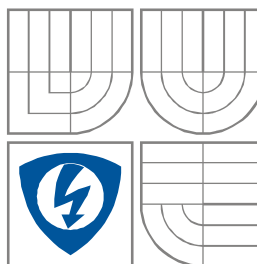


VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V
BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A
KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ

ÚSTAV TEORETICKÉ A EXPERIMENTÁLNÍ
ELEKTROTECHNIKY

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND
COMMUNICATION

DEPARTMENT OF OF THEORETICAL AND EXPERIMENTAL
ELECTRICAL ENGINEERING

NEDESTRUKTIVNÍ SENZORY PRO MĚŘENÍ MALÝCH ZMĚN ROZMĚRŮ BIOLOGICKÝCH STRUKTUR

NON-DESTRUCTIVE SENSORS FOR MEASURING VERY SMALL CHANGES IN BIOLOGICAL STRUCTURES

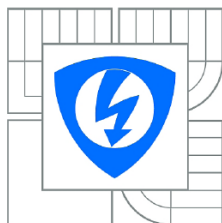
BAKALÁŘSKÁ PRÁCE
BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

Filip Kostka

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

Ing. Martin Friedl



VYSOKÉ UČENÍ
TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky
a komunikačních technologií

Ústav radioelektroniky

Bakalářská práce

bakalářský studijní obor
Elektronika a sdělovací technika

Student: Filip Kostka
Ročník: 3

ID: 125490
Akademický rok: 2011/2012

NÁZEV TÉMATU:

Nedestruktivní senzory pro měření velmi malých změn rozměrů biologických struktur

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Seznamte se s principy měření velmi malých změn rozměrů biologických struktur. Blíže popište existující senzory a jejich vlastnosti. Navrhněte vlastní uspořádání senzoru a elektroniky pro zpracování signálu ze senzoru.

Realizujte navržený senzor s měřicí elektronikou a proveďte měření ověřující jeho parametry. Výsledné hodnoty porovnejte s komerčním přístrojem.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

[1] ĎAĎO, S., BEJČEK, L., PLAŠIL, A. Měření průtoku a výšky hladiny. Praha: BEN - technická literatura, 2011. 448 stran s. ISBN 80-7300-156-X.

[2] -, Elektrotechnická měření. Praha: BEN - technická literatura, 2002. 256 s. ISBN 978-80-7300-022-6.

Termín zadání: 6.2.2012

Termín odevzdání: 25.5.2012

Vedoucí práce: Ing. Martin Friedl

Konzultanti bakalářské práce: Ing. Radek Kubásek, Ph.D.

prof. Dr. Ing. Zbyněk Raida
Předseda oborové rady

UPOZORNĚNÍ:

Autor bakalářské práce nesmí při vytváření bakalářské práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č.40/2009 Sb.

ABSTRAKT

Cílem tohoto semestrálního projektu je zaznamenat průběh velmi malého přírůstku obvodu stromu v průběhu jednoho dne pomocí měření prováděného dendrometrem. Jako senzor je u dendrometru použit tenzometr, který při deformaci svého tvaru mění i svůj odpor. Tohoto jevu se využívá ke sledování a následnému zaznamenávání přírůstků. Data z dendrometru jsou zpracovávána digitálním laboratorním multimetrem. Tento je synchronizován s PC, dopomocí něhož se data dále zpracovávají. Při měření a následném zpracování dat) jsou zohledněny teplotní roztažnosti kovové části dendrometru a okolní klimatické a ostatní podmínky působící při měření na dendrometr a jeho součásti.

KLÍČOVÁ SLOVA

Dendrometr, tenzometr, přírůstek obvodu stromu, neelektrické senzory.

ABSTRACT

The aim of this thesis is to record a very small increment of the perimeter trees in one day using dendrometr. As the sensor is used tensometer strain gauge, which the deformation of its shape also changes its resistance and it is used subsequently to monitor the recording of growth. Data from dendrometr are handles by digital multimeter, which is synchronized with the PC, where further processing occurs date. This semester project also deals with the thermal expansion of metal parts of dendrometr and ambient conditions during the experiment.

KEYWORDS

Dendrometer, tensometr, tree growth, non-electric sensors.

KOSTKA, F. Nedestruktivní senzory pro měření velmi malých změn rozměrů biologických struktur. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií. Ústav teoretické a experimentální elektrotechniky, 2012. 34 s.. Bakalářská práce. Vedoucí práce: Ing. Martin Friedl.

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že mou bakalářskou práci na téma Nedestruktivní senzory pro měření velmi malých změn rozměrů biologických struktur jsem vypracoval samostatně, pod vedením vedoucího bakalářské práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedené bakalářské práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této bakalářské práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a/nebo majetkových a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících zákona č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon), ve znění pozdějších předpisů, včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

V Brně dne

.....

(podpis autora)

PODĚKOVÁNÍ

Děkuji vedoucímu bakalářské práce ing. Martinu Friedlovi za účinnou metodickou, pedagogickou a odbornou pomoc a další cenné rady jím poskytnuté při zpracování mé bakalářské práce. Dále bych chtěl poděkovat panu ing. Miroslavovi Uhrovi za odbornou pomoc.

V Brně dne

.....

(podpis autora)

OBSAH

Seznam obrázků	viii
Seznam tabulek	x
Úvod	1
1 Problematika měření velmi pomalých změn rozměrů	2
1.1 Snímač	2
1.2 Charakteristiky snímačů	3
1.3 Přenos informace snímačem	5
1.4 Indukčnostní snímače	6
1.4.1 Indukčnostní snímač s malou vzduchovou mezerou	8
1.5 Odporové snímače deformace (tenzometry)	11
1.5.1 Snímače s volným odporovým článkem	12
1.5.2 Kovové tenzometry lepené	13
1.6 Kapacitní snímače	18
1.6.1 Kapacitní senzor s proměnnou vzduchovou mezerou	20
1.7 Optické vláknové senzory	22
1.7.1 Optické vlákno	22
1.7.2 Princip šíření světla optickým vláknem	22
1.7.3 Typy optických vláken	24
1.7.4 Útlum optických vláken	26
1.7.5 Útlum optického vlákna vlivem ohybu	27
1.7.6 Zapojení optické přenosové soustavy	27
2 Návrh dendrometru	29
2.1 Úvod do problematiky	29
2.2 Konstrukce dendrometru	29
2.3 Elektronická měřicí část	31
2.4 Zpracování informací z dendrometru	35
3 Závěr	36
Literatura	37

Seznam symbolů, veličin a zkratk	38
Seznam příloh	39

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1.1 Lineární přenosová charakteristika snímače (podle [2])	4
Obr. 1.2 Nelineární přenosová charakteristika snímače (podle [2])	4
Obr. 1.3 Elektrické náhradní schéma indukčnostního snímače (podle [2])	6
Obr. 1.4 Princip zapojení indukčnostního snímače s malou vzduchovou mezerou (podle [2])	8
Obr. 1.5 Charakteristika indukčnostního snímače s malou vzduchovou mezerou (podle [2])	9
Obr. 1.6 Závislost impedance na velikosti vzduchové mezery v komplexní rovině (podle [1]).	10
Obr. 1.7 Elektrické náhradní schéma odporového snímače (převzato z [2])	11
Obr. 1.8 Deformace vodiče všestranným tlakem (podle [2])	11
Obr. 1.9 Základní typy odporových tenzometrů s volným vodičem (převzato z [2]) ...	13
Obr. 1.10 Uspořádání odporového tenzometru lepeného. Průběh smykového a tahového napětí (převzato z [2])	13
Obr. 1.11 Základní typy lepených odporových tenzometrů (převzato z [2])	13
Obr. 1.12 Řešení sdružených snímačů [2]	14
Obr. 1.13 Fóliový tenzometr (převzato z [2])	15
Obr. 1.14 Elektrická schémata zapojení tenzometrů do můstku (převzato z [3])	17
Obr. 1.15 Náhradní schéma kapacitního snímače (převzato z [5])	20
Obr. 1.16 Schéma kondenzátoru a vyznačený směr pohybu elektrod kondenzátoru	21
Obr. 1.17 Graf závislosti kapacity C na vzdálenosti elektrod d	21
Obr. 1.18 Stavba optického vlákna (převzato z [6])	22
Obr. 1.19 Princip totálního odrazu (podle [6])	24
Obr. 1.20 Jednovidové vlákno (převzato z [6])	25
Obr. 1.21 Mnohavidové vlákno se skokovou změnou indexu (převzato z [6])	25
Obr. 1.22 Mohavidové vlákno s gradientní změnou indexu (převzato z [6])	25
Obr. 1.23 Optický senzor síly a polohy využívající ohyb optického vlákna.	27
Obr. 1.24 Blokové schéma optické přenosové soustavy.	27
Obr. 1.25 Podrobné zapojení optické přenosové soustavy.	28
Obr. 2.1 Obvodový dendrometr připevněný ke stromu (podle [4])	30
Obr. 2.2 Pohled z profilu na U proužek s upevněnou pružinou	30

Obr. 2.3 Návrh rozložení čtyř tenzometrů na U pružině	32
Obr. 2.4 Pohled z půdorysu na U pásek s nalepenými tenzometry	32
Obr. 2.5 Konstrukční řešení tenzometru 6JP120A	33
Obr. 2.6 Zapojení nelineárního celého mostu s vyjádřením deformací tenzometrů.....	34

SEZNAM TABULEK

Tabulka 1 Základní typy indukčních snímačů (převzato z [2])	7
Tabulka 2 Základní typy kapacitních snímačů (převzato z [5]).	19
Tabulka 3 Výhody a nevýhody jednovídného vlákna (převzato z [6]).....	25
Tabulka 4 Výhody a nevýhody mnohovidového vlákna (převzato z [6]).....	26

ÚVOD

Rychlý rozvoj techniky klade vysoké nároky na automatizaci ve všech oborech lidské činnosti. Dostatečné množství informací o jednotlivých procesech je základní podmínkou úspěšné činnosti všech systémů. Potřeba shromažďování informací za účelem centrálního řízení zdůvodňuje vytvoření oboru měření neelektrických veličin. Každé elektrické měření neelektrické veličiny je realizováno převodem měřené neelektrické veličiny na veličinu elektrickou, která je následně zpracována. [2, s. 19]

Mnoho let dochází po celém světě ke kácení lesů. Proto se v posledních letech mnoho vědních oborů zabývá stromy, které jsou základní stavební jednotkou lesa. Poznáním stromu se zabývá dendrologie. Z mnoha možných měřitelných veličin se v této práci soustředíme především na měření přírůstku a transpiračního toku stromů.

1 PROBLEMATIKA MĚŘENÍ VELMI POMALÝCH ZMĚN ROZMĚRŮ

1.1 Snímač

Snímač je jednou z nejdůležitějších částí měřicího kanálu nebo automatizovaných soustav. Obvykle představuje omezující část kanálu. Především pokud jde o přesnost, cenu, materiálovou, popř. výrobní náročnost. Pro konstrukci snímačů je využíváno mnoha fyzikálních principů (jsou stále hledány a zkoušeny nové). Používají se špičkové materiály s definovanou čistotou, jsou sledovány parazitní vlivy, které se kompenzují a omezují. Pro tyto skutečnosti představuje snímač náročný prvek, jenž v mnoha případech určuje kvalitu měřicího nebo regulačního kanálu. Cena snímače a zbývající části měřicího kanálu je srovnatelná, v některých případech je dokonce snímač dražší než zbývající části měřicího kanálu. Při výběru snímače požadujeme splnění některých základních požadavků:

- Jednoznačná závislost výstupní veličiny na veličině vstupní.
- Vhodný tvar základní přenosové charakteristiky. Velká citlivost snímače.
- Požadovaná přesnost snímače.
- Velká časová stálost snímače.
- Vhodná frekvenční charakteristika.
- Co nejmenší závislost na parazitních vlivech (teplota, vlhkost, tlak apod.)
- Minimální zatěžování měřeného objektu.
- Co největší elektrický výkon snímače.
- Maximální spolehlivost snímače.
- Jednoduchá konstrukce.
- Jednoduchá údržba.
- Minimální parazitní vliv snímače na okolí (popř. na obsluhu).

Splnění těchto nebo dalších požadavků u snímače je velmi obtížné, v některých případech i nemožné. Při výběru typu snímače se většinou volí kompromisní řešení. Je nutné brát v potaz vlastnosti celého měřicího kanálu, to znamená, řešit celý kanál komplexně.

K získání přehledu o vlastnostech snímačů a možnosti jejich porovnání je reálné uvažovat se dvěma základními skupinami snímačů:

1. *aktivní* (generátorové) - při působení neelektrické veličiny se snímač chová jako zdroj elektrické energie.
2. *pasivní* - působením neelektrických veličin na snímač se mění některý z jeho parametrů.

Převod *neelektrické veličiny* u snímače může být:

- a) *jednoduchý* - měřená neelektrická veličina se mění přímo na veličinu elektrickou.
- b) *několikanásobný* - měřená neelektrická veličina se mění na jinou neelektrickou veličinu, a ta se následně mění na veličinu elektrickou. Tento typ snímače je velmi častý.

Pro označení konstrukcí měřících zařízení je vhodné přihlídnout k hlediska využitého principu působení:

Snímače aktivní - termoelektrické, piezoelektrické, indukční a další.

Snímače pasivní - odporové, indukčnostní, kapacitní a další.

Volba snímače při řešení daného úkolu měřící techniky představuje obtížný problém, který v některých případech vyžaduje spolupráci s několika technickými obory.[2, s. 25]

1.2 Charakteristiky snímačů

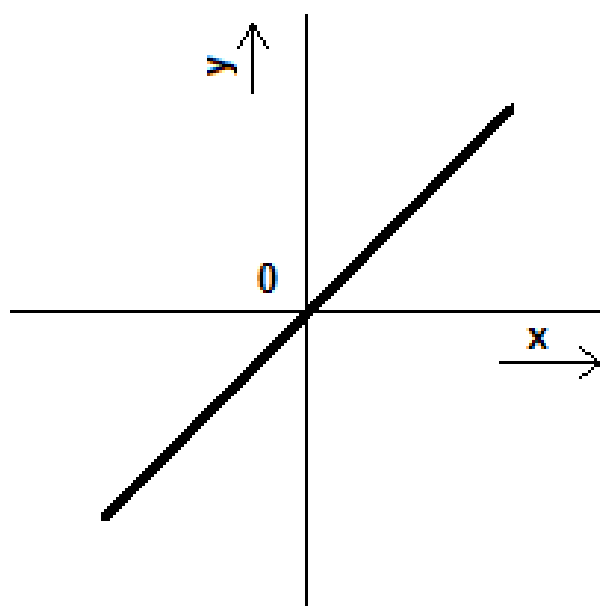
Měřená veličina může mít statický nebo dynamický charakter. U *statických měření* vyžadujeme především *lineární závislost* mezi vstupní a výstupní veličinou (obr.1.1). Při dynamických měřeních vyžadujeme mimo to i určité dynamické vlastnosti. Závislost mezi vstupní a výstupní veličinou můžeme bez uvažování parazitních vlivů vyjádřit podle (1.1) [2, s. 29]

$$y = (a_0 + a_1x + a_2x^2 + \dots + a_nx^n)x \quad (1.1)$$

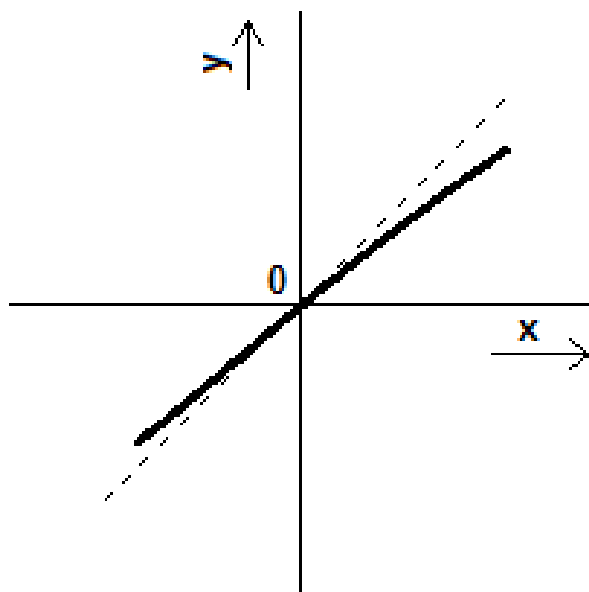
kde x je vstupní veličina,

y - výstupní veličina,

a_1, a_2, a_n - konstanty.



