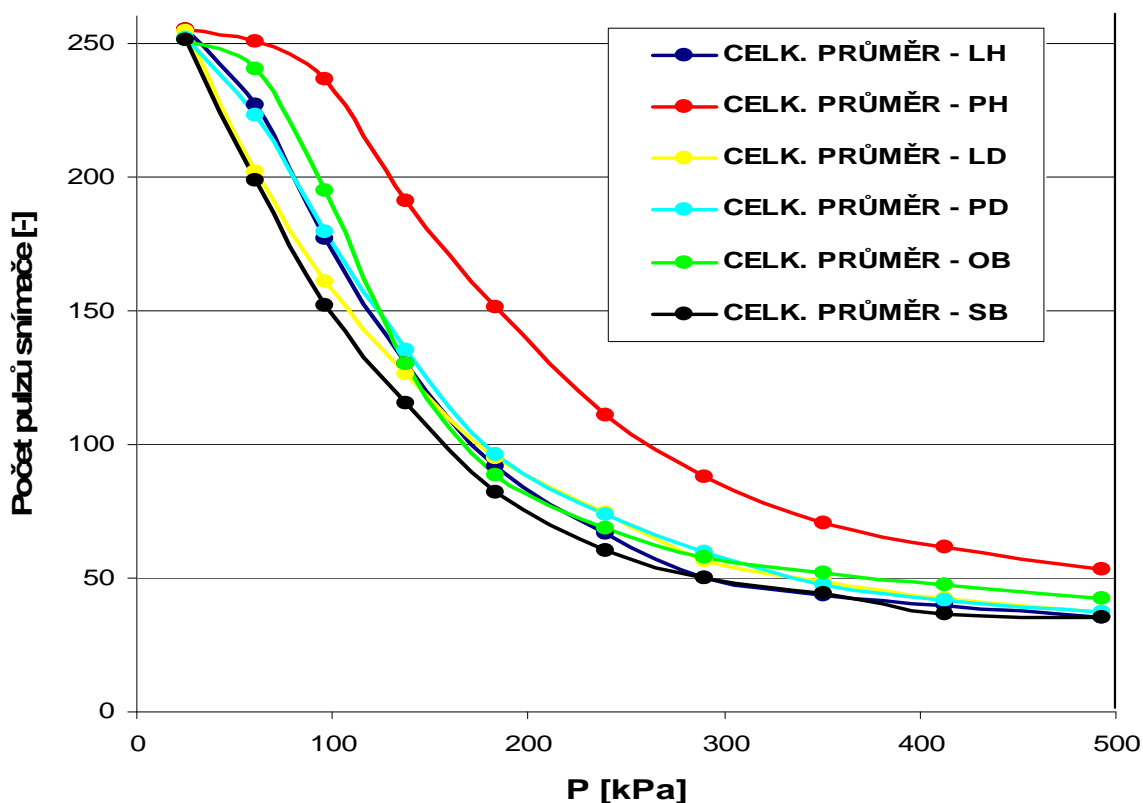
Aby bylo možné vyhodnotit naměřené hodnoty na jednotlivých elektrodách jako celek, je nutné porovnat jejich celkové průměrné hodnoty – jak ze „zatěžování“, tak z „odlehčování“, jak je vidět v *Tabulce č. 15 a Grafu č. 10*.

P [kPa]	25,5	61,1	96,77	137,5	183,3	239,3	290,3	351,4	412,5	493,5
CELK. PRŮMĚR – LH	255,00	226,87	176,47	129,87	91,47	66,87	49,73	43,27	39,40	35,27
CELK. PRŮMĚR – PH	254,83	250,70	236,47	190,83	151,36	110,67	87,86	70,33	61,30	53,47
CELK. PRŮMĚR – LD	254,23	201,63	160,80	126,03	95,03	73,97	56,50	48,57	42,33	37,20
CELK. PRŮMĚR – PD	251,50	223,00	179,30	135,30	96,00	73,33	59,87	47,57	41,83	36,97
CELK. PRŮMĚR – OB	250,73	240,00	195,00	130,00	88,60	68,47	57,93	51,67	47,53	42,53
CELK. PRŮMĚR – SB	251,00	198,53	152,00	115,53	81,80	60,07	49,73	44,13	36,20	35,20

Tabulka č. 15 Celkové průměry naměřených hodnot jednotlivých druhů elektrod

Při vyhodnocení a zjištění optimální konstrukce elektrod se vycházelo z následujících požadavků:

1. konstrukce měřicích elektrod musí být schopná spolehlivě měřit tlak v rozmezí od 25 kPa do 500 kPa
2. konstrukce měřicích elektrod musí mít co nejvyšší citlivost měření – počet pulzů snímače (resp. odpor měřicího bodu) by se měl začít snižovat při co nejnižším působícím tlaku na měřicí bod



Graf č. 10 Celkové průměry naměřených hodnot jednotlivých druhů elektrod

Shrnutí skutečností vyplývajících ze všech naměřených hodnot viz příloh E – J:

- U konstrukce elektrod s označením „LH“ při působícím tlaku 25,5 kPa na měřicí bod vůbec nedochází ke snížení počtu pulzů načtených snímačem, tzn., že tento typ konstrukce elektrod není vůbec schopen měřit tlak okolo 25 kPa.
- U konstrukce elektrod s označením „PH“ při působícím tlaku 25,5 kPa na měřicí bod došlo ke snížení počtu pulzů načtených snímačem pouze u jednoho měřicího bodu. Z toho vyplývá, že u tohoto typu konstrukce elektrod je měření tlaků okolo 25 kPa velice nespolehlivé, jelikož dva měřicí body ze tří vůbec na tento tlak působící na měřicí bod vůbec nereagovaly.
- U konstrukce elektrod s označením „LD“ při působícím tlaku 25,5 kPa na měřicí bod došlo ke snížení počtu pulzů načtených snímačem u každého měřeného bodu alespoň dvakrát z pěti po sobě jdoucích měření. Vyplývá z toho, že u této konstrukce na tlak okolo 25 kPa sice už reaguje každý z měřicích bodů, ale ještě ne zcela spolehlivě při každém měření.

- U konstrukce elektrod s označením „PD“ při působícím tlaku 25,5 kPa na měřicí bod došlo ke snížení počtu pulzů načtených snímačem u každého měřeného bodu a téměř u všech po sobě jdoucích měřeních (až na jedno měření prvního a dvě měření druhého bodu). Z toho vyplývá, že tato konstrukce tlak okolo 25 kPa je již schopna celkem spolehlivě měřit, avšak spolehlivost měření není ještě stoprocentní.
- U konstrukce elektrod s označením „OB“ při působícím tlaku 25,5 kPa na měřicí bod došlo ke snížení počtu pulzů načtených snímačem u každého měřeného bodu a u všech jednotlivých měření. Z toho vyplývá, že tato konstrukce tlak okolo 25 kPa je již schopna spolehlivě měřit – u každého měření měřicí bod reagoval na působící tlak snížením svého odporu.
- U konstrukce elektrod s označením „SB“ při působícím tlaku 25,5 kPa na měřicí bod došlo ke snížení počtu pulzů načtených snímačem u každého měřeného bodu a u všech jednotlivých měření. Z toho vyplývá, že tato konstrukce tlak okolo 25 kPa je již schopna spolehlivě měřit – u každého měření měřicí bod reagoval na působící tlak snížením svého odporu. U této konstrukce byl však pokles počtu pulzů snímače při menších hodnotách působícího tlaku rychlejší než u konstrukce „OB“.

Z výše uvedených požadavků a skutečností, které z měření vyplynuly, jsou zřejmé následující závěry:

- Podle nastavených požadavků se jeví z hlediska citlivosti jako nejlepší konstrukce s označením „SB“, která je schopná spolehlivě měřit celý rozsah působícího tlaku na měřicí bod od 25 kPa do 500 kPa s větším důrazem na spodní hranici rozsahu.
- Z měření elektrod s označením „OB“ a „SB“, které mají stejné rozměry, ale u „OB“ byly elementy vodivého elastomeru pouze v místě měřicích bodů, vyplynulo, že pro spolehlivější měření je vhodné, když je vodivý elastomer po celé ploše matice senzorů, než když jsou jeho elementy jen přímo na měřicích bodech. Nespolehlivost měření (snížení citlivosti měření) se projevuje hlavně při nižších hodnotách působícího tlaku, což způsobuje nepřesná poloha elementu vodivého elastomeru na měřicím bodu (není využita maximální dotyková plocha elektrody

a vodivého elastomeru). Při vyšším působícím tlaku se vodivý elastomer (z důvodu jeho elasticity) již „roztáhne“ na celou plochu elektrod a vliv jeho nepřesného umístění nad měřicím bodem se již přestane uplatňovat.

Obecně lze říci, že pokud nejsou rozměry měřicích elektrod nějak výrazně limitovány, je pro dosažení vyšší citlivosti měření vhodnější zvolit rozměry elektrod tak, aby dotyková plocha elektrod a vodivého elastomeru byla co největší.

4. Aproximace naměřených hodnot u jednotlivých druhů elektrod

Aby bylo možné matematicky popsat závislost počtu pulzů načtených čítačem na působícím tlaku na měřicí bod, je nutné tuto závislost aproximovat. Matematický popis této závislosti je potřebný pro případné další elektronické zpracování naměřených hodnot. Pro aproximaci naměřených hodnot byl použit program Microsoft Excel 2010.

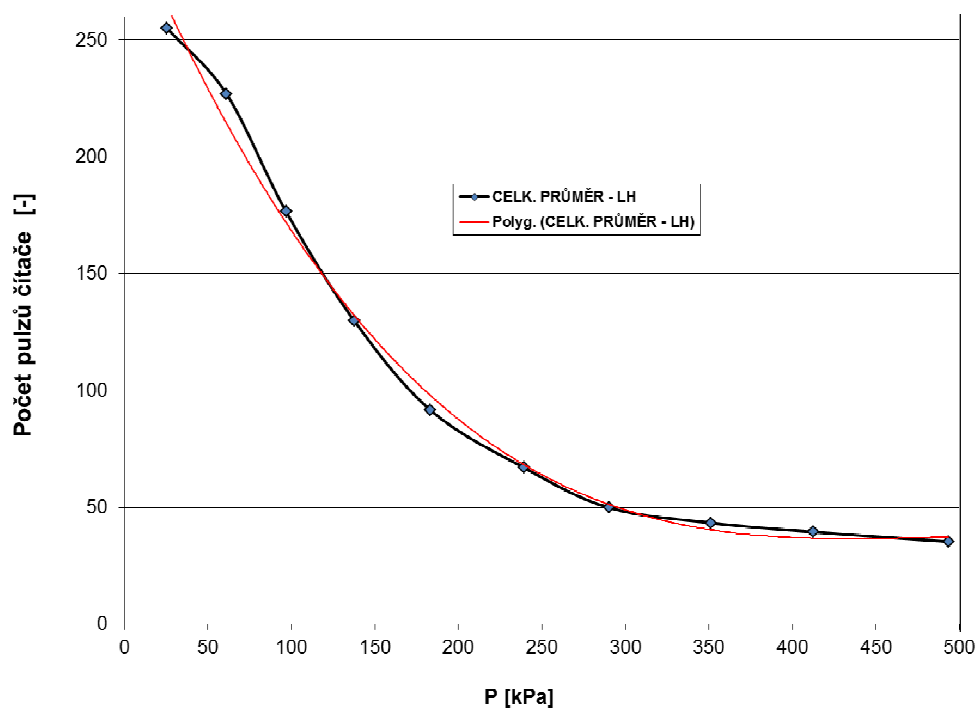
V níže uvedených kapitolách byla vždy vybrána metoda, která nejlépe popisovala trend naměřených hodnot (měla nejvyšší hodnotu spolehlivosti R^2). Bylo vždy vybíráno z těchto typů spojnice trendu naměřených hodnot:

- Exponenciální
- Logaritmický
- Polynomický

4.1. Aproximace naměřených hodnot elektrod – označení „LH“

V grafu č. 11 je vidět:

- celkový průměr všech naměřených hodnot (*postupem dle kapitoly V/2.1.*) závislosti počtu pulzů načtených čítačem na působícím tlaku u elektrod s označením „LH“
- vybraná spojnice trendu naměřených hodnot, která nejlépe popisuje trend naměřených hodnot, je v tomto případě proložení polynomem třetího stupně, viz rovnice (37).



Graf č. 11 Aproximace naměřených hodnot elektrod – označení „LH“

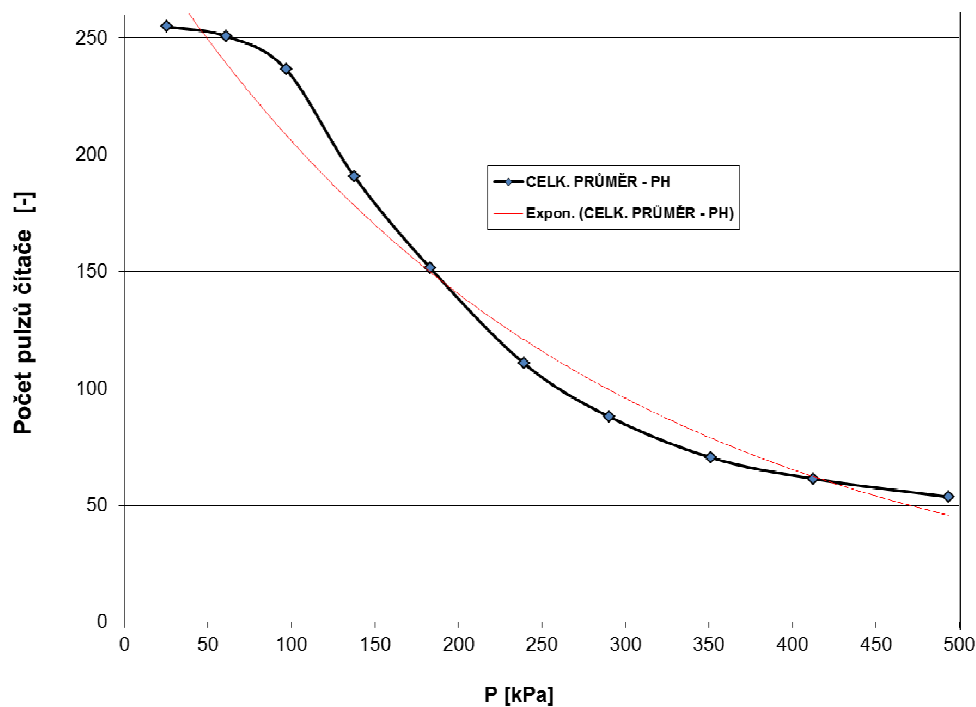
Rovnice polynomu třetího stupně, který prokládá závislost počtu pulzů načtených snímačem na působícím tlaku na měřicí bod se spolehlivostí $R^2 = 0,9943$, má tvar:

$$\text{Počet pulzů snímače} = -0,000002 \cdot p^3 + 0,0036 \cdot p^2 - 1,7102 \cdot p + 305,96 \quad [-] \quad (37)$$

4.2. Aproximace naměřených hodnot elektrod – označení „PH“

V grafu č. 12 je vidět:

- celkový průměr všech naměřených hodnot (*postupem dle kapitoly V/2.1.*) závislosti počtu pulzů načtených čítačem na působícím tlaku u elektrod s označením „LH“
- vybraná spojnice trendu naměřených hodnot, která nejlépe popisuje trend naměřených hodnot, je v tomto případě proložení klesající exponenciální funkcí, viz rovnice (38).



Graf č. 12 Aproximace naměřených hodnot elektrod – označení „PH“

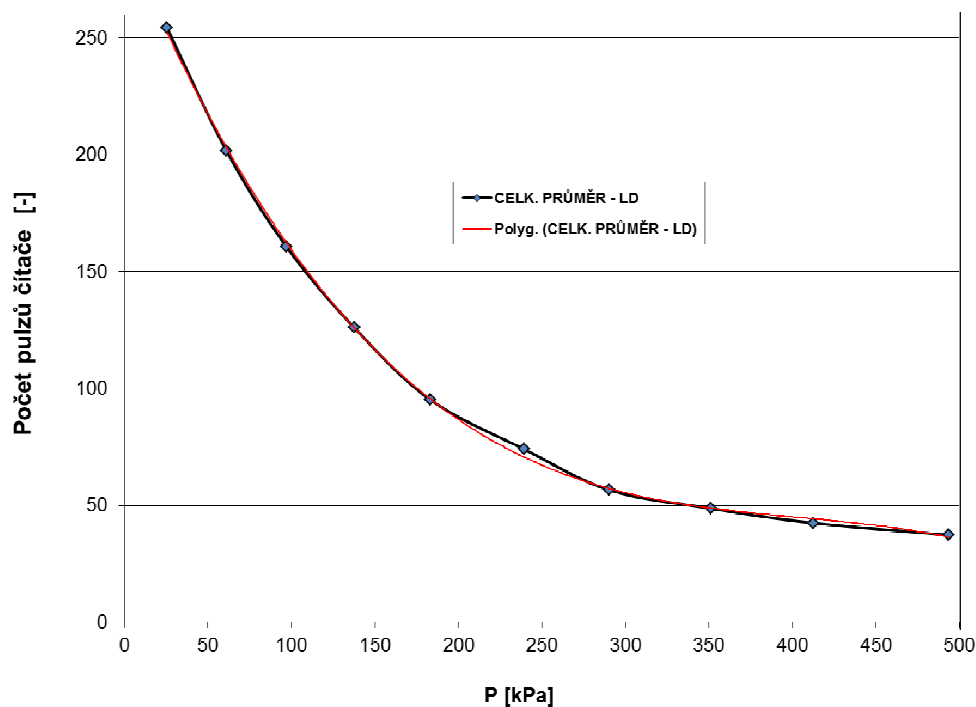
Klesající exponenciální rovnice, která prokládá závislost počtu pulzů načtených snímačem na působícím tlaku na měřicí bod se spolehlivostí $R^2 = 0,9732$, má tvar:

$$\text{Počet pulzů snímače} = 301,93 \cdot e^{-0,004 \cdot p} \quad [-] \quad (38)$$

4.3. Aproximace naměřených hodnot elektrod – označení „LD“

V grafu č. 13 je vidět:

- celkový průměr všech naměřených hodnot (*postupem dle kapitoly V/2.1.*) závislosti počtu pulzů načtených čítačem na působícím tlaku u elektrod s označením „LD“
- vybraná spojnice trendu naměřených hodnot, která nejlépe popisuje trend naměřených hodnot, je v tomto případě proložení polynomem třetího stupně viz rovnice (39).



Graf č. 13 Aproximace naměřených hodnot elektrod – označení „LD“

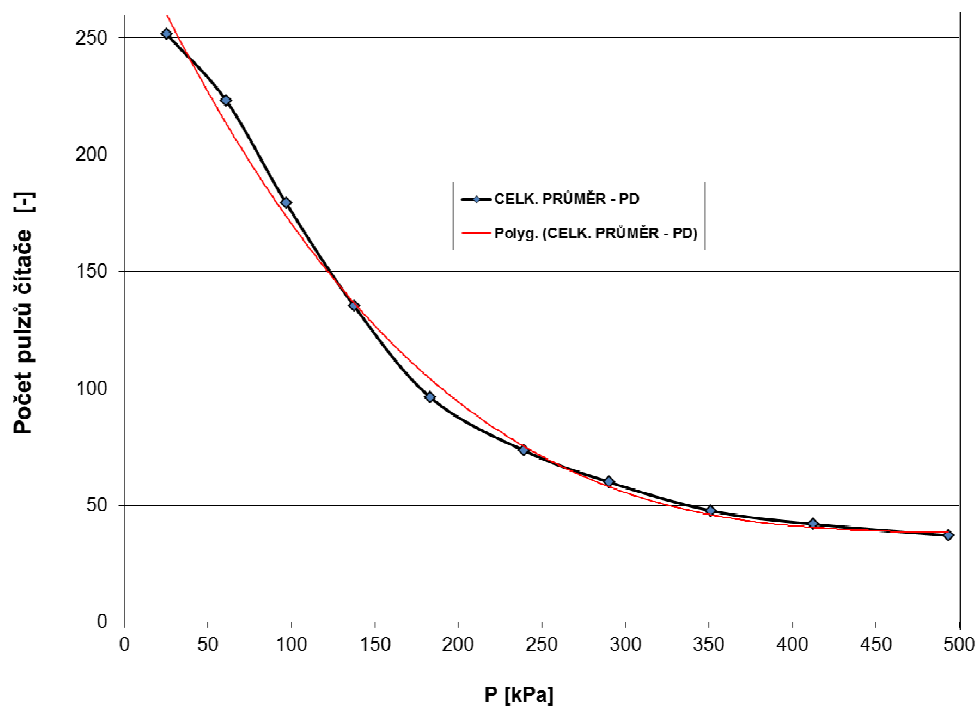
Rovnice polynomu třetího stupně, který prokládá závislost počtu pulzů načtených snímačem na působícím tlaku na měřicí bod se spolehlivostí $R^2 = 0,9995$, má tvar:

$$\text{Počet pulzů čítače} = -0,000003 \cdot p^3 + 0,0041 \cdot p^2 - 1,7178 \cdot p + 293,56 \quad [-] \quad (39)$$

4.4. Aproximace naměřených hodnot elektrod – označení „PD“

V grafu č. 14 je vidět:

- celkový průměr všech naměřených hodnot (*postupem dle kapitoly V/2.1.*) závislosti počtu pulzů načtených čítačem na působícím tlaku u elektrod s označením „PD“
- vybraná spojnice trendu naměřených hodnot, která nejlépe popisuje trend naměřených hodnot, je v tomto případě proložení polynomem třetího stupně viz rovnice (40).



