VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ
ÚSTAV AUTOMATIZACE A INFORMATIKY

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING
INSTITUTE OF AUTOMATION AND COMPUTER SCIENCE

AUTOMATICKÁ KALIBRACE SNÍMAČŮ VIBRACÍ

AUTOCALIBRATION OF VIBRATION SENSORS

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE
BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE PETRA MACHÁČKOVÁ
AUTHOR

VEDOUCÍ PRÁCE Ing. DANIEL ZUTH
SUPERVISOR

BRNO 2008

Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství

Ústav automatizace a informatiky
Akademický rok: 2007/08

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

student(ka): Macháčková Petra

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

obor: **Aplikovaná informatika a řízení (3902R001)**

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:

Automatická kalibrace snímačů vibrací

v anglickém jazyce:

Autocalibration of Vibration Sensors

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Studie možností a návrh řešení autokalibrace snímačů vibrací, které rozhodující měrou ovlivní výsledek vibrodiagnostiky

Cíle bakalářské práce:

Cílem práce je vypracování studie, která přiblíží možnosti a metody automatické kalibrace, porovná je, vybere vhodnou variantu řešení a tuto zapracuje ideově do systému analyzátoru vibrací.

Doporučená osnova práce:
1. Měření a analýza vibrací
2. Možnosti kalibrace snímačů vibrací
3. Návrh začlenění automatické kalibrace do vibrodiagnostického systému

Seznam odborné literatury:

JANOUŠEK, I.; Kozák, J.; Taraba, O. a kol.; Technická diagnostika. :1. vydání Praha, SNTL Praha, 1988. 432 s. ISBN 04-236-88.
KREIDL, M. a kol.; Diagnostické systémy. : 1. vydání Praha :Vydavatelství ČVUT, 2001. 352 s. ISBN 80-01-02349-4.
KREIDL, M.; Šmíd, R.; Technická diagnostika. : 1. vydání Praha: BEN – technická literatura, 2006. 408 s. ISBN 80-7300-158-6.
Firemní literatura

Vedoucí bakalářské práce: Ing. Daniel Zuth

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2007/08.

V Brně, dne 11. 12. 2007

L.S.

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ DĚKANÁT

doc. RNDr. Ing. Miloš Šeda, Ph.D.
Ředitel ústavu

doc. RNDr. Miroslav Doupovec, CSc.
Děkan fakulty

LICENČNÍ SMLOUVA

Na tomto místě je vložena licenční smlouva.

ABSTRAKT

Cílem této práce je seznámení s pokročilejšími funkcemi technické diagnostiky, jako jsou autodiagnostika a autokalibrace. V práci jsou uvedeny možnosti diagnostikování diagnostiky rotačních strojů, rozdělení snímačů, které se používají ve vibrační diagnostice a možnosti jejich kalibrace. Dále je uvedena automatická kalibrace okolních vlivů, které ovlivňují vlastnosti snímačů.

ABSTRACT

The main objective of this thesis is presentation of various features of technical diagnostics, such as autodiagnostics and autocalibration. Thesis describes ways to diagnostics of rotocure, presents various types of sensors used in vibrodiagnostics and shows possibilities for their calibration. This work also contains information about automatic calibration of external influences, which affect sensor characteristics.

KLÍČOVÁ SLOVA

Diagnostika, kalibrace, piezoelektrické snímače, signály, automatická diagnostika, automatická kalibrace

KEYWORDS

Diagnostics, calibration, piezoelectric sensors, signals, autodiagnostics, autocalibration

PODĚKOVÁNÍ

Poděkování patří Ing. Danielu Zuthovi, který byl vedoucím bakalářské práce. Děkuji mu za odborné vedení a cenné rady.

OBSAH

Zadání práce **3**
Licenční smlouva **5**
Abstrakt **7**
Klíčová slova **7**
Poděkování **9**
1. Úvod **13**
2. Technická měření **15**
3. Diagnostika **17**
3.1. Pojmy a definice 17
3.2. Metody diagnostiky 18
4. Kalibrace **21**
4.1. Pojmy a definice 21
4.2. Způsoby kalibrace snímačů vibrací 22
4.3. Kalibrace v zákonech 23
4.4. Kalibrační protokol 23
5. Snímače ve vibrodiagnostice **25**
5.1. Pojmy a definice 25
5.2. Druhy snímačů 25
5.2.1. Snímače polohy 25
5.2.2. Snímače rychlosti 26
5.2.3. Snímače zrychlení 26
6. Piezoelektrické snímače **29**
6.1. Princip činnosti 29
6.2. Zapojení 30
7. Vyhodnocování vibrací **33**
7.1. Vyhodnocování vibrací v časové oblasti 33
7.2. Vyhodnocování vibrací ve frekvenční oblasti 33
8. Frekvenční analýza **35**
9. Zpracování signálů **37**
9.1. Teorie signálů 37
10. Autodiagnostika a autokalibrace **41**
10.1. Inteligentní snímače (smart snímače) 41
10.2. Autodiagnostika 41
10.2.1 Princip 41
10.2.2 Využití 42
10.3 Autokalibrace 42
10.3.1 Autokalibrace vibrací 42
10.3.2 Autokalibrace okolních vlivů 43
11. Závěr **45**
Použitá literatura **47**

1. ÚVOD

Strojní zařízení je nemožné vyrobit tak, aby při svém chodu nebyla doprovázena vibracemi. Proto je velmi důležité tyto vibrace sledovat a zaznamenávat. Hodnoty vibrací udávají technický a provozní stav stroje. Jejich pomocí je zjišťován aktuální stav zařízení a tím je umožněno navrhnout plán údržby, případných oprav a také předcházení havarijním stavům.

Aby naměřené hodnoty byly co nejpřesnější musí být snímače před svým použitím kalibrovány. Běžná kalibrace znamená odstavení snímače a tím i odstavení celého stroje což může způsobit určité provozní potíže. Z tohoto důvodu by bylo mnohem výhodnější používat inteligentní snímače s funkcí tzv. autodiagnostiky a autokalibrace. V dnešní praxi se automatická kalibrace nevyužívá.

V této práci se hodlám zaměřit na teoretický rozbor problematiky autokalibrace. Poté se pokusím navrhnout využití pokročilých funkcí technické diagnostiky, jako jsou autodiagnostika a autokalibrace. Aby bylo možné návrh uskutečnit, je třeba se na začátku práce zaměřit na technickou diagnostiku a kalibraci obecně.

Pro měření vibrací se využívá několik typů snímačů, proto je nutné se s nimi seznámit, především se snímači piezoelektrickými. Pro jejich použití je potřeba znát princip, na kterém pracují, jak jsou konstruované a jak se podle konstrukce rozdělují. Pro zpracování jimi naměřených hodnot je důležité znát, jak jsou vibrace vyhodnocovány a jaké typy signálu se používají.

2. TECHNICKÁ MĚŘENÍ

Měření je neodmyslitelnou součástí každodenního života. Již 1000 let př. n. l. měli starověké civilizace téměř dokonalé měřící přístroje, jednotky a metody měření. Vyvíjely se společně s vývojem lidstva až do dnešní podoby. 20. května 1875 byla v Paříži 18-ti zakládajícími státy podepsána Metrická konvence. V roce 1993 konvenci podepsala i Česká republika. Dnes má Metrická konvence 48 členů.

Měřením se zabývá tzv. metrologie. Základními oblastmi, kterými se zabývá, jsou veličiny a jejich jednotky, metody měření, měřidla, vlastnosti a schopnosti pozorovatelů a péče o fyzikální konstanty a vlastnosti látek a materiálů. Všechna měření se opírají o soustavu základních jednotek SI.

O metrologický systém se starají Mezinárodní metrologické organizace, mezi něž patří Metrická konvence, Mezinárodní úřad pro váhy a míry, Generální konference vah a měr, Mezinárodní výbor pro váhy a míry, Mezinárodní organizace pro legální metrologii. Mezi Evropské metrologické organizace patří Euromet, Coomet a Welmec. V ČSFR metrologický systém zřizoval Federální úřad pro normalizaci a měření. Po rozpadu ČSFR byly normy pro metrologický systém upraveny a od roku 1996 spadá řízení technické normalizace, metrologie a státního zkušebnictví pod Ministerstvo průmyslu a obchodu. [1]

Žádné měření není úplně přesné, proto se měření vyhodnocuje pomocí chyb a nejistot měření. Chyba měření je rozdíl naměřené hodnoty a pravé hodnoty, kde pravá hodnota je hodnota získaná naprosto přesným měřením. Nejistota měření je parametr, který udává rozptyl hodnot, které může měřená veličina nabývat.

Mezi hlavní zdroje nejistot patří špatně zvolený postup měření, nedostatečně známé podmínky prostředí, nevhodný výběr přístroje vzhledem k jeho rozsahu a nedostatečná rozlišovací schopnost měřícího přístroje.

