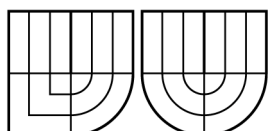


VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ
Ústav automobilního a dopravního inženýrství



FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING
Institute of automotive engineering

DIAGNOSTIKA MOTOROVÝCH VOZIDEL

STUDIJNÍ OPORA

Zpracoval: Prof. Ing. Jiří Stodola, DrSc.

Brno, 2011

Recenzenti:

Prof. Ing. Jiří BARTOŠ, DrSc., Brno (+ 2009)

Prof. Ing. Milan Lánský, DrSc., Univerzita Pardubice

Prof. Ing. Alexej Chovanec, PhD., Trenčínská univerzita A. Dubčeka

Studijní opora neprošla jazykovou úpravou.

Druhé, upravené vydání.

© Jiří Stodola, Brno 2011

PŘEDMLUVA	5
1. ZÁKLADY TECHNICKÉ DIAGNOSTIKY	1
1. 1 Základní pojmy	1
1. 2 Principy technické diagnostiky	5
2. DIAGNOSTICKÝ SYSTÉM	7
2. 1 Systémy testové diagnostiky, tzv. OFF-LINE;	8
2. 2 Systémy funkční (provozní) diagnostiky, tzv. ON-LINE;	8
3. EXPERTNÍ DIAGNOSTICKÝ SYSTÉM	11
3. 1 Expertní systém	11
3. 2 Fuzzy množiny a fuzzy expertní systém	14
3. 2 Fuzzy expertní systém	15
3. 3 Neuronové sítě	19
4. DIAGNOSTICKÝ MODEL, ROZPOZNÁVÁNÍ V DIAGNOSTICE	26
4. 1 Diagnostický model	26
4. 2 Rozpoznávání v diagnostice	32
5. ROZDĚLENÍ, ŘEŠENÍ A VYUŽITÍ TECHNICKÉ DIAGNOSTIKY	34
5. 1 Zásadní a náhradní řešení technické diagnostiky	36
5. 2 Využití TD při praktické diagnostice vozidel	37
5. 3 Metody a prostředky technické diagnostiky	40
6. VYBRANÉ FYZIKÁLNÍ METODY TECHNICKÉ DIAGNOSTIKY	43
6. 1 Akustické metody diagnostiky	43
6. 2 Vibrační metody diagnostiky	48
6. 2. 1 Úvod	48
6. 2. 2 Periodické harmonické vlastní (volné) netlumené kmity	50
6. 2. 3 Periodické harmonické vlastní tlumené kmity	58
6. 2. 4 Úvod do vibrodiagnostiky strojů	60
6. 2. 5 Provozní vibrodiagnostika strojů	68
6. 2. 6 Příklady spekter typických poruch	77
6. 2. 7 Měření vibrací	83
6. 3 Ultrazvukové metody diagnostiky	85
6. 4 Tepelné metody diagnostiky	87
7. DEFEKTOSKOPICKÉ METODY DIAGNOSTIKY	95
7. 1 Kapilární metody	95
7. 2 Odporové metody	96
7. 3 Elektromagnetické metody	96
7. 4 Magnetické metody	97
7. 5 Tepelné (IČ) metody	98
7. 6 Optické metody	98
7. 7 Ultrazvukové metody	99
7. 8 Metody prozařovací	101
8. TRIBOTECHNICKÁ DIAGNOSTIKA	103
8. 1 Úvod do tribodiagnostiky	103
8. 2 Jednoduché provozní metody (rychlometody) - souprava TRIBO - I	104
8. 3 Základní analytické metody	108
8. 4 Speciální tribodiagnostické metody	110
8. 4 Proces opotřebení vozidlového spalovacího motoru	125
9. APLIKACE DIAGNOSTIKY V PROVOZU A ÚDRŽBĚ VOZIDLOVÝCH SPALOVACÍCH MOTORŮ	132

9. 1 Výkon motoru	132
9. 2 Těsnost spalovacího prostoru.....	142
9. 3 Spotřeba paliva a oleje	147
9. 4 Kouřivost motoru a analýza výfukových plynů.....	154
9. 5. Teplota výfukových plynů	164
9. 6 Vibrace a hluk	165
9. 7 Koncentrace produktů opotřebení v motorovém oleji	172
9. 8 Diagnostika soustav spalovacích motorů.....	180
10. APLIKACE METOD TECHNICKÉ DIAGNOSTIKY V PROVOZU A ÚDRŽBĚ PŘEVODNÝCH ÚSTROJÍ VOZIDEL	190
10. 1 Požadavky na převodová ústrojí vozidel	190
10. 2 Diagnostika převodových ústrojí	197
11. APLIKACE METOD TECHNICKÉ DIAGNOSTIKY V PROVOZU A ÚDRŽBĚ PODVOZKŮ VOZIDEL.....	203
11. 1 Požadavky na technický stav vybraných částí podvozku	203
11. 2 Diagnostika brzdových soustav	207
11. 3 Diagnostika řízení	220
11. 4 Vyvažování kol s pneumatikou.....	230
11. 5 Diagnostika tlumičů pérování	235
12. DIAGNOSTIKA (OBD) ELEKTRONICKÝCH SYSTÉMŮ VOZIDEL.....	242
KONTROLNÍ OTÁZKY	261
POKYNY K ZPRACOVÁNÍ SAMOSTATNÉ PRÁCE Z PŘEDMĚTU DIAGNOSTIKA MOTOROVÝCH VOZIDEL.....	263
SEZNAM POUŽITÉ A DOPORUČENÉ LITERATURY	265

Motto: „Všechny věty, které vyslovím, považujte za otázky a nikoli za tvrzení“

PŘEDMLUVA

Studijní opory k přednáškám jsou základní studijní literaturou k přednáškám pro studenty studijního oboru "Dopravní a manipulační technika" v předmětu Diagnostika motorových vozidel. Jsou vytvořeny na základě zkušeností z učebnice „Spolehlivost a diagnostika“ z roku 2005 a dále poznatků z přednášek problematiky technické diagnostiky a jejich aplikací v oblasti vozidel a zejména na základě potřeb, které jsou kladeny na inženýry, specialisty v oboru motorových vozidel.

Cílem je umožnit provozovatelům motorových vozidel, pracovníkům v projekci, konstrukci, výrobě, opravárenství, pracovníkům dopravních podniků, logistiky a dalším zájemcům orientovat se v problematice metod bezdemontážního hodnocení technického stavu motorových vozidel a získat základní teoretické znalosti a dílčí praktické zkušenosti v oblasti promyšleného zavádění diagnostických systémů a systémů údržby vozidel podle jejich skutečného technického stavu.