Graf č. 14 Aproximace naměřených hodnot elektrod – označení „PD“

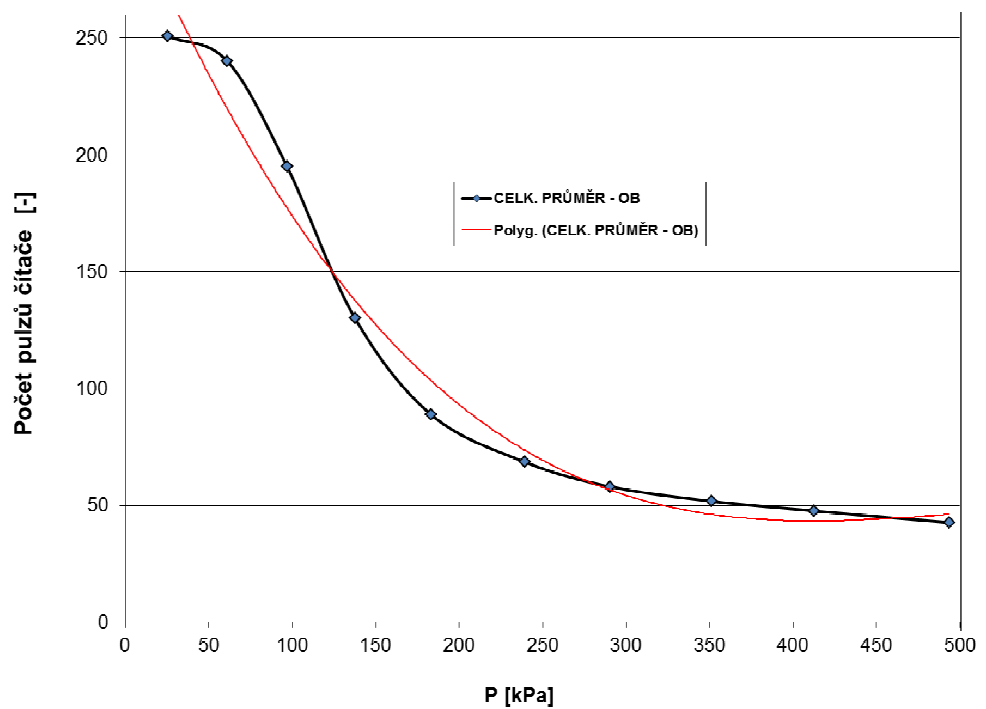
Rovnice polynomu třetího stupně, který prokládá závislost počtu pulzů načtených snímačem na působícím tlaku na měřicí bod se spolehlivostí $R^2 = 0,9951$, má tvar:

$$\text{Počet pulzů čítače} = -0,000002 \cdot p^3 + 0,0032 \cdot p^2 - 1,5689 \cdot p + 297,62 \quad [-] \quad (40)$$

4.5. Aproximace naměřených hodnot elektrod – označení „OB“

V grafu č. 15 je vidět:

- celkový průměr všech naměřených hodnot (*postupem dle kapitoly V/2.1.*) závislosti počtu pulzů načtených čítačem na působícím tlaku u elektrod s označením „OB“
- vybraná spojnice trendu naměřených hodnot, která nejlépe popisuje trend naměřených hodnot, je v tomto případě proložení polynomem třetího stupně viz rovnice (41).



Graf č. 15 Aproximace naměřených hodnot elektrod – označení „OB“

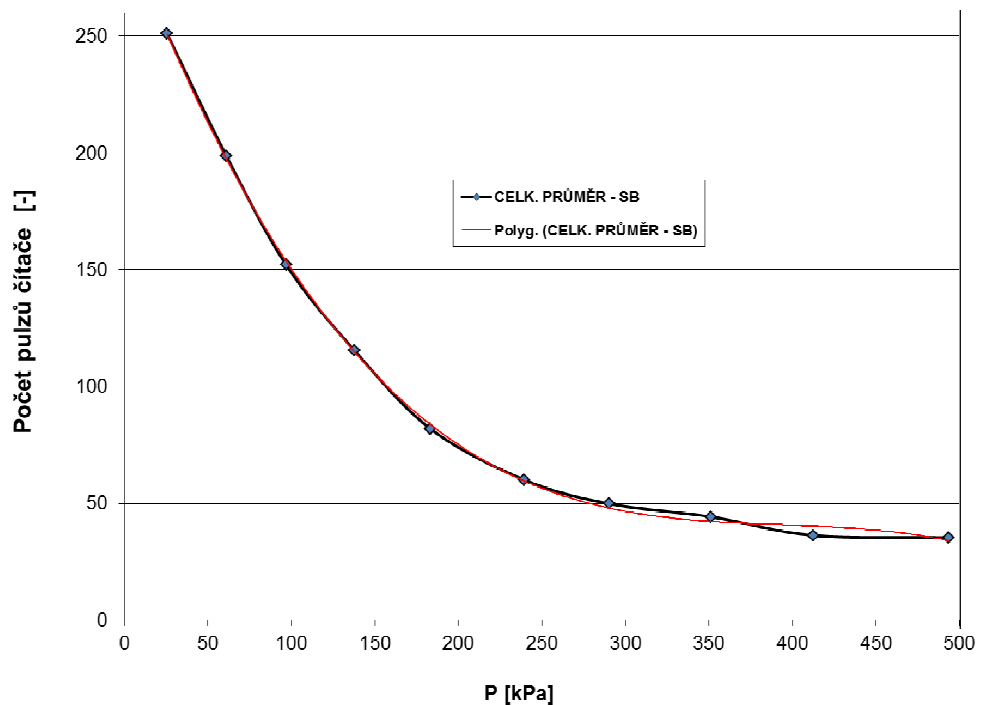
Rovnice polynomu třetího stupně, který prokládá závislost počtu pulzů načtených snímačem na působícím tlaku na měřicí bod se spolehlivostí $R^2 = 0,976$, má tvar:

$$\text{Počet pulzů čítače} = -0,000002 \cdot p^3 + 0,0035 \cdot p^2 - 1,6946 \cdot p + 310,55 \quad [-] \quad (41)$$

4.6. Aproximace naměřených hodnot elektrod – označení „SB“

V grafu č. 16 je vidět:

- celkový průměr všech naměřených hodnot (*postupem dle kapitoly V/2.1.*) závislosti počtu pulzů načtených čítačem na působícím tlaku u elektrod s označením „SB“
- vybraná spojnice trendu naměřených hodnot, která nejlépe popisuje trend naměřených hodnot, je v tomto případě proložení polynomem třetího stupně viz rovnice (42).



Graf č. 16 Aproximace naměřených hodnot elektrod – označení „SB“

Rovnice polynomu třetího stupně, který prokládá závislost počtu pulzů načtených snímačem na působícím tlaku na měřicí bod se spolehlivostí $R^2 = 0,9994$ má tvar:

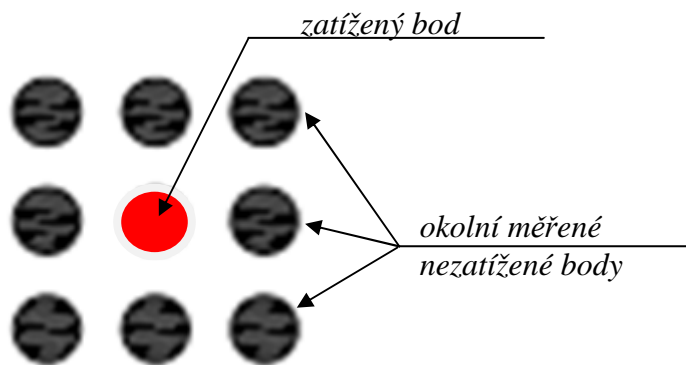
$$\text{Počet pulzů čítače} = -0,000004 \cdot p^3 + 0,0048 \cdot p^2 - 1,8959 \cdot p + 296,28 \quad [-] \quad (42)$$

5. Měření ovlivnění nezatížených bodů v okolí bodu zatíženého

Jak už bylo v práci uvedeno, u Plantografu V05 docházelo k nežádoucímu ovlivnění i nezatížených měřicích bodů v okolí bodu zatíženého, což negativně ovlivňovalo měření rozložení tlaku, a proto byla konstrukce Plantografu V08 navržena tak, aby toto ovlivnění bylo co možná nejmenší.

Úkolem tohoto měření bylo zjistit, zda nedochází k nežádoucímu ovlivnění i nezatížených měřicích bodů v okolí bodu zatíženého, jako tomu bylo u Plantografu V05. Měření probíhalo stejným způsobem a za použití stejných technologií jako v kapitole V/2 s tím rozdílem, že:

- u každého typu měřených elektrod byl měřen pouze jeden měřicí bod, a to pouze při zatížení
- byl měřen počet pulzů čítače u zatěžovaného měřicího bodu včetně počtu pulzů u dalších osmi měřicích bodů v nejbližším okolí (*viz Obr. 5. 6*)



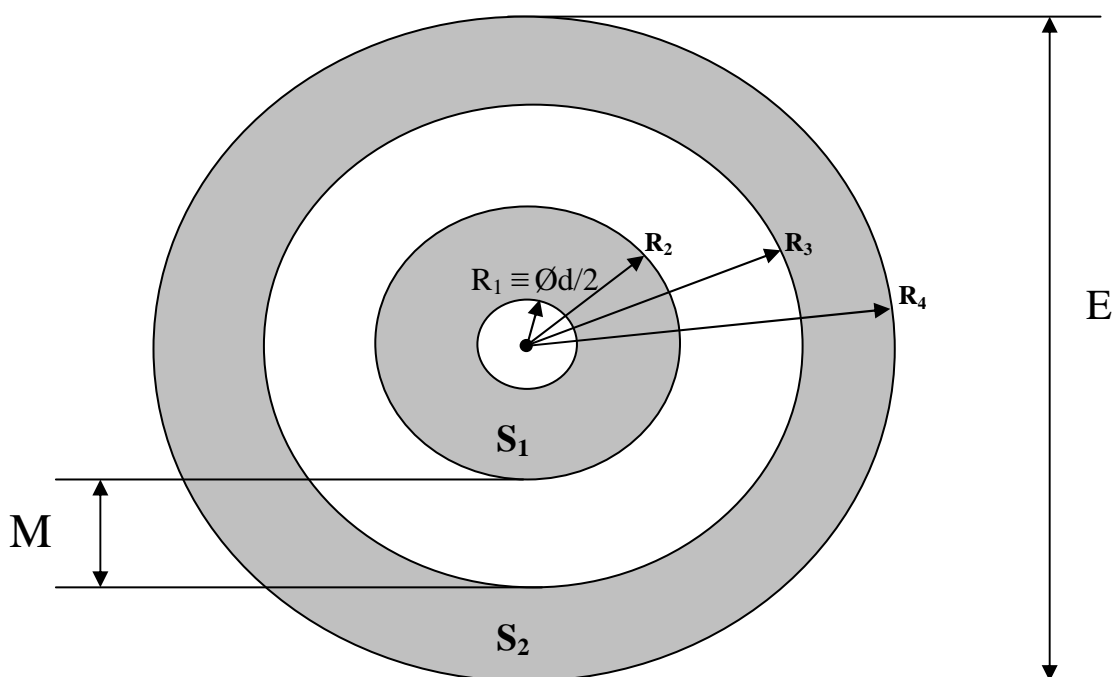
Obr. 5. 6 Okolí zatíženého bobu

Všechny naměřené hodnoty jsou uvedeny v příloze A, z těchto hodnot vyplývá, že ovlivnění okolních nezatížených měřicích bodů je minimální. Dá se říci, že nevýhoda ovlivňování nezatížených měřicích bodů v okolí bodu zatíženého je odstraněna, jelikož měření ukázalo, že toto nežádoucí ovlivnění je tak malé, že se v praxi může zanedbat.

6. Vyhodnocení citlivosti jednotlivých druhů elektrod v závislosti na ploše měřících elektrod

Pro vyhodnocení závislosti citlivosti jednotlivých druhů elektrod na velikosti dotykové plochy elektrod a elastomeru je nejprve zapotřebí vypočtení velikosti plochy elektrod.

Plocha elektrod je na *Obr. 5.7* zobrazena tmavší barvou.



Obr. 5. 7 Obecné rozměry elektrod

typ elektrod	$\varnothing E$ [mm]	$\varnothing d$ [mm]	M [mm]	R_1 [mm]	R_2 [mm]	R_3 [mm]	R_4 [mm]
LH	2	0,4	0,1	0,2	0,45	0,55	1
PH	2	0,1	0,1	0,05	0,45	0,55	1
LD	2,5	0,4	0,25	0,2	0,5	0,75	1,25
PD	2,5	0,1	0,25	0,05	0,5	0,75	1,25
OB	3,5	0,4	0,25	0,2	0,75	1	1,75
SB	3,5	0,4	0,25	0,2	0,75	1	1,75

Tabulka č. 16 Rozměry jednotlivých typů elektrod

Výpočet velikosti plochy měřících elektrod

Výpočet vychází z rozměrů zobrazených na *Obr. 5.7*. Nejprve je nutné vyjádřit jednotlivé poloměry potřebné k výpočtu velikosti plochy elektrod pomocí známých rozměrů ($\varnothing E$, $\varnothing d$, M). Výsledky jsou uvedeny v *Tabulce č. 16*.

$$R_1 = \frac{\varnothing d}{2} \quad [\text{mm}] \quad (43)$$

$$R_2 = \frac{E}{4} - \frac{M}{2} \quad [\text{mm}] \quad (44)$$

$$R_3 = \frac{E}{4} + \frac{M}{2} \quad [\text{mm}] \quad (45)$$

$$R_4 = \frac{E}{2} \quad [\text{mm}] \quad (46)$$

Z rovnic (47 - 49) je možné vypočítat obsah jednotlivých druhů elektrod, jednotlivé výsledky jsou uvedeny v *Tabulce č. 17*.

$$S_1 = \pi \cdot (R_2 - R_1)^2 \quad [\text{mm}^2] \quad (47)$$

$$S_2 = \pi \cdot (R_4 - R_3)^2 \quad [\text{mm}^2] \quad (48)$$

$$S = S_1 + S_2 \quad [\text{mm}^2] \quad (49)$$

Typ elektrod	S_1 [mm ²]	S_2 [mm ²]	S [mm ²]	Rovnice aproximace naměřených hodnot
LH	0,510509	2,191261	2,70177	PPČ = -0,000002·p ³ + 0,0036·p ² - 1,7102·p + 305,96
PH	0,628319	2,191261	2,819579	PPČ = 301,93 · e ^{-0,004·p}
LD	0,659734	3,141593	3,801327	PPČ = -0,000003·p ³ + 0,0041·p ² - 1,7178·p + 293,56
PD	0,777544	3,141593	3,919137	PPČ = -0,000002·p ³ + 0,0032·p ² - 1,5689·p + 297,62
OB	1,641482	6,479535	8,121017	PPČ = -0,000002·p ³ + 0,0035·p ² - 1,6946·p + 310,55
SB	1,641482	6,479535	8,121017	PPČ = -0,000004·p ³ + 0,0048·p ² - 1,8959·p + 296,28

Tabulka č. 17 Velikost plochy jednotlivých druhů elektrod

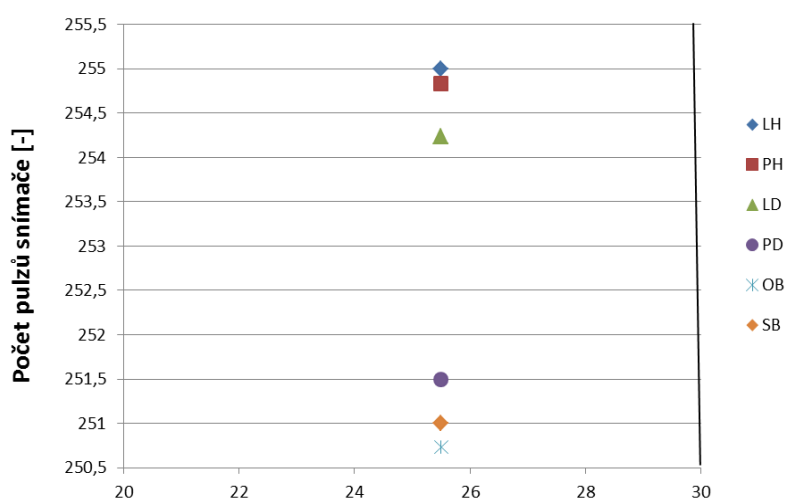
Výpočet velikosti plochy jednotlivých druhů elektrod a porovnání těchto hodnot s naměřenými hodnotami (viz Tabulka č. 15) slouží k ověření dvou zásadních zjištění:

- jak závisí schopnost elektrod spolehlivě měřit působící tlaky v dolní hranici požadovaného rozsahu (25 kPa – 500 kPa) na velikosti jejich dotykové plochy s vodivým elastomerem
- jak závisí strmost poklesu naměřeného počtu pulzů čítačem se zvyšujícím se tlakem na měřicí bod

Závislost schopnosti elektrod spolehlivě měřit působící tlaky v dolní hranici požadovaného rozsahu (25 kPa – 500 kPa) na velikosti jejich dotykové plochy s vodivým elastomerem:

Při tomto zhodnocení je zapotřebí brát na vědomí nejen celkový průměr počtu pulzů naměřených čítačem, ale také spolehlivost toho, že dojde ke snížení počtu pulzů čítače u všech jednotlivých měření.

Z měření jednotlivých druhů elektrod (viz Tabulka č. 15 a Graf č. 17) jednoznačně vyplynulo, že se zvyšující dotykovou plochou měřicích elektrod a vodivého elastomeru se spolehlivost měření dolní hranice požadovaného rozsahu zvyšuje. U elektrod typu „OB“ a „SB“ došlo ke snížení počtu pulzů načtených čítačem u všech měřicích bodů i jednotlivých měření, tzn., že tyto elektrody s největší plochou elektrod jsou schopny měřit tlak 25,5 kPa spolehlivě.



Graf č. 17 Počet pulzů snímače u jednotlivých druhů elektrod při působícím tlaku 25,5 kPa

Se zvyšující se dotykovou plochou měřicích elektrod a vodivého elastomeru se při působícím tlaku 25,5 kPa také snižuje průměrná hodnota počtu pulzů naměřených čítačem (viz Graf č. 17), z čehož se dá usoudit, že čím je větší dotyková plocha měřicích elektrod a vodivého elastomeru, tím jsou elektrody schopny spolehlivě měřit menší působící tlak na měřicí bod.

Závislost strmosti poklesu naměřeného počtu pulzů čítačem se zvyšujícím se tlakem na velikosti dotykové plochy měřicích elektrod a vodivého elastomeru:

Z měření jednotlivých druhů elektrod (viz *Tabulka č. 15, Tabulka č. 17 a Graf č. 10*) nevyplývá jednoznačná závislost strmosti poklesu počtu pulzů čítače na velikosti dotykové plochy měřicích elektrod a vodivého elastomeru. Dá se tedy říci, že strmost poklesu na velikosti dotykové plochy nezávisí.

VI. ZÁVĚRY A DOPORUČENÍ PRO VYUŽITÍ POZNATKŮ V PRAXI

Sestavení měřicího pracoviště pro měření matice senzorů taktilního snímače

Měřicí pracoviště bylo sestaveno s využitím robotizovaného pracoviště Turbo Scara SR 60 a modulárního systému pro měření taktilních snímačů, což zajistilo podmínky pro působení tlaku na měřicí body v požadovaném rozmezí 25 kPa – 500 kPa a současně požadované měření měřicích bodů ve snímací matici.

Zajištění přesné vzájemné polohy měřicího hrotu a měřicích bodů snímací matice

Pro zajištění toho, aby měřicí hrot modulárního systému působil přesně na celou plochu měřicího bodu ve snímací matici, je nutné upevnění snímací matice v pracovním prostoru robota Turbo Scara SR 60, zajištění obrázku vrchní části snímací matice pomocí kamery a obrazovou analýzou zjištění souřadnic středů jednotlivých měřicích bodů, a poté převedení těchto souřadnic (reprezentujících středy měřicích bodů v pořízeném obrázku) zpět do souřadnicového robota Turbo Scara SR 60.

Obrazová analýza, která zajistí souřadnice pixelů reprezentujících středy měřicích bodů je provedena v programu MATLAB. Požadované souřadnice středů jsou vypočítány pomocí vzdálenostní transformace, přičemž jako nejvhodnější a nejpřesnější vzdálenostní transformace je v tomto případě Euklidovská vzdálenostní transformace - D_E . Tato metoda byla vybrána na základě testu, při kterém byla hodnocena přesnost polohy zjištěných středů objektů a skutečnost, zda v jednom objektu nebyl nalezen jeho střed vícekrát. Nejlepších výsledků dosáhla Euklidovská vzdálenostní transformace, i když je její výpočet oproti ostatním metodám výpočetně a tedy i časově náročnější, to ale pro tuto aplikaci není rozhodující.

Optimalizace konstrukce snímače typu Plantograf, která potlačí nevýhody starší konstrukce Plantograf V05

Byla vyvinuta nová konstrukce snímací matice a vyhodnocovacího softwaru, která minimalizuje největší nevýhody konstrukce Plantografu V05. Novou konstrukcí Plantografu byl potlačen nežádoucí elektrický svod mezi elektrodami, což negativně ovlivňovalo výsledky měření nezátížených měřicích bodů v okolí bodu zatíženého. Dále změnou tvaru měřicích

elektrod se zmenšila jejich parazitní kapacita, což u Plantografu V05 při rychlých měřeních působilo problémy. A v neposlední řadě bylo navrženo nové vyčítání měřených dat ze snímací matice, které také zrychlilo celé měření.

Optimalizace konstrukce Plantografu měla dva vývojové stupně. Nejprve byl vyvinut tzv. Plantograf V07 – vývojová verze β , který byl navržen tak, aby potlačoval nevýhody Plantografu V05 za cenu náročnější konstrukce snímací matice. Orientačním měřením bylo však zjištěno, že se výrazným způsobem snížila jeho schopnost spolehlivého měření požadovaného rozpětí tlaků od 25 kPa do 500 kPa, jelikož při takovéto konstrukci snímací matice reagovali měřicí body změnou odporu až při tlaku od 212 kPa. Z tohoto důvodu není možné použít tuto konstrukci v aplikacích, pro které je systém typu Plantograf přednostně určen, tzn., pro měření tlaků v rozmezí od 25 kPa do 500 kPa s vyšším důrazem na spodní hranici intervalu. Z tohoto důvodu byla navržena nová konstrukce snímací matice nazvaná Plantograf V08. Konstrukce Plantografu V08 byla navržena tak, aby docházelo k co nejmenšímu ovlivňování měřicích bodů ve snímací matici, citlivost jednotlivých měřicích bodů byla co nejvyšší a konstrukce snímací matice byla co možná nejjednodušší na výrobu.

Měření jednotlivých druhů měřicích elektrod u vybrané konstrukce Plantografu V08

Měření bylo provedeno na pěti typech měřicích elektrod s různými rozměry. U jednoho typu elektrod bylo vyzkoušeno, jak se projeví na měřicích vlastnostech vložení vodivého elastomeru v podobě elementu pouze přímo na místo měřicího bodu, oproti vodivému elastomeru vloženého na celou plochu snímací matice.

Základním úkolem tohoto měření bylo určit rozměry elektrod, při kterých budou mít měřicí body snímací matice nejlepší měřicí vlastnosti, a to především nejvyšší citlivost měření. Vysoká citlivost měření taktilního snímače je důležitá při využití v biomechanice, kde se měří poměrně malé tlaky (od desítek kPa).