Aby mohlo být měření přesné, musí být zvolena vhodná metoda měření. Metody měření jsou rozděleny podle několika kritérií. Mohou být bezdotykové a dotykové, přímé a nepřímé, definiční a odvozené atd. [1]

3. DIAGNOSTIKA

Technická diagnostika zkoumá metody a prostředky zjišťování stavu objektů. Informace o jejich stavu jsou získávány vyhodnocováním vnějších projevů diagnostikovaných objektů. Diagnostiku můžeme rozdělit podle různých hledisek na:

- přímá
- nepřímá

- subjektivní
- objektivní

- částečná
- celková

- souborová
- hloubková

- mezioperační
- výstupní
- provozní

- závad a poruch
- funkční

3.1. Pojmy a definice [2]

Diagnóza - vyhodnocení provozuschopnosti objektu za daných podmínek

Prognóza - určení budoucího vývoje technického stavu objektu, u kterého je vycházeno ze statistického vyhodnocení pravděpodobnosti bezporuchového stavu

Geneze - analýza příčin poruch nebo předčasného zhoršení technického stavu objektu

Diagnostické prostředky - technická zařízení a pracovní postupy pro analýzu a vyhodnocení diagnostikovaného objektu, kde pracovní postupy počínají již studiem objektu a seznamem sledovaných poruch, pokračují volbou vhodného pracovního postupu a diagnostického prostředku a končí samotnou realizací diagnostického systému.
Rozdělujeme je na vnitřní, u kterých je diagnostické zařízení zabudované do diagnostikovaného objektu. Jsou používané u velmi časté diagnostiky bez zásahu do diagnostikovaného chodu. Dále máme vnější, kde je diagnostické zařízení odděleno od diagnostikovaného objektu. Používají se pro diagnostikování více objektů zároveň. V praxi se vnitřní a vnější prostředky kombinují, jelikož vnitřní prostředky nejsou přesné u lokalizace poruchy, proto se pro přesné určení polohy poruchy používají vnější.

Diagnostický systém - skládá se z diagnostických prostředků, diagnostikovaného objektu a obsluhy

Diagnostický systém = Diagnostické prostředky + Diagnostikovaný problém + Obsluha

Obr. 1 Diagnostický systém

Diagnostické systémy dělíme na online, které vyhodnocují technický stav za provozu objektu a na offline, kde je diagnostikovaný objekt během testování mimo provoz.

Technický stav – schopnost přístroje vykonávat požadované funkce za stanovených podmínek používání

Diagnostická veličina – nositel informace o technickém stavu diagnostikovaného objektu nebo jeho částí

Provozuschopný stav – stav, kdy je objekt schopen vykonávat funkce podle technických podmínek

Porucha - stav, kterým končí provozuschopnost objektu

3.2. Metody diagnostiky

Hlavními metodami diagnostiky jsou termodynamická diagnostika, tribotechnická diagnostika a pro nás nejpodstatnější vibrační diagnostika.

Termodynamická diagnostika

Tato metoda využívá ke zjišťování stavů zařízení jako diagnostický parametr teplotu. Provádí se bezdotykově nebo dotykově. U bezdotykového měření se využívá sálání tepla v oblasti infračerveného záření. U bezdotykových měření je měřící přístroj v přímém kontaktu s měřeným zařízením. [2]

Tribotechnická diagnostika

Zabývá se stavem maziv ve stroji a to převážně oleje. Tento typ diagnostiky je prováděn buď objektivně, nebo subjektivně. U objektivní metody se zkoumá kinematická viskozita, bod vzplanutí, hodnota pH a obsažené nečistoty. U subjektivních metod se zkoumá barva oleje, přítomnost vody, viditelnost nečistot, zápach a teplota.

Vibrační diagnostika

Provoz všech mechanických strojů je provázen mechanickým chvěním a v praxi je téměř nemožné se mu vyhnout. Hlavní příčiny mechanického chvění jsou dynamické síly, které doprovázejí výrobní nepřesnosti, vůle pohybových součástí, styk dílů se třením a odvalováním, nevyváženost součástí s rotačním kmitavým, kývavým nebo vratným pohybem. Mechanické chvění vyvolává rezonanci ostatních součástí a tak se stává zdrojem dalšího mechanického chvění.

Mechanické chvění, neboli vibrace, je dynamický jev, kdy se hmotné body nebo tuhá tělesa pohybují kolem rovnovážné polohy vratným pohybem. Vibrace popisujeme polohovým vektorem a fází v časovém okamžiku.

Chvění stroje úzce souvisí s jeho dynamickým namáháním a technickým stavem ložisek hřídelů, klikových ústrojí, nevyvážených rotujících součástí atd. Technický stav je dán opotřebením a uvolněním spojů, trhlinami a korozí. [3][4]

Kmitání lze rozdělit na:

- periodické
- neperiodické
- náhodné

- absolutní
- relativní

U periodického kmitání se časový průběh veličin opakuje a periody kmitů jsou v poměrech, které jsou dané racionálními čísly. U neperiodického kmitání je alespoň jeden poměr period kmitů daný iracionálním číslem.

V případě, že je pohyb tělesa vztahován ke gravitačnímu poli Země nebo k pevnému bodu, jedná se o kmitání absolutní. Je-li pohyb vztahován k reálnému bodu, jedná se o kmitání relativní.

Mechanické chvění má i užitečné vlastnosti. Uměle buzené mechanické kmity jsou základem pro práci vibračních podavačů, sbíječek, beranidel apod. Diagnostický parametr chvění se využívá k pozorování prvotních změn provozního stavu, jako reprezentativního diagnostického signálu k určení objektivního technického stavu rotujících strojních součástí.

Hlavním cílem je určit skutečný stav zařízení a tím umožnit plánování údržby, minimalizovat zbytečné preventivní opravy a předcházet havarijním stavům. Vibrační diagnostika se provádí často za plného provozu zařízení a bez omezení výroby. [3][4]

Způsoby vibrodiagnostiky

- jednorázová měření - využívají se k posouzení stavu zařízení a pro určení základních příčin vibrací.
  Měřením je možné získat poznatky pro odstranění vibrací, ale prognóza o budoucím vývoji stavu zařízení je obtížná.
- periodická měření - pravidelná měření vibrací, která pomáhají určit průběh vývoje nalezených stavů
- stabilní monitorování – nepřetržité sledování stavu strojního zařízení. Nejčastěji využíváno k bezpečnostnímu monitorování.

[3][4]

4. KALIBRACE

Kalibrace je soubor úkonů, pomocí nichž se za daných podmínek určuje vtah mezi hodnotami veličin, které mohou být indikované různými způsoby, které jsou realizovány etalony.

Způsoby indikace veličin:

- měřícím systémem
- měřícím přístrojem
- hodnotami reprezentovanými tělesnou mírou
- referenčním materiálem a odpovídajícími hodnotami

4.1. Pojmy a definice [1]

Etalon – měřidlo sloužící k realizaci a uchování určité jednotky nebo stupnice a k jejímu přenosu na měřidla, která mají nižší přesnost

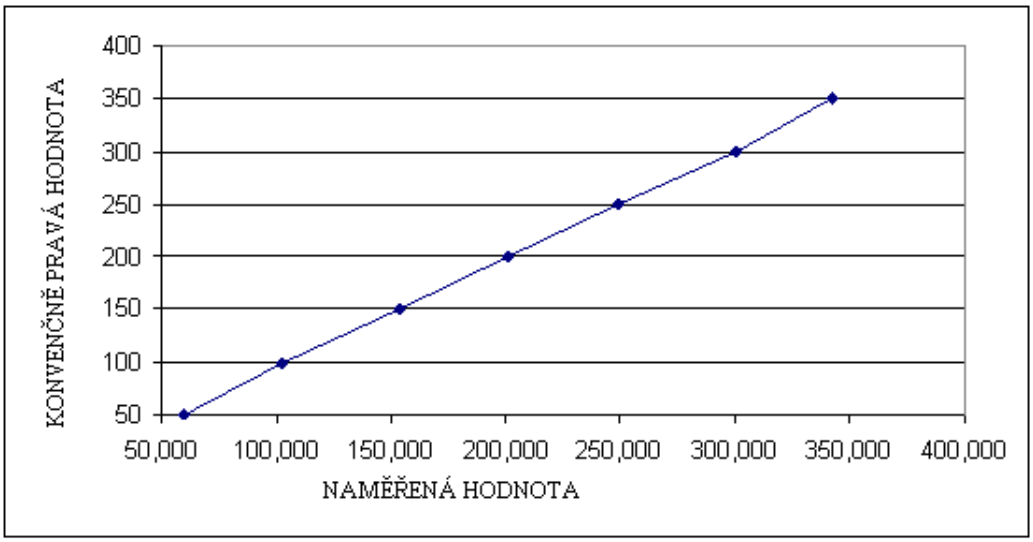
Referenční hodnota – hodnota referenční veličiny, při jejímž překročení nastává nepřesnost měření a vzniká možnost poruchy

Maximální (špičková) hodnota – nejvyšší naměřená hodnota měřené veličiny

Efektivní hodnota – je $\sqrt{2}$ maximální (špičkové) hodnoty

Korekce – hodnota připojená k výsledku měření, která je rovna systematické chybě, ale má opačné znaménko

Kalibrační křivka – křivka, která vyjadřuje závislost hodnoty konvenčně pravé na hodnotě naměřené, nejjednodušší formou je lomená čára, která propojuje body měření [7]



Obr. 2 Příklad kalibrační křivky[7]

4.2. Způsoby kalibrace snímačů vibrací [3]

Způsobů kalibrace snímačů vibrací máme několik. Mezi hlavní patří:
- použití stolku s vibračním zařízením
- porovnávání neznámého snímače s etalonem,
- použití vodorovného vibračního stolku

Použití stolku s vibračním zařízením

Kalibrovaný snímač je připevněn ke stolku s vibračním zařízením (vibrátorem), která je nastaveno na přesné referenční kmitání a to na kmitání jednotkového zrychlení (1 $m.s^{-2}$), nebo na kmitání tíhového zrychlení (9,81 $m.s^{-2}$). Podle zaznamenávaných signálů, které odpovídají nastavenému zrychlení, lze kontrolovat údaje měřidel.

