



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ
ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING
INSTITUTE OF MANUFACTURING TECHNOLOGY

AKTIVNÍ SNÍMAČE PRO ZJIŠŤOVÁNÍ OKAMŽITÝCH HODNOT NAPĚTÍ A DEFORMACÍ

ACTIVE SENSORS FOR DETECTING INSTANTANEOUS STRESS AND STRAIN VALUES

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

PETR VYCHOPEŇ

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. KAMIL PODANÝ, Ph.D.

BRNO 2013

Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství

Ústav strojírenské technologie

Akademický rok: 2012/2013

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

student(ka): Petr Vychopeň

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:

Aktivní snímače pro zjišťování okamžitých hodnot napětí a deformací

v anglickém jazyce:

Active 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 aktivních snímačů. Rešerše bude zaměřena zejména na piezoelektrické snímače a bude obsahovat základní rozdělení a principy.

Cíle bakalářské práce:

Aktuální literární studie se zaměřením na piezoelektrická 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.

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

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2012/2013

V Brně, dne 20.11.2012

L.S.

prof. Ing. Miroslav Píška, CSc.

Ředitel ústavu

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

Děkan

ABSTRAKT

VYCHOPĚŇ Petr: Aktivní snímače pro zjišťování okamžitých hodnot napětí a deformací

Snímače používané v technické praxi jsou děleny do různých skupin. Jednou z nich jsou aktivní snímače, do kterých patří indukční, fotoelektrické, termoelektrické, pyroelektrické a piezoelektrické. Na základě literární studie jsou prvně uvedeny základní pojmy týkající se obecných vlastností snímačů, jejich zařazení v měřicím procesu a poté popisuje jejich základní rozdělení, jednotlivé principy funkce, závislosti a charakteristiky, konkrétní příklady použití v technologické praxi a v neposlední řadě jejich výhody a nevýhody.

Klíčová slova: aktivní snímače, piezoelektrické

ABSTRACT

VYCHOPĚŇ Petr: Active sensors for detecting instantaneous stress and strain values

Sensors used in engineering are divided into different kind of groups. One of them are an active sensors, which include inductive, photoelectric, thermoelectric, pyroelectric and piezoelectric. Based on literary study there are introduced, on the first place, the basic concepts related to the general characteristics of sensors, their inclusion in the measuring process and then describes the basic division, each operating principles, dependence and characteristics, specific examples of the applications in technological process and finally their advantages and disadvantages.

Keywords: active sensors, piezoelectric

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

VYCHOPEŇ, Petr. *Aktivní snímače pro zjišťování okamžitých hodnot napětí a deformací*. Brno, 2013. 29s, 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, Ph.D.

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 24.5.2013

.....
Podpis

PODĚKOVÁNÍ

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

OBSAH

Zadání

Abstrakt

Bibliografická citace

Čestné prohlášení

Poděkování

Obsah

ÚVOD.....	9
1 ZÁKLADNÍ POJMY.....	10
2 INDUKČNÍ SNÍMAČE.....	12
3 FOTOELEKTRICKÉ SNÍMAČE.....	15
4 TERMOELEKTRICKÉ SNÍMAČE.....	18
5 PYROELEKTRICKÉ SNÍMAČE.....	21
6 PIEZOELEKTRICKÉ SNÍMAČE.....	23
6.1 Snímače sil.....	25
6.2 Snímače tlaku.....	26
6.3 Snímače zrychlení.....	27
6.4 Piezoelektrina v hudbě.....	28
7 ZÁVĚR.....	29

Seznam použitých zdrojů

Seznam použitých symbolů a zkratek

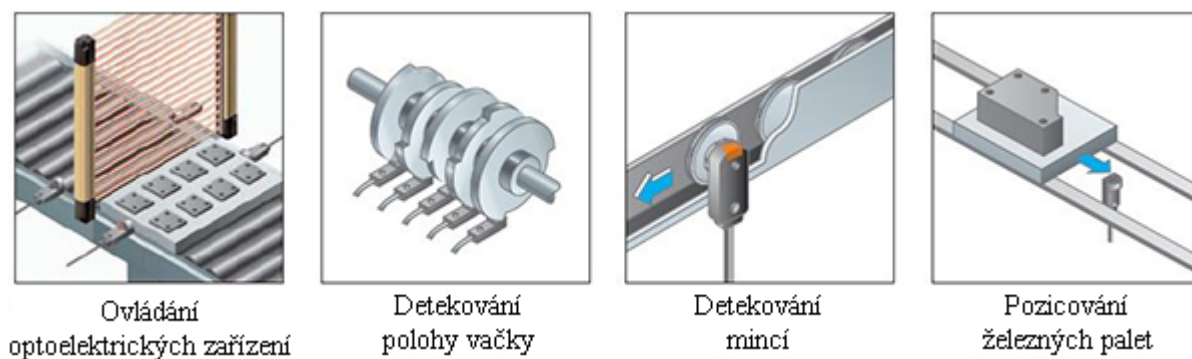
Seznam obrázků

Seznam příloh

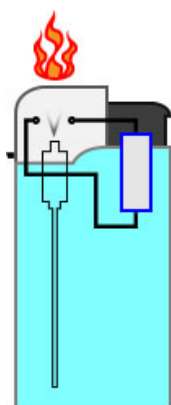
ÚVOD [4] [17] [20] [25] [51] [54]

V současné době jsou ve strojírenském průmyslu rychle a efektivně vyráběny velmi přesné výrobky. Je to díky moderním snímačům, které jsou při těchto výrobních procesech používány. Kromě měření kvality vyráběných součástek, kdy jsou měřeny síly, tlaky, deformace, polohy nebo rychlosti, také slouží k zajištění bezpečnosti při obsluhování strojů (obr. 1 a obr. 4). Již od 60. let minulého století jsou hojně využívány v hudebním průmyslu, protože k jejich funkci není potřeba magnetických ani elektricky vodivých součástí a jsou vhodné pro snímání kmitů nekovových dílů hudebních nástrojů (obr. 3). Některé principy využívané samotnými snímači jsou také použity v každodenních činnostech běžného života (obr. 2).

Lze vybírat z mnoha kvalitních snímačů, které se rozdělují se na dvě základní skupiny – aktivní a pasivní. Aktivní ke své funkci využívají přímou transformaci energie z měřeného objektu, takže nepotřebují vnější zdroje elektrické energie. Naproti tomu snímače pasivní touto transformací nedisponují a k jejich činnosti jsou nutné vnější pomocné zdroje elektrické energie.



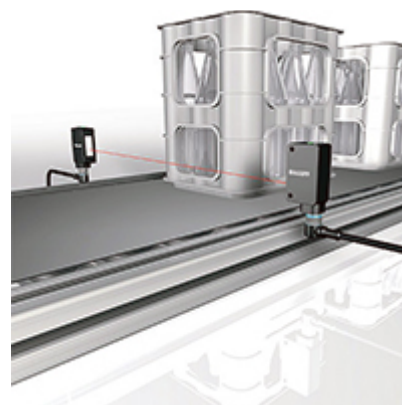
Obr. 1 Příklady použití indukčních snímačů [54]



Obr. 2 Zapalovač s piezokrystalem [51]



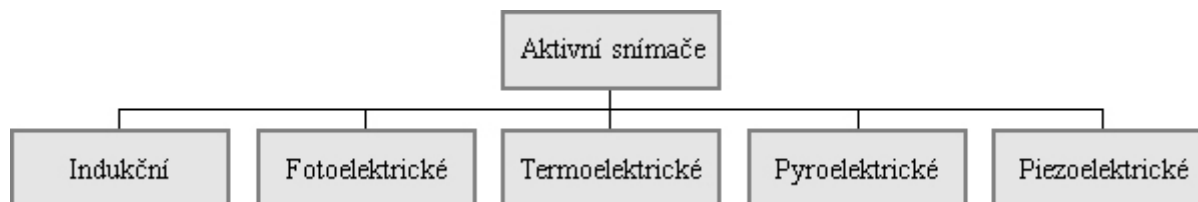
Obr. 3 Piezoelektrický snímač firmy Fishman [17]



Obr. 4 Použití fotoelektrického snímače firmy Balluff [4]

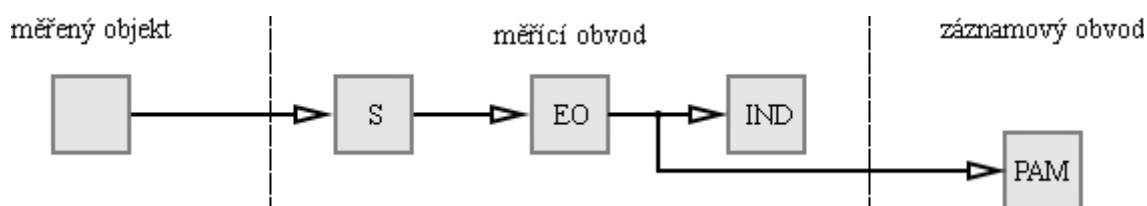
1 ZÁKLADNÍ POJMY [9] [23] [25] [35] [36] [48] [56] [57]

Snímače se obecně dělí do různých skupin a podskupin. Na obr. 1.1 je znázorněno základní rozdělení aktivních snímačů podle principu, které se dále mohou dělit na další podkategorie jako např. – mechanické (síla, moment, tlak, mechanické napětí, poloha, rychlost, zrychlení, průtok), tepelné (teplota, teplo, tepelný tok), elektrické (napětí, proud, indukčnost, odpor), a ostatní (světelný tok, svítivost, vlhkost atd.).



Obr. 1.1 Rozdělení aktivních snímačů podle principu

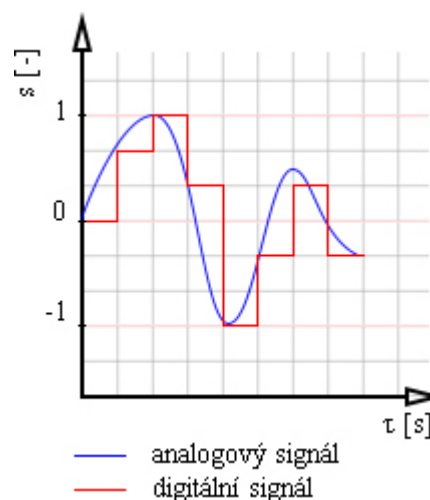
Aby bylo možné tyto veličiny měřit, je důležité zapojit snímače do měřicího obvodu, který zajišťuje měření potřebných veličin v měřicí soustavě nebo technologickém procesu. Schéma na obr. 1.2 znázorňuje zapojení jednotlivých členů, uspořádaných tak, aby bylo splněno požadované měření. Naměřená výstupní veličina pak musí mít takový tvar, aby byla dále zpracovatelná dalšími obvody měřicího či řídicího systému.



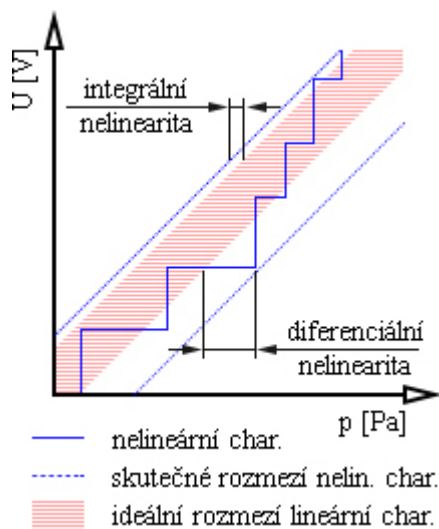
Obr. 1.2 Schéma měřicího obvodu [57]

První člen měřicího obvodu tvoří prvek označovaný jako snímač (na obr. 1.2 označen 'S'), který je jednou z nejdůležitějších částí měřicí soustavy a přímo ovlivňuje kvalitu samotného výsledku měření. Při výběru snímače je požadováno splnění některých základních požadavků, jako jsou např. – jednoznačná nebo lineární závislost výstupní veličiny na veličině vstupní, vysoká citlivost, požadovaná přesnost, vysoká časová stálost, minimální zatěžování měřeného objektu, maximální elektrický výkon, maximální spolehlivost, jednoduchá konstrukce, jednoduchá údržba, cenová dostupnost, co největší odolnost vůči vnějším vlivům jako je teplota, vlhkost nebo tlak. Snímač zastává dvě funkce, kdy první je sběr informací a druhá je jednoduchý nebo několikanásobný převod neelektrické vstupní veličiny na elektrickou výstupní. Jednoduchý spočívá v přímém, často nelineárním, převodu. Naproti tomu několikanásobný převádí neelektrické veličiny na jiné neelektrické a ty se pak dále mění na výstupní elektrické. Ty však nemusí být vhodné pro další přímé zpracování, a tak je do měřicího obvodu přidán blok elektronických obvodů (na obr. 1.2 označen 'EO'), zajišťující převedení výstupní veličiny na požadovaný tvar. Je složen z převáděcích členů, nebo-li převodníků a patří do nich např. zesilovače, generátory, můstkové obvody, filtry, počítačové obvody. Nejčastěji jsou pro elektronické zpracování požadovány tyto elektronické veličiny – napětí, proud nebo kmitočet. Ty jsou pak dále zpracovávány indikátorem (na obr. 1.2 označen 'IND'). Posledním členem je paměť (na obr. 1.2 označen 'PAM'), sloužící k vyhodnocování a uchování naměřených hodnot po určitou dobu.

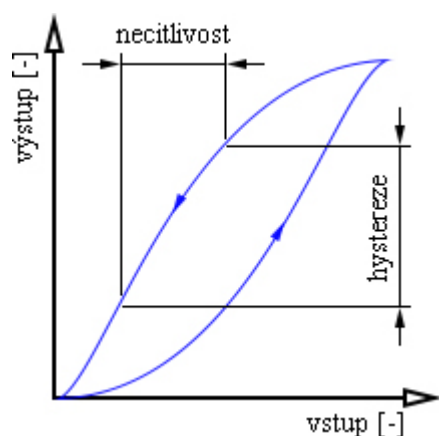
Měření neelektrických veličin elektrickou cestou je stále více uplatňováno nejen ve strojírenství, ale i ve vědeckém výzkumu. Je to díky výhodám, kterými tato metoda disponuje. Mezi tyto výhody patří malá hmotnost a rozměry snímače, vyšší přesnost, vyšší citlivost, vyšší rychlost snímání, možnost dálkového měření, možnost strojového zpracování výsledků, možnost měření na velkém počtu míst, výstupní signál v analogovém nebo číslicovém formátu (obr. 1.3). Elektrická metoda však obsahuje i určité nevýhody. Jsou to většinou vyšší náklady na měřicí soustavu, vyšší náklady na údržbu, nutnost odpovídající kvalifikace obsluhy. Mezi další omezující faktory obecně patří nelinearita, hystereze a necitlivost měřidla. Nelinearita měřidla udává odchylku skutečné charakteristiky od ideální přímkové (lineární), která se určuje na základě výběru hodnot v celém rozsahu.



