



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ  
ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING  
INSTITUTE OF MANUFACTURING TECHNOLOGY

## PASIVNÍ SNÍMAČE PRO ZJIŠŤOVÁNÍ OKAMŽITÝCH HODNOT NAPĚTÍ A DEFORMACÍ

PASSIVE SENSORS FOR DETECTING INSTANTANEOUS STRESS AND STRAIN VALUES

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

PETR JAŠEK

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. KAMIL PODANÝ, Ph.D.

BRNO 2014

Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství

Ústav strojírenské technologie  
Akademický rok: 2013/2014

## **ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE**

student(ka): Petr Jašek

který/která studuje v **bakalářském studijním programu**

obor: **Strojní inženýrství (2301R016)**

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

### **Passivní snímače pro zjišťování okamžitých hodnot napětí a deformací**

v anglickém jazyce:

### **Passive sensors for detecting instantaneous stress and strain values**

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Jedná se o zpracování aktuální literární studie možností zjišťování aktuálních hodnot napětí a deformací během technologických procesů prostřednictvím pasivních snímačů. Rešerše bude zaměřena zejména na odporové snímače (tenzometry) a bude obsahovat základní rozdělení a principy.

Cíle bakalářské práce:

Aktuální literární studie se zaměřením na tenzometrická měření se zhodnocením jejich vhodnosti či nevhodnosti pro strojírenskou praxi a s ukázkami použití.

Seznam odborné literatury:

1. DRASTÍK, F. a J. ELFMARK. Plastomery a tvařitelnost kovů. Praha: SNTL, 1977. 392 s. DT 539.214.07.
2. ČECH, Jaroslav, Jiří PERNIKÁŘ a Kamil PODANÝ. Strojírenská metrologie. Skriptum FSI VUT v Brně, 4. přeprac. vyd. Brno: Akademické nakladatelství CERM s.r.o., 2005. 176 s. ISBN 80-214-3070-2.
3. ZEHNULA, Karel. Snímače neelektrických veličin. 2. vyd. Praha: SNTL, 1983. 371 s.
4. JANÍČEK, P. Technický experiment, skriptum VUT FS, Ediční středisko VUT Brno 1988
5. JENČÍK, Josef a Jaromír VOLF. Technická měření. 1. vyd. Praha: ČVUT, 2000. 212 s. ISBN 80-01-02138-6.
6. HOSFORD, William F. and Robert M. CADDEL. Metal Forming: Mechanics and Metalurgy. 3th ed. New York: Cambridge University Press, 2007. 365 s. ISBN 978-0-521-88121-0.

Vedoucí bakalářské práce: Ing. Kamil Podaný, Ph.D.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2013/2014.

V Brně, dne 19.11.2013

L.S.

---

prof. Ing. Miroslav Píška, CSc.  
Ředitel ústavu

---

prof. RNDr. Miroslav Doupovec, CSc., dr. h. c.  
Děkan fakulty

## **ABSTRAKT**

J A Š E K Petr: Pasivní snímače pro zjišťování okamžitých hodnot napětí a deformací

Technická měření jsou nepostradatelným zdrojem informací v technických oborech. Vzhledem k počítačovému zpracování je nutné, aby výstupem snímače byl elektrický signál. Do oblasti měřicí techniky neelektrických veličin se řadí velké množství různých snímačů. Důležitou skupinu představují pasivní snímače, do které jsou řazeny odporové, indukčnostní, kapacitní, magnetické a ionizační. Jsou uvedeny základní poznatky měření a popsány jednotlivé druhy snímačů, jejich funkční principy, příklady použití a vyhodnocení vlastností.

Klíčová slova: senzor, snímač, tenzometr, odporový, indukčnostní

## **ABSTRACT**

J A Š E K Petr: Passive sensors for detecting instantaneous stress and strain values

Technical measurements are an indispensable source of information in the technical fields. Due to the computer processing it is necessary an electrical signal as the output of the sensor. The field of measuring techniques of non-electrical quantities comprises a wide range of various sensors. Passive sensors represent an important group, into which resistive, inductive, capacitive, magnetic and ionization sensors are arranged. Basic findings of measurement are presented, and particular kinds of sensors, their functional principles, application examples and evaluation of their properties are described in the thesis.

Keywords: sensor, gauge, resistance, inductance

## **BIBLIOGRAFICKÁ CITACE**

JAŠEK, Petr. *Pasivní snímače pro zjišťování okamžitých hodnot napětí a deformací*. Brno, 2014. 32s, CD. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství. Ústav strojírenské technologie, Odbor technologie tváření kovů a plastů. Vedoucí práce Ing. Kamil Podaný, CSc.

## **Čestné prohlášení**

Tímto prohlašuji, že předkládanou bakalářskou práci jsem vypracoval samostatně s využitím uvedené literatury a podkladů, na základě konzultací a pod vedením vedoucího bakalářské práce.

V ..... dne 30.5.2014

.....

podpis

## **PODĚKOVÁNÍ**

Tímto děkuji panu Ing. Kamilu Podanému, Ph.D. za cenné připomínky a rady týkající se zpracování bakalářské práce.

Také děkuji své rodině, přítelkyni a kamarádům za podporu a poskytnutí ideálních podmínek při studiu na vysoké škole.

## OBSAH

Zadání

Abstrakt

Bibliografická citace

Čestné prohlášení

Poděkování

Obsah

ÚVOD .....	9
1 ZÁKLADNÍ POZNATKY .....	10
2 ODPOROVÉ SNÍMAČE, TENZOMETRY .....	12
2.1 KOVOVÉ SNÍMAČE .....	13
2.2 POLOVODIČOVÉ SNÍMAČE .....	15
2.3 SNÍMAČE SÍLY .....	16
2.4 SNÍMAČE TLAKU.....	18
2.5 SNÍMAČE MOMENTU .....	19
2.6 ZHODNOCENÍ TENZOMETRICKÝCH SNÍMAČŮ .....	21
3 INDUKČNOSTNÍ SNÍMAČE.....	22
3.1 POUŽITÍ INDUKČNOSTNÍCH SNÍMAČŮ.....	24
4 KAPACITNÍ SNÍMAČE .....	26
4.1 POUŽITÍ KAPACITNÍCH SNÍMAČŮ .....	27
5 MAGNETICKÉ SNÍMAČE .....	30
6 ZÁVĚRY.....	32

Seznam použité literatury

Seznam použitých symbolů a zkratek

Seznam obrázků



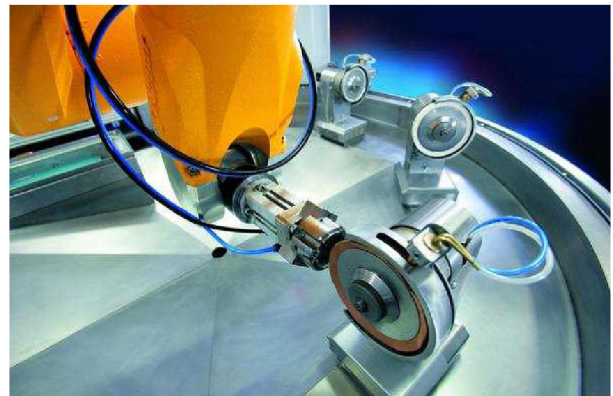
## ÚVOD [6] [14]

Téměř každý obor je nějakým způsobem závislý na měřicí technice. Z toho důvodu jsou technická měření jako zdroj informací nepostradatelnou disciplínou. Rozvoj některých oborů za poslední desetiletí je toho jasným příkladem. Na úrovni používané techniky jsou závislé jak technické oblasti, tak například i přírodní vědy.

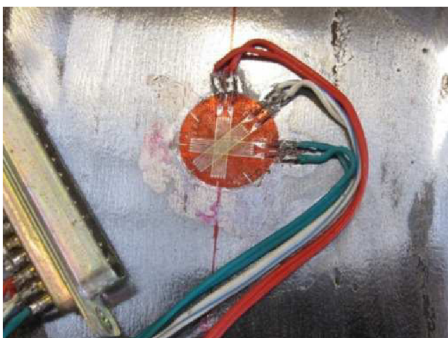
V praxi se setkáváme s velkou škálou měřících zařízení. Důležitým faktorem je výběr správného typu měřidla pro konkrétní měření. Nejpoužívanější snímače můžeme dělit na dvě základní skupiny, tj. na pasivní a aktivní. Zásadní rozdíl mezi těmito skupinami je v tom, že snímač pasivní potřebuje pro svoji činnost pomocné napětí, kdežto snímač aktivní napájen být nemusí. Pro získání hodnot napětí a deformace jsou používány zejména odporové snímače (tenzometry). Měření odporovými snímači patří mezi nejrozšířenější způsoby získávání již zmíněných hodnot (tj. napětí a deformace). Příklady použití tenzometrů a dalších pasivních snímačů jsou k vidění na následujících obrázcích.



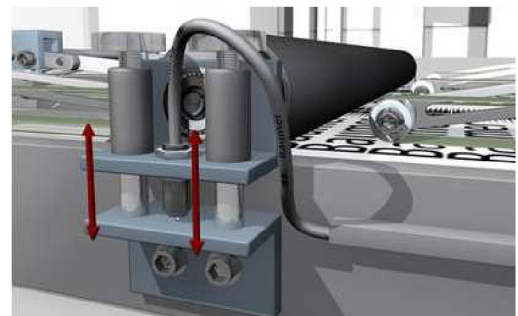
Obr. 1 Siloměr pro mostové konstrukce[35]



Obr. 2 Přístroj regulující sílu pro nalisování komponenty [2]



Obr. 3 Tenzometr na měřeném objektu[39]



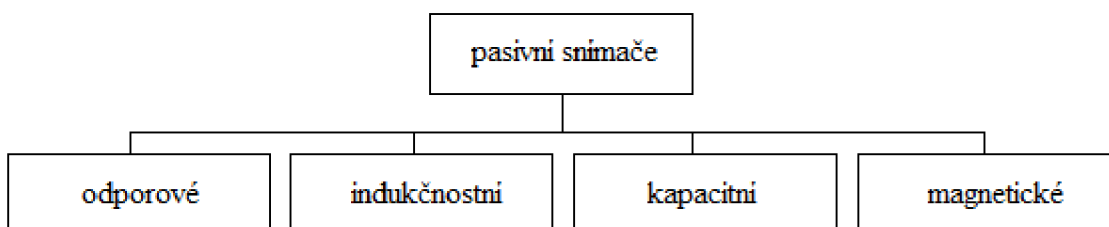
Obr. 4 Kontrola správné výšky přítlačného válce[24]



Obr. 5 Referenční digitální tlakoměr [10]

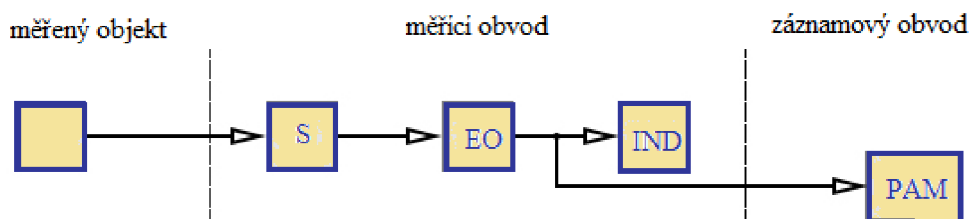
## 1 ZÁKLADNÍ POZNATKY [15][6][41][50][45]

Touha po poznání a snaha po objevování nových věcí přivedly člověka do dnešní doby moderních technologií. Je možné se s nimi setkat téměř ve všech sférách našeho okolí. Díky poznávání různých přírodních, fyzikálních, chemických a dalších zákonitostí, dochází ke zpřesňování a zkvalitňování výrobních technologií. Nejmarkantnějšího posunu vpřed posledních desetiletí bylo dosaženo v oblastech elektroniky a to takřka ve všech jejich podobách. Moderní technologie jsou používány při konstruování nových snímačů a následně pro vyhodnocování snímaných hodnot. K poznávání světa byly člověkem stanoveny různé fyzikální a chemické veličiny a jednotky (geometrické, mechanické, tepelné, atd). Významné a jistě i nezastupitelné postavení při získávání a dalším zpracování těchto veličin má sensorová technika. Existuje několik podskupin snímačů, které jsou děleny na základě fyzikálního principu. Například mechanické, elektrické, pneumatické, optické atd. Rozdělení pasivních snímačů podle fyzikálního principu je uvedeno na obr. 1.1.



Obr. 1.1 Rozdělení pasivních snímačů

Požadavkem pro měření požadovaných veličin je zapojení snímače do měřicího obvodu. Tento obvod je složen z měřicích členů, rozmístěných tak, aby bylo možné získat co nejlepší informaci o měřené fyzikální veličině. Schéma takového zapojení je znázorněno na obr. 1.2.



Obr. 1.2 Schéma měřicího obvodu [50]

Prvním členem obvodu je senzor (obr. 1.2 označení 'S'). Podle naučného slovníku je senzor zařízení k přeměně fyzikální veličiny v elektrický signál. Ekvivalentem senzoru mohou být pojmy snímač, převodník nebo detektor. Obecně je vnímán jako zařízení, které snímá sledovanou veličinu (fyzikální, chemickou, atd.). Snímač je nejdůležitějším členem měřicího obvodu. Jeho citlivá část bývá často v přímém kontaktu s měřeným objektem. Výstupem čidla je zpravidla neelektrická veličina, jež je převáděna (i vícekrát) na jiné neelektrické veličiny uvnitř snímače. Výstupní veličina snímače nemusí však být vhodná pro další zpracování. Z tohoto důvodu jsou do měřicího obvodu přidány elektronické obvody (obr. 1.2 označení 'EO'), které zajišťují převod veličiny do požadovaného tvaru. Elektronický obvod bývá složen z převodníků, mezi které jsou řazeny např. zesilovače, generátory, filtry, můstkové obvody a další. Pro elektronické zpracování jsou nejčastěji používány veličiny napětí, proud a kmitočet. Tyto veličiny jsou dále zpracovány indikátorem (obr. 1.2 označení IND). Poslední člen obvodu představuje paměť (obr. 1.2 označení PAM), která slouží k vyhodnocení a uchování naměřených hodnot po určité

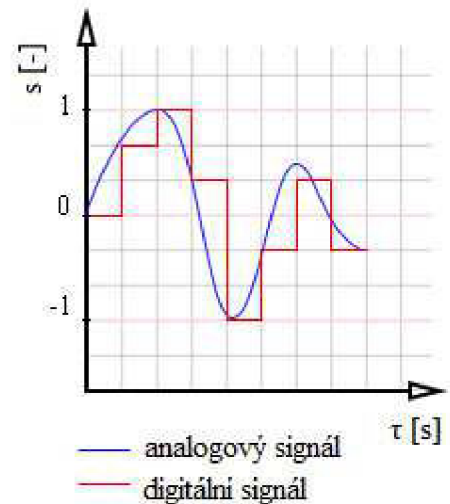
dobu. Konečným výstupem pak může být analogový, nebo číslicový signál. V případě analogového signálu, tak je často užíváno přímo-ukazujícího zapisovače nebo analogového přístroje. Číslicový signál bývá zpracován číslicovým měřicím přístrojem nebo zvoleným komunikačním rozhraním (viz obr. 1.2).