Z měření vyplynulo, že požadovanou dolní hranici tlaku 25,5 kPa jsou schopny spolehlivě měřit pouze měřicí elektrody s označením „SB“ a „OB“, které mají za všech měřených elektrod největší průměr vnější elektrody, a to \varnothing 3,5 mm, což je pro běžné použití Plantografu a pro rozteč měřicích bodů ve snímací matici vyhovující. Z těchto důvodů byla jako optimální konstrukce pro měřicí elektrody zvolena konstrukce s označením „SB“ (respektive „OB“ – mají stejné rozměry).

Aproximace naměřených hodnot u jednotlivých druhů elektrod

Matematický popis závislosti počtu pulzů načtených čítačem na tlaku, který působí na měřicí bod je potřebný pro případné další elektronické zpracování naměřených hodnot. U každého typu elektrod byly použity tři typy aproximací (exponenciální, logaritmická a polynomická) a z nich byla vždy vybrána ta, která nejlépe popisovala trend naměřených hodnot. U všech typů elektrod, kromě jednoho, bylo vyhodnoceno jako nejlepší proložení závislosti polynomem třetího stupně. Jen u jednoho typu elektrod, a to elektrod s označením „PH“, bylo přesnější proložit závislost klesající exponenciální funkcí.

Vyhodnocení citlivosti jednotlivých druhů elektrod v závislosti na ploše měřicích elektrod

Z měření jednotlivých druhů elektrod a srovnáním velikosti jejich dotykové plochy s elastomerem jednoznačně vyplynulo, že se spolehlivost měření dolní hranice požadovaného rozsahu tlaku s rostoucí dotykovou plochou zvyšuje. U elektrod typu „OB“ a „SB“ došlo ke snížení počtu pulzů načtených čítačem u všech měřicích bodů i jednotlivých měření, tzn., že tyto elektrody s největší plochou elektrod jsou schopny měřit tlak 25,5 kPa spolehlivě. Obecně lze říci, že čím je větší dotyková plocha měřicích elektrod a vodivého elastomeru, tím jsou elektrody schopny spolehlivě měřit menší působící tlak na měřicí bod.

Doporučení

Doporučení pro sestavení robotizovaného pracoviště na měření taktilních snímačů:

- Jako zařízení, kterým je možno vyvinout působící tlak na měřicí bod v dostatečné přesnosti, je použit robot Turbo Scara SR 60, na kterém je upevněn speciální modulární systém pro měření taktilních snímačů, který zajistí měření požadovaných veličin.
- Je nutné zajistit přenou polohu snímací matice v pracovním prostoru robota, společně s měřicím hrotem modulárního systému a snímací kamery.

Doporučení pro volbu konstrukce snímací matice snímače typu Plantograf

- Konstrukci snímací matice je zapotřebí volit takovým způsobem, aby její výroba nebyla příliš složitá, umožňovala sériovou výrobu, minimalizovala nevýhody staré

konstrukce u Plantografu V05 a byla schopna spolehlivě měřit požadovaný rozsah tlaku od 25,5 kPa do 500 kPa. Tyto parametry splňuje konstrukce Plantografu V08.

Doporučení pro volbu rozměrů měřicích elektrod u snímací matice snímače Plantograf V08

- Pokud se zvyšuje dotyková plocha měřicích elektrod a vodivého elastomeru, pak se také snižuje spodní hranice požadovaného rozpětí tlaku, které jsou schopny měřicí body spolehlivě měřit.
- Pro měření působícího tlaku v rozpětí od 25,5 kPa do 500 kPa je ideální průměr vnější měřicí elektrody \varnothing 3,5 mm. Při takovémto rozměru je možné jak měřit požadované rozpětí působícího tlaku, tak vnější průměr měřicích elektrod umožňuje zachování dostatečné hustoty měřicích bodů ve snímací matici, která je potřebná pro měření, na jaké je snímač typu Plantograf určen.
- Pro spolehlivé měření působícího tlaku na měřicí bod v dolní části požadovaného rozpětí je vhodnější použití vodivého elastomeru po celé ploše snímací matice jako celku, než když by byl elastomer rozdělen na elementy umístěné pouze v místě měřicích bodů.

VII. ZÁVĚR

Hlavním tématem této práce jsou taktilní snímače jako celek, jsou zde však popisovány i jednotlivé jejich části. V úvodní části je podrobný popis taktilních senzorů založených na různých fyzikálních principech, avšak další části práce jsou již zaměřeny pouze na maticové taktilní senzory, které pro převod působící síly na elektrický signál využívají vodivý elastomer.

Základní konstrukce taktilního snímače, ze které bylo vycházeno, byl Plantograf V05. Od tohoto typu taktilního snímače se odvíjely další typy konstrukcí, které byly navrženy tak, aby minimalizovali jeho největší nevýhody. Konstrukce, jež splnila požadované parametry, byla nazvána Plantograf V08. Podrobným měřením byly určeny optimální rozměry měřicích elektrod, které zajistí spolehlivé měření působícího tlaku v rozmezí od 25 kPa do 500 kPa, při dodržení požadované rozteče měřicích bodů ve snímací matici pro měření ke kterým je snímač typu Plantograf prvotně určen.

Výsledky této práce neměli splnit jednoznačný praktický cíl, ale měli poskytnout závěry a doporučení, které budou tvořit základy dalšího výzkumu.

POUŽITÁ LITERATURA:

- [1] MAŘÍK, V., ŠTĚPÁNKOVÁ, O., LAZAŇSKÝ, J. a kol.: Umělá inteligence (5), Academia AVČR, Vydání 1., Praha 2007.
- [2] KRÁLÍČEK, P.: Úvod do speciální neurofyzologie. Nakladatelství Karolinum. Praha 2002
- [3] SILBERNAGL, S., DESPOPOULOS, A.: Atlas fyziologie člověka. Grada Publishing, a.s., 2004. ISBN 80–247-0630X
- [4] KOCOUREK, P.: Přenos informace. Vydavatelství ČVUT, Praha 2001. ISBN 80–01-01978–0
- [5] KOLEKTIV: UNIVERSUM Všeobecná encyklopedie. Vydavatelství Odeon, Praha 2001. ISBN 80–207-1060–4
- [6] OLIVA, J.: Snímání a zpracování taktilní informace v biologických systémech. Teze doktorské disertační práce. FS ČVUT, Praha 2006
- [7] TRINKL, A.: Nová konstrukce taktilních snímačů – základní měření jednotlivých měřicích bodů snímací matice potřebné pro kalibraci snímače. Jemná mechanika a optika, Vydání 4., Praha 2008
- [8] DĚD, P.: Měření a zpracování biomechanických signálů. Disertační práce. TF ČZU, Praha 2010
- [9] NEDĚLA, R.: Snímání taktilní informace a její zpracování v biomedicíně. Diplomová práce, ČVUT, Praha 2005
- [10] VOLF, J. a kol.: Systém pro měření rozložení statických a dynamických tlaků pro biomechanické aplikace. AUTOMA. No.11/2002, Vol.8.FCC Public s.r.o. str.17-19.ISSN 1210-9592
- [11] VOLF, J. a kol.: Systém pro měření rozložení rozložení statických a dynamických tlaků pro biomechanické aplikace. AUTOMA, ROČNÍK 8, No 11, 2002. s. 17–19, ISSN 1210–9592
- [12] VOLF, J. a kol.: Maticový dynamický snímač rozložení tlaku pro užití v biomechanice. STROJAŘ. Časopis Masarykovy akademie práce Strojní společnosti na ČVUT. Ročník XI. No. 1, 2002. s. 1–5. ISSN 1213–0591
- [13] TRINKL, A.: Taktilné snímače novej konštrukcie a ich automatizovaná výroba. SPU v Nitre, str. 214 – 220, Nitra 2007
- [14] KODER, P.: Snímač zatížení. Bakalářská práce, ČZU v Praze, Praha 2008

- [15] VOLF, J.: Tactile Sensors and Transducers. In: XIII IMEKO World Congress, Torino, Italy, 1994, pp. 2022–2027
- [16] VOLF, J., VLČEK, J.: New Piezoelectric Tactile Sensors. In: XV. World Congress IMEKO. Japonsko, Osaka 1999. pp. 35–40.
- [17] ŽIVČÁK, J., ŠIMŠÍK, D., KNĚŽO, D., VOLF, J.: Electronic Processing of Local Muscle Disposition Sensor Output. The International Journal of Microcircuits & Electronic Packaging. Vol. 20, No. 1, IEPS, ISHM, USA. Virginia 1997. pp. 41-45
- [18] ŠIMŠÍK, D., ŽIVČÁK, J., VOLF, J.: Tactile Transducer Development for Rehabilitation and Exercise Machines. European Journal of Mechanical and Environmental Engineering, Vol. 41, No. 1, BSMEE, 1996. ISSN 0035-3612. pp. 19-24 (30 %)
- [19] VOLF J., HOLY S., PAPEZOVA S., VLCEK J.: Tactile Transducer for Pressure Distribution Measurement and its Practical Test-Proceeding IMEKO XV, Osaka-Japan 1999, pp. 153-157 57
- [20] VOLF, J. PAPEŽOVÁ, S. VLČEK, J. OTÁHAL, J. NOVÁK, P. - HOLÝ, S.: Transducer for Pressure Distribution Measurement and its Practical Tests. In.: The 5th World Multi-Conference on Systemics, Cybernetics and Informatics SCI 2001. Orlando 2001, Florida USA, p. 575. ISBN 980–07-7555–2
- [21] VOLF J., HOLY S., VLCEK J.: Using of Tactile Transducer for Pressure Distribution Measurement on Sole – Sensor and Actuators A62. Physical, ELSEVIER SEQUOIA S.A., Lousanne, Switzerland 1997 pp. 556-561
- [22] VOLF, J., PAPEŽOVÁ, S., VLČEK, J.: Transducer for Extreme Pressures Differentiation. In: Measurement and Control in Robotics ISMCR 03-IMEKO TC17. Madrid: Instituto de automatica industrial, 2003, s. 111-114. ISBN 84-607-9693-0.
- [23] ZIVCAK, J., SIMSIK, D., KNEZO, D.: Experimental testing of local muscle disposition sensor, ISMCR'95, Smolenice, Slovakia, 1995, pp. 543–546
- [24] MATSUMIYA, T.; NAKAYAMA, S.; MIURA, Y.; etc.: Intelligent control method for robot hand based on tactile information by double-octagon tactile sensor. 1999 IEEE International Conference on Systems, man, and Cybernetics (Cat. No. 99CH37028), vol. 2. IEEE, Piscataway, USA, 2001
- [25] EMGE, S.; CHEN, Ch.: Two dimensional contour imaging with a fiber optic microbend tactile sensor array.

- [26] Weed, H.; Taige, P.: Vibrator matrix for a tactile vision information system. Bioengineering American Society of mechanical Engineers, Petroleum Division PD v 64 n 4 1994, ASME, USA, 1994
- [27] SANO, A.; NISHI, K., etc.: Multi-fingered hand for telepresence based on tactile information, 2004 IEEE International Conference on robotic and Automation (IEEE Cat. No. 04CH37508), vol. 2, IEEE, Piscataway, USA, 2004
- [28] TODOVA, V.: Ferropiezoelectric array as a primary sensor for processing of tactile information. 2000 22nd International Conference on Microelectronics (Cat. No.00TH8400), vol. 2. IEEE, Piscataway, USA, 1999
- [29] KARASON, S.P.; SRINIVASAN, M.A.; ANNASWAMY, A.M.: Encoding and decoding of static information in tactile sensing. International Journal of Robotic Research, vol. 18, no.2. Sage Publications, 1999
- [30] HSEGAWA, T.; HONDA, K.; KIRIKI, T.; etc.: real-time pose estimation of an object grasped by a multi-fingered hand by using sensory fusion of visual and tactile information. Transaction of the Institute of Electrical Engineers of japan, Part C, vol. 118-C, no. 9. Inst. Electr. Eng. Japan, 1998
- [31] KURZE, M.: Interaction of blind persons with virtual worlds, based on two-dimensional tactile information. Software-Ergonomie '97. Usability Engineering. B. G. Teubner, Nemecko, 1997
- [32] MIYASATO, T.; NAKATSU, R.: Allowable delay between images and tactile information in a haptic interface. International Conference on Virtual Systems and Multimedia (Cat. No. 97100182). IEEE Comput. Soc., USA, 1997
- [33] TODOVA, V.; CHRISTOV, S.: A system for processing of tactile information. Proceedings of the Fourth International Symposium on Measurement and Control in Robotic. Slovak Tech. Univ, Slovensko 1995
- [34] MIYASATO, T.; NOMA, H.; KISHIMO, F.: Subjective evaluation of perception of delay time between visual information and tactile information. IEICE Transaction on Fundamentals of Electronics, Communications and computer Sciences, vol. E79-A, no. 5. Inst. Electron. Inf. & Commun, Anglie, 1996
- [35] HUTTON, R.J.B.; FLASH, J.M.; etc.: Keeping in touch: kinesthetic-tactile information and fly-by-wire. Proceedings of Human Factors and Ergonomics Society. 38th annual meeting, vol. 1. Human Factors & Ergonomic Soc., USA, 1994

- [36] SCHMID, H.P.; BEKEY, G.A: Tactile information processing by human operators in control system. IEEE Transaction on Systems, Man and Cybernetics, vol. SMC-8, no. 12, 1976
- [37] VOLF, J.: Taktilní informace. ČVUT, Praha, 2007 – Nepublikovaná práce
- [38] VOLF, J.: Taktilní senzory pro automatizaci. AUTOMA, No 7, Vol 14, Praha, 2008, pp 16–19, ISSN 1210-9592
- [39] VOLF, J.: Tactile Information i its Obtaining and Using. In: Interdisciplinary Aspects of Human-machine Co-existence and Co-operation. Czech – Argentine Biennale Workshop „e-Golems“. Prague, 2005.pp. 236-245 ISBN 80-01-03275-2
- [40] VOLF, J.: Užití taktilních čidel pro měření v biomechanice. Automatizace. 2006, roč. 49, č. 1, s. 27-29. ISSN 0005-125X
- [41] HOTTINGER BALDWIN MESSTECHNIK: Data sheet D.DF2S.0e. Darmstadt, Germany, Datasheet, 2001
- [42] RIPKA, P.: Senzory a převodníky Praha, Vydavatelství ČVUT, Praha 2005
- [43] JON S. WILSON: Sensor technology handbook, Burlington Newnes 2005, ISBN 0-7506-7729-5
- [44] SENTRON HALL SENSORS, 2SA-10 Two-axis Sensor For General Purpose: dostupné z <<http://www.sentron.ch/datasheets/2SA-10.pdf>> [cit.12.2.2009]
- [45] VOJÁČEK, A.: Magnetické senzory s Hallovým efektem: dostupné z <<http://automatizace.hw.cz/mag-senzory-s-hallovym-efektem-3-senzory-s-analog-vystupem>> [cit.25.6.2008]
- [46] Honeywell, Sensing and Control: dostupné z <http://sensing.honeywell.com/index.cfm/ci_id/154366/la_id/1.htm> [cit.30.5.2008]
- [47] ĎAĎO, S. a kol.: Senzory a měřicí obvody, Vydavatelství ČVUT, Praha 1996
- [48] JON S. Wilson: Sensor technology handbook, Burlington Newnes 2005, ISBN 0–7506-7729–5
- [49] NAKAMURA, Y.; Hanafusa, H.; Ueno, N.: A piezoelectric film sensor with uniformly expanded surface to detect tactile information for robotic end-effectors, In: Proceedings of '85 International Conference on Advanced Robotics, Japan Ind. Robot Assoc. Japonsko, 1985
- [50] VOLF, J.; VLČEK, J.: Piezoelectric Tactile Sensor, In: 8th International Symposium on Measurement and Control in Robotics ISMCR'98, Prague, 1998

- [51] TURÁN, J. PETRÍK, S.: Optické vláknové senzory, ALFA Bratislava 1990 ISBN 80-05 00655-1
- [52] MARŠÁLEK, L.: Optická vlákna, VŠB Otrava 2006
- [53] Micromachined Electromechanical Sensors for Automotive Applications, Freescale Semiconductor: dostupné z
<http://www.freescale.com/files/sensors/doc/app_note/AN1645.pdf?fsrch=1>
- [54] VOJÁČEK, A.: Princip a struktura integrovaných senzorů tlaku Freescale: dostupné z
<<http://hw.cz/teorie-praxe/art1941-princip-struktura-integrovaných-senzorů-tlakufreescale.html>> [cit.29.5.2008]
- [55] Sensors Device Data, Reference Manual, Freescale Semiconductor: dostupné z
<http://www.freescale.com/files/sensors/doc/data_lib/DL200.pdf?tid=tsclist>
[cit.2.10.2009]
- [56] Tire Pressure Monitor Sensor, Product Specification, Freescale Semiconductor: dostupné z
<http://www.freescale.com/files/sensors/doc/data_sheet/MPXY8300.pdf?fp=1>
- [57] RSscan Lab Ltd: dostupné z <<http://www.rsscan.co.uk/index.php>>
- [58] RSscan Lab Ltd, Bulletin of Footscan Systems: dostupné z
<http://www.rsscan.co.uk/files/RSscan_brochure.pdf>
- [59] AETREX, ISTEP: dostupné z <<http://www.aetrex.com/>> [cit.22.1.2009]
- [60] Tekscan, South Boston, USA: dostupné z <<http://www.tekscan.com/>> [cit.20.2.2009]
- [61] SILBERNAGL, S.: Agamemnon Despopoulos: Atlas fyziologie člověka. Grada Publishing, a.s., 2004. ISBN 80-247-0630-X
- [62] OLIVA, J.: Snímání, přenos a zpracování taktilní informace v lidském organismu. 2004
- [63] SANDU, C., WORLEY, M.E., MORGAN, J.P.: Experimental study on the mobility of light weight vehicles on sand, 16th International Conference of the International Society for Terrain-Vehicle System, listopad, 2008
- [64] KOMI, E.R., ROBERTS, J.R., ROTHBERG, S.J.: Measurement and analysis of grip force during a golf shot, Proceedings of the IMechE Vol.222, Part P: Journal of Sports Engineering and Technology, 2008
- [65] SHAW, AYRA J., DAVIS, BRETT A., COLLINS, MICHAEL J., CARNEY, LEO G.: A technique to measure eyelid pressure using piezoresistive sensors, IEEE Transactions on Biomedical Engineering. 2009

- [66] CHAN, B.J., HISSONG, E., SANDU, C., SOUTHWARD, S.: Development and design of cost efficient tire mechanics testing apparatus, Proceedings of 2007 ASME International Design Engineering Technical Conference, 2008
- [67] Kejík, P.: A new inductive proximity sensor with fully integrated electronics for industrial applications: dostupné z <<http://lmis3.epfl.ch/research/proximity/>> [cit.20.11.2009]
- [68] CREWS, R. T.: Pressure and Activity Level in the Development of Diabetic Foot Ulcers. Podiatry Management, pp 101-104, 2007
- [69] PATON, J., STENHOUSE, E., JONES, R., BRUCE, G.: Custom-made total contact insoles and prefabricated functional diabetic insoles: A case report, The Diabetic Foot Journal, Autumn, pp. 138-143, 2007
- [70] BRIMACOMBE, J. M., WILSON, D. R., HODGSON, A. J., HO, K. C., ANGLIN, C.: Effect of Calibration Method on Tekscan Sensor Accuracy. Journal of Biomechanical Engineering 131, 2009
- [71] TRINKL, A.: Automatizovaná výroba taktilních snímačů na školním robotizovaném pracovišti Turbo Scara SR60. GA Technické fakulty, ČZU v Praze, 31200/1312/3116, Praha, 2007
- [72] TRINKL, A.: Měření a kalibrace taktilních snímačů na školním robotizovaném pracovišti Turbo Scara SR60. GA Technické fakulty, ČZU v Praze, 31200/1312/3116, Praha, 2008
- [73] HŮLA, P., ŠINDELÁŘ, R., TRINKL, A.: Verification of applicability of ABB robots for operation transplanting tomatoes. Research in Agricultural Engineering, pp. 155-162, 2008
- [74] TRINKL, A., VOLF, J., NOVÁK, M., RŮŽIČKA, M.: Optimal Size Determination of Tactile Sensor Plantograf V08 and its Electrodes. 26th Symposium on Advances in Experimental mechanics, Montanuniversitat Leoben, Austria, pp. 233-234, 2009
- [75] TRINKL, A.: Základní měření taktilního snímače potřebné pro jeho kalibraci. X. International Conference of Young Scientists 2008, str. 225 – 229, Praha, 2008
- [76] TRINKL, A.: Automatická robotická měřicí hlavice zatěžovací síly. Prototyp, funkční vzorek, KEA TF ČZU v Praze, Praha, 2009
- [77] TRINKL, A.: Software modulárního systému pro měření taktilních snímačů. Autorizovaný software, KEA TF ČZU v Praze, Praha, 2009

- [78] TRINKL, A.: Plantograf V07. Prototyp, funkční vzorek, Vojenský rehabilitační ústav Slapy, 2009
- [79] Technical documentation of the conductive composite elastomer CS 57-7 RSC, Yokohama Rubber Co.Ltd. Japan – 1980
- [80] TUHH. *Labor Mechatronik SS2008* [online]. Dostupné z: <http://www.tu-harburg.de/ft2/wo/Vorlesungen/MechatronicLabor/MechatronicLaborAufgabenstellung.pdf>
- [81] Anex, Kamerové systémy, Standardní černobílé kamery KAMPRO: dostupný z <http://www.kamerove-systemy-cctv.cz/kc-381c-cb-hires-kamera-1-3-s-vysokou-citlivosti.html>
- [82] HBM measurement, Datasheet – tenzometrický člen DF2S-5: dostupný z <http://www.hbm.com.pl/arch/b1067.pdf>
- [83] VOLF, J., NOVÁK, M., TRINKL, A., VLČEK J.: Zařízení pro snímání taktilní informace. Patent ČR, č. 301 717, Praha, udělen dne 22. 4. 2011
- [84] VOLF, J., NOVÁK, M.: Elektronický obvod pro vyhodnocení informací ze snímačů s variabilním elektrickým odporem. Patent ČR, č. 301 690, Praha, udělen dne 14. 4. 2011

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ:

R – elektrický odpor

p – působící tlak na měřicí bod

λ_s - činitel magnetostrikce při nasycení [T^{-2}]

B_s - magnetická indukce při nasycení [T]

μ - permeabilita [Hm^{-1}]

σ - mechanické napětí [Nm^{-2}]

U_h [V] - Hallovo napětí

K_h - konstanta Hallova senzoru

B [T]– magnetická indukce

Q [C] – elektrický náboj

F_x [N] – síla působící ve směru osy x

θ_c [°] - úhel dopadu

n_1 [-] - index lomu jádra

n_2 [-] - index lomu pláště

C [F] – kapacita senzoru

ϵ_0 [Fm^{-1}] – permitivita vakua;

ϵ_r [-] – relativní permitivita;

S [m^2] – plocha společných elektrod;

d [m] – vzdálenost elektrod.

