



# VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

## FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

## ÚSTAV KONSTRUOVÁNÍ

INSTITUTE OF MACHINE AND INDUSTRIAL DESIGN

## TRIBOTECHNICKÁ DIAGNOSTIKA MAZIV

TRIBOTECHNICAL DIAGNOSTICS OF OILS

### BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

### AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Ondřej Pokorný

### VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Ing. Petr Svoboda, Ph.D.

BRNO 2017

# Zadání bakalářské práce

Ústav:	Ústav konstruování
Student:	<b>Ondřej Pokorný</b>
Studijní program:	Strojírenství
Studijní obor:	Základy strojního inženýrství
Vedoucí práce:	<b>doc. Ing. Petr Svoboda, Ph.D.</b>
Akademický rok:	2016/17

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:

## **Tribotechnická diagnostika maziv**

### **Stručná charakteristika problematiky úkolu:**

Tribotechnická diagnostika je jednou z metod nedestruktivní a bezdemontážní diagnostiky využívající maziva jako prostředku pro získání informací o dějích a změnách v tribologických systémech. V časovém předstihu identifikuje a vyhodnocuje výskyt cizích látek v mazivu. Vhodnou aplikací tribodiagnostických senzorů je možno upozornit na vznikající poruchy, popřípadě na lokalizaci místa vzniku mechanické závady.

Typ práce: rešeršně syntetická



**Cíle bakalářské práce:**

Hlavním cílem je zpracování kritického přehledu současného stavu poznání v oblasti senzorů pro tribodiagnostiku stavu maziva s ohledem na proaktivní řízení v reálném čase.

Dílčí cíle bakalářské práce:

- popsat senzory pro tribodiagnostiku stavu maziva (viskozita, teplota, metalické částice, pevné kontaminanty, vlhkost),
- analyzovat možnosti predikce chování tribologického systému pro plánování údržby a možnosti proaktivního zásahu na základě diagnostiky stavu maziva,
- zhodnotit vhodnost použití senzorů pro tribodiagnostiku ozubených převodů a ložisek pracujících v nepřetržitém provozu a extrémních podmínkách.

Požadované výstupy: průvodní zpráva.

Rozsah práce: cca 27 000 znaků (15 - 20 stran textu bez obrázků).

Struktura práce a šablona průvodní zprávy jsou závazné:

[http://dokumenty.uk.fme.vutbr.cz/BP\\_DP/Zasady\\_VSKP\\_2017.pdf](http://dokumenty.uk.fme.vutbr.cz/BP_DP/Zasady_VSKP_2017.pdf)

**Seznam doporučené literatury:**

TAHERI GHAHRIZJANI, R., H. SADEGHI a A. MAZAHERI. A Novel Method for onLine Monitoring Engine Oil Quality Based on Tapered Optical Fiber Sensor. IEEE Sensors Journal. 2016, 16(10), 3551-3555. DOI: 10.1109/JSEN.2016.2523805. ISSN 1530-437x.

DING, Y., Y. WANG a J. XIANG. An online debris sensor system with vibration resistance for lubrication analysis. Review of Scientific Instruments. 2016, 87(2), 025109-. DOI: 10.1063/1.4941440. ISSN 0034-6748.

TAYLOR, R. I., R. MAINWARING a R. M. MORTIER. Engine Lubricant Trends Since 1990. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part J: Journal of Engineering Tribology. 2005-6-1, 219(5), 331-346. DOI: 10.1243/135065005X9718. ISSN 1350-6501.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2016/17

V Brně, dne

L. S.

---

prof. Ing. Martin Hartl, Ph.D.  
ředitel ústavu

---

doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.  
děkan fakulty

## **ABSTRAKT**

---

Účelem této bakalářské práce je sestavit přehled současně používaných senzorů pro analýzu oleje v reálném čase. Práce obsahuje soupis poznání v oblasti opotřebení a tribotechnické sensoriky a stanovuje vhodné chování tribologického systému pro prediktivní údržbu. V další části práce jsou vyhodnoceny představené senzory a pomocí získaných informací sestavena diagnostika maziva pro monitorování stavu převodovky větrné elektrárny.

## **KLÍČOVÁ SLOVA**

---

Tribologie, tribotechnická diagnostika, opotřebení, kontaminace, senzory, predikce

## **ANNOTATION**

---

The purpose of this bachelor's thesis is compile an overview of currently used sensors for real-time oil analysis. The paper contains a record of knowlence in field of wear and tribotechnical sensors and determines the appropriate behavior of the tribological system for predictive maintenance. In the next part of the thesis are evaluated the introduced sensors and with help of obtained informations is assembled diagnostic for monitoring the state of gearbox of wind power plants.

## **KEY WORDS**

---

Tribology, tribotechnical diagnostic, wear, contamination, sensors, prediction



## **BIBLIOGRAFICKÁ CITACE**

---

POKORNÝ, O. *Tribotechnická diagnostika maziv*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2017. 56 s. Vedoucí bakalářské práce: doc. Ing. Petr Svoboda, Ph.D.



## PODĚKOVÁNÍ

---

Touto cestou bych rád poděkoval všem, kteří mě po dobu vysokoškolského studia podporovali, věřili a pomohli mi tak dostat se v mé životní cestě až do tohoto bodu. Děkuji.

## ČESTNÉ PROHLÁŠENÍ

---

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci, Tribotechnická diagnostika maziv, vypracoval samostatně za pomoci informací získaných z uvedené literatury.

V Brně dne 19. května 2017

.....  
Ondřej Pokorný



## OBSAH

### OBSAH

<b>1 ÚVOD .....</b>	<b>13</b>
<b>2 ANALÝZA PROBLÉMU A CÍL PRÁCE .....</b>	<b>14</b>
2.1 ANALÝZA PROBLÉMU .....	14
2.1.1 DŮLNÍ NAKLADAČ .....	14
2.1.2 VĚTRNÁ ELEKTRÁRNA .....	15
2.2 CÍL PRÁCE.....	16
<b>3 PŘEHLED SOUČASNÉHO STAVU POZNÁNÍ.....</b>	<b>17</b>
3.1 OPOTŘEBENÍ FUNKČNÍCH PLOCH.....	17
3.1.1 ADHEZIVNÍ OPOTŘEBENÍ .....	18
3.1.2 ABRASIVNÍ OPOTŘEBENÍ .....	19
3.1.3 EROZIVNÍ OPOTŘEBENÍ .....	19
3.1.4 ÚNAVOVÉ OPOTŘEBENÍ .....	20
3.1.5 VIBRAČNÍ OPOTŘEBENÍ.....	21
3.1.6 KOROZIVNÍ OPOTŘEBENÍ .....	22
3.2 ČÁSTICE VZNIKLÉ OPOTŘEBENÍM.....	23
3.2.1 ADHEZIVNÍ ČÁSTICE.....	23
3.2.2 ABRAZIVNÍ ČÁSTICE .....	23
3.2.3 SFÉRICKÉ ČÁSTICE.....	23
3.2.4 LAMINÁRNÍ ČÁSTICE.....	23
3.2.5 ÚNAVOVÉ ČÁSTICE.....	24
3.1.6 ABNORMÁLNÍ ČÁSTICE .....	24
3.1.7 NEŽELEZNÉ ČÁSTICE.....	24
3.1.8 PRACHOVÉ ČÁSTICE.....	24
3.1.9 VLÁKNA .....	24
3.1.10 TRIBOPOLYMERY .....	24
3.2.11 OXIDY ŽELEZA .....	25
3.3 KONTAMINACE .....	27
3.4 KONTAMINAČNÍ SENZOR.....	28
3.5 SENZOR METALICKÝCH ČÁSTIC .....	29
3.6 KAPACITNÍ SENZOR .....	32
3.7 SENZOR SNÍMÁNÍ VIZKOZITY .....	34
3.7.1 VIZKOZITA.....	34
3.7.2 AKUSTICKÝ SENZOR VIZKOZITY VISMART .....	35



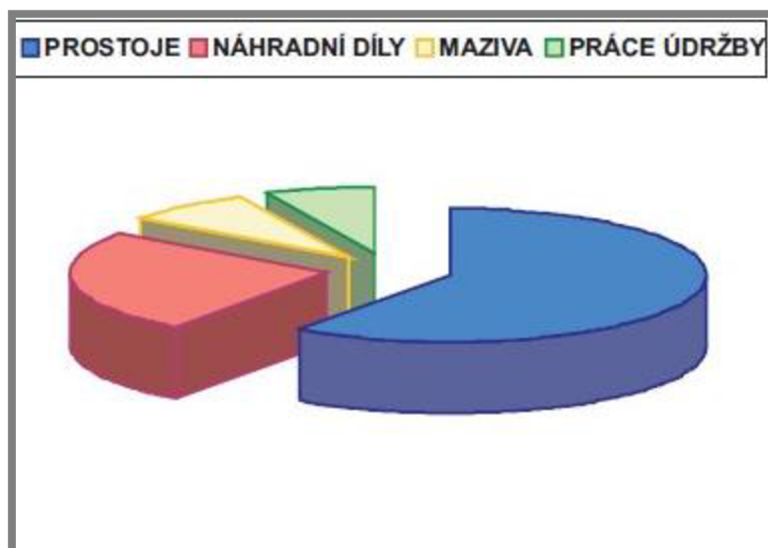
---

3.7.3 SENZOR VISKOZITY L-VIS .....	36
3.7.4 SENZOR VISKOZITY VISCOSENSE .....	38
3.8 SENZOR S OPTICKÝMI VLÁKNY.....	40
3.9 INDUKČNÍ SENZOR PEVNÝCH ČÁSTIC .....	42
3.10 PREDIKCE CHOVÁNÍ TRIBOLOGICKÉHO SYSTÉMU .....	43
3.10.1 INTERNET VĚCÍ.....	44
3.10.2 PRŮMYSL 4.0.....	44
<b>4 DISKUZE .....</b>	<b>45</b>
<b>5 ZÁVĚR .....</b>	<b>49</b>
<b>6 SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ.....</b>	<b>50</b>
<b>7 SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK, SYMBOLŮ A VELIČIN.....</b>	<b>54</b>
<b>8 SEZNAM OBRÁZKŮ A GRAFŮ .....</b>	<b>55</b>
<b>9 SEZNAM TABULEK.....</b>	<b>56</b>

V současné době, kdy se stále zvyšují ekonomické nároky na provoz průmyslových zařízení, zejména tak jejich bezporuchový chod, je jednou z možností průběžné sledování technického stavu stroje prostřednictvím maziva. Těmito problémy se detailně zabývá tribotechnická diagnostika (TTD), která umožňuje sledovat bez vnějších zásahů opotřebení stroje pomocí informací získaných z použitého maziva [1], [2].

Náklady na zařazení tribotechnické diagnostiky do provozu bývají vysoké. Výhoda však spočívá v dlouhodobějším hledisku, kdy můžeme přesněji definovat intervaly na výměnu maziva. Můžeme tak předejít na jednu stranu příliš časté, ekonomicky nevýhodné a i z ekologického hlediska nešetrné výměně maziva a na druhou stranu hraniční až pozdní výměně, kdy bude mazivo již obsahovat nežádoucí prvky a nebude tak plnit svůj účel. Životnost provozovaného zařízení bude rapidně klesat a bude tak hrozit destrukce stroje, přičemž bude následovat odstávka a nutná oprava. Při zohlednění těchto problémů v celkovém hospodaření firmy je pak montáž takovéto diagnostiky v mnoha případech více než rozumná [1].

Při diagnostice posuzujeme jak chemické, tak i fyzikální změny. Mezi základní posuzované parametry patří viskozita, teplota, vlhkost a dále také přítomnost metalických částic a pevných kontaminantů. Všechny tyto informace nám pomohou získat relativně přesnou představu o stavu maziva a umožní nám tak naplánovat další postup při provozu zařízení [1], [3].



Obr. 1 Skladba úspor dosažitelných proaktivní údržbou [3].

## 2 ANALÝZA PROBLÉMU A CÍL PRÁCE

### 2.1 ANALÝZA PROBLÉMU

Většina strojních zařízení, které jsou závislé na mazacím systému, jsou od výrobce doplněny o předem stanovený plán údržby, servisní intervaly pro výměnu oleje apod. Tyto intervaly jsou však čistě orientační a nejsou závislé na aktuální možné degradaci oleje a opotřebením strojních součástí vlivem neplánovaných změn v mazacím systému.

Takovéto změny mohou být způsobeny vnější kontaminací oleje vlivem vniknutí vody nebo mechanického prachu, nebo také např. nežádoucími vnějšími vibracemi, opotřebením funkčních ploch a vniknutím drobných kovových částic do maziva [3]. Proto je vhodné, sledovat v reálném čase stav maziva a prostřednictvím jeho také stav pracujících součástí. Monitorování v reálném čase nám tak zajistí možnost rychlého zásahu do sledovaného stroje, a také nám pomůže vytvořit možnost predikce chování v dalších fázích provozu.

#### 2.1.1 DŮLNÍ NAKLADAČ

Jedním z typických problémů tohoto typu je monitorování stavu převodovky důlního nakladače pracujícího ve velmi nepříznivých podmínkách (vibrace, nečistoty, nepřetržitý provoz apod.).

Tab. 1 Provoz důlního nakladače [4].

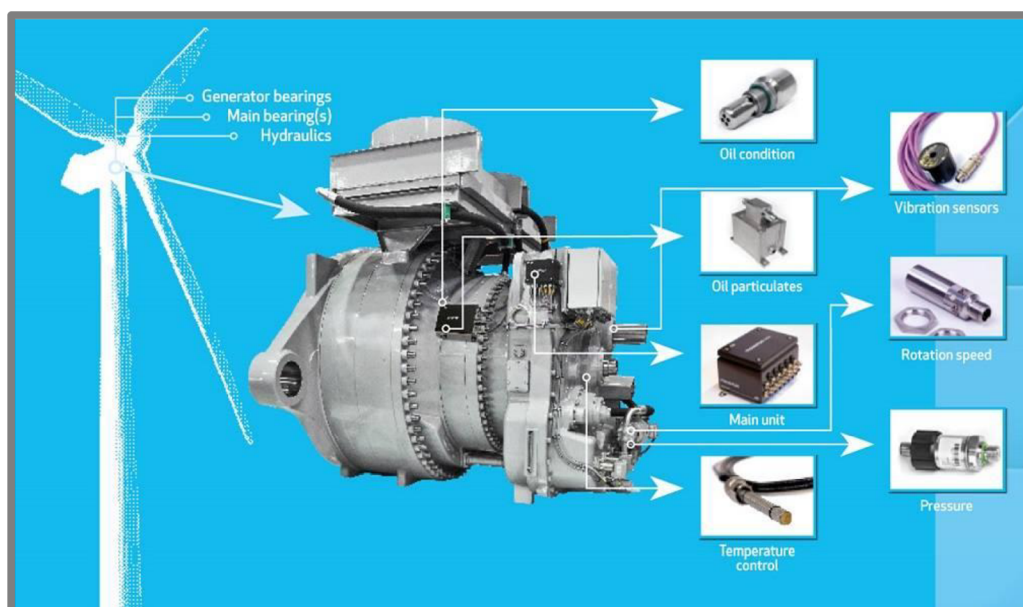
	s analýzou	bez analýzi	rozdíl	÷ %
<b>počet hodin do opravy</b>	2000 hod	12175 hod	10175 hod	83
<b>cena opravy</b>	20000,-	275000,-	255000,-	93
<b>cena 1 hodiny provozu</b>	10,-	23,-	13,-	56
<b>délka nutného prostoje</b>	4-8 hod	několik dní	-	-

Ve výše uvedené tabulce (Tab. 1) můžeme vidět porovnání provozu stroje s proaktivní diagnostikou mazacího oleje v reálném čase a bez ní. Monitorování stavu mazacího oleje poskytuje informace o opotřebením např. ozubených kol nebo valivých ložisek převodovky a umožní nám tak včasný zásah do systému, kterým předejdeme rozsáhlejšími opravami na stroji a několika denní odstavce stroje. Analýza stanovuje častější, ale méně finančně náročné opravy, které ve výsledném hospodaření způsobí až 56 % úspory v nákladech na hodinový provoz stroje. Dále je nutné uvažovat výrazně sníženou dobu odstávky stroje, která se následně také promítá do celkového hospodaření firmy [4].