Měřená veličina může mít statický nebo dynamický charakter. U statických měření je požadována především lineární závislost mezi vstupní a výstupní veličinou. Získává se měřením tak, že se vstupní veličina postupně nastavuje na předem zvolené hodnoty pozvolna bez překmitnutí, nejprve směrem k maximální hodnotě a pak zpět k začátku rozsahu. Takto zjištěná charakteristika při referenčních podmínkách se nazývá základní charakteristika. Typické parametry charakterizující základní statické a dynamické vlastnosti senzorů jsou shrnuty v následujícím přehledu:

- Statické parametry
  - Citlivost
  - Práh citlivosti
  - Dynamický rozsah
- Dynamické parametry
  - Parametry časové odezvy
  - Časová konstanta
  - Šíře frekvenčního pásma
- Reprodukovatelnost
- Rozlišitelnost linearita
- Parametry výstupu
- Frekvenční rozsah
- Rychlost číslicového přenosu
- Parametry šumu

Znalost dynamických vlastností měřicího přístroje je velmi důležitá pro měření veličin, jejichž hodnota se rychle mění s časem. V případě špatně zvoleného přístroje, nebude tento udávat přesnou hodnotu rychle se měnící veličiny. Takto naměřený údaj bude zatížen velkou dynamickou chybou, protože výstupní signál se bude opožďovat za změnou hodnoty měřené veličiny.

Z hlediska chyb je nutné uvažovat zapojení senzoru do celého měřicího systému. To znamená, že musí být respektovány vazby senzoru s ostatními částmi systému a také parazitní vlivy uvnitř senzoru. Mezi rušivé veličiny okolí se dají zahrnout např. teplota, tlak, vlhkost, radiace, elektrické či magnetické pole, atd. Všechny tyto působící vlivy jsou známy jako parazitní vlivy. Jistým omezením pro snímače je především kolísání teploty okolí, a protože i její malá změna je schopna způsobit změnu odporu, je snahou vliv teploty vyloučit.



Obr. 1.3 Analogový a digitální signál [45]

## 2 ODPOROVÉ SNÍMAČE, TENZOMETRY

[13][14][44][6][17][8][25][12][16][50][34]

Fyzikální princip, na němž tenzometry pracují, byl objeven lordem Kelvinem roku 1856. K využití tohoto principu však došlo až roku 1928 německým chemikem Waltherem Nernstem. Jeho snímač tlaku pracoval na základě deformace dvou odporových drátů deformovaných úměrným tlakem. Slovo tenzometr bylo převzato od firmy Huggenberger, kterým byla označena specifická konstrukce mechanického průtahoměru. Postupem času byl tento název přenesen i na jiné typy průtahoměrů, měřičů napjatosti a odporových měřičů.

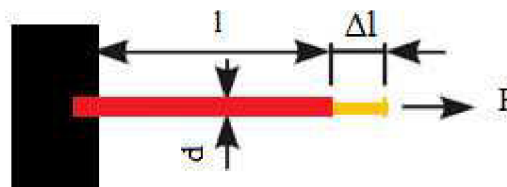
Odporové snímače jsou rozšířené a používané pro měření neelektrických veličin. Oblíbenost těchto snímačů se odvíjí od jejich spolehlivosti, přesnosti a příznivé pořizovací ceně. Ve strojírenství jsou používány ke snímání ohybových a krouticích momentů, ke stavbě siloměrů, pro zjišťování dvouosé napjatosti konstrukcí a mnoha dalších aplikací. Nejznámější využití odporových snímačů je zřejmě použití ve vahách.

Odporový tenzometr je snímač, jehož princip je založen na změně elektrického odporu. Této změny je dosaženo při mechanickém namáhání v oblastech pružných deformací. Pružnými deformacemi se dají nazvat síly takové, které působí v mezích platnosti Hookova zákona. Zpravidla jsou vyvolány tahem nebo tlakem. Při namáhání vodiče dochází ke změně jednak geometrických rozměrů (je měněn elektrický odpor), a také k mikrostrukturálním změnám materiálu (rezistivity).

Je-li vodič připevněn ve směru deformace a je známa změna ohmického odporu vodiče v závislosti na jeho deformaci, pak se z této změny dá stanovit velikost deformace. Pro odpor válcového vodiče platí:

$$R = \rho \cdot \frac{l}{S}, \quad (1)$$

kde: R odpor vodiče  
 $\rho$  měrný odpor vodiče,  
 l délka vodiče,  
 S plocha průřezu vodiče.



Obr. 2.1 Deformace vodiče v podélném směru [17]

Princip kovového odporového tenzometru lze demonstrovat dle obrázku 2.1. Pokud vodič délky 'l', průřezu 'S' (průměru 'd'), a měrném odporu ' $\rho$ ' je vystaven účinku síly 'F', prodlouží se tento vodič o délku  $\Delta l$ . Následkem působení síly 'F' se původní odpor vodiče změní o  $\Delta R$ , a to z důvodu, že změněny budou i délka o  $\Delta l$ , průřez o  $\Delta S$  a měrný odpor o  $\Delta \rho$ . Na základě těchto informací lze stanovit diferenciální vztah:

$$dR = \frac{\rho \cdot S \cdot dl + l \cdot S \cdot d\rho - l \cdot \rho \cdot dS}{S^2} \quad (2)$$

Po dosazení a úpravách diferenciálního vztahu je získán konečný tvar pro relativní změnu odporu, který má tvar:

$$\frac{\Delta R}{R} = \varepsilon \cdot \left( \frac{d\rho}{\rho} \cdot \frac{l}{\varepsilon} + 1 + 2 \cdot \mu \right) \quad (3)$$

kde:  $\varepsilon$  je poměrná deformace  
 $\mu$  je Poissonovo číslo

Materiál je deformován vlivem zatížení a deformace jsou zaznamenávány i na povrchu materiálu. Prostřednictvím těchto změn je měněn odpor tenzometru, který je lineárně úměrný prodloužení na povrchu materiálu (viz obr. 2.2). Jde tedy o lineární závislost elektrické a neelektrické veličiny.

První člen pravé strany rovnice (3), tedy poměrná deformace  $\varepsilon$  je rovna:

$$\varepsilon = \frac{\Delta l}{l_0} \quad (4)$$

Druhý člen (výraz v závorce) pravé strany rovnice (3) je konstanta, označována jako součinitel deformační citlivosti tenzometru  $k$ , též zvaný  $k$ -faktor. Na součinitel deformační citlivosti  $k$  jsou kladeny předpoklady jako stálost, nezávislost na deformaci, teplotě a na technologické přípravě deformačního materiálu. Nejvíce užívaným materiálem pro výrobu tenzometru je slitina mědi a niklu, nazývána konstantan, s hodnotou  $k$  okolo čísla 2.

Úpravou vzorce (3) je zjednodušená rovnice:

$$\frac{\Delta R}{R} = \varepsilon \cdot k \quad (5)$$

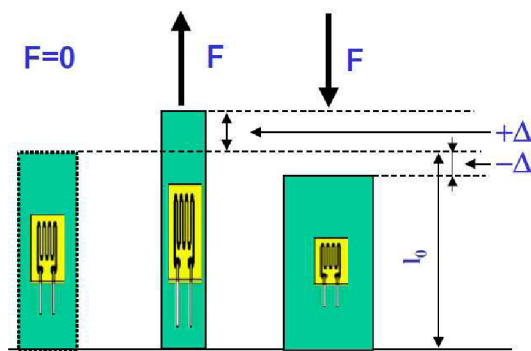
Podle použitého materiálu se dají tenzometry rozdělit na snímače kovové a polovodičové.

## 2.1 KOVOVÉ SNÍMAČE

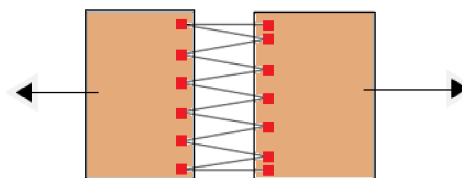
Mřížka těchto snímačů je tvořena kovem (konstantan, nichrom, wolfram, platina). Podle materiálu, konstrukčního tvaru a způsobu upevnění na měřený objekt je lze rozdělit na příložné a lepené.

### • Příložné

Snímač je složen z odporového drátku kruhového průřezu. Drátek je s mechanickým předpětím upevněn mezi kolíčky (viz obr. 2.3 - červené čtverečky), které jsou vetknuty na povrchu pružného členu. Kolíčky jsou vyrobeny z tvrdého izolačního materiálu (safír). Obdobným způsobem je možné, aby byl drátek navinut na povrchu tlustostěnné trubky, která bude sloužit jako pružný člen při měření velkých tlaků. Používány jsou pro konstrukci senzorů tlaku, síly, deformací, zrychlení. Výhodou při použití příložného snímače je, že odpadá problém s přenosem deformace na celý povrch snímače. Další výhodou je pak možnost použití při vyšších teplotách. Naopak nevýhody těchto snímačů představují dlouhá doba potřebná pro dosažení tepelné rovnováhy a náročná výroba na mechanické provedení.



Obr. 2.2 Poměrná deformace tenzometru  $\varepsilon$  [47]

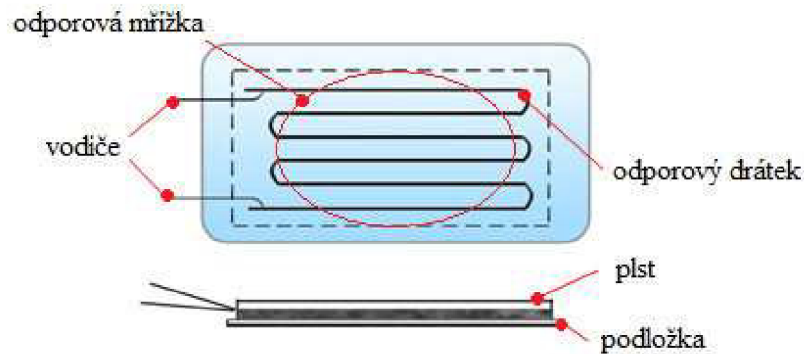


Obr 2.3 Příložný tenzometr

- **Lepené**

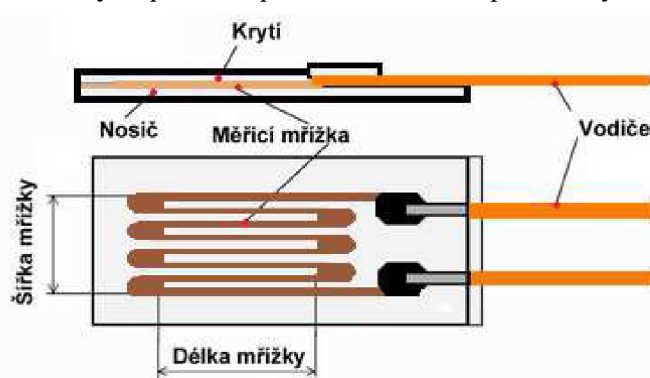
Odporový drát tvaru mřížky přilepený na podložce (z papíru, plastické hmoty či kovu) se lepí na měřenou část. Pro správnou funkci těchto snímačů je důležité, aby se deformace měřené části přenesla věrohodně na odporový drát. Toho je dosaženo správným nalepením snímače na měřenou část. Lepené tenzometry mohou být v provedení drátkovém nebo fóliovém.

- Drátkové snímače jsou vyráběny z drátku kruhového průřezu o průměrech 5 až 25  $\mu\text{m}$ . Na obrázku 2.4 lze vidět, že na konce odporového drátku jsou přiletovány silnější vývody.



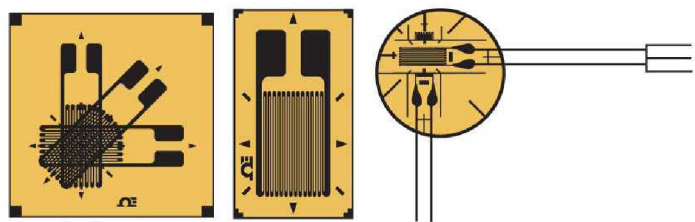
Obr. 2.4 Drátkový lepený tenzometr [40]

- Fóliové snímače (obr. 2.5, 2.6) jsou vyráběny z fólie tloušťky 1 až 10  $\mu\text{m}$  obdélníkového průřezu. Fólie je stejně jako u drátkových snímačů přilepena na podložku. Tímto způsobem je možno vyrábět tenzometry složitých tvarů (radiální, spirálové), které jinou technikou vyrobit nejdou. Jejich výhodou oproti drátkovým je, že jsou schopny snášet větší zatížení elektrickým proudem. Toho je dosaženo díky lepší schopnosti odvádět teplo. Díky lepšímu styku vlastního odporového



prvku s podložkou je dosaženo přesnějšího měření, protože přenášené smykové síly jsou menší než u drátkových snímačů, čímž je dosaženo větší citlivosti.