Obr. 1.1 Lineární přenosová charakteristika snímače (podle [2])



Obr. 1.2 Nelineární přenosová charakteristika snímače (podle [2])

V některých případech dochází ke zkreslení hysterezí. Běžně se setkáváme s hysterezí mechanickou, magnetickou a dielektrickou. Při popisu snímače je důležité tento vliv nezanedbat.[2, s. 29]

Jestliže je měřená veličina funkcí času, pak i ze snímače dostáváme signál závislý na čase. *Dynamicke vlastnosti snímače* lze popsat diferenčními rovnicemi (1.2)

$$a_n x^{(n)} + \dots + a_0 x = b_m y^{(m)} + \dots + B_0 y \quad (1.2)$$

kde x je neelektrická vstupní veličina,
 y - výstupní neelektrická veličina.

Přenosovou funkci lze pak vyjádřit

$$F(p) = \frac{b_m p^m + b_{m-1} p^{m-1} + \dots + b_0}{a_n p^n + a_{n-1} p^{n-1} + \dots + a_0} \quad (1.3)$$

Řešením těchto diferenčních rovnic můžeme stanovit přechodovou a frekvenční charakteristiku daného snímače. *Přechodová charakteristika* snímače je průběh výstupní veličiny v závislosti na čase při skokové změně vstupní veličiny. V některých případech je výhodnější popis snímače pomocí *frekvenčních charakteristik*. Je možné dvojí zobrazení frekvenční charakteristiky:

1. *Zobrazení v komplexní rovině*, přičemž jediný graf nese informaci o absolutní hodnotě přenosu $|F(j\omega)|$ a zároveň informaci o fázovém posuvu.
2. *Zobrazení pomocí amplitudové a fázové frekvenční charakteristiky*. Jedná se o závislost přenosu, popř. fázového úhlu na úhlovém kmitočtu. Přechodové nebo frekvenční charakteristiky je možno získat měřením nebo výpočtem. Výpočet bývá mnohdy velmi složitý nebo nemožný.

1.3 Přenos informace snímačem

Výstupní signál ze snímače může být spojitý nebo nespojitý. Zároveň také může nabývat spojitě všech hodnot v rozmezí určeném měřenou veličinou, zatímco výstupní signál číslicového snímače může nabývat nespojitě jen určitých hodnot. V obou případech lze podle výstupního signálu určit velikost měřené veličiny. [2, s. 30-31]

Přesnost snímače bývá vyjadřována obvykle relativní chybou, přičemž je tato relativní chyba vztažena k horní hranici měřicího rozsahu snímače. Vzhledem k tomu, že chyba může nabývat obojího znaménka, může se při známé relativní chybě δ pohybovat skutečná hodnota měřené veličiny v rozmezí $\pm\delta$ kolem naměřené hodnoty. Je-li rozsah snímače 0 až $X_{\max}$, pak lze při relativní chybě δ měřicí rozsah rozdělit na pásma o šířce

$$\Delta x = 2\delta x_{\max} \quad (1.4)$$

Těchto rozlišitelných pásem je celkem

$$n = \frac{x_{\max}}{\Delta x} = \frac{1}{2\delta} \quad (1.5)$$

a jsou vzájemně odděleny úrovněmi s počtem

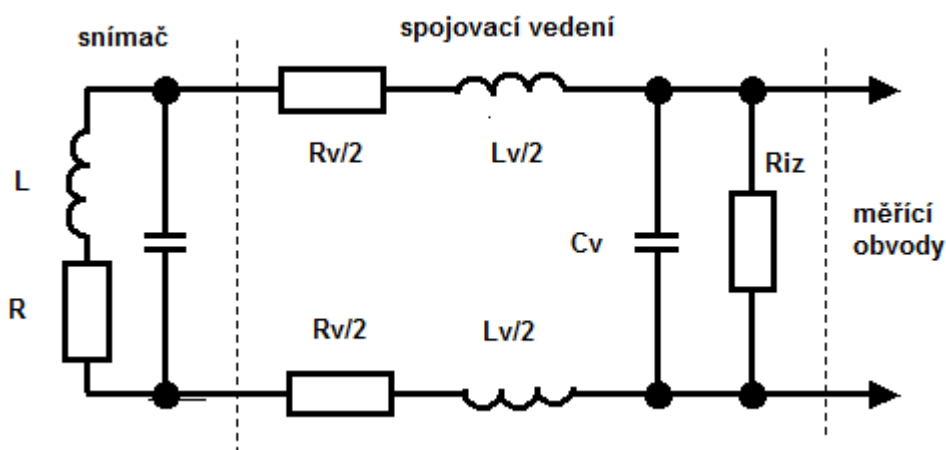
$$n' = n + 1 . \quad (1.6)$$

Tyto fiktivní diskrétní úrovně u analogových snímačů odpovídají hladinám kvantování u snímačů číslicových. [2, p. 30-31]

Chyby snímačů se zpravidla chápou jako statická vlastnost. Kromě toho je potřeba u snímačů také počítat s dynamickými vlastnostmi. Změní-li se měřená veličina skokem, pak na výstupu snímače dostaneme odpovídající elektrickou veličinu až po určité době. Během této doby (v každém okamžiku měření) je dynamická chyba větší, než chyba statická. Nemá-li dojít ke zhoršení přesnosti měření, je nutné brát elektrickou hodnotu převodu na výstupu až po uplynutí této přístupové doby. [2, s. 31]

1.4 Indukčnostní snímače

Měřená neelektrická veličina je snímačem převedena na změnu indukčnosti. Indukčnostní snímače bývají zapojeny do obvodu s pomocným střídavým napětím. Nejčastěji to bývají obvody můstkové nebo rezonanční. [2, s. 195]



Obr. 1.3 Elektrické náhradní schéma indukčnostního snímače (podle [2])

Každý indukčnostní snímač je nutné spojit s měřícím obvodem pomocí vodičů nebo spojovacího vedení. Vlastnosti tohoto vedení mohou výrazně ovlivnit parametry snímače a přesnost měření. Vlastní indukčnostní snímač je tvořen cívkou (nebo systémem cívek) bez feromagnetického jádra nebo s feromagnetickým, popř. neferomagnetickým elektricky vodivým jádrem. Působením neelektrické veličiny dochází k vzájemnému posunutí těchto částí nebo ke změně jejich elektrických vlastností. Cívka se vyznačuje indukčností, jejíž velikost závisí na počtu závitů, elektrických a magnetických vlastnostech jádra a na geometrických rozměrech cívky a jádra. Pokud jsou uvedené veličiny ovlivňovány vstupní měřenou neelektrickou veličinou, mění se i indukčnost cívky. Indukčnostní snímače vykazují též odporové a kapacitní parazitní vlastnosti. [2, s. 195]

Podle náhradního schéma snímače (obr. 1.3) je vedle indukčnosti L též ztrátový odpor R a parazitní kapacita C . Ztrátový odpor je dán především činným odporem vinutí cívky, k němuž přistupuje ještě odpor reprezentující vířivé proudy v jádru a ztráty způsobené magnetickou hysterezí jádra. Ideální indukčnostní snímač musí mít velkou reaktanci ωL v porovnání s R . Při běžných kmitočtech (5 až 50 kHz) nelze tento požadavek splnit a téměř lze dosáhnout

$$\omega L \sim (1 \text{ až } 10) R. \quad (1.7)$$

Důsledkem toho je silná kmitočtová závislost údaje indukčnostního snímače, protože ωL závisí více na kmitočtu než odpor R , který je však silně závislý na teplotě. Kapacita C nezpůsobuje velkou chybu, protože její reaktance je daleko menší než reaktance indukčnosti při téže kmitočtu. U přívodů (vedení) je nutno obecně uvažovat s odporem R_v , indukčností L_v , kapacitou mezi vodiči (popř. proti zemi) C_v a izolačním odporem R_{iz} . Protože tyto veličiny působí na citlivost snímače a jejich hodnoty se mění s teplotou, vlhkostí a časem (stárnutí), musí být reaktance snímače ωL zvolena tak, aby platilo

$$R_v, \omega L_v \ll \omega L_v \ll R_{iz}, \frac{1}{\omega C_v}. \quad (1.8)$$

V případě, že nelze tuto podmínku splnit, je nutné vyhodnotit parazitní vliv.[2, s. 195]

Tabulka 1 Základní typy indukčních snímačů (převzato z [2])

Typ snímače	Princip	Diferenční uspořádání	Charakteristika	Rozsah
Malá vzduchová mezera				3 μm až 5 μm
Otevřený magnetický obvod				3 μm až 100 mm
S potlačeným polem				3 μm až 5 mm
Bez feromagnetika				3 μm až 3 mm

1.4.1 Indukčnostní snímač s malou vzduchovou mezerou

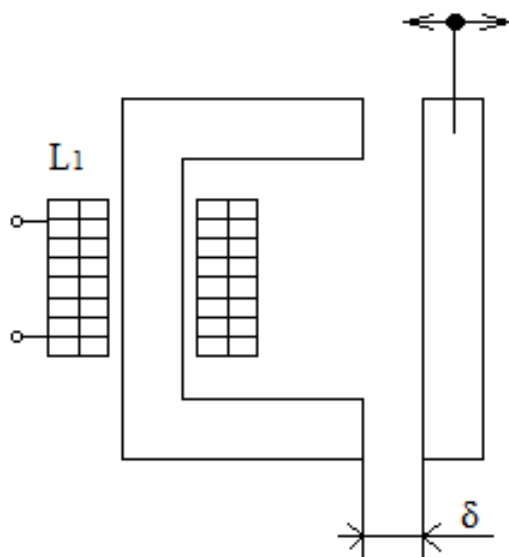
Tento typ snímače patří k nejvíce rozšířeným snímačům využívaným pro měření změn geometrických rozměrů. Princip jejich činnosti spočívá v tom, že změna polohy cívky vůči vodivé desce se převede ve změnu vlastní indukčnosti cívky L , popř. do vzájemné indukčnosti M více cívek. Indukčnostní snímače mohou pracovat v těchto režimech:

A. Pohyblivá část feromagnetika:

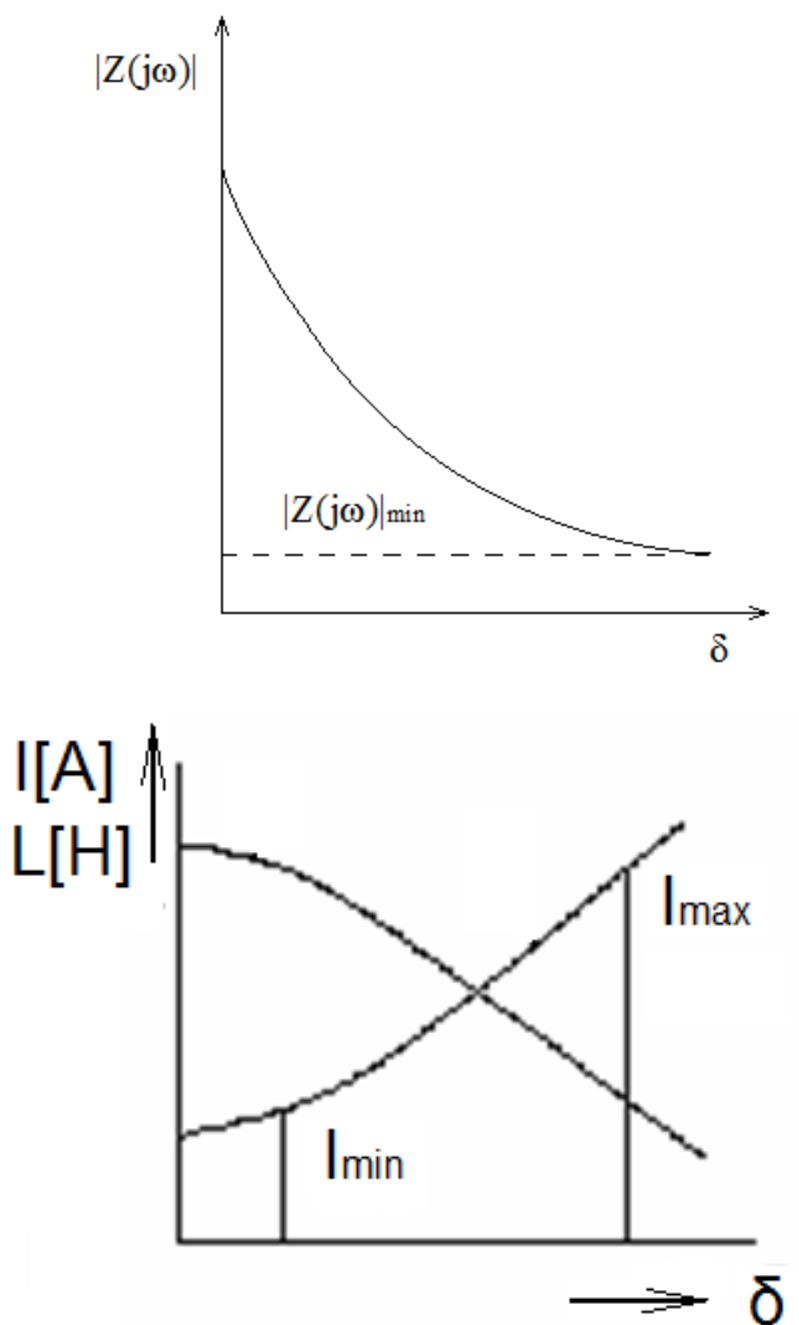
- a) změna velikosti vzduchové mezery,
- b) změna plochy vzduchové mezery.

B. Pohyblivá část cívky.

Snímače, pracující se změnou velikosti vzduchové mezery (obr. 1.4) se vyznačují velkou nelinearitou základní charakteristiky (obr. 1.5) a používají se většinou pouze v diferenčním uspořádání pro měření malých změn polohy.



Obr. 1.4 Princip zapojení indukčnostního snímače s malou vzduchovou mezerou (podle [2])



Obr. 1.5 Charakteristika indukčního snímače s malou vzduchovou mezerou (podle [2])

Pro impedanci Z indukčního snímače platí

$$Z = R + j\omega L \quad (1.9)$$

kde R je odpor cívky pro stejnosměrný proud,
 ω - úhlový kmitočet,

L - indukčnost cívky.

Pro indukčnost můžeme psát

$$L = \frac{\Psi}{I} = \frac{N_z}{I} = \frac{N_z^2 I}{Z_m I} = \frac{N_z^2}{Z_m} \quad (2.0)$$

kde Z_m je magnetická impedance (komplexní magnetický odpor),

Ψ - spřažený magnetický tok,

N_z - počet závitů,

Φ - magnetický tok.