OZ – operační zesilovač

GPS - Global Positioning System

U [V]– elektrické napětí

I [A] – elektrický proud

X – bodová množina

X^c – pozadí v obrázku

$dist_X(p)$ - vzdáleností transformace

p [Pa]– tlak působící na měřicí bod

D_E - Euklidovská vzdálenostní transformace

D_8 - Šachovnicová vzdálenostní transformace

D_4 - Cityblock vzdálenostní transformace

x_0 – výchozí souřadnice ramene robota v ose x
 y_0 – výchozí souřadnice ramene robota v ose y
 z_0 – výchozí souřadnice ramene robota v ose z
 u_A – standartní nejistota typu A
 Z_j – zdroje nejistot
 $\pm\Delta Z_{max}$ – rozsah odchylek od jmenovité hodnoty
 $f_{\text{čítače}}$ [Hz] - taktovací frekvence čítače
 $T_{\text{čítače}}$ [s]- perioda čítače
 $u_c(t)$ [V]- napětí na kondenzátoru
 C [F]– kapacita kondenzátoru
 R_C [Ω]– celkový odpor
 LH – typ měřených elektrod
 PH – typ měřených elektrod
 LD – typ měřených elektrod
 PD – typ měřených elektrod
 OB – typ měřených elektrod
 SB – typ měřených elektrod
 R_i - počet kmitů načtených čítačem při jednom konkrétním měření
 \bar{R} – aritmetický průměr počtu kmitů načtených snímačem ze všech 15 měření
 $s^2(y_i)$ - Výběrový rozptyl naměřených hodnot
 $s^2(\bar{y})$ - Rozptyl výběrových průměrů
 $s(\bar{y})$ - Směrodatná odchylka výběrových průměrů
 $PP\check{C}$ - počet pulzů čítače

SEZNAM OBRÁZKŮ:

Obr. 2.1 Struktura senzoru I

Obr. 2.2 Struktura senzoru II

Obr. 2.3 Axiální umístění připojení elektrod

Obr. 2.4 Radiální umístění připojení elektrod

Obr. 2.5 Základní vrstvy FSR senzoru

Obr. 2.6 Zjednodušená struktura senzoru

Obr. 2.7 Závislost odporu na působící síle senzoru FSR

Obr. 2.8 Blokové schéma Hallova senzoru a jeho převodní charakteristika

Obr. 2.9 Piezoelektrický senzor síly

Obr. 2.10 Náhradní schéma piezoelektrického elementu

Obr. 2.11 Řez zapouzdření piezoelektrického elementu

Obr. 2.12 Optický senzor pracující se změnou odrazu

Obr. 2.13 Makroohyb a mikroohyb optického vlákna

Obr. 2.14 Příklad sestaveného makroohybového senzoru s optickým vláknem

Obr. 2.15 Optický senzor se změnou tlumení v deformačním členu

Obr. 2.16 Uspořádání optických vláken v senzoru se změnou vzájemné vazby

Obr. 2.17 Sestavený kapacitní senzor síly

Obr. 2.18 Měřicí systém iStep

Obr. 2.19 Měřicí systém Footscan USB plate

Obr. 2.20 Výstup z systému Rsscan

Obr. 2.21 Měřicí systém „I-Scan[®] System“ firmy Tekscan

Obr. 2.22 Konstrukce taktilní matice firmy Tekscan

Obr. 2.23 Taktilních matice různých velikostí se stejnými konektory

Obr. 2.24 Měřicí systém „CONFORMat[®] System“ firmy Tekscan

Obr. 2.25 Měřicí systém „BPMS[™]“ firmy Tekscan

- Obr. 2.26 Měřicí systém „Grip™ System” firmy Tekscan
- Obr. 2.27 Vyhodnocovací software měřicího systému „Grip™ System” firmy Tekscan
- Obr. 2.28 Měřicí systém „K-Scan™ System” firmy Tekscan
- Obr. 2.29 Měřicí systém „T-Scan® III System” firmy Tekscan
- Obr. 2.30 Příklad matice senzorů společnosti Xsensor
- Obr. 2.31 Systém měření rozložení tlaku na matraci společnosti Xsensor
- Obr. 2.32 Opasek s vibračními motory
- Obr. 2.33 Reálné provedení vibračního opasku
- Obr. 2.34 Blokové schéma opasku
- Obr. 2.35 Systém TireScan™
- Obr. 2.36 Různé profily pneumatik naměřené systémem TireScan™
- Obr. 2.37 Systém Wiper™
- Obr. 2.38 Užití taktilní informace při aerodynamice letadel
- Obr. 3.39 Užití taktilní informace při aerodynamice cyklistů
- Obr. 2.40 Průběh zpracování taktilní informace
- Obr. 4.1 Robotizované pracoviště s robotem Turbo Scara SR60
- Obr. 4.2 Pracovní prostor robota Turbo Scara SR60
- Obr. 4.3 Půdorys prostorového uspořádání v pracovním prostoru robota Turbo Scara SR60
- Obr. 4.4 Pohled z boku na prostorové uspořádání pracovního prostoru
- Obr. 4.5 Speciální modulární systém pro měření taktilních snímačů
- Obr. 4.6 Obsluhující elektronické obvody tenzometrického členu
- Obr. 4.7 Rozměry tenzometrického snímače síly DF2S-5 použitého v modulárním systému
- Obr. 4.8 Nastavení portu komunikace
- Obr. 4.9 Připojení modulárního systému
- Obr. 4.10 Nastavení souboru pro ukládání naměřených dat
- Obr. 4.11 Kalibrace snímače (vlození převodního vzorce)

- Obr. 4.12 Vlastní měření
- Obr. 4.13 Vypnutí programu
- Obr. 4.14 Snímek malé vrchní části taktilní matice s vyznačenou polohou měřicích bodů
- Obr. 4.15 Tři různé výpočty vzdálenostních transformací
- Obr. 4.16 Grafické znázornění části snímací matice po euklidovské vzdálenostní transformaci a číselné vyjádření reprezentace jednoho bodu
- Obr. 4.17 Grafické znázornění části snímací matice po D8 vzdálenostní transformaci a číselné vyjádření reprezentace jednoho bodu
- Obr. 4.18 Grafické znázornění části snímací matice po D4 vzdálenostní transformaci a číselné vyjádření reprezentace jednoho bodu
- Obr. 4.19 Grafické znázornění části snímací matice po označení jednotlivých středů
- Obr. 4.20 Fixace snímací matice v pracovním prostoru robota
- Obr. 4.21 Zvětšená struktura elastomeru
- Obr. 4.22 Závislost odporu na působící síle – radiální uspořádání elektrod
- Obr. 4.23 Závislost odporu na působící síle – axiální uspořádání elektrod
- Obr. 4.24 Teplotní závislost materiálu
- Obr. 4.25 Konstrukce snímací matice u Plantografu V05
- Obr. 4.26 Náhradní elektrické schéma plošné snímací matice Plantografu V05
- Obr. 4.27 Blokové (princiální) schéma systému Plantograf V05 [8]
- Obr. 4.28 Obrazovka softwaru (2D a 3D zobrazení)
- Obr. 4.29 Nová konstrukce snímací matice
- Obr. 4.30 Vrchní pohled na novou konstrukci snímací matice (bez vrchní ochranné vrstvy)
- Obr. 4.31 Příčný řez Plantografem V08
- Obr. 4.32 Vrchní (princiální) pohled na část matice senzoru Plantografem V08
- Obr. 5.33 Elektrické schéma senzoru Plantografu V08
- Obr. 5.1 Obvod pro vysokorychlostní vyhodnocení informací ze snímačů s variabilním elektrickým odporem
- Obr. 5.2 Zapojení obvodu na každý řádek matice senzorů

Obr. 5.3 Orientačně znázorněný průběh napětí na kondenzátoru

Obr. 5.4 Měřicí pracoviště pro zjištění optimálních rozměrů měřicích elektrod

Obr. 5.5 Rozměry měřicích elektrod

Obr. 5. 6 Okolí zatíženého bobu

Obr. 5. 7 Obecné rozměry elektrod

SEZNAM GRAFŮ:

- Graf č. 1 Průměrný odpor osmi různých měřicích bodů (zatěžování a odlehčování)
- Graf č. 2 Průměrný odpor z osmi různých měření stejného bodu (zatěžování a odlehčování)
- Graf č. 3 Orientační měření Plantografu V08
- Graf č. 4 Grafické znázornění průměrných hodnot z měření elektrod „LH“
- Graf č. 5 Grafické znázornění průměrných hodnot z měření elektrod „PH“
- Graf č. 6 Grafické znázornění průměrných hodnot z měření elektrod „LD“
- Graf č. 7 Grafické znázornění průměrných hodnot z měření elektrod „PD“
- Graf č. 8 Grafické znázornění průměrných hodnot z měření elektrod „OB“
- Graf č. 9 Grafické znázornění průměrných hodnot z měření elektrod „SB“
- Graf č. 10 Celkové průměry naměřených hodnot jednotlivých druhů elektrod
- Graf č. 11 Aproximace naměřených hodnot elektrod – označení „LH“
- Graf č. 12 Aproximace naměřených hodnot elektrod – označení „PH“
- Graf č. 13 Aproximace naměřených hodnot elektrod – označení „LD“
- Graf č. 14 Aproximace naměřených hodnot elektrod – označení „PD“
- Graf č. 15 Aproximace naměřených hodnot elektrod – označení „OB“
- Graf č. 16 Aproximace naměřených hodnot elektrod – označení „SB“
- Graf č. 17 Počet pulzů snímače u jednotlivých druhů elektrod při působícím tlaku 25,5 kPa

SEZNAM TABULEK:

Tabulka č. 1 Technická data tenzometru použitého v modulárním systému [82]

Tabulka č. 2 Výpis XY souřadnic středů jednotlivých objektů

Tabulka č. 3 Výpis xyz souřadnic středů jednotlivých objektů převedených do souřadnicového systému robota Turbo Scara SR60

Tabulka č. 4 Průměrné hodnoty z měření osmi různých bodů a statistické vyhodnocení

Tabulka č. 6 Průměrné hodnoty z orientačního měření Plantografu V08

Tabulka č. 7 Hodnoty odporu měřicího bodu při první reakci na zvyšující se zatížení

Tabulka č. 8 Naměřené hodnoty při zatěžování – působící tlak 61,1 kPa elektrody „LH“

Tabulka č. 9 Průměrné hodnoty z měření elektrod „LH“ a statistické vyhodnocení

Tabulka č. 10 Průměrné hodnoty z měření elektrod „PH“ a statistické vyhodnocení

Tabulka č. 11 Průměrné hodnoty z měření elektrod „LD“ a statistické vyhodnocení

Tabulka č. 12 Průměrné hodnoty z měření elektrod „PD“ a statistické vyhodnocení

Tabulka č. 13 Průměrné hodnoty z měření elektrod „OB“ a statistické vyhodnocení

Tabulka č. 14 Průměrné hodnoty z měření elektrod „SB“ a statistické vyhodnocení

Tabulka č. 15 Celkové průměry naměřených hodnot jednotlivých druhů elektrod

Tabulka č. 16 Rozměry jednotlivých typů elektrod

Tabulka č. 17 Velikost plochy jednotlivých druhů elektrod

PŘÍLOHY

PŘÍLOHA A

Měření ovlivnění nezatížených bodů v okolní zatíženého bodu

1. Měření elektrod – označení „LH“

Rozměry: $\varnothing E=2\text{mm}$, $\varnothing d=0,4\text{mm}$, $M=0,1\text{mm}$

25,5 kPa

255	255	255
255	255	255
255	255	255

61,1 kPa

254	255	255
255	229	255
255	255	255

96,77 kPa

253	255	255
255	179	254
255	255	255

137,5 kPa

253	255	255
255	132	254
255	255	255

183,3 kPa

253	255	255
255	94	254
255	255	255

239,3 kPa

253	255	255
255	69	253
255	255	255

290,3 kPa

253	255	255
255	52	253
255	255	255

351,4 kPa

253	255	255
255	46	253
255	255	255

412,5 kPa

253	255	255
50	42	253
255	255	255

493,5 kPa

253	255	255
255	38	253
255	255	255

2. Měření elektrod – označení „PH“

Rozměry: $\varnothing E=2\text{mm}$, $\varnothing d=0,1\text{mm}$, $M=0,1\text{mm}$

25,5 kPa

255	255	255
255	254	255
255	255	255

61,1 kPa

255	255	255
255	250	255
255	255	255

96,77 kPa

255	255	255
255	232	255
254	255	255

137,5 kPa

255	255	255
255	205	255
254	255	255

183,3 kPa

255	255	255
255	169	255
254	255	255

239,3 kPa

255	255	255
255	96	255
254	255	255

290,3 kPa

255	255	255
255	76	255
254	255	255

351,4 kPa

255	255	255
255	62	255
254	255	255

412,5 kPa

255	255	255
255	58	255
254	255	255

493,5 kPa

255	255	255
255	54	255
254	255	255

3. Měření elektrod – označení „LD“

Rozměry: $\varnothing E=2,5\text{mm}$, $\varnothing d=0,4\text{mm}$, $M=0,25\text{mm}$

25,5 kPa

255	255	255
255	255	255
255	255	255

61,1 kPa

255	255	255
254	197	254
255	255	255

96,77 kPa

255	255	255
254	148	255
255	255	255

137,5 kPa

255	255	255
254	118	255
255	255	255

183,3 kPa

255	255	255
254	87	254
255	255	255

239,3 kPa

255	255	255
254	54	254
254	255	255

290,3 kPa

255	255	255
254	43	254
255	255	255

351,4 kPa

255	255	255
254	37	254
255	255	255

412,5 kPa

255	255	255
254	34	253
255	255	255

493,5 kPa

253	253	255
40	32	41
205	205	205

4. Měření elektrod – označení „PD“

Rozměry: $\varnothing E=2,5\text{mm}$, $\varnothing d=0,1\text{mm}$, $M=0,25\text{mm}$

25,5 kPa

255	255	255
255	253	255
255	255	255

61,1 kPa

255	254	255
255	231	255
255	255	255

96,77 kPa

255	253	255
255	189	255
255	255	255

137,5 kPa

255	254	255
254	120	255
255	255	255

183,3 kPa

255	253	255
255	90	254
255	255	255

239,3 kPa

255	253	255
254	63	255
254	255	255

290,3 kPa

255	254	255
254	60	255
254	255	255

351,4 kPa

255	253	255
254	42	255
254	255	255

412,5 kPa

255	253	255
254	38	255
254	255	255

493,5 kPa

255	253	255
254	36	255
254	254	255

5. Měření elektrod – označení „OB“

Rozměry: 5. ØE 3,5mm, Ød=0,4mm, M=0,25mm

25,5 kPa

255	255	255
255	253	255
255	255	255

61,1 kPa

255	255	255
255	242	255
255	255	255

96,77 kPa

255	255	255
255	197	255
255	255	255

137,5 kPa

255	255	255
255	132	255
255	255	255

183,3 kPa

255	255	255
255	91	255
255	255	255

239,3 kPa

255	255	255
255	71	255
255	255	255

290,3 kPa

255	255	255
255	60	255
255	255	255

351,4 kPa

255	255	255
255	54	255
255	255	255

412,5 kPa

255	255	255
255	50	255
255	255	255

493,5 kPa

255	255	255
255	45	255
255	255	255

6. Měření elektrod – označení „SB“

Rozměry: 5. ØE 3,5mm, Ød=0,4mm, M=0,25mm

25,5 kPa

255	255	255
255	253	255
255	255	255

61,1 kPa

255	255	255
255	201	255
255	254	255

96,77 kPa

255	255	255
255	154	255
255	254	255

137,5 kPa

255	255	254
255	118	255
255	254	255

183,3 kPa

255	255	254
255	84	255
255	254	255

239,3 kPa

255	255	254
255	63	255
255	255	255

290,3 kPa

255	255	254
255	52	255
254	255	255

351,4 kPa

255	255	254
255	47	255
254	254	255

412,5 kPa

255	255	254
255	39	255
254	254	25

493,5 kPa

255	255	254
255	38	255
254	254	255

PŘÍLOHA B

Měření Plantografu V07 – vývojové verze β

Měření osmi různých měřicích bodů matice senzorů

Měření č. 1

Bod č.1

P [kPa]	212	265	335	405	475
R [Ω] (zat.)	4 500	2 400	1 500	560	400
R [Ω] (odl.)	4 200	2 700	1 010	490	380

Bod č.2

P [kPa]	212	265	335	405	475
R [Ω] (zat.)	1 680	700	350	230	120
R [Ω] (odl.)	1 400	580	280	160	130

Bod č.3

P [kPa]	212	265	335	405	475
R [Ω] (zat.)	2 700	1 320	460	310	160
R [Ω] (odl.)	2 100	1 060	380	210	170

Bod č.4

P [kPa]	212	265	335	405	475
R [Ω] (zat.)	2 000	1 200	900	270	230
R [Ω] (odl.)	1 550	1 120	530	230	185

Bod č.5

P [kPa]	212	265	335	405	475
R [Ω] (zat.)	2 800	1 000	425	340	200
R [Ω] (odl.)	2 350	1 130	400	245	150

Bod č.6

P [kPa]	212	265	335	405	475
R [Ω] (zat.)	3 300	1 400	850	500	170
R [Ω] (odl.)	2 700	1 300	780	270	160

Bod č.7

P [kPa]	212	265	335	405	475
R [Ω] (zat.)	2 700	1 150	330	180	80
R [Ω] (odl.)	2 300	890	270	140	75

Bod č.8

P [kPa]	212	265	335	405	475
R [Ω] (zat.)	1 250	550	370	200	105
R [Ω] (odl.)	1 100	455	305	165	120

Měření č. 2

Bod č.1

P [kPa]	212	265	335	405	475
R [Ω] (zat.)	4 400	2 250	910	450	230
R [Ω] (odl.)	4 100	1 900	630	410	235

Bod č.2

P [kPa]	212	265	335	405	475
R [Ω] (zat.)	1 500	580	370	225	140
R [Ω] (odl.)	1 520	620	330	195	130

Bod č.3

P [kPa]	212	265	335	405	475
R [Ω] (zat.)	2 150	1 050	400	230	120
R [Ω] (odl.)	1 950	800	350	165	110

Bod č.4

P [kPa]	212	265	335	405	475
R [Ω] (zat.)	1 850	810	300	230	180
R [Ω] (odl.)	2 000	1 090	320	190	130

Bod č.5

P [kPa]	212	265	335	405	475
R [Ω] (zat.)	2 550	1 100	455	330	190
R [Ω] (odl.)	2 150	950	410	300	175

Bod č.6

P [kPa]	212	265	335	405	475
R [Ω] (zat.)	3 000	1 250	740	460	140
R [Ω] (odl.)	2 600	1 100	715	410	125

Bod č.7

P [kPa]	212	265	335	405	475
R [Ω] (zat.)	2 500	780	300	170	115
R [Ω] (odl.)	2 100	680	230	120	105

Bod č.8

P [kPa]	212	265	335	405	475
R [Ω] (zat.)	1 300	550	250	210	120
R [Ω] (odl.)	1 350	545	260	200	110

PŘÍLOHA B

Měření Plantografu V07 – vývojové verze β

Průměrné hodnoty ze dvou měření osmi různých měřicích bodů matice senzorů

P [kPa]	212	265	335	405	475
R [Ω] (zat.)	4 450	2 325	1 205	505	315
R [Ω] (odl.)	4 150	2 300	820	450	308
R [Ω] (zat.) - rozdíl proti průměru z 8 bodů	1 939	1 194	648	199	146
R [Ω] (odl.) - rozdíl proti průměru z 8 bodů	1 639	1 169	263	144	139
P [kPa]	212	265	335	405	475
R [Ω] (zat.)	1 590	640	360	228	130
R [Ω] (odl.)	1 460	600	305	178	130
R [Ω] (zat.) - rozdíl proti průměru z 8 bodů	-921	-491	-197	-78	-39
R [Ω] (odl.) - rozdíl proti průměru z 8 bodů	-1 051	-531	-252	-128	-39
P [kPa]	212	265	335	405	475
R [Ω] (zat.)	2 425	1 185	430	270	140
R [Ω] (odl.)	2 025	930	365	188	140
R [Ω] (zat.) - rozdíl proti průměru z 8 bodů	-86	54	-127	-36	-29
R [Ω] (odl.) - rozdíl proti průměru z 8 bodů	-486	-201	-192	-118	-29
P [kPa]	212	265	335	405	475
R [Ω] (zat.)	1 925	1 005	600	250	205
R [Ω] (odl.)	1 775	1 105	425	210	158
R [Ω] (zat.) - rozdíl proti průměru z 8 bodů	-586	-126	43	-56	36
R [Ω] (odl.) - rozdíl proti průměru z 8 bodů	-736	-26	-132	-96	-11
P [kPa]	212	265	335	405	475
R [Ω] (zat.)	2 675	1 050	440	335	195
R [Ω] (odl.)	2 250	1 040	405	273	163
R [Ω] (zat.) - rozdíl proti průměru z 8 bodů	164	-81	-117	29	26
R [Ω] (odl.) - rozdíl proti průměru z 8 bodů	-261	-91	-152	-33	-6
P [kPa]	212	265	335	405	475
R [Ω] (zat.)	3 150	1 325	795	480	155
R [Ω] (odl.)	2 650	1 200	748	340	143
R [Ω] (zat.) - rozdíl proti průměru z 8 bodů	639	194	238	174	-14
R [Ω] (odl.) - rozdíl proti průměru z 8 bodů	139	69	191	34	-26
P [kPa]	212	265	335	405	475
R [Ω] (zat.)	2 600	965	315	175	98
R [Ω] (odl.)	2 200	785	250	130	90
R [Ω] (zat.) - rozdíl proti průměru z 8 bodů	89	-166	-242	-131	-71
R [Ω] (odl.) - rozdíl proti průměru z 8 bodů	-311	-346	-307	-176	-79
P [kPa]	212	265	335	405	475
R [Ω] (zat.)	1 275	550	310	205	113
R [Ω] (odl.)	1 225	500	283	183	115
R [Ω] (zat.) - rozdíl proti průměru	-1 236	-581	-247	-101	-56
R [Ω] (odl.) - rozdíl proti průměru	-1 286	-631	-274	-123	-54

Měření Plantografu V07 – vývojové verze β

Průměrné hodnoty ze všech měření osmi různých měřicích bodů matice senzorů
a jejich statistické vyhodnocení