Obr. 1.3 Porovnání analogového a digitálního signálu [48]



Obr. 1.4 Nelinearita měřidla [23]



Obr. 1.5 Hystereze měřidla [23]

Na obr. 1.4 je znázorněna integrální a diferenciální nelineární závislost vstupujícího naměřeného tlaku 'p' na výstupní napětí 'U'. Integrální nelinearita je dána odchylkou od skutečné charakteristiky a diferenciální je dána právě touto odchylkou v určitém bodě. Časté příčiny nelinearity měřicího zařízení jsou většinou – neúplná kalibrace pro celý rozsah měřidla, chyba ve vzorkovacích kusech, opotřebování přístroje nebo jeho konstrukční znaky.

Hysterezní křivka zobrazená na obr. 1.5 udává vlastnosti měřicího přístroje, jehož výstupní signál, při daném vstupním signálu, závisí na sledu předchozích hodnot vstupního signálu. Dá se také definovat jako zpoždění mezi akcí a reakcí měřidla a určuje hodnotu chyby, pokud se toto zpoždění objeví. V praxi se lze běžně sekat s hysterezí mechanickou, magnetickou a dielektrickou. U mechanické se jedná o zpoždění vyvolané deformací za napětím, magnetická je podmíněna nevrátností magnetování feromagnetické látky (jinak řečeno, magnetizace a magnetická indukce není jednoznačně určena intenzitou magnetického pole) a dielektrická vyjadřuje závislost dielektrické polarizace při dané intenzitě elektrického pole na způsobu, jakým bylo této intenzitě dosaženo.

Necitlivost, označována také jako necitlivé pásmo, udává rozmezí, ve kterém nevzniká zaznamenaná změna údaje od ustálené hodnoty tzn. na výstupu není žádný signál. Většinou se vyskytuje tam, kde je přítomno tření nebo pohyblivé části.

2 INDUKČNÍ SNÍMAČE [2] [11] [33] [38] [40] [47] [48] [57]

Indukční snímače reprezentují rozsáhlou část z řad aktivních snímačů, využívající spojení permanentního magnetu a cívky, kdy na vinutí vzniká indukované napětí určené Faradayovým zákonem:

$$U_{IND} = -N_z \frac{d\Phi}{dt} \quad , \quad (2.1)$$

kde: U_{IND} okamžitá hodnota indukovaného napětí [V]
 N_z počet závitů cívky [-]
 $d\Phi/dt$ časová změna magnetického toku vázaného se závitů cívky [Wb/s]

Měření objektu probíhá bezdotykově a většinou je měřena síla, tlak, krouticí moment, rychlost, zrychlení, vibrace nebo průtok. Snímaná neelektrická veličina může působit buď na rychlost změny magnetického toku spojeného se závitů pevné cívky ' N_z ', nebo při stálém toku měnit počet závitů, které jsou v daném časovém okamžiku vázány s magnetickým tokem. Proto se indukční snímače dále rozdělují na elektromagnetické a elektrodynamické. Na obr. 2.1 je znázorněn princip elektromagnetického senzoru, kde je na stálém magnetu '2' nasazena cívka '1', obsahující ' N_z ' závitů. V určité vzdálenosti ' d ' je snímaný feromagnetický objekt '3'. Indukované napětí je dáno neustálým kmitáním měřeného objektu o výchylku ' y ' a je úměrné rychlosti pohybu, přičemž

$$\Phi = \frac{F_m}{R_m} \quad , \quad (2.2)$$

kde: Φ magnetický indukční tok [Wb]
 F_m magnetomotorické napětí [Az]
 R_m magnetický odpor [Az/Wb]

Za předpokladu harmonického kmitání a zanedbání magnetického odporu feromagnetické části vzniká napětí snímače:

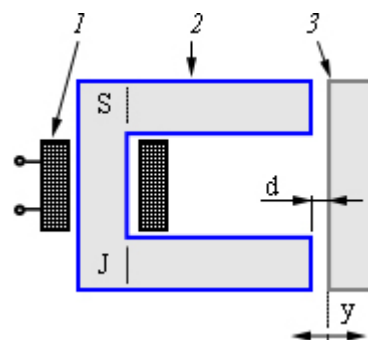
$$U_{IND} = \frac{N_z \mu_0 S F_m v}{d^2} \quad , \quad (2.3)$$

kde: μ_0 permeabilita vakua [H/m]
 S plocha vzduchové mezery [mm²]
 d vzdálenost mezi magnetem a objektem [m]
 v rychlost pohybu feromagnetické části [m/s]

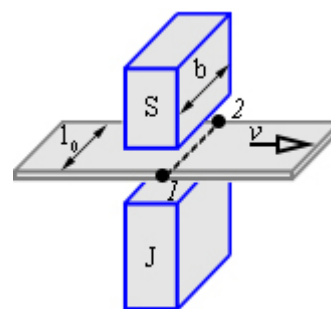
Princip elektrodynamického snímače je znázorněn na obr. 2.2, kde pohyb elektricky vodivého pásu o šířce ' l_0 ' vyvolá v magnetickém poli cívky vířivé proudy a mezi body '1-2' je možné naměřit indukované napětí (podmínkou je, aby ' $l_0 \leq b$ ')

$$U_{IND} = B \cdot v \cdot l \quad , \quad (2.4)$$

kde: B indukce magnetického pole [T]
 v rychlost vodiče ve směru kolmém na magnetické siločáry [m/s]
 l délka vodiče [m]

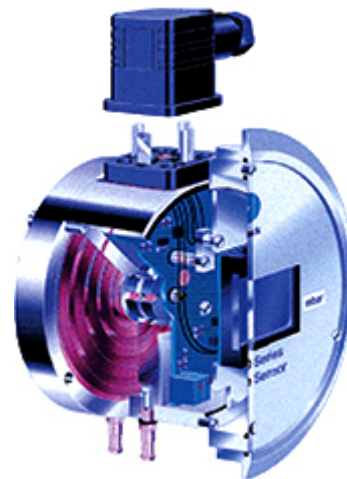


Obr. 2.1 El-mag. snímač [57]

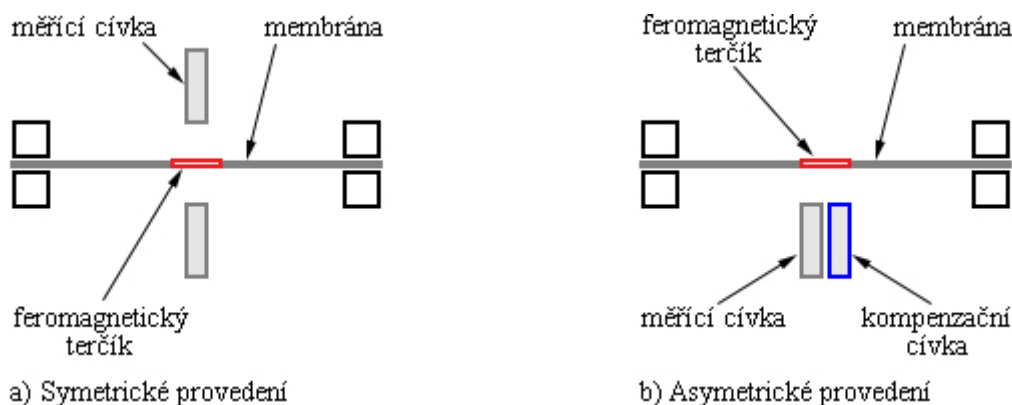


Obr. 2.2 El-dyn. snímač [57]

Existuje mnoho způsobů využití indukčních snímačů v praxi, avšak níže budou uvedeny pouze konkrétní aplikace pro měření tlaku, vibrací a polohy. Pod pojmem měření tlaku si lze většinou představit snímač, na který působí síla či objekt a díky doteku působící síly s povrchem snímače je možné naměřit tlak. Dotyková metoda měření tlaku však nemusí být vždy pravidlem. Spojením membrány a indukčního snímače je dosaženo velmi kvalitního bezdotykového měřicího zařízení tlaků nebo diferenčních tlaků. Na obr. 2.3 je uveden řez snímačem malých rozdílových tlaků firmy Druck, který je opatřen prolisovanou kovovou membránou. Z hlediska parametrů snímače je rozhodující materiál membrány, kdy základem jsou dobré pružné vlastnosti, stabilita rozměrů při zatěžování a stabilita při zvýšených teplotách. Materiál je zpravidla nemagnetický, pouze střed membrány je opatřen feromagnetickým terčíkem, jehož polohu snímá indukční snímač. Zdvih samotné membrány je velmi malý a pohybuje se řádově v desetinách milimetru. Čím větší tato membrána bude, tím je měřicí přístroj citlivější a lze měřit menší tlaky. Konstrukce snímače může být symetrická, kde cívky snímače jsou uloženy po obou stranách membrány (obr. 2.4a) nebo asymetrická, kde na téže straně je umístěna cívka měřicí i kompenzační (obr. 2.4b). Toto uložení je z hlediska výroby jednodušší a méně nákladné, avšak nevýhodou je menší přesnost. Senzory řady LP 1000 vynikají robustní konstrukcí, odolností, přesností, dlouhodobou stabilitou měření a nízkou cenou.



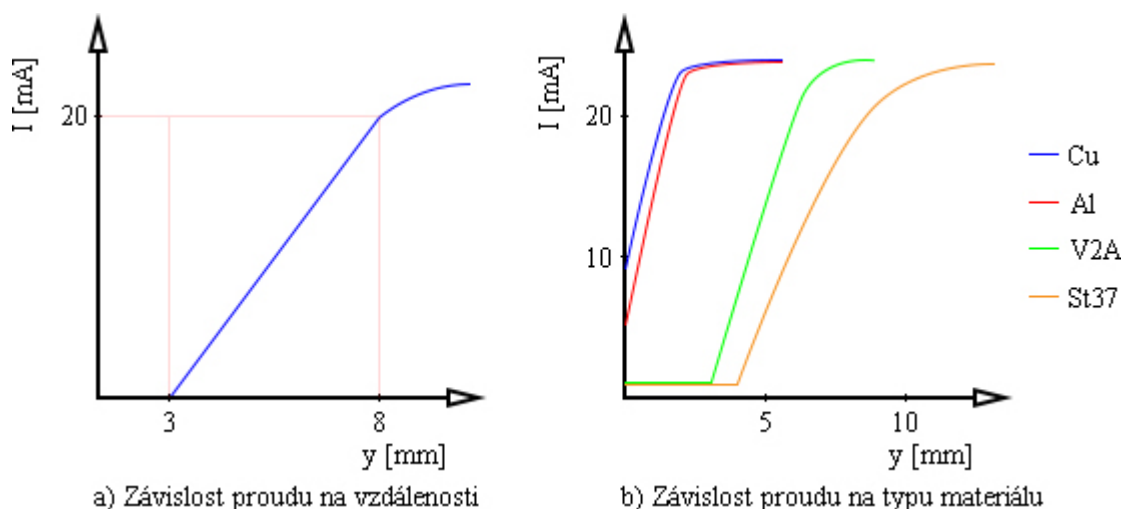
Obr. 2.3 Snímač LP 1000 [3]



Obr. 2.4 Konstrukční provedení indukčního snímače [3]

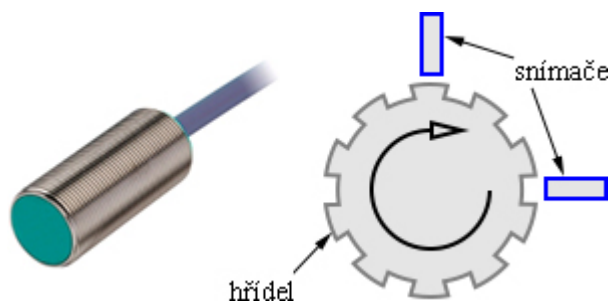
Měření tlaku je zapotřebí v mnoha technologických procesech a průmyslových odvětvích. V chemickém a petrochemickém průmyslu je nutné, v případě manipulace s biologicky nebezpečným materiálem, udržovat malý podtlak, aby nedošlo ke kontaminaci okolí. Ve zdravotnictví je požadováno čisté prostředí, kterou zajišťuje dokonale řízená vzduchotechnika. Ve strojírenství je klíčové kontrolovat vyrobené výrobky např. kontrola vzduchotěsnosti výrobku. Snímače zachytí pokles tlaku a vyhodnotí, zda je výrobek vadný či nikoliv. U membránových snímačů tlaku je důležité, v jaké pracovní poloze se nachází. S ohledem na hmotnost membrány je vhodné, aby poloha membrány byla svislá. Ve vodorovné poloze je nutné korigovat odchylku (posuv) a vibrace membrány z důvodu její hmotnosti.

Obecnou nevýhodou indukčních snímačů je nejen vysoká závislost výstupního signálu na vzdálenosti od měřeného objektu, ale také závislost měřicího rozsahu na typu materiálu měřené součásti. Na obr. 2.5a je uvedena závislost výstupního proudu na vzdálenosti snímače firmy Pepperl+Fuchs. Linearita a maximum měřicího potenciálu snímače je v rozmezí 3 až 8 mm. Po překročení 8 mm výstupní proud značně klesá, přestává být lineárně závislý na vzdálenosti a do měření je vnesena chyba. Z grafu na obr. 2.5b je patrné, že pro materiály typu měď nebo hliník se měřicí rozsahy výrazně snižují a jsou tak omezeny pro bezdotykové měření na krátké vzdálenosti. Na obr. 2.6 jsou pak uvedeny snímače a jejich použití v praxi, kdy změna velikosti generovaného proudu signalizuje pohyb a polohu otáčejícího se motoru nebo jiných rotačních součástí.