Omezený rozsah předmětu a jeho celkové pojetí však umožňují pouze úvod do relativně složité problematiky technické diagnostiky, nenajdeme zde vyčerpávající odpovědi na všechny problémy a otázky, které jsou spojeny se sledováním, hodnocením a ovlivňováním provozní spolehlivosti vozidel, s navrhováním a realizací diagnostických a údržbových systémů vozidel. Proto k hlubšímu studiu problematiky autor doporučuje vybranou specializovanou literaturu, která je uvedena na konci studijních opor.

Autor, kromě výše uvedeného vidí i hlubší smysl výuky předmětu "Diagnostika motorových vozidel" a tohoto stejnojmenného materiálu pro strojního inženýra, profesionála specializovaného v oblasti motorových vozidel. Nejde pouze o to znát a ovlivňovat spolehlivost, diagnostiku a údržbu. Dnešní moderní svět, společnost a civilizace je charakterizována růstem výkonnosti techniky, její koncentrací, elektronizací a informatizací. Násilí a protivenství v různých částech světa, nasycenost průmyslových aglomerací technikou, průmyslové havárie, ekologické katastrofy, dopravní nehody - to je každodenní skutečnost. Uvedená fakta vedou k nedůvěře a často i k averzi k technice. Přitom řešením

není zavržení dopravní techniky, jaderné energetiky, potlačení chemického průmyslu aj. - protože nepřítel není v samotné technice, ale v nerovnoměrném vývoji společnosti, v neřešení globálních světových problémů, v lidech, kteří rozdmýchávají násilí, ale také navrhuji a provozují techniku, včetně motorových vozidel, tradičním způsobem. Autor si netroufá odstranit násilí v lidech a společnosti, ale chce přispět k nalezení lidského rozměru veškeré technické činnosti směrem k humanitě a demokracii, což zákonitě, mimo jiné, musí vést i k určitým změnám ve výchově strojních inženýrů

Jedná se zejména o změnu postoje ke spolehlivosti, diagnostice, údržbě a bezpečnosti techniky. Tyto problémy nejsou okrajovou záležitostí a ukazuje se, že je zcela nezbytně nutné naučit techniky a inženýry systematicky odhalovat možnosti poruch a chránit zařízení před subjektivními lidskými chybami od konstrukce, přes výrobu, údržbu až po provoz a skladování, resp. až k ekologickému vyřazování z použití. Dalším aspektem je ochrana lidí před potenciálně škodlivými vlivy techniky, protože je jisté, že ekologické kvality jsou vyjádřením lidské úrovně a etických kvalit tvůrčího pracovníka. Jsou způsobem, jak inženýr dává průchod své lidské morálce v navrhovaném technickém řešení. Na žádoucí úrovni se s těmito problémy dokážou vyrovnat jen ti tvůrčí pracovníci, kteří nevidí jen úzce technickou stránku věci, ale svým vzděláním a rozhledem jsou schopni posoudit a svou vůlí prosadit řešení šetrné i k okolí.

Autor se domnívá, že Vysoké učení technické v Brně nesmí ve svých absolventech pěstovat jen utilitární technokratický základ, ale i humanismus, kulturnost, svobodomyšlnost a další pozitivní charakterové rysy, jakož i vnitřní potřebu neustálého sebevzdělávání a kultivace vlastní osoby.

Autor děkuje recenzentům za cenné připomínky a rovněž děkuje za připomínky z řad studentů, které by mohly pomoci zkvalitnit tento materiál při novelizaci.

Autor si přeje, aby se studenti neklaněli tomu, co již bylo dokázáno, ale aby o tom pochybovali.



Brno, říjen 2011

1. ZÁKLADY TECHNICKÉ DIAGNOSTIKY

1. 1 Základní pojmy

Technická diagnostika je v širším slova smyslu nauka, která zkoumá stavy technických zařízení, metody a prostředky určování těchto stavů a principy konstrukce diagnostických zařízení. Technickou diagnostikou rozumíme diagnostiku bezdemontážní a nedestruktivní. Slovo diagnostika, resp. diagnóza je odvozeno z řeckého „dia–gnosis“, což v řečtině znamená „skrze poznání“. Technická diagnostika se zabývá zjišťováním technického stavu objektů, které musí vyhovovat dvěma základním podmínkám:

- musí se nacházet alespoň ve dvou různých, navzájem se vylučujících stavech, (např. provozuschopný stav a alespoň jeden poruchový stav),
- musí mít rozpoznatelnou funkční strukturu, rozčlenitelnou na prvky, z nichž každý je charakterizován také alespoň dvěma technickými stavy.

Při zkoumání technického stavu diagnostikovaného objektu mohou nastat tři základní typy úloh:

1. K prvnímu typu úloh patří zjišťování současného technického stavu objektu diagnostiky (OD) v reálném čase, zahrnující:
 - Detekci poruchy (identifikaci poruchy objektu)
 - Lokalizaci poruchy (určení místa poruchy v objektu)
2. K druhému typu úloh počítáme problémy předvídání technického stavu OD, a to na základě stavu přítomného. To jsou úkoly prognostické (z řeckého „pro–gnosis“ – předvídání, předpovídání).
3. K třetímu typu úloh budeme počítat problémy určení technického stavu, ve kterém se nacházel OD v určitém čase v minulosti. Analogicky zde budeme hovořit o úlohách genetických (z řeckého "genesis" – původ, vznik).

Základem je však vždy určení okamžitého současného technického stavu zařízení, charakterizovaného určitou diagnostickou veličinou. S diagnózou úzce souvisí diagnostické pokrytí (hloubka detekce) a diagnostické rozlišení (hloubka lokalizace), které udávají počet detekovaných, popř. lokalizovaných poruch při realizaci daného diagnostického algoritmu. Za základní úkoly technické diagnostiky vozidel, strojů a zařízení považujeme:

- a) Testování, zda je zařízení provozuschopné, nebo má-li poruchu – detekce poruch.
- b) Zjišťování místa výskytu poruchy – v případě, že stroj byl hodnocen jako neprovozuschopný – lokalizace poruchy.

c) Zjištění příčiny poruchy, aby byla nejen odstraněna porucha a její následky, ale zamezeno i jejímu opakování.

d) Předpověď (prognóza) provozuschopnosti zařízení. Princip této předpovědi tkví v pravidelných inspekcích a měření, resp. kontinuálním monitorování určitých vybraných diagnostických veličin, z dosavadního vývoje odhadu trendu do budoucna, stanovení pravděpodobné doby vzniku poruchy a potřebné lhůty preventivního údržbového zásahu. Přitom je třeba:

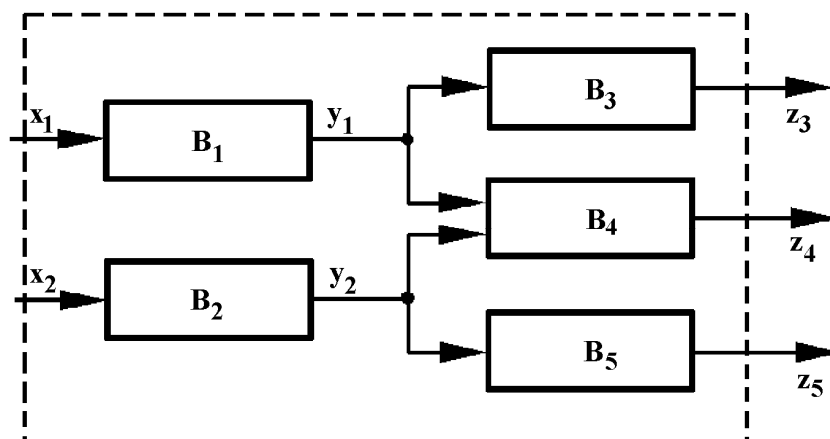
- znát správnou mezní velikost diagnostických veličin, tvořících předěl mezi provozuschopným a poruchovým stavem,
- znát zákonitosti rozvoje poruchy (správnost extrapolace),
- konat přiměřeně často diagnostická měření – inspekce (získat dostatek empirických dat), popř. trvale monitorovat vybrané veličiny aj.

Diagnostickou veličinou bývá nejčastěji jednoduchá, měřitelná fyzikální aj. veličina, charakterizující stav objektu diagnostiky (např. tlak, teplota, hluk, vibrace, spaliny, akustická emise, výchylka, rychlost, zrychlení, elektrické veličiny, síla aj.).

Pro účely technické diagnostiky rozčleníme objekt diagnostiky (OD), např. vozidlo, na dílčí části, konající určitou funkci. Ve schématu vozidla tyto části znázorníme samostatnými bloky. Podrobnější nebo méně podrobné rozčlenění OD závisí především na požadované přesnosti diagnózy, tzv. rozlišovací schopnosti diagnostického testu. Představme si nyní, že jsme OD (vozidlo) rozčlenili na funkční bloky tj. hlavní skupiny (motor, převodové ústrojí, podvozek, příslušenství), skupiny (převodovka, startér, aj.), podskupiny (palivová soustava, ústrojí čištění vzduchu, aj.), součástky (ložiska, ozubená kola, hřídele aj.), jejichž vzájemné vazby jsou zjednodušeně ukázány na obr. 1. 1.

Každý blok může mít podle funkce jeden nebo více vstupů a jeden nebo několik výstupů. Některé vstupy jsou z hlediska celého zařízení vnějšími vstupy (x_1, x_2). Výstupy z některých bloků jsou zároveň vstupy jiných bloků (y_1, y_2), jsou to vnitřní vstupy a výstupy. Výstupy z některých bloků jsou výstupy celého OD, tzv. vnější výstupy (z_1, z_2, z_3).

Všechny tyto vstupy a výstupy charakterizujeme v technické diagnostice určitou velikostí příslušných parametrů. Vnější vstupy jsou charakterizovány velikostí vstupních veličin, vstupních parametrů zařízení. Vztahy mezi jednotlivými částmi zařízení, znázorněnými na schématu bloky, jsou dány vnitřními (strukturními) parametry, vyjadřujícími vzájemné působení ve formě sil, tolerancí, rozměrů, velikosti elektrického proudu apod. Vnější výstupy diagnostického zařízení poskytují výstupní parametry.



Obr. 1. 1 Možné členění OD pro potřeby TD

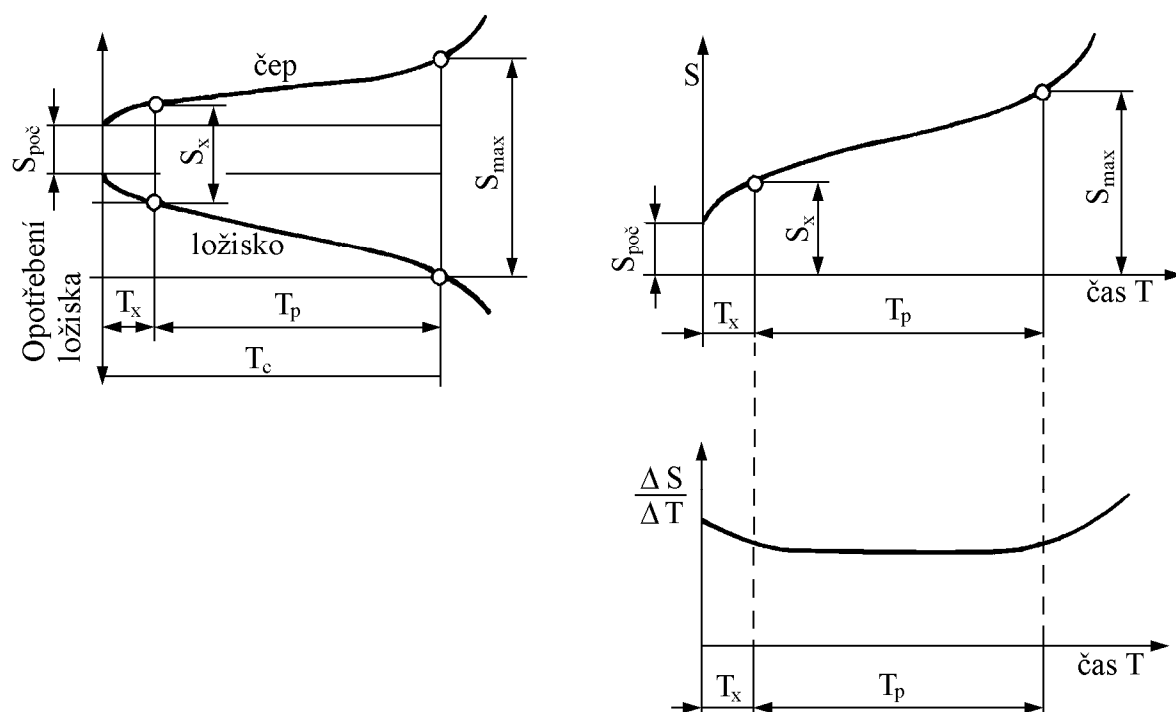
Při diagnostice předpokládáme, že vstupní parametry zařízení jsou vždy v toleranci. Příklady charakteristických parametrů, používaných v technické diagnostice výrobních zařízení ukazuje tab. 1.1.