### 2.1.2 VĚTRNÁ ELEKTRÁRNA

Každý den, kdy je elektrárna mimo provoz, způsobuje nepříjemné ekonomické ztráty. Přejít z preventivní nebo neplánované údržby na proaktivní údržbu může proto zajistit značné úspory v provozu elektrárny. Nepřetržitý provoz větrné elektrárny klade vysoké nároky na celkový servis a údržbu stroje, zejména na převodový mechanismus.

Celkový provoz je doprovázen vnějšími vibracemi, které způsobují opotřebení jednotlivých součástí stroje. Částice vzniklé opotřebením dále znečišťují mazací olej převodovky. Další problém nastává při opravách a údržbě turbíny. Převodová skříň je díky svému umístění vysoko nad zemí těžko přístupná, což značně komplikuje opravy a nutnou údržbu, jako je např. výměna převodového oleje. Generální oprava takovéto převodovky se pohybuje v rozmezí od 7 až 11 milionů korun, zatímco drobné a včasné opravy vyjdou mnohonásobně levněji. Samotná aplikace diagnostiky pak vyjde na necelý čtvrt milion korun [5].



Obr. 2 Diagnostika větrné elektrárny [5].

Proaktivní analýza stavu oleje spojená s monitorováním stavu strojních součástí tak může ve velké míře zvýšit možné úspory v provozu elektrárny. Systém senzorů poskytuje včasné varování před poruchami a umožňuje aktivně plánovat nadcházející údržbu spojenou s odstávkou stroje, dokonce až v řádech měsíců.

V následující tabulce (Tab. 2) můžeme vidět postupné monitorování oleje v převodovce větrné elektrárny. Interval výměny tohoto oleje byl nastaven na 2000 hod, z tabulky je zřejmé, že díky proaktivní analýze oleje byl interval výměny prodloužen na více než dvojnásobek počáteční hodnoty. Toto prodloužení vede k úsporám v oblasti výměny oleje, bez nepříznivého vlivu oleje na opotřebení součástí. Výměna oleje je samozřejmě spojena také s odstávkou stroje [6].

Tab. 2 Monitorování stavu oleje větrné elektrárny [6].

provozní hodiny	stav oleje	návrh postupu
0 hod	čerstvý olej	zaznamenány referenční hodnoty
1240 hod	klesla viskozita, zvýšil se obsah Fe částic	normální intervaly kontroly
2360 hod	klesla viskozita, zvýšil se obsah Fe částic	aktivní monitorování
3400 hod	klesla viskozita, zvýšil se obsah Fe částic	aktivní monitorování
4600 hod	olej kontaminován pevnými částicemi	výměna oleje

## 2.2 CÍL PRÁCE

Cílem této práce je sestavit přehled současně používaných senzorů pro tribodiagnostiku maziv v reálném čase a nastítnit tak možnost analyzovat současný stav opotřebení nejenom použitého maziva, ale také přítomného mechanismu zastoupeného například spalovacím motorem a jeho jednotlivými částmi. Dalším cílem práce je vytvořit možnost predikce chování tribologického systému v mechanismu s ozubenými převody a valivými ložisky.

### 3 PŘEHLED SOUČASNÉHO STAVU POZNÁNÍ

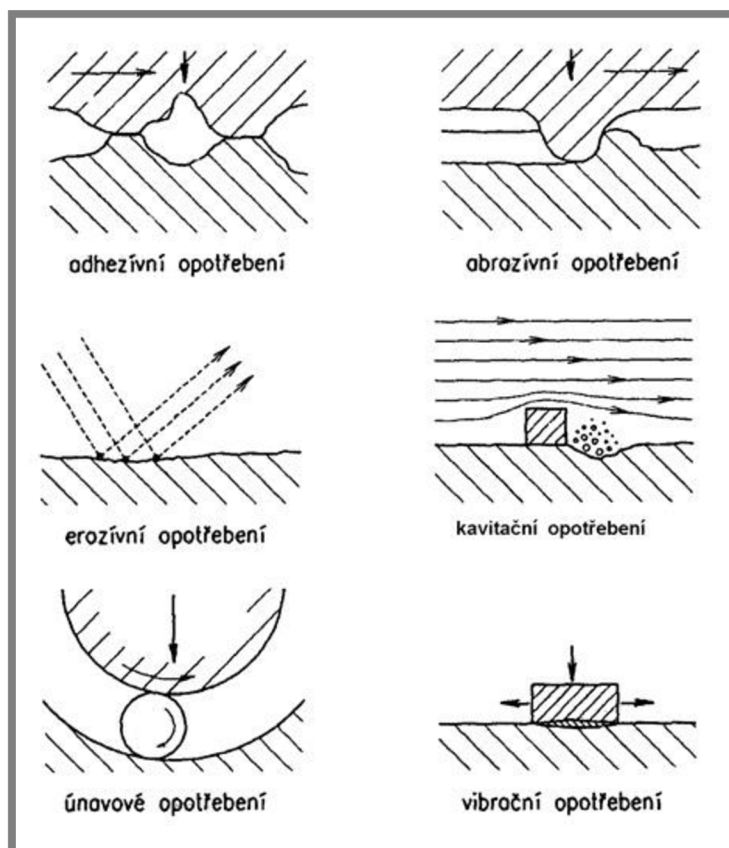
3

#### 3.1 OPOTŘEBENÍ FUNKČNÍCH PLOCH

3.1

Téměř nedílnou součástí každého mechanického zařízení je kontakt dvou ploch, respektive pohyb těchto ploch vůči sobě (po sobě), například valivá či kluzná ložiska nebo kontakt zubů u ozubeného soukolí. Každé z těchto spojení je doprovázeno třením, které je úzce spojeno s opotřebením a trvanlivostí přítomných součástí.

Nejčastější způsob, jak můžeme snížit třecí koeficient a zmírnit tak výsledné opotřebení je aplikovat mazivo. Pro správný chod mechanismu je důležité, aby bylo přítomné mazivo v co nejlepším stavu a mohlo tak účelně plnit svoji funkci. Nicméně, vlivem opotřebení funkčních ploch mechanismu se často uvolňují nebo vznikají nežádoucí prvky, které pak přítomné mazivo značně degradují [1], [2], [7], [8].



Obr. 3 Základní druhy opotřebení [7].



### 3.1.1 ADHEZIVNÍ OPOTŘEBENÍ

V závislosti na různém opracování funkčních ploch součástí se liší také výsledná kvalita povrchu. V současné době jsme schopni dosáhnout drsnosti povrchu Ra 0,025 [ $\mu\text{m}$ ] [10], nikdy však nedosáhneme povrchu dokonale hladkého. V silovém spojení dvou ploch tak dojde k částečnému kontaktu malých plošek, nerovností. U těchto malých plošek pak vzniká mikrosvar, který je náchylný na deformaci, respektive u něj dochází k otláčování, odlamování nebo přemísťování materiálu [7].

V provozu posuzujeme opotřebení mírné až intenzivní. Tyto dva stavy se od sebe liší tak, že na rozdíl od prvního mírného adhezivního opotřebení, kde je tvorba ochranných oxidačních vrstev v rovnováze s jejich porušením, je u intenzivního opotřebení povrch již značně narušen a můžeme zde pozorovat rýhy v materiálu, různá otláčání a také vměstnané částice. Tento stav zvyšuje odpor proti pohybu kontaktních ploch a může zde dojít až k úplnému zadření.

Intenzitu adhezivního opotřebení tak zásadně ovlivňuje kvalita obrobeneho povrchu použité součásti, velikost zatěžujících normálových sil spolu s rychlostí pohybu spojení a vlastnosti zvoleného materiálu. Mimo těchto faktorů můžeme také výrazně omezit opotřebení použitím správného maziva, které od sebe funkční plochy oddělí mazacím filmem a zamezí tak zadírání [1], [2], [7], [8], [9].



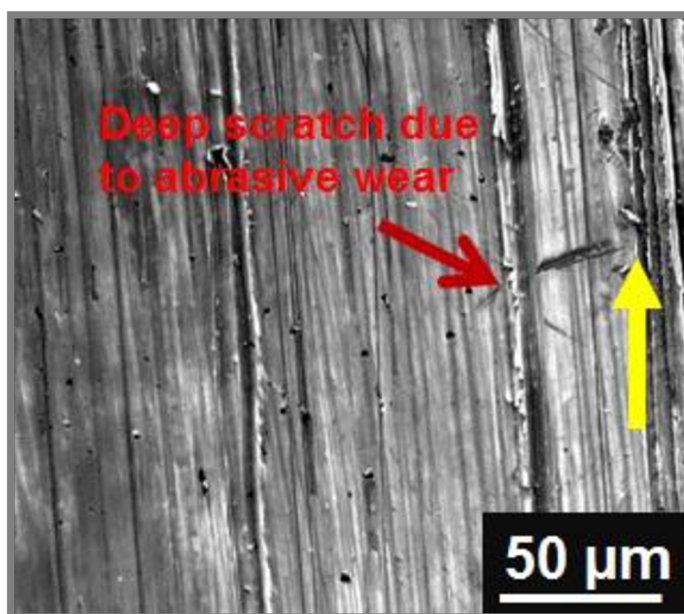
**Obr. 4** Adhezivní opotřebení různých materiálů při absenci maziva (zleva- legovaná ocel, tepelně upravená ocel, bronz, teflon, mosaz, hliník) [9].

### 3.1.2 ABRASIVNÍ OPOTŘEBENÍ

3.1.2

---

Tento způsob opotřebení vzniká při kontaktu dvou funkčních ploch, přičemž má jedna plocha vyšší tvrdost a drsnost povrchu nebo jsou zde přítomny abrazivní částice v podobě mechanických nečistot zanešených v mazivu, které se následně dostanou mezi pohyblivé plochy. Opotřebení se projevuje rýhami na povrchu materiálu. Zamezení spočívá první řadě volbou vhodných materiálu a drsností, a v případě maziva kvalitní filtrací a správným opatřením před vnikem nečistot z okolí [1], [2], [7], [8], [11].



Obr. 5 Rýhy způsobené abrazivním opotřebením [11].

### 3.1.3 EROZIVNÍ OPOTŘEBENÍ

3.1.3

---

Tento druh opotřebení je způsoben proudem kapaliny nebo plynu, který obsahuje nečistoty v podobě mechanických částic. Povrch funkční plochy je pak deformován nerovnoměrně a lze také pozorovat tzv. zvlnění, které je způsobeno charakterem a rychlostí proudění média.

Jako hlavní faktory ovlivňující míru erozivního opotřebení, můžeme uvažovat velikost mechanických částic obsažených v proudícím médiu, teplotu, chemické vlastnosti média, rychlost a charakter proudění a v neposlední řadě vlastnosti použitého materiálu funkčních ploch [1], [2], [7], [8], [12].





Obr. 6 Erozivní opotřebení koule kulového ventilu [7].

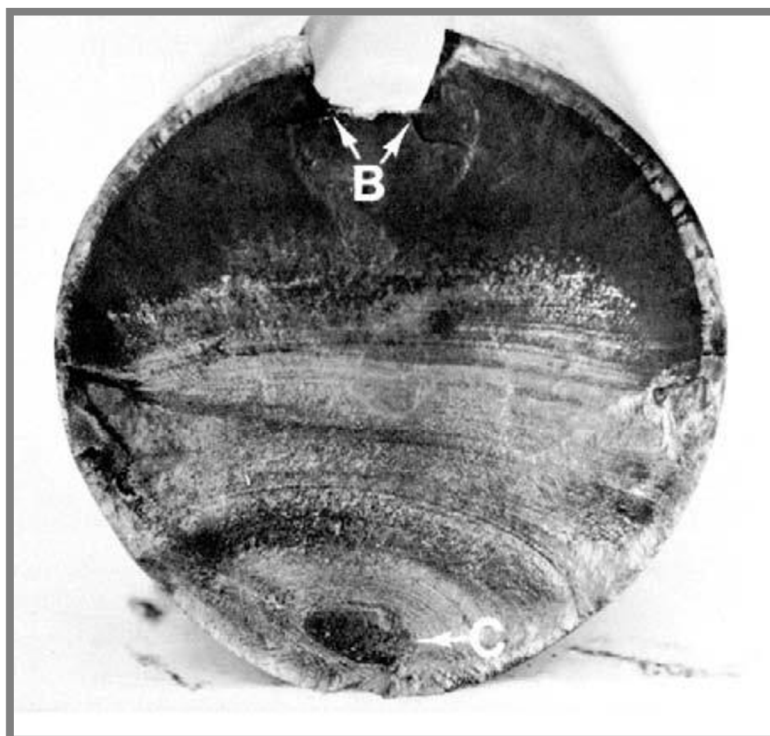
---

### 3.1.4 ÚNAVOVÉ OPOTŘEBENÍ

U součástí, které jsou opakovaně (cyklicky) namáhány se objevuje výše uvedené únavové opotřebení. V místě styku funkčních ploch vznikají povrchové vady, které se pak následným cyklickým zatížením dále rozšiřují. Jedná se o vznik drobných důlků na povrchu materiálu, na kterém se význačně podílí mazivo. Přítomné mazivo se vlivem styku ploch dostává do vzniklých drobných trhlin a následně pak působí tlakem na povrch materiálu, tedy zvyšuje jeho namáhání [8].

U křehkých a málo plastických materiálů, tak tímto způsobem může dojít i k vylamování částic z povrchu únavových trhlin a vzniku již zmíněných důlků [8].

Faktory ovlivňující vznik a následné šíření únavového opotřebení jsou mimo provozních podmínek zařízení také tvrdost materiálu, drsnost povrchu funkčních ploch a v neposlední řadě také nečistoty a vměstky přítomné v mazivu. S druhem tohoto opotřebení se můžeme setkat například u valivých ložisek, ozubených soukolí nebo vačkových hřídelů [1], [2], [7], [8], [13].