Vibrační zařízení obsahuje cívku, která snímá rychlost vibrací a pomocí napětí, které se na ní indikuje, lze nastavit a udržovat hladinu vibrací na referenční hodnotě, která by pro vysokou přesnost měla mít hodnotu jednotkového zrychlení, ale v praxi se často používá hodnota tíhového zrychlení zaokrouhlená na desetinásobek jednotkového zrychlení

Kalibrační zařízení pracuje se sinusovým signálem o amplitudě zrychlení a_0, z čehož lze za použití úhlové frekvence odvodit vztah pro amplitudu rychlosti a pro amplitudu výchylky dle [3].

$$v_0 = \frac{a_0}{\omega} \tag{4.1}$$

$$y_0 = \frac{a_0}{\omega^2} \tag{4.2}$$

Kalibrační zařízení je přenosný přístroj, který je často vybaven vlastním zdrojem elektrické energie – baterií, čímž umožňuje kontrolu snímače přímo při měření.

Porovnávání neznámého snímače s etalonem

V tomto případě je porovnáván neznámý snímač vibrací s etalonem, u kterého je známá jeho citlivost. Oba snímače jsou připevněné ke snímacímu stolku tak, aby na ně působilo stejné zrychlení, a výstupní napětí obou snímačů se porovná.

Použití vodorovného vibračního stolku

Kalibrovaný snímač vibrací je přimontován k vodorovnému vibračnímu stolku. Vedle snímače je položeno malé závaží. Stolek je elektromagneticky buzen frekvencí 50 Hz. Postupně měníme amplitudu zrychlení. Je-li amplituda zrychlení menší než tíhové zrychlení, které působí na závaží, závaží bude přesně sledovat pohyb stolku a zůstane vzhledem k němu v klidu. Je-li amplituda zrychlení vyšší než tíhové zrychlení, závaží nemůže sledovat pohyb stolku a bude se po něm pohybovat. Hodnota výstupního napětí, při kterém se závaží začalo pohybovat, slouží ke kalibraci snímače zrychlení při tíhovém zrychlení (9,81 $m.s^{-2}$).

V případě, že je tíhové zrychlení i amplitudou zrychlení (maximální hodnota zrychlení) a voltmetr, který měří výstupní napětí snímače udává maximální hodnotu, pak je poměr těchto maximálních hodnot citlivostí snímače. Většina přístrojů neudává maximální hodnotu, ale efektivní hodnotu. Pro výpočet citlivosti snímače je možné použít jak hodnoty maximální, tak hodnoty efektivní dle [3].

$$S = \frac{U_{\max}}{g_{\max}} = \frac{U_{ef}}{g_{ef}} \tag{4.3}$$

4.3. Kalibrace v zákonech

Zákon o kalibraci měřidel je uveden v zákoně 505/1990 Sb. o metrologii ze dne 16. listopadu 1990 ve znění dalších zákonů (119/2000 Sb., 137/2002 Sb., 444/2005 Sb. atd).

Zákon 505/1990 Sb. o metrologii § 5 odst. 5 nám říká:

„Hlavní etalony tvoří základ návaznosti měřidel u subjektů a podléhají povinné kalibraci. Kalibraci hlavních etalonů provádí na žádost uživatele Český metrologický institut nebo střediska kalibrační služby. Lhůtu následující kalibrace hlavního etalonu stanoví uživatel podle metrologických a technických vlastností, způsobu a četnosti používání hlavního etalonu. Je-li Český metrologický institut požádán o kalibraci hlavního etalonu, ve kterých jsou vyhlášena stanovená měřidla, je povinen ji buď provést, anebo může tuto kalibraci zprostředkovat v zahraničí.“

Dále se v tomto zákoně dočítáme o tzv. „návaznosti etalonů“ (jejich kalibrace), o „návaznosti stanovených měřidel“ (ověřování pomocí etalonů). [5]

4.4. Kalibrační protokol

Kalibrační protokol slouží k zapsání a následnému uložení informací a parametrech, které byly zjištěny kalibrací přístroje.

Kalibrační protokol musí obsahovat:

- kalibrační ústav, který kalibraci provedl
- zákazníka, který si kalibraci vyžádal
- informace o přístroji – typ, výrobce, výrobní číslo, rozsah, třída přesnosti
- etalon, který byl ke kalibraci použit
- výsledky měření
- hodnocení kontrolora
- datum a místo provedení

STROJNÍ laboratoře- Střední průmyslová a Vyšší odborná škola
ŠKOLNÍ 50, 430 01 CHOMUTOV
tel. 474/ 62 89 92 fax. 474/ 62 74 97

KALIBRAČNÍ LIST č. 2/UK-02 **Počet listů: 1** **List číslo : 1**

ZÁKAZNÍK Jméno : Energetické závody a.s.
Adresa: Prunéřov č. 375, 432 01 KADAŇ

PŘEDMĚT Název : **ČÍSELNÍKOVÝ ÚCHYLKOMĚR 0-3 / 0,01mm**
Č. ev. a výr.: **2C 128**
Výrobce: **SOMET**

Datum přijetí předmětu kalibrace: 11. 12. 2002
Datum provedení kalibrace: 13. 12. 2002
Kalibraci provedl: Hliza Vojtěch

ZPŮSOB KALIBRACE
Metodický předpis: ČSN 25 1801, ČSN 25 1802
Kalibrační zařízení: SUHL LS 012
Navazující etalon: koncové měrky –sada 1,05 – 100 mm v.č. 010723,UNIMETRA
Teplota: 22 ± 1°C

VÝSLEDEK KALIBRACE:

Rozsah (mm)	Výsledné hodnoty při zatížení a odlehčení								Δ1 (μm)	ΔV (μm)	Δ3 (μm)	R (μm)
0-3	**Zatěžování**								1	2	12	3
	a	0,00	0,50	1,00	1,50	2,00	2,50	3,00				
	b	1,00	2,00	10,00	12,00	11,00	8,00	8,00				
	Odlehčování											
	a	0,00	0,50	1,00	1,50	2,00	2,50	3,00				
	b	-2,00	6,00	9,00	9,00	10,00	8,00	6,00				

Použité znaky:
a-jmenovité hodnoty v mm
b-výsledné odchylky v μm
R- reverzibilita
Δ1- rozdíl max. a min. odchylky na úseku 1 mm
Δ3- algebraický rozdíl pořadnic nejvyššího a nejnižšího bodu křivky chyb
ΔV- variační rozpětí

Výsledek měření Y= (12μm ± 2) byla stanovena pro k= 2 podle dokumentu EAL- R2.

(razítko)

(podpis)

V Chomutově dne: 16.12. 2002 vedoucí kalibrační laboratoře

Uvedené výsledky se vztahují jen ke kalibrovanému předmětu. Bez svolení kalibrační laboratoře lze kalibrační list reprodukovat výhradně jen jako celek.

VZOR

Obr. 3 Ukázka kalibračního protokolu[6]

5. SNÍMAČE VE VIBRODIAGNOSTICE

5.1. Pojmy a definice

čidlo – přístroj k měření určité veličiny

dielektrikum – izolant, který může být polarizován (polarizace – vložení izolantu do elektrického pole)

seismická hmota – je tvořena cívkou, které je zavěšená na pružných planžetách v magnetickém poli permanentního magnetu

5.2. Druhy snímačů

Vibrace jsou popsány třemi základními veličinami: polohou, rychlostí a zrychlením.

5.2.1. Snímače polohy [9]

Snímače polohy jsou jednou z nejdůležitějších skupin snímačů, která nám umožňuje určit okamžitou polohu zkoumaného tělesa.

Dělení - mechanické
- pneumatické
- elektrické

Mechanické snímače jsou ovládány přímo sledovaným mechanismem nebo tělesem, díky čemuž na ně působí okolní prostředí a tím vnikaní chyby měření.

Pneumatické snímače můžeme rozdělit na pneumatické snímače s tryskou, kdy otvorem v cloně trysky je veden vzduch, který uniká do ovzduší. Dále máme pneumatické snímače s klapkou, která určuje množství unikajícího vzduchu. Podle polohy klapky se mění výstupní napětí mezi clonou a tryskou. Je-li klapka uzavřená, je výstupní tlak roven vstupnímu. Je-li klapka velmi oddálená, je výstupní tlak roven atmosférickému.

Elektrické snímače dělíme na odporové, indukčtnostní, kapacitní, fotoelektrické, Hallův a emisní.

U odporových snímačů (potenciometrů) se po odporové dráze se posouváním mění poloha kontaktů působením měřené neelektrické veličiny a tím se mění odpor mezi čidlem a začátkem (koncem) odporové dráhy. Jsou jednoduché a spolehlivé. Používají se k měření úhlové výchylky.