Obr. 2.5 Charakteristiky závislostí snímače IA8-30GM-I3 [11]

Další aplikací ve strojírenství je kontrola polohy pojezdu zobrazená na obr. 2.7, kde je lisovací hlava firmy K.STROJ, která je součástí automatického lisovacího stroje MARK 1, vyrábějící dřevěné vazníky různých tvarů a velikostí. Hydraulická hlava je zde opatřena dvěma indukčními snímači od firmy Sick (zvýrazněn zeleně), sloužící nejen k detekci maximální možné polohy, ale také jako pojistka při poruše stroje nebo také pro nalezení výchozí pozice pojezdu při kalibraci. Pokud zařízení dojde do své krajní polohy, indukční snímač se přiblíží ke kovovému rámu lisu, dojde k elektromagnetické indukci, pomocí připojených kabelů je přenesen signál do řídicí jednotky stroje a posuv lisovací hlavy je zastaven. Citlivost tohoto snímače je maximálně do 10 mm.



Obr. 2.6 Použití snímače IA8-30GM-I3 [40]



Obr. 2.7 Lisovací hlava a snímač IM30-10BPO-ZC1 [38]

3 FOTOELEKTRICKÉ SNÍMAČE [1] [14] [15] [38] [44] [46] [49] [50] [57] [58]

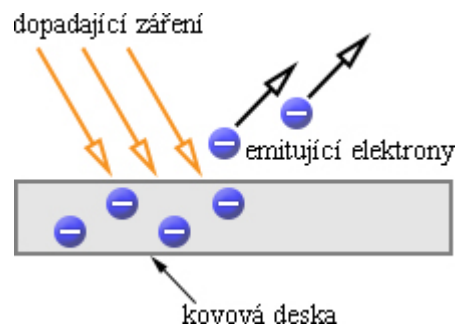
Snímače světelného záření jsou založeny na fotoelektrickém jevu, který může být dvojího druhu. Prvním je vnější fotoefekt, znázorněný na obr. 3.1, kdy působením dopadajícího záření se uvolňují elektrony z povrchu zpravidla kovového materiálu, emitující do prostoru nebo vnitřní, založený na podobném principu jako vnější jev, avšak elektrony, které jsou uvolněny působícím světelným tokem, neopouští látku a zůstávají uvnitř krystalu.

Fotoelektrické snímače představují polovodičové diody, nebo-li fotodiody, skládající se ze dvou polovodičů (P a N). Spojením těchto dvou typů vznikne tzv. hradlová vrstva, která v ideálním případě propouští elektrický proud pouze jedním směrem. Snímač na obr. 3.2 je konstruován tak, že pomocí okénka nebo soustředící čočky '1' prochází světlo skrz tenkou kovovou polopropustnou elektrodou '2' a dopadá na přechod PN '3'. Všechny tyto vrstvy jsou uloženy na základní kovové vrstvě '4'. Světlo narazí do elektronu ve valenční vrstvě atomu PN přechodu a předá mu tak svou energii. Elektron tuto energii absorbuje a pokud získá dostatek energie, vznikne tzv. volný elektron, který se dostává do prostoru uvnitř krystalové mřížky polovodiče. Tyto uvolněné elektrony jsou pak volné nosiče náboje, které snižují elektrický odpor polovodiče, resp. zvyšují jeho vodivost a pokud je tento polovodič uzavřen do elektrického obvodu začne jím téct elektrický proud, který je obecně daný množstvím emitujících elektronů a velikostí účinné plochy. Jinak řečeno, je závislý na intenzitě dopadajícího záření a hodnota generovaného proudu je dána vztahem:

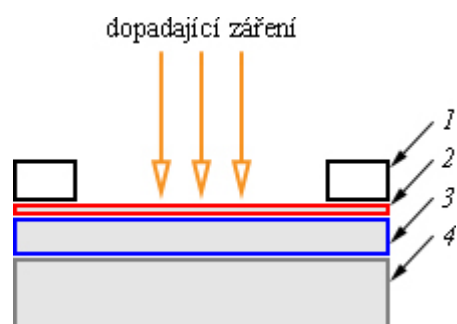
$$I = I_k - I_0 \left(\exp \frac{q U_D}{\eta \kappa T} - 1 \right) , \quad (3.1)$$

kde: I	generovaný proud na výstupu [A]
I_k	proud ideálního zdroje [A]
I_0	proud neosvětlené diody [A]
q	velikost náboje elektronu (elementární náboj) [C]
U_D	napětí přiložené na diodu [V]
η	konstanta závislá na typu polovodiče a pohybuje se od 1 do 2 [-]
κ	Boltzmanova konstanta [J/K]
T	teplota PN přechodu [K]

Na obr. 3.3 je pak uvedena konstrukce snímače firmy Electronic Components, vybavený infračerveným filtrem a jeho pozorovací úhel se pohybuje kolem 130°.



Obr. 3.1 Vnější fotoelektrický jev [50]

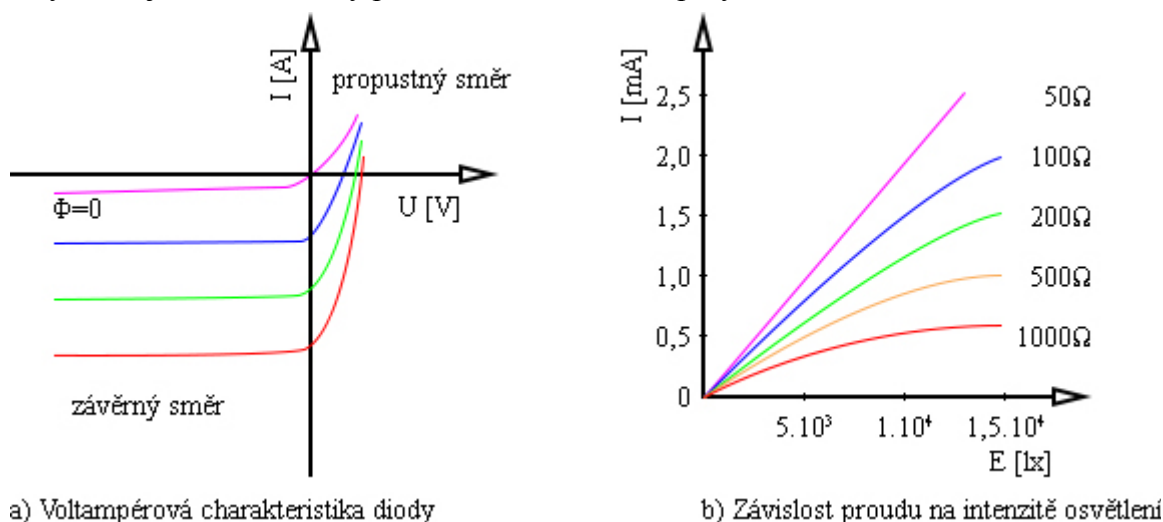


Obr. 3.2 Řez fotoel. snímačem [57]



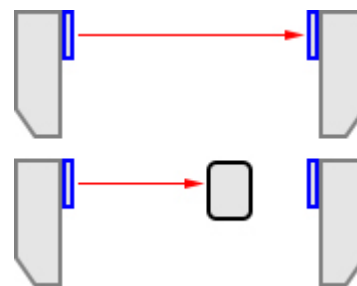
Obr. 3.3 Snímač BP104 [10]

Fotodiody mají svou typickou nesouměrnou voltampérovou charakteristiku, která je zobrazena na obr. 3.4a. Jednotlivé křivky znázorňují funkci proudu při různých intenzitách záření, včetně stavu bez osvětlení, kdy je světelný tok roven nule. I když na diodu nedopadá žádné záření, tak přesto v závěrném směru PN přechodu teče proud, ale na výstupu nevykazuje žádné napětí. Je to způsobeno právě hradlovou vrstvou mezi polovodiči P a N. Pokud je dioda vystavena dostatečnému záření, tato hradlová vrstva je proražena a teprve poté je možné na výstupu naměřit napětí, které je úměrné intenzitě dopadajícího záření. Podobně je tomu u charakteristiky závislosti proudu na intenzitě osvětlení zobrazené na obr. 3.4b. Čím vyšší je množství dopadajících fotonů, tím vyšší výstupní proud naměříme. Jednotlivé křivky ukazují charakteristiky pro různé zatěžovací odpory.

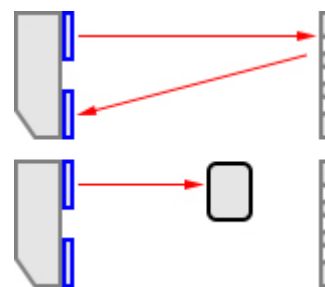


Obr. 3.4 Charakteristika a závislosti diody [14] [57]

Kromě závislosti na intenzitě osvětlení vykazuje dioda jistou teplotní závislost, projevující se tím, že s rostoucí teplotou roste závěrný proud. Naproti tomu se ale vyznačuje malou závislostí závěrného proudu na vloženém napětí. Hlavní předností fotodiody je vyšší mezní kmitočet, pohybující se řádově ve stovkách MHz, a tato vlastnost je hojně využívána pro konstrukci fotoelektrických snímačů, kdy reakční doba při detekci dopadajícího světla je velice krátká (řádově 10^{-6} až 10^{-9} s). Proto se využívají ve strojírenství pro měření polohy objektů, zajištění bezpečnosti nebo počítání vyrobených kusů. *Průchozí* metoda znázorněna na obr. 3.5 je založena na principu, kdy vysílač vypouští na jedné straně světelný paprsek nebo laser a ten je snímán na druhé straně přijímačem. Pokud se mezi snímači ocitne překážka, světelný tok je přerušen a snímač tuto změnu zaznamená. Nevýhodou tohoto snímání je jeho malý efektivní rozsah snímaného pole, daný velikostí čočky. Tato nevýhoda je však kompenzována dalekým dosahem, který činí až 250 m. U *reflexní* typu zobrazeného na obr. 3.6 je snímačem (vysílač i přijímač), vysílán signál, který je odražen pomocí odrazky z plastového optického vlákna, většinou kruhovitěho tvaru a změna signálu je opět zachycena a vyhodnocena.

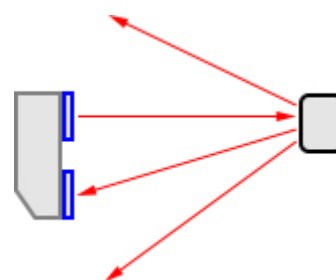


Obr. 3.5 Průchozí [49]



Obr. 3.6 Reflexní [49]

Efektivní rozsah snímaného pole je o málo větší než u předchozího zmíněného typu, ale je kompenzován kratším dosahem, který je pouze do 10 m. Posledním typem snímání je *difúzní* na obr. 3.7, fungující na principu vysílání signálu a jeho následného rozptýleného odrazu od snímaného objektu. Díky rozptylu paprsku při odrazu dopadá na přijímač pouze malé množství světla a toto způsobuje krátký dosah, který činí pouze 2 m. U tohoto typu detekce je nutné provést korekce pro různé typy povrchů snímaných materiálů a pro zajištění specifického rozpoznání objektů se používá testovací bílá matná deska.

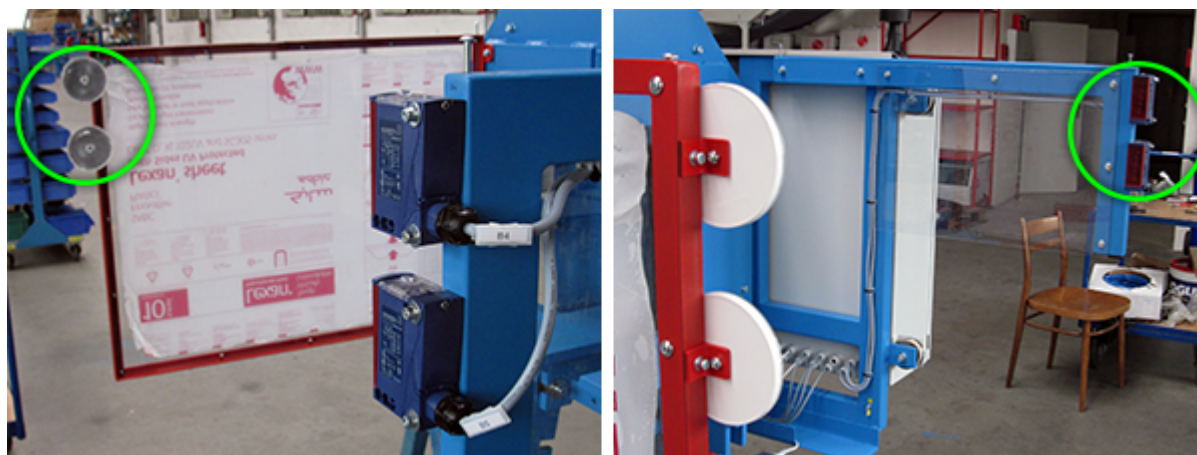


Obr. 3.7 Difúzní [49]

Na obr. 3.8 je uveden detail snímače firmy Schneider- Electric, který zajišťuje bezpečnost obsluhy stroje Posistrut (Posi-Joist™) zobrazeného na obr. 3.9, kde snímač a plastové optické vlákno jsou zvýrazněny zeleně. Byl zkonstruován firmou K.STROJ a používá se pro výrobu dřevěných stropních a podlahových nosníků nebo stěnových panelů. Jakmile se během provozu stroje dostane do pole s vysílaným paprskem nežádoucí objekt nebo osoba, tento paprsek je přerušen, snímač zaznamená změnu signálu, kterou pošle řídicí jednotce, ta ji vyhodnotí a stroj je zastaven během setin sekundy. K zajištění větší snímací plochy, a tím větší bezpečnosti pro obsluhu stroje, jsou použity dva fotoelektrické snímače, umístěné pod sebou. Plastové odrazky jsou většinou umístěny v poloze kolmé na dopadající světelný tok a jejich tolerance náklonu je přibližně 15°. Výhodou tohoto typu snímání je přesné rozpoznání neprůhledných a zrcadlicích se objektů podél celé optické osy, kompaktnost měřícího celku a jeho jednoduchá montáž. Naproti tomu nevýhodou této metody je horší detekce předmětů s lesklým či transparentním povrchem. V takovéto situaci je nutné použít speciální polarizační filtr, který zajistí korektnost při snímání právě takovýchto materiálů. Technická dokumentace uvádí maximální možný dosah výše zmíněného snímače do 15 m a v případě této aplikace více než postačující.