Obr. 7 Únavový lom hřídele (B- iniciace trhliny v drážce, C- nestabilní lom) [13].

### 3.1.5 VIBRAČNÍ OPOTŘEBENÍ

3.1.5

Vibrační opotřebení vzniká ve spojení dvou funkčních ploch, do kterých je za působení normálové síly přenášeno kmitání. Velikost amplitudy kmitání se pohybuje do 100  $\mu\text{m}$  [8]. Vlivem tangenciálních posuvů za působení zatížení a vibrací se z funkčních ploch materiálů oddělují drobné částice, čímž se povrch značně poškozuje.

Míru opotřebení posuzujeme z velikosti oddělených částic. Opotřebení dělíme na normální a nenormální. Nenormální opotřebení dále rozděleno na těžké a destruktivní. Nenormální opotřebení vzniká v důsledku nenormálního zatížení, kdy se vlivem vibrací nestíhá tvořit mazací vrstva na povrchu funkčních ploch. Plochy se tak dostávají do přímého styku a narušují se.

S takovýmto opotřebením se můžeme setkat zejména u části motorů (ložisek, hřídelů apod.), kde tento proces může vést až k úplnému zadření motoru [1], [2], [7], [8].



Obr. 8 Vibrační opotřebení valivého ložiska [7].

---

### 3.1.6 KOROZIVNÍ OPOTŘEBENÍ

V neposlední řadě je vhodné zmínit korozivní opotřebení. Jde o chemickou reakci povrch funkčních ploch při vniknutí kyslíku. Přítomnost kyslíku může být způsobena například stárnutím maziva nebo vniknutím kyslíku z okolí [7], [8], [14].



Obr. 9 Koroze způsobená vodou obsaženou v mazacím oleji [14].

## 3.2 ČÁSTICE VZNIKLÉ OPOTŘEBENÍM

3.2

---

Základní rozdělení částic vzniklých v důsledku opotřebení, je na primární a sekundární.

**Primární částice** vznikají přímo v důsledku kontaktu dvou funkčních ploch, tedy jejich vzájemnému opotřebení.

**Sekundární částice** vznikají z částic primárních, kdy se přetvoří při opakovaném průchodu celkovou soustavou.

Poměr výskytu těchto dvou druhů významně ovlivňuje např. druh použitého maziva, zatížení mechanismu, počet filtračních jednotek apod. [1], [2], [8].

### 3.2.1 ADHEZIVNÍ ČÁSTICE

3.2.1

---

Typickým projevem adhezivního opotřebení je přítomnost jemného oděru v mazivu, objevujícího se v důsledku vzniku a následné poruchy Beilbyho vrstvy. Z vrstvy se odlamují velmi jemné a tenké částice velikosti 5-15  $\mu\text{m}$ . Tyto částice jsou odplaveny pomocí přítomného maziva, ve kterém je také můžeme analyzovat [8].

### 3.2.2 ABRAZIVNÍ ČÁSTICE

3.2.2

---

Částice se uvolňují ve tvaru srpečků nebo mečků s ostrými výčnělky na koncích. Velikost těchto částic se pohybuje v rozmezí 50-300  $\mu\text{m}$  délky a tloušťky 0,25  $\mu\text{m}$  [8].

### 3.2.3 SFÉRICKÉ ČÁSTICE

3.2.3

---

S druhem těchto částic se můžeme setkat především u únavového opotřebení valivého charakteru. Do soustavy se uvolňují vlivem únavy Beilbyho vrstvičky. Setkat se s nimi můžeme především u valivých ložisek, respektive na vnitřním nebo vnějším povrchu ložiska. Co se týče velikosti, řadíme částice mezi menší, průměr sféroidu od 2 do 5  $\mu\text{m}$  [8]. Při zaznamenání částic můžeme predikovat začínající poruchu přítomného ložiska [1].

### 3.2.4 LAMINÁRNÍ ČÁSTICE

3.2.4

---

Příčinou vzniku laminárních částic bývá nejčastěji opakovaný oběh mazacího oleje, ve kterém jsou částice obsaženy. Částice jsou průchodem soustavou deformovány a stávají se z nich tenké lupínky s hladkým povrchem a nepravidelnými okraji. Délka lupínek se pohybuje od 40 až 250  $\mu\text{m}$  a šířky 10 až 50  $\mu\text{m}$  [8]. Zaznamenání těchto částic je obvykle doprovázeno výskytem sféroidů a je spojeno se začínající poruchou přítomného ložiska [1].

---

### 3.2.5 ÚNAVOVÉ ČÁSTICE

Trojrozměrné částice s takřka symetrickým tvarem co se týče délky, šířky a tloušťky. Velikostně se pohybují v rozmezí od 10 až 150  $\mu\text{m}$ . Povrch je na rozdíl od výše uvedených laminárních částic rýhovaný, nepravidelný. Setkat se s nimi můžeme nejčastěji u ozubených soukolí [8].

---

### 3.1.6 ABNORMÁLNÍ ČÁSTICE

Tyto částice vznikají porušením Beilbyho vrstvy, při působení nadměrného zatížení. Vrstva v místě kontaktu nedisponuje dostatečnou únosností a je tak odírána. Tempo opotřebení je příliš vysoké a tak už nedochází k obnově vrstvy. Při výskytu těchto částic považujeme stav opotřebení za mezní až havarijní, způsobený zadíráním a abrazí. Při tomto stavu už dále neregistrujeme částice adhezního otěru, protože jsou zcela nahrazeny abnormálními částicemi, které jsou charakterizovány jako trojrozměrné částice s ostrými hranami o rozměrech 30-70  $\mu\text{m}$  [8].

---

### 3.1.7 NEŽELEZNÉ ČÁSTICE

Výskyt můžeme registrovat při kontaktu oceli a slitin neželezných kovů, kde dochází k adhezivnímu opotřebení. Vzhledem a rozměry připomínají částice abnormální, ale rozdílnými ukazateli jsou zde zabarvení a magnetické vlastnosti [8].

---

### 3.1.8 PRACHOVÉ ČÁSTICE

Přítomnost těchto částic je způsobená netěsností soustavy a nešetrným servisem. Vyskytují se v podobě malých kulovitých nebo hranolovitých částic, zastoupených především křemičitany o velikostech do 30  $\mu\text{m}$  [8].

---

### 3.1.9 VLÁKNA

Původem těchto částic jsou především filtry přítomné v mazací soustavě. Rozlišujeme bavlněná a syntetická, které mají znatelné tvarové rozdíly. Bavlněná vlákna mají pentlovitý tvar, zatímco syntetická jsou rovná s výrazným světelným lomem na obou koncích [8].

---

### 3.1.10 TRIBOPOLYMERY

Vyskytují se v amorfnní formě, kdy jádro je vždy složeno ze submikronických ocelových částic [2]. Zbylá organická část zaniká buď rozpouštěním ve správném roztoku, nebo při zvýšení teploty maziva nad 300°C [8].

### 3.2.11 OXIDY ŽELEZA

3.2.11

---

V tomto případě sledujeme dvě formy a to Magnetit  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  a Hematit  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ .

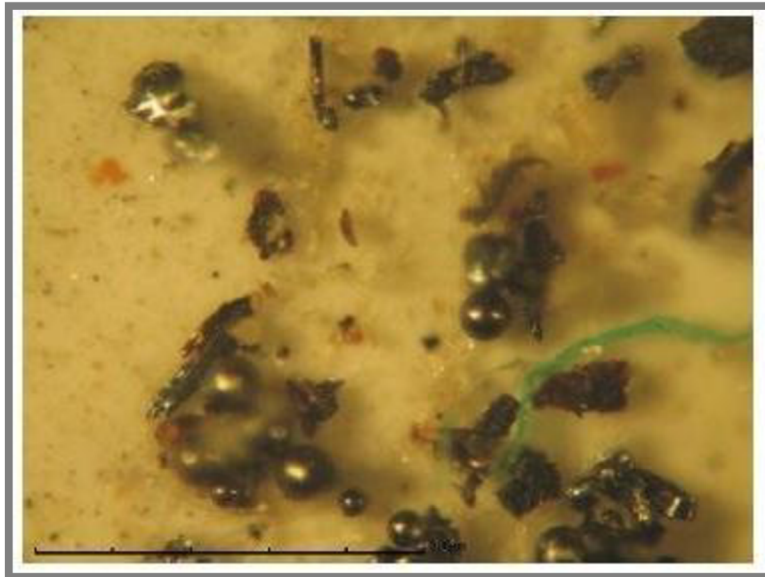
První z předem uvedených forem vzniká za vysokých teplot a tlaků, vlivem nedostatečného mazání funkčních ploch. Částice oblázkového charakteru disponují hladkým černě zabarveným povrchem o velikosti kolem  $5\ \mu\text{m}$ . Vyskytují se při opotřebení součástí, které jsou vyrobeny z vysokopevnostní oceli nebo z materiálu pro výrobu ložisek.

Druhý uvedený, Hematit, je charakterizován růžovými až do červena zabarvenými částicemi a vzniká při korozi funkčních ploch vlivem působení vody [8].



Obr. 10 Nečistoty ve formě uvolněných vláken z vložek filtrů [14].





Obr. 11 Kontaminace mazacího oleje otěrovými částicemi [14].



Obr. 12 Mechanický prach v mazacím oleji [14].

### 3.3 KONTAMINACE

Jak již bylo zmíněno, hlavními úlohami maziva (oleje) je především snížit tření a v co nejvyšší míře zabránit přímému kontaktu ploch, vedoucímu k jejich vzájemnému opotřebenosti. Další funkce oleje jsou např. odvod tepla, ochrana před nežádoucí korozi, přenos energie v hydraulických systémech, tlumení vibrací apod.

Pro správné plnění těchto funkcí musí mít použité mazivo vhodné vlastnosti a je kladen důraz na to, aby si své vlastnosti udrželo po co nejdéle dobu. Proto posuzujeme míru znečištění (kontaminace) maziva vedoucí ke ztrátě potřebných vlastností a následnému opotřebenosti funkčních ploch. Pevné kontaminanty jsme si již rozebrali v předchozím bodě, zde si vypíšeme nejčastější kontaminující kapaliny, palivo, vodu a chladicí kapalinu [8].

Palivo přítomné v oleji snižuje jeho viskozitu, v krajním případě může zmenšit tloušťku mazacího filmu až pod kritickou mez. Přítomnost v oleji zjišťujeme pomocí měření parametrů maziva a to především viskozity a bodu vzplanutí [8].

Kontaminující kapalina zastoupená vodou podporuje korozi a může vést až k úplnému zadření mechanismu. Mimo to také vyvolává rozklad aditiv zamezením jejich rozpustnosti v oleji a podporou následného vysrážení. Jako přípustná maximální hranice obsahu vody v oleji se běžně uvádí 0,1 % hm [8].

V případě kontaminující kapaliny jakožto chladicí kapaliny, způsobuje její přítomnost velmi rychlou degradaci oleje vlivem tvorby nerozpustných úsad a následnému stárnutí oleje. Koncentrace by tak neměla překročit hranici 0,02 % hm [8].

Vzniku nebo vniknutí všech výše uvedených nežádoucích prvků (kontaminantů), které degradují vlastnosti použitého maziva se snažíme zabránit nebo jej alespoň dostatečně kontrolovat a vytvořit tak možnost stanovení plánu potřebné údržby popřípadě detekovat nutnost mechanického zásahu do soustavy [1], [7], [8], [14], [15].

Mnoho firem využívá pro údržbu a servis svých strojů tzv. off-line analýzu, jedná se o předem vytvořený plán odebrání vzorků mazacího oleje a následnou analýzu vzorku v laboratorních pracovištích. Tento způsob zaručuje možnost získat přesné a podrobné informace o stavu maziva, nicméně neposkytuje včasné informace o aktuálním stavu maziva. Proto se v technické praxi zavádějí senzory, které umožňují z části sledovat stav stroje a maziva v reálném čase, ty jsou schopny dodávat pouze omezené informace, avšak dostačující varování pro možnost včasným zásahem do systému předejít poruchám a odstávkám stroje [8], [16], [17].

V současné době se můžeme setkat s několika metodami, na základě kterých pracují měřicí senzory v reálném čase, např. optické, magnetické indukční, metody na základě změny kapacity apod. Každá tato metoda snímání skrývá své výhody, ale také chyby a mezery v měření. Proto je vhodné senzory kombinovat z důvodu možného zkreslení konečného výstupu. Jedním z příkladů je měření viskozity, ta

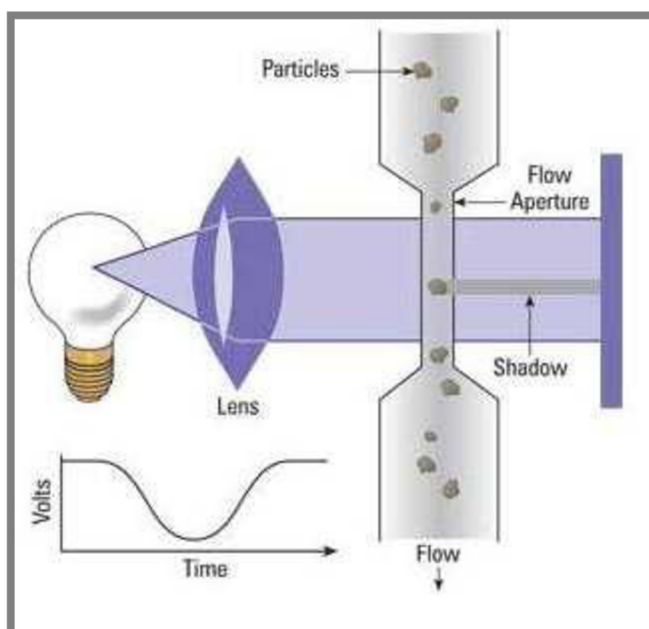


s přítomností paliva v oleji klesá a naopak s přítomností mechanických nečistot zase stoupá, tudíž ve výsledném měření by mohl nastat stav, kdy hodnota viskozity bude v mezích přípustnosti, přitom mazací olej už bude v tomto stádiu značně degradován a kontaminován [1], [2], [7], [14], [18].

### 3.4 KONTAMINAČNÍ SENZOR

Kontaminační senzor je používán k měření mechanických nečistot principem zastínění procházejícího paprsku světla protékajícím médiem, jde tedy o optický senzor. Pomocí tohoto snímače můžeme detekovat velmi jemné mechanické znečištění, obvykle o velikosti od 4  $\mu\text{m}$  [19]. Nachází tak uplatnění přímo v mazacích soustavách a díky své přesnosti i v laboratořích nebo v jejich zmenšených přenosných měřicích jednotkách [15], [19], [20], [21].

