

# Provoz strojních zařízení a strojů

Známé problémy nastávající při provozu musí být uvažovány už při navrhování strojního zařízení či stroje. Jedná se především o jevy spojené s [pohybem](#), tj. setrvačné síly, vibrace, chvění, rezonance. Při vzájemném pohybu částí strojů dochází ke tření, jeho důsledkem jsou energetické ztráty a opotřebení. Konečný důsledek je tzv. degradace, situace, kdy stroj už nemůže plnit svou funkci, pro kterou byl navržen. Kromě hospodářských škod může být degradace spojena s ohrožením obsluhy.

## Plánování pro provoz stroje

Plánovány jsou periodické prohlídky, údržba a opravy. Tyto úkony prodlužují životnost stroje předcházením možné havárie. Součástí údržby je např.:

- seřízení (nastavení vhodných hodnot např. vůlí aj.)
- odstranění drobných závad
- regenerace např. náplně maziva (vyčištění, přidání přísad aj.), frikčních obložení
- výměna provozních náplní (maziva, paliva, kapaliny pro hydraulické obvody)
- výměna součástí, které podléhají značnému opotřebení nebo jsou určeny sezónně

Generální opravy se provádějí tehdy, je-li určitá součást stroje velmi drahá (často rozměrná) a její funkce není ovlivněna délkou provozu (např. lité stojany a lože velkých obráběcích strojů). Většina ostatních součástí je vyměněna. Běžné stroje jsou však opravovány výměnou celých stavebnicových dílů (motor, převodovka, spojka atd.).

Pro opravy strojních součástí jsou používány metody, které umožňují součást znovu obrábět a získat součást kvalitou materiálu i rozměrově podobnou s původní originální (doplnění materiálu):

- navařování (elektricky obloukově, plamenem, termitem)
- nastříkání kovového materiálu (metalizace)
- opravy odlitků přilitím
- galvanické nanášení kovových povlaků
- nakování (napěchování apod.)

# POHYB

## Základy mechaniky pohybu - kinematika

- řeší dráhu, rychlost, zrychlení (frekvenci otáčení, úhlovou rychlost, úhlové zrychlení)
- kinematika bodu a tělesa (složený pohyb – základní, unášivý, sekundární, relativní)
- soustavy těles a mechanismy (vazby mezi tělesy – rotační, posuvné, obecné)
- řešení rovinné soustavy a prostorové soustavy (stupně volnosti)

$$s = \int v \cdot dt \quad v = \int a \cdot dt \quad \varphi = \int \omega \cdot dt \quad \omega = \int \varepsilon \cdot dt \quad v = \omega \cdot r$$

$$a = r \cdot \omega^2$$

## Silové účinky za pohybu - dynamika

- změna rychlosti (zrychlení) vyvolá silový účinek na hmotu
- setrvačné síly a momenty mají takový směr, že brání urychlování (zpomalování)
- řešení silových účinků rovinné soustavy těles a prostorové soustavy těles
- energetické principy – hybnost a moment hybnosti soustavy, kinetická energie
- vazební síly a reakce v mechanismech

$$F = m \cdot a \quad M_k = J \cdot \varepsilon \quad \Sigma m \cdot v = \int F \cdot dt \quad \Sigma J \cdot \omega = \int M_k \cdot dt \quad M_k = F \cdot r$$

$$E = 0,5 \cdot m \cdot v^2$$

$$E = 0,5 \cdot J \cdot \omega^2$$

$$F_C = m \cdot r \cdot \omega^2$$

# DEGRADACE STROJNÍCH ČÁSTÍ A JEJÍ PŘÍČINY

Přetěžování v důsledku nekázně, spektrum zatěžování, cyklické namáhání, únava a lomy.

Vliv vnitřní dynamiky – vyvažování, eliminace rezonančních stavů – tlumiče, mechatronická zařízení, autoregulace a zpětná vazba (ABS aj.).

Opotřebení a jeho následek rázy ve vazbách, dodatečné vymezení vůlí, kontaktní únava.

Stereostatická neurčitost a účinek nerovnoměrného rozložení sil, příklad – brzdy automobilu, záběr ozub. kol, vyrovnávání účinků – např. tlakotěsné víko, diferenciál.