Obr. 2.5 Konstrukce fóliového snímače [6]



Obr. 2.6 Různé druhy fóliových tenzometrů [36]

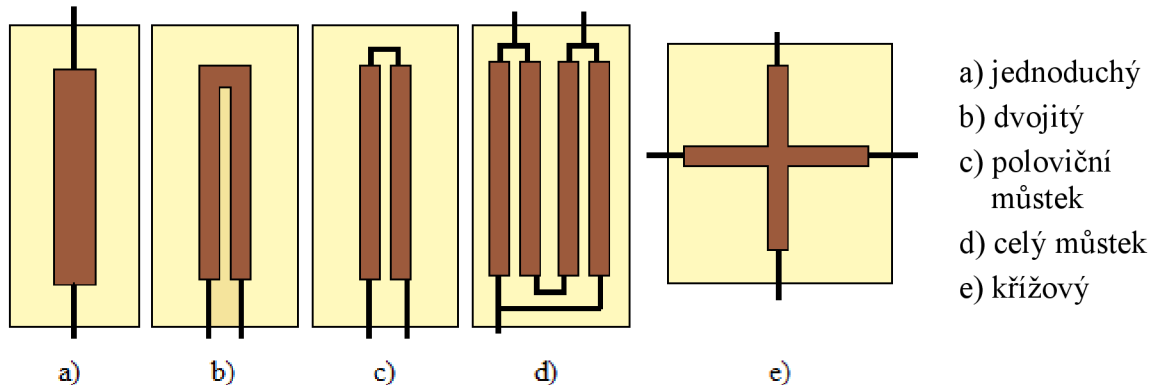
## 2.2 POLOVODIČOVÉ SNÍMAČE

Tyto snímače pracují na principu, kdy je silovým působením (mechanické namáhání v určité krystalografické ose monokrystalu nebo difuzní vrstvě polovodiče) na polovodičový PN přechod dosaženo změny jeho vlastností. Dochází ke změně vodivosti přechodu a při konstantním napětí se mění proud procházející přechodem. Tato změna je závislá na typu polovodiče a koncentraci příměsi. Tento jev se označuje jako piezodporový.

Nejčastější typ polovodičového tenzometrického snímače je s již zmíněným PN přechodem. Princip je ten, že se pro vznik volných elektronů používají příměsi, tj. přítomnost jiných atomů v krystalové mřížce. Pokud je například přidán do krystalové mřížky čistého germania, které má ve vnější slupce 4 elektrony, atom pětimocného kovu (např. antimón), vzniká ve struktuře přebytek elektronu. Zástupcem této skupiny je polovodič typu *N* a jeho příměs je donorem. V opačné situaci, kdy je přidán třímocný prvek (např. indium), vznikne místo s chybějícím elektronem. Tímto způsobem vznikne polovodič typu *P*, jeho příměs se nazývá akceptor.

Polovodičové tenzometry (obr. 2.7) nacházejí uplatnění v moderních snímačích, kde jsou nejčastěji používanými materiály pro jejich výrobu monokrystal křemíku nebo germania. Vyráběny jsou řezáním, broušením, leptáním nebo planární technologií na křemíkovém nebo jiném substrátu. Na základě toho, se rozlišují tenzometry:

- monokrystalické (jednoduché nebo s přechody PN)
- polykrystalické – tato skupina zahrnuje umělé směsi (např. uhlík a bakelitový lak), jejich vývoj se rozvíjel v počátcích tenzometrie, nyní se jejich vývoj považuje za ukončený

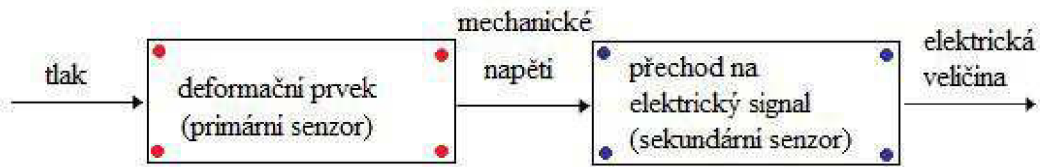


Obr. 2.7 Základní typy polovodičových tenzometrů [6]

V porovnání s kovovými tenzometry se polovodičové vyznačují mnohem větší citlivostí. Součinitel deformační citlivosti je u polovodičových tenzometrů chápán jako strmota tečny přiložené ke křivce, kterou vyjadřuje rovnice pro prodloužení. Je dosahováno poměrně velkého rozsahu *k*-faktoru v rozmezí od -80 do -100 (vodivý křemík typu *N*) a hodnot +110 až +130 (vodivý křemík typu *P*). Existují i různé speciální polovodičové tenzometry, u kterých se hodnota *k*-faktoru pohybuje až kolem +240. Naopak jejich nevýhodami je odchylka od lineární charakteristiky a značná teplotní závislost, která se kompenzuje měřícím můstkem nebo pomocným obvodem.

### 2.3 SNÍMAČE SÍLY

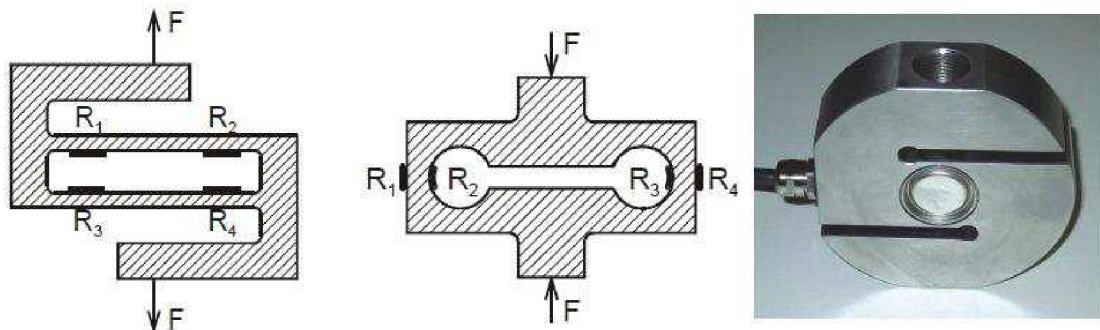
Základním měřicím prvkem snímačů síly se stal deformační tlakoměrný prvek. Na tento prvek pak navazuje vhodný senzor s elektrickým výstupem, vyhodnocující deformaci způsobenou měřeným tlakem. Jedná se tedy o snímače s několikanásobným převodem. Základní schéma takového zapojení je uvedeno na obrázku 2.8.



Obr. 2.8 Základní schéma snímače tlaku [18]

Materiál pružných členů musí mít minimální teplotní roztažnost a teplotní koeficient Youngova modulu pružnosti, dobrou teplotní vodivost, malou hysterezi, jemnozrnnou homogenní strukturu, malé účinky tečení a odolnost vůči korozi. Typickým materiálem pro pružné členy je pružinová antikorozi ocel. Na obrázku 2.9 jsou uvedeny základní tvary pružných členů.

Měření je obvykle uspořádáno do Wheastonova můstku. Na každé straně deformačního prvku jsou nalepeny polovodičové tenzometry se zapojením do měřicího můstku. Působením síly, která je vyvolána účinkem tlaku jsou tenzometry  $R_1$  a  $R_2$  namáhány na tah, druhý pár  $R_3$  a  $R_4$  je pak namáhán na tlak. Jejich umístění je situováno tak, že tenzometry namáhané stejným směrem se umísťují do protilehlých větví můstku. Výsledná citlivost takového můstku je pak čtyřnásobná ve srovnání vůči použití jednoho tenzometru.



Obr. 2.9 Jedny ze základních tvarů pružných členů [29][11]

Na obrázku 2.10 jsou zobrazeny snímače tlakové síly firmy Meatest. Měřicí rozsah těchto snímačů se pohybuje v rozmezí hodnot 0-500 N až 0-100 kN. Přetížitelnost je v rozsahu 150 % až 600 % z rozsahu. Tyto snímače byly vyvinuty speciálně pro ruční lisu. Jsou nasazovány mezi lisovací nástroj a píst. Použití naleznou všude tam, kde se lisovací nástroj nasazuje do otvoru 10H7 pro rozsahy do 20 kN včetně. Síla je snímána zabudovaným tenzometrickým můstkem a je přímo úměrná síle působící na průchozí snímač. Díky o-kroužkům, které chrání vlastní tělo snímače, se zvýšila i třída ochrany, což umožňuje využití těchto snímačů v procesech s možným únikem kapalin. Za další výhody těchto snímačů je považován také omezený vliv bočních a torzních sil a integrovaná ochrana proti přetížení.





Obr. 2.10 Ruční lis a snímače tlakové síly Meatest 8451/8552 [25]

Odporové snímače síly jsou používány taktéž k měření deformací. Příkladem mohou být aplikace kroužkových snímačů síly (obr. 2.11), které jsou používány pro měření na tyčích a hřídelích. Jsou určeny k měření mechanických namáhání, jako jsou průhyb, zkrut a podélné pnutí. Mechanicky se namontují na měřenou tyč pomocí šroubů. Existuje i upínání pomocí rychloupínací svorky. Všechna provedení jsou vhodná pro snímání dynamických aplikací. Pro síly velikostí od 10 do 100 kN se používají obvykle pružné členy, které mají tvar dutého válce. Pro měření větších sil v rozsahu 1 až 20 MN se používají rozměrné snímače s válcovým pružným členem kruhového průřezu. Síla působí většinou celoplošně přímo na pružný člen s nalepenými tenzometry. Měření tak velkých sil je velmi obtížné. Pro pružné prvky se doporučují materiály s vysokou mezí pružnosti. Pro snímání větší síly a teploty nad 450°C je vhodná ocel 19 552.



Obr. 2.11 Kroužkový snímač firmy Brosa s rozsahem od 30 do 3000 kN [28]

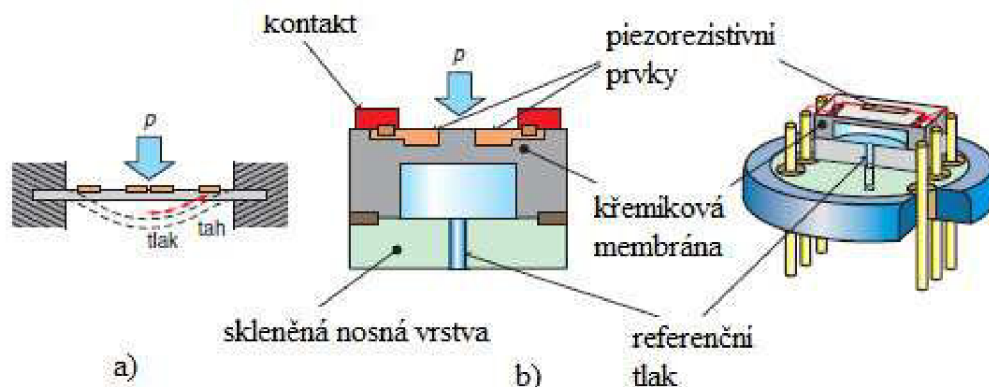
Speciálním příkladem nejnovějších trendů je snímač s tenkým filmovým implantátem (obr. 2.12). Namísto lepeného spojení je měřící můstek napařovacím procesem spojen atomární vazbou s měřícím prvkem, který je tvořen kruhovou destičkou o průměru 7 mm. Výhodou tohoto snímače je jeho velikost, díky které se dá umístit do míst, kde je velmi málo prostoru. Prostřednictvím metody konečných prvků se potom dá určit ideální místo pro jeho umístění z hlediska toku síly v součástce. Se součástí je spojen laserovým svarem, čímž je dosaženo spolehlivého spojení. Mezi výhody tohoto měření se řadí cenová výhodnost a preciznost zpracování díky automatizované výrobě, konstantní vysoká kvalita, dlouhá stabilita, vyloučení změny tvaru tečením a integrovaný zesilovač. Snímače jsou výhodné pro speciální použití a OEM (original equipment manufacturer) aplikace.



Obr. 2.12 Snímač s filmovým implantátem [12]

## 2.4 SNÍMAČE TLAKU

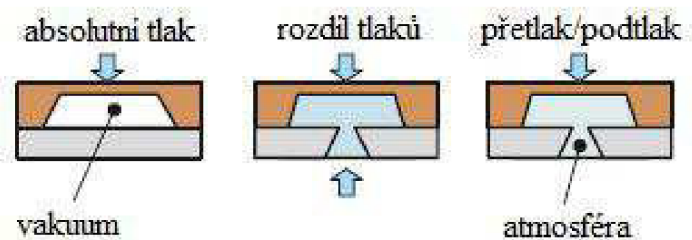
V moderních snímačích tlaku jsou používány tlakoměrné buňky s polovodičovými tenzometry, které jsou zhotoveny difuzní technologií. Základním prvkem snímače tlaku s difundovanými polovodičovými tenzometry se stala měřicí buňka převádějící tlak na elektrický signál. Velmi důležitým prvkem takového snímače je křemíková membrána vetknutá do válcového pouzdra. Na této membráně jsou difuzně tvořeny polovodičové tenzometry a současně tvoří membrána úlohu pružného členu pro snímání tlaku. Průměr membrány konstantní tloušťky zpravidla nepřesahuje hodnotu 6mm. Membrána je namáhána tlakem, rovnoměrně rozloženým po celé její ploše. Na obrázku 2.13a je zakreslena membrána v nezatíženém stavu a čárkovaně ve stavu zatížení působením tlaku  $p$ , a 2.13b je zobrazeno provedení měřicí buňky. Je nutno podotknout, že průhyb membrány na obrázku 2.13a je silně předimenzován. Napětí v tlaku a tahu povrchových vláken je měřeno tenzometricky. Tloušťky membrány se pohybují v závislosti na tom, pro jaké tlaky budou použity v rozmezí 2 až 5  $\mu\text{m}$  pro malé a 20 až 50  $\mu\text{m}$  pro velké tlaky.



Obr. 2.13 Senzor tlaku s difundovanými tenzometry [18]

Z důvodu velké citlivosti křemíkové destičky jsou čidla určená pro použití do náročnějších podmínek chráněna proti působení měřeného média zástavbou do pouzdra. Toto pouzdro je složeno z oddělovací membrány a pro přenos tlaku z membrány k čidlu se používá nevodivá kapalina, většinou se jedná o silikonový olej.