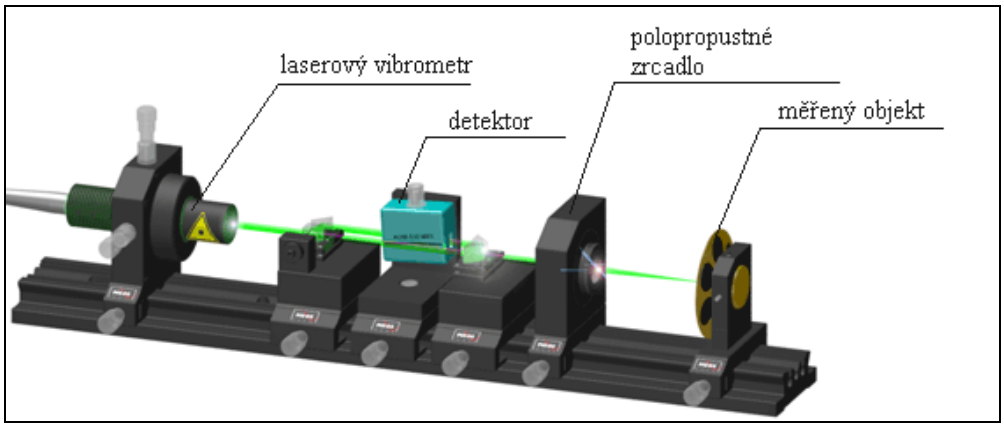
Indukčtnostní snímače jsou často používané. Pro měření malých posunutí se využívají snímače se změnou velikosti mezery. Pro měření velkých posunutí (do 100 mm) se využívají snímače s konstantním magnetickým obvodem, snímače pohyblivou cívkou snímače s proměnnou délkou magnetického obvodu, nebo snímače s otevřeným magnetickým obvodem. [10]

Kapacitní snímače využívají přímého přenosu posunutí nebo otočení na jednu z desek kondenzátoru nebo na dielektrikum. Pro jejich malé rozměry se používají pro měření rychlých jevů.

Fotoelektrické snímače jsou bezkontaktní a jsou tvořeny fotocitlivým prvkem a zdrojem světla. Mezi fotocitlivé prvky patří fotoodpory, fotodiody, fototranzistory atd. Zdrojem světla může být například žárovka, LED dioda nebo výbojka.

Mezi nejpoužívanější optické snímače vibrací patří laserový vibrometr. Těchto přístrojů máme několik typů. Klasickým řešením je jednoduchý nebo dvojitý Michelsonův interferometr a heterodynní laserový vibrometr.

Principem je monochromatický referenční optický svazek z nízkovýkonového laseru procházející Braggovým deflektorem, polopropustným zrcadlem a dopadající na reflektivní terčík, který je upevněný na kmitajícím objektu. Zpětný odražený paprsek, který je frekvenčně modulovaný, se na polopropustném zrcadle zcela odráží směrem k detektoru. [3]



Obr. 4 Laserový vibrometr[17]

Hallovy snímače se používají k měření polohy ve spojení s permanentním magnetem, kde se vzdálenost magnetu od snímače mění na výstupní napětí Hallova snímače.

5.2.2. Snímače rychlosti

Rychlost můžeme snímat buď snímačem zrychlení, kdy musíme výstupní signál integrovat a nebo použijeme elektrodynamické snímače.

Elektrodynamické snímače rychlosti pracují na principu prolínání magnetických siločar závity cívky. Ta se pohybuje ve vzduchové mezeře permanentního magnetu, která má tvar prstence. Cívka je spojena se seismickou hmotou. Při pohybu cívky se indikuje elektromagnetická síla, která je přímo úměrná rychlosti.

Mezi výhody elektrodynamických snímačů patří nízká cena, malý vnitřní odpor, velká citlivost na magnetické pole, teplotu a nárazy a výstupní signál lze použít bez dalšího zesílení. Nevýhodami jsou omezení horního kmitočtu na maximálních 3500 Hz a citlivost na parazitní magnetické pole. [10]

5.2.3. Snímače zrychlení

Snímače zrychlení našly své využití v diagnostice strojních komponent, kde při měření chvění měří zrychlení kmitání, ze kterého následnou integrací dostaneme rychlost kmitání a opětovnou integrací polohu.

Dělení - tenzometrické
- piezoelektrické

Tenzometrické snímače zrychlení se skládají z jednostranně vetknutého nosníku, kde na jeho volném konci je umístěna seismická hmota, která nosník deformuje. Deformace jsou snímané tenzometrem, který je připevněn přibližně v 1/3 délky nosníku od místa vetknutí. [3]

6. PIEZOELEKTRICKÉ SNÍMAČE

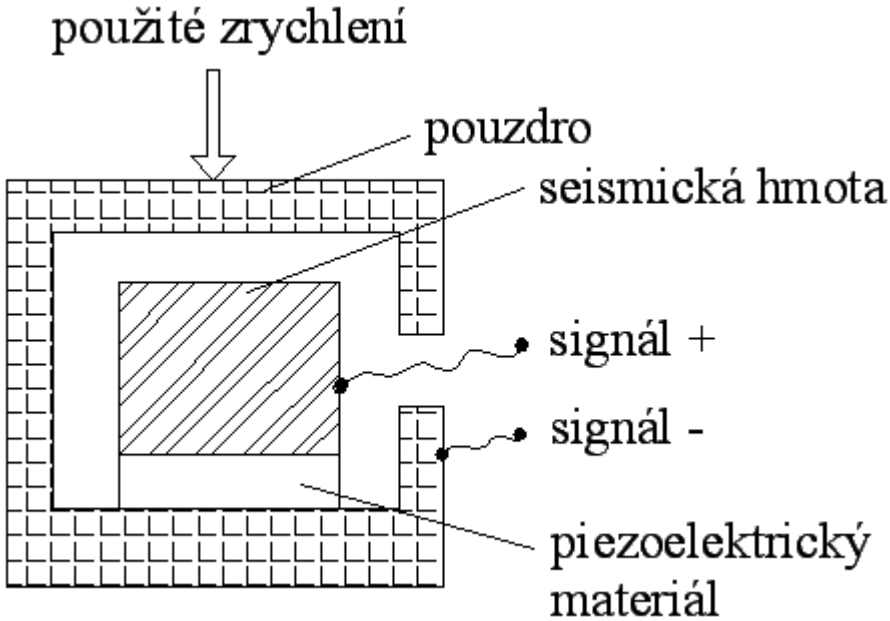
Piezoelektrické snímače jsou moderními a nejrozšířenějšími snímači zrychlení.

6.1. Princip činnosti

Snímače pracují na principu piezoelektrického jevu.

Piezoelektrický jev je schopnost krystalu generovat elektrické napětí, popřípadě se krystal působením elektrického pole deformuje. Vzniká při deformaci, kdy se ionty s opačnými náboji přesunou v krystalické mřížce tak, že se elektrická těžiště záporných a kladných iontů, která jsou v zdeformovaném krystalu souhlasná, se od sebe oddálí a tím se na plochách krystalu objeví elektrický náboj. Velikost náboje je závislá na velikosti a směru deformace krystalu. Nejpoužívanějšími materiály na výrobu krystalů jsou křemen, křišťál, titaničitan barnatý a titaničitan olovnatý. [8]

Základem piezoelektrických snímačů je piezoelektrický materiál, seismická hmota a pouzdro. Piezoelektrický materiál, který je obvykle vyroben z piezokeramiky, je z jedné strany připevněný k základně pouzdra senzoru. Seismická hmota je upevněná na piezoelektrický člen.



Obr. 5 Blokové schéma piezoelektrického snímače[11]

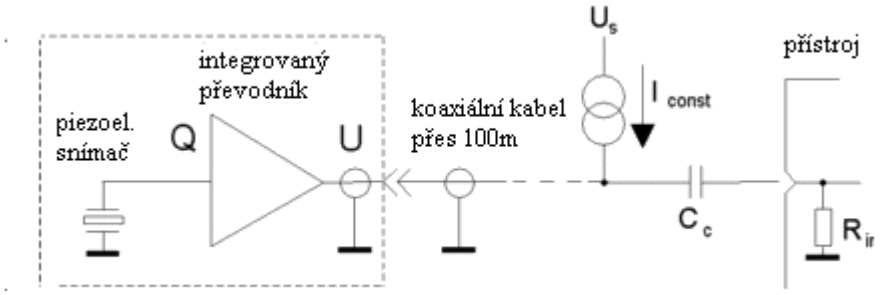
Výstupní napětí členu je přímo úměrné zrychlení, kterému je snímač vystaven. Základní požadavek, který je kladen na snímače zrychlení, je, aby elektrický signál byl co největší a to při malých hodnotách zrychlení. Aby byl tento požadavek splněn, musel by mít piezoelektrický člen velkou hmotnost a velké rozměry. Pro zmenšení hmotnosti a rozměrů se používají předzesilovače.

Piezoelektrický snímač má svou citlivost, což je poměr elektrického výstupního signálu a zrychlení, které by signál vyvolalo. Citlivost máme napěťovou, která je poměrem výstupního napětí a zrychlení a dále nábojovou, která je poměrem náboje a zrychlení, které náboj vyvolalo. [11]

6.2. Zapojení piezoelektrických snímačů

Piezoelektrický člen je připojený na výstupní elektrické rozhraní pomocí dvou elektrod. Vlastnosti výstupního signálu jsou určeny vnitřním integrovaným elektronickým obvodem (ICP – Integrate Circuit-piezoelectric), který přeměňuje signál o vysoké impedanci na signál s nízkou impedancí.