Zatěžování					
P [kPa]	212	265	335	405	475
R [Ω] - průměr	2 511,25	1 130,63	556,88	305,94	168,75
Nejistota UA	351,77	193,41	109,10	44,05	24,69
UA - korigovaná	422,12	232,09	130,92	52,86	29,63
Výběrový rozptyl	989 941,07	299 260,27	95 228,13	15 524,89	4 878,57
Směr. Odchylka	994,95	547,05	308,59	124,60	69,85

Odlehčování					
P [kPa]	212	265	335	405	475
R [Ω] - průměr	2 216,88	1 057,50	450,00	243,75	155,63
Nejistota UA	338,27	199,11	86,16	44,11	23,73
UA - korigovaná	405,93	238,93	103,39	52,93	28,47
Výběrový rozptyl	915 421,43	317 154,02	59 391,52	15 564,40	4 503,57
Směr. Odchylka	956,77	563,16	243,70	124,76	67,11

PŘÍLOHA C

Měření Plantografu V07 – vývojové verze β

Osm po sobě jdoucích měření stejného bodu v matici senzorů

Měření č.1	P [kPa]	212	265	335	405	475
	R [Ω] (zat.)	2 400	800	390	250	150
	R [Ω] (odl.)	1 700	780	400	190	120
	R [Ω] (zat.) - rozdíl proti průměru z 8 bodů	877,50	222,50	56,25	51,88	34,38
	R [Ω] (odl.) - rozdíl proti průměru z 8 bodů	396,25	206,88	85,00	21,88	10,00
Měření č.2	P [kPa]	212	265	335	405	475
	R [Ω] (zat.)	1 500	580	370	225	140
	R [Ω] (odl.)	1 520	620	330	195	130
	R [Ω] (zat.) - rozdíl proti průměru z 8 bodů	-22,50	2,50	36,25	26,88	24,38
	R [Ω] (odl.) - rozdíl proti průměru z 8 bodů	216,25	46,88	15,00	26,88	20,00
Měření č.3	P [kPa]	212	265	335	405	475
	R [Ω] (zat.)	1 680	700	350	230	120
	R [Ω] (odl.)	1 400	580	280	160	130
	R [Ω] (zat.) - rozdíl proti průměru z 8 bodů	157,50	122,50	16,25	31,88	4,38
	R [Ω] (odl.) - rozdíl proti průměru z 8 bodů	96,25	6,88	-35,00	-8,13	20,00
Měření č.4	P [kPa]	212	265	335	405	475
	R [Ω] (zat.)	1 680	550	330	210	100
	R [Ω] (odl.)	1 200	590	270	135	80
	R [Ω] (zat.) - rozdíl proti průměru z 8 bodů	157,50	-27,50	-3,75	11,88	-15,63
	R [Ω] (odl.) - rozdíl proti průměru z 8 bodů	-103,75	16,88	-45,00	-33,13	-30,00
Měření č.5	P [kPa]	212	265	335	405	475
	R [Ω] (zat.)	1 200	490	370	200	105
	R [Ω] (odl.)	1 150	460	310	165	120
	R [Ω] (zat.) - rozdíl proti průměru z 8 bodů	-322,50	-87,50	36,25	1,88	-10,63
	R [Ω] (odl.) - rozdíl proti průměru z 8 bodů	-153,75	-113,13	-5,00	-3,13	10,00
Měření č.6	P [kPa]	212	265	335	405	475
	R [Ω] (zat.)	1 200	450	240	180	120
	R [Ω] (odl.)	1 210	520	300	190	110
	R [Ω] (zat.) - rozdíl proti průměru z 8 bodů	-322,50	-127,50	-93,75	-18,13	4,38
	R [Ω] (odl.) - rozdíl proti průměru z 8 bodů	-93,75	-53,13	-15,00	21,88	0,00
Měření č.7	P [kPa]	212	265	335	405	475
	R [Ω] (zat.)	1 480	550	370	160	80
	R [Ω] (odl.)	1 050	525	310	150	75
	R [Ω] (zat.) - rozdíl proti průměru z 8 bodů	-42,50	-27,50	36,25	-38,13	-35,63
	R [Ω] (odl.) - rozdíl proti průměru z 8 bodů	-253,75	-48,13	-5,00	-18,13	-35,00
Měření č.8	P [kPa]	212	265	335	405	475
	R [Ω] (zat.)	1 040	500	250	130	110
	R [Ω] (odl.)	1 200	510	320	160	115
	R [Ω] (zat.) - rozdíl proti průměru	-482,50	-77,50	-83,75	-68,13	-5,63
	R [Ω] (odl.) - rozdíl proti průměru	-103,75	-63,13	5,00	-8,13	5,00

Měření Plantografu V07 – vývojové verze β

Průměrné hodnoty ze všech osmi měření jednoho měřicího bodu matice senzorů a jejich statistické vyhodnocení

Zatěžování					
P [kPa]	212	265	335	405	475
R [Ω] - průměr	1 522,50	577,50	333,75	198,13	115,63
Nejistota UA	150,16	41,39	20,35	14,01	7,87
UA - korigovaná	180,20	49,67	24,42	16,82	9,45
Výběrový rozptyl	180 392,86	13 707,14	3 312,50	1 570,98	495,98
Směr. Odchylka	424,72	117,08	57,55	39,64	22,27

Odlehčování					
P [kPa]	212	265	335	405	475
R [Ω] - průměr	1 303,75	573,13	315,00	168,13	110,00
Nejistota UA	76,93	34,65	14,02	7,61	7,50
UA - korigovaná	92,31	41,58	16,82	9,14	9,00
Výběrový rozptyl	47 341,07	9 606,70	1 571,43	463,84	450,00
Směr. Odchylka	217,58	98,01	39,64	21,54	21,21

PŘÍLOHA D

Orientační měření Plantografu V08

Měření třech různých měřicích bodů matice senzorů

Bod č. 1

Měření č.1

P [kPa]	25	61	97	193	290	412	483
R [Ω] - zatěžování	2 536,32	2 356,14	1 863,20	932,10	415,30	208,30	163,25
R [Ω] - odlehčování	2 511,20	2 113,19	1 673,30	783,23	401,80	209,31	157,21

Měření č.2

P [kPa]	25	61	97	193	290	412	483
R [Ω] - zatěžování	2 387,21	2 098,23	1 687,32	711,50	383,90	192,15	143,83
R [Ω] - odlehčování	2 341,23	1 983,54	1 548,36	739,30	319,85	174,32	133,14

Měření č.3

P [kPa]	25	61	97	193	290	412	483
R [Ω] - zatěžování	2 630,20	2 398,41	1 839,10	901,80	439,21	241,90	191,00
R [Ω] - odlehčování	2 658,30	2 193,21	1 702,36	804,33	405,30	205,36	181,47

Měření č.4

P [kPa]	25	61	97	193	290	412	483
R [Ω] - zatěžování	2 385,30	2 098,14	1 695,30	785,30	321,85	183,60	136,90
R [Ω] - odlehčování	2 401,80	1 963,36	1 519,28	711,36	319,52	174,36	139,30

Měření č.5

P [kPa]	25	61	97	193	290	412	483
R [Ω] - zatěžování	2 593,40	2 387,30	1 826,82	869,35	451,36	241,08	163,90
R [Ω] - odlehčování	2 491,23	2 153,84	1 678,39	800,96	405,90	209,38	159,37

Bod č. 2

Měření č.1

P [kPa]	25	61	97	193	290	412	483
R [Ω] - zatěžování	2 645,38	2 333,22	1 845,36	855,33	452,98	224,90	167,21
R [Ω] - odlehčování	2 501,21	2 108,20	1 608,90	794,12	408,20	208,36	155,90

Měření č.2

P [kPa]	25	61	97	193	290	412	483
R [Ω] - zatěžování	2 602,36	2 365,30	1 865,30	863,30	436,80	239,70	156,60
R [Ω] - odlehčování	2 571,30	2 141,98	1 605,36	769,21	399,91	231,02	152,36

Měření č.3

P [kPa]	25	61	97	193	290	412	483
R [Ω] - zatěžování	2 595,24	2 298,71	1 801,90	863,40	403,85	209,32	168,20
R [Ω] - odlehčování	2 559,60	2 198,36	1 704,35	803,68	409,58	204,90	167,10

Orientační měření Plantografu V08

Měření třech různých měřicích bodů matice senzorů

Bod č. 2

Měření č.4

P [kPa]	25	61	97	193	290	412	483
R [Ω] - zatěžování	2 600,60	2 298,73	1 807,69	874,62	431,90	261,09	159,65
R [Ω] - odlehčování	2 596,36	2 236,30	1 705,50	803,66	409,59	209,36	159,20

Měření č.5

P [kPa]	25	61	97	193	290	412	483
R [Ω] - zatěžování	2 632,00	2 459,25	1 809,50	957,20	403,90	239,90	163,80
R [Ω] - odlehčování	2 547,90	2 197,50	1 687,30	801,90	399,70	251,30	161,20

Bod č. 3

Měření č.1

P [kPa]	25	61	97	193	290	412	483
R [Ω] - zatěžování	2 363,10	2 175,30	1 687,30	751,10	352,90	172,50	141,90
R [Ω] - odlehčování	2 349,80	1 992,30	1 574,60	701,30	319,80	170,20	138,30

Měření č.2

P [kPa]	25	61	97	193	290	412	483
R [Ω] - zatěžování	2 314,60	2 005,60	1 654,50	741,20	311,80	155,90	138,90
R [Ω] - odlehčování	2 403,90	1 911,30	1 543,80	701,60	329,30	159,50	139,40

Měření č.3

P [kPa]	25	61	97	193	290	412	483
R [Ω] - zatěžování	2 351,50	1 987,35	1 687,40	765,40	381,50	187,50	138,50
R [Ω] - odlehčování	2 384,90	1 925,65	1 554,50	701,20	366,50	182,20	139,50

Měření č.4

P [kPa]	25	61	97	193	290	412	483
R [Ω] - zatěžování	2 398,20	2 114,20	1 703,60	785,50	388,90	185,80	149,50
R [Ω] - odlehčování	2 403,60	1 952,50	1 553,00	703,40	381,30	166,21	144,90

Měření č.5

P [kPa]	25	61	97	193	290	412	483
R [Ω] - zatěžování	2 295,30	1 896,50	1 654,20	709,20	387,30	185,30	141,50
R [Ω] - odlehčování	2 214,50	1 901,90	1 558,54	688,30	381,30	182,30	142,80

Průměrné hodnoty měření třech různých měřicích bodů matice senzorů

P [kPa]	25	61	97	193	290	412	483
R [Ω] - zatěžování	2 497,05	2 215,83	1 755,13	821,98	398,98	208,16	156,40
R [Ω] - odlehčování	2 462,46	2 064,88	1 614,50	753,84	377,17	195,87	151,41

PŘÍLOHA E

Měření elektrod – označení „LH“

Rozměry: ØE=2mm, Ød=0,4mm, M=0,1mm

Měřicí bod č. 1

P [kPa]		25,5	61,1	96,77	137,5	183,3	239,3	290,3	351,4	412,5	493,5
1.	PPC - zatěžování	255	229	179	132	94	69	52	46	42	38
	PPC - odlehčování	255	225	175	128	90	65	48	42	38	34
PPČ (zat.) - rozdíl od průměru		0,00	1,87	2,27	1,87	2,27	1,86	2,00	2,47	2,33	2,47
PPČ (odl.) - rozdíl od průměru		0,00	-2,13	-1,73	-2,13	-1,73	-2,14	-2,00	-1,53	-1,67	-1,53
2.	PPC - zatěžování	255	233	184	139	100	71	57	48	43	39
	PPC - odlehčování	255	229	180	135	96	67	53	44	39	35
PPČ (zat.) - rozdíl od průměru		0,00	5,87	7,27	8,87	8,27	3,86	7,00	4,47	3,33	3,47
PPČ (odl.) - rozdíl od průměru		0,00	1,87	3,27	4,87	4,27	-0,14	3,00	0,47	-0,67	-0,53
3.	PPC - zatěžování	255	221	180	134	86	71	51	44	43	38
	PPC - odlehčování	255	220	179	133	85	70	50	43	42	37
PPČ (zat.) - rozdíl od průměru		0,00	-6,13	3,27	3,87	-5,73	3,76	1,00	0,47	3,33	2,47
PPČ (odl.) - rozdíl od průměru		0,00	-7,13	2,27	2,87	-6,73	2,76	0,00	-0,53	2,33	1,47
4.	PPC - zatěžování	255	228	170	134	92	60	50	38	33	34
	PPC - odlehčování	255	233	175	139	97	65	55	43	38	39
PPČ (zat.) - rozdíl od průměru		0,00	0,87	-6,73	3,87	0,27	-7,24	0,00	-5,53	-6,67	-1,53
PPČ (odl.) - rozdíl od průměru		0,00	5,87	-1,73	8,87	5,27	-2,24	5,00	-0,53	-1,67	3,47
5.	PPC - zatěžování	255	227	180	123	92	68	41	44	39	30
	PPC - odlehčování	255	233	186	129	98	74	47	50	45	36
PPČ (zat.) - rozdíl od průměru		0,00	-0,13	3,27	-7,13	0,27	0,76	-9,00	0,47	-0,67	-5,53
PPČ (odl.) - rozdíl od průměru		0,00	5,87	9,27	-1,13	6,27	6,76	-3,00	6,47	5,33	0,47

PPČ - počet pulzů snímače

Průměrné hodnoty měření měřicího bodu č.1

P [kPa]	25,5	61,1	96,77	137,5	183,3	239,3	290,3	351,4	412,5	493,5
Zatěž. - průměr	255,00	227,60	178,60	132,40	92,80	67,74	50,20	44,00	40,00	35,80
Odlhč.- průměr	255,00	228,00	179,00	132,80	93,20	68,14	50,60	44,40	40,40	36,20

Měřicí bod č. 2

P [kPa]		25,5	61,1	96,77	137,5	183,3	239,3	290,3	351,4	412,5	493,5
1.	PPČ - zatěžování	255	230	180	133	95	70	53	47	43	39
	PPČ - odlehčování	255	225	175	128	90	65	48	42	38	34
PPČ (zat.) - rozdíl od průměru		0,00	2,87	3,27	2,87	3,27	2,86	3,00	3,47	3,33	3,47
PPČ (odl.) - rozdíl od průměru		0,00	-2,13	-1,73	-2,13	-1,73	-2,14	-2,00	-1,53	-1,67	-1,53
2.	PPČ - zatěžování	255	231	182	137	98	69	55	46	41	37
	PPČ - odlehčování	255	227	178	133	94	65	51	42	37	33
PPČ (zat.) - rozdíl od průměru		0,00	3,87	5,27	6,87	6,27	1,86	5,00	2,47	1,33	1,47
PPČ (odl.) - rozdíl od průměru		0,00	-0,13	1,27	2,87	2,27	-2,14	1,00	-1,53	-2,67	-2,53
3.	PPČ - zatěžování	255	219	176	122	84	69	40	52	41	36
	PPČ - odlehčování	255	222	179	125	87	72	43	55	44	39
PPČ (zat.) - rozdíl od průměru		0,00	-8,13	-0,73	-8,13	-7,73	1,76	-10,00	8,47	1,33	0,47
PPČ (odl.) - rozdíl od průměru		0,00	-5,13	2,27	-5,13	-4,73	4,76	-7,00	11,47	4,33	3,47
4.	PPČ - zatěžování	255	227	174	138	85	64	54	42	37	38
	PPČ - odlehčování	255	228	175	139	86	65	55	43	38	39
PPČ (zat.) - rozdíl od průměru		0,00	-0,13	-2,73	7,87	-6,73	-3,24	4,00	-1,53	-2,67	2,47
PPČ (odl.) - rozdíl od průměru		0,00	0,87	-1,73	8,87	-5,73	-2,24	5,00	-0,53	-1,67	3,47
5.	PPČ - zatěžování	255	231	178	127	90	60	45	48	38	34
	PPČ - odlehčování	255	228	175	124	87	57	42	45	35	31
PPČ (zat.) - rozdíl od průměru		0,00	3,87	1,27	-3,13	-1,73	-7,24	-5,00	4,47	-1,67	-1,53
PPČ (odl.) - rozdíl od průměru		0,00	0,87	-1,73	-6,13	-4,73	-10,24	-8,00	1,47	-4,67	-4,53

Průměrné hodnoty měření měřicího bodu č.2

P [kPa]	25,5	61,1	96,77	137,5	183,3	239,3	290,3	351,4	412,5	493,5
Zatěž. - průměr	255,00	227,60	178,00	131,40	90,40	66,34	49,40	47,00	40,00	36,80
Odlehč.- průměr	255,00	226,00	176,40	129,80	88,80	64,74	47,80	45,40	38,40	35,20

Měřicí bod č. 3

P [kPa]		25,5	61,1	96,77	137,5	183,3	239,3	290,3	351,4	412,5	493,5
1.	PPČ - zatěžování	255	229	179	132	94	69	52	46	42	38
	PPČ - odlehčování	255	226	176	129	91	66	49	43	39	35
PPČ (zat.) - rozdíl od průměru		0,00	1,87	2,27	1,87	2,27	1,86	2,00	2,47	2,33	2,47
PPČ (odl.) - rozdíl od průměru		0,00	-1,13	-0,73	-1,13	-0,73	-1,14	-1,00	-0,53	-0,67	-0,53
2.	PPČ - zatěžování	255	232	183	138	99	70	56	47	42	38
	PPČ - odlehčování	255	231	182	137	98	69	55	46	41	37
PPČ (zat.) - rozdíl od průměru		0,00	4,87	6,27	7,87	7,27	2,86	6,00	3,47	2,33	2,47
PPČ (odl.) - rozdíl od průměru		0,00	3,87	5,27	6,87	6,27	1,86	5,00	2,47	1,33	1,47
3.	PPČ - zatěžování	255	219	171	114	84	73	40	37	42	29
	PPČ - odlehčování	255	220	172	115	85	74	41	38	43	30
PPČ (zat.) - rozdíl od průměru		0,00	-8,13	-5,73	-16,13	-7,73	5,76	-10,00	-6,53	2,33	-6,53
PPČ (odl.) - rozdíl od průměru		0,00	-7,13	-4,73	-15,13	-6,73	6,76	-9,00	-5,53	3,33	-5,53
4.	PPČ - zatěžování	255	226	171	125	96	64	54	42	34	35
	PPČ - odlehčování	255	226	171	125	96	64	54	42	34	35
PPČ (zat.) - rozdíl od průměru		0,00	-1,13	-5,73	-5,13	4,27	-3,24	4,00	-1,53	-5,67	-0,53
PPČ (odl.) - rozdíl od průměru		0,00	-1,13	-5,73	-5,13	4,27	-3,24	4,00	-1,53	-5,67	-0,53
5.	PPČ - zatěžování	255	225	164	124	87	61	50	26	35	30
	PPČ - odlehčování	255	226	165	125	88	62	51	27	36	31
PPČ (zat.) - rozdíl od průměru		0,00	-2,13	-12,73	-6,13	-4,73	-6,24	0,00	-17,53	-4,67	-5,53
PPČ (odl.) - rozdíl od průměru		0,00	-1,13	-11,73	-5,13	-3,73	-5,24	1,00	-16,53	-3,67	-4,53

Průměrné hodnoty měření měřicího bodu č.3

P [kPa]	25,5	61,1	96,77	137,5	183,3	239,3	290,3	351,4	412,5	493,5
Zatěž. - průměr	255,00	226,20	173,60	126,60	92,00	67,34	50,40	39,60	39,00	34,00
Odlehč.- průměr	255,00	225,80	173,20	126,20	91,60	66,94	50,00	39,20	38,60	33,60

Průměrné hodnoty z měření všech tří bodů

P [kPa]	25,5	61,1	96,77	137,5	183,3	239,3	290,3	351,4	412,5	493,5
Zatěž. - průměr	255,00	227,13	176,73	130,13	91,73	67,14	50,00	43,53	39,67	35,53
Odlehč.- průměr	255,00	226,60	176,20	129,60	91,20	66,61	49,47	43,00	39,13	35,00

P [kPa]	25,5	61,1	96,77	137,5	183,3	239,3	290,3	351,4	412,5	493,5
1.bod	255,00	227,80	178,80	132,60	93,00	67,94	50,40	44,20	40,20	36,00
2.bod	255,00	226,80	177,20	130,60	89,60	65,54	48,60	46,20	39,20	36,00
3.bod	255,00	226,00	173,40	126,40	91,80	67,14	50,20	39,40	38,80	33,80

P [kPa]	25,5	61,1	96,77	137,5	183,3	239,3	290,3	351,4	412,5	493,5
CELK. PRŮMĚR - LH	255,00	226,87	176,47	129,87	91,47	66,87	49,73	43,27	39,40	35,27

Statistické vyhodnocení naměřených hodnot

Zatěžování										
P [kPa]	25,5	61,1	96,77	137,5	183,3	239,3	290,3	351,4	412,5	493,5
PPČ [-] - průměr	255,00	227,13	176,73	130,13	91,73	67,14	50,00	43,53	39,67	35,53
Nejistota UA [-]	0,00	1,15	1,46	1,88	1,42	1,11	1,49	1,60	0,89	0,89
Výběrový rozptyl [-]	0,00	19,98	31,78	53,27	30,21	18,39	33,29	38,55	11,95	11,84
Výběr. sm. odch. [-]	0,00	4,47	5,64	7,30	5,50	4,29	5,77	6,21	3,46	3,44

Odlehčování										
P [kPa]	25,5	61,1	96,77	137,5	183,3	239,3	290,3	351,4	412,5	493,5
PPČ [-] - průměr	255,00	226,60	176,20	129,60	91,20	66,61	49,47	43,00	39,13	35,00
Nejistota UA [-]	0,00	1,05	1,28	1,69	1,27	1,18	1,22	1,54	0,85	0,77
Výběrový rozptyl [-]	0,00	16,42	24,62	42,99	24,05	20,93	22,43	35,45	10,86	8,88
Výběr. sm. odch. [-]	0,00	1,09	1,64	2,87	1,60	1,40	1,50	2,36	0,72	0,59