Tab. 1. 1 Vybrané parametry využívané v diagnostice

Parametr	Podrobnější určení
Tuhost	statická, dynamická
Vůle	funkční, opotřebení
Výkon	v různých pracovních režimech
Moment	v různých pracovních režimech
Dynamika pohybu	rychlost, zrychlení,
Hlučnost	střední akustický výkon, hladina akustického tlaku
Vibrace	výchylka, rychlost, zrychlení, amplitudová a fázová spektrální charakteristika
Funkce mechanických uzlů	sled a průběh činností, časové konstanty
Funkce řídicího systému	v různých režimech práce
Stav elektrických obvodů	napětí, proudy, odpory

Technická diagnostika se při zkoumání technického stavu zařízení opírá o bezdemonážní, nedestruktivní metody. Zjišťování hodnot strukturních parametrů, jejichž změna bezprostředně signalizuje změnu technického stavu některé části diagnostikovaného zařízení, je obvykle dost obtížné. Proto technická diagnostika využívá především tzv. příznaků poruch, tj. změny snadno zjistitelných výstupních parametrů diagnostikovaného

objektu, nebo v některých případech změnu průvodních veličin (vibrací, hluku, teplot apod.). Průvodní veličiny charakterizují jevy, které doprovázejí činnost zařízení, ale nepodmiňují jeho správnou činnost a nejsou pro ni podstatné. Kombinace hodnot výstupních, resp. průvodních veličin, tvořící příznak poruchy, vede ke zjištění poruchy a nalezení jejího zdroje. Pro potřeby technické diagnostiky rozdělujeme parametry technického zařízení na hlavní, jejichž velikost rozhodujícím způsobem ovlivňuje stav zařízení, a na parametry druhořadé. Každý z těchto parametrů má v technických podmínkách zařízení vymezenou určitou správnou velikost, stanovenou tolerancemi. Příklad časového průběhu změn diagnostického parametru (opotřebení párové součásti) je na obr. 1. 2. Technický stav zařízení závisí na tom, nakolik velikost zmíněných parametrů splňuje dané podmínky.



Obr. 1. 2 Časový průběh změny opotřebení párové součásti (ložisko-hřídel)

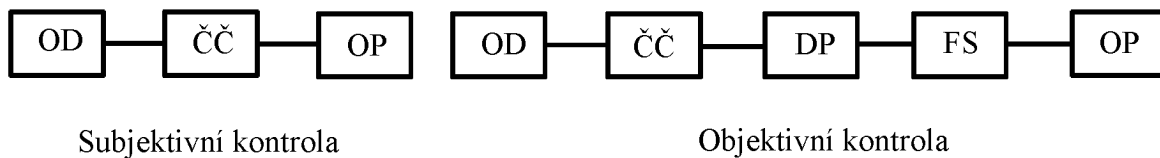
Technická diagnostika rozlišuje bezvadný stav, provozuschopný stav a poruchový stav (poruchu). Bezvadný stav je takový stav zařízení, kdy všechny parametry splňují předem dané podmínky (tolerance) a diagnostikované zařízení plní zadané funkce. Jestliže jsou v tolerancích pouze hlavní parametry zařízení, hodnotíme je jako provozuschopné. Pokud ani všechny hlavní parametry nemají předepsanou velikost, hodnotíme stav jako poruchu zařízení.

1. 2 Principy technické diagnostiky

Technická diagnostika se vyznačuje dvěma hlavními principy, jsou to:

1. OBJEKTIVNOST

Tento princip úzce souvisí s požadavky na jednoznačnost a opakovatelnost jejích výsledků. Znamená, že opakované diagnostické kontroly objektů, nacházejících se v jednom a tomtéž technickém stavu, musí vést ke stejným výsledkům. Diagnóza musí být určena pouze na základě stavu objektu a nesmí záviset na subjektivních vlivech člověka. Objektivností diagnostiky se tedy rozumí to, že je při ní vyloučen subjektivní vliv lidského činitele. Schéma postupu odhalení poruchy při subjektivní a objektivní diagnostické kontrole je uvedeno na obr. 1. 3.



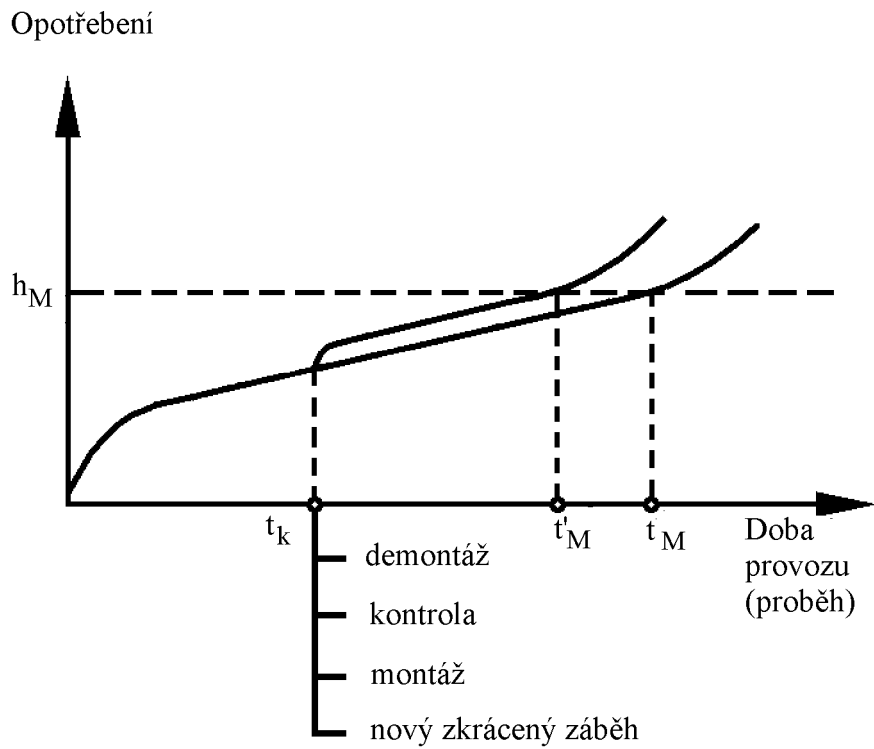
Obr. 1. 3 Schéma postupu odhalení poruchy při subjektivní a objektivní diagnostické kontrole

Legenda: *OD - objekt diagnostiky, ČČ - činnost člověka, OP - odhalení poruchy, DP - diagnostický prostředek, FS - funkce diagnostického systému;*

2. RACIONÁLNOST

Spočívá v tom, že měření se konají bez demontáže vozidla a nebo jeho skupin. Demontáž a opětná montáž jsou totiž nákladné, časově náročné a často velmi pracné. Jak je zřejmé z obr. 1. 4 u funkčně spojených součástí se v případě jejich demontáže v rámci kontroly projevuje nepříznivý vliv nutnosti opětného záběhu součástí a tím zhoršení parametrů jejich životnosti (zkrácení technického života). Ani nejpečlivější montáží nelze totiž zabránit novému vzájemnému přizpůsobování a zabíhání součástí, provázenému intenzivnějším opotřebením.

V současné době stávající diagnostické metody a prostředky, využívané v technické diagnostice vozidel, jen zřídka beze zbytku splňují požadavky bezdemontážní kontroly a určité demontáže při diagnostických kontrolách jsou obvykle nutné.