Pro magnetickou impedanci Z_m a admitanci Y_m platí

$$Z_m = R_m + jX_m \quad (2.1)$$

kde R_m je činná složka magnetického odporu,

X_m - jalová složka magnetického odporu

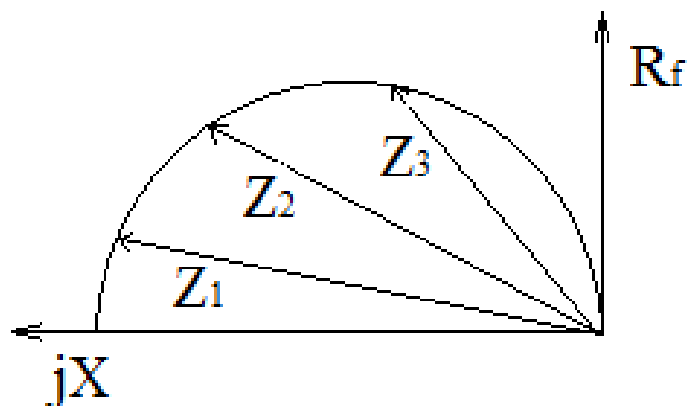
Výpočet hodnot R_m a X_m , pokud neexistuje povrchový jev nebo je-li slabý, není obtížný. R_m se určuje jako

$$R_m = \sum \frac{l_i}{\mu_i S_i}, \quad (2.2)$$

kde l_i , S_i a μ_i jsou délka, plocha a permeabilita i -tého úseku magnetického obvodu.

Hodnotu X_m vypočítáme ze vztahu

$$X_m = \frac{P_0}{\omega \Phi^2} \quad (2.3)$$

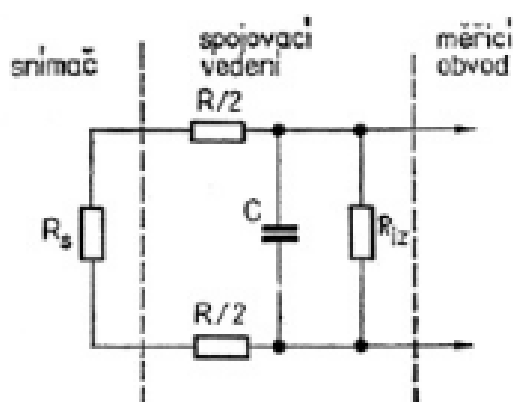


Obr. 1.6 Závislost impedance na velikosti vzduchové mezery v komplexní rovině (podle [1]).

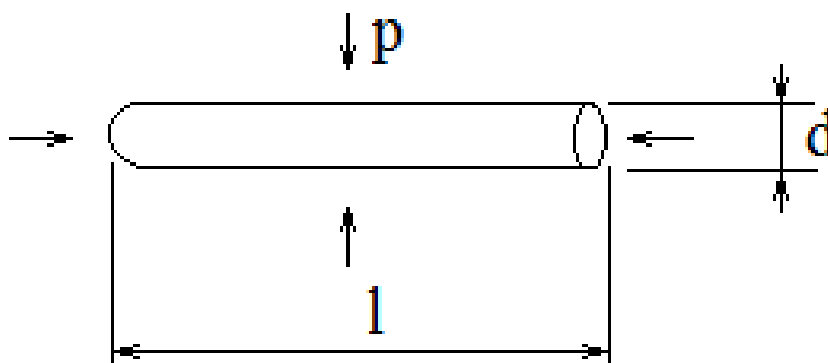
Závislost impedance cívky $Z = f(\delta)$ (obr. 1.6) v komplexní rovině je znázorněna křivkou, procházející počátkem souřadnic. Vyplývá z ní, že změnou vzduchové mezery se mění jak jalová, tak i činná impedance cívky Z .

1.5 Odporové snímače deformace (tenzometry)

Princip činnosti tenzometrů spočívá ve změně vodivosti kovů nebo polovodičů při jejich deformaci. Senzor musí být spojen s měřicím obvodem vodiči nebo vedením. Tyto ovšem vykazují vlastní odpor a kapacitu mezi vodiči (obr. 1.7). Spojení senzoru s měřicí technikou může také být zajištěno telemetricky, což ovšem přináší poměrně složitou realizaci tohoto bezdrátového přenosu. [2, s. 76-78]



Obr. 1.7 Elektrické náhradní schéma odporového snímače (převzato z [2])



Obr. 1.8 Deformace vodiče všestranným tlakem (podle [2])

Pro odpor válcového vodiče o délce l a průřezu S (obr. 1.8) můžeme psát

$$R = \rho \frac{l}{S} \quad (2.4)$$

kde ρ je měrný odpor.

Relativní změnu odporu vypočítáme ze vztahů

$$\ln R = \ln \rho + \ln l + \ln S \quad (2.5)$$

$$\frac{1}{R} = \frac{d\rho}{\rho dR} + \frac{dl}{l dR} - \frac{dS}{S dR} \quad (2.6)$$

Pro malé změny dostaneme

$$\frac{\Delta R}{R} = \frac{\Delta \rho}{\rho} + \frac{\Delta l}{l} - \frac{\Delta S}{S} \quad (2.7)$$

A součinitel deformační citlivosti je

$$K = 1 + \beta_\rho + 2\mu_p \quad (2.8)$$

kde B_ρ je součinitel úměrnosti,

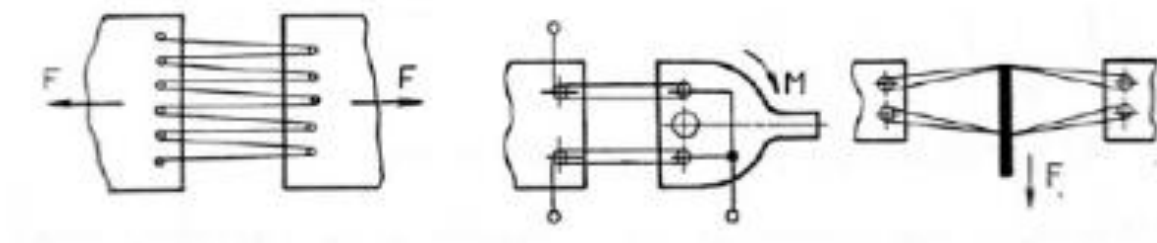
μ_p - součinitel příčného stlačení (Poissonovo číslo).

Kovové nebo polovodičové články se používají pro realizaci snímačů deformace nebo tlaku:

- a) volný odporový článek,
- b) odporový článek na podložce.

1.5.1 Snímače s volným odporovým článkem

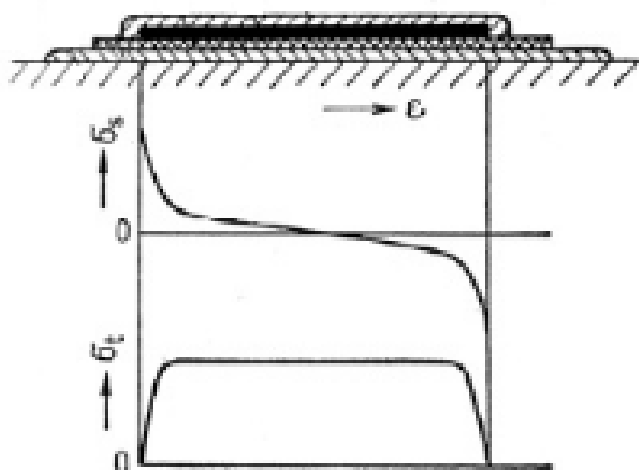
Jde o snímače, u nichž jsou odporové drátky uchyceny mezi soustavou držáků. Aktivní odporový článek není přilepen a odpadají tedy problémy s přenosem deformace na celý povrch odporového článku. Další výhodou tohoto uspořádání odporového snímače je možnost použití při vyšších teplotách (až 310 °C). Mají též malou hysterezi a malý posun nulového bodu. Nedostatkem je poměrně nízký rezonanční kmitočet snímače (jednotky kilohertzů a menší) a poměrně dlouhá doba, potřebná pro dosažení tepelné rovnováhy. Jejich výroba je velmi náročná na mechanické provedení. Základní principy snímačů jsou uvedeny na obr. 1.9. [2, p. 79]



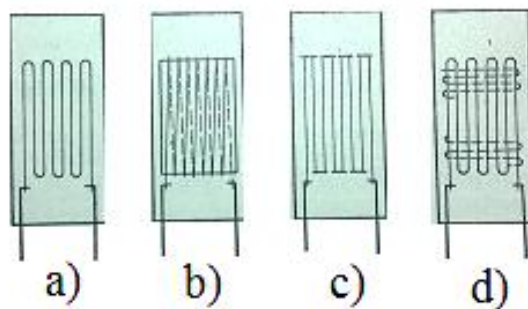
Obr. 1.9 Základní typy odporových tenzometrů s volným vodičem (převzato z [2])

1.5.2 Kovové tenzometry lepené

Kovový tenzometr je odporový článek přilepený na podložce, která se pak celá přilepí na měřenou část. Vlastní odporový drát má tvar mřížky, uspořádání je patrné z obr. 1.10. V dolní části obrázku je znázorněné smykové a tahové napětí podél snímače. Na obr. 1.11 je vyobrazeno různé provedení tohoto typu tenzometru.[2, s. 80]



Obr. 1.10 Uspořádání odporového tenzometru lepeného. Průběh smykového a tahového napětí (převzato z [2])



Obr. 1.11 Základní typy lepených odporových tenzometrů (převzato z [2])

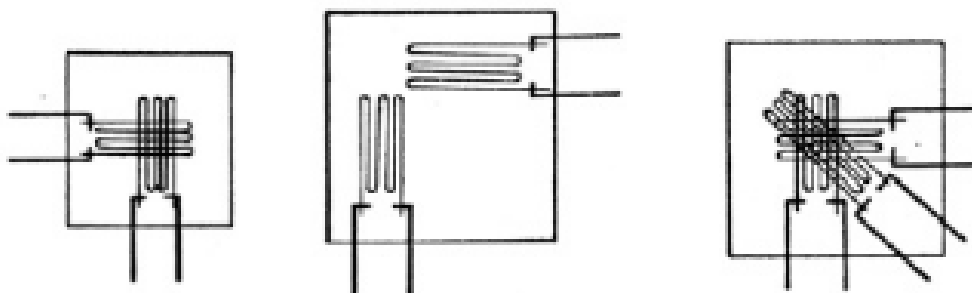
Na obr. 1.11a) je dosud nejvíce používaný typ drátkového tenzometru. Na obr. 1.11b) je typ s vinutým drátem na válcové podložce, která je pak zmáčknuta. Konce měrného drátu mají ostrý ohyb a podložka má trojnásobnou tloušťku. Celý snímač má tedy větší hmotnost. Dělený typ tenzometru (obr. 1.11c)) se vyznačuje větším průřezem příčných drátků, tzv. příčná citlivost tenzometru je menší. Dále na obr. 1.11d) je tkaný typ tenzometru. Odporový drátek tvoří útek a např. umělé hedvábí (skleněné vlákno) tvoří osnovu tkaniny tkané tak, že se drátek neobjeví na povrchu.[2, s. 82]

Pro závislost mezi relativní změnou a prodloužením platí podle předchozího

$$\frac{\Delta R}{R} = (\beta_p + 1 + 2\mu_p) \frac{\Delta l}{l} = K_1 \frac{\Delta l}{l} = K_1 \varepsilon_1 \quad (2.9)$$

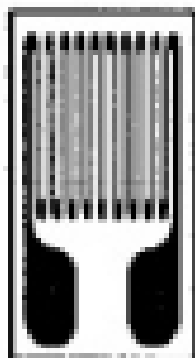
kde K_1 je součinitel deformační citlivosti tenzometru.

Tato závislost, v omezeném rozsahu deformací, je dána materiálem použitým na odporový článek tenzometru. Např. pro konstantan a některé chromniklové slitiny je to do $\varepsilon_1 = 4$ až 5 %. Ostatní používané slitiny (elinvar, slitiny Ni-Cr-Fe, manganin), jejichž součinitel deformační citlivosti je větší nebo menší než 2, jsou lineární pouze do $\varepsilon_1 = 0,3$ až 0,4 %. Nejčastěji se používá konstantan ($K = 2$). Celková hodnota odporu se pohybuje od 50 do 2500 Ω . Nejčastěji to však bývá 120, 300 a 600 Ω . Délka tenzometru bývá v rozsahu 3 až 35 mm, šířka tenzometru 0,8 mm až 12 mm a odpor izolace od 50 M Ω . Tloušťka tenzometru 0,05 μm až 1 μm a více. Průměr aktivního odporového drátu se volí co nejmenší. Běžně se používá 25 μm , výjimečně 10 až 5 μm . Nejvyšší teplota 50, popř. 200 $^{\circ}\text{C}$. V případech kdy je nutné měřit poměrné prodloužení ve více směrech se používá tzv. *sdrúžených tenzometrů* (obr. 1.12). Na jedné podložce je umístěno několik vhodně orientovaných vinutí, která mohou být umístěna nejen vedle sebe ale i na sobě. [2, s. 82]



Obr. 1.12 Řešení sdrúžených snímačů [2]

Z hlediska parametrů i technického použití jsou zajímavé snímače s obdélníkovým průřezem odporového článku (fólie). Články, zhotovené z fólie (obr. 1.13), bývají 1 až 10 μm silné a přilepené na podložce.[2, s. 83]



Obr. 1.13 Fóliový tenzometr (převzato z [2])

Hlavní výhodou fóliových tenzometrů je možnost zvětšení zatížení elektrickým proudem až na hodnoty jednotek ampér. Tohoto se dosahuje větším poměrem obvodu průřezu vodiče k jeho ploše a tím i odvod tepla, vzhledem k větší hodnotě obvodu, dosahuje i větší hodnoty, než je tomu u drátů kruhového průřezu. Styk vlastního odporového prvku s podložkou je lepší, rozložení a hodnoty smykových napětí jsou výhodnější.[2, s 84]

Jako nosná podložka se používá u odporových tenzometrů papír, umělé hmoty, azbest, tkaniny apod. Používá se i speciální papír rýžový, který vykazuje velký modul pružnosti ve smyku.[2, s. 84]

Pro lepení tenzometrů se dnes nejvíce používá lepidel na bázi termoplastů. Jsou však většinou hygroskopická a používají se do teplot 50 °C. Pro vyšší teploty do 200 °C se používají speciální lepidla většinou na bázi termosetů (např. fenolové pryskyřice) apod. Pro ještě vyšší teploty to jsou často dvousložková lepidla. Pro teploty nad 300 °C se používají keramické tmely, které mohou sloužit zároveň jako podložka pro odporové vinutí. Vrstva lepidla by měla být co nejmenší. Bezpodmínečně je třeba dodržet předepsaný postup lepení a používat lepidla, která doporučuje výrobce.[2, s. 84]

Pro funkci snímače při měření deformací může být nepříjemná tzv. příčná citlivost. Pro snímače (obr. 1.11) je nutné citlivost korigovat, protože při jednoosé napjatosti vzniká kromě deformace ve směru působícího napětí též příčná deformace. Je nutné upřesnit:

$$\frac{\Delta R}{R} = K_0 \varepsilon_0 + K_n \varepsilon_n \quad (3.0)$$

kde $\varepsilon_0, \varepsilon_n$ - poměrné prodloužení ve směru podélné a příčné osy snímače,
 K_0, K_n - součinitel deformační citlivosti snímače v podélném a příčném směru.