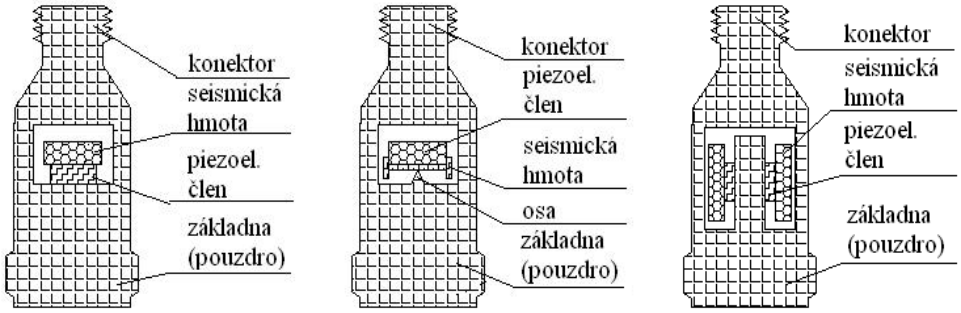
Reálné snímače mají limity měření. Zrychlení lze měřit jen v platném provozním frekvenčním rozsahu, který je určen konstrukcí senzoru. [11]



Obr. 6 Zapojení piezoelektrického snímače[11]

Rozdělení senzorů podle konstrukce (podle uspořádání jednotlivých částí senzoru):

- mód smykový – používá se pro senzory s vysokou odolností na vliv teploty a vibrace pouzdra
- mód ohybový – používá se pro velmi citlivé senzory
- mód kompresní – používá se u běžných průmyslových senzorů se základním provedením



Obr. 7 Smykový mód, ohybový mód, kompresní mód[11]

Vlastnosti:

Piezoelektrické snímače mají řadu kladných vlastností, mezi něž patří nízká hmotnost (i pod 1g), díky které snímače tolik nezatěžuji měřený objekt, dále pak jednoduchá konstrukce, necitlivost na magnetické pole, vysoká mechanickou odolnost a velký dynamický rozsah. Piezoelektrické snímače mohou pracovat i za teplot okolo 450 °C a to podle použitého piezoelektrického prvku.

Nevýhodami jsou vyšší pořizovací cena, nízká úroveň výstupního signálu znemožňuje aplikaci bez zesilovače a tedy bez napájecího zdroje. [11]

Obr. 8 Piezoelektrický snímač s přídavným zařízením pro měření výstupního napětí [12]

7. VYHODNOCOVÁNÍ VIBRACÍ

7.1. Vyhodnocování vibrací v časové oblasti

Vyhodnocení signálů v časové oblasti rozdělujeme na vyhodnocení celkového kmitání a na vyhodnocení časových průběhů signálů. Celkové kmitání souvisí se všemi frekvencemi kmitání v daném bodě měření. Vyhodnocení se porovnává naměřená hodnota celkového kmitání v předchozím měření, kdy stroj pracoval bez poruchy, nebo se nastavují kritické hodnoty, se kterými se porovnávají ty naměřené.

Pomocí databáze výsledků měření celkového kmitání byla sestavena doporučení mezních hodnot kmitání pomocí efektivních rychlostí kmitání v kmitočtovém pásmu 10 HZ až 1000 Hz. Mechanické kmitání se měří při jmenovitých otáčkách stroje na víku ložisek nebo na štítech ložisek a to ve třech navzájem kolmých směrech. [2][3]

7.2. Vyhodnocování vibrací ve frekvenční oblasti

Správné použití frekvenční analýzy odstraňuje nevýhody vyhodnocování v časové oblasti, protože jen vyhodnocování ve frekvenční oblasti určuje místo vznikající poruchy u jednotlivých strojních součástí. Úplná frekvenční analýza je dána amplitudovým a fázovým spektrem, které je podstatné pro zjištění typu nevyváženosti a také pro metody vyvažování. Fázové spektrum tvoří podklad pro rozlišení závad na rotujícím stroji, jako jsou nevyváženost ozubených soukolí a ložisek. Průběžné sledování a zobrazování rozběhů a doběhů strojů a postupném zhoršování technického stavu můžeme analyzovat na trojrozměrných diagramech. [2][3]

8. FREKVENČNÍ ANALÝZA

Spousta měřících přístrojů používá k frekvenční analýze matematického postupu, kdy se pomocí rychlé Fourierovy transformace vypočítají jednotlivé kmitočtové složky změřeného časového komplexního signálu.

Pomocí Fourierovy transformace analyzujeme především periodické a neperiodické signály. Pro náhodné signály je Fourierova transformace nepoužitelná.

Periodické signály

Fourierova transformace lze použít pouze jako limitní případ signálu definovaného na intervalu –T/2, T/2 pro T→ ∞, čímž Fourierova transformace přejde na Diracovy impulsy. Pro spektrum jednotkového rotačního fázoru platí dle [3]:

$$x(t) = e^{j2\pi f_1 t} \longleftrightarrow F\{x(t)\} = \delta(f - f_1)\,, \tag{8.1}$$

kde $\delta(f - f_1)$ je Diracův impuls v kmitočtové oblasti posunutý o f_1 od počátku kmitočtové stupnice f = 0. Pro periodický signál platí dle [3]:

$$x(t) = \sum_{k=-\infty}^{\infty} c_k e^{j2\pi f_k t} = \sum_{k=-\infty}^{\infty} |c_k| e^{j(2\pi f_k t + \varphi_k)} \tag{8.2}$$

kde f_k je základní frekvence
c_k je komplexní amplituda
φ_k je základní fáze

po jeho transformaci dostaneme

$$F\{x(t)\} = \sum_{k=-\infty}^{\infty} c_k * \delta(f - f_k) \tag{8.3}$$

Neperiodické signály

Neperiodický signál, tj. signál $x(t) \neq x(t + nT)$, definujeme jako konečný signál o délce trvání daného časového intervalu. Mimo tento interval je signál nulový. Bude-li signál periodicky opakován s periodou T větší než je daný interval, pak bude platit Fourierův poznatek o rozložení funkce na nekonečnou řadu harmonických složek dle [3]:

$$x(t) = \sum_{k=-\infty}^{\infty} c_k e^{j2\pi f_k t} = \sum_{k=-\infty}^{\infty} |c_k| e^{j(2\pi f_k t + \varphi_k)} \tag{8.4}$$

kde

$$c_k = \frac{1}{T} \int_{-T/2}^{T/2} x(t) e^{-j2\pi f_k t} dt \tag{8.5}$$

Pro periodu T→ ∞ se amplituda analýzy blíží nule, jejich limita se blíží také nule a počet čar spektra se blíží nekonečnu. Čárové spektrum přejde ve spektrum spojité, tj. dle [3]
k*f → f
T*c_k → F (jf), kde

$$F(jf) = \int_{-\infty}^{\infty} x(t) e^{-j2\pi f t} dt\,, \tag{8.6}$$

což je vzorec pro přímou Fourierovu transformaci. Pro Fourierovu transformaci inversní platí dle [3]:

$$x(t) = F^{-1}\{F(jf)\} = \int_{-\infty}^{\infty} F(jf) e^{j2\pi ft} df \tag{8.7}$$

[3]

9. ZPRACOVÁNÍ SIGNÁLŮ

9.1. Teorie signálů

Signál je fyzikální veličina, která nese informaci, většinou jako okamžitou hodnotu určité měřené veličiny, která je funkcí času.

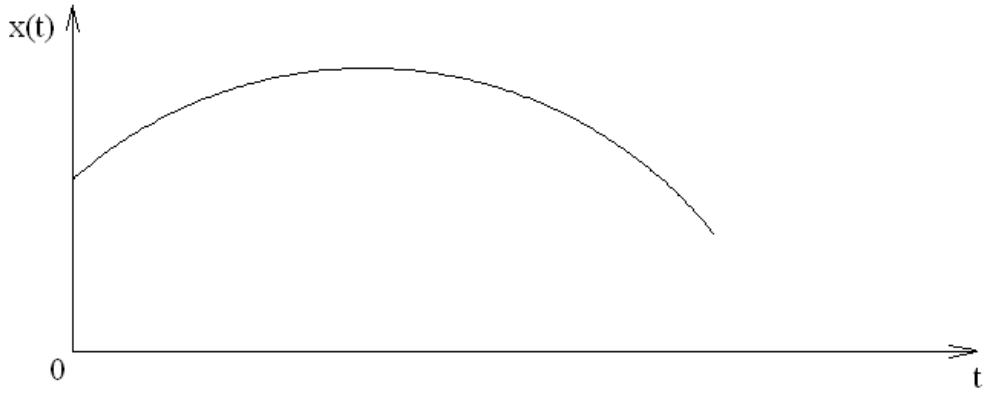
Signály se vyjadřují graficky, analyticky, tabulkově nebo vektorově.