Obr. 1. 4 Vliv demontáže funkčních součástí na průběh jejich opotřebení

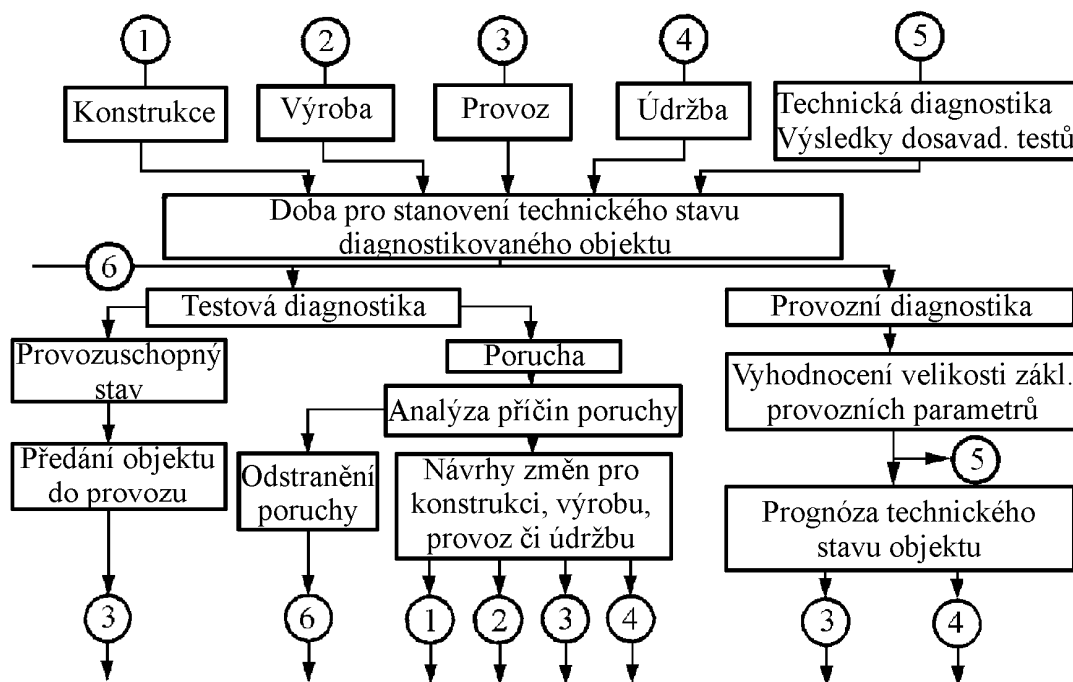
Legenda:

- t_k - proběh vozidla, při kterém se provádí kontrola technického stavu,
- t_M - proběh do mezního opotřebení, není-li prováděna kontrola spojená s demontáží,
- t'_M - proběh do mezního opotřebení, je-li prováděna kontrola spojená s demontáží,
- h_M - hodnota mezního opotřebení.

2. DIAGNOSTICKÝ SYSTÉM

Pojem "diagnostický systém" je v technické diagnostice velmi frekventovaný a je chápán různým způsobem, buď jako systém diagnostických prostředků, nebo jako systém diagnostických činností. Nejčastěji chápeme diagnostický systém jako organizovaný soubor tvořený objektem diagnostiky, diagnostickými prostředky, jejich obsluhou a souborem pracovních postupů (diagnostických algoritmů). Je určen k realizaci diagnostického procesu, tj. k objektivnímu zjišťování technického stavu objektů diagnostiky pomocí zvolených diagnostických metod. V druhém pojetí se jedná o komplex všech základních diagnostických činností od rozboru funkce OD, jeho struktury, parametrů, poruch, přes tvorbu diagnostického modelu, sestavení diagnostického testu až k volbě prostředků, jimiž budeme diagnostiku realizovat.

Možné obecné schéma diagnostického systému je uvedeno na obr. 2. 1.



Obr. 2. 1 Obecné schéma diagnostického systému

V diagnostice rozlišujeme dva základní druhy diagnostických systémů:

1. Systémy testové diagnostiky.
2. Systémy funkční (provozní) diagnostiky.

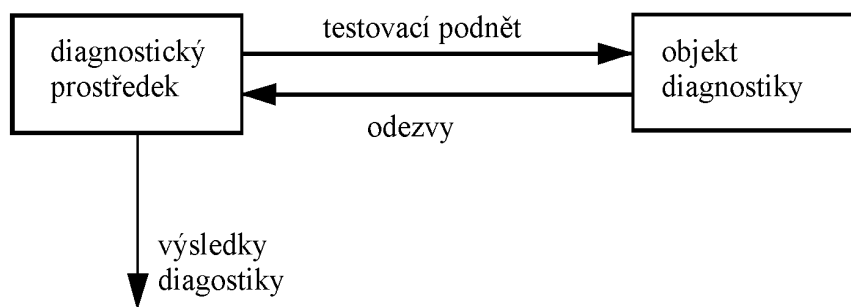
Podle charakteru výsledků můžeme rozlišit diagnostické systémy deterministické a diagnostické systémy pravděpodobnostní.

Deterministické systémy pracují s pevně stanoveným diagnostickým modelem a rozpoznávání je určeno jednoznačným vztahem "PŘÍČINA → NÁSLEDEK".

Pravděpodobnostní systémy pracují i s nejasnými, neurčitými daty a také výsledky mají neurčitý pravděpodobnostní charakter. Většina testových a funkčních systémů patří k deterministickým systémům.

2. 1 Systémy testové diagnostiky, tzv. OFF-LINE;

Jejich zvláštností je to, že diagnostické prostředky působí na objekt prostřednictvím speciálních podnětů formou testu. Jsou v činnosti tehdy, když se objekt nevyužívá. Podněty na objekt přichází od diagnostického prostředku, proto každý další podnět diagnostického postupu může být určen v závislosti na odezvě objektu na předchozí podnět. Slouží obvykle



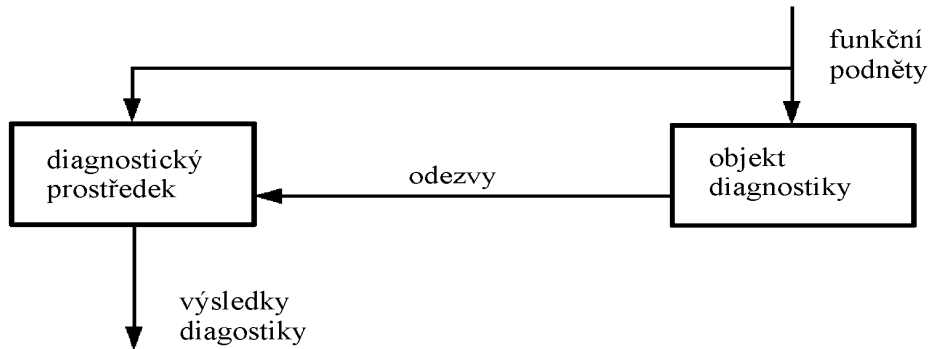
Obr. 2. 2 Schéma systému testové diagnostiky

ke kontrole správnosti a provozuschopnosti objektu, popř. k odhalování náhlých poruch. Blokové schéma systému testové diagnostiky je uvedeno na obr. 2. 2. Obvykle se dělí na nezávislé (kombinační), kdy sled jednotlivých testů nezávisí na výsledcích předchozích kroků testů a hodnocení technického stavu je podmíněno provedením všech testů a závislé (sekvenční), kdy algoritmus testu realizujeme v závislosti na výsledcích předchozích kroků, což je časově méně náročné.