PŘÍLOHA F

Měření elektrod – označení „PH“

Rozměry: ØE=2mm, Ød=0,1mm, M=0,1mm

Měřicí bod č. 1

	P [kPa]	25,5	61,1	96,77	137,5	183,3	239,3	290,3	351,4	412,5	493,5
1.	PPČ - zatěžování	254	250	232	205	169	96	76	62	58	54
	PPČ - odlehčování	255	242	196	157	134	95	73	65	60	53
	PPČ (zat.) - rozdíl od průměru	-0,73	-1,13	-7,60	10,53	16,14	-15,00	-11,66	-8,20	-3,60	0,73
	PPČ (odl.) - rozdíl od průměru	0,27	-9,13	-43,60	-37,47	-18,86	-16,00	-14,66	-5,20	-1,60	-0,27
2.	PPČ - zatěžování	254	247	220	194	139	106	80	67	59	55
	PPČ - odlehčování	255	238	193	158	132	99	76	76	64	54
	PPČ (zat.) - rozdíl od průměru	-0,73	-4,13	-19,60	-0,47	-13,86	-5,00	-7,66	-3,20	-2,60	1,73
	PPČ (odl.) - rozdíl od průměru	0,27	-13,13	-46,60	-36,47	-20,86	-12,00	-11,66	5,80	2,40	0,73
3.	PPČ - zatěžování	255	248	224	206	167	108	81	73	64	54
	PPČ - odlehčování	255	252	215	168	137	112	88	74	62	55
	PPČ (zat.) - rozdíl od průměru	0,27	-3,13	-15,60	11,53	14,14	-3,00	-6,66	2,80	2,40	0,73
	PPČ (odl.) - rozdíl od průměru	0,27	0,87	-24,60	-26,47	-15,86	1,00	0,34	3,80	0,40	1,73
4.	PPČ - zatěžování	253	252	238	191	147	105	88	70	64	52
	PPČ - odlehčování	255	250	243	196	152	110	93	75	69	57
	PPČ (zat.) - rozdíl od průměru	-1,73	0,87	-1,60	-3,46	-5,86	-6,00	0,34	-0,20	2,40	-1,27
	PPČ (odl.) - rozdíl od průměru	0,27	-1,13	3,40	1,54	-0,86	-1,00	5,34	4,80	7,40	3,73
5.	PPČ - zatěžování	255	245	234	185	152	112	87	68	54	49
	PPČ - odlehčování	254	251	240	191	158	118	93	74	60	55
	PPČ (zat.) - rozdíl od průměru	0,27	-6,13	-5,60	-9,46	-0,86	1,00	-0,66	-2,20	-7,60	-4,27
	PPČ (odl.) - rozdíl od průměru	-0,73	-0,13	0,40	-3,46	5,14	7,00	5,34	3,80	-1,60	1,73

PPČ - počet pulzů snimače

Průměrné hodnoty měření měřicího bodu č.1

P [kPa]	25,5	61,1	96,77	137,5	183,3	239,3	290,3	351,4	412,5	493,5
Zatěž. - průměr	254,20	248,40	229,60	196,20	154,80	105,40	82,40	68,00	59,80	52,80
Odlhč.- průměr	254,80	246,60	217,40	174,00	142,60	106,80	84,60	72,80	63,00	54,80

Měřicí bod č. 2

P [kPa]		25,5	61,1	96,77	137,5	183,3	239,3	290,3	351,4	412,5	493,5
1.	PPČ - zatěžování	255	254	250	231	161	125	101	84	77	60
	PPČ - odlehčování	255	254	250	230	200	123	94	76	64	60
PPČ (zat.) - rozdíl od průměru		0,27	2,87	10,40	36,53	8,14	14,00	13,34	13,80	15,40	6,73
PPČ (odl.) - rozdíl od průměru		0,27	2,87	10,40	35,53	47,14	12,00	6,34	5,80	2,40	6,73
2.	PPČ - zatěžování	255	254	253	221	173	130	99	77	74	65
	PPČ - odlehčování	255	254	251	234	166	116	101	72	74	64
PPČ (zat.) - rozdíl od průměru		0,27	2,87	13,40	26,53	20,14	19,00	11,34	6,80	12,40	11,73
PPČ (odl.) - rozdíl od průměru		0,27	2,87	11,40	39,53	13,14	5,00	13,34	1,80	12,40	10,73
3.	PPČ - zatěžování	255	254	248	199	169	113	103	76	70	68
	PPČ - odlehčování	255	254	249	197	174	117	89	80	72	68
PPČ (zat.) - rozdíl od průměru		0,27	2,87	8,40	4,53	16,14	2,00	15,34	5,80	8,40	14,73
PPČ (odl.) - rozdíl od průměru		0,27	2,87	9,40	2,53	21,14	6,00	1,34	9,80	10,40	14,73
4.	PPČ - zatěžování	255	254	242	192	151	109	92	74	68	52
	PPČ - odlehčování	255	254	243	193	152	110	93	75	69	53
PPČ (zat.) - rozdíl od průměru		0,27	2,87	2,40	-2,46	-1,86	-2,00	4,34	3,80	6,40	-1,27
PPČ (odl.) - rozdíl od průměru		0,27	2,87	3,40	-1,46	-0,86	-1,00	5,34	4,80	7,40	-0,27
5.	PPČ - zatěžování	255	254	232	189	146	109	87	66	63	53
	PPČ - odlehčování	255	251	229	186	143	106	84	63	60	50
PPČ (zat.) - rozdíl od průměru		0,27	2,87	-7,60	-5,46	-6,86	-2,00	-0,66	-4,20	1,40	-0,27
PPČ (odl.) - rozdíl od průměru		0,27	-0,13	-10,60	-8,46	-9,86	-5,00	-3,66	-7,20	-1,60	-3,27

Průměrné hodnoty měření měřicího bodu č.2

P [kPa]	25,5	61,1	96,77	137,5	183,3	239,3	290,3	351,4	412,5	493,5
Zatěž. - průměr	255,00	254,00	245,00	206,40	160,00	117,20	96,40	75,40	70,40	59,60
Odlehč.- průměr	255,00	253,40	244,40	208,00	167,00	114,40	92,20	73,20	67,80	59,00

Měřicí bod č. 3

P [kPa]		25,5	61,1	96,77	137,5	183,3	239,3	290,3	351,4	412,5	493,5
1.	PPČ - zatěžování	255	253	251	176	147	107	83	62	55	44
	PPČ - odlehčování	255	253	235	173	134	110	90	63	50	42
PPČ (zat.) - rozdíl od průměru		0,27	1,87	11,40	-18,47	-5,86	-4,00	-4,66	-8,20	-6,60	-9,27
PPČ (odl.) - rozdíl od průměru		0,27	1,87	-4,60	-21,47	-18,86	-1,00	2,34	-7,20	-11,60	-11,27
2.	PPČ - zatěžování	255	254	251	180	134	113	88	70	53	43
	PPČ - odlehčování	255	253	248	170	128	105	83	60	47	41
PPČ (zat.) - rozdíl od průměru		0,27	2,87	11,40	-14,47	-18,86	2,00	0,34	-0,20	-8,60	-10,27
PPČ (odl.) - rozdíl od průměru		0,27	1,87	8,40	-24,47	-24,86	-6,00	-4,66	-10,20	-14,60	-12,27
3.	PPČ - zatěžování	255	253	251	165	131	108	82	65	51	40
	PPČ - odlehčování	255	253	239	171	130	109	95	64	49	42
PPČ (zat.) - rozdíl od průměru		0,27	1,87	11,40	-29,47	-21,86	-3,00	-5,66	-5,20	-10,60	-13,27
PPČ (odl.) - rozdíl od průměru		0,27	1,87	-0,60	-23,47	-22,86	-2,00	7,34	-6,20	-12,60	-11,27
4.	PPČ - zatěžování	255	250	239	195	151	109	91	76	60	54
	PPČ - odlehčování	255	250	239	195	151	109	91	76	60	54
PPČ (zat.) - rozdíl od průměru		0,27	-1,15	-0,58	0,54	-1,89	-2,00	3,31	5,80	-1,58	0,76
PPČ (odl.) - rozdíl od průměru		0,27	-1,15	-0,58	0,54	-1,89	-2,00	3,31	5,80	-1,58	0,76
5.	PPČ - zatěžování	255	245	229	188	156	115	77	63	54	56
	PPČ - odlehčování	255	246	230	189	157	116	78	64	55	57
PPČ (zat.) - rozdíl od průměru		0,27	-6,15	-10,58	-6,46	3,11	4,00	-10,69	-7,20	-7,58	2,76
PPČ (odl.) - rozdíl od průměru		0,27	-5,15	-9,58	-5,46	4,11	5,00	-9,69	-6,20	-6,58	3,76

Průměrné hodnoty měření měřicího bodu č.3

P [kPa]	25,5	61,1	96,77	137,5	183,3	239,3	290,3	351,4	412,5	493,5
Zatěž. - průměr	255,00	250,99	244,21	180,80	143,79	110,40	84,19	67,20	54,61	47,41
Odlehč.- průměr	255,00	250,99	238,21	179,60	139,99	109,80	87,39	65,40	52,21	47,21

Průměrné hodnoty z měření všech tří bodů

P [kPa]	25,5	61,1	96,77	137,5	183,3	239,3	290,3	351,4	412,5	493,5
Zatěž. - průměr	254,73	251,13	239,60	194,47	152,86	111,00	87,66	70,20	61,60	53,27
Odlehč.- průměr	254,93	250,33	233,34	187,20	149,86	110,33	88,06	70,47	61,00	53,67

P [kPa]	25,5	61,1	96,77	137,5	183,3	239,3	290,3	351,4	412,5	493,5
1.bod	254,50	247,50	223,50	185,10	148,70	106,10	83,50	70,40	61,40	53,80
2.bod	255,00	253,70	244,70	207,20	163,50	115,80	94,30	74,30	69,10	59,30
3.bod	255,00	250,99	241,21	180,20	141,89	110,10	85,79	66,30	53,41	47,31

P [kPa]	25,5	61,1	96,77	137,5	183,3	239,3	290,3	351,4	412,5	493,5
CELK. PRŮMĚR - PH	254,83	250,73	236,47	190,83	151,36	110,67	87,86	70,33	61,30	53,47

Statistické vyhodnocení naměřených hodnot

Zatěžování										
P [kPa]	25,5	61,1	96,77	137,5	183,3	239,3	290,3	351,4	412,5	493,5
PPČ [-] - průměr	254,7	251,1	239,6	194,5	152,9	111,0	87,7	70,2	61,6	53,3
Nejistota UA [-]	0,15	0,97	2,80	4,31	3,35	2,09	2,16	1,65	2,05	1,95
Výběrový rozptyl [-]	0,35	14,09	117,35	278,68	167,98	65,29	69,98	40,88	63,09	57,22
Výběr. sm. odch. [-]	0,59	3,75	10,83	16,69	12,96	8,08	8,37	6,39	7,94	7,56

Odlehčování										
P [kPa]	25,5	61,1	96,77	137,5	183,3	239,3	290,3	351,4	412,5	493,5
PPČ [-] - průměr	254,93	250,33	233,34	187,20	149,86	110,33	88,06	70,47	61,00	53,67
Nejistota UA [-]	0,09	1,51	5,04	6,17	5,13	1,89	2,02	1,67	2,12	1,99
Výběrový rozptyl [-]	0,11	34,26	380,34	571,05	394,74	53,71	61,12	41,92	67,36	59,14
Výběr. sm. odch. [-]	0,01	2,28	25,36	38,07	26,32	3,58	4,07	2,79	4,49	3,94

PŘÍLOHA G

Měření elektrod – označení „LD“

Rozměry: ØE=2,5mm, Ød=0,4mm, M=0,25mm

Měřicí bod č. 1

P [kPa]		25,5	61,1	96,77	137,5	183,3	239,3	290,3	351,4	412,5	493,5
1.	PPČ - zatěžování	255	197	148	118	87	54	43	37	34	32
	PPČ - odlehčování	255	175	129	94	69	48	41	35	34	32
PPČ (zat.) - rozdíl od průměru		1,00	-8,60	-14,67	-10,26	-7,60	-19,47	-13,53	-11,00	-8,07	-4,80
PPČ (odl.) - rozdíl od průměru		1,00	-30,60	-33,67	-34,26	-25,60	-25,47	-15,53	-13,00	-8,07	-4,80
2.	PPČ - zatěžování	255	205	139	118	68	53	41	36	34	31
	PPČ - odlehčování	255	175	124	95	70	49	38	37	32	32
PPČ (zat.) - rozdíl od průměru		1,00	-0,60	-23,67	-10,26	-26,60	-20,47	-15,53	-12,00	-8,07	-5,80
PPČ (odl.) - rozdíl od průměru		1,00	-30,60	-38,67	-33,26	-24,60	-24,47	-18,53	-11,00	-10,07	-4,80
3.	PPČ - zatěžování	255	211	160	125	90	68	46	39	35	34
	PPČ - odlehčování	255	171	139	100	84	54	58	42	38	33
PPČ (zat.) - rozdíl od průměru		1,00	5,40	-2,67	-3,26	-4,60	-5,47	-10,53	-9,00	-7,07	-2,80
PPČ (odl.) - rozdíl od průměru		1,00	-34,60	-23,67	-28,26	-10,60	-19,47	1,47	-6,00	-4,07	-3,80
4.	PPČ - zatěžování	253	203	162	121	96	70	57	38	37	36
	PPČ - odlehčování	255	208	167	126	101	75	62	43	42	41
PPČ (zat.) - rozdíl od průměru		-1,00	-2,60	-0,67	-7,27	1,40	-3,46	0,47	-10,00	-5,06	-0,80
PPČ (odl.) - rozdíl od průměru		1,00	2,40	4,33	-2,27	6,40	1,54	5,47	-5,00	-0,06	4,20
5.	PPČ - zatěžování	252	190	155	128	96	61	50	49	42	36
	PPČ - odlehčování	255	196	161	134	102	67	56	55	48	42
PPČ (zat.) - rozdíl od průměru		-2,00	-15,60	-7,67	-0,27	1,40	-12,46	-6,53	1,00	-0,06	-0,80
PPČ (odl.) - rozdíl od průměru		1,00	-9,60	-1,67	5,73	7,40	-6,46	-0,53	7,00	5,94	5,20

PPČ - počet pulzů snímače

Průměrné hodnoty měření měřicího bodu č.1

P [kPa]	25,5	61,1	96,77	137,5	183,3	239,3	290,3	351,4	412,5	493,5
Zatěž. - průměr	254,00	201,20	152,80	122,00	87,40	61,20	47,40	39,80	36,40	33,80
Odléhč.- průměr	255,00	185,00	144,00	109,80	85,20	58,60	51,00	42,40	38,80	36,00

Měřicí bod č. 2

	P [kPa]	25,5	61,1	96,77	137,5	183,3	239,3	290,3	351,4	412,5	493,5
1.	PPČ - zatěžování	255	204	170	135	82	66	51	46	43	36
	PPČ - odlehčování	254	189	147	120	89	70	58	49	41	37
	PPČ (zat.) - rozdíl od průměru	1,00	-1,60	7,33	6,74	-12,60	-7,47	-5,53	-2,00	0,93	-0,80
	PPČ (odl.) - rozdíl od průměru	0,00	-16,60	-15,67	-8,26	-5,60	-3,47	1,47	1,00	-1,07	0,20
2.	PPČ - zatěžování	252	203	169	138	91	68	60	52	41	36
	PPČ - odlehčování	254	202	170	142	95	69	36	50	41	35
	PPČ (zat.) - rozdíl od průměru	-2,00	-2,60	6,33	9,74	-3,60	-5,47	3,47	4,00	-1,07	-0,80
	PPČ (odl.) - rozdíl od průměru	0,00	-3,60	7,33	13,74	0,40	-4,47	-20,53	2,00	-1,07	-1,80
3.	PPČ - zatěžování	251	202	162	136	86	70	58	40	38	35
	PPČ - odlehčování	253	199	158	130	96	72	57	44	39	35
	PPČ (zat.) - rozdíl od průměru	-3,00	-3,60	-0,67	7,74	-8,60	-3,47	1,47	-8,00	-4,07	-1,80
	PPČ (odl.) - rozdíl od průměru	-1,00	-6,60	-4,67	1,74	1,40	-1,47	0,47	-4,00	-3,07	-1,80
4.	PPČ - zatěžování	255	208	159	125	102	68	63	42	41	40
	PPČ - odlehčování	255	209	160	126	103	69	64	43	42	41
	PPČ (zat.) - rozdíl od průměru	1,00	2,40	-3,67	-3,27	7,40	-5,46	6,47	-6,00	-1,06	3,20
	PPČ (odl.) - rozdíl od průměru	1,00	3,40	-2,67	-2,27	8,40	-4,46	7,47	-5,00	-0,06	4,20
5.	PPČ - zatěžování	255	200	159	132	100	77	54	56	38	35
	PPČ - odlehčování	253	197	156	129	97	74	51	53	35	32
	PPČ (zat.) - rozdíl od průměru	1,00	-5,60	-3,67	3,73	5,40	3,54	-2,53	8,00	-4,06	-1,80
	PPČ (odl.) - rozdíl od průměru	-1,00	-8,60	-6,67	0,73	2,40	0,54	-5,53	5,00	-7,06	-4,80

Průměrné hodnoty měření měřicího bodu č.2

P [kPa]	25,5	61,1	96,77	137,5	183,3	239,3	290,3	351,4	412,5	493,5
Zatěž. - průměr	253,60	203,40	163,80	133,20	92,20	69,80	57,20	47,20	40,20	36,40
Odlehč.- průměr	253,80	199,20	158,20	129,40	96,00	70,80	53,20	47,80	39,60	36,00

Měřicí bod č. 3

	P [kPa]	25,5	61,1	96,77	137,5	183,3	239,3	290,3	351,4	412,5	493,5
1.	PPČ - zatěžování	255	220	162	135	120	89	70	52	50	44
	PPČ - odlehčování	255	225	164	132	113	101	72	54	48	46
	PPČ (zat.) - rozdíl od průměru	1,00	14,40	-0,67	6,74	25,40	15,53	13,47	4,00	7,93	7,20
	PPČ (odl.) - rozdíl od průměru	1,00	19,40	1,33	3,74	18,40	27,53	15,47	6,00	5,93	9,20
2.	PPČ - zatěžování	255	220	180	136	110	90	70	62	55	44
	PPČ - odlehčování	254	214	198	145	111	98	74	70	52	43
	PPČ (zat.) - rozdíl od průměru	1,00	14,40	17,33	7,74	15,40	16,53	13,47	14,00	12,93	7,20
	PPČ (odl.) - rozdíl od průměru	0,00	8,40	35,33	16,74	16,40	24,53	17,47	22,00	9,93	6,20
3.	PPČ - zatěžování	255	217	190	132	120	105	75	70	52	42
	PPČ - odlehčování	255	200	185	138	130	107	69	60	55	43
	PPČ (zat.) - rozdíl od průměru	1,00	11,40	27,33	3,74	25,40	31,53	18,47	22,00	9,93	5,20
	PPČ (odl.) - rozdíl od průměru	1,00	-5,60	22,33	9,74	35,40	33,53	12,47	12,00	12,93	6,20
4.	PPČ - zatěžování	254	208	156	122	90	82	59	45	53	40
	PPČ - odlehčování	255	208	156	122	90	82	59	45	53	40
	PPČ (zat.) - rozdíl od průměru	0,00	2,40	-6,67	-6,27	-4,60	8,54	2,47	-3,00	10,94	3,20
	PPČ (odl.) - rozdíl od průměru	1,00	2,40	-6,67	-6,27	-4,60	8,54	2,47	-3,00	10,94	3,20
5.	PPČ - zatěžování	253	196	169	123	81	81	51	56	38	31
	PPČ - odlehčování	254	197	170	124	82	82	52	57	39	32
	PPČ (zat.) - rozdíl od průměru	-1,00	-9,60	6,33	-5,27	-13,60	7,54	-5,53	8,00	-4,06	-5,80
	PPČ (odl.) - rozdíl od průměru	0,00	-8,60	7,33	-4,27	-12,60	8,54	-4,53	9,00	-3,06	-4,80

Průměrné hodnoty měření měřicího bodu č.3

P [kPa]	25,5	61,1	96,77	137,5	183,3	239,3	290,3	351,4	412,5	493,5
Zatěž. - průměr	254,40	212,20	171,40	129,60	104,20	89,40	65,00	57,00	49,60	40,20
Odlehč.- průměr	254,60	208,80	174,60	132,20	105,20	94,00	65,20	57,20	49,40	40,80

Průměrné hodnoty z měření všech tří bodů

P [kPa]	25,5	61,1	96,77	137,5	183,3	239,3	290,3	351,4	412,5	493,5
Zatěž. - průměr	254,00	205,60	162,67	128,26	94,60	73,47	56,53	48,00	42,07	36,80
Odlehč.- průměr	254,47	197,67	158,93	123,80	95,46	74,47	56,47	49,13	42,60	37,60

P [kPa]	25,5	61,1	96,77	137,5	183,3	239,3	290,3	351,4	412,5	493,5
1.bod	254,50	193,10	148,40	115,90	86,30	59,90	49,20	41,10	37,60	34,90
2.bod	253,70	201,30	161,00	131,30	94,10	70,30	55,20	47,50	39,90	36,20
3.bod	254,50	210,50	173,00	130,90	104,70	91,70	65,10	57,10	49,50	40,50

P [kPa]	25,5	61,1	96,77	137,5	183,3	239,3	290,3	351,4	412,5	493,5
CELK. PRŮMĚR - LD	254,23	201,63	160,80	126,03	95,03	73,97	56,50	48,57	42,33	37,20

Statistické vyhodnocení naměřených hodnot

Zatěžování										
P [kPa]	25,5	61,1	96,77	137,5	183,3	239,3	290,3	351,4	412,5	493,5
PPC [-] - průměr	254,0	205,6	162,7	128,3	94,6	73,5	56,5	48,0	42,1	36,8
Nejistota UA [-]	0,37	2,24	3,16	1,81	3,69	3,63	2,59	2,58	1,83	1,11
Výběrový rozptyl [-]	2,00	75,40	149,67	48,94	203,83	198,12	100,84	100,00	50,49	18,46
Výběr. sm. odch. [-]	1,41	8,68	12,23	7,00	14,28	14,08	10,04	10,00	7,11	4,30

Odlehčování										
P [kPa]	25,5	61,1	96,77	137,5	183,3	239,3	290,3	351,4	412,5	493,5
PPC [-] - průměr	254,47	197,67	158,93	123,80	95,46	74,47	56,47	49,13	42,60	37,60
Nejistota UA [-]	0,23	4,44	5,08	4,27	4,15	4,55	2,97	2,42	1,84	1,29
Výběrový rozptyl [-]	0,79	295,96	387,85	273,54	258,50	311,05	132,41	87,50	50,71	24,80
Výběr. sm. odch. [-]	0,05	19,73	25,86	18,24	17,23	20,74	8,83	5,83	3,38	1,65