Signály se dělí podle časového průběhu na:

- spojité signály
- diskrétní signály

Spojité signály

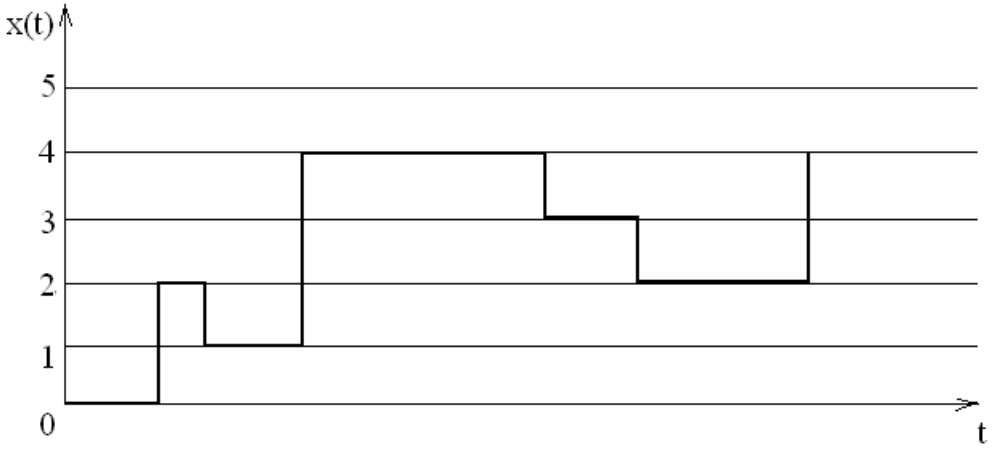
Spojitý signál je spojitou funkcí v závislosti na čase, která nabývá neomezeného množství hodnot. Spojitý signál je vždy získáván na výstupu.



Obr.9 Příklad spojitého signálu[14]

Diskrétní signály

Diskrétní signál je nespojitý buď v čase, nebo v hodnotě. Signál nespojitý v čase vzniká vzorkováním.



Obr.10 Příklad diskrétního signálu[14]

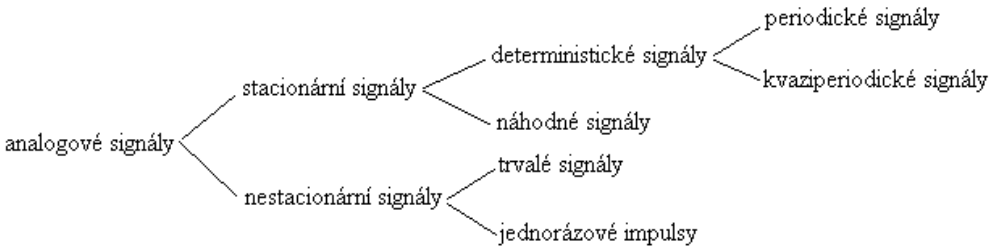
Další dělení:

- analogové signály
- číslicové signály

Analogové signály

Analogový signál je vyjadřován jako přímý obraz fyzikálního děje. Tyto signály jsou spojité a vyjadřují se především graficky, analyticky nebo pomocí časových funkcí.

Dělení analogových signálů:



Obr. 11 Rozdělení analogových signálů

Stacionární signály oproti nestacionárním nemění své vlastnosti se změnami času. U deterministického signálu je možné předem určit, jakou hodnotu bude signál v určitém časovém okamžiku mít. Jednorázové impulsy jsou signály, které mají konečnou energii, která má nulový střední výkon.

Periodické signály

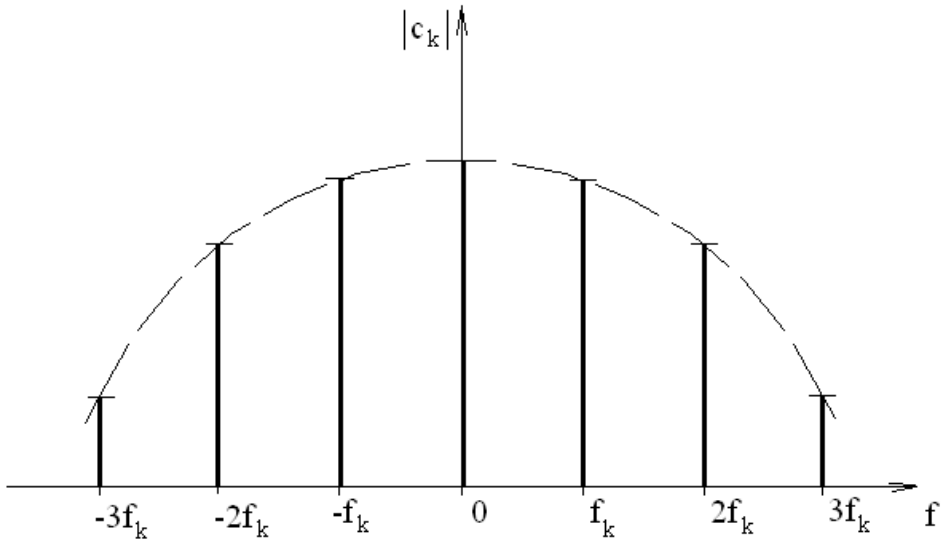
Periodickými signály jsou signály, u kterých se časový průběh veličiny opakuje s periodou T. Pro periodické signály platí dle [14]:

$$x(t) = x(t + n * T) \tag{9.1}$$

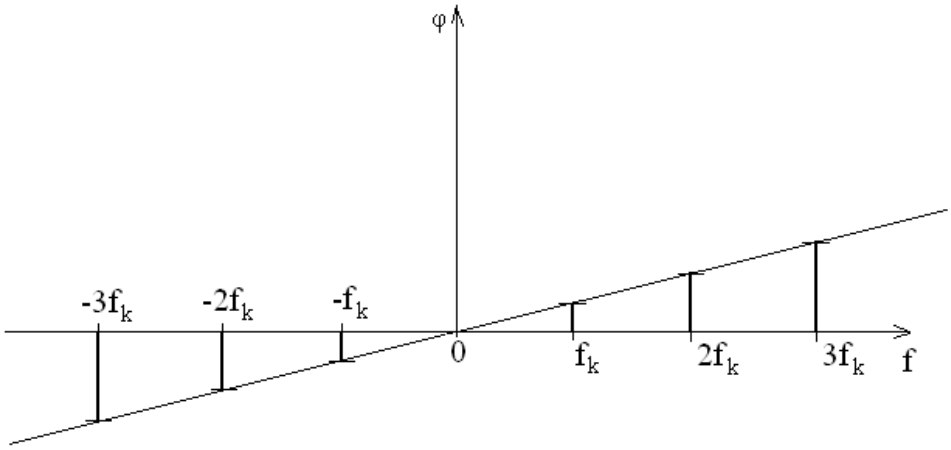
kde n ϵ Z , t ϵ (- ∞;∞).

Vyjádření periodického signálu pomocí harmonických složek se nazývá čárové spektrum. Pro každou periodu je nutné vyjádřit amplitudu a fázi příslušné složky. K vyjádření se používá zejména vztah (8.5), který obsahuje i záporné frekvence komplexní amplitudu je možné vyjádřit jako vektory v komplexní rovině. Závislost na frekvenci ovšem není moc názorná. Amplitudy a fáze mají názorné fyzikální znázornění, tudíž se využívá jejich vyjádření závislosti na čase. Podle toho se mluví buď o amplitudovém spektru, nebo o fázovém spektru.

Pojmenování vyplývá z tvaru vyjádření obou spekter. Rozklad na jednotlivé harmonické složky se nazývá harmonickou analýzou.



Obr. 12 Amplitudové spektrum periodického signálu[14]



Obr. 13 Fázové spektrum periodického signálu[14]

Kvaziperiodické signály

Tyto signály nejsou periodické, ale vyjadřují se čárovým spektrem. Signál je složen z minimálně dvou harmonických signálů, kde mají alespoň dva z nich iracionální poměr frekvencí. U těchto signálů se špatně určuje, zda jsou nestacionární nebo zda jsou kvaziperiodické, jelikož předem nelze určit, jaká je jejich frekvence.

Číslicové signály

Číslicové signály lze chápat jako řadu čísel vyskytujících se v určitých časových okamžicích. Tyto signály jsou diskrétní.

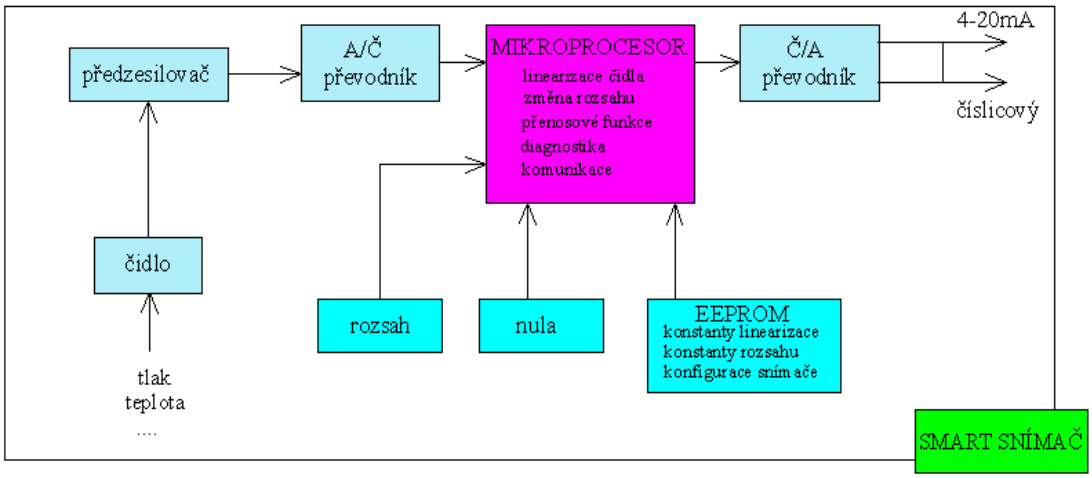
[13][14]

10. AUTODIAGNOSTIKA A AUTOKALIBRACE

U každého typu měřícího přístroje může docházet k chybám při měření. Tyto chyby způsobují naměření nepřesných hodnot a tím přístroj samotné měření znehodnocuje. S chybami může měřit samozřejmě i snímač vibrací. Aby se tyto chyby co nejvíce snížily nebo se jim dalo úplně vyhnout, bylo by vhodné využít automatické diagnostiky a automatické kalibrace.