## Degradace styků součástí s vzájemným pohybem

- křehký lom při cyklickém namáhání
- únava povrchů a vydrolování
- gradující otěr po odebrání tvrzené vrstvy
- zadírání

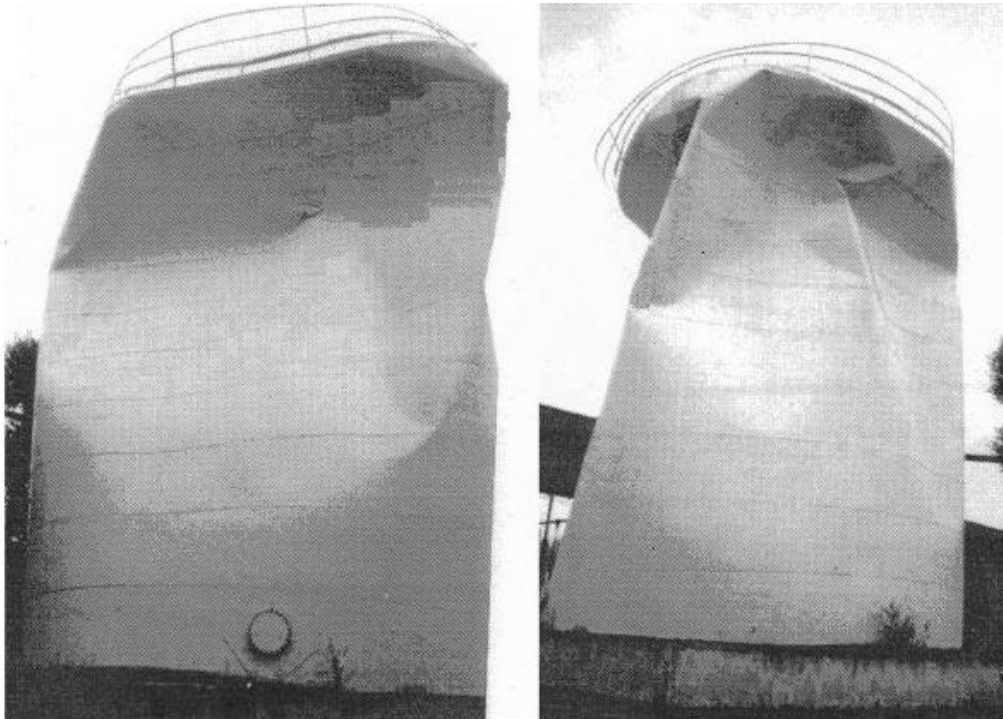
## Ztráta stability součástí (tvarové zhroucení)

Ikdyž nebylo překročeno mezní namáhání tah – tlak, krut, součást výrazně mění tvar a tvarově změněná součást je v důsledku změny tvaru namáhána podstatně více (platí princip minima deformační práce).

### Typy ztráty stability:

- vzpěr přímých tyčí (vybočení při namáhání v tlaku)
- zhroucení ohýbaného prutu (vybočení z roviny ohybu)
- zhroucení kroucené tyče (osa přestává být přímočará)
- zvlnění rovinného panelu smykovým namáháním
- boulení zakřivených panelů

Tenkostěnné konstrukce (plech, nosníky, tyče, stojiny, skořepiny, panely)



# ZÁKLADY TRIBOLOGIE

Tribologie – nauka o tření a opotřebení – obvykle opotřebení vede k nutnosti výměny dílu.

Pasivní odpory – smyk, valení, čepové a vrtné tření, mezivrstvy při tření, kapalně tření (tečné napětí na povrchu), projevy tření (odpor, opotřebení, vznik tepla).

Povrch třecí dvojice mikro a makro geometrie, princip adheze a abraze, souč. tření, velikost odporu, ztráty, tepelná bilance.

Opotřebení – druhy, časový průběh, kvantitativní řešení, hlavní činitelé – dráha, měrný (kontaktní) tlak, další činitelé – materiál, vlastnosti povrchu aj.

Opatření pro snížení tření – mazání, vlastnosti povrchů, materiál, úpravy tvaru.

Zvýšení tření cílem – drážkové tření, pneumatiky, brzdy, třecí spojky.

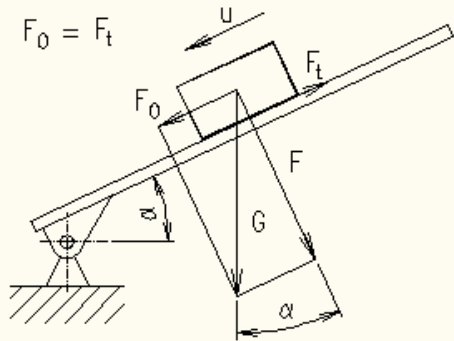
Kvantifikace opotřebení – tloušťka odebrané vrstvy materiálu  $h = \int I_h \cdot ds$  .