Příčná citlivost tenzometru bývá posuzována podle poměru:

$$\kappa_a = \frac{K_n}{K_0} \quad (3.1)$$

Velikost vlivu je možné určit pro jednotlivé typy snímačů. Většinou požadujeme, aby příčná citlivost byla co nejmenší (pod 2 %). Je tedy nutné, aby šířka snímače byla co nejmenší. Tento požadavek se velmi těžko plní u krátkých snímačů. [2, s. 84]

Vliv příčné deformace na citlivost můžeme zmenšit, jestliže část vinutí, kolmá na podélnou osu snímače, se bude co nejméně podílet na celkovém odporu tenzometru. Toho se dá dosáhnout zvětšením průřezu vodiče v příčném směru. Poměrné změny odporu zesílených spojovacích částí se sice nezmění, ale jejich vliv na celkovou poměrnou změnu odporu tenzometru je menší. [2, s. 84]

Přesnost měření odporovými tenzometry výrazně ovlivňuje teplota snímače. Změnou teploty se mění nejen mechanické, ale i elektrické vlastnosti tenzometru. Je to změna odporu tenzometru s teplotou, změna součinitele deformační citlivosti K , změna elektrických a mechanických vlastností podložky a lepidla, dále pak vznik parazitního termoelektrického napětí. I poměrně malé změny teploty způsobují změnu odporu tenzometru, která je porovnatelná se změnou odporu způsobenou měřenou veličinou. Vliv teploty [2, s. 85] můžeme vyloučit:

- kompenzací dalším snímačem,
- autokompenzací,
- korekcí naměřených výsledků.

Za ustálených teplotních poměrů můžeme za jistých podmínek vyloučit tento vliv kompenzačním tenzometrem, který má stejnou konstrukci a stejné vlastnosti jako měřicí tenzometr. Kompenzační tenzometr je zapojen v sousedním rameni můstku (půl můstek) nebo se používá zapojení se čtyřmi tenzometry, nazývané jako Celý Wheatstonův můstek (obr. 1.14). Výhodou celého můstku je velká teplotní kompenzace a čtyřnásobně větší citlivost v porovnání s měřením změny odporu na jednom tenzometru. Při měření za neustálených změn tepelných poměrů je tato kompenzace nedostačující. V takových případech je nutné korigovat údaje tenzometru na parazitní vliv teploty nebo použití tzv. autokompenzačního tenzometru. [2, s. 85]

Pro celkovou poměrnou změnu odporu můžeme psát

$$\frac{\Delta R}{R} = \left(\frac{\Delta R}{R}\right)_{\vartheta} + \left(\frac{\Delta R}{R}\right)_s + \left(\frac{\Delta R}{R}\right)_{d1} = [\alpha_p + K(\alpha_s - \alpha_{d1}) \Delta \vartheta] \quad (3.2)$$

kde $\left(\frac{\Delta R}{R}\right)_{\vartheta}$ - poměrná změna odporu drátu tenzometru, způsobená změnou teploty,

$\left(\frac{\Delta R}{R}\right)_s$ - poměrná změna odporu tenzometru způsobená roztažností měřené části s teplotou,

$\left(\frac{\Delta R}{R}\right)_{d1}$ - poměrná změna odporu tenzometru způsobená roztažností drátu tenzometru s teplotou,

α_p - teplotní součinitel odporu drátu tenzometru,

α_s - teplotní součinitel roztažnosti měřené části,

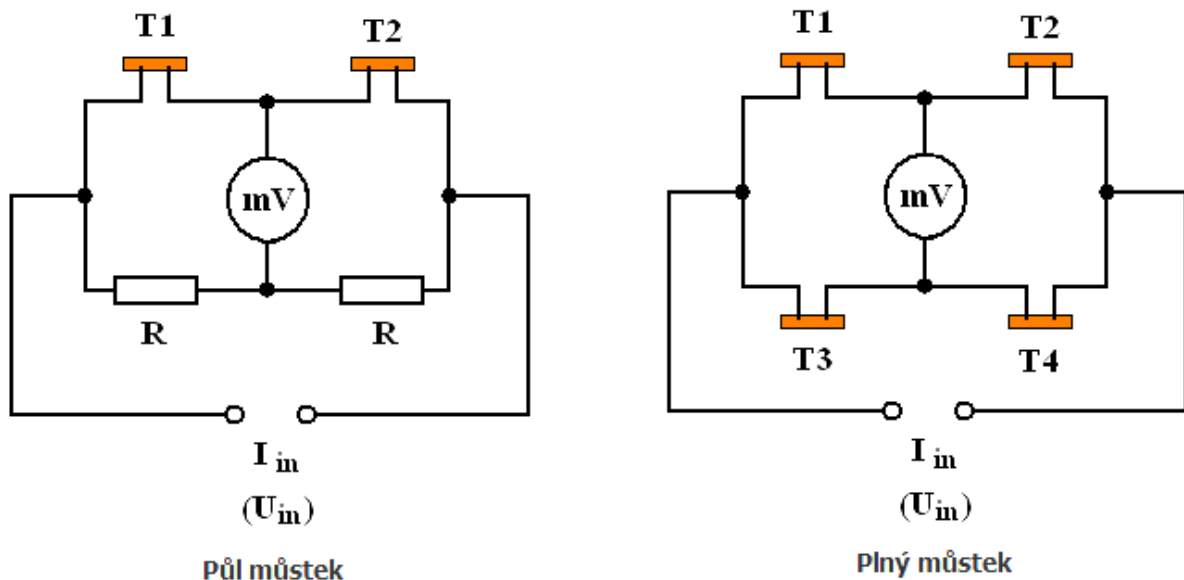
α_{d1} - teplotní součinitel roztažnosti drátu tenzometru,

$\Delta\vartheta$ - změna teploty působící na tenzometr a měřenou část.

Pro potlačení vlivu teploty je nutné, aby hodnota v závorce na pravé straně předchozí rovnice byla co nejmenší. Porovnáme-li hodnotu teplotních součinitelů, jak se obvykle vyskytují, vidíme, že největší vliv na změnu odporu má hodnota α_ρ . Z tohoto hlediska je vhodným materiálem pro konstrukci tenzometrů konstantan, méně vhodným elinvar apod. Kdyby byla splněna pro určitý materiál drátu tenzometru a měřené části podmínka:

$$\alpha_\rho = -K(\alpha_s - \alpha_{d1}) \quad (3.3)$$

nebylo by nutné kompenzaci provádět. Automatická teplotní kompenzace se zajistí většinou tak, že vinutí tenzometru je zhotoveno alespoň ze dvou částí různé délky a z různých kovů. Tím lze dosáhnout nezávislosti součinitele deformační citlivosti K na teplotě v určitém stavu.[2, s. 85]



Obr. 1.14 Elektrická schémata zapojení tenzometrů do můstku (převzato z [3])

Vlhkost, obsažená v prostředí kolem tenzometru, vniká do většiny lepidel a materiálů podložky a mění jejich fyzikální vlastnosti. Proto je nutno většinou tenzometr před vlivem vlhkosti chránit. Používá se ochranná vrstva např. z vosku, čisté vazelíny, ochranných laků apod. Měřítkem odolnosti tenzometru proti vlhkosti může být izolační odpor. U správně přilepeného a vysušeného tenzometru dosahuje izolační odpor 50 až 1000 M Ω . Teoretický popis tohoto vlivu je možný, známe-li hodnotu izolačního odporu. Zmenšení izolačního odporu se projeví jako zdánlivá změna součinitele deformační citlivosti. Vliv izolačního odporu můžeme většinou zanedbat, pokud neklesne pod hodnotu 1 M Ω . [2, s. 86]

Hystereze a nelineární průběh charakteristiky způsobují u snímače dodatečnou chybu. Velikost hysterezní chyby definujeme jako poměr rozdílu hodnoty poměrné změny odporu, získané při zatěžování a odlehčování, k hodnotě poměrné změny odporu při zatěžování. Její velikost může dosáhnout až 0,3 %, při opakovaném namáhání

se zmenšuje. Je proto účelné, pokud to okolnosti dovolí, několikrát zatížit zkoušený předmět před vlastním měřením a pak teprve zahájit vlastní měření. [2, s. 86]

Při dlouhodobém zatížení snímače se v závislosti na čase mění i velikost odporu tenzometru (mění velikost odporu tenzometru s časem). Jde o tzv. povolování tenzometru, plazivý efekt (Creep Efekt). Při dynamickém zatěžování tenzometru dochází též ke změně jeho charakteristických vlastností (jakých). Oba tyto vlivy jsou za normálních okolností nevýrazné a je potřeba s nimi uvažovat jen při přesných měřeních. Střední doba životnosti odporového tenzometru je určena především kvalitou lepidla, ochranou před vlhkostí a teplotou. [2, s. 86]

1.6 Kapacitní snímače

Základním principem kapacitních snímačů polohy je převod měřené veličiny na kapacitu kondenzátoru a její následné převedení na zpracovatelný signál napětí nebo proudu. Je využito vzorce pro kapacitu kondenzátoru

$$C = \varepsilon_r \cdot \varepsilon_0 \cdot \frac{S}{d} \quad (3.3)$$

kde C - kapacita kondenzátoru

ε_r - poměrná permitivita

ε_0 - permitivita vakua

S - účinná plocha elektrod

d - vzdálenost elektrod

Z výše popsaného vzorce pro výpočet kapacity kondenzátoru je zřejmé, že kapacita je závislá na velikosti plochy elektrod S , vzdálenosti elektrod d a také na permitivitě prostředí mezi elektrodami. V případě, že mezi elektrodami je vzduchová výplň, výpočet se zjednoduší na

$$C = \varepsilon_0 \cdot \frac{S}{d} \quad (3.4)$$

neboť platí $\varepsilon_{r_vzduch} \approx \varepsilon_{r_vakuum} = 1$.

Tyto snímače ve většině případů používají k měření polohy vzdálenost elektrod od sebe. Tato změna vzdálenosti způsobí změnu kapacity. Nejpoužívanější typy kapacitních snímačů polohy jsou uvedeny v tabulce 2.

Tabulka 2 Základní typy kapacitních snímačů (převzato z [5]).

Typ snímače	schéma	funkční vztahy	charakteristika
deskový jednoduchý s proměnnou mezerou		$C = \varepsilon \frac{S}{d(x)}; \frac{\Delta C}{\Delta d} = -\frac{C}{d} \left(1 - \frac{\Delta d}{d}\right)$	
diferenční s proměnnou plochou překrytí		$C = \varepsilon \frac{S(\alpha)}{d}$	
deskový s vrstvou dielektrika s proměnnou mezerou		$C = \frac{\varepsilon_1 S}{d_1(x) + \frac{d_2 \varepsilon_1}{\varepsilon_2}}; \frac{\Delta C}{C} = -\frac{\Delta d_1}{d_1 + d_2} \frac{1}{N} \frac{\Delta d_1}{d_1 + d_2}$ $N = \frac{\varepsilon_2 (d_1 + d_2)}{\varepsilon_2 d_1 + \varepsilon_1 d_2}$	
deskový s proměnnou plochou překrytí		$C = \varepsilon \frac{S(x)}{d}; \frac{\Delta C}{\Delta l} = \frac{C_{max}}{l_{max}} \left(1 + \frac{\Delta d}{d}\right)$	

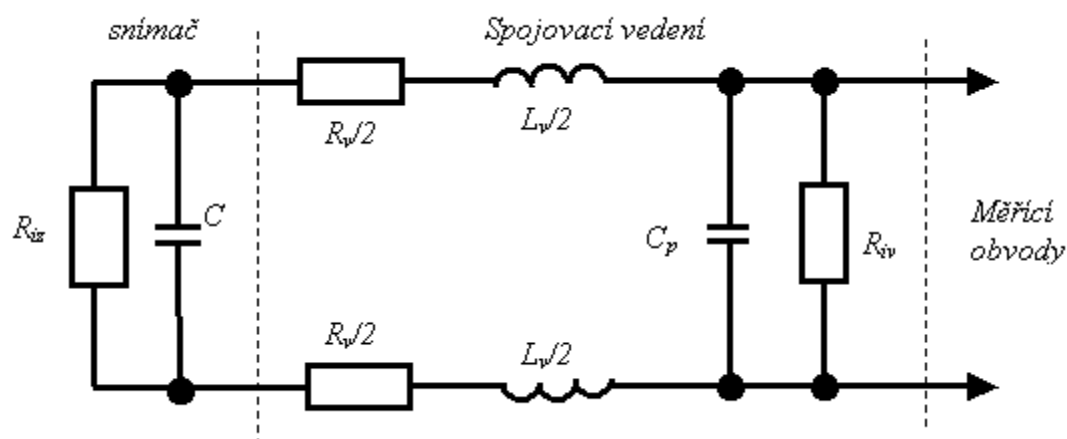
Z elektrického zapojení s náhradním schématem (viz. Obr. 1.15) kapacitního snímače je zřejmé, že obsahuje také indukčnost a odpor. Indukčnost je možné ve většině případů zanedbat. Podmínkou správné činnosti kapacitních snímačů je minimalizace vlivu parazitních kapacit, které mohou znehodnotit výsledek. Nejjednodušší je zkrácení přívodů ke kapacitnímu snímači. Dále pro indukčnost kapacitního snímače by mělo platit

$$R_v, \omega L_v \ll \frac{1}{\omega \cdot C} \ll R_{iv}, \frac{1}{\omega \cdot C} \quad (3.5)$$

$$\frac{1}{\omega \cdot C} \ll R_{iz} \quad (3.6)$$

Existuje také více metod vyhodnocování kapacity snímače:

- můstková metoda - měřící kondenzátor je zapojen do jedné z větví můstku napájeného harmonickým napětím,
- zpětnovazební metoda - měřící kondenzátor je součástí děliče zapojeného do zpětné vazby operačního zesilovače,
- rezonanční metoda - měřící kondenzátor je součástí LC obvodu, kapacita se převádí na kmitočet oscilátoru.



Obr. 1.15 Náhradní schéma kapacitního snímače (převzato z [5]).

1.6.1 Kapacitní senzor s proměnnou vzduchovou mezerou

Tento typ senzoru pracuje na principu proměnné vzdálenosti d mezi elektrodami (viz. Obr. 1.16). Změna kapacity v závislosti na vzdálenosti desek kondenzátoru není lineární, ale je exponenciální (viz. Obr. 1.17). Pro toto rovinné uspořádání platí

$$C = \varepsilon_r \cdot \varepsilon_0 \cdot \frac{S}{d}, \quad (3.7)$$

při změně d o Δd dostaneme

$$C_1 = \varepsilon_r \cdot \varepsilon_0 \cdot \frac{S}{d + \Delta d} = \varepsilon_r \cdot \varepsilon_0 \cdot \frac{S}{d_1}, \quad (3.8)$$

a z toho vyplývá, že

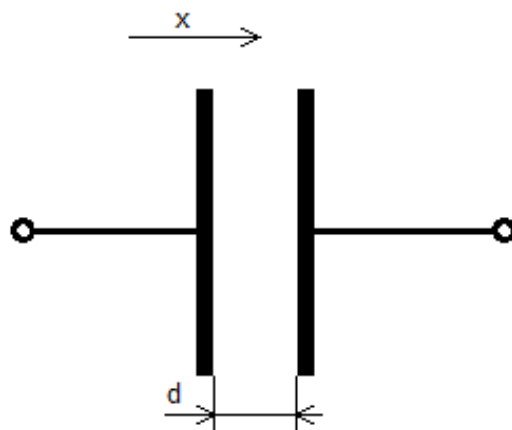
$$\frac{C_1}{C} = \frac{1}{1 + \frac{\Delta d}{d}}. \quad (3.9)$$

Tato závislost již není lineární. Pouze pro malé výchylky x dostaneme

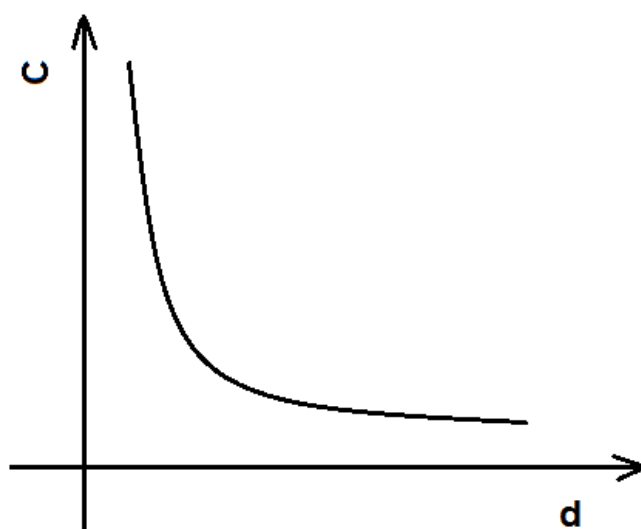
$$\frac{C_1}{C} \approx 1 - \frac{\Delta d}{d}. \quad (4.0)$$

Pro citlivost snímače pak dostaneme výraz

$$\frac{\Delta C}{\Delta d} = -\frac{\varepsilon_r \cdot \varepsilon_0 \cdot S}{d^2}. \quad (4.1)$$



Obr. 1.16 Schéma kondenzátoru a vyznačený směr pohybu elektrod kondenzátoru



Obr. 1.17 Graf závislosti kapacity C na vzdálenosti elektrod d

Pokud snímač funguje na principu změny plochy desek kondenzátoru, mění se tedy plocha S , která ovlivňuje celkovou kapacitu snímače podle

$$C = \frac{\varepsilon_r \cdot \varepsilon_0 \cdot b \cdot l}{d}, \quad (4.1)$$

kde l - délka překrytí elektrod,
 b - šířka překrytí.