2. 2 Systémy funkční (provozní) diagnostiky, tzv. ON-LINE;

Jsou v činnosti tehdy, když objekt je v normální činnosti, v některých případech i nepřetržitě, tzv. monitorování obsahující předhavarijní signalizaci. Jsou schopné nejen rozpoznat náhlé poruchy, ale také sledovat postupné zhoršování některých diagnostických veličin, obvykle souvisejících se stavem mechanických částí (opotřebením ložisek aj.).

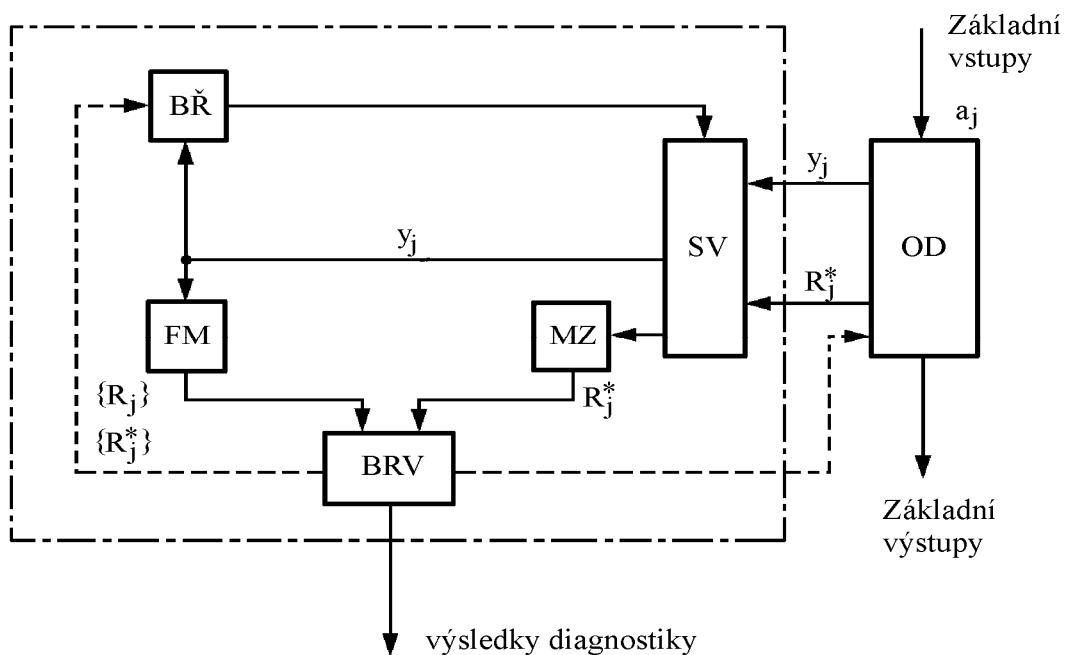
V technické diagnostice vozidel jsou systémy funkční diagnostiky široce využívány. Blokové schéma systému funkční diagnostiky je uvedeno na obr. 2. 3.



Obr. 2. 3 Schéma systému funkční diagnostiky

Funkce systému funkční diagnostiky

Na obr. 2. 4 je znázorněno funkční schéma systému funkční diagnostiky. Na základní vstupy do objektu diagnostiky vstupují pracovní podněty a_j (j označuje číslo elementární prověrky). Na objektu se snímají signály R_j^* odezev objektu na podněty a_j . V případě, že je nutné řízení fyzikálního modelu FM a bloku řízení BŘ v závislosti na režimu činnosti objektu, jsou snímány i signály řízení y_j . Blok řízení s pomocí signálů y_j , popř. signálů zpětné vazby od bloku rozpoznávání BRV uskutečňuje spojení kanálů v systému vazeb SV.



Obr. 2. 4 Funkční schéma systému funkční diagnostiky

Legenda: *BR* - blok řízení, *FM* - fyzikální model, *BRV* - blok rozpoznávání výsledků, *MZ* - měřící zařízení, *SV* - soustava vazeb, *DP* - diagnostické prostředky, *OD* - objekt diagnostiky (vozidlo);

Tato zpětná vazba se realizuje tehdy, když algoritmus diagnostiky představuje podmíněnou posloupnost elementárních kontrol (tj. následující elementární kontrola je závislá na výsledcích předchozí kontroly). Výsledky elementárních kontrol R_j^* postupují soustavou vazeb na měřící zařízení *MZ* a z něho na vstup bloku rozpoznávání. Tento blok porovnává skutečné výsledky elementárních kontrol R_j^* s možnými výsledky $\{R_j\}$, $\{R_j^i\}$, vydávanými fyzikálním modelem a po ukončení procesu určování vypracovává signál výsledků diagnostiky. Funkční schéma systému funkční (provozní) diagnostiky uvedené na obr. 2. 4 je abstraktní a ne vždy je snadné objevit jeho prvky ve skutečných diagnostických systémech, např. v technické diagnostice vozidel. Pro snadnější pochopení je v tab. 2. 1 uveden příklad aplikace obecných zásad systému funkční diagnostiky na měření kompresního tlaku vozidlového spalovacího motoru s pomocí kompresimetru s registračním záznamem.