Obr. 3.8 Detail snímače [15]



Obr. 3.9 Využití fotoelektrického snímače XUX1ARCNT16 v praxi [38]

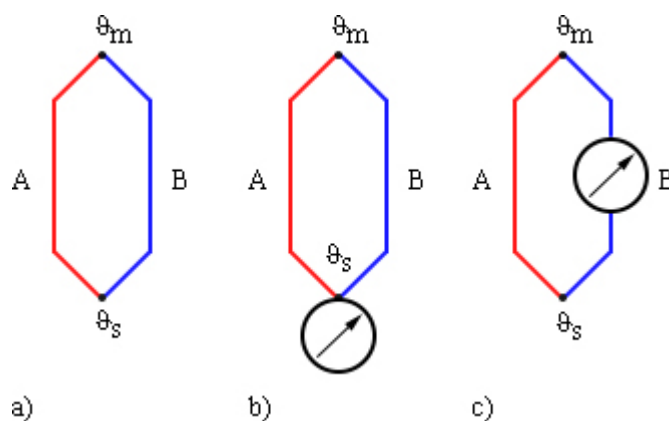
4 TERMOELEKTRICKÉ SNÍMAČE [2] [6] [7] [25] [26] [39] [45] [48] [57]

Skupina termoelektrických snímačů využívá termoelektrického jevu, kdy na styku dvou vodivě spojených kovů o různých teplotách může vzniknout rozdíl potenciálu, vytvářející termoelektrické napětí a elektricky vodivým obvodem prochází proud. Hodnota tohoto rozdílu je závislá na zvoleném typu materiálů. Vzniklé napětí je pak definováno vztahem:

$$U_t = a_T + b_T \Delta\vartheta + c_T (\Delta\vartheta)^2, \quad (4.1)$$

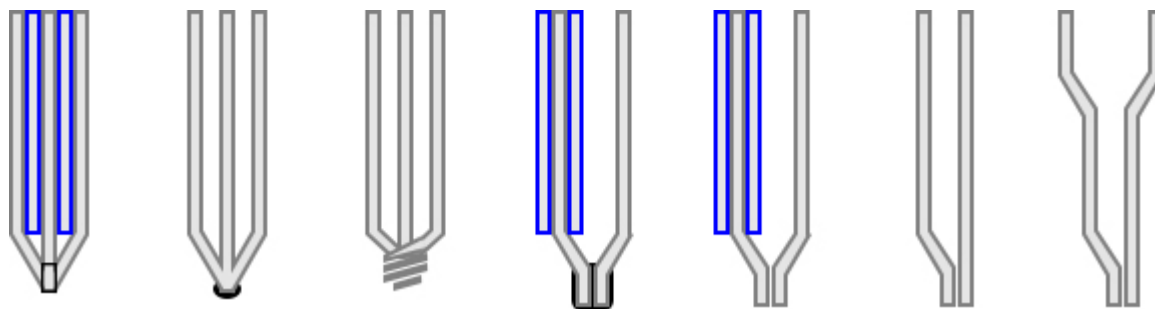
kde: U_t termoelektrické napětí [V]
 a_T, b_T, c_T konstanty pro určité druhy snímačů [-]
 $\Delta\vartheta$ rozdíl teplot v bodě styku dvou kovů [°C]

Aby byla zajištěna funkčnost, je nutné zapojit měřící články snímače do termoelektrického obvodu, znázorněného na obr. 4.1, kde jsou zobrazeny tři základní typy. Nejjednodušší zapojení je znázorněno na obr. 4.1a, kde je obvod složen ze dvou vodičů A a B. Spoje označené jako t_m představují měřící spoje a spoje označené t_s jsou spoje srovnávací. Aby byla zajištěna správnost funkce, musí být teplota srovnávacího spoje t_s konstantní. Pro případ měření je nutné do obvodu zapojit měřící přístroj a lze



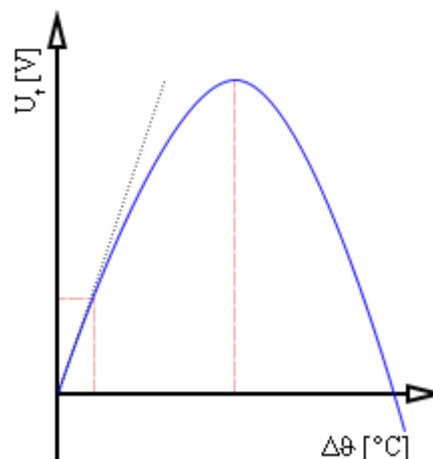
Obr. 4.1 Zapojení termoelektrického článku [26]

tak učinit dvěma způsoby uvedené na obr. 4.1b a 4.1c. Aby se při zapojení měřícího přístroje do obvodu nezměnilo termoelektrické napětí je třeba, aby obě přípojovací svorky měřidla měly stejnou teplotu jako termočlánky. Různé konstrukce spojů znázorněné na obr. 4.2 bývají ve formě drátů stejných průměrů, které jsou k sobě připojeny mechanicky, svařením nebo pájením. Mechanické provedení se používá pouze ve výjimečných případech a jsou na něj kladeny vysoké nároky, kdy spojení dvou drátků musí být pevné a vzájemný styk ploch musí být dokonalý, aby bylo zamezeno vzniku přechodových odporů. U svařování plamenem či elektrickým obloukem je důležité dbát na to, aby nedošlo k okysličení nebo nasycení materiálu uhlíkem. Při pájení se pájka nanáší pouze na vlastní spoj. V případě všech těchto variant musí být zajištěna vzájemná elektrická izolace drátků a je nutné je chránit před mechanickým či chemickým namáháním. K tomu slouží kovový kryt nebo jímka.

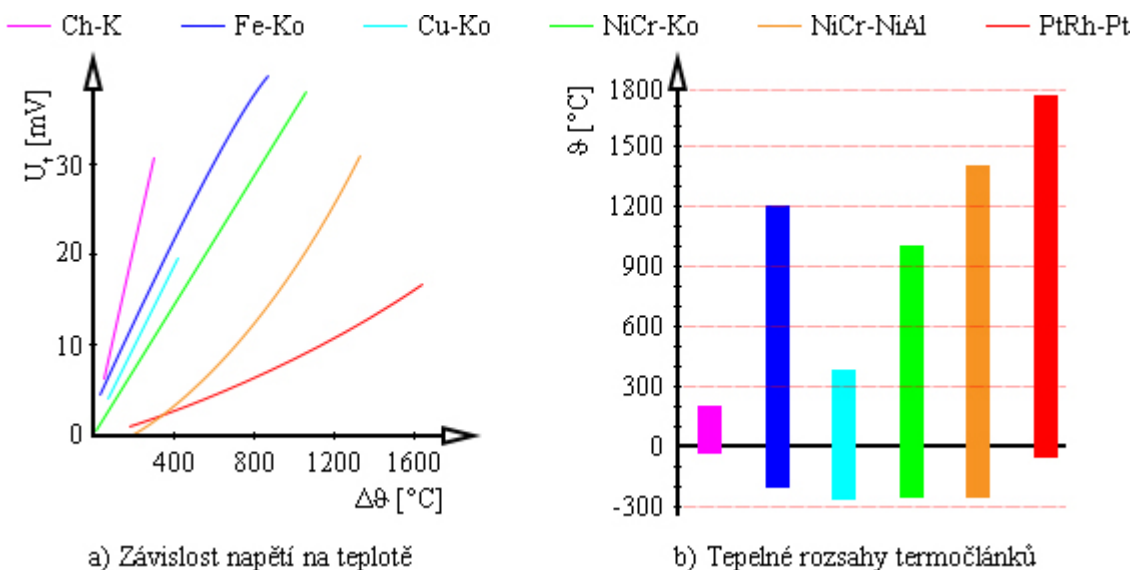


Obr. 4.2 Příklady konstrukce spojů termočlánku [48]

Výběr materiálu termočlánků je podmíněn základními požadavky, především lineární závislostí výstupního napětí na teplotě pro celý měřicí rozsah, odolností proti chemickým, mechanickým či korozním vlivům, požadovaným rozsahem teplot, požadovanou přesností a časovou stálostí popř. střední dobou života snímače. Na obr. 4.3 je znázorněna závislost, kdy se zvyšující se teplotou roste napětí do svého určitého maxima a poté začne klesat až na nulovou hodnotu. Dalším postupným zvyšováním teploty mění napětí znaménko a dále roste v záporném směru. Pro technickou praxi se využívá pouze počáteční úsek stoupající charakteristiky, kde je pouze minimální odchylka od lineariry. Dále je nutné, aby výstupní napětí bylo co největší. Čím větší je tento výstupní signál, tím je měření preciznější a naopak. Pokud není možné zajistit vyšší hodnoty na výstupu zařízení, musí být samotný měřicí přístroj kvalitnější a citlivější. Na druhou stranu, čím citlivější přístroj, tím je náchylnější vůči nepřenostem a vnějším vlivům, které se při měření mohou vyskytnout a vnesou do výsledku chybu. Dále je kladen velký důraz na stálost snímače, protože při vyšších teplotách se může stát, že dojde k rekrystalizaci nebo stárnutí materiálu v místě spoje. V takovém případě je nutno snímač obnovit. V praxi se běžně používají materiály a charakteristiky znázorněné na obr. 4.4a. Pro nižší teploty to jsou – Ch-K (chroman kopel), Fe-Ko (železo konstantan), Cu-Ko (měď konstantan), NiCr-Ko (nikl-hrom konstantan). Pro vyšší teploty se používají materiály slitin z niklové nebo platinové větve – NiCr-NiAl (nikl-chrom nikl-hliník), PtRh-Pt (platina-rhodium platina). Všechny tyto slitiny materiálů mají svoje normalizované označení a značí se velkým písmenem (K, E, J, N, B, R, S a T). Tepelné rozsahy pro výše uvedené základní termočlánky jsou znázorněné na obr. 4.4b, kde dolní hranice teploty začíná přibližně na 3 K (270,15°C). Podrobnější popis je uveden v příloze 1



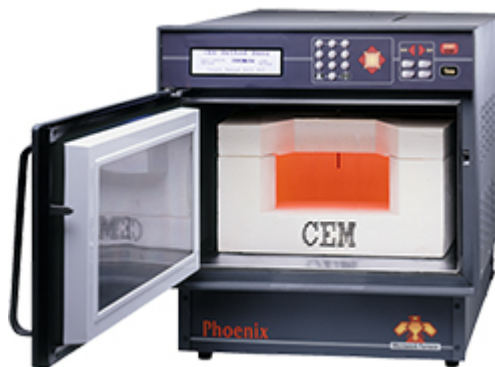
Obr. 4.3 Závislost napětí na teplotě [57]



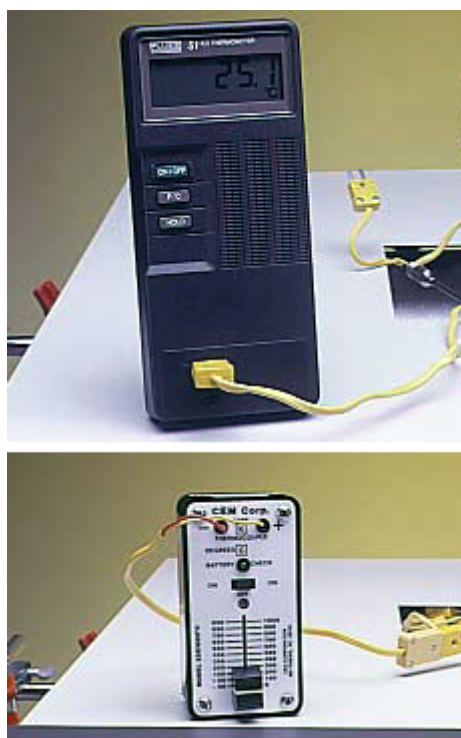
Obr. 4.4 Charakteristiky termočlánků [45] [57]

Termočlánky jsou jedny z mála nejstarších používaných snímačů neelektrických veličin a jsou hojně využívány pro svou jednoduchost, mechanickou a teplotní odolnost. Používají se především pro snímání teploty, množství tepla, hustoty tepelného toku nebo tepelného záření (infrazáření). Na obr. 4.5 je uveden konkrétní případ použití termoelektrického článku, kde se jedná o muflovou pec firmy CEM. Muflové pece se používají k výrobě smaltu, keramiky nebo pro tavení skla či pájení různých materiálů. Je vybavena integrovaným termočlánkem, který zde plní funkci jističe při kritickém přehřátí pece. Pomocí doplňujících zařízení, zobrazených na obr. 4.6, které opět pro svou funkci využívají termočlánku, je verifikována teplota uvnitř pece a provádí se případná kalibrace vestavěného termočlánku, kdy pomocí malého otvoru je prostrčen do pece měřící drátek a na displeji měřícího přístroje je zobrazena aktuální teplota uvnitř zařízení. Předností těchto miniaturních senzorů je poměrně vysoká přesnost, stabilita, opakovatelnost měření, jednoduchá manipulace a zapojení.

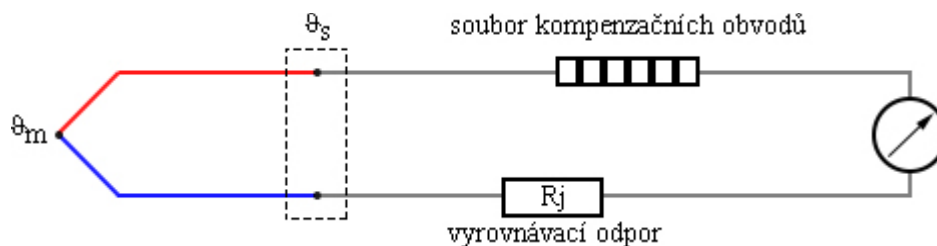
Při měření je důležité nezapomenout na parazitní vlivy, které mohou ovlivnit kvalitu naměřených hodnot. Mezi tyto vlivy patří chyba měřícího spoje ' θ_m ', která úzce souvisí s kvalitou použitého materiálu. Dále zde lze také zahrnout náchylnost materiálu ku stárnutí, odpařování vlastní složky, oxidace povrchu nebo místní deformace, kdy termoelektrické články nesmí být zbytečně mechanicky namáhány ohybem či krutem. Chybu srovnávacího spoje ' θ_s ' lze redukovat dvěma způsoby, konstatní teplotou srovnávacího spoje nebo kompenzací parazitního termoelektrického napětí srovnávacího spoje. Konstatní teplotu lze u obecných kovů termočlánku zajistit pomocí kompenzačního obvodu, složeného z náhradních kovů. Avšak napětí této přidané dvojice musí být shodné s napětím použitého materiálu (obr. 4.7).