10.1 Inteligentní snímače (smart snímače)

Inteligentní snímač je možné chápat jako samostatnou mikroprocesorovou jednotku, jehož částmi jsou čidlo, předzesilovač, A/Č převodník, mikroprocesor pro zpracování a analýzu signálu, Č/A převodník a komunikátor. Je schopen provádět autodiagnostiku a autokalibraci, avšak využití těchto pokročilejších funkcí je dáno znalostí a odhalením všech důležitých vlivů, které se podílejí na výsledné odchylce měřené veličiny.



Obr. 14 Blokové schéma inteligentního snímače

Smart snímač se rozděluje na tři části – vstupní část, vnitřní část a výstupní část. Vstupní část zajišťuje vstup měřených veličin, převádí je na elektrickou veličinu a tu převádí na vhodný elektrický signál. Vnitřní část zpracovává vstupní signál a zajišťuje kompenzaci vlivu okolí, automatickou kalibraci měřící funkce a autodiagnostické funkce a mnoho dalších. Výstupní část zajišťuje komunikaci senzoru s následným zařízením a dle potřeby převádí signál na analogový. V případě, že se signál bude dále zpracovávat pomocí diskrétního zařízení, tak je signál vhodně unifikován pro toto zařízení. Na výstupu snímače je většinou jedna hodnota měřené veličiny, buď v číslicové nebo analogové podobě. [15]

10.2 Autodiagnostika

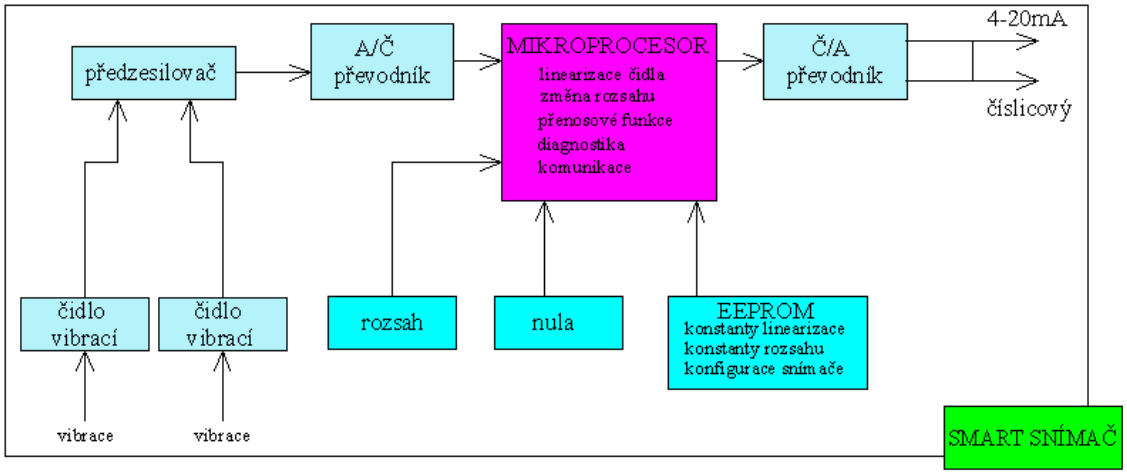
10.2.1 Princip

Autodiagnostika probíhá neustále. Při jejím chodu snímač sám vyhodnocuje, zda pracuje správně a zda nedošlo při měření k chybě. Pokud k chybě dojde, pak snímač vyšle informaci řídícímu systému o tom, že nepracuje správně a je nutné chybu odstranit.

10.2.2 Využití

Pro přesnou funkci autodiagnostiky u snímače vibrací je vhodné využít tzv. zdvojený snímač. Jedná se o provedení, kdy vlastní snímač obsahuje dva měřící elementy pracující na jiném principu, aby se snížila pravděpodobnost poruchy obou snímačů naráz. Diagnostika reaguje na odchylky jednotlivých signálů. Jako součást smart snímače se použijí dvě čidla měřící vibrace. Kdyby bylo použito pouze jedno čidlo měřící vibrace a vznikla by jeho porucha, pak by byla těžko rozpoznatelná. Proto se používají dvě čidla. Při srovnání jejich signálů lze odhalit vznik poruchy na jednom z nich. Jejich výstupy jsou napojené na vstupy mikrokontroleru. Přivedené hodnoty signálů z měřících elementů mikrokontroler porovná. Pokud jsou shodné, pak měření probíhá správně. Pokud se liší, je signalizovaná porucha obsluze nebo nadřazenému hlídacímu systému, a to například výstupním signálem 0-4 mA.

Na místo mikrokontroleru lze použít DSP (Digital Signal Processor), které jsou modernější a výkonnější.



Obr. 15 Blokové schéma zapojení čidel a mikrokontroleru ve smart snímači pro autodiagnostiku

10.3 Autokalibrace

Kalibrace je proces, kterým se za daných podmínek určuje vztah mezi naměřenými hodnotami a hodnotami danými etalonem. Pokud je přístroj schopen provést kalibraci bez vnějšího zásahu, hovoříme o autokalibraci

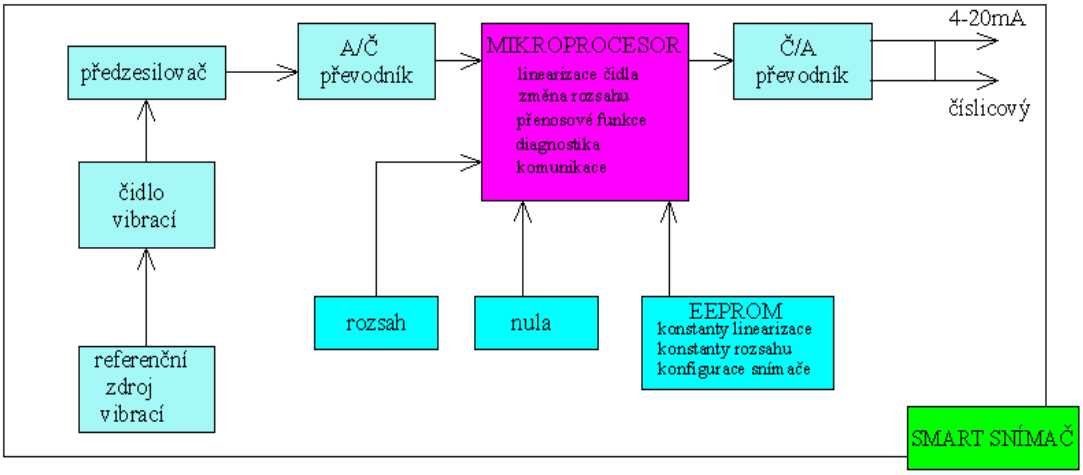
10.3.1 Autokalibrace snímače vibrací

Pro automatickou kalibraci se opět vyžije smart snímač jehož součástí je čidlo měřící vibrace, referenční zdroj vibrací a mikrokontroler. Zdroj vibrací produkuje předem nastavené vibrace o určité hodnotě (mm/s, Hz) a je spouštěn mikrokontrolerem. Čidlo vibrací změří vibrace a ty jsou převedeny na elektrický signál. Tento signál je vyhodnocen mikrokontrolerem. Mikrokontroler má informaci o hodnotě referenčního signálu ze zdroje vibrací, který má být shodný se signálem z čidla. Je-li signál z čidla jiný, pak si rozdíl uloží mikrokontroler do paměti a při dalším měření bude tento rozdíl kompenzovat. Z výstupu smart snímače jde zkalibrovaný signál.

Toto řešení lze použít, pokud není diagnostikovaný stroj v provozu. Pokud je stroj v provozu, pak na snímač působí rušivé vibrace a máme dvě řešení.

Prvním by bylo odpojení snímače a druhým řešením je posílání signálů na určité frekvenci a zbylé frekvence by se odfiltrovaly pomocí pásmové propusti. Po odfiltrování by zůstal pouze testovací signál.

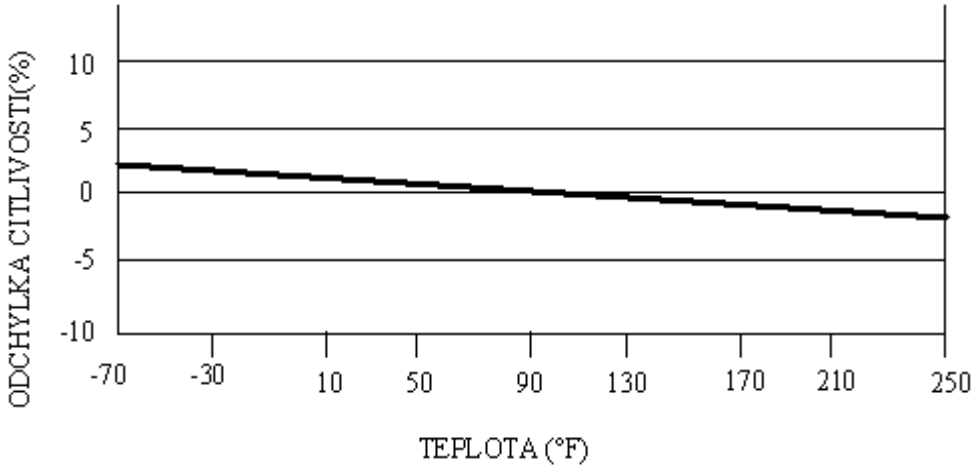
Pro zdroj vibrací je možné zvolit např. vibrační motorek do mobilního telefonu. Na trhu je několik typů. Jejich cena se liší podle značky mobilního telefonu a pohybuje se v rozsahu od 50 do 250 Kč za kus.