Tab. 2. 1 Příklad aplikace zásad systému funkční diagnostiky

PRVEK DIAGNOSTICKÉHO SYSTÉMU	PRAKTICKÁ APLIKACE
Objekt diagnostiky (OD)	vznětový spalovací motor
Diagnostický prostředek (SV)	kompresimetr s registračním záznamem
Měřící zařízení (MZ)	tlakové potrubí od měřeného válce k tlakoměru kompresimetru
Blok rozpoznání výsledků (BRV)	je realizován obsluhou kompresimetru, porovnávající změřenou a předepsanou hodnotu kompresního tlaku
Fyzikální model objektu (FM)	může mít podobu grafického záznamu jmenovité hodnoty kompresního tlaku na registračním štítku kompresimetru
Blok řízení (BR)	v tomto případě je realizován člověkem - obsluhou kompresimetru
Pracovní podněty (a_j)	protáčení motoru elektrickým spouštěčem
Signály odezev objektu na pracovní podněty (R_j^*)	stlačování vzduchu ve válci motoru

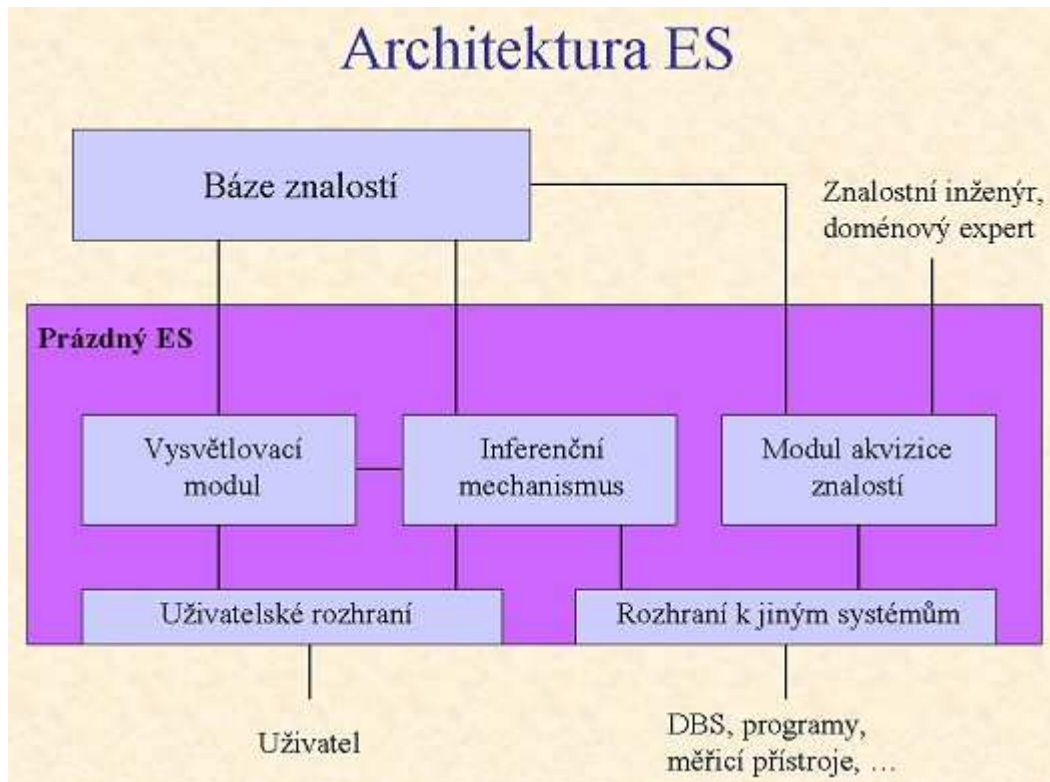
3. EXPERTNÍ DIAGNOSTICKÝ SYSTÉM

3. 1 Expertní systém

Rozpoznávání vzniku, druhu a místa poruchy, popř. ještě formulace doporučení pro údržbu, představuje u složitých objektů značně komplikovaný rozhodovací proces. V některých případech je situace složitější v tom, že poznatky odborníků o chování objektu mají jen z menší části charakter matematizované teorie, a z větší části charakter heuristik. Heuristiky představují zkušenosti, které nám obvykle v minulosti pomohly vyřešit problém. Nejsou formalizovány a nezaručují optimální řešení. Někdy nenalezneme řešení vůbec, i když existuje. Rozvoj výpočetní techniky, zvláště na bázi mikroprocesorů, rozšířil a zlevnil její využití a umožnil řešení zmíněných problémů pomocí expertních systémů. Ty jsou praktickou aplikací výsledků vědní oblasti, zabývající se tzv. umělou inteligencí. Expertní systém (ES) je založen na počítačovém programu, využívajícím znalosti odborníků (expertů) v dané oblasti k řešení komplikovaných úloh. Řešení je na úrovni, určené odbornou úrovní daných expertů a může je nahradit při diagnostice. Expertní systém je počítačový program, který simuluje s požadovanou přesností rozhodovací činnost odborníka – experta při řešení diagnostických úloh. ES poskytuje expertní rady odborníka, rozhodnutí nebo řešení konkrétní situace (úlohy). ES musí splňovat následující podmínky:

- jednoduchá obsluha a srozumitelná interpretace výsledků, popř. i s vysvětlením a zdůvodněním závěrů (tzv. user friendly system – "přátelský" k uživatelům),
- instruktivnost postupu, daného sekvenčním, dialogově vedeným režimem práce, imitujícím v určitém smyslu konzultaci laika s expertem, při němž si expert dotazy upřesňuje představu o problému, až dochází k určitému závěru a doporučení.

Z hlediska charakteru činnosti se dnes dělí ES na skupiny systémů plánovacích, konstrukčních, hybridních, diagnostických (EDS) aj. Např. ES plánovací slouží k nalezení optimální strategie postupného řešení problému. Obvykle užívají determinované znalosti (bez neurčitostí) a musí mít zabudovaný model objektu. EDS diagnostické (název neznamená, že mohou řešit jen úlohy technické diagnostiky), jsou určeny k tomu, aby efektivní interpretací vybrali hypotézu (z konečné množiny cílových hypotéz), která nejlépe koreluje s daty reálného případu. Struktura expertního diagnostického systému je zřejmá z obr. 3. 1.



Obr. 3. 1 Expertní diagnostický systém

Expertní systém je obvykle tvořen následujícími programovými moduly:

1) **Báze znalostí**, v níž jsou uloženy informace expertů o objektu diagnostiky. Reprezentaci báze znalostí obvykle tvoří:

- **Sémantické sítě**, které mají strukturu grafu, kdy každý uzel odpovídá určitému objektu a každá hrana odpovídá příslušné relaci mezi dvěma objekty.
- **Produkční systémy**, u nichž jsou znalosti vyjádřeny procedurálním typem pravidla např. *situace* → *akce*. Situace (levá strana pravidla) popisuje podmínku, za které může být akce (pravá strana pravidla) vykonána. Pokud je tato podmínka splněna, může být vykonána. Nebo jsou vyjádřeny deklarativně pravidlem *předpoklad* → *závěr* v podobě

"IF < předpoklad P > THEN < závěr Z >"

- **Rámce**, které umožňují reprezentaci stereotypních situací a mají strukturu formulářů skládajících se z položek naplněných hodnotami. Položkám bývají přiřazeny procedury, které jsou při aplikaci automaticky prováděny obdobně jako např. tabulkový editor Excel aj.