Obr. 4.5 Muflová pec Phoenix [7]



Obr. 4.6 Doplňující zařízení [6]



Obr. 4.7 Zapojení termočlánku [48]

5 PYROELEKTRICKÉ SNÍMAČE [18] [19] [22] [24] [28] [45] [57]

Pyroelektrické snímače představují další způsob bezdotykového měření teploty. Pro svou funkci využívají pyroelektrický jev, kdy se za změny teploty materiálu, vykazující pyroelektrické vlastnosti, mění stupeň orientace polárních molekul krystalu, tedy i jeho polarizace a krystalická mřížka dielektrika se deformuje. Tato změna je dána vztahem:

$$\Delta P = p_e \Delta T \quad , \quad (5.1)$$

kde: ΔP změna polarizace [C/m²]
 p_e pyroelektrická konstanta [-]
 ΔT změna teploty [K]

Pyroelektrická konstanta je definována rovnicí:

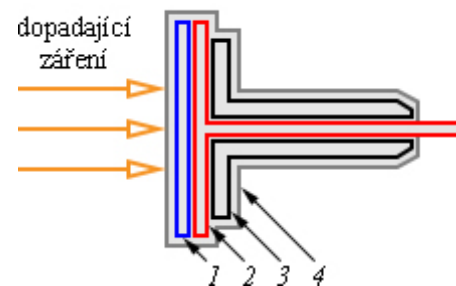
$$\Delta p_e = \frac{\Delta P}{\Delta T} \quad , \quad (5.2)$$

Spojení těchto dvou vztahů představuje dočasnou změnu elektrického náboje:

$$\Delta Q = S \frac{\Delta P}{\Delta T} \Delta T \quad , \quad (5.3)$$

kde: ΔQ změna elektrického náboje [C]
 S plošný obsah povrchu snímače vystavený záření [m²]

Takto teplem generovaný náboj se velice rychle rozptýlí, protože materiál krystalu má konečný odpor a lze tak vykonávat pouze dynamické měření. Je možné ho dosáhnout pomocí modulátoru, kterým je vybaven samotný měřicí přístroj. Většinou se jedná o rotující lopatku, vytvářející clonu, která zajišťuje výsledné střídavé napětí, jehož amplituda je úměrně závislá dopadajícímu tepelnému záření a tedy i teplotě snímaného tělesa. Na obr. 5.1 je znázorněn řez jednoduchým snímačem, kde na snímací pyroelektrický prvek '1' dopadá tepelné záření, které je dále přenášeno, přes vnitřní elektrodu '2', izolovanou pomocí vrstvy '3' od kovového krytu senzoru '4', sloužící jako vnější elektroda. Na obr. 5.2 je pak uveden detail vnitřností snímače firmy InfraTec.



Obr. 5.1 Řez pyroel. snímačem [45]

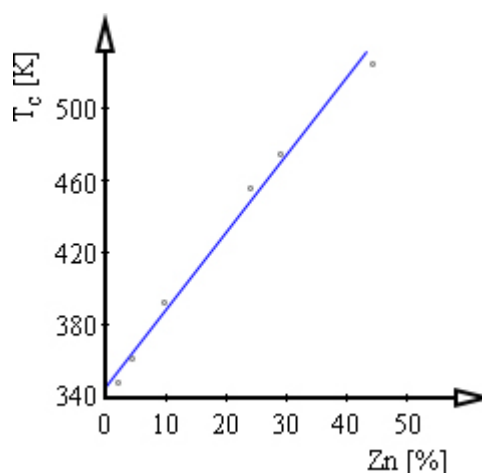


Obr. 5.2 Snímač typu LIE-200 [24]

Pro výrobu snímačů jsou používány materiály, disponující anizotropní krystalickou strukturou. Avšak většina těchto látek nevykazuje pyroelektrické vlastnosti, a je nutné vykonat speciální úpravu, kdy se materiál zahřeje nad určitou teplotu (Curierova) a je vystaven silnému elektrickému poli, které upraví orientaci náhodně uspořádaných prvků tzv. dipólů. Po postupném ochlazení a ustálení teploty se tato orientace nemění a materiál se stává pyroelektrickým. Je důležité, aby při měření pomocí takto upravené látky, byla snímaná teplota dostatečně nízká, protože jakmile je překročena Curierova mez, ztrácí krystal piezoelektrické i pyroelektrické vlastnosti. Tato hranice se pro různé materiály liší.

Jako konkrétní příklad pyroelektrického materiálu lze uvést slitinu CdZnTe (kadmium-zinek-tellur) s obecným označením CZT, kdy při zvyšování obsahu zinku ve sloučenině se rapidně mění horní hranice Curieovy teploty uvedeného materiálu, zobrazené na obr. 5.3. Dalšími typickými zástupci hojně využívaných látek pro výrobu senzorů jsou olověný titanát zirkoničitý a tantalát lithia.

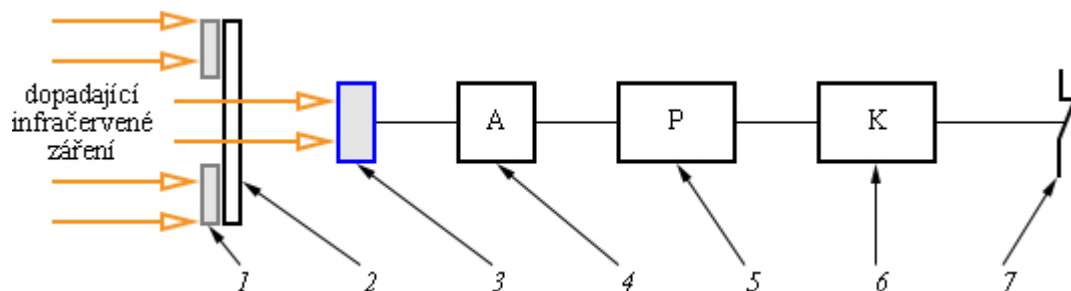
Jelikož pyroočlanky reagují na změnu teploty ve snímaném okolí, jsou velmi hojně využívány k rychlé detekci požáru, kdy běžné detektory plamene, kvůli svým dlouhým reakčním dobám, nejsou vhodným řešením. Pro takovéto případy je ideální využít jeden z mnoha kvalitních snímačů ohně firmy General Monitors, zobrazeného na obr. 5.4. Schéma zapojení je uvedeno na obr. 5.5, kdy pomocí okénka '1' proudí světelné záření přes speciální optiku '2', propouštějící pouze infračervenou část spektra na citlivý pyroelektrický prvek '3'. Změny amplitudy napětí způsobené tímto zářením jsou zaznamenávány analogovým elektrickým obvodem '4' a vyhodnoceny spolu s procesorem '5', který dále posílá zpracovaný signál do komunikačního obvodu '6' a ten nakonec vyšle impulz na relé '7'. Výhodou oproti komerčním senzorům, které většinou stále zdroje záření ignorují a reagují pouze na proměnné infračervené podněty, je to, že díky spojení systémů MSIR a NNT (Multi-Spectrum-InfraRed a Neutral-Network-Technology), eliminující spuštění falešného poplachu, je snímač FL4000H schopný rozpoznat typické ohně, produkované alkoholem, benzínem, leteckým palivem a uhlovodíkem, proto je především používán pro těžařské společnosti, rafinérie ropy nebo zemního plynu, chemický a petrochemický průmysl, areály plynovodů nebo letiště. Dalším pozitivním faktorem je poměrně daleký dosah, který činí 64 m. Pro zajištění správnosti funkce, je nutné, aby byl přístroj umístěn na vhodně zvoleném místě bez fyzických překážek, pevně umístěn bez zbytečných vibrací a sledovací okénko se musí udržovat, pokud možno, suché a bez nečistot.



Obr. 5.3 Závislost Curieovy teploty na obsahu zinku slitiny CdZnTe [22]



Obr. 5.4 Snímač FL4000H [18]



Obr. 5.5 Schéma zapojení snímače FL4000H [19]

6 PIEZOELEKTRICKÉ SNÍMAČE [8] [21] [29] [30] [31] [32] [42] [43] [52] [53] [55] [57]

Ke konstrukci snímačů tohoto typu je využíván piezoelektrický jev, jehož základní princip (obr. 6.1) spočívá ve vzniku polarizace v určitých krystalech, za působení mechanických deformací, kdy se na povrchu vytváří zdánlivý náboj a po přiložení elektrod lze naměřit elektrické napětí, podobně jako tomu bylo u pyroelektrických detektorů. Jakmile je mechanické napětí odstraněno, dostane se krystalické dielektrikum do původního nedeformovaného stavu.

Na obr. 6.2 je tento jev znázorněn u šestibokého krystalu křemene, kde na výřez o rozměrech 'a', 'b', 'c' působí síla 'F' v osách 'x', 'y', 'z' kolmých na stěny vyříznuté destičky. Při působení deformační síly jen v tzv. optické ose 'z', se krystal nezelektrizuje. Jestliže je uvažováno pouze zatěžování v elektrické ose 'x', tak rovnoměrně rozložená síla 'F_x' vyvolá elektrickou polarizaci a její hodnota je přímo úměrná velikosti deformace, která je dána vztahem:

$$P_e = k_p p_x \frac{F_x}{S_x} \quad (6.1)$$

kde: P_e elektrická polarizace [C/m²]
 k_p piezoelektrická konstanta [pC/N]
 p_x tlak působící na stěnu 'bc' [Pa]
 F_x síla působící na stěnu 'bc' [N]
 S_x plocha stěny bc [mm²]

Velikost náboje 'Q_e', vznikající na každé stěně kolmé k ose 'x', je pak dána rovnicí:

$$Q_e = P_e S_x = k_p F_x \quad (6.2)$$

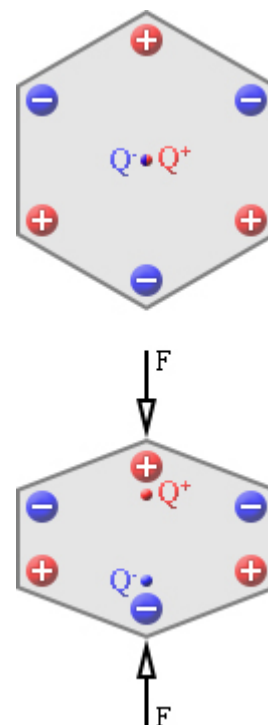
Z této rovnice plyne, že hodnota nábojů generujících se na stěnách 'bc', při působení sil výhradně podél elektrických os, nezávisí na geometrických rozměrech krystalu. Pokud je dielektrikum zatěžováno ve směru tzv. mechanické osy 'y', budou se opět tvořit náboje jen na plochách 'bc', ale směr orientace polarizace bude opačný:

$$+P_e = -k_p p_y = k_p \frac{F_y}{S_y} \quad (6.3)$$

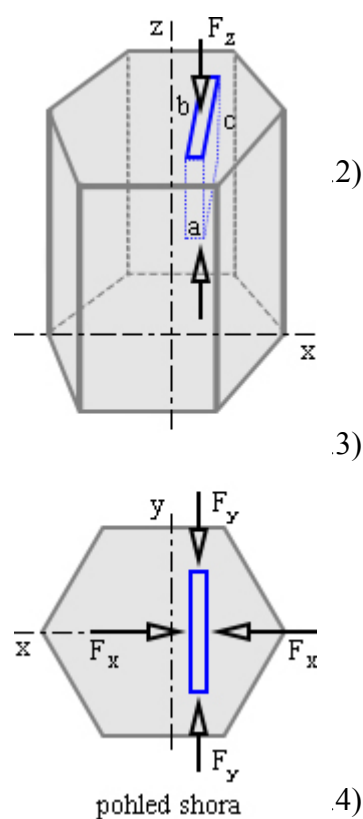
kde: p_y tlak působící na stěnu 'ac' [Pa]
 F_y síla působící na stěnu 'ac' [N]
 S_y plocha stěny ac [mm²]

Dosazením rovnice (6.3) do rovnice (6.2), kdy piezoelektrická konstanta 'k_p' má stejnou číselnou hodnotu jako v rov. (6.1), je dostán vztah pro velikost náboje vznikající na stěnách 'bc' při zatěžování v ose 'y':

$$+Q_e = P_e S_x = -k_p F_y \frac{S_x}{S_y} = -k_p F_y \frac{bc}{ac} \quad (6.4)$$



Obr. 6.1 Princip jevu [42]



Obr. 6.2 Piezokrystal [57]

nebo

$$Q_e = -k_p F_y \frac{b}{a}, \quad (6.5)$$

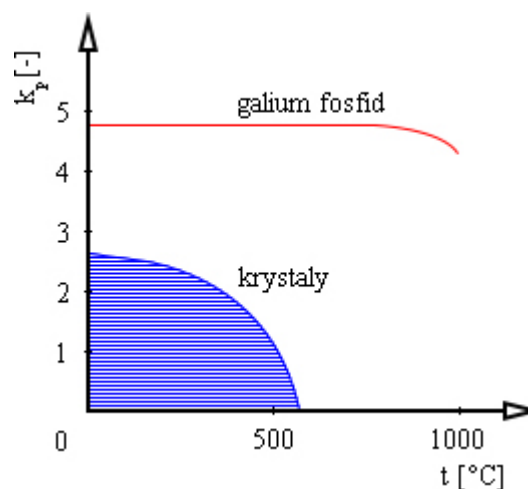
Tento vztah pak ukazuje, že při působení síly podél mechanických os krystalu jsou náboje, vznikající na stěnách 'bc', závislé na geometrických rozměrech a pomocí této vlastnosti lze za rostoucího poměru 'b/a' zvýšit citlivost piezoelektrického snímače.