Princip funkce snímače je založen na prosvícení protékajícího média světelným paprskem, který je následně stíněn procházejícími nečistotami. Snímač v sobě skrývá úzkou rovnoměrnou plochu osvětlení (fotodiody), která je umístěna napříč průtokovým kanálem snímače a zaznamenává změny v intenzitě paprsku, dobu přerušení. Procházející nečistoty pak následně způsobují stínění a množství odstíněného světla je pak přímo úměrné velikosti procházející částice. Tyto snímače jsou z hlediska změny indexu lomu světla a tvaru částic méně ovlivněny než senzory fungující na principu rozptylu světla. To je důvod použití těchto senzorů pro snímání nečistot v hydraulických systémech, neboť kontaminanty v nich obsažené mohou mít různý tvar a díky odlišnému materiálu i jiný index lomu světla [19], [20], [21].



Obr. 13 Princip funkce optického senzoru [19].

Běžné snímače mechanické kontaminace potřebují pro svůj správný chod dávkovací čerpadlo, které zajistí konstantní průtok. Ten je potřeba zajistit z důvodu snímání

nejen velikosti částic, ale také koncentraci částic. Bez přidaného čerpadla by tak nebyly výsledné informace správné z důvodu změn průtoku [19].

Další provozní parametry, které je vhodné zmínit: provozní tlaky 300 bar, průtok 30 až 300 ml/min, rozsah teploty média -10 až +80°C (tyto parametry jsou pouze orientační, samozřejmě záleží na přesném typu snímače) [22].



Obr. 14 Optický senzor LDP100. [22]

Kontaminační senzor je díky své vysoké odolnosti vůči provoznímu tlaku možné instalovat přímo do hlavní větve mazací soustavy, proto jsou hojně používány v hydraulických obvodech se servo a proporcionálními ventily, dále také v testovacích a zkušebních obvodech např. zkoušení hydraulických servopohonů, výroba zubových čerpadel, výroba leteckých palivových soustav a samozřejmě v dalších případech, kde by výpadek mazaného stroje z důvodu znečištění oleje znamenal značné hospodářské ztráty [15], [19], [20], [21].

### 3.5 SENZOR METALICKÝCH ČÁSTIC

3.6

---

MCS (z anglického názvu Metallic Contamination Sensor) je senzor používaný pro analýzu částic o velikosti 70  $\mu\text{m}$  [21] a více. V předchozím případě jsme si uvedli senzor sledující také přítomnost pevných částic v oleji, nicméně pro některé aplikace je tento senzor až příliš jemný a získané informace by tak mohly být zkreslené. Sledování přítomnosti metalických částic vzniklých z důvodu opotřebení funkčních ploch mechanismů, je však jedním z nejdůležitějších parametrů pro správnou údržbu a servis stroje. Proto byly vyvinuty tyto senzory kovového znečištění (MCS) [20], [21], [23].

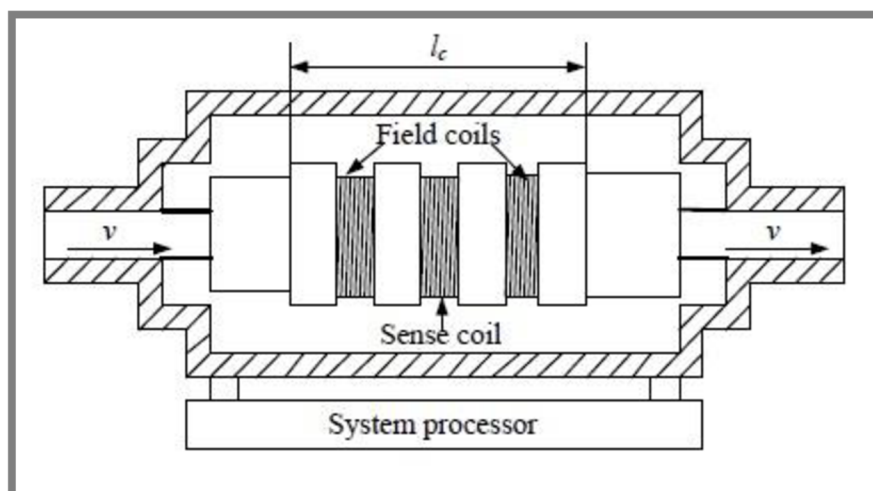


Obr. 15 Sensory metalických částic MCS1000 [24].

MCS jsou používány zejména u olejových systémů převodovek, kde přítomnost metalických částic o velikostech stovek  $\mu\text{m}$  značí již pokročilé poškození pracujících ozubených kol a varuje tak před nutným servisem nebo výměnou použitých součástí. Pro správnou funkci by tedy senzor měl být umístěn na průtoku hlavní větvi mazacího systému [20], [21], [23].

Důležité parametry, které následně posuzujeme, jsou především počet a velikost metalických částic, dále poté sledujeme průběžný vývoj kontaminace právě těmito částicemi [24].

MCS fungují na základě měření změny indukčnosti při průchodu částic systémem cívek senzoru. Při tomto průchodu dojde ke změně indukčnosti, respektive změně výstupního signálu ve tvaru připomínající sinusovou křivku, který je zaznamenáván. Se změnou materiálu částice se také mění tvar výstupního signálu, lze tedy z části analyzovat materiál pozorovaných kontaminantů [20], [21], [23].

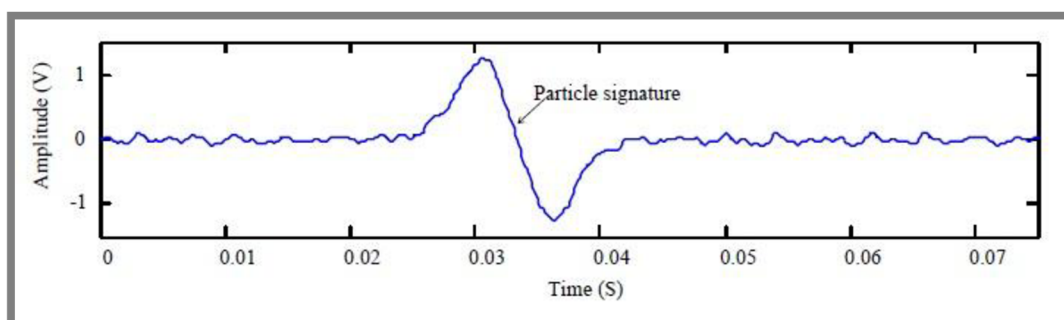


Obr. 16 Schéma senzoru metalických částic. [23]

Senzor je schopný detekovat částice o velikosti od 70  $\mu\text{m}$  u feromagnetických částic a od 200  $\mu\text{m}$  u neferomagnetických částic [21]. Počet sledovaných objektů je až 100 částic za sekundu. Samotná konstrukce je velmi robustní (obr. 13), cívky obklopuje hliníkový obal a jsou tak dobře chráněny před vnějším poškozením. Celý snímač je možné připojit přímo na výtlak čerpadla mazacího oleje [20], [21], [23].

Další provozní parametry, které je vhodné zmínit: odolnost vůči provoznímu tlaku do 20 bar, rozsah průtoku 10-200 l/min, teplotní rozsah od -40 do + 85°C (tyto parametry jsou pouze orientační, samozřejmě záleží na přesném typu snímače) [24].

Díky relativně nízké citlivosti na viskozitu oleje a velmi dobré odolnosti vůči vnějším vibracím je tento senzor vhodný pro sledování kontaminace oleje v mazacích soustavách převodových mechanismů [20], [21], [23].

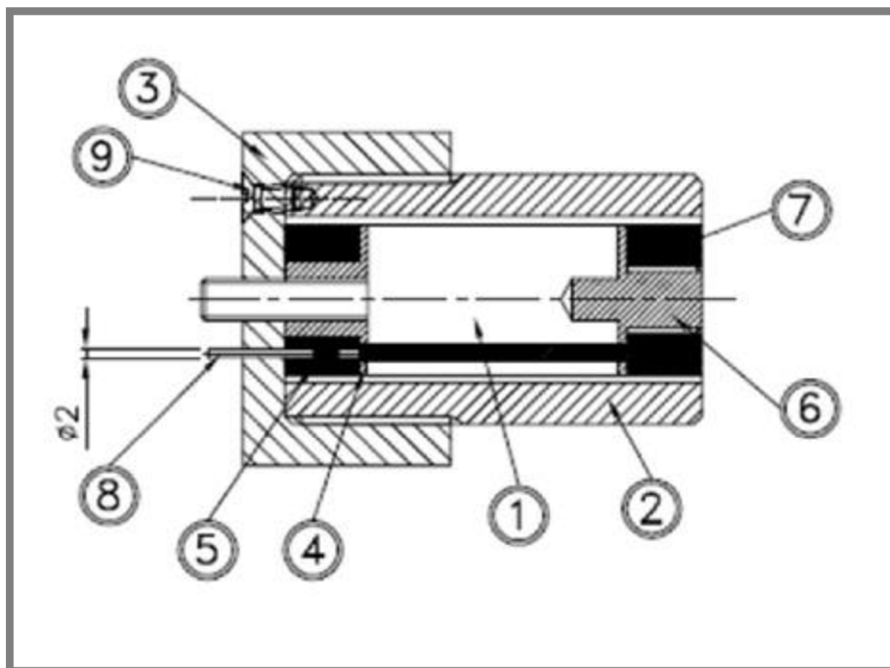


Obr. 17 Část výstupního signálu snímače [23].

### 3.6 KAPACITNÍ SENZOR

Se snímačem tohoto typu se nejčastěji můžeme setkat v podobě stacionárního snímače s přípojovacím závitem, který nám dovoluje pozorovat změnu především vlhkosti a teploty mazacích olejů [25], [26].

Princip funkce snímače je založen na měření změny kapacity. V kapacitním snímači jsou umístěny dva koaxiální válce zastupující elektrody, které jsou odděleny prostorem nebo případně médiem o známé dielektrické konstantě (permitivitě). Ta se vztahuje ke schopnosti materiálu přenášet elektrické pole a bereme ji jako měřítko vlivu materiálu na elektrické pole. Dále pak sledujeme zvyšování nebo snižování kapacity v závislosti na typu dielektrického materiálu [25], [26].



Obr. 18 Náčrt prototypu dielektrického senzoru, 1) vnitřní elektroda, 2) vnější elektroda, 3) nylonový horní kryt, 5) kryt, 6) spodní nylonová vložka, 7) spodní kryt, 8) zemnicí svorka, 9) ochranná svorka [25].

U kondenzátorů umožňuje zvýšená relativní permitivita ukládat stejný náboj s menším elektrickým odporem, což vede ke zvýšení kapacity.

Odečítání relativní permitivity ( $\epsilon_r$ ) je pak založeno na poměru kapacity s dielektrikem obsaženým mezi deskami kondenzátoru a kapacitou s absencí dielektrika [26].

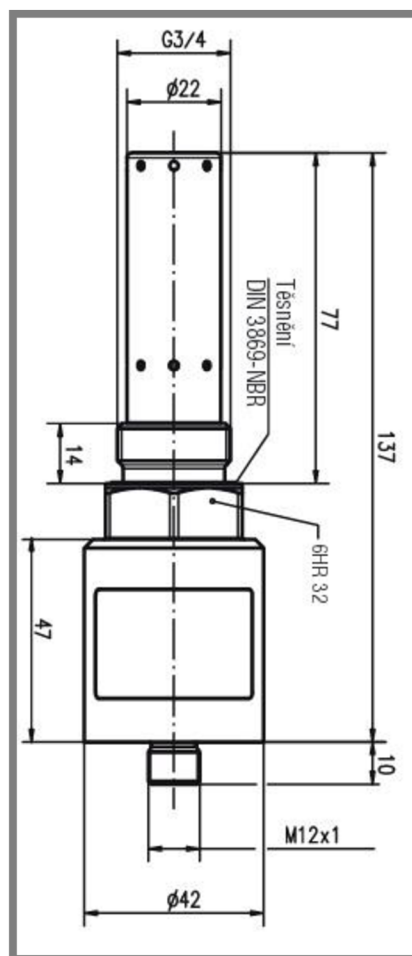
$$\epsilon_r = \frac{C}{C_0}$$

Kde  $\epsilon_r$  – relativní permitivita [-]

$C$  – kapacita s dielektrikem [F]

$C_0$  – kapacita s absencí dielektrika [F]

Názorný příklad tohoto typu snímače je LubCos H<sub>2</sub>Oplus II od firmy ARGO HYTOS. Snímač je v provedení, které můžeme vidět na obr. 17, je opatřen závitem G3/4 [37] pro snadnou montáž například do olejové nádrže. Princip měření je v zapisování fyzikálních veličin a jejich změn v závislosti na čase. Pro možnost dlouhodobého sledování disponuje snímač integrovanou pamětí (až půl roku). Snímač ukládá počáteční referenční veličiny nově zavedeného oleje a následně je neustále porovnává s aktuálně naměřenými hodnotami a se zadanými mezními hodnotami [26].



Obr. 19 Náčrt senzoru LubCos H<sub>2</sub>Oplus II [37].

Měřené veličiny: teplota, relativní vlhkost, relativní dielektrická konstanta (permitivita) a vodivost [25].

Naměřené veličiny poté slouží k výpočtu zbývající doby životnosti (RUL = remaining useful lifetime) [25]. RUL vychází z tepelného zatížení soustavy, naměřených chemických parametrů a zadaných mezních hodnot uživatelem. Snímač umožňuje uživateli bezprostředně kontrolovat zbývající životnost a stejně tak i naměřené parametry.

Tento senzor neměří mechanické znečištění oleje, proto je vhodné jej pro optimální kontrolu kombinovat například s kontaminačním senzorem nebo se senzorem metalických částic [25], [26], [37].

---

## 3.7 SENZOR SNÍMÁNÍ VISKOZITY

---

### 3.7.1 VISKOZITA

Viskozita je vlastní odpor tekutiny vůči vnějším působícím silám, které se snaží posunout její nejmenší částice. Zjednodušeně řečeno, stanovuje jak lehce či obtížně lze tekutiny dopravovat na potřebná místa, respektive jak je tekutina řídká, tekutá nebo hustá. Viskozita určuje mazací režim, schopnost tvorby mazacího filmu, velikosti odporu pohyblivých součástí, těsnicí schopnost a čerpatelnost. Rozdělujeme ji na dynamickou a kinematickou. Obě tyto veličiny se můžou vlivem tlaku a teploty měnit [7], [8].

#### 3.7.1.1 DYNAMICKÁ VISKOZITA $\eta$

Veličina charakterizující míru tření je konstantou pro nepřímou úměru mezi tečným napětím  $\tau$  a rychlostním spádem  $dv/dz$  [8].

$$\tau = \eta \frac{dv}{dz}$$

Kde  $\tau$  – smykové napětí [Pa]  
 $\eta$  – dynamická viskozita [Pa.s]  
 $dv/dz$  – rychlostní gradient [ $s^{-1}$ ]

#### 3.7.1.2 KINEMATICKÁ VISKOZITA $\nu$

Definice kinematické viskozity je  $\nu$  poměru dynamické viskozity  $\eta$  vůči hustotě kapaliny  $\rho$  [8].

$$\nu = \frac{\eta}{\rho}$$

Kde  $\nu$  – kinematická viskozita [ $m^2 \cdot s^{-1}$ ]  
 $\eta$  – dynamická viskozita [Pa.s]  
 $\rho$  – hustota kapaliny [ $kg \cdot m^{-3}$ ]

Pro měření viskozity v reálném čase se používají tzv. procesní viskozimetry. V současné době existuje více druhů těchto snímačů a každý pracuje na jiném principu měření např. pomocí akustických vln, pomocí torzně kmitajících lopatek apod. Samozřejmě každý z nich má své výhody a nevýhody tedy i vhodnou oblast použití.