Intenzita opotřebení  $I_h$  je funkcí tlaku a vlastností materiálů a povrchů (včetně mezivrstvy).

Pokud dráha tření  $s$  narůstá konstantní rychlostí a podmínky se nemění  $h = I_h \cdot s$  a  $I_h = C \cdot p^m$  .

Opotřebení  $h$  je úměrné  $m$ -mocnině tlaku  $p$ , exponent lze  $m \approx 1$  .

# Stanovení součinitele tření



$u = \text{konst.}$

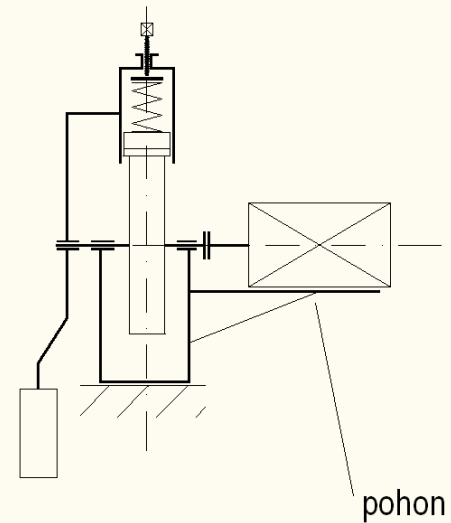
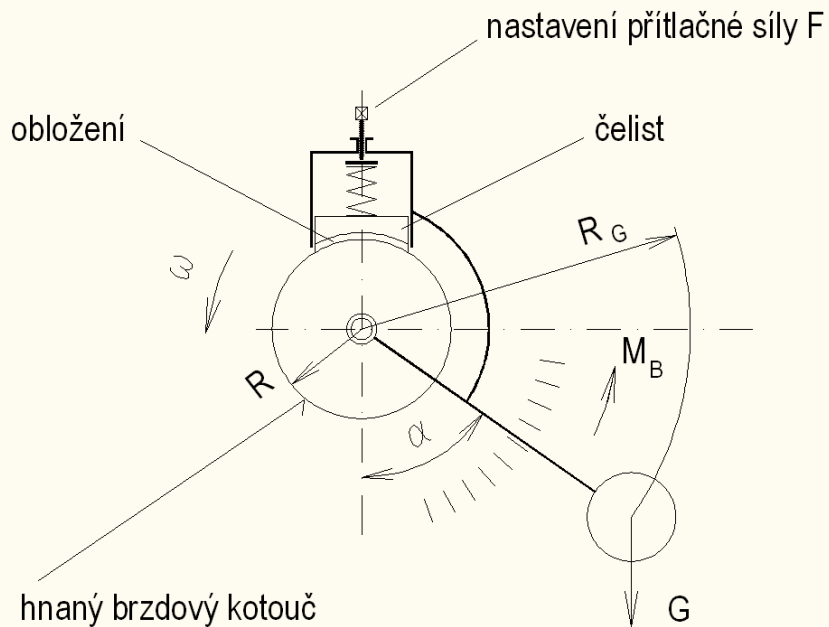
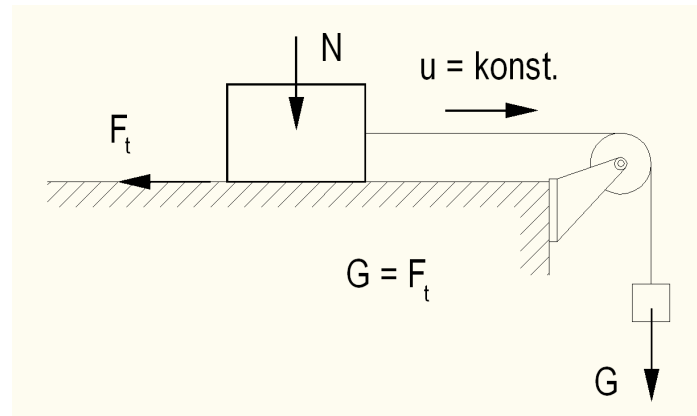
$F_0 = F_t$