Takto vzniklé elektrické náboje pak vytváří na dvou paralelních plochách o kapacitě 'C' napětí, dané vztahem:

$$U = \frac{Q_e}{C} = \frac{k_p}{C} F_x = k_u F_x, \quad (6.6)$$

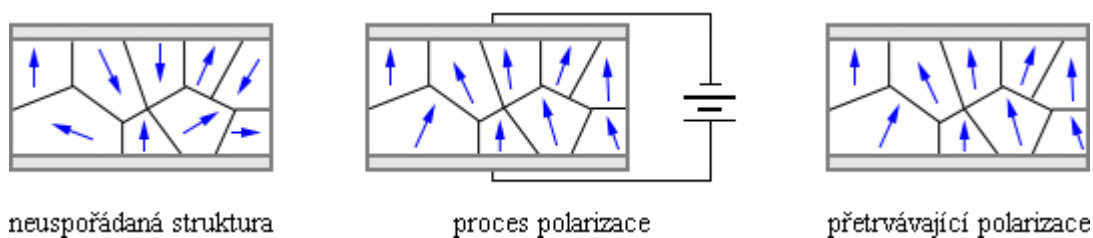
kde: k_u napěťová citlivost [V/N]

O tom, jak velké bude toto výstupní napětí, rozhodují vybrané materiály, které se dělí podle jejich struktury na krystalické, keramické a organické. Krystalické látky, nebo také monokrystaly, byly zpočátku omezené na přírodní látky jako je křemen nebo turmalín. Později začaly být průmyslově vyráběny různé slitiny jako např. lithium niobát, lithium tantalát nebo galium fosfid, které mají, pokud je s nimi opatrně zacházeno, velkou dlouhodobou stabilitu i za zvýšených teplot. Na obr. 6.3 je znázorněno porovnání závislosti piezoelektrického koeficientu ' k_p ' na zvyšující se teplotě galium fosfidu vůči přírodním krystalům, kdy piezoelektrická konstanta obecně představuje citlivost materiálu. Keramické materiály na bázi tuhých roztoků



Obr. 6.3 Závislost piezoelektrické konstanty na teplotě [41]

oxidů olova, zirkonu nebo titanu, označovány jako PZT keramika, mají přibližně o dva řády vyšší citlivost než monokrystaly a mohou být vyráběny levným slinovacím procesem. Takto vyrobené látky však nemají uspořádanou strukturu, tudíž nedisponují spontánními piezoelektrickými vlastnostmi a je nutné je podrobit polarizaci silným elektrickým polem, viz obr. 6.4. Samotný proces polarizování dipólů je nutné kontrolovat, protože při něm dochází k mechanickému působení mezi zrny a to může mít za následek i popraskání keramiky. Jejich vysoká citlivost je kompenzována nedostatečnou dlouhodobou stabilitou a jsou většinou používány ve spotřebních výrobcích např. v piezo zapalovačích plynu.



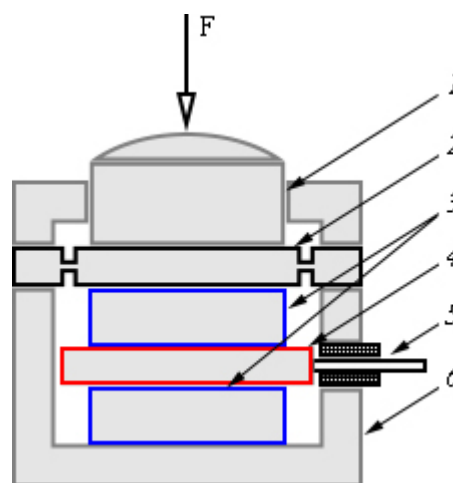
Obr. 6.4 Proces polarizace PZT keramiky [8]

Organické polymery jako polyvinylchlorid (PVC), polyvinylfluorid (PVF) nebo difluorpolyetylen (PVF₂) jsou většinou tenké, mechanicky odolné, vrstvy (od 9 μm do 1 mm), které jsou využívány např. v zařízeních měřící krevní tlak.

Piezoelektrické materiály lze uplatit v různorodých aplikacích, počínaje primitivním zapalovačem v domácnosti, přes snímače nekovových součástí hudebních nástrojů, až po vysoce citlivé senzory ve strojírenství. Hlavní předností piezoelektrických snímačů je jejich vysoká spolehlivost, malá, robustní a kompaktní konstrukce, nízkenergetická náročnost, lineární charakteristika a dlouhodobá stabilita. Jsou vhodné pro měření dynamických veličin, především tlakové síly, tlaku, zrychlení, vibrační nebo mechnického napětí. Následující text bude vyhrazen právě pro snímače, výše uvedených, neelektrických veličin.

6.1 Snímače sil

Princip piezoelektrického snímače tlakové síly je zobrazen na obr. 6.5, kde síla, působící na hlavu '1' je přenášena pomocí membrány '2' na dva piezokrystaly '3' zapojených proti sobě tak, že se jejich náboje sčítají. Výstup snímače je z centrální elektrody '4', která je opatřena izolační průchodkou '5'. Celá konstrukce je uzavřena v krytu '6', sloužící také jako elektrické a magnetické stínění. Při měření v tahu je u krystalu vyvoláno předpětí a postupným odlehčováním je měřena tahová složka. Jsou vyráběny v nejrůznějších konstrukčních velikostech a variantách pro tlakové i tahové síly v rozsahu od 10 kN až do 10 GN. Lze se setkat také s kombinovaným provedením, kdy se měří síly ve třech osách. Jako konkrétní příklady lze uvést snímač typu 9077C firmy Kistler, který je zobrazen na obr. 6.6. Jedná se o senzor pro měření tříosých dynamických nebo kvazi-statických (pomalu se měnících) složek, působících ve všech směrech. Jeho rozměry jsou 100x100x26 mm a je schopný snímat kolmé síly do 150 kN (s kombinací předpětíových doplňků až do 500 kN). Obsahuje tři piezokrystaly umístěných mezi dvěma ocelovými pláty opatřené keramickou vrstvou, sloužící jako elektrické uzemnění při montáži senzoru do různých strojních zařízení. Robustní konstrukce zaručuje minimalizaci vibrační z okolí a díky tomu může operovat ve vyšších frekvencích. Třípólový výstupní konektor disponuje polohovacím systémem, zajišťující správnou polohou pin konektorů a je chráněn proti otáčení. Tento snímač je velice hojně využíván např. pro zjišťování řezných sil při obrábění, nárazových sil při nárazových testech, vibračních sil komponentů pro kosmické účely, třecích sil, sil při testování výrobků, působících sil v aerodynamickém tunelu nebo pro kontrolu přetížení silničních vozidel. Mezi jeho silné stránky patří nezávislost přesnosti měření na pozici působící síly, ochrana proti přetížení, široký frekvenční rozsah, kompaktní rozměry, uzavřené pouzdro z nerezové oceli, robustní multipólní výstupní konektor a v neposlední řadě přijatelná cena. Naproti tomu je nutné vždy provést kalibraci snímače pro měření absolutních hodnot.



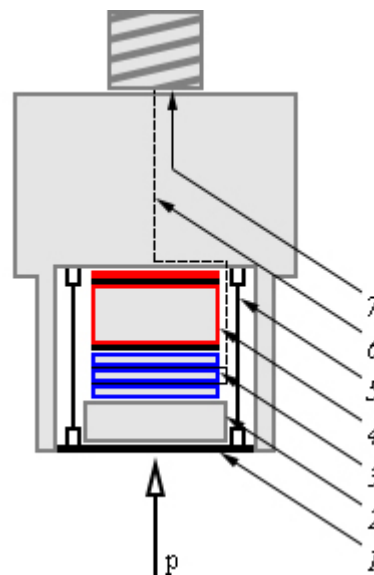
Obr. 6.5 Snímač tlakové síly [57]



Obr. 6.6 Snímač 9077C [29]

6.2 Snímače tlaku

Jelikož se náboj generovaný díky piezoelektrickému jevu rychle vybíjí a zaniká jsou tyto snímače upřednostňovány pro dynamické měření. U tohoto typu je měřený tlak přenášen pomocí membrány '1' na tlakovou destičku '2', zajišťující rovnoměrné rozložení tlaku na soubor piezoelektrických elementů '3'. Vzniklé náboje jsou pomocí elektrických vývodů elektrod '6' přiváděny do konektoru '7', opatřený závitem pro připojení kabelu. Dále je senzor vybaven součástí kompenzující zrychlení '4' a předpět'ovým prvkem '5', sloužící nejen k zajištění těsného spojení mezi jednotlivými vrstvami, ale je také vhodný ke zlepšení linearity. Většinou jsou vyráběny ve formě válcovitých tvarů různých velikostí. Na obr. 6.8 je zobrazen snímač typu 6001 vyroben firmou Kistler, sloužící pro měření dynamických tlaků do velikosti 25 MPa, s možným krátkodobým přetížením do 35 MPa. Membrána je zapuštěna do kovového nerezového těla a hermeticky tak uzavírá vnitřnosti snímače, kde mají krystaly velmi těsné uspořádání, které zajišťuje vysokou citlivost měření. Konektor, upevněný na konci, je pevný a opatřený keramickou izolací. Díky malým rozměrům a použití piezoelektrického materiálu s prodejním označením Polystable™, odolávající vysokým teplotám, je snímač vhodný pro měření v náročných podmínkách jako jsou např. spalovací motory, kompresory, pneumatické a hydraulické zařízení (s výjimkou vstřikovacích čerpadel). Při použití, ve výše uvedených případech, je důležité brát v úvahu přítomnost vysokých, rychle se měnících a nerovnoměrně rozložených teplot ve vlastním snímači, které způsobují nepřesnosti při měření (např. ve spalovacích motorech může být teplota ve válci až kolem 2000 °C). V takovém případě je nutné zabránit zbytečnému ohřevu těla snímače použitím izolace, kovových článků s vysokou tepelnou vodivostí nebo aktivního vodního chlazení, kterým jsou některé typy vybaveny. Při montáži připojovacích kabelů k hlavě snímače je někdy používána těsnící hmota (např. Loctite 221™), která zabraňuje samovolnému uvolnění, způsobené vnějšími vibracemi nebo rázy. Kromě zajištění dále utěsňuje samotný spoj a brání vstupu kapalin do konektoru, která by mohla poškodit snímač a elektrickou izolaci. Při aplikaci těsnící hmoty je nutné dbát ohled na její teplotní odolnost, která je většinou menší než u samotného snímače. Při demontáži spoje běžným ručním náradím je pak důležité, aby hmota byla plastická a lehce odstranitelná. Mezi výhody typu 6001 patří malé rozměry, linearita, široký tepelný rozsah použití (od -190° do 350°C) a vlastní vysoká frekvence. Mezi omezující faktory lze zahrnout nutnost chlazení při použití v extrémních tepelných podmínkách a omezení teplotního rozsahu snímače při použití těsnících tmelů.



Obr. 6.7 Snímač tlaku [55]



Obr. 6.8 Snímač 6001 [31]

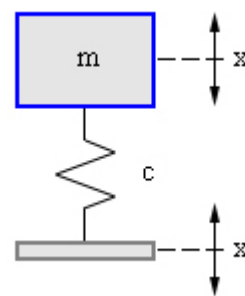
6.3 Snímače zrychlení

Tyto snímače, někdy také nazývané akcelerometry, pracují na principu působení síly od setrvačné hmotnosti 'm' na piezoelektrický článek o tuhosti 'c', která vyvolá jeho deformaci ' Δx ' (obr. 6.9). Příklad konstrukčního řešení je zobrazen na obr. 6.10, kde v ochranném kovovém krytu '1' jsou zabudovány dva piezokrystaly '2', opatřené na vnějších stranách tlumícími podložkami '3', které vylučují i menší nerovnosti povrchu krystalů a jejich deformace je vyvolána seismickým tělesem o značné hmotnosti '4'. Všechny tyto prvky jsou umístěny na středovém trnu '5'. Náboje jsou přiváděny pomocí vedení '6' do konektoru se závitem '7'. Na obr. 6.11 je uveden konkrétní příklad akcelerometru Kistler typu 8044, vybavený stabilním piezoelektrickým elementem s rezonanční frekvencí 90 kHz, který zajišťuje přesné měření a umožňuje snímači opakovaně podstoupit vysoké mechanické rázy až do přetížení 30 000 g prakticky bez ztráty přesnosti, kde jednotka 'g' představuje tíhové zrychlení. Vyvolaný náboj je přímo úměrný síle, a tedy i zrychlení v souladu s druhým Newtonovým zákonem:

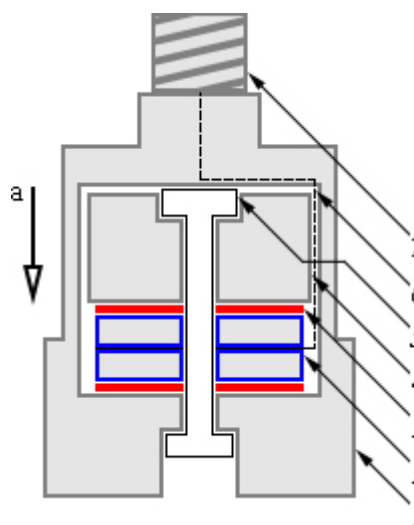
$$F = m \cdot a \quad , \quad (6.7)$$

kde: F působící síla [N]
 m hmotnost seismické hmoty [kg]
 a zrychlení [m/s²]

Vzhledem k velikosti předpětí, vyvolané seismickou hmotou na krystal, je akcelerometr schopen vydržet větší zatížení v jednom směru a neměl by být vystavován zrychlení větší než 20 000 g ve směru opačném, kdy působící síla je orientována od konektoru k základně. Uvedený snímač je ideální pro měření a analyzování vibrací s velmi vysokou amplitudou. Lze ho najít v motorech, dopravních prostředcích, průmyslové výrobě, odvětvích zpracovávající plasty nebo biomechanice, konkrétně pak při strojním kování úderem či tlakem, anebo pro výbušné tváření. Aby bylo měření co nejpřesnější, je nutné zajistit, aby montážní plochy byly rovné, zbavené nečistot a pokud možno ošetřené tenkou vrstvou maziva. Při měření vysokých hodnot g-zrychlení je nutné zajistit šroubový spoj konektoru proti samovolnému uvolnění epoxidovým tmelem. Díky jeho nízké hmotnosti a kompaktním rozměrům jej lze použít i na lehké součástky, aniž by výrazně ovlivnil jejich vlastní vibrace. Stabilní piezoelektrický element zajišťuje poměrně velký měřicí a tepelný rozsah (od -195 °C do 200 °C). Naproti tomu mezi jeho nevýhody patří nemožnost měření nízkých hodnot zrychlení a nepřítomnost uzemnění.