1.7 Optické vláknové senzory

Na vstupu každého optického vláknového senzoru, s výjimkou senzorů využívajících záření absolutně černého tělesa, je *optický zdroj záření*, který je připojen k elektrickému budicímu zdroji. Nejčastěji se jako optické zdroje používají elektroluminiscenční diody LED. Tyto jsou nekoherentními zdroji záření s úzkým spektrem. Dále se používají laserové diody LD, které jsou koherentními zdroji záření s úzkým spektrem. Popřípadě se využívají také klasické zdroje záření jako například výbojky, halogenové žárovky, které jsou nekoherentními širokopásmovými zdroji záření. Dalším důležitým optickým prvkem senzorů je již výše zmiňované *optické vlákno*. To je využito buď jako citlivá část senzoru nebo pouze k přenosu optického signálu. Používají se jednovidová i mnohavidová, skleněná i plastová optická vlákna, přičemž volba optického vlákna závisí na typu, konstrukci popřípadě požadovaných vlastností senzoru. Dalším nezbytným prvkem optických vláknových senzorů je *optický detektor - fotodetektor*, ve kterém se energie světelného záření přímo převádí v energii elektrickou. Jako fotodetektory se nejčastěji používají fotodiody PIN, lavinová dioda APD nebo fotonásobiče. Nezbytnou součástí každého optického vláknového senzoru je elektronický detekční systém, který vyhodnocuje elektrický signál z fotodetektoru.

1.7.1 Optické vlákno

Optické vlákno je dielektrický vlnovod, nejčastěji vyrobený z různých druhů skla nebo plastu, ve kterém se šíří elektromagnetické vlny ve směru podélné osy vlákna. Nejčastěji se jedná o světlo popřípadě infračervené záření. Optické vlákno se skládá z více vrstev (viz. Obr. 1.18).[6]



Obr. 1.18 Stavba optického vlákna (převzato z [6])

1.7.2 Princip šíření světla optickým vláknem

Úkolem optického vlákna je přivést světelný paprsek od jeho zdroje k detektoru s co nejmenšími ztrátami. Na základě zákonů paprskové optiky je zřejmé, že světelný

paprsek se při dopadu na rozhraní dvou optických prostředí částečně láme do druhého prostředí a z části se odráží zpět do prvního prostředí. Aby mohl být světelný paprsek veden optickým vláknem, musí být do vlákna zaveden z vnějšího prostředí. Tím je nejčastěji vzduch s indexem lomu $n_v = 1$. Světelný paprsek dopadá na první optické rozhraní vzduch – jádro. Jelikož prochází z prostředí opticky řidšího do opticky hustšího, nastává lom paprsku ke kolmici. [6]

Podle Snellova zákona platí

$$\frac{\sin\varphi_1}{\sin\varphi_2} = \frac{n_j}{n_v} \rightarrow \frac{\sin\varphi_1}{\sin\varphi_2} = n_j, \quad (4.2)$$

kde n_j - index lomu jádra optického vlákna,
 n_v - index lomu vzduchu.

Světelný paprsek prochází jádrem optického vlákna a pod určitým úhlem dopadá na druhé optické rozhraní jádro – plášť. Podle hodnoty úhlu, pod kterým paprsek dopadá na rozhraní jádro – plášť, můžou nastat tři případy :

- pokud je úhel dopadu světelného paprsku vzhledem ke kolmici k optickému rozhraní malý, pak se část paprsku odráží pod úhlem dopadu zpět do jádra a část paprsku se láme od kolmice pod úhlem menším než 90° . Lomený paprsek vstupuje do pláště, prochází pláštěm a nakonec uniká ven z optického vlákna – červený paprsek, viz obr. 1.19. Při tom dochází k vyzaření světelné energie a tím ke ztrátám, které jsou nežádoucí,
- jestliže je úhel dopadajícího paprsku roven meznímu úhlu, nastává obdobná situace jako v prvním případě. Část paprsku se opět odráží pod mezním úhlem zpět do jádra a část paprsku se láme od kolmice pod úhlem rovným 90° . Lomený paprsek se potom šíří po rozhraní pláště a jádra,
- poslední varianta je jestliže je úhel dopadajícího paprsku větší než mezní úhel. V tomto případě se paprsek zcela odráží pod stejným úhlem zpět do jádra. Nastává totální odraz světla, při němž nedochází k nežádoucím ztrátám světelné energie a účinnost přenosu světla optickým vláknem je nejvyšší.

Jak už bylo řečeno, úkolem optického vlákna je přivést světlo ze zdroje k detektoru s co nejmenšími ztrátami. Toho lze dosáhnout s využitím podmínky totálního odrazu na rozhraní jádro – plášť:

$$\frac{\sin\varphi_3}{\sin 90^\circ} = \frac{n_p}{n_j} \wedge \sin\varphi_3 = \frac{n_p}{n_j} \wedge \sin\varphi_3 \leq 1 \quad (4.3)$$

$$\varphi_3 = 90^\circ - \varphi_2 \quad (4.4)$$

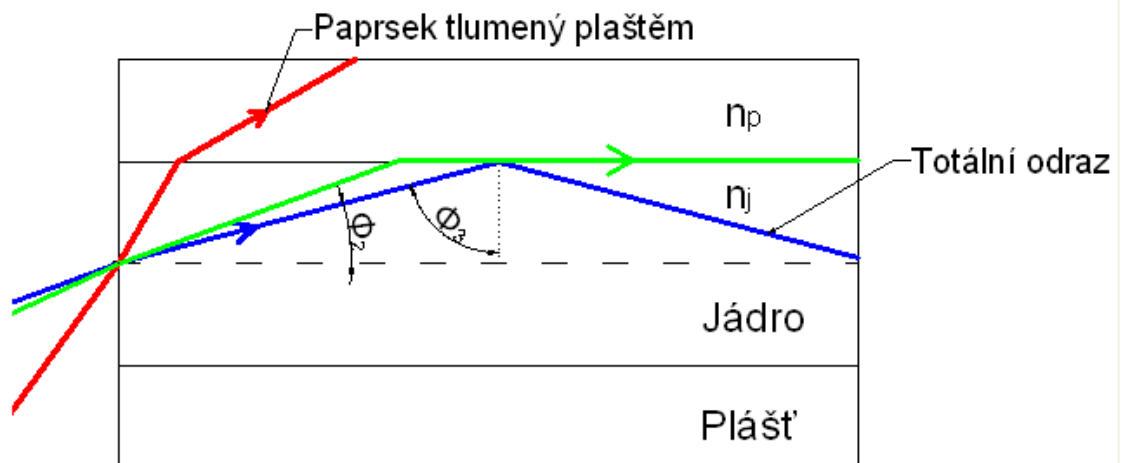
Nyní určíme pod jakým úhlem mohou paprsky vstupovat do vlákna, aby byly splněny podmínky pro totální odraz na rozhraní jádro – plášť:

$$\sin\varphi_1 = n_j \cdot \sin\varphi_2, \quad (4.5)$$

$$\begin{aligned} \sin \varphi_1 &= n_j \cdot \sin(90^\circ - \varphi_3) = n_j \cdot \cos \varphi_3 = n_j \cdot \sqrt{1 - \sin^2 \varphi_3} = \\ &= n_j \cdot \sqrt{1 - \frac{n_p^2}{n_j^2}} = \sqrt{n_j^2 - n_p^2}, \end{aligned} \quad (4.6)$$

$$\varphi_1 = \arcsin \sqrt{n_j^2 - n_p^2}. \quad (4.7)$$

Odvozením jsme získali vztah pro hodnotu kritického úhlu Φ_1 , tj. úhlu, pod kterým mohou paprsky vstupovat do optického vlákna, aniž by byla porušena podmínka totálního odrazu. Z předchozího vztahu je patrné, že numerická apertura závisí na indexu lomu jádra i na indexu lomu pláště optického vlákna. Jedná se o bezrozměrný parametr vyjadřující schopnost optického vlákna přijímat a vést světlo.[6]



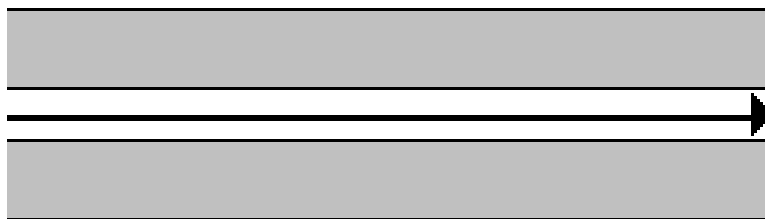
Obr. 1.19 Princip totálního odrazu (podle [6])

1.7.3 Typy optických vláken

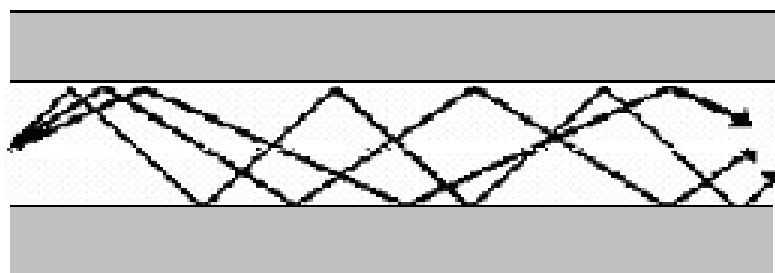
Podle počtu vidů, které se mohou vláknem šířit je dělíme :

- jednovidová - vlákna schopná vést pouze jeden vid osou vlákna (viz. Obr. 1.20) . Toho se dosahuje například velmi malým průměrem jádra (4 až 10 μ m),
- mnohavidová - vlákna, kterými se může šířit více vidů. Vláknem je k tomu uzpůsobeno tím, že jádro je mnohem větší (50 až 100 μ m) než u vláken jednovidových.

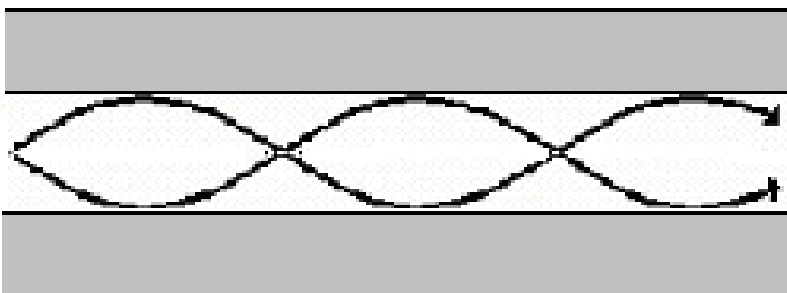
Další rozšířené dělení je na vlákna se skokovou změnou indexu lomu (viz. Obr. 1.21) a na vlákna s gradientní změnou indexu lomu (viz. Obr. 1.22).



Obr. 1.20 Jednovídné vlákno (převzato z [6])



Obr. 1.21 Mnohovidové vlákno se skokovou změnou indexu (převzato z [6])



Obr. 1.22 Mnohovidové vlákno s gradientní změnou indexu (převzato z [6])

Tabulka 3 Výhody a nevýhody jednovídného vlákna (převzato z [6])

Výhody	Nevýhody
malý útlum	malá NA
malá disperze	drahá výroba
možnost přenosu na delší vzdálenosti	nutné dražší a přesnější generátory světla i detektory

Tabulka 4 Výhody a nevýhody mnohavidového vlákna (převzato z [6])

Výhody	Nevýhody
velká NA	velký útlum
levná výroba	velká disperze
stačí levnější a jednodušší generátory i detektory	možnost přenosu na kratší vzdálenosti

1.7.4 Útlum optických vláken

Útlum A je jednou ze základních charakteristik optických vláken. Říká nám, jak klesá výkon optického signálu přenášeného vláknem. Je definován jako logaritmické vyjádření podílu optického výkonu P_0 navázaného do optického vlákna a optického výkonu P vystupujícího na jeho konci.[6]

$$A = 10 \log \frac{P_0}{P} \quad (4.8)$$

Jeho hodnota se uvádí v dB. V praxi se běžněji používá útlum vztažený na délku vlákna v kilometrech, tzv. měrný útlum vlákna α . Měrný útlum vlákna je definován následujícím vztahem. [6]

$$\alpha = \frac{10}{L} \log \frac{P_0}{P} , \quad (4.9)$$

kde L - je délka optického vlákna v km.

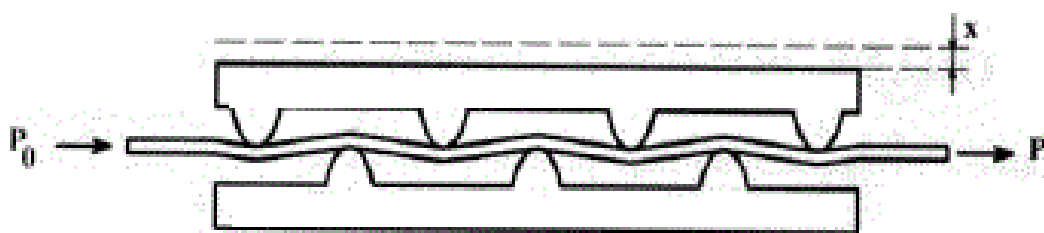
Jeho hodnota se uvádí v dB/km.