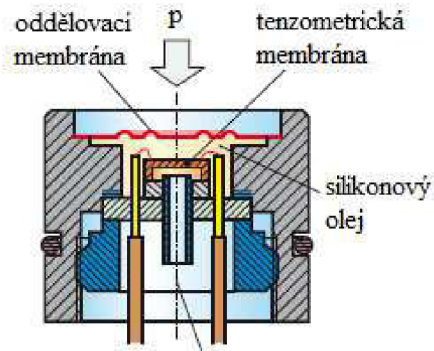
Snímače se dají použít pro snímání tlaku absolutního, přetlaku, podtlaku nebo rozdílu tlaků. Pro měření absolutního tlaku se dá použít senzor, u kterého je prostor pod membránou uzavřený, naopak při měření přetlaku a podtlaku je prostor pod membránou propojen s okolním prostředím (obr. 2.14).



Obr. 2.14 Schéma při měření různých tlaků [19]

Rozsah měření těchto snímačů se pohybuje až do 60 MPa u přetlaku a do -100 kPa u podtlaku. V běžné provozní praxi se pomalu dostávají do popředí referenční digitální tlakoměry, jež nahrazují klasické mechanické etalonové tlakoměry. Digitální tlakoměry často využívají při měření moderní piezorezistivní křemíkové čidla tlaku (obr. 2.15), pracující na principu popsáném výše. Membrána je tvořena korozivzdornou ocelí a výstupní signál je zpracován mikroprocesorem. Na obrázku

2.16 je tlakoměr schopný měřit v rozmezích od 0-6 kPa do 0 - 60 MPa. Za nejdůležitější schopnost takového čidla se považuje opakovatelné chování při nastalých změnách tlaku a teploty okolního prostředí. Výhodou křemíkové membrány je, že při vystavení přetížení je ukazovaný údaj tlaku reálný (správný) až do dosažení mechanického poškození, což je způsobeno vlastnostmi křemíku, který je dokonale pružný a mechanické přetížení nemění jeho vlastnosti. Dá se tedy říci, že nemůže měřit nesprávně, protože buď měří správně, nebo neměří vůbec.



Obr. 2.16 Křemíkového čidla s oddělovací membránou[19]



Obr. 2.15 Digitální tlakoměr se spínací funkcí BHV [3]

Dalším příkladem použití je snímač tlakové difference (obr. 2.17) kapalin a plynů slučitelných s nerezovou ocelí 17 349. Základní prvek snímače je tvořen dvěma čidly tlaku - polovodičovými tenzometry v nerezových pouzdrech s navařenými nerezovými oddělovacími membránami. Jednotka elektroniky zabezpečuje stabilní napájení čidel, zesílení a převod jejich rozdílového signálu na normalizovaný. Elektronika a čidla se šroubením jsou uschovány v pouzdře z eloxovaného duralu tak, že je zaručena vysoká odolnost vůči vibracím a rázům. Rozsah provozních teplot tohoto snímače se pohybuje v rozmezí měřeného média od -25 až do + 125 °C. Rozsah tlaků je v rozmezí od 20 kPa do 1,6 MPa.

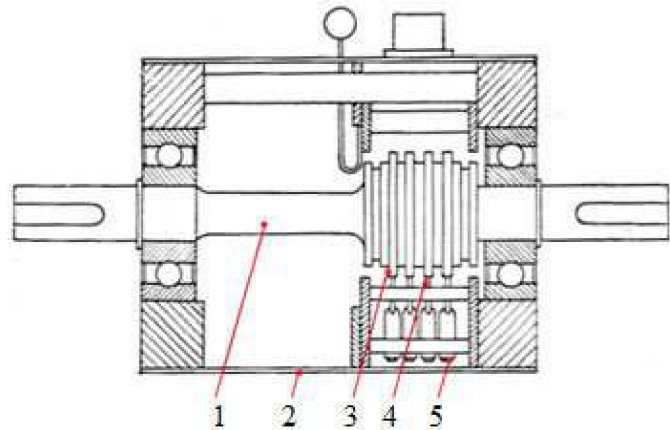


Obr. 2.17 Snímač tlakové difference firmy JSP DMD 331 [16]

## 2.5 SNÍMAČE MOMENTU

Obecně se snímače kroutících momentů dělí na dvě skupiny podle toho, na jakém principu pracují. První skupina je tvořena snímači, u kterých se na základě silového působení mění parametry měřicích členů (např. náboj u piezoelektrického jevu, magnetické a kapacitní vlastnosti). Druhá skupina je založena na měření pomocí tenzometrů, jedná se zároveň o nejrozšířenější způsob jak měřit moment síly. V této kapitole bude dále pojednáváno pouze o snímačích druhé skupiny. Ty určují buď přímo deformaci hřídele mezi motorem a zátěží, nebo je deformaci podroben jejich pružný člen. Jako deformační člen je nejčastěji používána hřídel.

Obrázek 2.18 zobrazuje princip snímače momentu síly s odporovými tenzometry. Odporové tenzometry jsou nalepeny do můstku na hřídeli '1', která plní úlohu deformačního členu. Jsou lepeny ve směru maximálních smykových napětí, tedy pod úhlem  $45^\circ$  vzhledem k ose hřídele. Signál se z měřících a napájecích bodů převádí přes sběrací kroužky '3' a sběrače '4' na svorkovnici '5' na statorové části. Celý snímač je chráněn krytem '2'. Pokud se neměří, je možné sběrače od kroužků pákovým mechanismem odklonit, aby nedocházelo k jejich opotřebením.



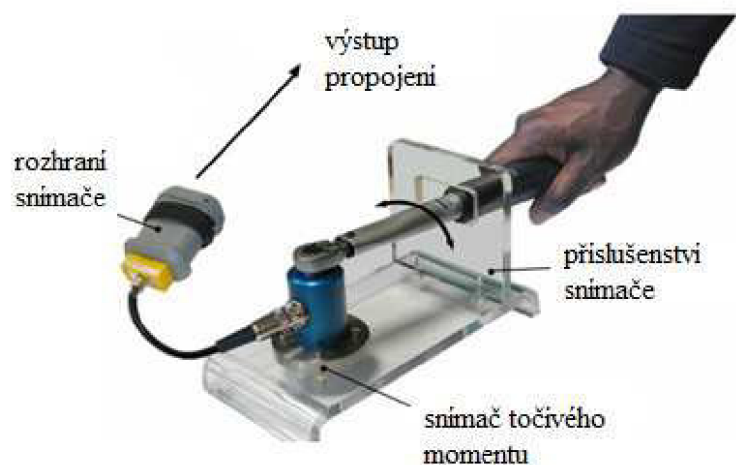
Obr. 2.18 Konstrukční řešení snímače krouticího momentu [50]

Příklad snímače pracujícího na tomto principu je zobrazen na obrázku 2.19. Jedná se o přesný rotační snímač firmy Burster. Je určen pro měření statického i dynamického krouticího momentu při libovolném směru otáčení. Je používán především pro přesné měření malých krouticích momentů. Uplatnění nachází jak v průmyslovém odvětví, tak v laboratořích nebo servisech. Umožňuje trvalý bezúdržbový provoz při vysokých rychlostech otáčení. Měřené napětí je bezkontaktně převáděno do snímacího zesilovače. Tělo snímače je vyrobeno z eloxovaného hliníku. Jako novinka jsou nově osazeny stavovými diodami, které informují o aktuálním zatížení snímače nebo o jeho případném přetížení (není potřeba vyhodnocovací jednotka). Měřicí rozsah se pohybuje od hodnoty  $0 \pm 0,05 \text{ Nm}$  až  $0 \pm 200 \text{ Nm}$ . Přetížitelnost je 200% z rozsahu a kladné napětí signalizuje pravotočivý moment a naopak.



Obr.2.19 Snímač Burster 8661[25]

Další z uvedených snímačů momentu (obr.2.20) je také z produkce firmy Burster. Tento nerotační snímač je specifický tím, že při vývoji byla snaha optimalizovat jeho rozměry pro co možná největší potlačení vlivu nesouosého působení síly. Až do hodnoty 20 % rozsahu snímače mají tyto parazitní síly jen malý vliv na měření. Měření je zajištěno plným tenzometrickým můstkem, který je tvořen fóliovými tenzometry. Při využití v laboratorních podmínkách a zapojení správného převodníku může být dosaženo přímého propojení s počítačem přes USB kabel.



Obr. 2.20 Kalibrace momentového klíče[38]

## 2.6 ZHODNOCENÍ TENZOMETRICKÝCH SNÍMAČŮ

Tenzometry jsou schopny měřit všechny mechanické veličiny, které se dají převádět pomocí vhodného deformačního členu na deformaci materiálu. Řadí se mezi ně především síla, hmotnost, tlak, krouticí moment a dráha. Používají se pro měření statické a dynamické deformace při různých frekvencích. Rozsah měřitelnosti frekvencí se pohybuje od  $1 \cdot 10^{-9}$  do stovek tisíc hertzů. Při statickém měření jsou schopny fungovat v rozmezí od  $-200$  do  $+500$  °C a při dynamickém od  $-200$  do  $1000$  °C. Mezi základní požadované vlastnosti je řazena životnost snímače, která je závislá na použitém materiálu měřící části, která může dosahovat úrovně až velmi pevných konstrukčních ocelí. Aktivní část nejužívanějších tenzometrů dosahuje délek od 1 do 20 mm, mohou však být i několikanásobně větší (100 mm a více). Hmotnostně se běžné typy pohybují od 0,008 g do 0,1 g.

Nejčastěji používanými kovovými snímači jsou fóliové lepené. Dají se zatěžovat velkými proudovými hustotami a po nalepení na měřený objekt dobře kopírují sledovanou deformaci. Jejich životnost se přibližně pohybuje kolem hodnoty  $10^7$  cyklů. Pro použití kovových tenzometrů je vhodné používat materiály, které vykazují minimální mikrostrukturální změny spolu s minimálním teplotním koeficientem odporu. Jsou upřednostňovány kovové materiály, které vykazují lineární závislost relativní změny odporu na měřené deformaci.

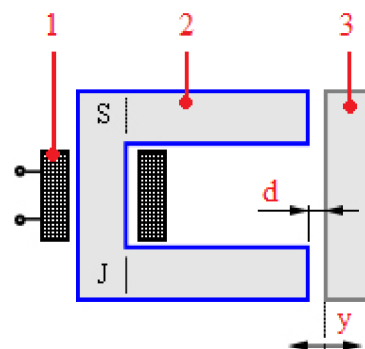
Polovodičové snímače jsou charakterizovány teplotní závislostí a nelineární převodovou charakteristikou. Ve srovnání s kovovými se polovodičové vyznačují mnohonásobně vyšší citlivostí. Chyba linearit se dá zmenšovat zvětšením vodivosti, zároveň však klesá citlivost snímače. Pro vyhodnocení je nutné používat speciální vyhodnocovací obvody a mají i vyšší nároky na přesnost měření. Změna odporu těchto snímačů bývá vyvolána především mikrostrukturálními změnami materiálu. Mezi nejrozšířenější snímače této skupiny se řadí monokrystalické, vytvářené difuzní technologií.

### 3 INDUKČNOSTNÍ SNÍMAČE [6] [33][46][42][30][21][31][18][50][5]

Řadí se mezi významné představitele pasivních snímačů. Do elektrického obvodu jsou zapojeny s pomocným střídavým napětím. Skládají se z jedné či více cívek. Magnetický obvod cívky je otevřený nebo uzavřený a snímače jsou s nebo bez feromagnetického jádra. Ve strojírenství jsou používány zejména k určování polohy, měření rychlosti, detekci změny tloušťky ocelového plechu, detekci vychýlení a vyosení, stanovení polohy feromagnetické součásti nebo koncové polohy kmitající strojní součásti. Pracují na principu, kdy je neelektrická veličina převedena snímačem na změnu vlastní indukčnosti nebo změnu vzájemné indukčnosti mezi dvěma cívkami. Nespornou výhodou těchto snímačů je to, že jsou schopny pracovat bezdotykově, čímž odolávají lépe opotřebení a okolním vlivům prostředí. Následující rozdělení je sestaveno podle různých možností dosažení změny indukčnosti:

- **Snímač s malou vzduchovou mezerou**

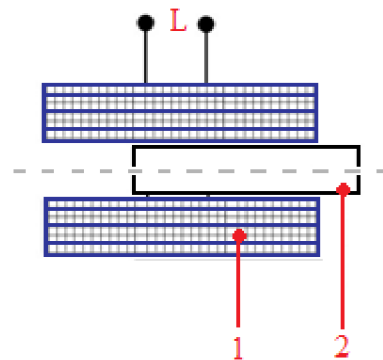
Indukčnost se mění na základě změny vzduchové mezery  $d$  nebo změny plochy. Snímače pracující se změnou velikosti vzduchové mezery jsou charakteristické nelineárními vlastnostmi. Používají se pro měření malých vychylek a zapojeny mohou být v jednoduchém nebo diferenčním zapojení. Na obr. 3.1 je znázorněn snímač v jednoduchém zapojení, kde pevnou část tvoří feromagnetické jádro '2', na kterém je umístěna cívka '1'. Ve vzdálenosti  $d$  od jádra je snímáný objekt '3'. Diferenční zapojení má oproti jednoduchému navíc ještě jedno jádro, které je zrcadlově otočené. Samotný princip snímačů s malou vzduchovou mezerou je založen na tom, že dochází-li ke změně polohy pohyblivé části '3', nastává změna impedance, což má za následek změnu proudu procházejícího cívkou, který jsme schopni změřit.



Obr. 3.1 Snímač s malou vzduchovou mezerou [50]

- **Snímač s otevřeným magnetickým obvodem**

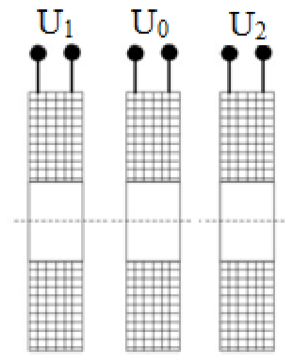
Opět existují dvě varianty snímače (v jednoduchém a diferenciálním zapojení). Jednoduchý snímač je k vidění na obrázku 3.2. Je složen z cívky '1' a feromagnetického jádra '2'. Princip funkčnosti spočívá v tom, že feromagnetické jádro je v závislosti na poloze měřeného objektu zasouváno/vysouváno. Indukčnost je měněna na základě toho, kde se zrovna nachází jádro. Pokud je jádro uprostřed, tak je hodnota indukčnosti  $L$  maximální a naopak minimální, když je jádro v krajních polohách cívky. Ve srovnání s předchozími snímači se vyznačují menší citlivostí, nelineární změnou indukčnosti a větším vlivem parazitních polí.