Obr. 6.9 Náhradní schéma [57]



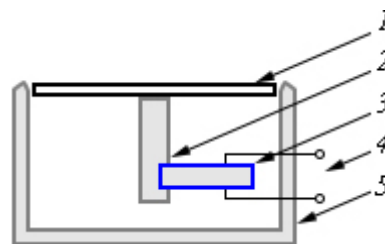
Obr. 6.10 Snímač zrychlení[21]



Obr. 6.11 Snímač 8044 [30]

6.4 Piezoelektrika v hudbě [5] [12] [13] [16] [27]

Piezoelektrický jev je hojně využíván i v hudebním průmyslu a to především u klasických strunných nástrojů, u kterých jsou snímány kmity strun nebo vibrace nástroje. U piezoelektrických snímačů je obtížné dosáhnout vyrovnané frekvenční charakteristiky, a proto se často kombinují s jinými snímači nebo mikrofony. Na obr. 6.12 je znázorněn princip funkce jednoduchého piezomikrofonu, kde dopadající zvuk vytváří deformaci membrány '1', spojenou s přenosným můstkem '2'. Kmity jsou přenášeny na piezoelektrický element '3' a na výstupu '4' lze naměřit napětí. Celá konstrukce je uzavřena do chranného krytu '5'. Existují bezmembránové typy, kde zvuk působí přímo na citlivý výbrus krystalu a jsou využívány pro snímání zvuku pod vodou až v hloubce přes 1000 m. Typickým představitelem membránového typu je mikrofon firmy Ronette Piézo Electricse Industrie Amsterdam Holland zobrazený na obr. 6.13, který se sice už nepoužívá, ale v minulosti byl velmi rozšířen díky své konstrukční nenáročnosti. Tomu však odpovídalo i velké

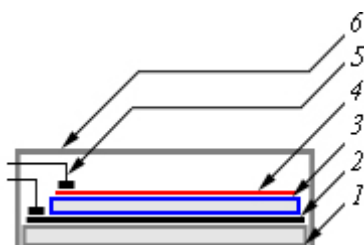


Obr. 6.12 Piezomikrofon [27]



Obr. 6.13 Ronette ZBD3 [13]

zkreslení a horší kvalita zvuku. Není však pravidlem, že to co je jednoduché je i nekvalitní. Na obr. 6.14 je uvedený princip piezoelektrického snímače, určený pro snímání kmitů strun houslí, viol a mnoho dalších strunných nástrojů. Konstrukce je řešena tak, že na podkladovém plastu ve tvaru kolečka '1' je tenkostěnný mosazný plech '2', na kterém je přilepen piezokrystal '3' s napařenou vrstvou stříbra '4'. Generované náboje jsou odváděny pomocí vedení '5', kde jeden z kabelů je stíněn na mosazné vrstvě. Všechny tyto komponenty jsou umístěny v krycím plastovém obalu '6'. Na obr. 6.15 je pak snímač firmy Fishman (zvýrazněn zeleně) připevněn na violu pomocí pružného netvrdnoucího tmelu nebo lepicího gumového polštářku. Na uložení je kladen velký důraz, protože přímo ovlivňuje kvalitu snímání. U strunných nástrojů se umísťuje na tzv. rezonanční bod a zpravidla se nalézá na horní desce v oblasti za kobylkou. Většinou jsou tyto body uvedené v manuálu výrobce nástroje, avšak někdy je nutné tuto pozici trochu upravit, aby bylo dosaženo maximálního potenciálu snímače. Pomocí připojení snímače do zesilovače a postupným přilepováním na nástroj je tento bod nalezen. Podmínkou je, aby byl zvuk co nejsilnější s největším poměrem basových frekvencí. Jemné doladění se pak provádí za využití nahrávání a poslechu na magnetofon, aby se vyloučil přímý zvuk z nástroje. Výstup je pak řešen pomocí konektoru (jacku), do kterého lze napojit přívodní kabel až délky 10 m bez ztráty kvality zvuku. Výhodou tohoto snímače je jeho malá hmotnost, minimalizující tlumení a jednoduchá instalace.



Obr. 6.14 Piezosnímač [12]



Obr. 6.15 Fishman V200 [16]

7 ZÁVĚR

Rostoucí poptávka po moderních snímačích je důkazem toho, že bez kvalitního měření se dnešní průmysl neobejde. Zajišťují co nejpřesnější měření při kontrole výrobků nebo bezpečnosti obsluhovaných strojů a je důležité brát ohled na jejich omezující faktory, které tuto kvalitu mohou výrazně ovlivnit, protože ne všechny snímače disponují vhodností pro určité aplikace. Obecně se lze setkat u všech typů snímačů s nelinearitou a hysterezí, objevující se při každém měření a tyto charakteristiky jsou uvedeny téměř u každého manuálu výrobce.

U indukčních snímačů se vyskytuje závislost výstupního proudu na materiálu a jeho vzdálenosti. Toto bezdotykové měření lze uplatit jen na velmi krátké vzdálenosti pro snímání pouze kovových objektů. Naproti tomu mají jednoduchou konstrukci a nízkou pořizovací cenu.

Fotoelektrické snímače se vyznačují poměrně velkou nelinearitou závislosti proudu na intenzitě osvětlení při vyšších zatěžovacích odporech, kterou však lze přímo korigovat množstvím dopadajícího světla. Jejich velmi rychlá reakce a daleký dosah u některých typů je upřednostňována hlavně při detekci objektů na výrobních linkách.

Termoelektrické snímače slouží převážně pro měření tepla a vyznačují se značnou nelineární závislostí generovaného napětí na teplotě, a proto se používá pouze začátek charakteristiky, kde je odchylka od linearity minimální. Mezi silné stránky patří jejich jednoduchost konstrukce a spolehlivost. Na druhou stranu je materiál termočlánků náchylný vůči stárnutí.

Pyroelektrické snímače představují další způsob měření teploty a infračerveného záření, kdy pomocí obsahu materiálu v pyročlánku lze korigovat rozsah snímání. Díky rychlé detekci infrazářením jsou hojně používány jako detektory ohně v těžkém průmyslu. Mezi jeho omezující faktory patří nutnost vhodného umístění.

Piezoelektrické snímače se vyznačují téměř lineární závislostí a najdeme je všude tam, kde je nutné zajistit přesné měření velkých dynamických složek síly, tlaku nebo zrychlení. Vyznačují se malými rozměry a jednoduchostí konstrukce, kterých se využívá např. v malých prostorách spalovacího motoru, kompresorech, ale i v hudebním průmyslu pro výrobu kvalitních snímačů strunných nástrojů. Možné limitace je nutnost případné tepelné izolace či chlazení a zajištění jejich polohy proti samovolnému uvolnění.

Díky rozmanitým typům aktivních snímačů lze předpokládat, že jejich kvalita bude nadále stoupat a budou stále více uplatňovány nejen ve strojírenství a výzkumu, ale i v každodenních činnostech běžného života.

SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ [34]

1. ACAGNETTI. *Dynamic Systems* [online]. 2004 [cit. 2013-05-06]. Dostupné z: http://www.dinasys.rs/images/datasensor/bt_gen.pdf
2. ADÁMEK, Martin. Ústav mikroelektroniky: Internetová stránka Martina Adámka. [online]. [cit. 2013-04-30]. Dostupné z: <http://www.umel.feec.vutbr.cz/~adamek>
3. *Automa: časopis pro automatizační techniku* [online]. Praha: FCC Public, 1994, č. 11 [cit. 2013-05-01]. ISSN 1210-9592. Dostupné z: http://www.odbornecasopisy.cz/index.php?id_document=36107
4. *Balluff: sensors worldwide* [online]. Design World, 2010 [cit. 2013-04-30]. Dostupné z: <http://www.balluff.com/balluff/MUS/en/news/Search-for-Better-Proximity-Sensor.jsp>
5. BURDA, Zdeněk. Zdeněk Burda. In: [online]. 1999 [cit. 2013-05-20]. Dostupné z: <http://www.zdenda.com/1999/01/mikrofony/>
6. *CEM: Phoenix*. 2007, 4 s. Dostupné z: <http://www.cem.de/documents/pdf/produkte/englisch/Phoenix.pdf>
7. *CEM: Tomorrow's science today* [online]. [cit. 2013-04-30]. Dostupné z: <http://cem.com/phoenix.html>
8. D'AURÉLIEN. *The Piezoelectric Effect: Piezoelectric Effect Basics* [online]. 1999, 3 s. [cit. 2013-05-19]. Dostupné z: <http://www.aurelienr.com/electronique/piezo/piezo.pdf>
9. ĎAĎO, Stanislav. *Senzory a měřicí obvody*. 1. vyd. Praha: ČVUT, 1996, 315 s. ISBN 80-010-1500-9.
10. *Electronic Components* [online]. [cit. 2013-05-15]. Dostupné z: <http://www.tme.eu/cz/details/bp104/fotodiody/#>
11. *Elektro: odborný časopis pro elektrotechniku* [online]. Praha: FCC PUBLIC s. r. o., 1991, č. 08 [cit. 2013-05-01]. ISSN 1210-0889. Dostupné z: http://www.odbornecasopisy.cz/index.php?id_document=22832
12. ELEKTROAKUSTIKA. *Návod na výrobu levného a přitom kvalitního snímače pro akustické hudební nástroje* [online]. [cit. 2013-05-20]. Dostupné z: <http://www.elektroakustika.cz/snimac.html>
13. ELEKTROAKUSTIKA. *Piezelektrický mikrofon RONETTE ZBD 3* [online]. [cit. 2013-05-20]. Dostupné z: http://www.elektroakustika.cz/ronette_zbd3.html
14. ELEKTRONIKA ZA OKAMŽIK. *Fotoprvky: Fotodioda* [online]. [cit. 2013-05-06]. Dostupné z: http://www.edunet.souepl.cz/EZO/f_dio.htm
15. *Element-Sib: Датчику помюка* [online]. [cit. 2013-05-10]. Dostupné z: http://www.element-sib.com/index.php?option=com_virtuemart&category_id=636&page=shop.browse&Itemid=1&limit=20&limitstart=480
16. *Euroguitar: The European Music Shop* [online]. [cit. 2013-05-20]. Dostupné z: http://es.euroguitar.com/view_images_145135_2
17. *Gear4music* [online]. [cit. 2013-04-30]. Dostupné z: <http://www.gear4music.cz/cs/Dechovej-mosaz-etzc/Profesionalni-housle-snima-Fishman-V-200/OAZ>
18. *General Monitors* [online]. [cit. 2013-05-12]. Dostupné z: <http://www.generalmonitors.com/Flame-Detectors/FL4000H-Multi-spectrum-IR-Flame-Detector/p/000140006600001008#>
19. GENERAL MONITORS. *FL4000H Multi-spectral Infrared Flame Detector Manual: Instructions for FL4000H Multi-spectral IR Flame Detector*. 2011, 71 s. Dostupné z: <http://s7d9.scene7.com/is/content/minesafetyappliances/FL4000H%20Manual>
20. GUŠTAR, Milan. *Elektrofony: historie, principy, souvislosti* [online]. Vyd. 1. Praha: Uvnitř, 2007 [cit. 2013-04-30]. ISBN 978-80-239-8446-0.
21. HUSÁK. *Akcelerometry* [online]. Praha, 2009, 11 s. [cit. 2013-05-19]. Dostupné z: <http://www.micro.feld.cvut.cz/home/X34SES/prednasky/08%20Akcelerometry.pdf>

22. CHACK, A., K. COHEN, S. STOLYAROVA, Y. NEMIROVSKY, R. BESERMAN a WEIL. *Journal of Crystal Growth: Dielectric and pyroelectric properties of ordered CdZnTe layers grown by MOCVD* [online]. Israel, 1999, 1179–1183 [cit. 2013-05-12].
23. CHVOJKA, Petr. *Senzory v diagnostické praxi*. In: [online]. Praha, 2010, s. 43 [cit. 2013-04-30]. Dostupné z: http://www3.fs.cvut.cz/web/fileadmin/documents/12135-VSZ/download/obor_stud/SD_-_2351086/6_Senzory.pdf
24. *InfraTec* [online]. [cit. 2013-05-12]. Dostupné z: <http://www.infratec.de/en/sensor-division/products/detector-range/standard-detectors.html>
25. JANÍČEK, Přemysl. *Technický experiment: [určeno pro posl. fak. strojni]*. 1. vyd. Praha: MON, 1989, 384 s. ISBN 80-214-1011-6.
26. KADLEC, Karel. *Ústav fyziky a měřicí techniky* [online]. 2012 [cit. 2013-04-30]. Dostupné z: ufmt.vscht.cz/cs/component/joomdoc/doc.../431-principyteplotav3h.html
27. KAISLER, Radek. *Mikrofon: Jaký kam použít*. [online]. 2002 [cit. 2013-05-20]. Dostupné z: <http://elektrika.cz/data/clanky/mjkgp020822>
28. KAŠPAR. *Infračervené detektory plamene* [online]. 2010, 54 s. [cit. 2013-05-12]. Dostupné z: http://measure.feld.cvut.cz/system/files/files/cs/vyuka/predmety/A5M38MEB/A5M38EMBP11_13SECURITY.pdf
29. KISTLER GROUP. *3-Component Force Sensor* [online]. 2009, 4 s. [cit. 2013-05-19].
30. KISTLER GROUP. *High Resonant Frequency, Charge Mode, Shock Accelerometer* [online]. 2005, 2 s. [cit. 2013-05-19]. Dostupné z: <http://www.kistler.com/cz/en/product/acceleration/8044>
31. KISTLER GROUP. *Piezoelectric Pressure Sensor (Miniature)* [online]. 2013, 2 s. [cit. 2013-05-19]. Dostupné z: <http://www.kistler.com/cz/en/product/pressure/6001>
32. KISTLER GROUP. *Process Instrumentation and Automation* [online]. 2009, 170 s. [cit. 2013-05-19]. Dostupné z: http://www.helmar.com.pl/helmar/biblioteka/pdf/process_automation.pdf
33. KOCHANÍČEK, Ludvík. *Elektrotechnika: Indukční snímače* [online]. 2010 [cit. 2013-04-30]. Dostupné z: <http://coptel.coptkm.cz/?action=2&doc=9224>
34. KRČÁL, Martin. *Citace.com: ...citovat je snadné* [online]. 2004 [cit. 2013-05-20]. Dostupné z: <http://www.citace.com/>
35. KVETAKOV.NET. *Základy měření neelektrických veličin*. In: [online]. 2007, s. 9 [cit. 2013-04-30]. Dostupné z: www.kvetakov.net/down.php?file=./UEIKMT/2/Is/.../MTVKap1.pdf
36. LYSENKO. *Senzory a snímače: Čidla a převodníky*. In: [online]. 2006, s. 5 [cit. 2013-04-30]. Dostupné z: artemis.osu.cz:8080/artemis/uploaded/171_UVMET%2010.doc
37. MAVIS Nový Bor s.r.o. *Měřicí a regulační technika* [online]. 2010 [cit. 2013-05-21]. Dostupné z: <http://www.mavis.cz/produkty/kompenzacni-vedeni-pro-termoclanke-snimace-teploty>
38. *MiTek Industries Ltd: United Kingdom* [online]. [cit. 2013-05-08]. Dostupné z: <http://www.mii.com/unitedkingdom/>
39. *Muffle furnace*. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2006-2012, 26.2.2013 [cit. 2013-04-30]. Dostupné z: http://en.wikipedia.org/wiki/Muffle_furnace
40. *Pepperl+Fuchs: International* [online]. [cit. 2013-05-01]. Dostupné z: <http://www.pepperl-fuchs.com/>
41. PIEZOCRYST ADVANCED SENSORICS GMBH. *Piezocryst* [online]. 2005 [cit. 2013-05-19]. Dostupné z: http://www.piezocryst.com/downloads/Piezoelectric_Sensors_01.pdf
42. *Piezoelektrický jev*. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2005-2013, 8.3.2013 [cit. 2013-05-19]. Dostupné z: http://cs.wikipedia.org/wiki/Piezoelektrick%C3%BD_jev