Útlum optických vláken je způsoben několika jevy:

- absorpce světla
 - vlastní
 - nevlastní (příměsová)
- rozptyl světla
 - lineární
 - Rayleighův rozptyl
 - Mieův rozptyl
 - nelineární
 - Brillounův rozptyl
 - Ramanův rozptyl
- ohyby vlákna
 - makroohyby
 - mikroohyby

1.7.5 Útlum optického vlákna vlivem ohybu

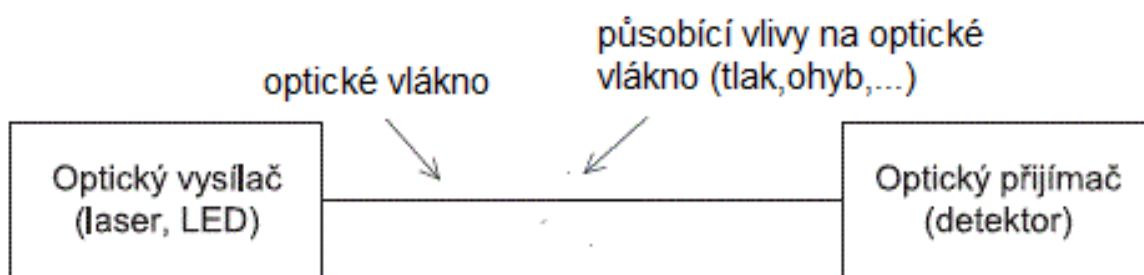
Ohyb vlákna (viz. Obr. 1.23) způsobí, že pro některé paprsky se naruší podmínka totálního odrazu na rozhraní jádro a plášť. Takové paprsky dopadají na rozhraní, lámou se do pláště, kterým prochází a nakonec unikají z vlákna. Tím dochází ke ztrátě energie, kterou tyto světelné paprsky mají. Ztráty způsobené ohybem rozdělujeme na ztráty makroohybem a ztráty mikroohybem. Makroohyb je ohyb vlákna, jehož poloměr křivosti nabývá hodnot řádově desítky milimetrů. Energetické ztráty způsobené makroohybem lze snížit návrhem optické trasy s velkým poloměrem zakřivení. Mikroohyb je ohyb, jehož poloměr křivosti je menší než průměr jádra vlákna.[6]



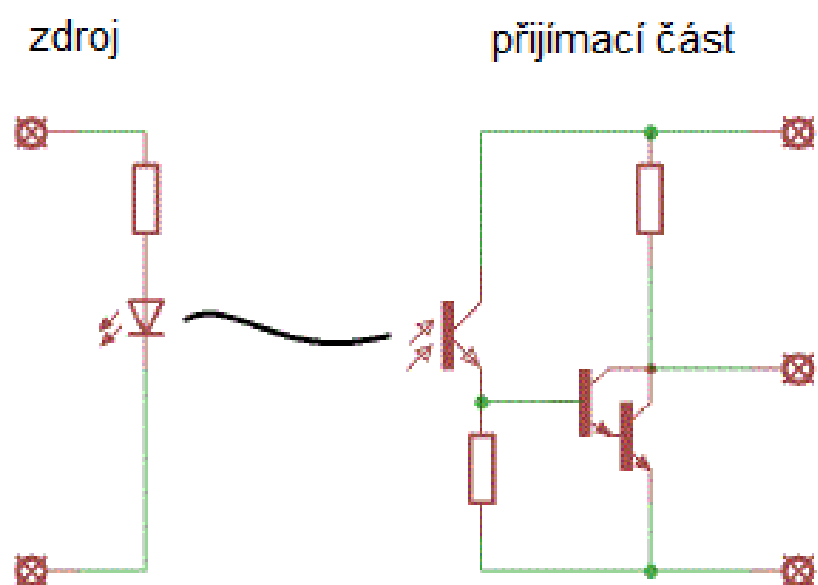
Obr. 1.23 Optický senzor síly a polohy využívající ohyb optického vlákna.

1.7.6 Zapojení optické přenosové soustavy

Jak již bylo řečeno, na začátku tohoto řetězce je *zdroj optického záření*. Následuje optické vlákno. Funkci přijímacího členu zastává *optický detektor*, který realizuje následné zpracování přijatého signálu (viz. Obr. 1.24). Podrobné zapojení optické přenosové soustavy je na obr. 1.25.



Obr. 1.24 Blokové schéma optické přenosové soustavy.



Obr. 1.25 Podrobné zapojení optické přenosové soustavy.

2 NÁVRH DENDROMETRU

2.1 Úvod do problematiky

Dendrometrie, nauka o měření stromů a stanovení taxačních veličin (výčetní šířky a výšky). Vhodná studie růstového průběhu stromů je pomocí měření nedestruktivními senzory. Výhoda použití nedestruktivních senzorů je v možnosti měření na objektu (stromu), aniž by došlo k jeho poškození (destruktivní senzory vyžadují přímý zásah do živé části objektu-stromu)., Vzhledem ke snadnosti přístupu a zjednodušení podmínek měření se nejčastěji měří obvod stromu ve výčetní výšce (tj. 130 cm nad zemí), ovšem studují se i změny obvodu v různých výškách. V principu se měření provádí přístrojem, připevněným kolem obvodu stromu, který je spojený s měřicí a záznamovou technikou (PC). Tato bakalářská práce se věnuje měření dynamiky tloušťkového přírůstku stromu během jednodenního cyklu, ovšem velmi častá jsou i měření dynamiky přírůstku po dobu celého ročního období.

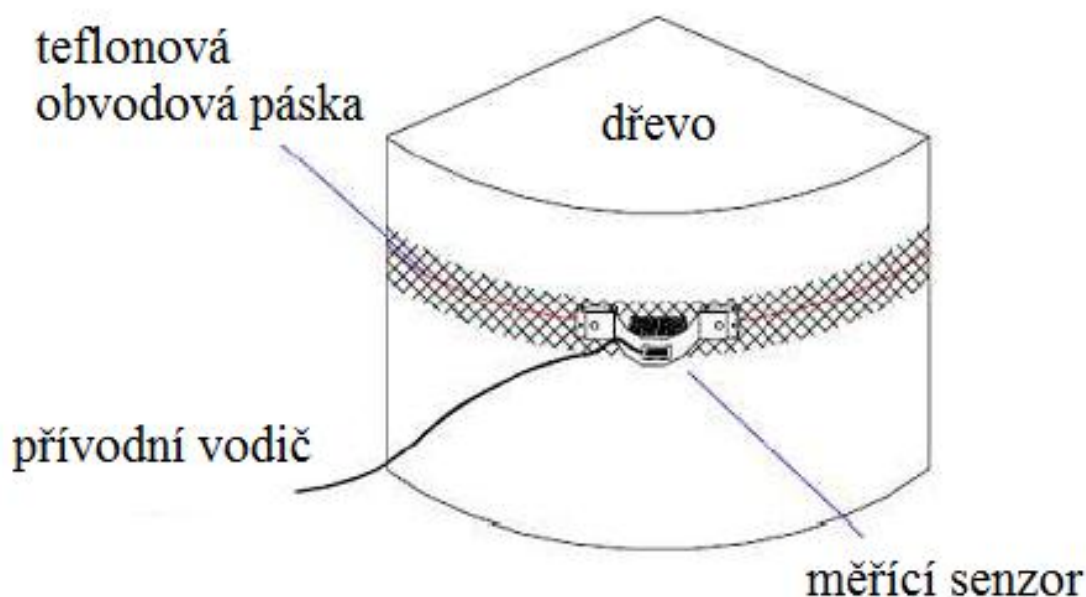
V současné době existují dva druhy komerčních dendrometrů:

- obvodové (v této bakalářské práci),
- bodové.

Dynamiku denního přírůstku stromu výrazně ovlivňují vnitřní i vnější faktory. Na základě analýzy vnějších vlivů je zřejmé, že na roli tloušťkového přírůstku má velký vliv socioekologické postavení stromu, hustota zalesnění, úhrn podkorunových srážek, hloubka, vlhkost a fyzikální vlastnosti půdy.

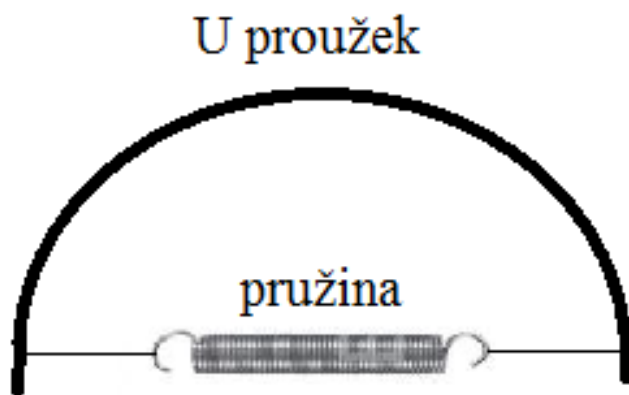
2.2 Konstrukce dendrometru

Při návrhu konstrukce dendrometru jsem vycházel z již existujícího dendrometru UMS D6 firmy GEOMOR - TECHNIK Zp. z o. o., Principiálně se jedná o obvodový typ dendrometru (obr. 2.1), který se skládá z lanka (obepínající strom), plechového U proužku, vratné pružiny, teflonového podkladu pro lanko a samotného měřícího zařízení umístěného na U proužku. Specifické vlastnosti dendrometru UMS D6 udává výrobce na svých stránkách. Technologie provedení měřicí elektronické části je součástí firemní know how a je utajena.



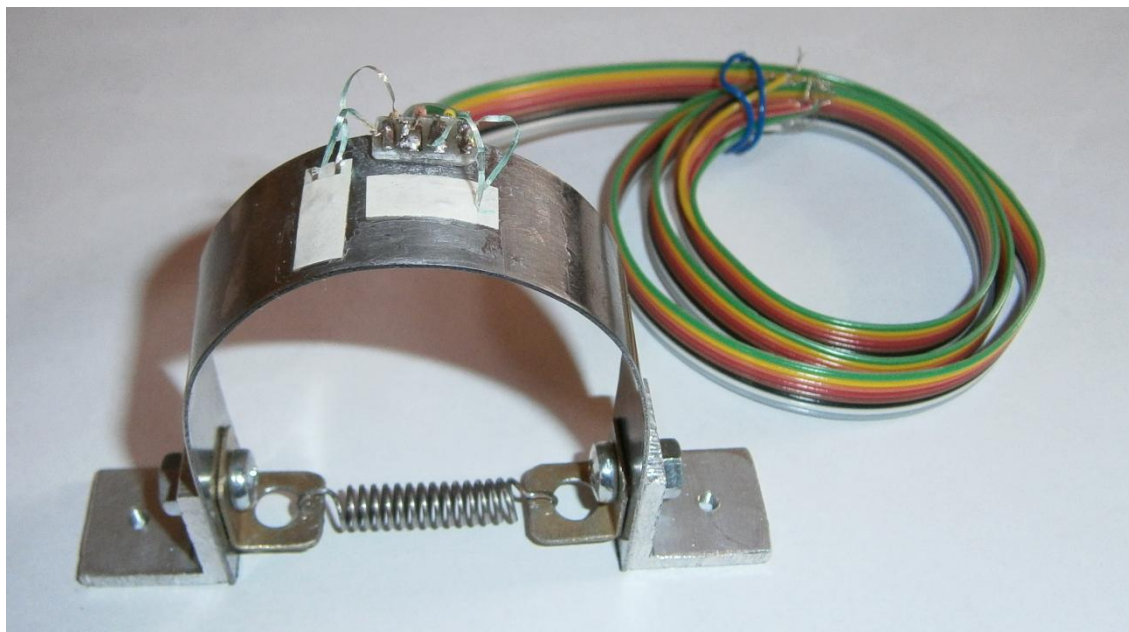
Obr. 2.1 Obvodový dendrometr připevněný ke stromu (podle [4])

Plechový U kroužek je pevně spojen s obvodovým drátem vedoucím kolem stromu. Toto spojení je třeba provést velmi precizně, neboť při denním přírůstku několik desítek μm může povolující spoj způsobovat chybu, která naprosto degraduje měření. Další částí je vratná pružina, která zajišťuje dokonalé obepnutí přístroje kolem stromu. Tato je připevněna na U proužku (obr. 2.2) a zabraňuje rozbíhání konců U proužku. Volba pružiny musí být také uvažována. Strom při zvětšování přírůstku vytváří na obvodový dendrometr tlak. Volba příliš tvrdé pružiny by znemožnila, popř. alespoň omezila přenesení změny přírůstku na elektrické měřicí zařízení. Naopak, příliš měkká pružina nevytvoří dokonalé přilnutí přístroje po obvodu stromu a tudíž změna přírůstku stromu se na měřicí elektrickou část dendrometru dostane s určitou setrvačností, což může způsobit velké zkreslení.



Obr. 2.2 Pohled z profilu na U proužek s upevněnou pružinou

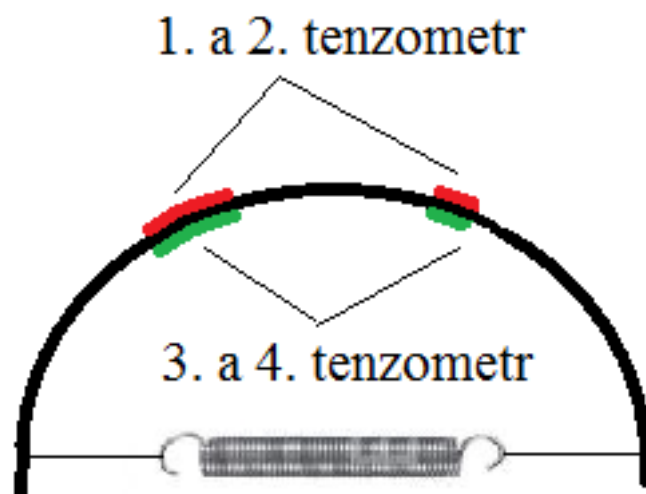
Teflonový pásek (obr.2.1) obepíná strom a slouží především jako podložka pod odvodové lanko, které brání zařezávání lanka do stromu tak, že tlak lanka se rozloží na větší plochu, kterou představuje právě teflonová podložka. Teflon se volí kvůli svým vlastnostem, mezi které patří nenasákavost, odolnost vůči světlu, stárnutí, křehnutí a jeho mechanické vlastnosti nejsou v širokém rozmezí (20 - 250 °C) téměř závislé na teplotě. Teflonový pásek není pevně spojen s dendrometrem. Na obrázku 2.1 je zkonstruovaný dendrometr s přilepenými tenzometry na horní i dolní straně U proužku.



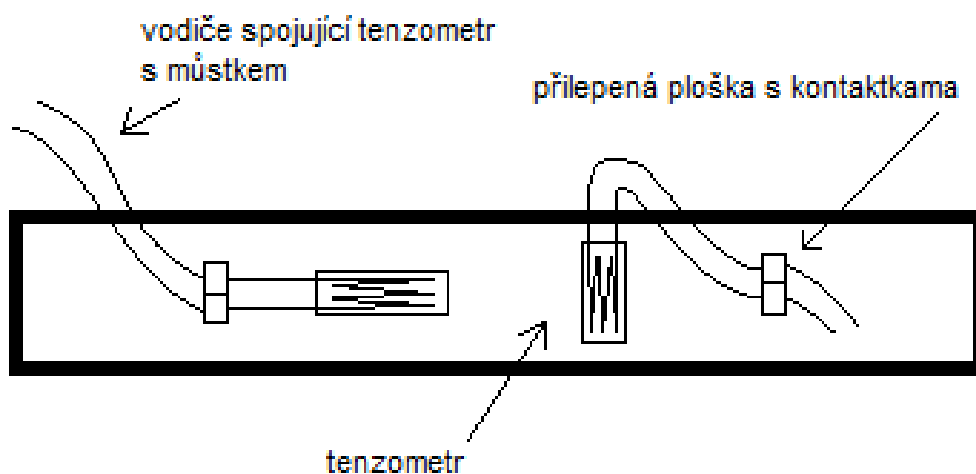
Obrázek 2.1 Zkonstruovaný dendrometr

2.3 Elektronická měřicí část

Měřicí část je nejdůležitější součástí dendrometru. Je to jeho samotné měřicí zařízení. Po prozkoumání dendrometru UMS D6 je zřejmé, že měřicí senzor je umístěn na horní straně U proužku a měří deformaci tohoto U proužku. Takto změřená deformace odpovídá určitému protažení U proužku, které způsobí přírůstek stromu. Podle prozkoumaných metod měření neelektrických veličin je známo, že k měření deformací se využívají tenzometry. Kvůli potřebné teplotní kompenzaci, a také zvýšení citlivosti budou zapojeny čtyři tenzometry do úplného můstku (viz. Obr. 1.14). Výrobce dendrometru UMS D6 svůj neznámý měřicí senzor umísťuje pouze na horní stranu U proužku V tomto návrhu ovšem budou z důvodů zvýšení citlivosti umístěny dva tenzometry na dolní a dva na horní straně (viz. Obr. 2.3). Dva ve směru příčného a dva ve směru podélného namáhání tenzometrů (viz. Obr. 2.2).