Obr. 3.2 Schéma snímače s otevřeným magnetickým obvodem [26]

- **Snímač bez feromagnetika**

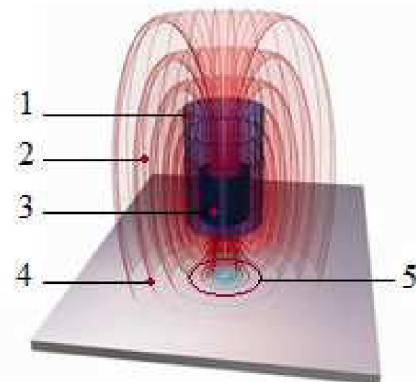
Již z názvu je patrné, že tyto snímače neobsahují feromagnetikum, čímž jsou odstraněny parazitní vlivy. Fungují na principu transformátoru, tj. mezi cívkami působí magnetické vazby a dochází k indukovanému napětí. Snímač je tvořen nejméně dvěma cívkami a jejich sestavení umožňuje vzájemné souosé posunutí. Častěji je však používáno diferenční uspořádání (obr. 3.3). Funkčnosti je dosaženo tím, že přivedeme střídavé napětí na buzenou cívku ( $U_0$ ) a ta vytvoří magnetické pole, které (v našem případě pro diferenční zapojení) následně indukuje napětí na obou vedlejších cívkách ( $U_{1,2}$ ). Pokud je buzená cívka  $U_0$  vychýlena ze středové polohy, tak je větší indukované napětí  $U_1$  nebo  $U_2$  na té cívkce, která je buzené cívkce  $U_0$  blíže. Nepřítomnost feromagnetika způsobuje, že magnetický tok, který buzená cívka vytváří, je menší než u cívek, které feromagnetikum obsahují. S tím souvisí nižší pracovní rozsah snímače, kde je dosaženo hodnot maximálně kolem 3 mm. To může být jeden z důvodů, proč nejsou tyto snímače příliš rozšířené naproti tomu, že dosahují dobrého rozlišení, přesnosti a opakovatelnosti.



Obr.3.3 Diferenciální zapojení snímače bez feromagnetika [26]

- **Snímač s potlačeným magnetickým obvodem (s vířivými proudy)**

Tento druh bezkontaktních snímačů pracuje na principu vířivých proudů. Měří vzdálenosti od elektricky vodivých předmětů, které mohou, avšak nemusejí být feromagnetické. Proud způsobuje, že se kolem cívky nachází magnetické pole, které působí na měřený objekt. Jakmile se tento objekt nachází v magnetickém poli snímače, začnou se v něm indukovat vířivé proudy, které vybudí vlastní magnetické pole. Toto vzniklé magnetické pole působí zpětně na původní pole a zmenšuje jeho intenzitu. To je důvod, proč se hovoří o potlačeném magnetickém obvodu. Vzájemným působením obou polí je ovlivňována impedance cívky. Vzdálenost měřeného objektu je určena na základě změny amplitudy a fázového posunutí proudu, který se vrací do demodulátoru. Snímače pracující na principu vířivých proudů jsou využívány tehdy, je-li vzájemný kontakt snímače a měřeného objektu nežádoucí. Měřicí soustava je schopna pracovat ve špatných podmínkách, jako jsou olej, špína, prach, vlhkost, rušivá pole. Z tohoto důvodu se dají s výhodou používat v extrémních průmyslových podmínkách.



Obr.3.4 Princip měření pomocí vířivých proudů [48]

### 3.1 POUŽITÍ INDUKČNOSTNÍCH SNÍMAČŮ

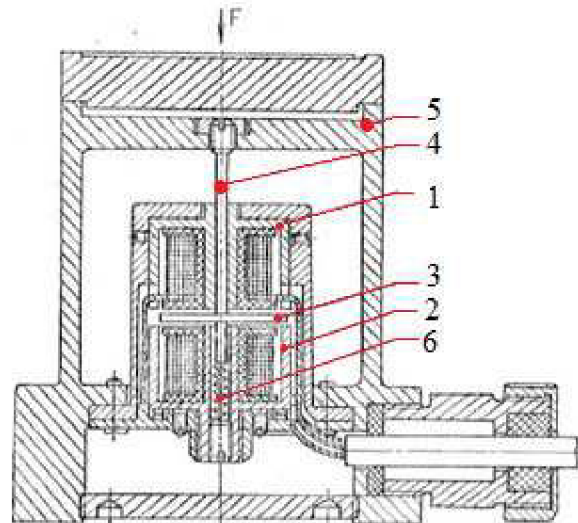
Díky svým vlastnostem se řadí mezi významné představitele pasivních snímačů pro měření většiny neelektrických veličin (rozměrů, tlakových a tahových sil, krouticího momentu, deformací, tlaků, zrychlení a další). Pro měření tlakových a tahových sil se používají jak snímače s malou vzduchovou mezerou, tak s otevřeným magnetickým obvodem. Schéma tlakového typu snímače je zobrazeno na obrázku 3.5.

Mezi jádry '1' a '2' z měkkého železa je kotva '3', jejíž dřívík '4' se dotýká dna tělesa '5', které se stlačuje. Působením tlakové síly 'F' se těleso deformuje a kotva '3' snímače se posouvá spolu se dnem, s nímž je pevně spojena.

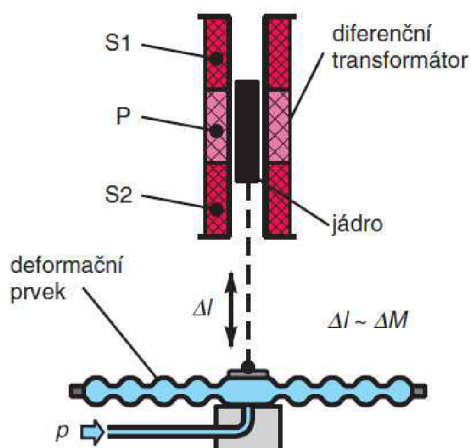
Pro měření tlaků se všechny typy indukčnostních snímačů používají ve spojení s pružným článkem. Tlaková změna se ve snímači mění pomocí pružného členu na změnu polohy, která se indikuje pomocí některého typu indukčnostního snímače. Jako pružné články se používají:

- tuhá membrána
- Bourdonova trubice
- měkká membrána
- vlnovec
- ostatní (různé druhy deformačních trubek)

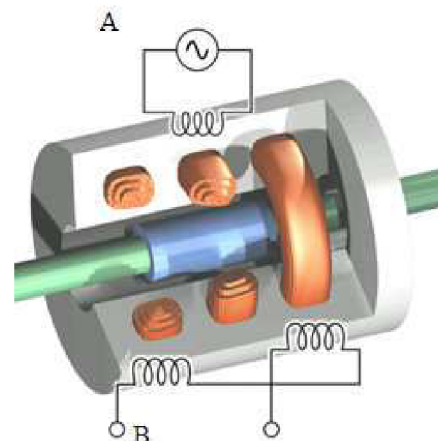
U tlakoměrů s indukčnostním senzorem polohy se nejčastěji používá diferenční zapojení známé jako LVDT (linear variable differential transformer, viz obr. 3.6). Změna tlaku vyvolá prostřednictvím vhodného pružného členu změnu polohy feromagnetického jádra diferenčního transformátoru, což způsobí změnu vzájemné indukčnosti mezi primárním (obr.3.6 označeno A) a sekundárním (obr.3.6 označeno B) vinutím transformátoru. Schéma deformačního tlakoměru s indukčnostním senzorem polohy a deformačním prvkem je na obrázku 3.7.



Obr. 3.5 Tlakový snímač s malou vzduchovou mezerou [50]



Obr. 3.7 Tlakoměr s LVDT senzorem [18]

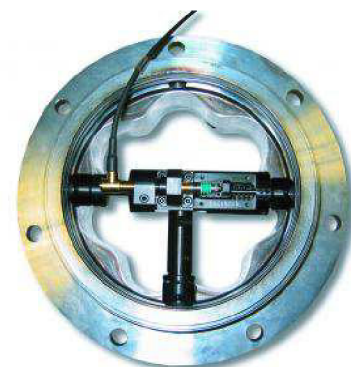


Obr. 3.6 Senzor LVDT [22]



Speciálním příkladem použití je snímač na bázi vířivých proudů, který je produktem společnosti Micro - Epsilon. Snímač využívá schopnosti vířivých proudů proniknout skrze izolant. Měřeným objektem se může stát tedy i kov, který je izolovaný vrstvou nevodivého materiálu. Sensor o průměru hlavy pouhých 2 mm a délce 4 mm je nejmenším sériově vyráběným senzorem na bázi vířivých proudů. Těchto úctyhodných rozměrů bylo docíleno díky speciální metodě vinutí cívky. Snímač nachází uplatnění například ve spalovacích motorech, kde měří pohyby pístu, pístních kroužků, dráhu hřídele nebo tloušťku olejového filmu. Je schopen snímat i při běžícím motoru. Při měřicím rozsahu 500  $\mu\text{m}$  se dosahuje linearit 1  $\mu\text{m}$  a rozlišení 20 nm.

Mezi nejčastěji prováděná měření ve strojírenství patří měření průměrů, a to jak průměrů vnitřních, tak i vnějších. K jednodušším a levnějším měřidlům pro měření průměrů součástek patří posuvná měřítka či úchylkoměry. Složitější a cenově náročnější zařízení se pak skládají z různých typů snímačů. Příkladem může být zakázkově řešené provozní měřidlo průměrů oběžných drah ložisek po procesu broušení. Rozsah měřitelných průměrů je 200 – 400 mm. Měřidlo je tvořeno dvojicí pevných dotyků, které svírají úhel 90°, třetí dotyk je pohyblivý a je uložen na předepnutém kuličkovém vedení. Poloha pohyblivého dotyku je odměřována indukčným snímačem. Měřidlo je z produkce firmy Mesing a je uvedeno na obr. 3.8.



Obr. 3.8 Měřidlo oběžných drah ložisek [31]

Indukčnými snímači jsou také s velkou oblibou využívány v automobilovém průmyslu, kde jsou nejčastěji používaným měřicím prvkem v provozní kontrole autodílů a vytěsňují tak používání starých číselníkových úchylkoměrů. V tomto zaměření jsou úspěšné ty firmy, které projevují snahu vyvíjet levné, do provozních podmínek odolné a hlavně dostatečně přesné snímače. Snahou je řešit problém kontaktního měření některých součástek z Al-slitin, ale i součástek z tvrdých povrchů, kde bývají problémem měřicí doteky. Možným řešením tohoto problému se zdá být kulový nebo břitový dotek z monokrystalického diamantu (viz obr. 3.10). Příkladem použití je speciální mnohasnímačová stanice, která je používána při kontrole převodovkových hřídelí (obr. 3.9). K nasazení takových zařízení může dojít v případě, kdy přesnostně nevyhovují součástky vyráběné sériově.



Obr 3.9 Kulový a břitový dotek z monokrystalického diamantu [21]



Obr 3.10 Snímač LVDT s vytlačováním hrotu firmy Micro-Epsilon [21]

#### 4 KAPACITNÍ SNÍMAČE [8][14][4][6][17][32][15][9][18][50]

Tyto snímače se používají pro měření neelektrických veličin, které ovlivňují kapacitu kondenzátoru (tj. plochu  $S$  a vzdálenost  $d$ ) a permitivitu  $\epsilon$  prostoru, ve kterém dochází k uzavření elektrického pole kondenzátoru. Stejně jako všechny předchozí jsou řazeny mezi snímače pasivní. Snímač je tvořen dvěma či více elektrodami, u kterých se na základě působení vnějšího podnětu mění kapacita snímače. V praxi jsou velmi rozšířené a používané všude tam, kde je doceněno jejich předností, jako jsou např. malá hmotnost a jednoduchá konstrukce. Jsou využívány k měření tahové síly, tlaku, krouticího momentu, polohy, hladiny, vlhkosti, přítomnosti předmětů na pásu apod.

Pro kapacitu rovinného kondenzátoru  $C$  platí:

$$C = \epsilon_0 \cdot \epsilon_R \cdot \frac{S^k}{d}, \quad (6)$$

kde:  $\epsilon_0$  je permitivita vakua,  
 $\epsilon_R$  je poměrná permitivita,  
 $S^k$  je plocha elektrod,  
 $d$  je vzdálenost mezi deskami.

Z rovnice (6) je patrné, že ovlivněny mohou být pouze tři veličiny. Danému úsudku odpovídají i tři konstrukce kapacitních snímačů a to v závislosti na:

- **Změně vzdálenosti mezi deskami**

Pro kapacitu těchto snímačů platí rovnice (6), ze které se dá odvodit, že největší citlivosti je dosahováno při malých hodnotách  $d$ . Musí se počítat s minimální vzdáleností  $d$ , aby nedošlo k proražení kapacitoru. Pouze při malých vzdálenostech desek má snímač velkou citlivost. Z tohoto důvodu je v praxi snaha využívat diferenciální zapojení, kterým se dá dosáhnout lineárnějšího průběhu v poměrně velké oblasti. Další nevýhodou tohoto typu snímačů je poměrně malý měřicí rozsah, dosahující řádově jednotek mm.

- **Změně aktivní plochy desek**

Pro tyto snímače platí, že závislost kapacity na mezeře mezi elektrodami je lineární. Těmto kondenzátorům, se říká také „překrývací“ či „ladící“ pro jejich lineární statickou charakteristiku. I u těchto snímačů existuje zapojení diferenciální, které se zde používá pro odstranění parazitních vlivů. Snímače využívající změnu aktivní plochy lze snadno přizpůsobit pro měření natočení. Nejčastěji je však pro měření neelektrických veličin používáno souosé zapojení kapacitního snímače, který má lineární statickou charakteristiku.