43. PIÉZOTECH S.A.S. [online]. Hésingue, 2010, 19 s. [cit. 2013-05-19]. Dostupné z: <http://www.piezotech.fr/image/documents/22-31-32-33-piezotech-piezoelectric-films-leaflet.pdf>
44. Polovodičová dioda. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001-2013, 8.3.2013 [cit. 2013-05-06]. Dostupné z: http://cs.wikipedia.org/wiki/Polovodi%C4%8Dov%C3%A1_dioda
45. REGTIEN, Paul, Martin HALAJ a Eva KUREKOVÁ. *Meranie teploty* [online]. 2005, 47 s. [cit. 2013-05-08]. Dostupné z: <http://www.kam.sjf.stuba.sk/katedra/publikacie/leonardo/ucebnica/08s.pdf>
46. *Schneider-Electric*. 2004, 2 s. Dostupné z: http://www.schneider-electric.cz/czech-republic/cz/produkty-sluzby/automatizace-rizeni/produkty-nabidka/rada-prezentace.page?p_tab_type=products&p_range_id=511&p_url=/gc_1_0/htm/XitiFrame.htm%3fhttp://www.ops-ecat.schneider-electric.com/ecatalogue/browse.do%3fel_typ=product%26cat_id=BU_AUT_511_L3_Z021%26prd_id=XUX1ARCNT16%26scp_id=Z021%26lc=cz#
47. *Sick: Sensor Intelligence*. 2010, 78 s. Dostupné z: http://www.sick.com/pl/pl-pl/home/products/productnews_overview/industrial_sensors/Documents/IME_12_2012.pdf
48. ŠTĚTINA, Josef, Michal JAROŠ a Pavel RAMÍK. *Virtuální laboratoř - Měření: Měření snímače, metody* [online]. Brno, 2003 [cit. 2013-04-30]. Dostupné z: <http://ottp.fme.vutbr.cz/skripta/vlab/mereni/>
49. TED MCGEE. *EandM* [online]. 2001 [cit. 2013-05-06]. Dostupné z: http://www.eandm.com/Products/Content/Siemens/Training/Siemens_Courses/snrs_4.pdf
50. THE ENCYKLOPEDIA OF SCIENCE. *Photoelectric effect* [online]. [cit. 2013-05-06]. Dostupné z: http://www.daviddarling.info/encyclopedia/P/photoelectric_effect.html
51. Trussty Jasmine: The Lighter Comes Before the Match. In: [online]. 2012 [cit. 2013-05-17]. Dostupné z: <http://trussty-jasmine.blogspot.cz/2012/08/the-lighter-comes-before-match.html#axzz2TRMehdkU>
52. Ústav počítačové a řídicí techniky: Vysoká škola chemicko-technologická. *Měření tlaku* [online]. Praha [cit. 2013-05-19]. Dostupné z: <http://uprt.vscht.cz/kminekm/mrt/F4/F4k42-tlak.htm>
53. VACEK, Václav. *Piezelektrické jevy* [online]. Praha, 2012, 25 s. [cit. 2013-05-19]. Dostupné z: http://fyzika.fs.cvut.cz/subjects/fzmt/lectures/FZMT_11.pdf
54. VOJÁČEK, Antonín. *Automatizace.hw.cz: rady a poslední novinky v oboru* [online]. 2011 [cit. 2013-04-30]. Dostupné z: <http://automatizace.hw.cz/komponenty/miniaturni-a-presne-indukcni-snimace-sunx-gx.html>
55. Vysoká škola chemicko-technologická: Fakulta chemicko-inženýrská. *Tenkovrstvé piezelektrické senzory* [online]. Praha, 2010 [cit. 2013-05-19]. Dostupné z: http://fchi.vscht.cz/uploads/pedagogika/nano/predmety/senzory/14_senzory_QCM.pdf
56. *Vysoká škola chemicko-technologická v Praze: Fakulta chemicko-inženýrská* [online]. 2005 [cit. 2013-04-30]. Dostupné z: <http://uprt.vscht.cz/kminekm/mrt/F4/F4k41-zvmp.htm>
57. ZEHNULA, Karel. *Snímače neelektrických veličin*. 2. vyd. Praha: SNTL - Nakladatelství technické literatury, 1983, 372 s.
58. ZMEŠKAL, Oldřich. *Světlocitlivé prvky: Fotoelektrický jev* [online]. 2003 [cit. 2013-05-06]. Dostupné z: http://www.fch.vutbr.cz/~zmeskal/obring/presentace_2003/09_svetlocitlive_prvky.pdf

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

Označení	Legenda	Jednotka
a	zrychlení	[m/s ²]
a, b, c	délky hran	[m]
a _T , b _T , c _T	konstanty druhů termoelektrických snímačů	[-]
B	indukce magnetického pole	[T]
d, y	vzdálenost	[m]
dΦ/dt	časová změna magnetického toku	[Wb/s]
E	intenzita osvětlení	[lx]
F	síla	[N]
F _m	magnetomotorické napětí	[Az]
F _x	síla působící na stěnu 'bc'	[N]
F _y	síla působící na stěnu 'ac'	[F]
g	tíhové zrychlení	[m/s ²]
I	proud	[A]
I ₀	proud neosvětlené diody	[A]
I _k	proud ideálního zdroje	[A]
k _p	piezoelektrická konstanta	[pC/N]
k _u	napět'ová citlivost	[V/N]
l ₀	délka vodiče	[m]
m	hmotnost	[kg]
N _Z	počet závitů cívky	[-]
p	tlak	[Pa]
p _e	pyroelektrická konstanta	[-]
P _e	elektrická polarizace	[C/m ²]
p _x	tlak působící na stěnu 'bc'	[Pa]
p _y	tlak působící na stěnu 'ac'	[Pa]
q	elementární náboj	[C]
Q _e	velikost náboje	[C]
R _j	vyrovnávací odpor	[Ω]
R _m	magnetický odpor	[Az/Wb]
s	signál	[-]
S	plocha	[mm ²]
S _x	plocha stěny 'bc'	[mm ²]
S _y	plocha stěny 'ac'	[mm ²]
T	teplota	[K]
t	teplota	[°C]
T _C	Curieova teplota	[K]
U	napětí	[V]
U _D	napětí přiložené na diodu	[V]
U _{IND}	indukované napětí	[V]
U _t	termoelektrické napětí	[V]
v	rychlost	[m/s]

ΔP	změna polarizace	[C/m ²]
ΔQ	změna elektrického náboje	[C]
ΔT	změna teploty	[K]
$\Delta \vartheta$	rozdíl teplot dvou termoelektrických kovů	[°C]
η	konstanta polovodiče	[-]
ϑ_m	teplota měřicího spoje	[°C]
ϑ_s	teplota srovnávacího spoje	[°C]
κ	Boltzmanova konstanta	[J/K]
μ_0	permeabilita vakua	[H/m]
τ	čas	[s]
Φ	magnetický indukční tok	[Wb]

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1 Příklady použití indukčních snímačů [54].....	9
Obr. 2 Zapalovač s piezokrystalem [51].....	9
Obr. 3 Piezoelektrický snímač firmy Fishman [17].....	9
Obr. 4 Použití fotoelektrického snímače firmy Balluff [4].....	9
Obr. 1.1 Rozdělení aktivních snímačů podle principu.....	10
Obr. 1.2 Schéma měřicího obvodu [57].....	10
Obr. 1.3 Porovnání analogového a digitálního signálu [48].....	11
Obr. 1.4 Nelinearita měřidla [23].....	11
Obr. 1.5 Hystereze měřidla [23].....	11
Obr. 2.1 El-mag. snímač [57].....	12
Obr. 2.2 El-dyn. snímač [57].....	12
Obr. 2.3 Snímač LP 1000 [3].....	13
Obr. 2.4 Konstrukční provedení indukčního snímače [3].....	13
Obr. 2.5 Charakteristiky závislosti snímače IA8-30GM-I3 [11].....	14
Obr. 2.6 Použití snímače IA8-30GM-I3 [40].....	14
Obr. 2.7 Lisovací hlava a snímač.....	14
Obr. 3.1 Vnější fotoelektrický jev [50].....	15
Obr. 3.2 Řez fotoel. snímačem [57].....	15
Obr. 3.4 Charakteristiky a závislosti diody [14] [57].....	16
Obr. 3.5 Průchozí [49].....	16
Obr. 3.6 Reflexní [49].....	16
Obr. 3.7 Difúzní [49].....	17
Obr. 3.8 Detail snímače [15].....	17
Obr. 3.9 Využití fotoelektrického snímače XUX1ARCNT16 v praxi [38].....	17
Obr. 4.1 Zapojení termoelektrického článku [26].....	18
Obr. 4.2 Příklady konstrukce spojů termočlánku [48].....	18
Obr. 4.3 Závislost napětí na teplotě [57].....	19
Obr. 4.4 Charakteristiky termočlánků [45] [57].....	19
Obr. 4.5 Mulfová pec Phoenix [7].....	20
Obr. 4.6 Doplnující zařízení [6].....	20
Obr. 4.7 Zapojení termočlánku [48].....	20
Obr. 5.1 Řez pyroel. snímačem [45].....	21
Obr. 5.2 Snímač typu LIE-200 [24].....	21
Obr. 5.3 Závislost Curieovy teploty na obsahu zinku slitiny CdZnTe [22].....	22
Obr. 5.4 Snímač FL4000H [18].....	22
Obr. 5.5 Schéma zapojení snímače FL4000H [19].....	22
Obr. 6.1 Princip jevu [42].....	23
Obr. 6.2 Piezokrystal [57].....	23
Obr. 6.3 Závislost piezoelektrické konstanty na teplotě [41].....	24
Obr. 6.4 Proces polarizace PZT keramiky [8].....	24
Obr. 6.5 Snímač tlakové síly [57].....	25
Obr. 6.6 Snímač 9077C [29].....	25
Obr. 6.7 Snímač tlaku [55].....	26
Obr. 6.8 Snímač 6001 [31].....	26
Obr. 6.9 Náhradní schéma [57].....	27
Obr. 6.10 Snímač zrychlení[21].....	27
Obr. 6.11 Snímač 8044 [30].....	27
Obr. 6.12 Piezomikrofon [27].....	28
Obr. 6.13 Ronette ZBD3 [13].....	28
Obr. 6.14 Piezosnímač [12].....	28
Obr. 6.15 Fishman V200 [16].....	28

SEZNAM PŘÍLOH

Příloha 1 Tabulka typů termočlánků [37]

Norma	Složení termočlánku			Složení kompenzačního vedení			Barevné označení		
	Typ	+ pól	- pól	Kód	+ pól	- pól	Vnitřní izolace		Obal
							+ pól	- pól	
DIN 43722 IEC 584	T	Cu	CuNi	TX	Cu	CuNi	Hnědý	Bílý	Hnědý
	E	NiCr	CuNi	EX	NiCr	CuNi	Fialový	Bílý	Fialový
	J	Fe	CuNi	JX	Fe	CuNi	Černý	Bílý	Černý
	K	NiCr	Ni	KX	NiCr	Ni	Zelený	Bílý	Zelený
	K	NiCr	Ni	KC A	Fe	CuNi	Zelený	Bílý	Zelený
	K	NiCr	Ni	KC B	Cu	CuNi	Zelený	Bílý	Zelený
	R/S	Pt13/10Rh	Pt	RC A/SC A	Cu	CuNi	Oranžový	Bílý	Oranžový
	R/S	Pt13/10Rh	Pt	RC B/SC B	Cu	CuNi	Oranžový	Bílý	Oranžový
	N	NiCrosil	Nisil	NC	Cu	CuNi	Růžový	Bílý	Růžový
B	Pt30Rh	Pt6Rh	BC	Cu-leg.	Cu	Šedivý	Bílý	Šedivý	
ANSI	T	Cu	CuNi	TX	Cu	CuNi	Modrý	Červený	Modrý
	E	NiCr	CuNi	EX	NiCr	CuNi	Purpurový	Červený	Purpurový
	J	Fe	CuNi	JX	Fe	CuNi	Bílý	Červený	Černý
	K	NiCr	Ni	KX	NiCr	Ni	Žlutý	Červený	Žlutý
	R/S	Pt13/10Rh	Pt	RX/SX	Cu	CuNi	Černý	Červený	Zelený
	B	Pt30Rh	Pt6Rh	BX	Cu-leg.	Cu	Šedivý	Červený	Šedivý
NF	T	Cu	CuNi	TX	Cu	CuNi	Žlutý	Modrý	Modrý
	E	NiCr	CuNi	EX	NiCr	CuNi	Žlutý	Oranžový	Oranžový
	J	Fe	CuNi	JX	Fe	CuNi	Žlutý	Černý	Černý
	K	NiCr	Ni	KX	NiCr	Ni	Žlutý	Fialový	Fialový
	K	NiCr	Ni	VC	Cu	CuNi	Žlutý	Hnědý	Hnědý
	K	NiCr	Ni	WC	Fe	CuNi	Žlutý	Bílý	Bílý
	R/S	Pt13/10Rh	Pt	RC/SC	Cu	CuNi	Žlutý	Zelený	Zelený
	B	Pt30Rh	Pt6Rh	BC	Cu-leg.	Cu	Žlutý	Šedivý	Šedivý
DIN43710	U	Cu	CuNi	UX	Cu	CuNi	Červený	Hnědý	Hnědý
	L	Fe	CuNi	LX	Fe	CuNi	Červený	Modrý	Modrý