### 3.7.2 AKUSTICKÝ SENZOR VISKOZITY VISMART

Tento senzor od firmy SenGenuity je založen na principu akustických vln. Jeho výhodou je flexibilita v oblasti použití díky své malé, jednoduché a odolné konstrukci. Výhodou je také necitlivost vůči vnějším otřesům, vibracím a také mechanickým nečistotám. Tyto výhody předurčují senzor pro použití v náročných provozních podmínkách [27], [28].



Obr. 20 Akustický senzor viskozity ViSmart [28].

Princip měření senzoru spočívá v měření akustické impedance ( $Z_a$  [Pa.s.m<sup>-1</sup>]) [28] :

$$Z_a = \frac{1}{2} \omega \cdot \rho$$

kde  $\omega$  – úhlová rychlost [rad.s<sup>-1</sup>]  
 $\rho$  – hustota [kg.m<sup>-3</sup>]  
 $\eta$  – dynamická viskozita [Pa.s]

Měření viskozity se provádí pomocí umístěného křemíkového rezonátoru v kontaktu s kapalinou. Viskozita určuje tloušťku kapaliny (mazacího filmu) hydrodynamicky spojenou s povrchem snímače. Plocha snímače je v rovnoměrném pohybu při konstrukčně známé frekvenci a amplitudě, která je dána úrovní výkonu elektrického signálu vstupujícího do senzoru. Jak můžeme vidět na obr. 19, smyková vlna proniká do hloubky  $d$  [μm] určené jako [27], [28]:

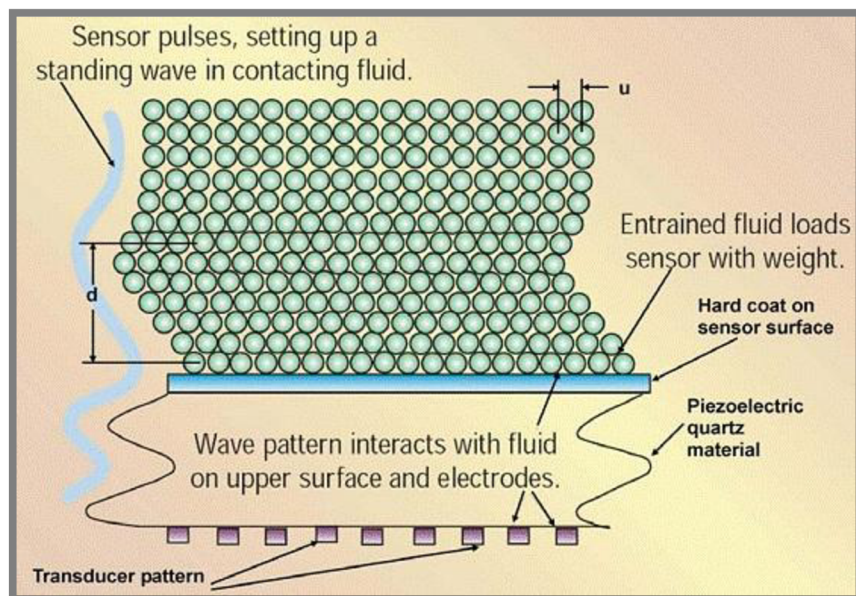
$$d = \frac{1}{2} \cdot \left( \frac{2 \cdot \eta}{\omega \cdot \rho} \right)$$

kde  $\eta$  – dynamická viskozita [Pa.s]  
 $\omega$  – úhlová rychlost [rad.s<sup>-1</sup>]  
 $\rho$  – hustota [kg.m<sup>-3</sup>]



Měrnou jednotkou je tedy akustická viskozita, která se vypočte pomocí ztrátové energie z rezonátoru do kapaliny a je rovna hodnotě součinu hustoty a dynamické viskozity [27], [28].

Provozní parametry: odolnost vůči provoznímu tlaku do 6 bar, teplotní rozsah měřené kapaliny od  $-15$  do  $+105^{\circ}\text{C}$ , rozsah měřené viskozity od  $0,4$  do  $140 \text{ mm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$  (tyto parametry jsou pouze orientační, samozřejmě záleží na přesném typu snímače) [29].

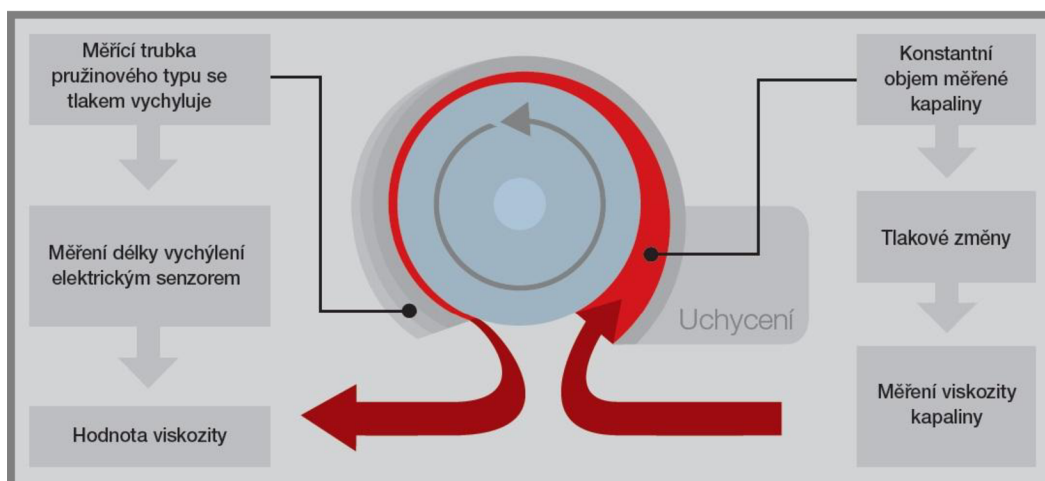


Obr. 21 Průřez senzoru (snímače ve spodní části a molekuly kapaliny v horní části senzoru [28].

### 3.7.3 SENZOR VISKOZITY L-VIS

Další z řady procesních viskozimetrů, v tomto případě od firmy Anton Paar. Měřená kapalina zde prochází senzorem a aktuální měřené parametry (viskozita a teplota) jsou následně zobrazovány na displeji, kterým je snímač osazen.

Princip měření spočívá v měření hydrostatického tlaku, který je úměrný viskozitě kapaliny. Viskozimetr je složen z částečně otevřené trubice, uvnitř které rotuje cylindrická osa. Jak můžeme vidět na obr. 22, prostor štěrby v trubici se postupně zužuje, toto zúžení způsobuje deformaci stěny trubice vlivem tlaku protékající kapaliny. Senzor následně měří délku deformované části, kterou využívá ke konečnému výpočtu viskozity [30], [31].



Obr. 22 Princip procesního viskozimetru L-Vis. [30]

Výhodou senzoru je absolutní necitlivost vůči změnám tlaku a rychlosti toku kapaliny. Díky tomu poskytuje stabilní výsledky i v nepříznivých podmínkách. Senzor je vhodný pro měření jemných suspenzí, kde přináší stabilní a přesné výsledky [30], [31].

Provozní parametry: odolnost vůči provoznímu tlaku do 25bar, teplotní rozsah měřené kapaliny od  $-5$  do  $+200^{\circ}\text{C}$ , rozsah měřené viskozity od 1 do 50 000 mPa.s (tyto parametry jsou pouze orientační, samozřejmě záleží na přesném typu snímače) [30], [31].



Obr. 23 Procesní viskozimetr L-Vis 510 od firmy Anton Paar [31].

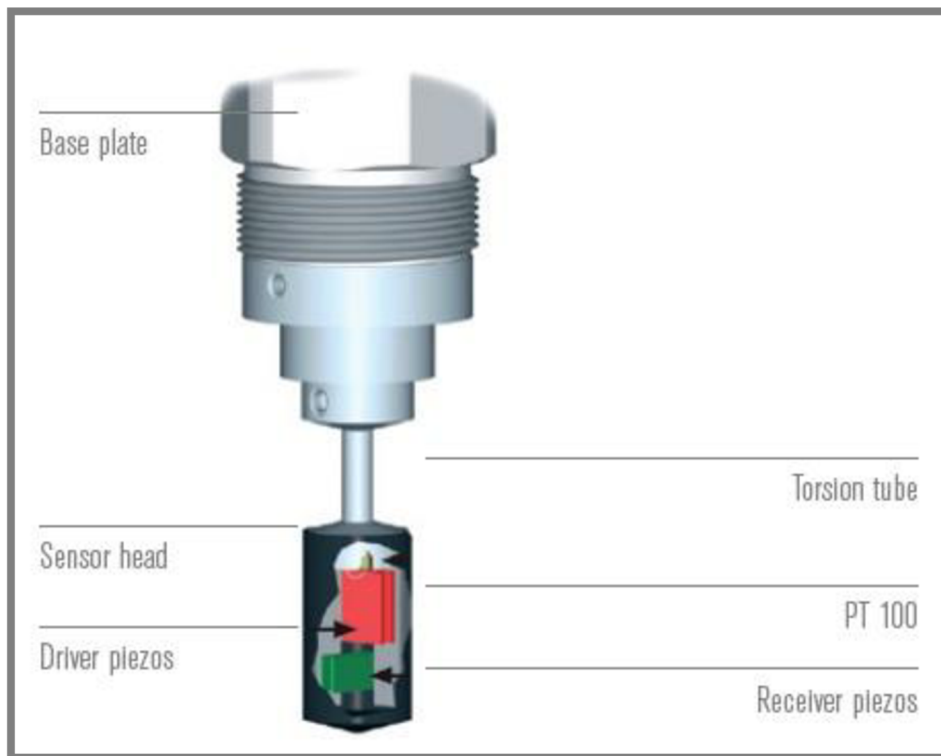
### 3.7.4 SENZOR VISKOZITY VISCOSENSE

Senzor od firmy VAF Instruments pracuje na základě torzně kmitajícího kyvadla v kapalině. Naměřené tlumení vibrací pak přímo souvisí s viskozitou kapaliny. Dále senzor snímá také teplotu a to ve stejném místě jako viskozitu.

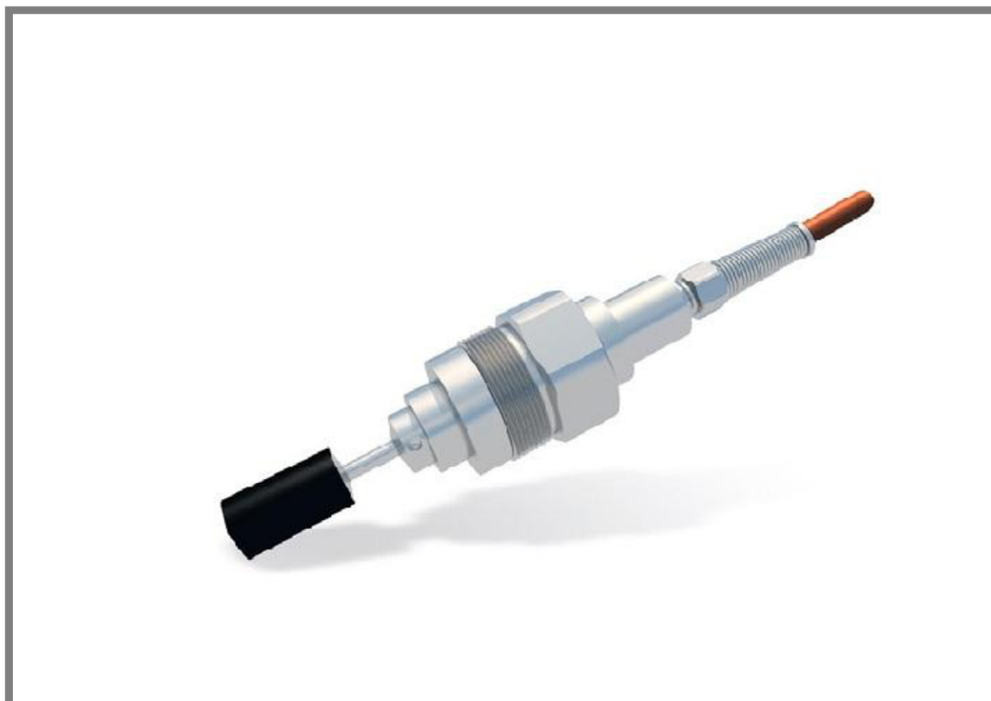
Funkce tohoto senzoru je založen na základě principu torzního kyvadla. Snímač je složen z hlavy čidla (nerezová ocel), která je připevněna k základní desce pomocí trubkové torzní pružiny. V hlavě ovládá jeden pár piezoelektrických prvků kyvadlo při jeho torzní rezonanční frekvenci, zatímco druhý pár piezosnímačů detekuje skutečný pohyb hlavy, který je tlumen přítomnou kapalinou. Ve výsledku se rezonanční frekvence lehce posune směrem k nižším frekvencím, zatímco šířka rezonance zůstává stejná a to je právě míra viskozity. Senzor je schopen měřit aktuální dynamickou viskozitu velkého množství kapaliny.

Díky principu torzního kyvadla je necitlivý k vnějším vlivům jako rychlost proudění, směr proudění a pulzace. Díky své konstrukci zajišťuje snímač dlouhou a relativně bezúdržbovou životnost, proto je vhodný i do provozu v těžkých podmínkách.

Provozní parametry: teplota měřící kapaliny do +180°C, rozsah měřené viskozity od 0 do 50 mPa.s (tyto parametry jsou pouze orientační, samozřejmě záleží na přesném typu snímače) [32], [33].



Obr. 24 Senzor viskozity na základě torzních vibrací [33].