- **Změně dielektrika**

Této změny může být dosaženo několika způsoby:

- a) změnou plochy dielektrika

Celková kapacita je dána součtem dvou dílčích kapacit  $C = C_A + C_B$ . Charakteristika tohoto snímače má lineární průběh.

- b) změnou permitivity dielektrika

Princip tohoto měření je často používaný pro měření parametrů látky nacházející se mezi jednotlivými elektrodami. Příkladem může být využití ke zjišťování vlhkosti sypkých látek v zásobnících, či zjištění některých vlastností leteckého paliva.

- c) změnou tloušťky dielektrika

Pro správnou funkci a dosažení co nejlepší přesnosti je nutné znát velikost jednotlivých parazitních vlivů. Jelikož kapacita závisí na rozměrech snímače, mohou změny rozměrů a teploty okolí způsobit značnou chybu, protože součásti snímače z rozdílných materiálů se budou chovat jinak. Chyby při měření lze však eliminovat správnou volbou geometrických rozměrů součástí snímače se zřetelem na jejich součinitele teplotní roztažnosti. Kapacita senzoru se dá spočítat za předpokadu, že je mezi elektrodami homogenní pole, jinak je nutné použít komplikované výpočty. Přesný výpočet kapacity má praktický význam, protože odstraňuje nutnost cejchování a usnadňuje návrh senzoru.

Jelikož mají kapacitní snímače většinou velkou impedanci, je důležité aby všechny části snímače byly vzájemně řádně izolovány. Důvodem je fakt, že při nedostatečně velkém povrchovém odporu izolantu prochází po jeho povrchu proud od jedné elektrody ke druhé a vytváří na tomto úseku úbytek napětí. Kvůli nerovnoměrnosti izolantu je úbytek napětí podél izolačního úseku nerovnoměrný. Jednotlivé úseky izolantu tvoří s druhou elektrodou kondenzátor určité kapacity. Plocha desek se zdánlivě může zvětšovat, avšak nestejně.

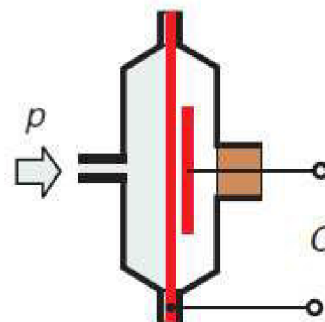
Vlastnosti kapacitních snímačů jsou hodnoceny podle mnoha kritérií. Jedná se především o jednoznačnou závislost mezi elektrickou a neelektrickou veličinou bez hystereze. Tuto vlastnost nesplňují zcela snímače, u kterých je využito vlastností pevného dielektrika. Požadavek linearity mezi vstupní a výstupní veličinou je u kapacitních snímačů splnitelný. Citlivostí se vyrovnávají ostatním pasivním snímačům. Parazitní vliv teploty a vlhkosti lze vyloučit vhodným konstrukčním řešením snímače. Snímače se díky své konstrukci stávají odolnými vůči přetížení, chemickým a povětrnostním vlivům apod. Používají se při snímání vysokých rychlostí a zrychlení. Při měření délek nebo detekci se jako výhoda jeví i bezdotykové snímání. Používají se především pro snímání:

- polohy
- tlaková síla
- tlak
- krouticí moment
- hladina
- vlhkost

#### 4.1 POUŽITÍ KAPACITNÍCH SNÍMAČŮ

Kapacitní snímače si za dlouhou dobu svého působení získaly velkou oblibu. V poslední době díky použití nových materiálů i nových technologií došlo k jejich miniaturizaci. Základní čidlo pro měření tlaku funguje na velmi jednoduchém principu (viz obr. 4.1). Je složeno z deformační membrány vytvořené tenkým vodivým materiálem. Pokud na tuto membránu začne působit tlak  $p$ , tak dojde vlivem průhybu membrány ke změně kapacity kondenzátoru.

Čidlo moderního kapacitního snímače je tvořeno keramickou membránou, nejčastěji jako součást keramické tlakoměrné buňky. Například keramická buňka firmy Endress+Hauser je tvořena z velmi čisté keramiky  $\text{Al}_2\text{O}_3$  o čistotě 99,9 %. Tato měřicí buňka (viz obr. 4.2) používá dva deskové kondenzátory. Jeden slouží jako pevná a druhý jako pohyblivá elektroda. Pevná elektroda je součástí keramického tělesa a ta pohyblivá je umístěna na vnitřní straně safírové (safír je modrá odrůda korundu s velkou mechanickou pevností) membrány, která se díky svým vlastnostem k tomuto účelu skvěle



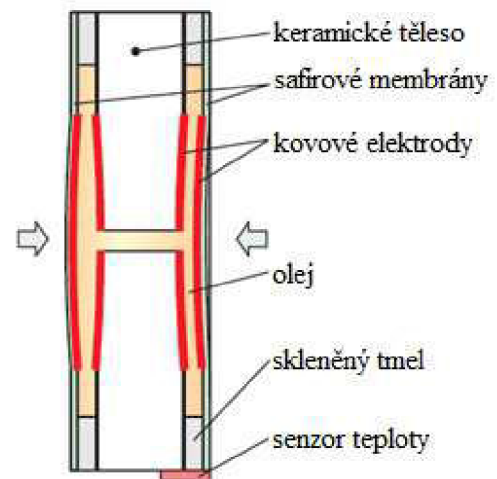
Obr. 4.1 Jednoduché schéma principu kapacitního čidla tlaku [18]

hodí. Jako dielektrikum se v tomto případě používá silikonový nebo minerální olej. Působením tlaků dojde k odpovídajícímu prohnutí membrán. Díky tomuto průhybu se změní i kapacita, kterou vyhodnotí elektronický obvod řízený mikroprocesorem. Mohou být vybaveny automatickou kompenzací vlivu teploty. Pro současné kapacitní senzory tlaku se charakteristickou známkou staly miniaturní rozměry a vysoká kvalita čidel. Toho je dosaženo na základě mikroelektromechanických postupů výroby.

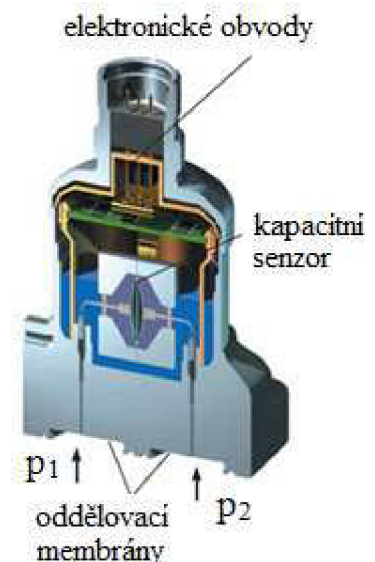
Příkladem moderního snímače tlaku s rovinným připojením je přístroj Rosemount na obrázku 4.3. Rovinné (koplanární) připojení umožňuje přímou montáž ventilových souprav a oddělovacích membrán. Měřicí rozsah snímače se pohybuje od 0,025 do 27 600 kPa, kdy nejistota snímače nepřekračuje 0,025 % z rozsahu, vliv změny teploty není větší než 0,0012 % K a vliv statického tlaku 0,015 % MPa. V porovnání s odporovými tenzometry má tento typ snímačů tyto vlastnosti:

- jednoduchost konstrukce, jsou odolnější, mají rychlejší odezvu a podstatně menší drift (posuv nuly). Jako nevýhody se považují citlivost na parazitní kapacity přívodů a vibrace původem ze zařízení.

Dále popisované typy snímačů tlaku byly vyvinuty pro hlídání a měření tlaku v hydraulických a pneumatických systémech. Uplatnění však naleznou i v odvětvích, jako jsou potravinářský průmysl a v zařízeních s vysokými nároky na hygienu. Snímač tlaku dále uvedený je z nabídky společnosti ifm electronic s.r.o.. Všechny typy těchto senzorů (ifm electronic), tj. pro měření tlaku, jsou vyrobeny z jednodílného pouzdra, neobsahují žádné pohyblivé části (písty, pružiny), jsou tedy odolné proti mechanickým vlivům a vlivům okolního prostředí. Výhodou těchto snímačů je, že mají keramickou membránu, která zabraňuje korodování a je dlouhodobě stabilní. Snímače a senzory s takovou membránou jsou velmi odolné proti tlakovému přetížení a dynamickým tlakovým špičkám, které mohou vzniknout v hydraulických systémech nebo u zavírajících se ventilů. Měřicí systém je sestaven tak, že na vnitřní straně keramické membrány z oxidu hlinitého, je umístěna kruhová destička stejného materiálu. Na této destičce je v tlusté vrstvě nanesen rezinát zlata. Tato sestava tvoří měřicí a referenční elektrodu. Protikus tohoto sestavení je druhá kruhová destička rovněž ze stejného materiálu, také pokryta vrstvou rezinátu zlata, která tvoří druhou elektrodu. Destičky jsou spojeny skleněnou pájkou, a to tak, že ploché elektrody leží proti sobě (vzdálenost mezi nimi je zhruba 10  $\mu\text{m}$ ). Charakteristika se považuje za lineární, protože výchylky membrány jsou nepatrné. Kondenzátor je po určitých časových



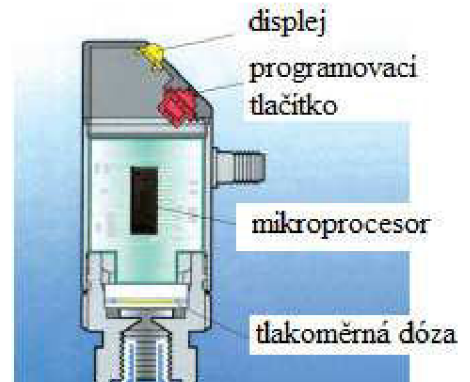
Obr. 4.2 Kapacitní keramická tlakoměrná buňka [18]



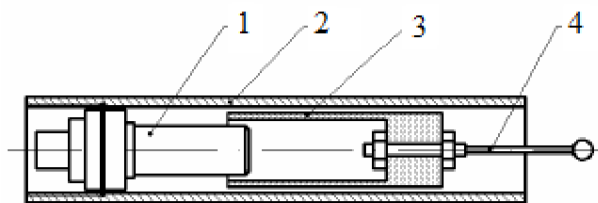
Obr. 4.3 Snímač tlaku s rovinným připojením [18]

intervalech nabíjen zdrojem a díky působení elektrostatické síly je membrána vrácena do původní nevychýlené polohy (na obrázku 4.4 řez snímačem).

Kapacitní snímače jsou z oblibou používány pro měření drah. Měří bezdotykově jako indukčnostní snímače, ale jsou více odolné proti poruchám. Pro měření drah vzálenosti až 400 mm je používáno snímače s proměnnou plochou elektrod. Jednoduché schéma je na obrázku 4.5. Princip spočívá v tom, že se trubka pohybuje lehce suvně v ocelové trubce (tato tvoří plášť a zároveň zemnicí elektrodu) snímače. Z důvodu vyloučení rozptylové vzálenosti je živá elektroda asi o 3 mm delší, než je požadovaná délka dráhy. K oscilátoru je snímač připojen přes konektor, který je na druhé straně ukončené závitem s dírou pro kolík konektoru. Výhodou je také možnost výměny živé části při zachování celkové dráhy. To nachází uplatnění při práci na lisu, kde se využívá jen malá část celkového zdvihu beranu. Senzor neregistruje.



Obr. 4.4 Snímač tlaku ifm electronic [32]



1 - živá elektroda, 2 - trubka sloužící jako stínění a zároveň jako vodítka dielektrika, 3 - posuvné dielektrikum, 4 - táhlo

Obr. 4.5 Kapacitní snímač dráhy [9]

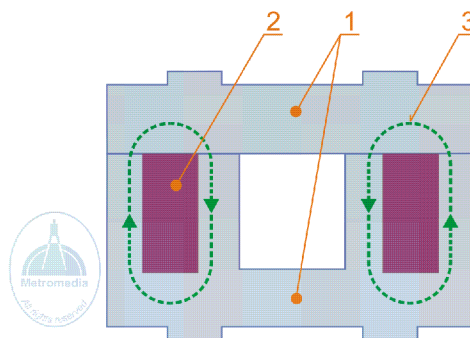
## 5 MAGNETICKÉ SNÍMAČE [23][37][51][5][27][11][43][1][7]

Principy které tyto snímače využívají jsou známy z měření magnetického pole a zakládají se na změně permeability feromagnetických těles, která je závislá na působení okolních vlivů (mechanické napětí, teplotě). Změnou permeability dochází ke změnám magnetické impedance magnetického obvodu a také dochází ke změně indukčnosti. Výsledkem je změna impedance cívky (která se nachází na magnetickém obvodu) nebo vlastní či vzájemná indukčnost. Nejvýznamějšími představiteli skupiny magnetomechanických jevů (Widemannův, Villariův) jsou snímače na principu magnetostrikce. Widemanův jev říká, že prochází-li dlouhou a tenkou tyčí z feromagnetického materiálu nacházející se v podélném magnetickém poli proud, pak je tyč namáhána krutem. Jako Villariho jev se označuje takový stav, kdy je díky deformacím feromagnetické tyče v podélném směru dosaženo změn magnetických vlastností (např. indukčnosti).