$F_t = G \cdot \sin \alpha = F \cdot \text{tg } \varphi$

$F = G \cdot \cos \alpha$

$\text{tg } \alpha = \text{tg } \varphi = \mu$

$\alpha = \varphi$

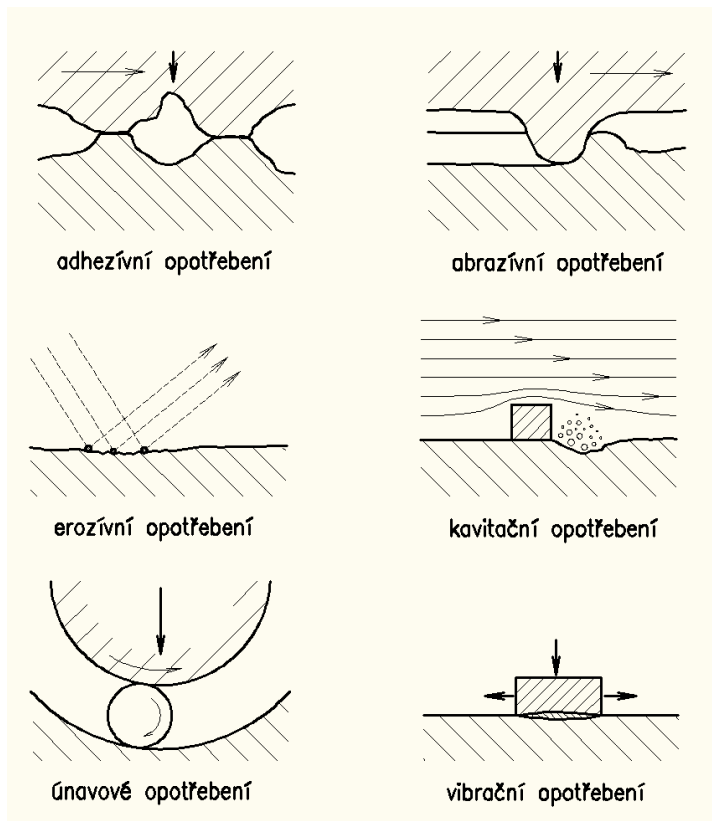


$G \cdot R_G \cdot \sin \alpha = F \cdot R \cdot \mu$

## Součinitelé tření pro různé kombinace povrchů

Materiály stykových ploch	za klidu	za pohybu
	$\mu_0$	$\mu$
ocel / ocel - suché	0,15	0,1
ocel / bronz - suché	0,18	0,16
ocel / bronz - dobře mazáno	0,1	0,01
ocel / led	0,027	0,014
guma / asfalt - sucho	0,85	0,3
guma / asfalt - mokro	0,2 - 0,5	0,15
guma / dlažba (malé kostky, sucho)	0,7	
guma / dlažba (velké kostky, sucho)	0,6	
guma / beton - suché	0,7 - 0,8	
guma / náledí	0,1 - 0,2	
brzd. buben (litina) / oblož. ferodo		0,25 - 0,35
remenice (ocel) / remen (kůže, pryž)		0,2 - 0,9
spojka lamela / oblož. textol. / olej		0,1