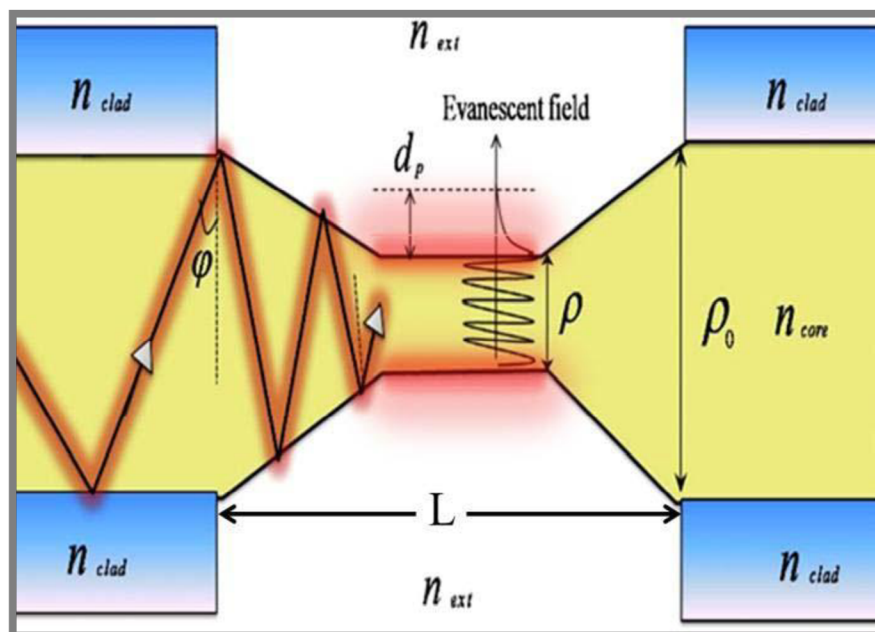


Obr. 25 Procesní viskozimetr ViscoSense 2 [32].

### 3.8 SENZOR S OPTICKÝMI VLÁKNY

Senzory s optickými vlákny (TOFS – tapered optical fibre sensor) pracují s pomocí zúžených optických vláken. Sensor analyzuje změny v kvalitě oleje a technickou specifikaci oleje. Tyto změny ovlivňují jeho optické vlastnosti, které jsou detekovány a porovnávány s vlastnostmi nového oleje.

Šíření světla v jádře optických vláken je dáno celkovým vnitřním odrazem světla, způsobeným zejména rozdílným indexem lomu pláště a jádra. Tato změna silně ovlivňuje výstupní optický výkon optického vlákna. U senzorů TOFS je důležitým faktorem citlivosti poměr průměru pláště k průměru jádra (RT). Když se optické vlákno zúží, část světelným paprsků může proniknout do okolního média, v našem případě oleje. Olej poté funguje jako nový plášť a sensor pro svoji analýzu zachycuje změny v indexu lomu světla. Zúžením průměru vlákna se zvýší počet odrazů světla a zmenší úhel směru paprsku světla mezi normálou k povrchu [16].

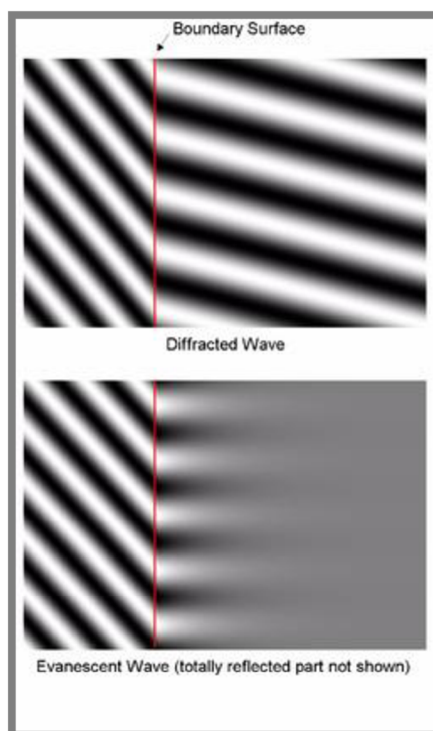


Obr. 26 Schéma zúženého optického vlákna [16].

Hloubka, do které proniká tzv. evanescentní pole za hranici pláště, se exponenciálně snižuje. Evanescentní pole je charakterizováno vlnami na rozhraní prostředí o různých indexech lomu, přes které nemůže proniknout periodická vlna (obr. 26). Hodnota hloubky proniknutí ( $d_p$  [ $\mu\text{m}$ ]) je dána následujícím vztahem [16]:

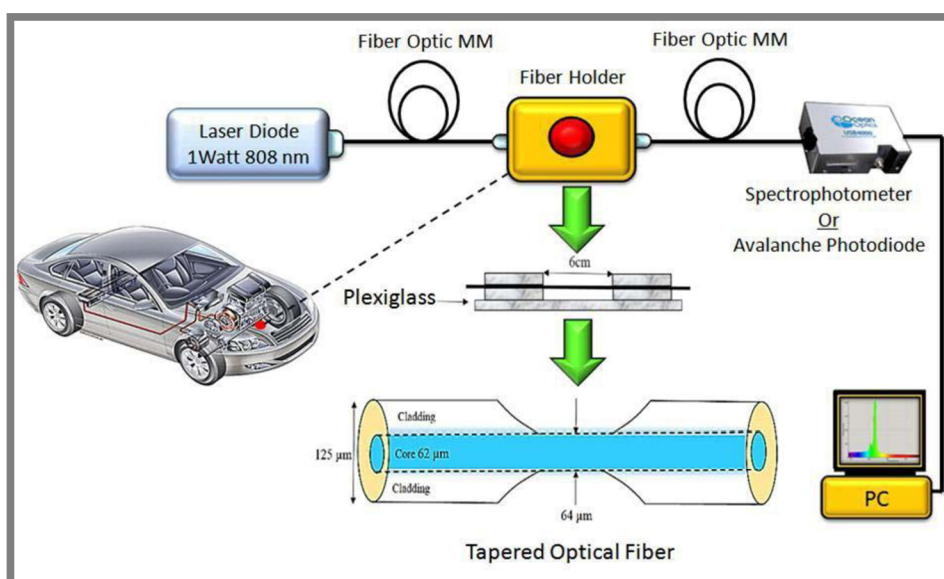
$$d_p = \frac{\lambda}{2 \cdot \pi \cdot \sqrt{n_{cl}^2 \cdot \sin^2 \phi - n_{ex}^2}}$$

kde  $\lambda$  – vlnová délka laseru [nm]  
 $n_{cl}$  – index lomu světla pláště [-]  
 $n_{ex}$  – index lomu světla media [-]



Obr. 27 Evanescentní pole [36].

Výhody tohoto senzoru spočívají v jeho malých rozměrech a necitlivosti vůči elektromagnetickým změnám a vůči vnějším vibracím. Pro svoji schopnost přesného měření, i za nepříznivých podmínek, je senzor vhodný do těžkého provozu, kde je zapotřebí přesných informací o stavu přítomného oleje. Názorný příklad využití můžeme vidět na obr. 28, kde je monitorován motorový olej u osobního automobilu [16].



Obr. 28 Použití TOFS v praxi [16].



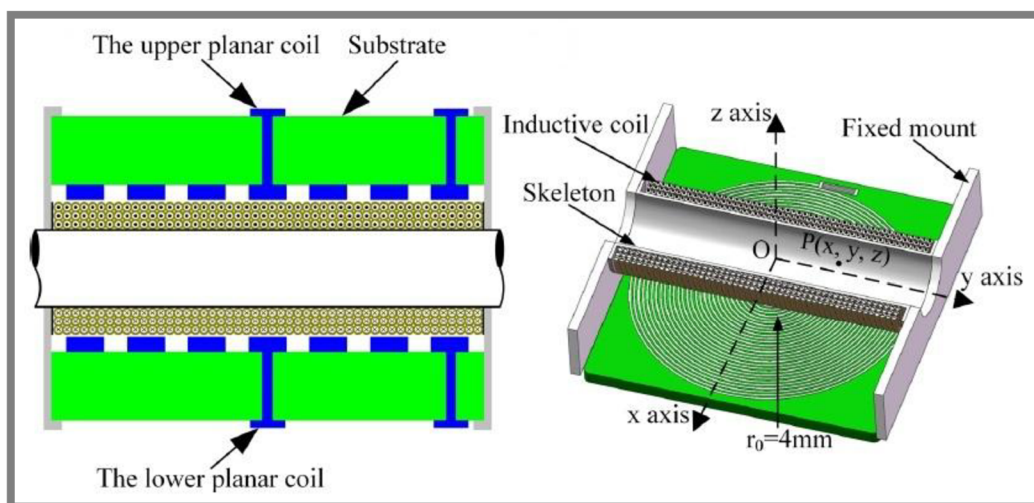
### 3.9 INDUKČNÍ SENZOR PEVNÝCH ČÁSTIC

Tento senzor vychází z relativně nové studie publikované v únoru minulého roku (2016).

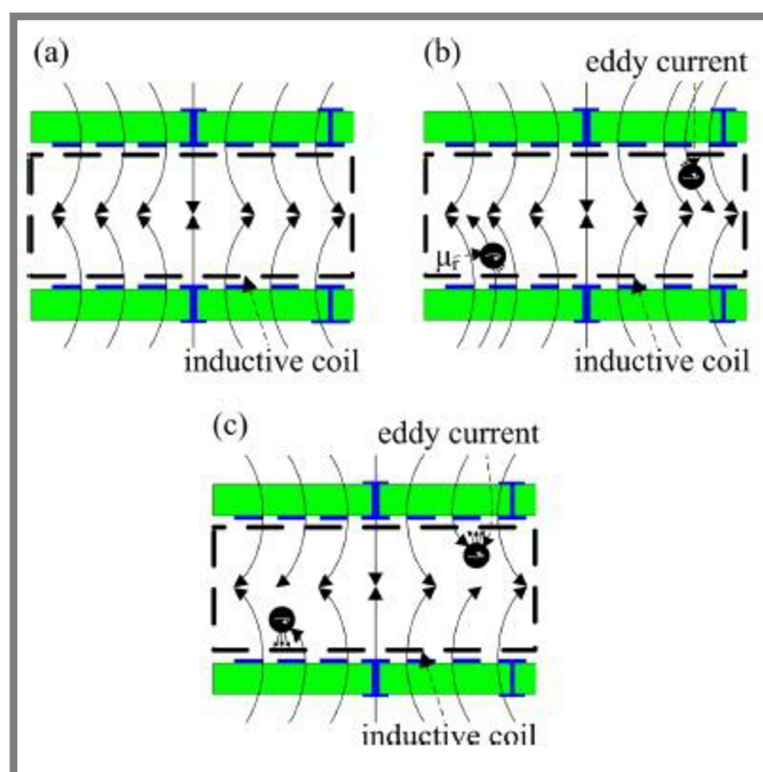
Jedná se o senzor pevných částic, který pro svoji funkci aplikuje radiální magnetické pole, na rozdíl od běžněji používaného axiálního pole. Senzor se vyznačuje svojí vysokou odolností vůči externímu rušení v podobě hluku v pozadí stroje nebo vibrací samotného stroje. Výsledky experimentů ukázaly, že touto metodou lze detekovat železné částice o velikosti  $120\mu\text{m}$  a neželezné o velikosti  $500\mu\text{m}$  pod vlivem vibrací.

Každý z výše uvedených senzorů má své určité nevýhody, optický snímač je citlivý na barvu a průhlednost měřeného oleje, kapacitní snímač nerozlišuje feromagnetické a neferomagnetické částice apod. Snímač, který si popisujeme je schopný detekovat koncentraci, typ materiálu, velikost a tvar částic přítomných v měřeném oleji.

Senzor pracuje na principu magnetické indukce, vytvářením radiálního magnetického pole, namísto axiálního, které je v měřicích senzorech více rozšířeno. Na rozdíl od axiálního pole, které je rovnoběžné s potrubím, radiální je vůči potrubí svislé a je proto schopno docílit vyšší intenzity snímání. Ačkoli jsou obě hustoty magnetického toku podobné, radiální pole vede k malé gradientové oblasti magnetického toku, a proto může vykazovat lepší výsledky v detekci částic, než pole axiální [17].



Obr. 29 Schéma principu indukčního senzoru [17].



Obr. 30 Změna magnetického pole při průchodu částice ((a) magnetické pole indukční cívky, (b) magnetické pole indukované železnými částicemi, (c) magnetické pole indukované neželeznými částicemi) [17].

Radiální magnetické pole je vytvářeno horními a spodními rovinnými cívkami, které jsou vodorovně přiléhající k podkladu čidla (obr. 29). Částice prochází úzkou více vrstvou spirálovitou cívkou, která je ve funkci hnací. Při průchodu mechanické nečistoty pak snímač analyzuje změnu magnetické indukce (obr. 30).

Senzory pracující na tomto principu jsou tak díky své odolnosti vůči vnějším vibracím vhodné do provozu v nepříznivých podmínkách. Mez detekce zmíněného senzoru může být do budoucna redukována z důvodů potřeby detekovat částice o menší velikosti, toho lze dosáhnout např. použitím cívek s vyšší hustotou vinutí [17].

### 3.10 PREDIKCE CHOVÁNÍ TRIBOLOGICKÉHO SYSTÉMU

3.10

Tribologický systém by měl být schopný sám plánovat a aktivně zasahovat na základě diagnostiky mazacího oleje. Tento systém samostatně synchronizuje aktuální výsledky analýzy oleje s těmi předchozími. Na základě porovnání těchto parametrů, pak vyhodnotí a naplánuje nadcházející údržbu, popřípadě varuje uživatele před možnou poruchou a sám aktivně zasáhne do systému např. změnou otáček stroje, čímž sníží zátěž stroje.

Systém zaznamenává výstupy z monitorovacích senzorů, které následně ukládá do paměti. V systému jako je například tzv. Internet věcí nebo novodobý Průmysl 4.0



jsou pak tyto výsledky vyhodnocovány a je vytvořen nadcházející plán údržby popř. odstávky strojů s ohledem na jejich ekonomické využití.

### 3.10.1 INTERNET VĚCÍ

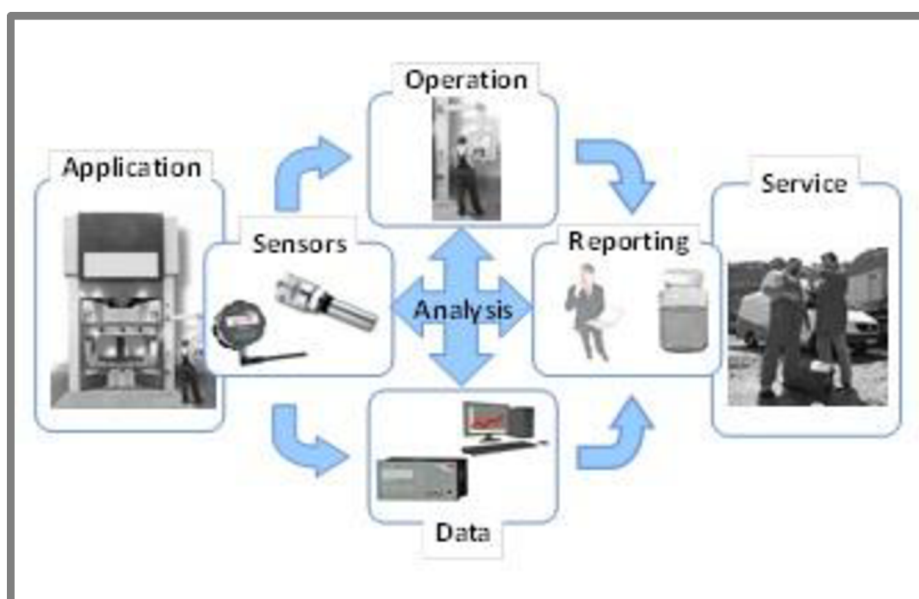
Internet věcí je označení pro propojení vestavěných zařízení, v našem případě tribotechnických senzorů, s internetem. Takové propojení by mělo být bezdrátové, a tudíž by mělo umožňovat interakci mezi jednotlivými systémy „na dálku“ [34].