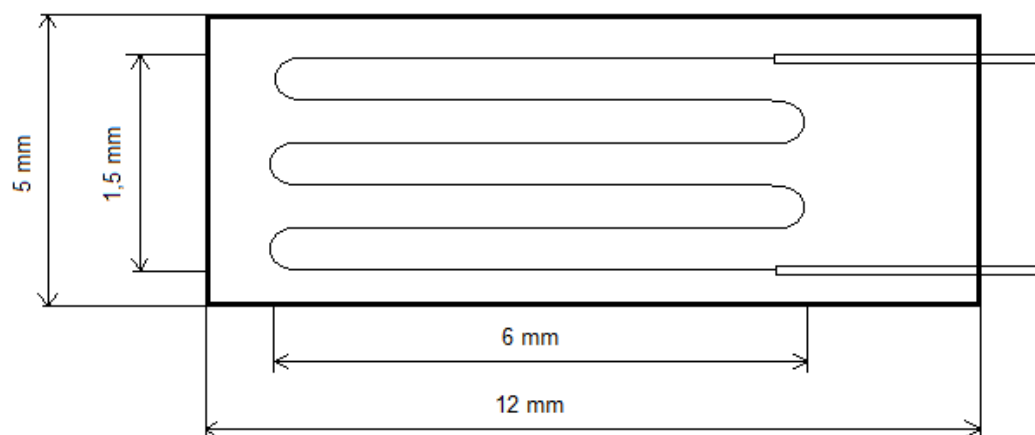


Obr. 2.3 Návrh rozložení čtyř tenzometrů na U pružině



Obr. 2.4 Pohled z půdorysu na U pásek s nalepenými tenzometry

Zvoleny byly odporové drátkové tenzometry (viz. Obr. 2.5) firmy Mikrotechna typu 6 JP 120 A. Měřicí mřížka tenzometru je vyrobena z konstantanového drátu průměru několika setin mikrometru (uveď kolik). Jako podklad pro měřicí mřížku je použit papír. Přívodní dráty tenzometrů jsou měděné postříbřené. Součinitel deformační citlivosti (někdy je také uváděn jako k-faktor nebo gage factor) je u použitých tenzometrů roven 2. Tento typ tenzometru pracuje v rozmezí $\pm 45^{\circ}\text{C}$ a jeho odpor je $120\ \Omega$ s tolerancí $\pm 0,25\%$.

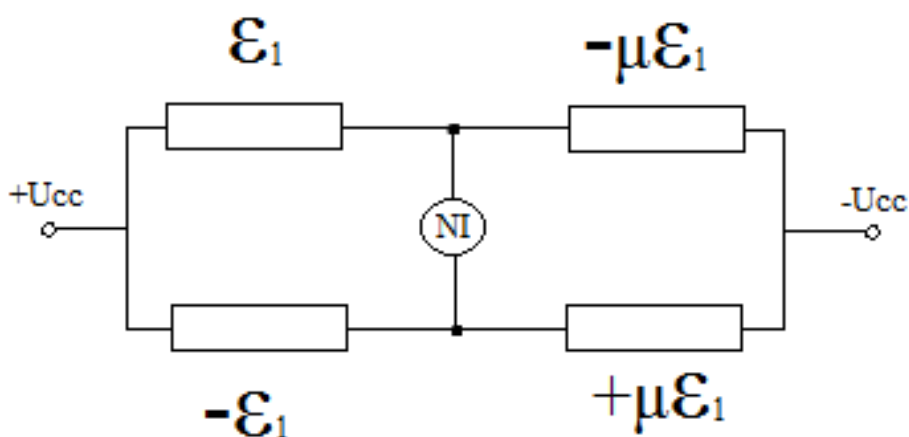


Obr. 2.5 Konstrukční řešení tenzometru 6JP120A

Před samotným přilepením tenzometru na U proužek je nutné dodržet technologický postup lepení tenzometru. Lepení bylo provedeno takto:

1. mechanické čištění povrchu,
2. chemické čištění povrchu,
3. nalepení tenzometru a letovací lišty,
4. krytí tenzometru krycími prostředky.

Po odzkoušení, zda-li jsou všechny přilepené tenzometry funkční, bylo zařízení testováno na školním přípravku. Výsledkem je zjištění, že dendrometr má největší citlivost při zapojení do nelineárního úplného můstku (viz. Obr. 2.6).



Obr. 2.6 Zapojení nelineárního celého mostu s vyjádřením deformací tenzometrů

Na obrázku 2.6 jsou tenzometry vyjádřeny pomocí jejich deformací ε_1 , případně pomocí deformací násobených Poissonovou konstantou, která je pro každý materiál jiná. Pro takový to můstek je třeba určit můstkový faktor

$$N = 2 \cdot (1 + \mu) \quad (5.0)$$

kde μ - Poissonova konstanta.

Most je napájen stejnosměrným napětím $\pm U_{cc}$ a napětí U_{ni} na nulovém indikátoru (ve schématu jako NI) je pro nás zásadní, neboť právě výchylky tohoto indikátoru znamenají deformace tenzometrů. Čím větší bude výchylka, tím více se tenzometry budou deformovat, a my můžeme usoudit, že dochází k obvodovým změnám rozměrů měřeného stromu. Pro napětí nulového indikátoru NI platí

$$U_{ni} = U_{cc} \cdot \frac{1}{4} \cdot N \cdot K \cdot \varepsilon \cdot 10^{-6} \quad (5.1)$$

kde U_{cc} - napájecí napětí,

N - můstkový faktor,

K - k-faktor,

ε - deformace [$\mu\text{m}/\text{m}$].

Z rovnice 5.1 dostaneme úpravou vztah pro výpočet velikosti deformace tenzometrů

$$\varepsilon = \frac{4 \cdot U_{ni}}{U_{cc} \cdot N \cdot K \cdot 10^{-6}} \quad (5.2)$$

Číselná velikost deformace je důležitá. Pomocí ní a také známé velikosti paraboly U proužku se dopočítá změna obvodu měřeného stromu.

2.4 Zpracování informací z dendrometru

Elektronická část dendrometru, neboli tenzometrický můstek, je senzor, snímající aktuální hodnotu roztažení (deformace) tenzometrů přilepených na U proužku tím, že při deformaci tenzometry mění hodnotu odporu. Signál z nulového indikátoru (pouze pomyslná součástka) můstku je příliš malý, je ho potřebné zesílit. Jako zesilovač je použit obvod INA128U. Zapojení v obvodu je zřejmé z obrázku 2.7. Takto zesílený signál je již zpracováván pomocí digitálního multimetru Agilent, který je synchronizovaný s PC pomocí softwaru VEE s patřičně vytvořeným programem (viz. C). Program pracuje tak, že digitální multimetr Agilent odečítá informaci o napěťové úrovni zesíleného signálu z NI s předem nastaveným časem opakování odečítání. Získaná data jsou z digitálního multimetru poslána přes USB sběrnici do PC, kde dochází k jejich uložení do souboru. Prostředí VEE navíc nabízí možnost změřená data ihned zobrazovat v X-Y grafu, což nás již během měření informuje o průběhu měřených veličin (např. $U=f(t)$).

3 ZÁVĚR

Dendrologie je nauka zkoumající stromy a dřeviny. První zmínky o dendrologii již v polovině 19. století v učebních textech pěstění lesů. Hlavním cílem této bakalářské práce je prozkoumání chování roztažnosti obvodu stromu během jednoho denní cyklu. Pro jeho naplnění jsem využil metodu sledování deformací tenzometrů v závislosti na změně obvodu stromu.

Práce je rozdělená do 2 kapitol.

První kapitola této práce je věnovaná teoretické problematice o možnostech měření malých změn vzdálenosti pomocí převodu změny polohy na signál ze senzoru. Byly prostudovány čtyři metody měření a to indukční, kapacitní, odporová a optická. U každé metody byl rozebrán princip činnosti takto konstruovaného senzoru a uvedeny základní používané typy. Na základě těchto znalostí a zkoumání komerčních výrobků jsem se rozhodl pro použití dendrometru využívající deformace tenzometrů.

Druhá kapitola je věnovaná návrhu vlastního dendrometru pro zaznamenávání denního přírůstku. Návrh spočíval v použití odporových drátkových tenzometru vhodné přilepených na konstrukci U proužku. Využívá se principu deformace tenzometrů, která vzniká obvodovými změnami objektu (stromu) a převodu těchto deformací na měřitelné změny odporu tenzometrů. Z důvodu teplotní kompenzace tenzometrů a také z důvodu zvýšení citlivosti senzorů jsou tenzometry zapojeny do celého nelineárního můstku. Byla vytvořena deska plošného spoje se zapojením mostu s operačním zesilovačem, který zesiluje signál z celého nelineárního mostu.

Sběr dat z tenzometrického můstku zajišťuje digitální multimetr firmy Agilent, který je synchronizovaný s PC. V prostředí VEE byl dále napsán obslužný program pro tento digitální multimetr, který zajišťuje odečítání hodnot z tenzometrického můstku, zpracování na potřebný formát, uložení do souboru a také okamžité zobrazení naměřených hodnot v závislosti na čase.

Přínosem použitého dendrometru je zaznamenávání denního přírůstku stromu podle jeho typu. Podle křivky denního přírůstku stromu je možné dopočítat transpirační tok stromu, tedy množství vody, proudící stromem (od kořenů do koruny stromu) za jednotku času.

Tyto znalosti mohou být využity při komerčním pěstování stromů. Znalost vodohospodaření stromů podle typu stromu umožňuje racionální zalesňování, čím může být zabráněno trvalému podmáčení půdy, tvorby lužních lesů apod.

LITERATURA

- [1] WASGESTIAN P., Tenzometry HBM. Dostupné na <[http://artax.karlin.mff.cuni.cz/~sidlof/vyuka/LA1/Materialy%20k%20prednaskam%20\(ce%20sky\)/tenzometryHBM_CZ.pdf](http://artax.karlin.mff.cuni.cz/~sidlof/vyuka/LA1/Materialy%20k%20prednaskam%20(ce%20sky)/tenzometryHBM_CZ.pdf)>.
- [2] ZEHNULA K., *Snímače nelineárních veličin*, Praha 1977: SNTL-Nakladatelství technické literatury, 398 s.
- [3] KATTAUER P., *Tenzometry VTS* [cit. 2011-12-29]. Dostupné na <<http://www.vtsz.cz/polovodicove-tenzometry.php>>.
- [4] GEOMOR TECHNIK [online]. [cit. 2011-12-29]. Dostupné na : <http://www.geomor.com.pl/beta/pdf/13/pobierz.php?file=UMS_D6.pdf>
- [5] ŠTĚTINA J., *Kapacitní senzory*, Brno 2003. Dostupné na <<http://ottp.fme.vutbr.cz/skripta/vlab/mereni/Ka03-03.htm>>
- [6] STRÍTESKÁ R., práce *Moderní metody měření teploty*, Brno 2010

SEZNAM SYMBOLŮ, VELIČIN A ZKRATEK

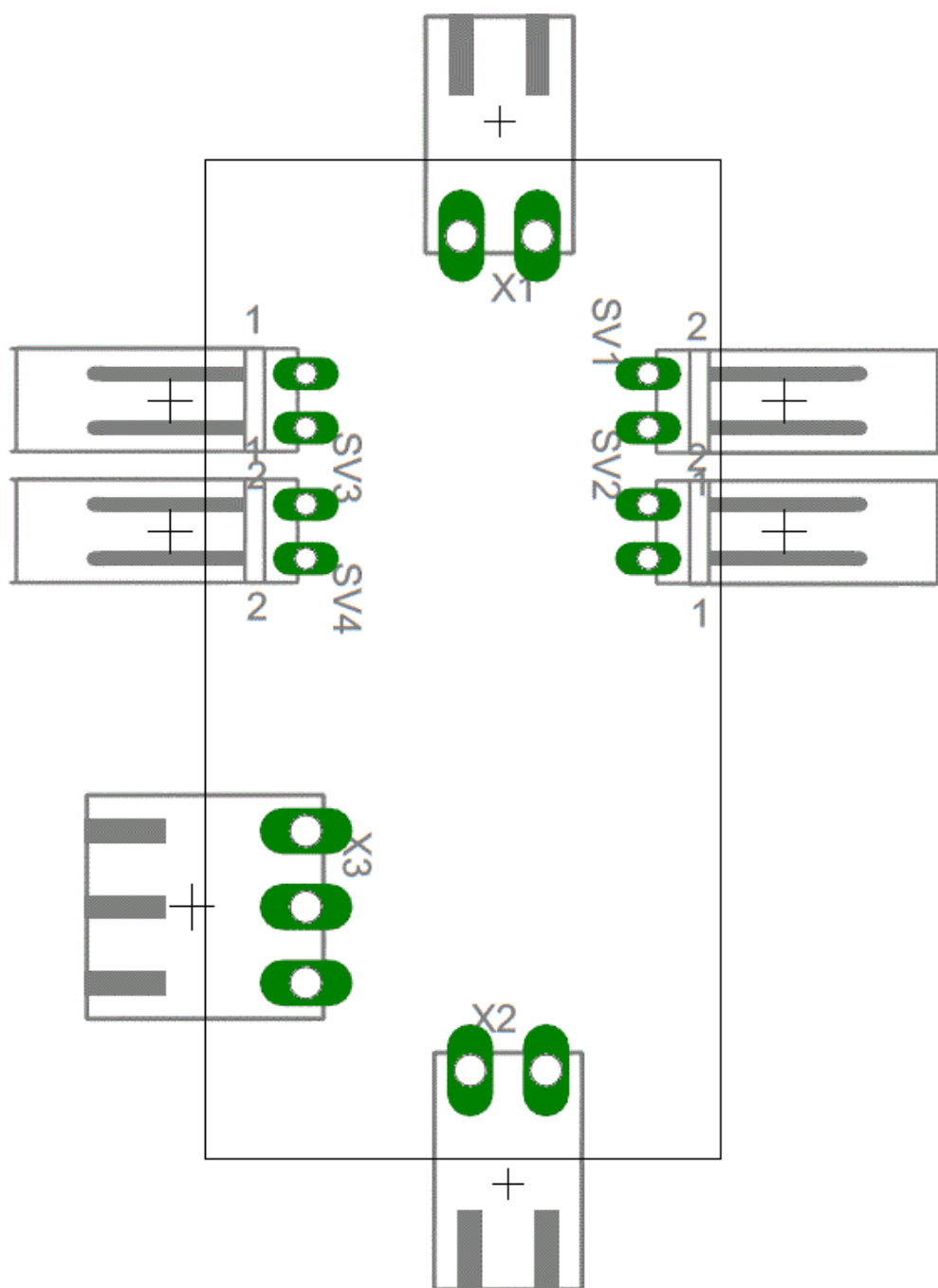
$F(p)$	- přenosová funkce
Z_m	- magnetická impedance
Z	- impedance
ω	- úhlový kmitočet
L	- indukčnost
Ψ	- spřažený magnetický tok
N_z	- počet závitů
R_m	- činná složka magnetického odporu
X_m	- jalová složka magnetického odporu
S_i	- plocha průřezu i-tého úseku magnetického obvodu
l_i	- délka i-tého úseku magnetického obvodu
μ_i	- permeabilita i-tého úseku magnetického vedení
ρ	- měrný odpor
K	- součinitel deformační citlivosti
β_ρ	- součinitel úměrnosti
μ_ρ	- součinitel příčného stlačení
ε_0	- poměrné prodloužení v podélném směru
ε_1	- poměrné prodloužení v příčném směru
K_0	- součinitel deformační citlivosti v podélném směru
K_1	- součinitel deformační citlivosti v příčném směru
κ	- příčná citlivost tenzometru
C	- kapacita kondenzátoru
ε_r	- poměrná permitivita
ε_0	- permitivita vakua
n_j	- index lomu jádra optického vlákna
n_i	- index lomu vzduchu
N	- můstkový faktor
k	- k-faktor
ε	- deformace tenzometru
μ	- Poissonova konstanta