# OPOTŘEBENÍ



## Typy opotřebení

- adhezivní
- abrazivní
- erozivní
- kavitační
- únavové
- vibrační

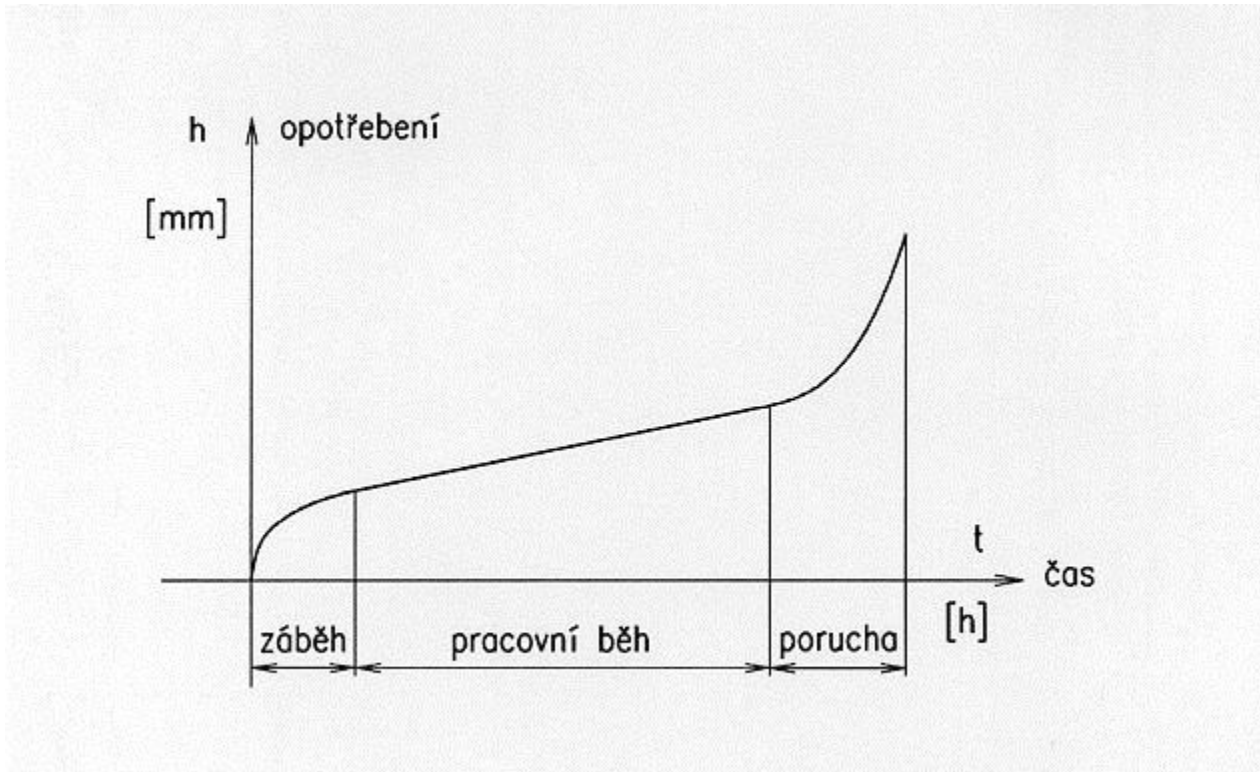
vliv tvrdosti

Tvrdot HV podle Vickerse (diamantový jehlan)



## Časový nárůst opotřebení v průběhu životnosti součásti

Opotřebení jako tloušťka odebrané vrstvy  $h$  nebo hmotnost (objem) odebraného materiálu  $m$ ,  $V$ .



Lineární průběh v době po záběhu  $h = l_h \cdot v \cdot t$  (konst. rychlost v nárůstu dráhy tření  $s$ )

## Tvrlosti některých vybraných materiálů

Minerál	Tvrdot HV	Materiál, fáze	Tvrdot HV
Sádra	36	Ferit	70-200
Vápenec	140	Perlit	250-330
Apatit	540	Legovaný perlit	300-460
Sklo	500	Austenit, 12 % Mn	170-230
Živec	600-750	Martenzit	500-1010
Pazourek	950	Cementit Fe <sub>3</sub> C	840-1100
Křemen	900-1280	Karbid Cr (Cr <sub>7</sub> C <sub>3</sub> )	1200-1600
Topas	1430	Karbid W (WC)	2400
Korund	1800	Karbid V (VC)	2800
Karbid křemíku	2600	Karbid Ti (TiC)	3200
Diamant	10 000	Karbid B (B <sub>4</sub> C)	3700

Stupnice tvrdosti nerostů: Mastek Mg<sub>3</sub>Si<sub>4</sub>O<sub>10</sub>(OH)<sub>2</sub>, sůl kamenná NaCl, vápenec CaCO<sub>3</sub>, kazivec (fluorit CaF<sub>2</sub>), apatit Ca<sub>5</sub>(PO<sub>4</sub>)<sub>3</sub>F, živec (orthoklas KAlSi<sub>3</sub>O<sub>8</sub>), křemen SiO<sub>2</sub>, topas Al<sub>2</sub>{SiO<sub>4</sub>(F, OH)<sub>2</sub>}, korund Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, diamant C.

## Intenzita opotřebení povrchu některých součástí (zatěžováno běžným tlakem p)

**Tabulka 3.3** Intenzita opotřebení některých strojních součástí

Součást uzlu stroje, materiál	$10^{12} \cdot I_h$
Bok zubu řetězovky rázově zatíženého převodu bagru, ocel	7,3
Vložka válce spalovacího motoru, litina - Al slitina	11 - 56
Pístní kroužky spalovacího motoru, litina - litina	6 - 12
Ojniční ložisko klikového hřídele, ložiskový kov - ocel	5 - 40
Klikové ložisko spalovacího motoru, ložiskový kov - ocel	2 - 16
Přímočaré vedení obráběcího stroje, litina - litina	400 - 2500
Brzda, obložení z třecího materiálu - litina	$(2 - 80) \cdot 10^6$
Pryžové těsnění hřídele, pryž - ocel	$(5 - 50) \cdot 10^5$
Pneumatika automobilu, pryž - asfalt	$(2 - 200) \cdot 100$