Magnetostrikce představuje fyzikální jev (Jouleův), kdy se pod vlivem magnetického pole mění rozměry některých feromagnetických materiálů (podélná nebo příčná kontrakce) nebo se naopak mění permeabilita (vykazují magnetizaci) při působení vnějších sil. V praxi to funguje tak, že se do vodiče uvnitř senzoru přivede krátký proudový impuls, jež v celém vodiči vybudí magnetické pole. Interakcí magnetického pole permanentního magnetu (je přiložen blízko povrchu senzoru) a magnetického pole vodiče (Wiedemanův jev) je vybuzen ve feromagnetickém vodiči torzní magnetostrikční impuls. Tenzo impuls se šíří od místa vzniku, k oběma koncům vodiče. Na jednom konci vodiče se nachází tlumící prvek, který impuls pohltí. Na druhém konci vodiče je umístěn snímač, který zachytí impuls a z časové prodlevy od vyslání proudového impulsu a známé rychlosti šíření se určí poloha místa, kde k interakci obou polí došlo. Podobně funguje i snímač založený na Villariho jevu, jen s tím rozdílem, že se k začátku vodiče přivaří feromagnetický pásek. Jakmile dorazí k tomuto pásku impuls, tak je tento podroben mechanickému namáhání, které způsobí změnu permeability. Cívka umístěná v blízkosti feromagnetického pásku indukuje napětí, které je vyhodnoceno elektronikou senzoru. Dále budou uvedeny různé druhy snímačů využívající magnetostrikce:

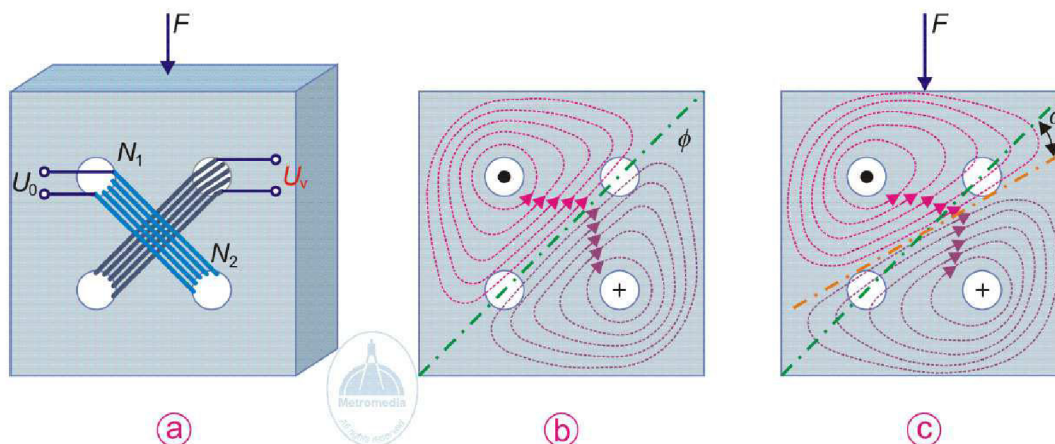
- magnetoelastické,
- magnetoanizotropní,
- využívající Wiedemannova jevu,
- využívající změnu magnetické indukce.

Magnetoelastické snímače se vyznačují jednoduchostí a spolehlivostí a pro svůj robustní charakter jsou používány v těžkých provozech. Ve snímačích se často používá permalloyová slitina (78,5 % Ni) nebo obyčejná měkká ocel. Na obrázku 5.1. je zobrazeno konstrukční uspořádání magnetoelastického snímače. Feromagnetický obvod '1' se vyrábí se zabroušenými stykovými plochami, aby nedocházelo ke změně magnetického odporu vlivem parazitních vzduchových mezer. Z důvodu teplotní kompenzace je hlavní vinutí '2' doplněno o teplotněné vinutí '3'. Výstupem snímače je změna indukčnosti. Jako perspektivní materiály se pro tyto snímače hodí amorfní magnetické materiály (kovové sklo), z důvodů vyšší citlivosti, lepší stability, vyšší hodnoty napětí a větší tvrdosti.



Obr. 5.1 Základní schéma magnetoelastického snímače [27]

Magnetoanizotropní snímač je vyroben buď z plného nebo z plechů složeného feromagnetického tělesa (viz obr. 5.2a), ve kterém jsou kolem středu symetricky vytvořeny čtyři otvory. Skrze otvory je vedeno vinutí, složené z vinutí primárního a sekundárního tvořící transformátor. Pokud není těleso zatíženo, tak magnetický tok primárního vinutí nezasahuje do sekundární cívký (obr. 5.2b). Naopak mechanickým zatížením se vytvoří oblast se zvýšenou permeabilitou pod úhlem  $\alpha$  od hlavní úhlopříčky (obrázek 5.2c). Toto zatížení vytvoří magnetickou anizotropii, jejímž důsledkem se zvýší vazba mezi vstupním a výstupním napětím. Ve vinutí cívký '2' se generuje napětí, díky magnetickému toku, který sleduje směr zatíženého odporu a vytváří plochu kolmou k tomuto vinutí.



Obr. 5.2 Magnetoanizotropní snímač a rozložení magnetického toku [27]

Výhodou těchto typů snímačů je jejich robustnost. To je důvod, proč jsou nasazovány v aplikacích, kde ostatní metody nevyhoví. Měřicí rozsah se dá nastavit tak, že výstupní signál je generován pouze pro potřebný rozsah. Kompletní elektronika je uložena v těle senzoru, což umožňuje zjednodušenou instalaci a téměř bezúdržbovost tohoto typu snímače. Dalším nepřehlédnutelným faktorem, díky kterému jsou tyto snímače s oblibou používány je rozsah, s jakým mohou měřit. Tento se pohybuje v řádu milimetrů i mnoha metrů s přesností od 1  $\mu\text{m}$ . Výstupem může být běžný analogový, pulsní či digitální výstup. Příklad takového snímače je na obrázku 5.3.



Obr. 5.3 Magnetostrikční lineární snímač pohybu[43]

Magnetostrikční snímače se dnes tedy uplatňují všude tam, kde ostatní typy přestávají měřit. Jsou používány v extrémních podmínkách, kde je vysoký tlak (až 35 MPa), zvýšená prašnost nebo vlhkost. Nacházejí se v lisech, hydraulických stolicích, vstřikovacích strojích pro plasty, mobilních hydraulických systémech, v regulačních ventilech parních turbín, ve vodních i větrných elektrárnách apod. Běžným příslušenstvím je široká škála různě tvarovaných pracovních magnetů, konektorů, upevňovacích pomůcek.

## 6 ZÁVĚRY

Neustálý vývoj snímačů je důkazem toho, že jsou nepostradatelné pro mnohá odvětví průmyslu. S postupnou modernizací, vývojem strojů a měřicích zařízení dochází k jejich nasazování i tam, kde by to dříve nebylo možné. Naproti všem kladům, které snímače poskytují, je důležité, aby byly omezovány škodlivé faktory znehodnocující výsledky měření. Jedním ze základních požadavků pro úspěšné měření spočívá ve výběru správného senzoru pro danou aplikaci.

Snímače se dělí na aktivní a pasivní, kde pasivní potřebují pro svoji funkci pomocné napájení. V základním rozdělení se jedná o snímače odporové, indukčnostní, kapacitní a magnetické.

Odporové jsou hlavními představiteli pro měření mechanických veličin a používají se pro měření statických i dynamických deformací. Podle způsobu, jakým jsou vyrobeny, se odporové snímače dělí na kovové a polovodičové. Z kovových tenzometrů patří mezi nejpoužívanější díky svým vlastnostem fóliové lepené, pro měření tlaku se téměř výlučně používají nanesené difuzní cestou. V provedení polovodičovém se vyznačují teplotně závislou a nelineární převodovou charakteristikou. V porovnání s kovovými jsou mnohonásobně citlivější.

Indukčnostní pracují na změně indukčnosti. Snímače s proměnnou vzduchovou mezerou mají nelineární hyperbolickou charakteristiku, kterou lze linearizovat užitím diferenciálního zapojení. Snímače vířivých proudů mají lineární závislost výstupního signálu na sledované vzdálenosti. Jsou používány pro měření vzdáleností, hloubek nebo detekci kovových objektů v okolí. Díky bezdotykovému způsobu snímání jsou odolné vůči nepříznivým vlivům.

Kapacitní snímače jsou ovlivněny, stejně jako indukčnostní, vlivem spojovacího kabelu. Z toho plynou určitá omezení použití. Výhodou je jejich schopnost snímat bezdotykově, čímž výrazně zvyšují svoji životnost v těžkých provozech a jsou schopny snímat vodivé i nevodivé materiály. Použití nalézají nejčastěji jako senzory přiblížení.

Magnetické snímače se vyznačují pevnou konstrukcí a jednoduchostí. Kompenzace chyb, které vznikají magneticko-mechanickou hysterezí je nákladná. S oblibou jsou používány pro měření vzdáleností díky svojí přesnosti při tomto použití.

Díky nepřestávajícímu vývoji v oblasti sensoriky a elektrotechniky se dá předpokládat, že vývoj snímačů bude nadále pokračovat. Pokud to dovolí konstrukční řešení snímačů, tak se dá očekávat jejich miniaturizace. Budoucnost mají například v lékařství, letectví i v činnostech každodenního života. Dá se předpokládat, že vývoj bude pokračovat směrem



## SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY [20]

1. ALPHA: INTERNATIONAL s.r.o. *Lineární snímače polohy* [online]. [cit. 2014-05-25]. Dostupné z: <http://www.alphaint.cz/>
2. Automations Praxis: Roboter bringt Keramik zum Glänzen. In: [online]. [cit. 2014-05-17]. Dostupné z: [http://www.automationspraxis.de/home//article/33568397/38009718/Roboter-bringt-Keramik-zum-Gl%C3%A4nzen/art\\_co\\_INSTANCE\\_0000/maximized/](http://www.automationspraxis.de/home//article/33568397/38009718/Roboter-bringt-Keramik-zum-Gl%C3%A4nzen/art_co_INSTANCE_0000/maximized/)
3. BHV SENZORY. *DIGITÁLNÍ MANOMETR SE SPÍNACÍ FUNKCÍ PS 111*. 2006. Dostupné z: <http://www.bhvsenzory.cz/bhv/doc1/ps111.pdf>
4. BYSTRICKÝ, Radek, Josef BAJER a Přemysl JANŮ. *Systémy měření a regulace I*. Brno: Vydavatelské oddělení UO, 2008, 103 s. ISBN 978-80-7231-616-8.
5. CHLEBNÝ, Jan. *Automatizace a automatizační technika III*. čtvrté. Vladimír Vecheta. Brno: Computer Press, a.s., 2009, 296 s. ISBN 978-80-251-2523-6.
6. ČECH, Jaroslav, Jiří PERNIKÁŘ a Kamil PODANÝ. *STROJÍRENSKÁ METROLOGIE I*. páté. AKADEMICKÉ NAKLADATELSTVÍ CERM®, s.r.o. Brno, 2009. ISBN 978-80-214-4010-4
7. ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE - FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ. *MAGNETOSTRIKČNÍ SENZOR LINEÁRNÍ POLOHY*. 2011. Dostupné z: <http://fieldbus.feld.cvut.cz/system/files/files/cs/vyuka/predmety/A3M38MSZ/Magnetostrickni.pdf>
8. DAŘO, Stanislav a Marcel KREIDL. *Senzory a měřicí obvody*. Praha: Vydavatelství ČVUT, 1996, 315 s. ISBN 80-01-01500-9.
9. DRASTÍK, F.; ELFMARK, J. *Plastomery a tvařitelnost kovů*. Vyd. 1. Praha 1 : Nakladatelství technické literatury, 1977. 392s. Typové číslo-L13-B3-IV-1/22490.
10. D-EX LIMITED, SPOL. S R. O. Deformační manometr v digitálním věku. *Automa: Časopis pro automatizační techniku* [online]. 2006, č. 1 [cit. 2014-05-17]. Dostupné z: [http://www.odbornecasopisy.cz/index.php?id\\_document=30903](http://www.odbornecasopisy.cz/index.php?id_document=30903)
11. Elektronické učebnice: Měření mechanických veličin. *E-AUTOMATIZACE: informační portál z oblasti automatizace* [online]. [cit. 2014-05-19]. Dostupné z: <http://www.e-automatizace.cz/ebooks/>
12. HAVELKA, Oto. *SÍLA BUDE ZMĚŘENA: Trendy MSV 2008* [online]. 2008, č. 9 [cit. 2014-05-18]. Dostupné z: [http://www.schmachtl.cz/web\\_get\\_img\\_data?aID=544722](http://www.schmachtl.cz/web_get_img_data?aID=544722)
13. HRUBANT, Ladislav a Jan HRUBANT. *Odporové tenzometry z pohledu využití v automatizovaných soustavách* [online]. Automa. roč. 2004, č. 7 [cit. 2014-03-16]. Dostupné z: <http://www.odbornecasopisy.cz/download/au070427.pdf>
14. HRUŠKA, František. *Senzory: Fyzikální principy, úpravy signálů, praktické použití (e-book)*. [online]. druhé, rozšířené. Vydáno elektronicky: Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně, 2010 [cit. 2014-03-16]. ISBN 978-80-7454-096-7. Dostupné z: [http://www.utb.cz/file/15534\\_1\\_1/](http://www.utb.cz/file/15534_1_1/)
15. JENČÍK, Josef a Ludvík KUHN. *TECHNICKÁ MĚŘENÍ VE STROJÍRENSTVÍ: TECHNICKÝ PRŮVODCE 57*. Miloslav Vlk. Praha: SNTL- Nakladatelství technické literatury, 1982, 580 s.
16. JSP. *Měření a regulace* [online]. 2013 [cit. 2014-05-19]. Dostupné z: [http://www.jsp.cz/cz/sortiment/seznam\\_dle\\_kategorie/snimace\\_tlaku\\_a\\_tlakove\\_diference/snimace\\_tlaku\\_a\\_tlakove\\_diference\\_s\\_analogovym\\_vystupem/snimac-tlakove-diference-dmd-331.html](http://www.jsp.cz/cz/sortiment/seznam_dle_kategorie/snimace_tlaku_a_tlakove_diference/snimace_tlaku_a_tlakove_diference_s_analogovym_vystupem/snimac-tlakove-diference-dmd-331.html)