SEZNAM PŘÍLOH

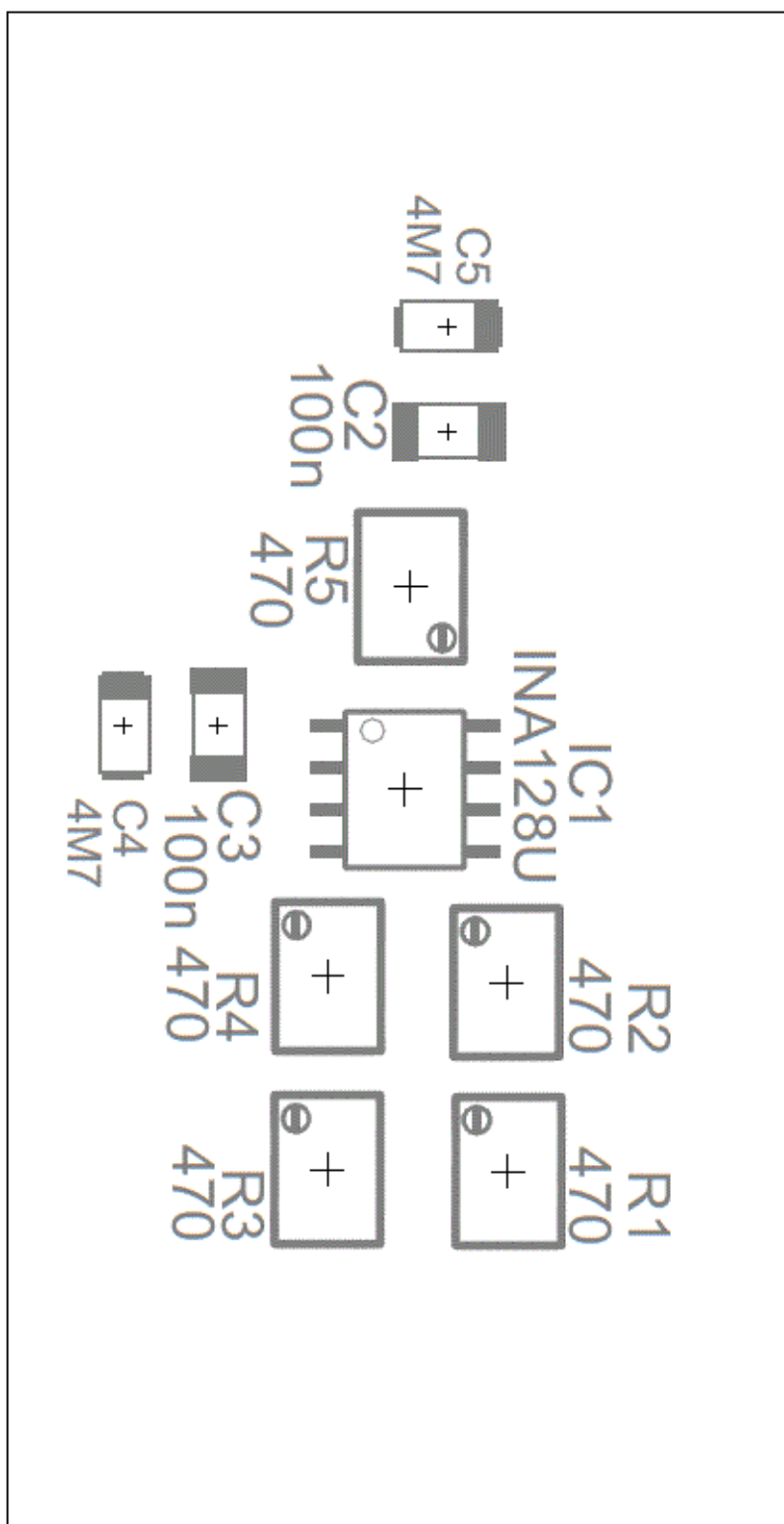
A	Návrh desky plošného spoje	40
A.1	Osazovací výkres desky plošného spoje - top	40
A.2	Osazovací výkres desky plošného spoje - bottom	41
A.3	Deska plošného spoje – bottom	42
B	schéma zapojení můstku se zesilovačem	43
C	schéma programu v prostředí vee	44
D	Seznam součástek	45

A NÁVRH DESKY PLOŠNÉHO SPOJE

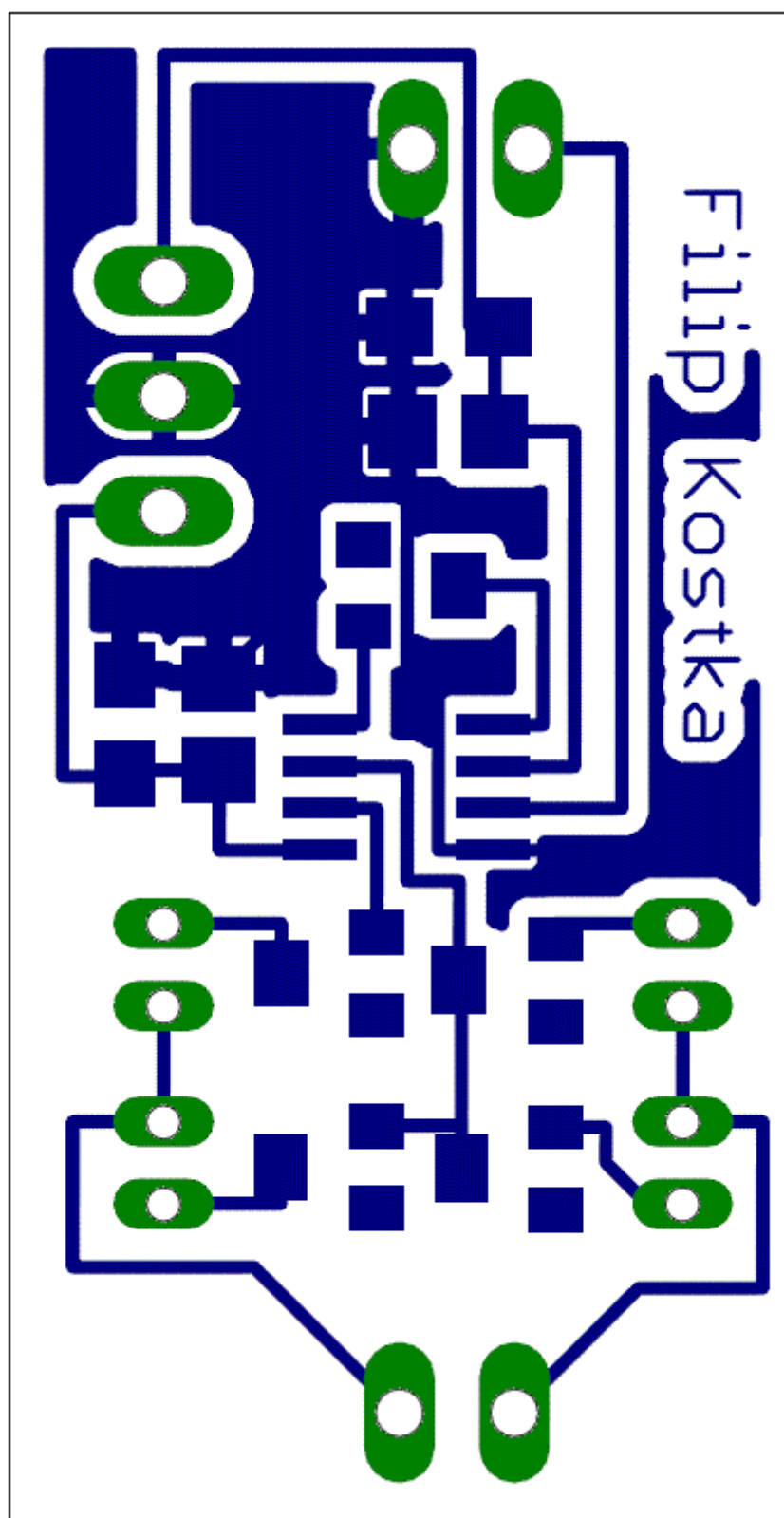
A.1 Osazovací výkres desky plošného spoje - top



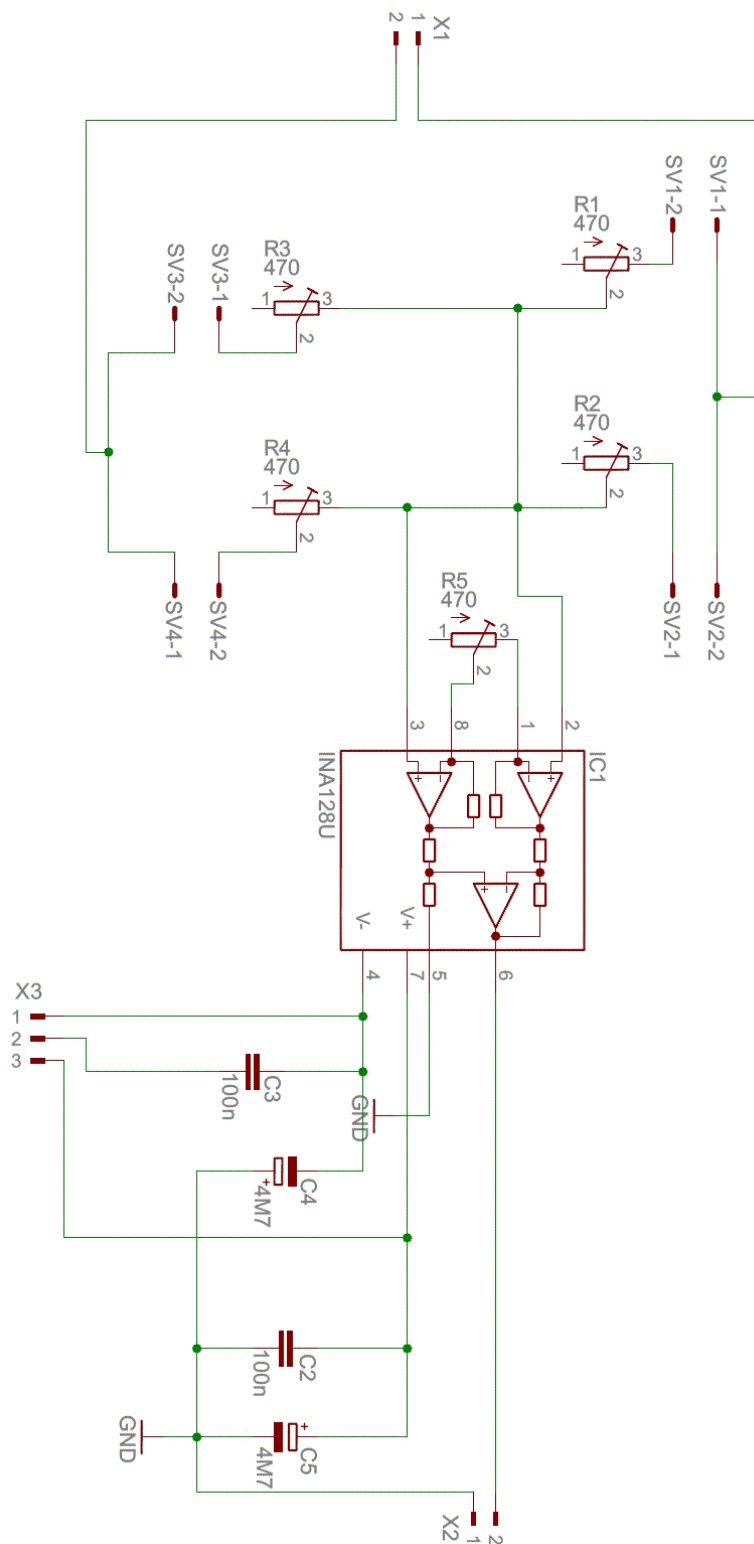
A.2 Osazovací výkres desky plošného spoje - bottom



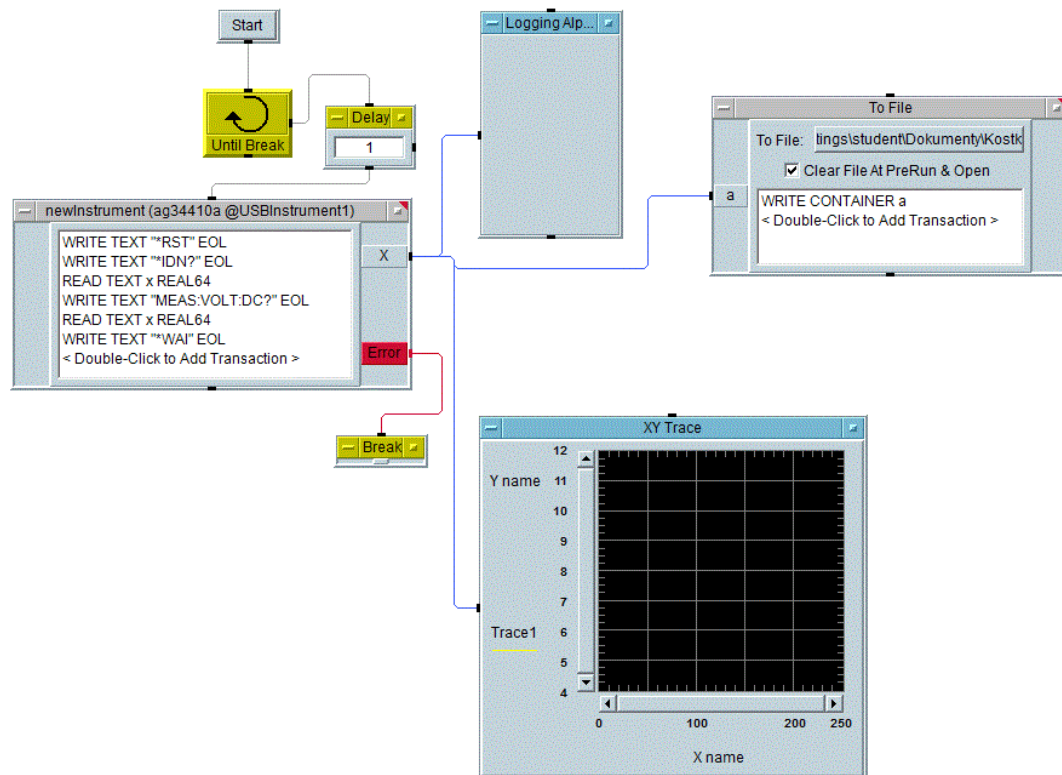
A.3 Deska plošného spoje – bottom



B SCHÉMA ZAPOJENÍ MŮSTKU SE ZESILOVAČEM



C SCHÉMA PROGRAMU V PROSTŘEDÍ VEE



D SEZNAM SOUČÁSTEK

Označení	Hodnota	Pouzdro	Popis
C2	100nF	C1206	Keramický kondenzátor
C3	100nF	C1206	Keramický kondenzátor
C4	4,7uF	SMC_A	Keramický kondenzátor
C5	4,7uF	SMC_A	Keramický kondenzátor
IC1	INA128U	SO08	Přístrojový zesilovač
R1	470Ω	RTRIM5W	Trimr
R2	470Ω	RTRIM5W	Trimr
R3	470Ω	RTRIM5W	Trimr
R4	470Ω	RTRIM5W	Trimr
R5	470Ω	RTRIM5W	Trimr
SV1	-	L02P	Konektor
SV2	-	L02P	Konektor
SV3	-	L02P	Konektor
SV1	-	L02P	Konektor
X1	-	90-2	Upevňovací konektor
X2	-	90-2	Upevňovací konektor
X3	-	90-2	Upevňovací konektor