PŘÍLOHA H

Měření elektrod – označení „PD“

Rozměry: ØE=2,5mm, Ød=0,1mm, M=0,25mm

Měřicí bod č. 1

P [kPa]		25,5	61,1	96,77	137,5	183,3	239,3	290,3	351,4	412,5	493,5
1.	PPČ - zatěžování	253	231	189	120	90	63	60	42	38	36
	PPČ - odlehčování	252	210	170	114	83	66	55	44	39	37
PPČ (zat.) - rozdíl od průměru		1,53	4,13	5,53	-17,53	-7,13	-10,00	0,27	-5,53	-3,67	-0,74
PPČ (odl.) - rozdíl od průměru		0,53	-16,87	-13,47	-23,53	-14,13	-7,00	-4,73	-3,53	-2,67	0,26
2.	PPČ - zatěžování	252	211	178	130	91	65	54	44	40	36
	PPČ - odlehčování	253	210	169	129	83	63	56	45	42	36
PPČ (zat.) - rozdíl od průměru		0,53	-15,87	-5,47	-7,53	-6,13	-8,00	-5,73	-3,53	-1,67	-0,74
PPČ (odl.) - rozdíl od průměru		1,53	-16,87	-14,47	-8,53	-14,13	-10,00	-3,73	-2,53	0,33	-0,74
3.	PPČ - zatěžování	252	220	185	139	98	60	54	45	41	37
	PPČ - odlehčování	253	201	181	121	85	69	58	44	40	36
PPČ (zat.) - rozdíl od průměru		0,53	-6,87	1,53	1,47	0,87	-13,00	-5,73	-2,53	-0,67	0,26
PPČ (odl.) - rozdíl od průměru		1,53	-25,87	-2,47	-16,53	-12,13	-4,00	-1,73	-3,53	-1,67	-0,74
4.	PPČ - zatěžování	248	224	181	140	96	75	60	47	44	35
	PPČ - odlehčování	253	229	186	145	101	80	65	52	49	40
PPČ (zat.) - rozdíl od průměru		-3,47	-2,87	-2,47	2,47	-1,13	2,00	0,27	-0,53	2,34	-1,73
PPČ (odl.) - rozdíl od průměru		1,53	2,13	2,53	7,47	3,87	7,00	5,27	4,47	7,34	3,27
5.	PPČ - zatěžování	249	223	183	137	96	75	63	48	41	35
	PPČ - odlehčování	255	229	189	143	102	81	69	54	47	41
PPČ (zat.) - rozdíl od průměru		-2,47	-3,87	-0,47	-0,53	-1,13	2,00	3,27	0,47	-0,66	-1,73
PPČ (odl.) - rozdíl od průměru		3,53	2,13	5,53	5,47	4,87	8,00	9,27	6,47	5,34	4,27

PPČ - počet pulzů snímače

Průměrné hodnoty měření měřicího bodu č.1

P [kPa]	25,5	61,1	96,77	137,5	183,3	239,3	290,3	351,4	412,5	493,5
Zatěž. - průměr	250,80	221,80	183,20	133,20	94,20	67,60	58,20	45,20	40,80	35,80
Odlehč.- průměr	253,20	215,80	179,00	130,40	90,80	71,80	60,60	47,80	43,40	38,00

Měřicí bod č. 2

	P [kPa]	25,5	61,1	96,77	137,5	183,3	239,3	290,3	351,4	412,5	493,5
1.	PPČ - zatěžování	254	248	210	155	101	74	60	49	45	36
	PPČ - odlehčování	253	230	180	145	96	76	52	46	40	36
	PPČ (zat.) - rozdíl od průměru	2,53	21,13	26,53	17,47	3,87	1,00	0,27	1,47	3,33	-0,74
	PPČ (odl.) - rozdíl od průměru	1,53	3,13	-3,47	7,47	-1,13	3,00	-7,73	-1,53	-1,67	-0,74
2.	PPČ - zatěžování	255	240	193	145	94	70	58	45	38	35
	PPČ - odlehčování	254	230	180	135	97	75	56	43	39	35
	PPČ (zat.) - rozdíl od průměru	3,53	13,13	9,53	7,47	-3,13	-3,00	-1,73	-2,53	-3,67	-1,74
	PPČ (odl.) - rozdíl od průměru	2,53	3,13	-3,47	-2,53	-0,13	2,00	-3,73	-4,53	-2,67	-1,74
3.	PPČ - zatěžování	255	243	200	150	101	80	60	49	40	36
	PPČ - odlehčování	253	234	198	149	103	79	65	45	38	35
	PPČ (zat.) - rozdíl od průměru	3,53	16,13	16,53	12,47	3,87	7,00	0,27	1,47	-1,67	-0,74
	PPČ (odl.) - rozdíl od průměru	1,53	7,13	14,53	11,47	5,87	6,00	5,27	-2,53	-3,67	-1,74
4.	PPČ - zatěžování	252	222	175	130	100	72	53	51	36	36
	PPČ - odlehčování	253	223	176	131	101	73	54	52	37	37
	PPČ (zat.) - rozdíl od průměru	0,53	-4,87	-8,47	-7,53	2,87	-1,00	-6,73	3,47	-5,66	-0,73
	PPČ (odl.) - rozdíl od průměru	1,53	-3,87	-7,47	-6,53	3,87	0,00	-5,73	4,47	-4,66	0,27
5.	PPČ - zatěžování	253	227	187	141	89	79	67	43	45	39
	PPČ - odlehčování	250	224	184	138	86	76	64	40	42	36
	PPČ (zat.) - rozdíl od průměru	1,53	0,13	3,53	3,47	-8,13	6,00	7,27	-4,53	3,34	2,27
	PPČ (odl.) - rozdíl od průměru	-1,47	-2,87	0,53	0,47	-11,13	3,00	4,27	-7,53	0,34	-0,73

Průměrné hodnoty měření měřicího bodu č.2

P [kPa]	25,5	61,1	96,77	137,5	183,3	239,3	290,3	351,4	412,5	493,5
Zatěž. - průměr	253,80	236,00	193,00	144,20	97,00	75,00	59,60	47,40	40,80	36,40
Odlehč. - průměr	252,60	228,20	183,60	139,60	96,60	75,80	58,20	45,20	39,20	35,80

Měřicí bod č. 3

	P [kPa]	25,5	61,1	96,77	137,5	183,3	239,3	290,3	351,4	412,5	493,5
1.	PPČ - zatěžování	250	221	175	140	108	80	60	51	44	40
	PPČ - odlehčování	249	210	150	124	100	78	64	53	45	39
	PPČ (zat.) - rozdíl od průměru	-1,47	-5,87	-8,47	2,47	10,87	7,00	0,27	3,47	2,33	3,26
	PPČ (odl.) - rozdíl od průměru	-2,47	-16,87	-33,47	-13,53	2,87	5,00	4,27	5,47	3,33	2,26
2.	PPČ - zatěžování	249	236	181	145	107	90	72	58	50	42
	PPČ - odlehčování	246	209	160	132	101	80	68	52	48	41
	PPČ (zat.) - rozdíl od průměru	-2,47	9,13	-2,47	7,47	9,87	17,00	12,27	10,47	8,33	5,26
	PPČ (odl.) - rozdíl od průměru	-5,47	-17,87	-23,47	-5,53	3,87	7,00	8,27	4,47	6,33	4,26
3.	PPČ - zatěžování	248	220	170	132	96	78	64	50	43	36
	PPČ - odlehčování	246	210	158	130	94	74	62	52	43	36
	PPČ (zat.) - rozdíl od průměru	-3,47	-6,87	-13,47	-5,53	-1,13	5,00	4,27	2,47	1,33	-0,74
	PPČ (odl.) - rozdíl od průměru	-5,47	-16,87	-25,47	-7,53	-3,13	1,00	2,27	4,47	1,33	-0,74
4.	PPČ - zatěžování	252	218	172	128	103	70	53	51	36	36
	PPČ - odlehčování	252	218	172	128	103	70	53	51	36	36
	PPČ (zat.) - rozdíl od průměru	0,53	-8,87	-11,47	-9,53	5,87	-3,00	-6,73	3,47	-5,66	-0,73
	PPČ (odl.) - rozdíl od průměru	0,53	-8,87	-11,47	-9,53	5,87	-3,00	-6,73	3,47	-5,66	-0,73
5.	PPČ - zatěžování	250	219	173	131	87	64	58	40	44	36
	PPČ - odlehčování	251	220	174	132	88	65	59	41	45	37
	PPČ (zat.) - rozdíl od průměru	-1,47	-7,87	-10,47	-6,53	-10,13	-9,00	-1,73	-7,53	2,34	-0,73
	PPČ (odl.) - rozdíl od průměru	-0,47	-6,87	-9,47	-5,53	-9,13	-8,00	-0,73	-6,53	3,34	0,27

Průměrné hodnoty měření měřicího bodu č.3

P [kPa]	25,5	61,1	96,77	137,5	183,3	239,3	290,3	351,4	412,5	493,5
Zatěž. - průměr	249,80	222,80	174,20	135,20	100,20	76,40	61,40	50,00	43,40	38,00
Odlehč. - průměr	248,80	213,40	162,80	129,20	97,20	73,40	61,20	49,80	43,40	37,80

Průměrné hodnoty z měření všech tří bodů

P [kPa]	25,5	61,1	96,77	137,5	183,3	239,3	290,3	351,4	412,5	493,5
Zatěž. - průměr	251,47	226,87	183,47	137,53	97,13	73,00	59,73	47,53	41,67	36,74
Odlehč.- průměr	251,53	219,13	175,13	133,07	94,87	73,67	60,00	47,60	42,00	37,20

P [kPa]	25,5	61,1	96,77	137,5	183,3	239,3	290,3	351,4	412,5	493,5
1.bod	252,00	218,80	181,10	131,80	92,50	69,70	59,40	46,50	42,10	36,90
2.bod	253,20	232,10	188,30	141,90	96,80	75,40	58,90	46,30	40,00	36,10
3.bod	249,30	218,10	168,50	132,20	98,70	74,90	61,30	49,90	43,40	37,90

P [kPa]	25,5	61,1	96,77	137,5	183,3	239,3	290,3	351,4	412,5	493,5
CELK. PRŮMĚR - PD	251,50	223,00	179,30	135,30	96,00	73,33	59,87	47,57	41,83	36,97

Statistické vyhodnocení naměřených hodnot

Zatěžování										
P [kPa]	25,5	61,1	96,77	137,5	183,3	239,3	290,3	351,4	412,5	493,5
PPČ [-] - průměr	251,5	226,9	183,5	137,5	97,1	73,0	59,7	47,5	41,7	36,7
Nejistota UA [-]	0,61	2,71	2,86	2,37	1,63	2,06	1,37	1,17	0,99	0,52
Výběrový rozptyl [-]	5,55	110,55	122,99	84,56	39,98	63,57	28,21	20,69	14,81	4,06
Výběr. sm. odch. [-]	2,36	10,51	11,09	9,20	6,32	7,97	5,31	4,55	3,85	2,02

Odlehčování										
P [kPa]	25,5	61,1	96,77	137,5	183,3	239,3	290,3	351,4	412,5	493,5
PPČ [-] - průměr	251,53	219,13	175,13	133,07	94,87	73,67	60,00	47,60	42,00	37,20
Nejistota UA [-]	0,70	3,35	3,94	2,77	2,08	1,52	1,45	1,24	1,05	0,54
Výběrový rozptyl [-]	7,27	168,20	233,23	115,29	65,06	34,57	31,65	23,12	16,69	4,41
Výběr. sm. odch. [-]	0,48	11,21	15,55	7,69	4,34	2,30	2,11	1,54	1,11	0,29

PŘÍLOHA I

Měření elektrod – označení „OB“

Rozměry: 5. ØE 3,5mm, Ød=0,4mm, M=0,25mm

Měřicí bod č. 1

	P [kPa]	25,5	61,1	96,77	137,5	183,3	239,3	290,3	351,4	412,5	493,5
1.	PPC - zatěžování	253	242	197	132	91	71	60	54	50	45
	PPC - odlehčování	249	238	193	128	87	67	56	50	46	41
	PPČ (zat.) - rozdíl od průměru	2,00	1,73	1,73	1,73	2,13	2,27	1,80	2,07	2,20	2,20
	PPČ (odl.) - rozdíl od průměru	-2,00	-2,27	-2,27	-2,27	-1,87	-1,73	-2,20	-1,93	-1,80	-1,80
2.	PPC - zatěžování	254	246	202	139	97	73	65	56	51	46
	PPC - odlehčování	251	242	198	135	93	69	61	52	47	42
	PPČ (zat.) - rozdíl od průměru	3,00	5,73	6,73	8,73	8,13	4,27	6,80	4,07	3,20	3,20
	PPČ (odl.) - rozdíl od průměru	0,00	1,73	2,73	4,73	4,13	0,27	2,80	0,07	-0,80	-0,80
3.	PPC - zatěžování	253	243	184	138	83	56	66	55	44	44
	PPC - odlehčování	252	242	183	137	82	55	65	54	43	43
	PPČ (zat.) - rozdíl od průměru	2,00	2,73	-11,27	7,73	-5,87	-12,73	7,80	3,07	-3,80	1,20
	PPČ (odl.) - rozdíl od průměru	1,00	1,73	-12,27	6,73	-6,87	-13,73	6,80	2,07	-4,80	0,20
4.	PPC - zatěžování	246	243	200	128	91	72	45	55	48	42
	PPC - odlehčování	251	248	205	133	96	77	50	60	53	47
	PPČ (zat.) - rozdíl od průměru	-5,00	2,73	4,73	-2,27	2,13	3,27	-13,20	3,07	0,20	-0,80
	PPČ (odl.) - rozdíl od průměru	0,00	7,73	9,73	2,73	7,13	8,27	-8,20	8,07	5,20	4,20
5.	PPC - zatěžování	249	228	195	118	87	73	57	40	46	37
	PPC - odlehčování	254	234	201	124	93	79	63	46	52	43
	PPČ (zat.) - rozdíl od průměru	-2,00	-12,27	-0,27	-12,27	-1,87	4,27	-1,20	-11,93	-1,80	-5,80
	PPČ (odl.) - rozdíl od průměru	3,00	-6,27	5,73	-6,27	4,13	10,27	4,80	-5,93	4,20	0,20

PPČ - počet pulzů snimače

Průměrné hodnoty měření měřicího bodu č.1

P [kPa]	25,5	61,1	96,77	137,5	183,3	239,3	290,3	351,4	412,5	493,5
Zatěž. - průměr	251,00	240,40	195,60	131,00	89,80	69,00	58,60	52,00	47,80	42,80
Odlhč.- průměr	251,40	240,80	196,00	131,40	90,20	69,40	59,00	52,40	48,20	43,20

Měřicí bod č. 2

P [kPa]		25,5	61,1	96,77	137,5	183,3	239,3	290,3	351,4	412,5	493,5
1.	PPČ - zatěžování	254	243	198	133	92	72	61	55	51	46
	PPČ - odlehčování	249	238	193	128	87	67	56	50	46	41
PPČ (zat.) - rozdíl od průměru		3,00	2,73	2,73	2,73	3,13	3,27	2,80	3,07	3,20	3,20
PPČ (odl.) - rozdíl od průměru		-2,00	-2,27	-2,27	-2,27	-1,87	-1,73	-2,20	-1,93	-1,80	-1,80
2.	PPČ - zatěžování	253	244	200	137	95	71	63	54	49	44
	PPČ - odlehčování	249	240	196	133	91	67	59	50	45	40
PPČ (zat.) - rozdíl od průměru		2,00	3,73	4,73	6,73	6,13	2,27	4,80	2,07	1,20	1,20
PPČ (odl.) - rozdíl od průměru		-2,00	-0,27	0,73	2,73	2,13	-1,73	0,80	-1,93	-2,80	-2,80
3.	PPČ - zatěžování	251	244	181	114	74	70	67	51	49	42
	PPČ - odlehčování	254	247	184	117	77	73	70	54	52	45
PPČ (zat.) - rozdíl od průměru		0,00	3,73	-14,27	-16,27	-14,87	1,27	8,80	-0,93	1,20	-0,80
PPČ (odl.) - rozdíl od průměru		3,00	6,73	-11,27	-13,27	-11,87	4,27	11,80	2,07	4,20	2,20
4.	PPČ - zatěžování	250	232	202	128	94	67	43	56	43	45
	PPČ - odlehčování	251	233	203	129	95	68	44	57	44	46
PPČ (zat.) - rozdíl od průměru		-1,00	-8,27	6,73	-2,27	5,13	-1,73	-15,20	4,07	-4,80	2,20
PPČ (odl.) - rozdíl od průměru		0,00	-7,27	7,73	-1,27	6,13	-0,73	-14,20	5,07	-3,80	3,20
5.	PPČ - zatěžování	247	242	199	142	93	64	59	47	49	40
	PPČ - odlehčování	244	239	196	139	90	61	56	44	46	37
PPČ (zat.) - rozdíl od průměru		-4,00	1,73	3,73	11,73	4,13	-4,73	0,80	-4,93	1,20	-2,80
PPČ (odl.) - rozdíl od průměru		-7,00	-1,27	0,73	8,73	1,13	-7,73	-2,20	-7,93	-1,80	-5,80

Průměrné hodnoty měření měřicího bodu č.2

P [kPa]	25,5	61,1	96,77	137,5	183,3	239,3	290,3	351,4	412,5	493,5
Zatěž. - průměr	251,00	241,00	196,00	130,80	89,60	68,80	58,60	52,60	48,20	43,40
Odlehč.- průměr	249,40	239,40	194,40	129,20	88,00	67,20	57,00	51,00	46,60	41,80

Měřicí bod č. 3

P [kPa]		25,5	61,1	96,77	137,5	183,3	239,3	290,3	351,4	412,5	493,5
1.	PPČ - zatěžování	253	242	197	132	91	71	60	54	50	45
	PPČ - odlehčování	250	239	194	129	88	68	57	51	47	42
PPČ (zat.) - rozdíl od průměru		2,00	1,73	1,73	1,73	2,13	2,27	1,80	2,07	2,20	2,20
PPČ (odl.) - rozdíl od průměru		-1,00	-1,27	-1,27	-1,27	-0,87	-0,73	-1,20	-0,93	-0,80	-0,80
2.	PPČ - zatěžování	254	245	201	138	96	72	64	55	50	45
	PPČ - odlehčování	253	244	200	137	95	71	63	54	49	44
PPČ (zat.) - rozdíl od průměru		3,00	4,73	5,73	7,73	7,13	3,27	5,80	3,07	2,20	2,20
PPČ (odl.) - rozdíl od průměru		2,00	3,73	4,73	6,73	6,13	2,27	4,80	2,07	1,20	1,20
3.	PPČ - zatěžování	250	242	181	114	74	70	67	51	49	42
	PPČ - odlehčování	251	243	182	115	75	71	68	52	50	43
PPČ (zat.) - rozdíl od průměru		-1,00	1,73	-14,27	-16,27	-14,87	1,27	8,80	-0,93	1,20	-0,80
PPČ (odl.) - rozdíl od průměru		0,00	2,73	-13,27	-15,27	-13,87	2,27	9,80	0,07	2,20	0,20
4.	PPČ - zatěžování	253	231	199	128	91	68	43	52	43	42
	PPČ - odlehčování	253	231	199	128	91	68	43	52	43	42
PPČ (zat.) - rozdíl od průměru		2,00	-9,27	3,73	-2,27	2,13	-0,73	-15,20	0,07	-4,80	-0,80
PPČ (odl.) - rozdíl od průměru		2,00	-9,27	3,73	-2,27	2,13	-0,73	-15,20	0,07	-4,80	-0,80
5.	PPČ - zatěžování	245	237	193	133	84	61	53	44	45	37
	PPČ - odlehčování	246	238	194	134	85	62	54	45	46	38
PPČ (zat.) - rozdíl od průměru		-6,00	-3,27	-2,27	2,73	-4,87	-7,73	-5,20	-7,93	-2,80	-5,80
PPČ (odl.) - rozdíl od průměru		-5,00	-2,27	-1,27	3,73	-3,87	-6,73	-4,20	-6,93	-1,80	-4,80

Průměrné hodnoty měření měřicího bodu č.3

P [kPa]	25,5	61,1	96,77	137,5	183,3	239,3	290,3	351,4	412,5	493,5
Zatěž. - průměr	251,00	239,40	194,20	129,00	87,20	68,40	57,40	51,20	47,40	42,20
Odlehč.- průměr	250,60	239,00	193,80	128,60	86,80	68,00	57,00	50,80	47,00	41,80

Průměrné hodnoty z měření všech tří bodů

P [kPa]	25,5	61,1	96,77	137,5	183,3	239,3	290,3	351,4	412,5	493,5
Zatěž. - průměr	251,00	240,27	195,27	130,27	88,87	68,73	58,20	51,93	47,80	42,80
Odlehč.- průměr	250,47	239,73	194,73	129,73	88,33	68,20	57,67	51,40	47,27	42,27

P [kPa]	25,5	61,1	96,77	137,5	183,3	239,3	290,3	351,4	412,5	493,5
1.bod	251,20	240,60	195,80	131,20	90,00	69,20	58,80	52,20	48,00	43,00
2.bod	250,20	240,20	195,20	130,00	88,80	68,00	57,80	51,80	47,40	42,60
3.bod	250,80	239,20	194,00	128,80	87,00	68,20	57,20	51,00	47,20	42,00

P [kPa]	25,5	61,1	96,77	137,5	183,3	239,3	290,3	351,4	412,5	493,5
CELK. PRŮMĚR - OB	250,73	240,00	195,00	130,00	88,60	68,47	57,93	51,67	47,53	42,53

Statistické vyhodnocení naměřených hodnot

Zatěžování										
P [kPa]	25,5	61,1	96,77	137,5	183,3	239,3	290,3	351,4	412,5	493,5
PPČ [-] - průměr	251,0	240,3	195,3	130,3	88,9	68,7	58,2	51,9	47,8	42,8
Nejistota UA [-]	0,84	1,44	1,89	2,28	1,86	1,26	2,18	1,22	0,73	0,76
Výběrový rozptyl [-]	10,57	30,92	53,50	78,21	52,12	23,92	71,31	22,50	8,03	8,60
Výběr. sm. odch. [-]	3,25	5,56	7,31	8,84	7,22	4,89	8,44	4,74	2,83	2,93

Odlehčování										
P [kPa]	25,5	61,1	96,77	137,5	183,3	239,3	290,3	351,4	412,5	493,5
PPČ [-] - průměr	250,47	239,73	194,73	129,73	88,33	68,20	57,67	51,40	47,27	42,27
Nejistota UA [-]	0,76	1,25	1,82	1,81	1,65	1,55	2,03	1,12	0,85	0,71
Výběrový rozptyl [-]	8,71	23,51	49,94	48,94	40,97	36,19	62,11	18,70	10,80	7,66
Výběr. sm. odch. [-]	0,58	1,57	3,33	3,26	2,73	2,41	4,14	1,25	0,72	0,51