### 3.10.2 PRŮMYSL 4.0

Průmysl 4.0 je nový trend v průmyslové digitalizaci. Na základě tohoto konceptu by měly vznikat tzv. chytré továrny, kde jednoduché fyzické operace doposud vykonávané lidmi, nahradí automaticky řízení roboti. Řízení takovéto továrny by pak mělo probíhat výhradně prostřednictvím internetu [35].

Celý systém by měl samostatně aktivně reagovat na vzniklé situace v mazání stroje, respektive plánovat jeho údržbu a případný servis pomocí informací získaných z maziva. Například v takovém případě, kdy zaznamená náhlé zvýšení kontaminace oleje metalickými částicemi, by měl vyhodnotit závažnost této změny a případně provést nutná opatření, jako jsou dočasné snížení provozního zatížení stroje a varování obsluhy.

Dále by měl systém proaktivně plánovat nutné odstávky. Pro příklad uvažujeme firmu zaměřenou čistě na obrábění strojních součástí, kde je v pracovním provozu několik obráběcích center. V takovém případě by měl systém naplánovat odstávky strojů v závislosti na pracovním vyčerpání jednotlivých zařízení a zamezit tak situaci současné odstávky většiny strojů. Takové plánování může získat výrazné úspory, které se ve značné míře promítají do celkové ekonomiky firmy.



Obr. 31 Aplikace proaktivní údržby [6].

## 4 DISKUZE

V diskuzní části zhodnotíme vhodnost použití senzorů, dále zhodnotíme vhodnost použití celého tribologického systému pro proaktivní monitorování maziva a zdůvodníme použití systému při monitorování stavu oleje v převodové skříně větrné elektrárny.

V mazacím oleji se můžeme setkat s různými mechanickými nečistotami vzniklými opotřebením strojních součástí, nebo vniknutím z vnějšího okolí vlivem netěsností apod. Tyto mechanické částice bývají nejčastěji v podobě kovového oteru a prachu složeném z krystalů púdnicích nerostů. Mechanické nečistoty mají zásadní vliv na vlastnosti mazacího oleje a ve většině případů také přispívají k nepříznivému opotřebením pracujících součástí. Proto je zapotřebí výskyt těchto částic detekovat a získat tak možnost včasného zásahu do mechanismu stroje. K detekci těchto částic slouží kontaminační senzor, senzor metalických částic a indukční senzor. Dále se můžeme setkat se změnami způsobenými kontaminací kapalinou. Jako kontaminující kapaliny jsou brány palivo, chladicí kapalina a voda. Přítomnost těchto kapalin ovlivňuje zejména viskozitu oleje potřebnou k tvorbě mazacího filmu, ale také vznik korozního opotřebením.

Kontaminační senzor pracující na principu zastínění světelného paprsku je schopen detekovat velmi malé částice o rozměrech obvykle 4  $\mu\text{m}$ . Jeho výhodou spočívá ve vysoké přesnosti a odolnosti vůči provoznímu tlaku. Snímač je tak vhodný např. do výroby zubových čerpadel, palivové soustavy letadel nebo také do přenosných laboratoří. Ve všech těchto případech je vyžadována vysoká přesnost a spolehlivost měření. Nevýhody kontaminačního snímače spočívají v jeho vysoké ceně a v nevhodnosti použití ve velmi nepříznivých podmínkách, kde se dá očekávat častý výskyt mechanických nečistot mnohonásobně větších, než je potřebná přesnost senzoru. Senzor pak v takových případech nemusí měřit správně, neboť detekci velkých částic považuje za měřicí chybu.

Senzor metalických částic (MCS), pracující se změnou indukčnosti, je schopen detekovat částice velké od 70  $\mu\text{m}$  u feromagnetických materiálů a od 200  $\mu\text{m}$  u neferomagnetických. Díky své odolnosti a dostatečné přesnosti je vhodný k analýze v mazacích systémech převodovek a valivých ložisek, kde můžeme očekávat výskyt kovových částí velikosti stovek  $\mu\text{m}$  vlivem opotřebením pracujících součástí. Pro správnou funkci by měl být senzor zařazen na hlavní větvě mazacího systému.

Kapacitní senzor, jak už z názvu vyplývá, pracuje s měřením změny kapacity protékajícího média. Tento senzor analyzuje aktuální změnu dielektrické konstanty oleje, kterou pak následně porovnává s referenčními hodnotami. Hlavními výstupy senzoru jsou teplota, relativní vlhkost oleje a relativní dielektrická konstanta, neměří tedy mechanické znečištění.

Rozsáhlejší skupinou v oblasti senzorů jsou senzory pro měření viskozity. V této podskupině se můžeme setkat s různými principy, na základě kterých je viskozita měřena. Pro měření viskozity v reálném čase se používají tzv. procesní viskozimetry, které dodávají aktuální informace o diagnostikovaném oleji. Senzory většinou

snímají také teplotu, která má také vliv na aktuální viskozitu oleje. Každý má pak různá pozitiva a tedy i oblast použití.

Senzor viskozity ViSmart od firmy SenGuity pracuje na základě měření akustické impedance v protékajícím mazivu. Akustická impedance úzce souvisí s viskozitou oleje. Výhody senzoru spočívají v jeho malé, jednoduché a odolné konstrukci. Další výhodou senzoru spočívá v necitlivosti vůči vnějším vibracím a mechanickým nečistotám v oleji. Senzor je tedy vhodný pro použití v náročných nepříznivých podmínkách, kde můžeme očekávat mechanické znečištění oleje, vibrace stroje a také degradaci oleje vlivem vniknutí cizí kapaliny.

Senzor viskozity L-VIS firmy Anton Paar pracuje na principu změny hydrostatického tlaku v postupně zužující se trubičce, kterou protéká diagnostikovaný olej. Výhodou senzoru je necitlivost vůči změnám tlaku a rychlosti protékající kapaliny. Díky své konstrukci je vhodný pro měření viskozity jemných suspenzí, kde je schopen poskytovat rychlé a přesné výsledky.

Další z řady procesních viskozimetrů je senzor ViscoSense vyráběný firmou VAF Instruments. Pracuje s torzně kmitajícím kyvadlem, kde vyhodnocuje změny v tlumení kyvadla. Díky principu torzního kyvadla je senzor necitlivý vůči změnám v rychlosti a směru proudění oleje, a také vůči pulzacím oleje. Proto může pracovat v nepříznivých podmínkách, kde můžeme očekávat právě výše uvedené změny. Další výhodou senzoru je jeho téměř bezúdržbový provoz, což ho předurčuje pro monitorování stavu oleje v nepřetržitých provozech.

V neposlední řadě je vhodné okomentovat nově vznikající studie a to senzory pracující se zúženými optickými vlákny (TOFS) a indukční senzory pevných částic.

TOFS senzory pracují s principem prosvícování zúženého optického vlákna, kde část světla proniká do oleje. Výhody senzorů TOFS spočívají v jejich necitlivosti na elektromagnetické změny a vnější vibrace. Další výhodou senzoru je jejich relativně malá konstrukce, která je v řádech desítek milimetrů. Díky své přesnosti měření, i v nepříznivých podmínkách, a také svým malým rozměrům, jsou senzory vhodné např. pro monitorování stavu mazacího oleje u osobních automobilů.

Poslední představený senzor pracuje se změnami v indukovaném magnetickém poli. Senzor vytváří radiální pole, na rozdíl od běžně používaného axiálního pole, a poté detekuje jeho změny způsobené průchodem mechanických částic. Výhody tohoto senzoru spočívají v schopnosti přesně určit velikost, tvar a materiál procházející částice. Studie tohoto senzoru byla zveřejněna na začátku minulého roku a zatím spíše naznačuje směr vývoje v analýze mechanického znečištění oleje.

Všechny výše uvedené senzory jsou schopny analyzovat mazací olej v reálném čase a poskytovat tak uživateli aktuální informace o dění v tribologickém systému. Pro získání celkových informací o stavu oleje je vhodné senzory kombinovat. Například kombinace senzoru metalických částic se senzorem viskozity nám zaručí celkové informace o kontaminaci oleje vlivem mechanických částic a cizích kapalin.

Nicméně, pro celkovou diagnostiku a predikci následujícího chování systému je zapotřebí interakce senzorů s vyhodnocovacím systémem, jako je např. Průmysl 4.0. Touto interakcí vznikne tribologický systém, který by měl být schopen samostatně a nepřetržitě monitorovat stav mazacího oleje. Systém by měl ukládat průběžné informace a při jejich porovnání by měl být schopen předvídat následné možné závady a plánovat zásahy do systému. Všechny tyto akce by měli být sdíleny přes bezdrátové rozhraní.

Při monitorování mechanického znečištění oleje, by měl systém sledovat jeho průběžný vývoj. Například při zvyšování obsahu metalických částic by měl rozpoznat probíhající opotřebení strojních součástí a naplánovat tak jejich servis s ohledem na celkovou ekonomiku firmy.

Při monitorování stavu viskozity oleje by měl být schopen na základě jejích změn, tedy změn v tloušťce mazacího filmu, naplánovat nutnou výměnu oleje, a to opět s ohledem na celkovou ekonomiku provozu.

Plánování nutných odstávek strojů by mělo být synchronizováno mezi všemi stroji, aby nedocházelo k odstávkám na několika strojích zároveň. Systém by měl být také schopen samostatně řešit náhlé hrozby možných poruch stroje, např. snížením otáček stroje, respektive snížením zatížení.

Aplikace takového monitorovacího systému má pak velký význam na celkové hospodaření, kdy je možné dosáhnout vysokých úspor např. prodloužením intervalu výměny oleje, vhodnou kombinací nutných odstávek strojů nebo včasným zásahem před závažnou poruchou pracujícího zařízení.

Pro lepší představu, aplikujeme tribologický systém pro monitorování stavu mazacího oleje v převodové skříni větrné elektrárny.

Větrná elektrárna pracuje v nepřetržitém provozu a za nepříznivých podmínek zapříčiněných vlivem vnějšího okolí. Výrobní cena celé elektrárny se pohybuje v řádech desítek milionů, proto každá závažná porucha způsobuje vysoké ekonomické ztráty. Do těchto ztrát se započítává cena opravy zařízení, ale také doba odstávky, při které elektrárna nepřináší žádný zisk.

Převodová skříň elektrárny je umístěna většinou několik desítek metrů nad zemí, proto jakýkoli přímý zásah do systému je velmi náročný a také nákladný. V převodovce můžeme předpokládat opotřebení ozubených kol a rotujících valivých ložisek, vlivem provozního zatížení a vzniklých vibrací. Toto opotřebení s sebou přináší nebezpečí poruchy jednotlivých součástí a tím i celého mechanismu. Částice vzniklé opotřebením budou mít nepříznivý vliv na celkový stav mazacího oleje. Provoz elektrárny ve venkovním prostředí nám také napoví, možnost kontaminace oleje vlivem vniknutí vody a tím zhoršení mazacích vlastností oleje (viskozity).

Ve výsledné diagnostice budeme tedy monitorovat stav mazacího oleje a jednotlivých součástí v zastoupení ozubených kol a valivých ložisek.



Pro monitorování mechanických částic v oleji aplikujeme senzor MCS, který je díky své dostatečné přesnosti a vysoké odolnosti vůči nepříznivým provozním podmínkám, vhodný právě pro analýzu v převodových mechanismech strojů.

Pro monitorování viskozity mazacího oleje aplikujeme procesní viskozimetr ViSmart, který je odolný vůči vnějším nepříznivým podmínkám zastoupených vibracemi stroje a přítomnými nečistotami. Senzor se také vyznačuje velmi jednoduchou a malou konstrukcí, proto jej můžeme snadněji zařadit do systému. Díky těmto vlastnostem je také téměř bezúdržbový, a proto je vhodný do nepřetržitého provozu větrné elektrárny a komplikované údržbě převodovky zapříčiněné obtížnou dostupností.

Celkový systém by tak měl na základě aktuálních informací získaných pomocí senzorů plánovat následující kroky v provozu elektrárny. Systém by měl při dlouhodobě zvyšujícím se výskytu metalických částic vyhodnotit stav pracujících součástí, přesněji opotřebení ozubených kol a valivých ložisek a varovat tak uživatele před možnou poruchou stroje nebo naplánovat servis. Dále by měl při monitorování viskozity oleje porovnávat její aktuální hodnoty s mezními hodnotami zadanými uživatelem a plánovat intervaly jeho výměny. Do doby nutného servisu převodovky by měl systém snížit otáčky stroje a zmírnit tak jeho opotřebení s ohledem na ekonomické ztráty způsobené úplnou odstávkou stroje.

Jednotlivé části elektrárny jsou nejen velmi drahé, ale také velmi rozměrné a jakákoli manipulace je velmi obtížná, časově a finančně náročná. Celkové plánování údržby a odstávek zařízení by tak mělo být realizováno s dostatečným předstihem pro možnost včasného zajištění všech potřebných prvků.

Díky této predikci, zajištěné tribotechnickou diagnostikou, jsme schopni vytvořit nemalé úspory v celkovém hospodaření, například prodloužením intervalu výměny oleje o více jak 50% z původního intervalu. Další příklad je předejít úplnému zastavení stroje a následně vysoce finančně náročné opravě pohybující se v řádech milionů korun, včasnými, cílenými a finančně méně náročnými zásahy do zařízení.

Přínos zaznamenáváme nejen v ekonomické odvětví, ale také například v ekologickém odvětví, zabráněním havárii elektrárny, při kterých je devastováno a kontaminováno okolní přírodní prostředí.

## 5 ZÁVĚR

Tato práce se zaměřuje na vytvoření přehledu současného stavu poznání v oblasti tribotechnické diagnostiky. Obsahuje přehled používaných senzorů, stanovení možné predikce v chování tribologického systému a volbou vhodné diagnostiku převodovky větrné elektrárny.

V první části je analyzován problém spojený s údržbou mazacího systému a možných úspor díky aktivnímu monitorování mazacího oleje.

Dále práce pokračuje sestavením současného stavu poznání v oblasti opotřebení a sestavením přehledu používaných typů senzorů pro analýzu mazacího oleje. Jsou zde představeny senzory fungující na různých principech snímání. Senzory pracující na základě prosvícování protékajícího oleje a snímání změny intenzity světla způsobené přítomnými mechanickými nečistotami, senzory snímající změnu indukčnosti při průchodu mazacího oleje snímačem, senzory detekující změnu kapacity protékajícího média apod. Dále jsou zde představeny senzory monitorující viskozitu oleje, které pracují se změnou akustické viskozity, hydrostatického tlaku nebo změnou při torzním kmitání integrovaného kyvadla. V neposlední řadě jsou zde uvedeny také nově vznikající studie pracující na principu šíření světla optickými vlákny nebo vytvořením radiálního magnetického pole, které jsou, jak se zdá, budoucností v používaných senzorech pro tribotechnickou diagnostiku v reálném čase.