Např. kolo automobilu s obvodem 2 m (smyk v důsledku pružnosti asi 2 % obvodu),  
ujeto 20000 km, intenzita  $I_h = 10^{-8} \text{ m}^{-1}$ , počet otočení kola  $10^7$ , dráha tření  $s = 4 \cdot 10^5 \text{ m}$ ,  
odebraná vrstva  $h = I_h \cdot s = 4 \cdot 10^{-3} \text{ m}$

# Jak snížit tření ?

Ložiska, klouby, vedení, závěsy, vazby členů v mechanismech, ozubené převody, vačky aj.

## Mazání (mezivrstvy)

použití maziv – kapalná maziva (minerální oleje)  
plastická maziva (mazací tuky)  
tuhá maziva (grafit, sirník molybdenu aj.)  
výjimečně také plyn, magnetické zavěšení

## Úpravy povrchů

malá drsnost  
materiál pro ložisko – povrchové vrstvy na čepu a páni (bronz, kompozice)  
další kluzné vrstvy na povrchu (nástřiky, galvanicky, teflon, keramika aj.)  
úpravy tvaru, využití vlastností maziva (přilnavost, průtok, viskozita a teplota)

# Jak zvýšit tření ?

Brzdná a spojková obložení, pneumatiky, řemenové převody

## Vlastnosti povrchů

použití materiálů s vysokým součinitelem tření (ve styku s ocelí - směsí)  
obložení musí snášet vysoké teploty beze změny součinitele tření

## Úpravy povrchů

využití tvaru zvětšujícího přitlačnou sílu, např. využití drážkového tření  
opatření pro zlepšení chlazení povrchů

# Posouzení stavu degradace součásti

**Defektoskopie – destruktivní** (rozřezání součástí, zkoušení vzorků materiálu, výbrusy, odhalení trhlin)  
**nedestruktivní** (ultrazvuk, rentgen, magnetické silokřivky, defektoskopie povrchu)

Defektoskopie odhaluje závady na částech konstrukcí (nejčastěji materiálové vady, např. odlitků, svarů, výkovků). Defektoskopie je doplňována mechanickými zkouškami vzorků materiálu (pevnost, tvrdost atd.).

## Technická diagnostika

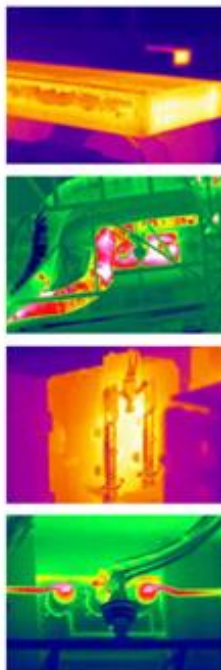
Technická diagnostika posuzuje stav strojního zařízení v průběhu jeho provozování nebo po havárii apod. Používá pro tyto cíle některá dále uvedené metody (především nedestruktivní v průběhu života zařízení):

- sledování vlastností zařízení (přesnost obráb. stroje, charakteristiky motorů, výkon, spotřeba apod.),
- **vibrační** diagnostika (snímání vychylek, rychlostí a zrychlení, analýza signálů),
- infradiagnostické metody (bezdotykové měření teploty povrchu objektů a vyhodnocování části elektromagnetického vlnění - tepelného záření, které diagnostikovaný objekt vyzařuje),
- defektoskopické metody (povrchu – kapilární, magnetické, termobarvy, vnitřní – roentgen, ultrazvuk aj.),
- akustická diagnostika (analýza akustických emisí, hluku, frekvencí aj.),
- analýza záznamů provozních parametrů (příkon, zatěžování, teploty důležitých míst aj.),
- **tribotechnická** diagnostika (stav náplní maziv, jejich analýza, obsah částic opotřebením aj.).

Technická diagnostika umožňuje předvídat další život součástí (nebo zařízení), tj. možnou dosažitelnou životnost, změny vlastností v průběhu dalšího využívání, ale i plánování spotřeby náhradních dílů, plánování servisních prohlídek, oprav apod.



termovize



kapilární kontrola svaru

snímače vibrací



hlukoměr



Laboratorní ferrograf SPECTRO T2 FM Q 500