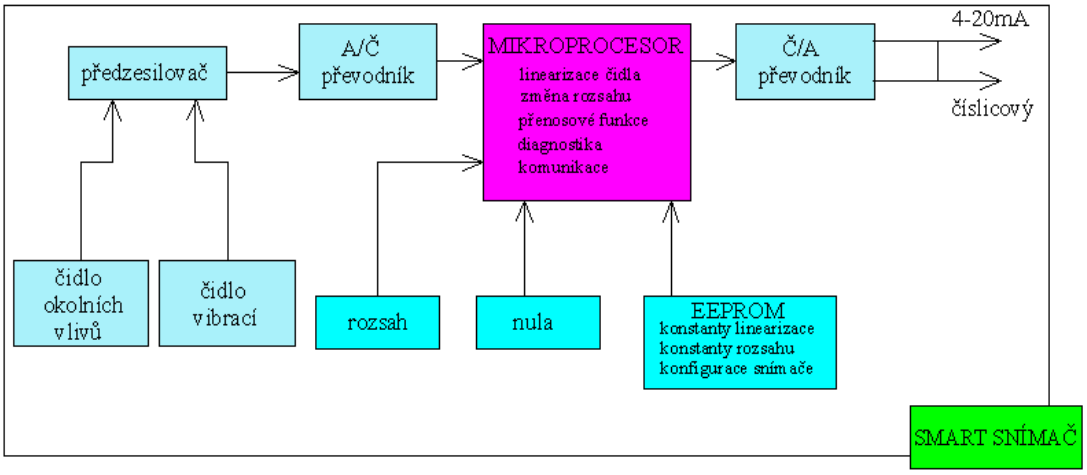
Obr. 16 Blokové schéma zapojení čidla vibrací, referenčního zdroje a mikrokontroleru pro autokalibraci snímače vibrací

10.3.2 Autokalibrace okolních vlivů

Mezi hlavní okolní vlivy patří teplota, tlak a čas (stárnutí snímače). Pro automatickou kalibraci okolních vlivů je navržen smart snímač, který obsahuje čidlo vibrací, čidlo měřící některý z okolních vlivů a mikrokontroler. Výstupy obou čidel jsou přivedeny na vstupy mikroontroleru. Signál z čidla vibrací je různý podle měnící se teploty. Mikrokontroler má v paměti uloženou korekční křivku nebo příslušný matematický algoritmus daný výrobcem (Obr. 17). Při změně teploty je k signálu z čidla vibrací přidaná hodnota odpovídající rozdílu referenční a aktuální teploty. Poté jde z výstupu smart snímače zkalibrovaný signál.



Obr. 17 Příklad korekční křivky pro závislost citlivosti na teplotě[16]



Obr. 18 Blokové schéma zapojení čidla vibrací, čidla okolních vlivů a mikrokontroleru pro autokalibraci okolních vlivů

11. ZÁVĚR

Cílem práce bylo vytvoření návrhu automatické kalibrace snímačů vibrací. Autokalibrace a autodiagnostika, která vyhodnocuje poruchu, na základě které se snímač kalibruje, jsou pokročilejšími funkcemi technické diagnostiky.

Pro návrh automatické kalibrace bylo potřeba nejprve zpracovat návrh pro automatickou diagnostiku. V návrhu jsou využité inteligentní (smart) snímače. Pro automatickou diagnostiku jsou do smart snímače vestavěná dvě čidla vibrací, a mikrokontroler. Po srovnání výstupních signálů čidel, lze detekovat poruchu na jednom z nich. Pokud porucha nastane, mikrokontroler na ni upozorní nadřazeny systém.

V návrhu autokalibrace snímačů vibrací je součástí smart snímače referenční zdroj vibrací, čidlo vibrací a opět mikrokontroler. Tentokrát se porovná referenční signál zdroje a signál z čidla. Jsou-li rozdílné, je provedena autokalibrace, kterou nastavuje mikrokontroler.

Na snímač mohou působit okolní vlivy, které se pomocí automatické kalibrace dají odstranit. Mezi okolní vlivy patří teplota, tlak a čas (stárnutí snímače). V navržené autokalibraci okolních vlivů je v inteligentním snímači obsaženo čidlo vibrací, čidlo měřící okolní vlivy a mikrokontroler. Například při změně teploty jsou přepočítané výstupní údaje z čidla vibrací.

Pro praktické zpracování teoretických návrhů by bylo potřeba větší množství času. Před vlastním praktickým zpracováním by bylo potřeba navrhnout, které snímače a typy mikrokontroleru by byly nejvhodnější pro použití. Dále by se mělo zauvažovat nad vzájemným propojením komponent a nad omezením rušivých vlivů (např. další vibrace), které by mohly funkčnost snímače ovlivnit.

Automatická diagnostika a automatická kalibrace mají v budoucnosti technického diagnostikování své místo. S jejich pomocí je možné ušetřit čas tím, že je snímač schopen diagnostikovat svoji poruchu a následně ji sám i opravit, bez zásahu z nadřazeného systému. Dále se zajisté ušetří finanční prostředky.

POUŽITÁ LITERATURA

[1] VDOLEČEK, František. Technická měření. Brno, 2002. 64 stran.

[2] VDOLEČEK, František. *Spolehlivost a technická diagnostika*. Brno, 2002. 49 stran

[3] JANOUŠEK, I.; Kozák, J.; Taraba, O. a kol.. *Technická diagnostika*. 1. vydání Praha, SNTL Praha; 1988. 432 stran. ISBN 04-236-88.

[4] KRIEDL, M. a kol.. *Diagnostické systémy*. 1. vydání Praha: Vydavatelství ČVUT, 2001. 352 stran. ISBN 80-01-02349-4.

[5] *Sbírka předpisů*.[online].Praha: Federální shromáždění České a Slovenské republiky,Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví. 1990-2006. [cit. 17.3.2008]. Dostupné z: http://www.unmz.cz/cz/4/505_90_upl.htm.

[6] SPŠ CHOMUTOV; *Kalibrační list*.[online]. 2002. [cit. 17.3.2008]. Dostupné z: http://www.spscv.cz/images/kalibrace/list_vzor2.gif.

[7] ISS MĚLNÍK. *Základní pojmy*. [online]. 2006. [cit. 20.5.2008]. Dostupné z: http://www.isstechn.cz/programy/mereni/zakladni_pojmy.

[8] WIKIPEDIE. Piezoelektrický jev. [online].15.10.2007. [cit. 8.5.2008]. Dostupné z: http://cs.wikipedia.org/wiki/Piezoelektrick%C3%BD_jev.

[9] VŠB-TU OSTRAVA.*Snímače polohy a výchylky*.[online].[cit. 29.3.2008].Dostupné z: http://hgf.vsb.cz/neu10/studium/ashv/texty/doly/07_poloha.pdf

[10] JANDOVÁ, Kateřina. *Vibrodiagnostika*. [online]. 2006. [cit. 29.3.2008]. Dostupné z: http://www.cdm.cas.cz/czech/hora/vyuka/tdk/sem2006/VD_JANDOVA.ppt#256,1,Vibrodiagnostika

[11] VOJÁČEK, Antonín. *Principy akcelerometrů – 1.díl – Piezoelektrické*.[online]. 14.1.2007. [cit.9.5.2008]. Dostupné z: http://automatizace.hw.cz/mereni-a-regulace/ART303-principy-akcelerometru--1-dil--piezoelektricke.html.

[12] NEWPORT ELECTRONICS, spol. s r.o.. *Akcelerometry*.[online].Kladno 1995-2005. [cit. 22.4.2008]. Dostupné z: http://www.omegaeng.cz/prodinfo/Accelerometers.html.

[13] NEVŘIVA, Pavel. *Signály a soustavy I*. 1. vydání Ostrava: Vydavatelství VSB, 1993. 169 stran. ISBN 80-7078-196-3 20.00.

[14] ERTINGR, Zdeněk. *Signály a soustavy*. 4. vydání Brno: Vydavatelství VUT, 1990, 197 stran.

[15] ADÁMEK, Martin. *Mikrosenzory* .[online]. 1995. [cit. 17.5.2008]. Dostupné z: http://147.229.68.118/~adamek/uceb/DATA/s_1_1.html.

[16] PCB PIEZOTRONICS. *Installation and operating manual – Model 301A11*. [online].2007. [cit. 22.5.2008]. Dostupné z: http://www.pcb.com/contentstore/docs/PCB_Corporate/Vibration/products/Manuals/301A11.pdf.

[17] ČVUT PRAHA. Laserový vibrometr. [online]. 2006. [cit. 12.5.2008]. Dostupné z: mech.fsik.cvut.cz/doku.php?id=mech:laborator.