Další bod se zabývá sestavením tribologického systému, respektive stanovení jeho chování v případě plánování údržby a předvídání možných poruch.

V diskuzní části této práce je pak zhodnocena vhodnost použití snímačů v provozu a vytvořena představa pro monitorování stavu převodovky větrné elektrárny.

---

## 6 SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

- [1] HELEBRANT, F. *Technická diagnostika a spolehlivost: Tribodiagnostika I/ František Helebrant, Jiří Ziegler, Daniela Marasová*. 1. vyd. Ostrava: Vysoká škola Báňská – Technická univerzita Ostrava, 2000. 155 s. ISBN 80-7078-883-6
- [2] STRAKA, B. *Motorové oleje a tribotechnická diagnostika naftových motorůka*. 1. vyd. Praha: Nakladatelství dopravy a strojů, 1986. 247 s.
- [3] *Analýza olejů- cesta k efektivitě*. NOVÁČEK, V. [online]. [cit. 2017-05-15] Dostupné z: <http://www.tribotechnika.sk/tribotechnika-32017/analyzy-oleju-cesta-k-efektivite-.html>
- [4] *Analýza olejů pro prediktivní a proaktivní údržbu*. NOVÁČEK, V. [online]. [cit. 2017-05-16] Dostupné z: <http://www.engineering.sk/clanky2/tribologia-a-tribotechnika/2769-analyzy-oleju-pro-prediktivni-a-proaktivni-udrzbu>
- [5] *The Benefits of installing a condition monitoring systém*. [online]. [cit. 2017-05-16] Dostupné z: <http://www.nacleanenergy.com/articles/22175/the-benefits-of-installing-a-condition-monitoring-system>
- [6] *Cost reduction through online condition monitoring*. KRAHLING, R. a DYCK, H. [online]. [cit. 2017-05-16] Dostupné z: <http://www.argo-hytos.com/news/archive/archive/cost-reduction-through-online-condition-monitoring.html>
- [7] FAMFULÍK, J.; MÍKOVÁ, J.; KRZYŽANEK, R. *Teorie údržby*. 1. vyd. Ostrava: Vysoká škola Báňská – Technická univerzita Ostrava, 2007. 237 s. ISBN 978-80-248-1509-1
- [8] SEJKOROVÁ, M. *Metody tribotechnické diagnostiky. 1. vyd.* Ostrava: Vysoká škola Báňská – Technická univerzita Ostrava, Univerzita Pardubice 2013. 111 s. ISBN 978-80-248-3280-7
- [9] *Adhesion effect in dry rubbing metal- metal combustion* [online]. [cit. 2017-05-15] Dostupné z: <http://www.tribology-abc.com/abc/adhesion.htm>
- [10] *Drsnost povrchu*. [online]. [cit. 2017-05-16] Dostupné z: <http://e-konstrukter.cz/prakticka-informace/drsnost-povrchu>
- [11] Wear. In: *Wikipedia: the free encyclopedia*. [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation. [cit. 2017-05-15] Dostupné z: <https://en.wikipedia.org/wiki/Wear>

- [12] *Praktické případy erozivního opotřebení*. SUCHÁNEK, J. [online]. [cit. 2017-05-15] Dostupné z: <http://www.tribotechnika.sk/tribotechnika-12013/prakticke-pripady-erozivniho-opotrebeni.html>
- [13] *Přednáška 2- Porušování při cyklickém zatížení*. BRANDEJS, J., Fakulta strojního inženýrství v Brně [online]. [cit. 2017-05-15] Dostupné z: [moodle.vutbr.cz](http://moodle.vutbr.cz)
- [14] *Znehodnocení mazacích olejů vlivem kontaminace, typy nečistot*. RŮŽIČKA, P. [online]. [cit. 2017-05-15] Dostupné z: <http://www.tribotechnika.sk/tribotechnika-12015/znehodnoceni-mazacich-oleju-vlivem-kontaminace-typy-necistot.html>
- [15] *Automatické zjišťování kontaminace olejů*. [online]. [cit. 2017-05-15] Dostupné z: <http://m.mmspektrum.com/clanek/automaticke-zjistovani-kontaminace-oleju>
- [16] TAHERI GHAHRIZJANI, R.; H. SADEGHI a A. MAZAHERI. *A Novel Method for onLine Monitoring Engine oil Quality Based on Tapered Optical Fiber Sensor*. IEE Sensor Journal [online]. 2016, **16**(10), 2551-3555 [cit. 2017-05-15]. DOI: 10.1109/JSEN.2016.2523805. ISSN 1530-437x. Dostupné z: <http://www.sciencedirect.com.ezproxy.lib.vutbr.cz/science/article/pii/S1877705810009410>
- [17] DING Y., Y. WANG aj. XIANG. *An online debris sensor system with vibration resistance for lubrication analysis*. Review of Scientific Instruments [online]. 2016, **87**(2), 025109- [cit. 2017-05-15]. DOI: 10.1063/1.4941440. ISSN 0034-6748. Dostupné z: <http://aip.scitation.org/doi/abs/10.1063/1.4941440>
- [18] *Sledování opotřebení strojů pomocí analýz mazacích olejů*. NOVÁČEK, V. [online]. [cit. 2017-05-15] Dostupné z: <http://www.tribotechnika.sk/tribotechnika-62015/sledovani-opotrebeni-stroju-pomoci-analyz-mazacich-oleju.html>
- [19] WANG, Y., M. ZHANG a D. LIU. *A compact on-line particle counter sensor for hydraulic oil contamination detection*. Applied Mechanics and Materials [online]. 2012, **130-134**, 4198-4201 [cit. 2017-05-15]. DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMM.130-134.4198. ISBN 9783037852866. ISSN 16609336. Dostupné z: <https://www.scientific.net.ezproxy.lib.vutbr.cz/AMM.130-134.4198>
- [20] *Použití kontaminačních senzorů v praxi- příklady aplikací*. KANIA, Z. [online]. [cit. 2017-05-15] Dostupné z: <http://www.tribotechnika.sk/tribotechnika-52013/pouziti-kontaminacnich-senzoru-v-praxi-prikklady-aplikaci.html>
- [21] *Senzory pro zjišťování kontaminace hydraulického a mazacího média*. KANIA, Z. [online]. [cit. 2017-05-15] Dostupné z: <http://www.tribotechnika.sk/tribotechnika-1-2009/senzory-pro-zjistovani-kontaminace-hydraulickeho-a-mazaciho-media.html>



- [22] *LDP100- Senzor pro monitorování částic sleduje znečištění olejů.* [online]. [cit. 2017-05-15] Dostupné z: <http://www.ifm.com/ifmcz/web/news/particle-monitor-ldp100-monitors-the-contamination-of-oils.html>
- [23] LI, C., J. PENG a M. LIANG. *Enhancement of the wear particle monitoring capability of oil debris sensors using a maximal overlap discrete wavelet transform with optimal decomposition depth.* Sensors (Switzerland) [online]. Molecular Diversity Preservation International, 2014, **14**(4), 6207-6228 [cit. 2017-05-15]. DOI: 10.3390/s140406207. ISSN 14248220. Dostupné z: <http://www.mdpi.com/1424-8220/14/4/6207>
- [24] *MCS1000.* [online]. [cit. 2017-05-15] Dostupné z: <https://www.hydac.com/cz-cs/vyroby/sensorika/senzory-znecistenimcs-1000.html>
- [25] BALASHANMUGAM, V. a D. GOBALAKICHENIN. *Development of dielectric sensor to monitor the engine lubricating oil degradation.* Thermal Science [online]. Serbian Society of Heat Transfer Engineers, 2016, **20**(s4), S1061-S1069 [cit. 2017-05-15]. DOI: 10.2298/TSCI16S4061B. ISSN 03549836. Dostupné z: <http://www.doiserbia.nb.rs/Article.aspx?ID=0354-983616061B>
- [26] *Monitorování stavu hydraulického oleje.* VRHEL, J. [online]. [cit. 2017-05-15] Dostupné z: <http://www.tribotechnika.sk/tribotechnika-52016/monitorovani-stavu-hydraulickeho-oleje.html>
- [27] *Measuring viscosity with surface acoustic wave sensor.* DURDAG, K. [online]. [cit. 2017-05-15] Dostupné z: <http://www.sensorsmag.com/components/measuring-viscosity-a-surface-acoustic-wave-sensor>
- [28] *Oil and fuel monitoring using The ViSmart viscosity sensor.* [online]. [cit. 2017-05-15] Dostupné z: <http://www.machinerylubrication.com/Read/2071/oil-fuel-viscosity-sensor>
- [29] *Viscosity sensor.* [online]. [cit. 2017-05-15] Dostupné z: <http://www.sengenuity.com/viscositysensor.html>
- [30] STEINER G.; GAUTSCH, J.; BREIDLER, R.; PLANK, F. *A Novel fluid dynamic inline viscometer suitable for harsh proces conditions.* Procedia Engineering [online]. Elsevier, 2010, **5**, 1470-1473 [cit. 2017-05-15]. DOI: 10.1016/j.proeng.2010.09.394. ISSN 1877-7058. Dostupné z: <http://www.sciencedirect.com.ezproxy.lib.vutbr.cz/science/article/pii/S1877705810009410>
- [31] *Procesní viskozimetr: L-Vis 510.* [online]. [cit. 2017-05-15] Dostupné z: <http://www.anton-paar.com/cz-cs/produkty/detaily/procesni-viskozimetr-l-vis-510/>

- [32] *Viscosity inline analysers*. [online]. [cit. 2017-05-15] Dostupné z:  
<http://cemsonboard.com/portfolio/viscosity-in-line-analysers/>
- [33] *ViscoSense 2*. [online]. [cit. 2017-05-15] Dostupné z:  
<http://cemsonboard.com/wp-content/uploads/2016/03/Viscosense-2-VAF-TECNOVA-HT-Skeeper7.pdf>
- [34] Internet věcí. In: *Wikipedia: the free encyclopedia*. [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation. [cit. 2017-05-16] Dostupné z:  
[https://cs.wikipedia.org/wiki/Internet\\_v%C4%9Bc%C3%AD](https://cs.wikipedia.org/wiki/Internet_v%C4%9Bc%C3%AD)
- [35] Průmysl 4.0. In: *Wikipedia: the free encyclopedia*. [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation. [cit. 2017-05-16] Dostupné z:  
[https://cs.wikipedia.org/wiki/Internet\\_v%C4%9Bc%C3%AD](https://cs.wikipedia.org/wiki/Internet_v%C4%9Bc%C3%AD)
- [36] Evanescentní vlna. In: *Wikipedia: the free encyclopedia*. [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation. [cit. 2017-05-16] Dostupné z:  
[https://cs.wikipedia.org/wiki/Internet\\_v%C4%9Bc%C3%AD](https://cs.wikipedia.org/wiki/Internet_v%C4%9Bc%C3%AD)

**7 SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK, SYMBOLŮ A VELIČIN**

<i>TTD</i>		- tribotechnická diagnostika
<i>MCS</i>		- metallic contamination sensor
<i>RUL</i>		- remaining useful lifetime
<i>TOFS</i>		- tapered optical fibre
<i>Ra</i>	[ $\mu\text{m}$ ]	- drsnost povrchu
<i>hm</i>	[kg]	- hmotnost
$\varepsilon_r$	[-]	- relativní permitivita
<i>C</i>	[F]	- kapacita
$\eta$	[Pa.s]	- dynamická viskozita
$\tau$	[Pa]	- smykové napětí
$dv/dz$	[ $\text{s}^{-1}$ ]	- rychlostní gradient
<i>v</i>	[ $\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ ]	- kinematická viskozita
$\rho$	[ $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ ]	- hustota
<i>Za</i>	[ $\text{Pa} \cdot \text{s} \cdot \text{m}^{-1}$ ]	- akustická impedance
$\omega$	[ $\text{rad} \cdot \text{s}^{-1}$ ]	- úhlová rychlost
<i>d</i>	[ $\mu\text{m}$ ]	- hloubka proniknutí vlny světla
$\lambda$	[nm]	- vlnová délka laseru
$n_{cl}$	[-]	- index lomu světla pláště
$n_{ex}$	[-]	- index lomu světla média

**8 SEZNAM OBRÁZKŮ A GRAFŮ**

<b>Obr. 1</b> Skladba úspor dosažitelných proaktivní údržbou.	13
<b>Obr. 2</b> Diagnostika větrné elektrárny.	15
<b>Obr. 3</b> Základní druhy opotřebení.	17
<b>Obr. 4</b> Adhezivní opotřebení různých materiálů při absenci maziva.	18
<b>Obr. 5</b> Rýhy způsobené abrazivním opotřebením.	19
<b>Obr. 6</b> Erozivní opotřebení koule kulového ventilu.	20
<b>Obr. 7</b> Únavový lom hřídele.	21
<b>Obr. 8</b> Vibrační opotřebení valivého ložiska.	22
<b>Obr. 9</b> Koroze způsobená vodou obsaženou v mazacím oleji.	22
<b>Obr. 10</b> Nečistoty ve formě uvolněných vláken z vložek filtrů.	25
<b>Obr. 11</b> Kontaminace mazacího oleje otěrovými částicemi.	26
<b>Obr. 12</b> Mechanický prach v mazacím oleji.	26
<b>Obr. 13</b> Princip funkce optického senzoru.	28
<b>Obr. 14</b> Optický senzor LDP100.	29
<b>Obr. 15</b> Senzory metalických částic MCS1000.	30
<b>Obr. 16</b> Schéma senzoru metalických částic.	31
<b>Obr. 17</b> Část výstupního signálu snímače.	32
<b>Obr. 18</b> Náčrt prototypu dielektrického senzoru.	33
<b>Obr. 19</b> Náčrt senzoru LubCos H2plus II.	33
<b>Obr. 20</b> Akustický senzor ViSmart.	34
<b>Obr. 21</b> Průřez senzoru.	36
<b>Obr. 22</b> Princip procesního viskozimetru L-Vis.	37
<b>Obr. 23</b> Procesní viskozimetr L-Vis 510 od firmy Anton Paar.	37
<b>Obr. 24</b> Senzor viskozity na základě torzních vibrací.	39
<b>Obr. 25</b> Procesní viskozimetr ViscoSense.	39
<b>Obr. 26</b> Schéma zúženého optického vlákna.	40
<b>Obr. 27</b> Evanescentní pole.	41
<b>Obr. 28</b> Použití TOFS v praxi.	41
<b>Obr. 29</b> Schéma principu indukčního senzoru.	42
<b>Obr. 30</b> Změna magnetického pole při průchodu částice.	43
<b>Obr. 31</b> Aplikace proaktivní údržby.	44

---

## 9 SEZNAM TABULEK

<b>Tab. 1</b> Provoz důlního nakladače.	14
<b>Tab. 2</b> Monitorování stavu oleje větrné elektrárny.	16