17. KADLEC, Karel. VYSOKÁ ŠKOLA CHEMICKO-TECHNOLOGICKÁ. *MĚŘENÍ A REGULACE TLAKU, KALIBRACE TLAKOMĚŘŮ: Příprava na laboratorní práci*. Praha, 19 s. Dostupné z: <http://uprt.vscht.cz/ucebnice/LO/download/B6-priprava.pdf>
18. KADLEC, Karel. *Snímače tlaku – principy, vlastnosti a použití (část 2)* [online]. 2007, č. 3 [cit. 2014-04-20]. Dostupné z: <http://www.odbornecasopisy.cz/download/au070725.pdf>
19. KADLEC, Karel. *Snímače tlaku – principy, vlastnosti a použití (část 3)*. *Automa: Časopis pro automatizační techniku*. 2007, č. 7, s. 23-26. Dostupné z: <http://www.odbornecasopisy.cz/download/automa/2007/au100723.pdf>
20. KRČÁL, Martin. *Citace.com: ...citovat je snadne* [online]. 2004 [cit. 2013-05-20]. Dostupné z: <http://www.citace.com/>
21. KŮR, Jan a Martin CHAMRÁD. V kontrole autodílů převládají kontaktní měřicí metody. [online]. 2014 [cit. 2014-04-22]. Dostupné z: <http://infocube.cz/cs/v-kontrola-autodilu-prevladaji-kontaktne-merici-metody/>
22. Linear variable differential transformer. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2014-03-26]. Dostupné z: [http://en.wikipedia.org/wiki/Linear\\_variable\\_differential\\_transformer?oldid=430241623](http://en.wikipedia.org/wiki/Linear_variable_differential_transformer?oldid=430241623)
23. MARTINEK, Radislav. *Senzory: v průmyslové praxi*. Praha: BEN-technická literatura, 2004, 200 s. ISBN 80-7300-114-4.
24. Precision mechanical switches My-Com®: Micrometer precision: 70 times more accurate than a hair is thick!. *Baumer: Passion for Sensors* [online]. [cit. 2014-05-17]. Dostupné z: <http://www.baumer.com/us-en/products/presence-detection/precision-mechanical-switches/>
25. Produkty: Snímače síly, tlaku, momentu, dráhy, polohy. *MEATEST* [online]. [cit. 2014-05-18]. Dostupné z: <http://www.meatest.cz/produkty-snimace-tlaku-87>
26. Přednášky. [online]. [cit. 2014-05-04]. Dostupné z: [www.n18.eu/skola/MMS/prednasky/7%5B1%5D.MMS.ppt](http://www.n18.eu/skola/MMS/prednasky/7%5B1%5D.MMS.ppt)
27. REGTIEN, Paul, Vladimír CHUDÝ a Martin HALAJ. SLOVENSKÁ TECHNICKÁ UNIVERZITA V BRATISLAVE, Katedra automatizácie, informačnej a prístrojovej techniky. *Fyzikálne princípy snímačov* [online]. 2005 [cit. 2014-05-25]. Dostupné z: <http://www.kam.sjf.stuba.sk/katedra/publikacie/leonardo/ucebnica/05s.pdf>
28. Ring type tension/compression load cell. *Direct industry: The Online Industrial Exhibition* [online]. [cit. 2014-05-18]. Dostupné z: [http://img.directindustry.com/images\\_di/photo-g/ring-type-tension-compression-load-cells-61546-6030217.jpg](http://img.directindustry.com/images_di/photo-g/ring-type-tension-compression-load-cells-61546-6030217.jpg)
29. RIPKA, Pavel. ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ. *Senzory síly a hmotnosti*. Praha. 2005. Dostupné z: [http://measure.feld.cvut.cz/cs/system/files/files/cs/vyuka/predmety/x38ssd/05\\_sila\\_moment.pdf](http://measure.feld.cvut.cz/cs/system/files/files/cs/vyuka/predmety/x38ssd/05_sila_moment.pdf)
30. Senzory: LVDT (Linear Variable Differential Transformer). In: FEJT, Radek. *Senzory* [online]. 2011/2012 [cit. 2014-04-20]. Dostupné z: <http://senzory.aspone.cz/lvdt.htm>
31. SMUTNÝ, Daniel a Ladislav OŠLEJŠEK. MM Průmyslové spektrum: Strojírenský měsíčník přinášející aktuální technické informace z tuzemska i zahraničí. *Netradiční průměrová dílenská měřidla* [online]. 2008 [cit. 2014-05-22]. Dostupné z: <http://www.mmspektrum.com/clanek/netradicni-prumerova-dilenska-meridla.html>

32. Snímače tlaku a tlakové spínače s keramickou membránou. *Automa: Časopis pro automatizační techniku* [online]. 2004, č. 6 [cit. 2014-04-07]. Dostupné z: [http://www.odbornecasopisy.cz/index.php?id\\_document=32394](http://www.odbornecasopisy.cz/index.php?id_document=32394)
33. ŠIMBERSKÝ, Michal. *INDUKČNOSTNÍ SNÍMAČE*. Brno, 2011. 52 s. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií. Vedoucí práce doc. Ing. Ludvík Bejček, CSc.
34. ŠTURCEL, Ján. SLOVENSKÁ TECHNICKÁ UNIVERZITA V BRATISLAVE. *SNÍMAČE A PREVODNÍKY*. Bratislava: STU, 2002, 262 s. ISBN 80-227-1712-6.
35. Tenzometr 100 N. *PASCO.CZ: přinášíme experimentální systémy pro lepší výuku* [online]. [cit. 2014-05-17]. Dostupné z: <http://www.pasco.cz/sites/default/files/obrazky/produkty/fotogalerie/ps-22001.png>
36. Tenzometry, přístroje a příslušenství: Základní tenzometrické elementy. *Omegaeng.cz: Váš zdroj o měření a regulaci!* [online]. [cit. 2014-05-08]. Dostupné z: <http://www.omegaeng.cz/shop/subsectionSC.asp?subsection=E02&book=Pressure>
37. TIMUROVÁ, Petra. *Magnetické senzory a jejich využití (rešerše)*. Plzeň, 2012. 25 s. Dostupné z: [https://otik.uk.zcu.cz/bitstream/handle/11025/2785/E09B0092K\\_Petra\\_Timurova.pdf?sequence=1](https://otik.uk.zcu.cz/bitstream/handle/11025/2785/E09B0092K_Petra_Timurova.pdf?sequence=1). Bakalářská práce. ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI, FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ. Vedoucí práce Ing. Josef Girg.
38. Torque Sensor for non-rotary applications Models 8627, 8628, 8632. *Burster: measure, testing, production control* [online]. 2012 [cit. 2014-05-21]. Dostupné z: <http://www.burster.com/en/products/sensors/c/torque/p/torque-sensor-for-non-rotary-applicationsmodels-8627-8628-8632/v/>
39. TUE. [online]. [cit. 2014-03-16]. Dostupné z: <http://www.tue.nl/uploads/pics/SG1.jpg>
40. Types of Strain Gauges. In: *Chipkin: Automation systems* [online]. [cit. 2014-05-08]. Dostupné z: <http://www.chipkin.com/types-of-strain-gauges/>
41. Ústav mikroelektroniky. ADÁMEK, Martin. FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ. *MODERNIZACE VÝUKY SENZOROVÉ TECHNIKY* [online]. Brno [cit. 2014-05-15]. Dostupné z: <http://www.umel.feec.vutbr.cz/~ADAMEK/UCEB/menufram.htm>
42. VOJÁČEK, Antonín. Jak pracují LVDT snímače pro měření pohybu či detekci přiblížení. [online]. 2011 [cit. 2014-03-26]. Dostupné z: <http://automatizace.hw.cz/jak-pracuji-lvdt-snimace-pro-mereni-pohybu-ci-detekci-priblizeni>
43. VOJÁČEK, Antonín. Magnetostrikční lineární snímače pohybu. *Automatizace.hw.cz: rady a poslední novinky z oboru* [online]. 2010 [cit. 2014-05-25]. Dostupné z: <http://automatizace.hw.cz/magnetostrikcni-linearni-snimace-pohybu>
44. VLK, Miloš, Lubomír HOUFEK, Pavel HLAVOŇ, Petr KREJČÍ, Vladimír KOTEK a Jiří KLEMENT. *EXPERIMENTÁLNÍ MECHANIKA* [online]. Brno, 2003 [cit. 2014-03-16]. Dostupné z: [http://www.umt-old.fme.vutbr.cz/\\_studium/\\_opory/Experimentalni\\_mechanika.pdf](http://www.umt-old.fme.vutbr.cz/_studium/_opory/Experimentalni_mechanika.pdf). Studijní opory. VUT FSI BRNO.
45. VYCHOPEŇ, Petr. *Aktivní snímače pro zjišťování okamžitých hodnot napětí a deformací*. Brno, 2013. 29 s. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství. Vedoucí práce Ing. Kamil Podaný, Ph.D.

46. VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ, Fakulta strojního inženýrství. *Indukčnostní snímače: skripta* [online]. Brno: Vysoké učení technické [cit. 2014-03-26]. Dostupné z: <http://ottp.fme.vutbr.cz/skripta/vlab/mereni/Ka03-02.htm>
47. WASGESTIAN, Petr. *Tenzometry HBM*. HBM. [online]. [cit. 2014-03-16]. Dostupné z: <http://www.hbm.cz/Aplikace/tenzometry.pdf>
48. WEIGL, Martin. Návrh nestandardních indukčnostních a inkrementálních měřicích snímačů. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2013. 83 s. Vedoucí diplomové práce doc. Ing. Jiří Pernikář, CSc..
49. Základní typy měřičů. In: *E-Automatizace: Informační portál z oblasti automatizace* [online]. [cit. 2014-04-10]. Dostupné z: <http://www.e-automatizace.cz/>
50. ZEHNULA, Karel. *Snímače neelektrických veličin*. 2. vyd. Praha: SNTL - Nakladatelství technické literatury, 1983, 372 s.
51. ZEHNULA, Karel. VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ, Fakulta elektrotechnická. *Měření neelektrických veličin: Snímače II*. SNTL- nakladatelství technické literatury, 1976, 166 s.

## SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

Označení	legenda	Jednotka
C	kapacita kondenzátoru	[F]
d	vzdálenost mezi deskami	[mm]
k	součinitel deformační citlivosti	[-]
l	délka vodiče	[mm]
R	odpor vodiče	[ $\Omega$ ]
S	plocha průřezu	[mm <sup>2</sup> ]
S <sup>k</sup>	plocha elektrod	[mm <sup>2</sup> ]
dl	diferenciál délek	[mm]
dp	diferenciál měrných odporů vodiče	[ $\Omega \cdot m$ ]
dS	diferenciál plochy průřezu	[mm <sup>2</sup> ]
$\epsilon$	poměrná deformace	[-]
$\Delta R$	změna odporu vodiče	[ $\Omega$ ]
$\Delta l$	změna délky vodiče	[mm]
$\epsilon_0$	permitivita vakua	[C <sup>2</sup> N <sup>-1</sup> m <sup>-2</sup> ]
$\epsilon_R$	poměrná permitivita	[-]
$\mu$	Poissonovo číslo	[-]
$\rho$	měrný odpor vodiče	[ $\Omega \cdot m$ ]

## SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1 Siloměr pro mostové konstrukce[35] .....	9
Obr. 2 Přístroj regulující sílu pro nalisování komponenty [2].....	9
Obr. 3 Tenzometr na měřeném objektu[39].....	9
Obr. 4 Kontrola správné výšky přítlačného válce[24].....	9
Obr. 5 Referenční digitální tlakoměr [10] .....	9
Obr. 1.2 Schéma měřícího obvodu [50].....	10
Obr. 1.1 Rozdělení pasivních snímačů .....	10
Obr. 1.3 Analogový a digitální signál [45] .....	11
Obr. 2.1 Deformace vodiče v podélném směru [17].....	12
Obr. 2.2 Poměrná deformace tenzometru $\epsilon$ [47].....	13
Obr. 2.3 Příložený tenzometr.....	13
Obr. 2.4 Drátkový lepený tenzometr [40].....	14
Obr. 2.5 Konstrukce fóliového snímače [6].....	14
Obr. 2.6 Různé druhy fóliových tenzometrů [36].....	14
Obr. 2.7 Základní typy polovodičových tenzometrů [6] .....	15
Obr. 2.8 Základní schéma snímače tlaku [18] .....	16
Obr. 2.9 Jedny ze základních tvarů pružných členů [29][11] .....	16
Obr. 2.10 Ruční lis a snímače tlakové síly Meatest 8451/8552 [25].....	17
Obr. 2.11 Kroužkový snímač firmy Brosa s rozsahem od 30 do 3000 kN [28] .....	17
Obr. 2.12 Snímač s filmovým implantátem [12] .....	17
Obr. 2.13 Senzor tlaku s difundovanými tenzometry [18].....	18
Obr. 2.14 Schéma při měřeních různých tlaků [19].....	18
Obr. 2.15 Digitální tlakoměr se spínací funkcí BHV [3].....	19
Obr. 2.16 Křemíkového čidlo s oddělovací membránou[19] .....	19
Obr. 2.17 Snímač tlakové difference firmy JSP DMD 331 [16].....	19
Obr. 2.18 Konstrukční řešení snímače kroutícího momentu [50].....	20
Obr. 3.1 Snímač s malou vzduchovou mezerou [50].....	22
Obr. 3.2 Schéma snímače s otevřeným magnetickým obvodem [26] .....	22
Obr.3.3Diferenciální zapojení snímače bez feromagnetika[26] .....	23
Obr.3.4 Princip měření pomocí vířivých proudů [48] .....	23
Obr. 3.5 Tlakový snímač s malou vzduchovou mezerou [50].....	24
Obr. 3.6 Senzor LVDT [22].....	24
Obr. 3.7 Tlakoměr s LVDT senzorem [18] .....	24
Obr. 3.8 Měřidlo oběžných drah ložisek [31].....	25
Obr. 3.9 Kulový a břitový dotek z monokrystalického diamantu [21].....	25
Obr. 3.10 Snímač LVDT s vytlačováním hrotu firmy Micro-Epsilon [21].....	25
Obr. 4.1 Jednoduché schéma principu kapacitního čidla tlaku [18].....	27
Obr. 4.2 Kapacitní keramická tlakoměrná buňka [18].....	28
Obr. 4.3 Snímač tlaku s rovinným připojením [18].....	28
Obr. 4.4 Snímač tlaku ifm electronic [32] .....	29

---

Obr. 4.5 Kapacitní snímač dráhy [9].....	29
Obr. 5.1 Základní schéma magnetoelastického snímače [27] .....	30
Obr. 5.2 Magnetoanizotropní snímač a rozložení magnetického toku [27].....	31
Obr. 5.3 Magnetostrikční lineární snímač pohybu[43].....	31