PŘÍLOHA J

Měření elektrod – označení „SB“

Rozměry: 5. ØE 3,5mm, Ød=0,4mm, M=0,25mm

Měřicí bod č. 1

P [kPa]		25,5	61,1	96,77	137,5	183,3	239,3	290,3	351,4	412,5	493,5
1.	PPČ - zatěžování	253	201	154	118	84	63	52	47	39	38
	PPČ - odlehčování	249	197	150	114	80	59	48	43	35	34
PPČ (zat.) - rozdíl od průměru		1,40	1,87	1,40	1,87	1,60	2,33	1,67	2,27	2,20	2,20
PPČ (odl.) - rozdíl od průměru		-2,60	-2,13	-2,60	-2,13	-2,40	-1,67	-2,33	-1,73	-1,80	-1,80
2.	PPČ - zatěžování	254	205	159	125	90	65	57	49	40	40
	PPČ - odlehčování	247	197	151	117	82	57	49	41	32	32
PPČ (zat.) - rozdíl od průměru		2,40	5,87	6,40	8,87	7,60	4,33	6,67	4,27	3,20	4,20
PPČ (odl.) - rozdíl od průměru		-4,60	-2,13	-1,60	0,87	-0,40	-3,67	-1,33	-3,73	-4,80	-3,80
3.	PPČ - zatěžování	252	203	153	118	86	63	49	43	38	36
	PPČ - odlehčování	252	204	154	119	87	64	50	44	39	37
PPČ (zat.) - rozdíl od průměru		0,40	3,87	0,40	1,87	3,60	2,33	-1,33	-1,73	1,20	0,20
PPČ (odl.) - rozdíl od průměru		0,40	4,87	1,40	2,87	4,60	3,33	-0,33	-0,73	2,20	1,20
4.	PPČ - zatěžování	253	204	157	124	86	66	54	48	43	38
	PPČ - odlehčování	254	205	158	125	87	67	55	49	44	39
PPČ (zat.) - rozdíl od průměru		1,40	4,87	4,40	7,87	3,60	5,33	3,67	3,27	6,20	2,20
PPČ (odl.) - rozdíl od průměru		2,40	5,87	5,40	8,87	4,60	6,33	4,67	4,27	7,20	3,20
5.	PPČ - zatěžování	248	199	155	117	82	62	53	45	36	34
	PPČ - odlehčování	248	199	155	117	82	62	53	45	36	34
PPČ (zat.) - rozdíl od průměru		-3,60	-0,13	2,40	0,87	-0,40	1,33	2,67	0,27	-0,80	-1,80
PPČ (odl.) - rozdíl od průměru		-3,60	-0,13	2,40	0,87	-0,40	1,33	2,67	0,27	-0,80	-1,80

PPČ - počet pulzů snímače

Průměrné hodnoty měření měřicího bodu č.1

P [kPa]	25,5	61,1	96,77	137,5	183,3	239,3	290,3	351,4	412,5	493,5
Zatěž. - průměr	252,00	202,40	155,60	120,40	85,60	63,80	53,00	46,40	39,20	37,20
Odlhč.- průměr	250,00	200,40	153,60	118,40	83,60	61,80	51,00	44,40	37,20	35,20

Měřicí bod č. 2

P [kPa]		25,5	61,1	96,77	137,5	183,3	239,3	290,3	351,4	412,5	493,5
1.	PPČ - zatěžování	254	202	155	119	85	64	53	48	40	39
	PPČ - odlehčování	252	200	153	117	83	62	51	46	38	37
PPČ (zat.) - rozdíl od průměru		2,40	2,87	2,40	2,87	2,60	3,33	2,67	3,27	3,20	3,20
PPČ (odl.) - rozdíl od průměru		0,40	0,87	0,40	0,87	0,60	1,33	0,67	1,27	1,20	1,20
2.	PPČ - zatěžování	253	203	157	123	88	63	55	47	38	38
	PPČ - odlehčování	250	205	159	125	90	65	57	49	40	40
PPČ (zat.) - rozdíl od průměru		1,40	3,87	4,40	6,87	5,60	2,33	4,67	2,27	1,20	2,20
PPČ (odl.) - rozdíl od průměru		-1,60	5,87	6,40	8,87	7,60	4,33	6,67	4,27	3,20	4,20
3.	PPČ - zatěžování	246	195	144	118	77	56	46	43	32	28
	PPČ - odlehčování	247	191	140	114	73	52	42	39	28	24
PPČ (zat.) - rozdíl od průměru		-5,60	-4,13	-8,60	1,87	-5,40	-4,67	-4,33	-1,73	-4,80	-7,80
PPČ (odl.) - rozdíl od průměru		-4,60	-8,13	-12,60	-2,13	-9,40	-8,67	-8,33	-5,73	-8,80	-11,80
4.	PPČ - zatěžování	253	196	153	110	86	62	54	48	33	38
	PPČ - odlehčování	246	189	146	103	79	55	47	41	26	31
PPČ (zat.) - rozdíl od průměru		1,40	-3,13	0,40	-6,13	3,60	1,33	3,67	3,27	-3,80	2,20
PPČ (odl.) - rozdíl od průměru		-5,60	-10,13	-6,60	-13,13	-3,40	-5,67	-3,33	-3,73	-10,80	-4,80
5.	PPČ - zatěžování	252	203	150	111	77	56	45	38	40	38
	PPČ - odlehčování	249	200	147	108	74	53	42	35	37	35
PPČ (zat.) - rozdíl od průměru		0,40	3,87	-2,60	-5,13	-5,40	-4,67	-5,33	-6,73	3,20	2,20
PPČ (odl.) - rozdíl od průměru		-2,60	0,87	-5,60	-8,13	-8,40	-7,67	-8,33	-9,73	0,20	-0,80

Průměrné hodnoty měření měřicího bodu č.2

P [kPa]	25,5	61,1	96,77	137,5	183,3	239,3	290,3	351,4	412,5	493,5
Zatěž. - průměr	251,60	199,80	151,80	116,20	82,60	60,20	50,60	44,80	36,60	36,20
Odlehč.- průměr	248,80	197,00	149,00	113,40	79,80	57,40	47,80	42,00	33,80	33,40

Měřicí bod č. 3

P [kPa]		25,5	61,1	96,77	137,5	183,3	239,3	290,3	351,4	412,5	493,5
1.	PPČ - zatěžování	253	201	154	118	84	63	52	47	39	38
	PPČ - odlehčování	250	198	151	115	81	60	49	44	36	35
PPČ (zat.) - rozdíl od průměru		1,40	1,87	1,40	1,87	1,60	2,33	1,67	2,27	2,20	2,20
PPČ (odl.) - rozdíl od průměru		-1,60	-1,13	-1,60	-1,13	-1,40	-0,67	-1,33	-0,73	-0,80	-0,80
2.	PPČ - zatěžování	254	204	158	124	89	64	56	48	39	39
	PPČ - odlehčování	253	203	157	123	88	63	55	47	38	38
PPČ (zat.) - rozdíl od průměru		2,40	4,87	5,40	7,87	6,60	3,33	5,67	3,27	2,20	3,20
PPČ (odl.) - rozdíl od průměru		1,40	3,87	4,40	6,87	5,60	2,33	4,67	2,27	1,20	2,20
3.	PPČ - zatěžování	246	195	144	113	74	49	42	43	29	28
	PPČ - odlehčování	253	202	151	120	81	56	49	50	36	35
PPČ (zat.) - rozdíl od průměru		-5,60	-4,13	-8,60	-3,13	-8,40	-11,67	-8,33	-1,73	-7,80	-7,80
PPČ (odl.) - rozdíl od průměru		1,40	2,87	-1,60	3,87	-1,40	-4,67	-1,33	5,27	-0,80	-0,80
4.	PPČ - zatěžování	253	190	153	103	75	62	45	42	33	38
	PPČ - odlehčování	254	192	155	105	77	64	47	44	35	40
PPČ (zat.) - rozdíl od průměru		1,40	-9,13	0,40	-13,13	-7,40	1,33	-5,33	-2,73	-3,80	2,20
PPČ (odl.) - rozdíl od průměru		2,40	-7,13	2,40	-11,13	-5,40	3,33	-3,33	-0,73	-1,80	4,20
5.	PPČ - zatěžování	250	186	143	101	73	52	42	35	33	27
	PPČ - odlehčování	252	187	144	102	74	53	43	36	34	28
PPČ (zat.) - rozdíl od průměru		-1,60	-13,13	-9,60	-15,13	-9,40	-8,67	-8,33	-9,73	-3,80	-8,80
PPČ (odl.) - rozdíl od průměru		0,40	-12,13	-8,60	-14,13	-8,40	-7,67	-7,33	-8,73	-2,80	-7,80

Průměrné hodnoty měření měřicího bodu č.3

P [kPa]	25,5	61,1	96,77	137,5	183,3	239,3	290,3	351,4	412,5	493,5
Zatěž. - průměr	251,20	195,20	150,40	111,80	79,00	58,00	47,40	43,00	34,60	34,00
Odlehč.- průměr	252,40	196,40	151,60	113,00	80,20	59,20	48,60	44,20	35,80	35,20

Průměrné hodnoty z měření všech tří bodů

P [kPa]	25,5	61,1	96,77	137,5	183,3	239,3	290,3	351,4	412,5	493,5
Zatěž. - průměr	251,60	199,13	152,60	116,13	82,40	60,67	50,33	44,73	36,80	35,80
Odlehč.- průměr	250,40	197,93	151,40	114,93	81,20	59,47	49,13	43,53	35,60	34,60

P [kPa]	25,5	61,1	96,77	137,5	183,3	239,3	290,3	351,4	412,5	493,5
1.bod	251,00	201,40	154,60	119,40	84,60	62,80	52,00	45,40	38,20	36,20
2.bod	250,20	198,40	150,40	114,80	81,20	58,80	49,20	43,40	35,20	34,80
3.bod	251,80	195,80	151,00	112,40	79,60	58,60	48,00	43,60	35,20	34,60

P [kPa]	25,5	61,1	96,77	137,5	183,3	239,3	290,3	351,4	412,5	493,5
CELK. PRŮMĚR - SB	251,00	198,53	152,00	115,53	81,80	60,07	49,73	44,13	36,20	35,20

Statistické vyhodnocení naměřených hodnot

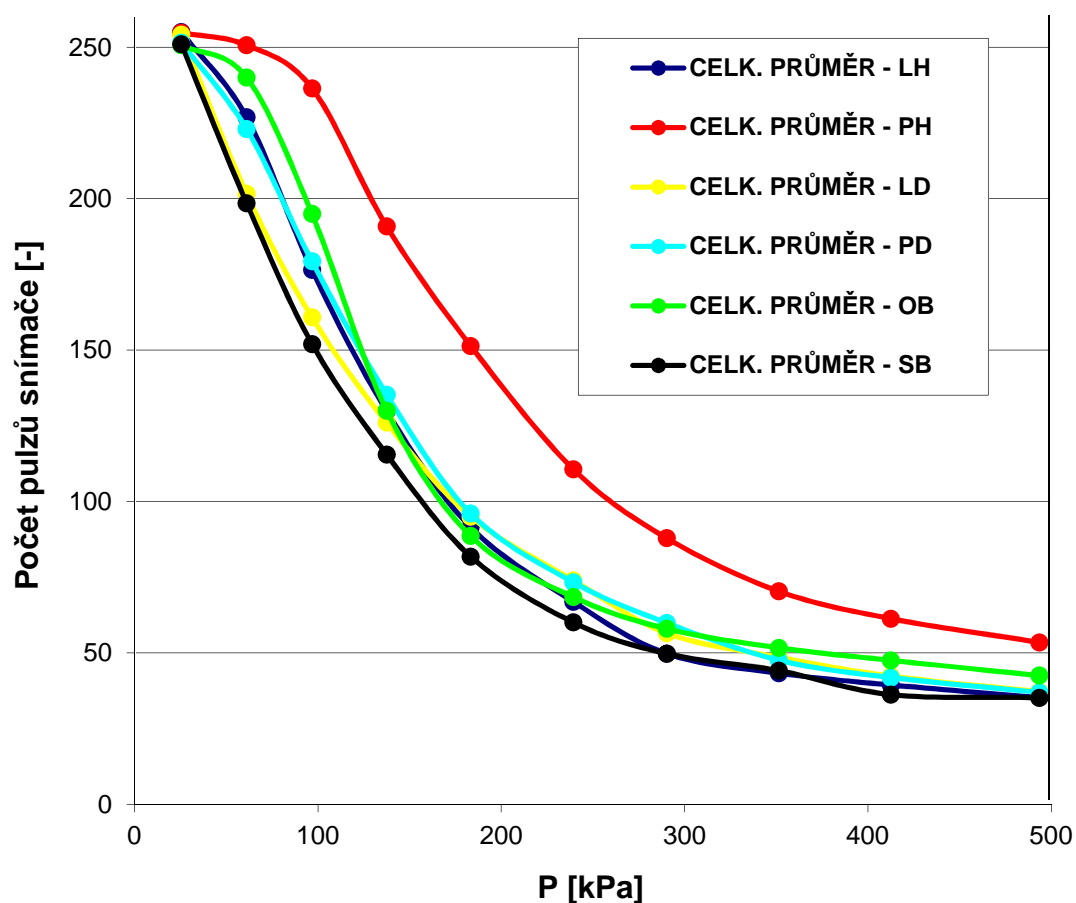
Zatěžování										
P [kPa]	25,5	61,1	96,77	137,5	183,3	239,3	290,3	351,4	412,5	493,5
PPC [-] - průměr	251,6	199,1	152,6	116,1	82,4	60,7	50,3	44,7	36,8	35,8
Nejistota UA [-]	0,72	1,45	1,33	1,89	1,47	1,29	1,31	1,05	1,01	1,14
Výběrový rozptyl [-]	7,69	31,55	26,54	53,41	32,54	25,10	25,81	16,64	15,31	19,60
Výběr. sm. odch. [-]	2,77	5,62	5,15	7,31	5,70	5,01	5,08	4,08	3,91	4,43

Odlehčování										
P [kPa]	25,5	61,1	96,77	137,5	183,3	239,3	290,3	351,4	412,5	493,5
PPC [-] - průměr	250,40	197,93	151,40	114,93	81,20	59,47	49,13	43,53	35,60	34,60
Nejistota UA [-]	0,98	1,53	1,42	1,95	1,40	1,30	1,24	1,21	1,20	1,19
Výběrový rozptyl [-]	14,37	35,32	30,37	57,32	29,43	25,24	22,95	21,95	21,66	21,37
Výběr. sm. odch. [-]	0,96	2,35	2,02	3,82	1,96	1,68	1,53	1,46	1,44	1,42

PŘÍLOHA J

Průměrné hodnoty naměřených hodnot jednotlivých druhů elektrod

P [kPa]	25,5	61,1	96,77	137,5	183,3	239,3	290,3	351,4	412,5	493,5
CELK. PRŮMĚR - LH	255,00	226,87	176,47	129,87	91,47	66,87	49,73	43,27	39,40	35,27
CELK. PRŮMĚR - PH	254,83	250,70	236,47	190,83	151,36	110,67	87,86	70,33	61,30	53,47
CELK. PRŮMĚR - LD	254,23	201,63	160,80	126,03	95,03	73,97	56,50	48,57	42,33	37,20
CELK. PRŮMĚR - PD	251,50	223,00	179,30	135,30	96,00	73,33	59,87	47,57	41,83	36,97
CELK. PRŮMĚR - OB	250,73	240,00	195,00	130,00	88,60	68,47	57,93	51,67	47,53	42,53
CELK. PRŮMĚR - SB	251,00	198,53	152,00	115,53	81,80	60,07	49,73	44,13	36,20	35,20



PŘÍLOHA L

Skript pro hledání středů měřících bodů pomocí Euklidovské vzdálenostní transformace v programu Matlab

% upravení načteného obrázku ze snímací kamery a nastavení proměnných do nulové hodnoty

```
function [stredy,t]=metoda2(matrice)
profile on
global objekty;
clear stredy, objekty;
P=0;
obj=0; prx=0; pry=0; X=0; Y=0; soucet=0; objekty=0;
```

% N radky; M sloupce

```
[N,M]=size(matrice);
maticeInv=1-matrice;
```

% vzdálenostní Euklidovská transformace

```
D1=bwdist (maticeInv,'euclidean');
```

% Zobrazení obrázku po vzdálenostní transformaci

```
figure;
imshow(D1,[0 20]);
```

```
UUU=max(max(D1)); % Zjistí nejvyšší hodnotu euklidovské transformace
prS=0.90; % procento středů
```

% Prohledá pole po Euklidovské transformaci a vyznačí body s hodnotou min 90%

%hodnoty maximální

```
for I=1:N
for J=1:M
if D1(I,J) > (prS*UUU)
P=P+1;
obj(P,1)=I;
obj(P,2)=J;
end
end
end
```

% Vyhledá geometrické středy po vzdálenostní euklidovské transformaci

zz=5;

for I=1:P

soucet=0;

for K=(obj(I,1))-zz:1:(obj(I,1))+zz

for L=(obj(I,2))-zz:1:(obj(I,2))+zz

if D1(K,L) > (prS*UUU)

soucet=soucet+1;

end

end

end

for K=(obj(I,1))-zz:1:(obj(I,1))+zz

for L=(obj(I,2))-zz:1:(obj(I,2))+zz

if D1(K,L) > (prS*UUU)

prx=prx+1;

end

end

X=X+(prx*K);

prx=0;

end

X=X/soucet;

for L=(obj(I,2))-zz:1:(obj(I,2))+zz

for K=(obj(I,1))-zz:1:(obj(I,1))+zz

if D1(K,L) > (prS*UUU)

pry=pry+1;

end

end

Y=Y+(pry*L);

pry=0;

end

Y=Y/soucet;

soucet=0;

objekty(I,2)=round(Y);

objekty(I,1)=round(X);

X=0;

Y=0;

end

stredy=objekty;

% [K,L]=size(stredy);

% K

stats=profile('info');

t=stats.ClockPrecision;

PŘÍLOHA M

Skript pro hledání středů měřících bodů pomocí Šachovnicové vzdálenostní transformace D8 v programu Matlab

% upravení načteného obrázku ze snímací kamery a nastavení proměnných do nulové hodnoty

```
function [stredy,t]=metoda3(matice)
profile on
global objekty;
clear stredy, objekty;
P=0;
obj=0; prx=0; pry=0; X=0; Y=0; soucet=0; objekty=0;
```

% N radky; M sloupce

```
[N,M]=size(matice);
maticeInv=1-matice;
```

% vzdálenostní Šachovnicová transformace

```
D8=bwdist (maticeInv,'chessboard');
```

% Zobrazení obrázku po vzdálenostní transformaci

```
figure;
imshow(D1,[0 20]);
```

% Zjistí nejvyšší hodnotu Šachovnicové transformace procento středů

```
UUU=max(max(D1));
prS=0.90;
```

% Prohledá pole po Šachovnicové transformaci a vyznačí body s hodnotou min 90%

%hodnoty maximální

```
for I=1:N
for J=1:M
if D8(I,J) > (prS*UUU)
P=P+1;
obj(P,1)=I;
obj(P,2)=J;
end
end
end
```

% Vyhledá geometrické středy po vzdálenostní Šachovnicové transformaci

zz=5;

```
for I=1:P
soucet=0;
for K=(obj(I,1))-zz:1:(obj(I,1))+zz
for L=(obj(I,2))-zz:1:(obj(I,2))+zz
if D1(K,L) > (prS*UUU)
soucet=soucet+1;
end
end
end
for K=(obj(I,1))-zz:1:(obj(I,1))+zz
for L=(obj(I,2))-zz:1:(obj(I,2))+zz
if D1(K,L) > (prS*UUU)
prx=prx+1;
end
end
X=X+(prx*K);
prx=0;
end
X=X/soucet;
for L=(obj(I,2))-zz:1:(obj(I,2))+zz
for K=(obj(I,1))-zz:1:(obj(I,1))+zz
if D1(K,L) > (prS*UUU)
pry=pry+1;
end
end
Y=Y+(pry*L);
pry=0;
end
Y=Y/soucet;
soucet=0;
objekty(I,2)=round(Y);
objekty(I,1)=round(X);
X=0;
Y=0;
end
```

[K,L]=size(stredy);

K

stats=profile('info');

t=stats.ClockPrecision;

PŘÍLOHA N

Skript pro hledání středů měřících bodů pomocí Cityblock vzdálenostní transformace D4 v programu Matlab

```
% upravení načteného obrázku ze snímací kamery a nastavení proměnných do nulové
% hodnoty
function [stredy,t]=metoda4(matice)
profile on
global objekty;
clear stredy, objekty;
P=0;
obj=0; prx=0; pry=0; X=0; Y=0; soucet=0; objekty=0;

% N radky; M sloupce
[N,M]=size(matice);
maticeInv=1-matice;

% vzdálenostní Cityblock transformace
D2=bwdist (maticeInv,'cityblock');

% Zobrazení obrázku po vzdálenostní transformaci
figure;
imshow(D1,[0 20]);

% Zjistí nejvyšší hodnotu Cityblock transformace procento středů
UUU=max(max(D1));
prS=0.90;

% Prohledá pole po Cityblock transformaci a vyznačí body s hodnotou min 90%
%hodnoty maximální
for I=1:N
for J=1:M
if D8(I,J) > (prS*UUU)
P=P+1;
obj(P,1)=I;
obj(P,2)=J;
end
end
end
```

% Vyhledá geometrické středy po vzdálenostní Cityblock transformaci

zz=5;

```
for I=1:P
soucet=0;
for K=(obj(I,1))-zz:1:(obj(I,1))+zz
for L=(obj(I,2))-zz:1:(obj(I,2))+zz
if D1(K,L) > (prS*UUU)
soucet=soucet+1;
end
end
end
for K=(obj(I,1))-zz:1:(obj(I,1))+zz
for L=(obj(I,2))-zz:1:(obj(I,2))+zz
if D1(K,L) > (prS*UUU)
prx=prx+1;
end
end
X=X+(prx*K);
prx=0;
end
X=X/soucet;
for L=(obj(I,2))-zz:1:(obj(I,2))+zz
for K=(obj(I,1))-zz:1:(obj(I,1))+zz
if D1(K,L) > (prS*UUU)
pry=pry+1;
end
end
end
Y=Y+(pry*L);
pry=0;
end
Y=Y/soucet;
soucet=0;
objekty(I,2)=round(Y);
objekty(I,1)=round(X);
X=0;
Y=0;
end
```

[K,L]=size(stredy);

K

stats=profile('info');

t=stats.ClockPrecision;