- 2) **Báze dat**, která obsahuje hodnoty charakterizující např. technický stav objektu diagnostiky. Hodnoty obvykle získáváme přímým měřením objektu diagnostiky, popř. z expertních programů nebo z dialogu s uživatelem.
- 3) **Řídící (inferenční) mechanismus**, který zahrnuje proceduru zpracovávající data z báze dat na základě znalostí uložených v bázi znalostí. Obvykle se využívá metoda zřetězování elementárních znalostí, jejichž struktura má podobu orientovaného grafu reprezentujícího stavový prostor. Kromě tohoto způsobu realizace řídicího mechanismu existují další techniky.
- 4) **Vysvětlovací modul**, který zabezpečuje komunikaci expertního systému s uživatelem.
- 5) **Aktuální model**, vyjadřuje se aktualizovanými hodnotami pravděpodobností, jistot a vah, popř. dalších poznatků zahrnutých v bázi znalostí, kdy tento model reprezentuje současný stav báze dat a právě aktuálních poznatků o řešení problému. V počáteční fázi mají poznatky přiřazeny apriorní hodnoty, v průběhu řešení se tyto hodnoty modifikují.

Moderní expertní systémy se uplatňují i při neurčitých znalostech (heuristiky v bázi znalostí) a nejistých či nepřesných datech (v bázi dat). Nejisté znalosti mají přidělenou míru důvěry v jejich platnost, nejistá data vyplývají z odpovědí uživatele typu "asi ano", "spíše ne", "nevím" apod. Znalosti jsou prezentovány způsobem

"IF < předpoklad P > THEN < závěr Z > WITH < váha V >."

Konkrétní data k právě řešenému případu jsou obsažena v bázi dat. Jde o číselná data (měření) odečtená, popř. automaticky vyjádřena příznaky, popř. i data nejistá (velmi přibližné hodnocení, odpovědi typu "asi" apod.). K jádru ES patří problémově nezávislý řídicí mechanismus, který na základě báze znalostí po každé odpovědi z báze dat zpřesňuje aktuální model řešeného případu. Řídící mechanismus vždy vybere dotaz na uživatele tak, aby odpověď znamenala maximální přínos k upřesnění modelu, a upraví současný model po obdržení odpovědi. Úprava často spočívá v tom, že na počátku diagnózy mají jednotlivé poznatky z báze znalostí určité apriorní hodnoty pravděpodobností, které jsou v průběhu řešení měněny, např. od apriorního modelu, daného apriorními pravděpodobnostmi určitých typů poruchy, k modelu konkrétního případu. Vysvětlovací mechanismus sestává z řady pomocných programů, umožňujících uživateli sledovat proces formování konečného výsledku. Komunikační moduly programu EDS, zabezpečující plynulý dialog, informace o průběhu konzultace i o stavu aktuálního modelu (s případným vysvětlením a zdůvodněním), tvoří značnou část zdrojového programu ES (50 až 90 %). Závěr diagnózy má obvykle pravděpodobnostní charakter, tzn., že výsledkem je buď technický stav s výrazně vyšším

stupněm pravděpodobnosti, nebo několik možných alternativ typu poruchy s udáním stupně pravděpodobnosti každé z nich. Z hlediska obecnosti lze dnešní EDS rozdělit na:

- Uzavřené expertní systémy, specializované na stále se opakující úkoly.
- Problémově orientované ES, používané k jistému typu úloh v určité problémové oblasti. Příkladem mohou být ES DART pro diagnostiku poruch počítačů, čs. EDS POES pro diagnostiku motorových lokomotiv apod.
- Prázdné ES, což jsou univerzální problémově nezávislé systémy bez báze znalostí, kterou si musí vytvořit uživatel, distribuované spolu s podpůrným softwarem. Často se jim obrazně říká shell systémy (shell – ulita).

V technické diagnostice bohužel nelze většinou určit přesnou hranici mezi poruchovým a bezporuchovým, tedy provozuschopným stavem. Pokud diagnostikujeme složitější objekt, neexistuje většinou vzájemně jednoznačně zobrazení mezi diagnostickými veličinami a třídami poruch, a jím odpovídajícím technickým stavům, tzv. diagnózám. Třídy poruch se mohou navzájem překrývat, to znamená, že stejným hodnotám diagnostických veličin odpovídají různé diagnózy. V takovém případě lze využít k určení technického stavu diagnostikovaného objektu teorii fuzzy množin. Jedná-li se o složité diagnostikované objekty s mnoha diagnostikovanými veličinami, u kterých není možné přesně stanovit vzájemné relace mezi těmito veličinami, je použití fuzzy teorie téměř nutností.

3. 2 Fuzzy množiny a fuzzy expertní systém

Klasická množina představuje soubor prvků libovolného druhu. S množinami lze realizovat klasické množinové operace (sjednocení, průnik, množinový rozdíl, symetrický rozdíl, kartézský součin), popř. speciální množinové operace (projekce, restrikce, spojení, dělení). Pokud označíme U jako univerzum, což je množina prvků libovolného okruhu (např. množina čísel představující výsledky měření, rozsah hodnot, množina objektů apod.), dále A jako množinu a x jako libovolný prvek z daného univerza, pak v teorii klasických množin tento prvek jednoznačně do množiny A buď patří nebo nepatří. Klasické množiny lze definovat výčtem všech prvků, které patří do množiny, definicí vlastností, která určuje příslušnost prvku do množiny nebo pomocí charakteristické funkce μ_A . Zobrazení $\mu_A : U \rightarrow \{0,1\}$ nazveme charakteristickou funkcí množiny A právě tehdy, jestliže pro všechna x platí :

$$\mu_A(x) = \begin{cases} 1 & x \in A \\ 0 & x \notin A \end{cases}$$

U klasických množin mapuje tedy charakteristická funkce univerzum do dvouprvkové

množiny. V teorii fuzzy množin je tato funkce zobecněna, nazývá se funkce (stupeň) příslušnosti (je to hodnota – reálné číslo, které vyjadřuje subjektivní lidské posouzení) a mapuje univerzum na celý interval $\langle 0, 1 \rangle$. Funkce příslušnosti $\sim B$ fuzzy množiny B je funkce

$$\mu_B : U \rightarrow \langle 0, 1 \rangle$$

Každá fuzzy množina je jednoznačně určena prvkem $x \in U$ a jemu odpovídající hodnotou funkce příslušnosti $\mu_B(x)$. Funkce příslušnosti mohou mít různý tvar. Skutečnost nejlépe vystihují funkce ve tvaru křivek, jako jsou Gaussova křivka, zvonová křivka, sigmoidní křivka, splajnová křivka apod. Z důvodů snadnosti výpočtů se tyto tvary nahrazují funkcemi příslušnosti sestavenými z lomených přímk. Nejčastěji používané tvary po částech lineárních funkcí příslušnosti jsou A -funkce (trojúhelníková) H -funkce (lichoběžníková) Γ -funkce a L -funkce. Pomocí fuzzy množin lze pracovat se znalostmi, které jsou uváděny ne v numerických hodnotách, ale v jazykové formě. Základní jednotkou reprezentující znalosti je tedy jazyková (lingvistická) proměnná, jejíž hodnota se vyznačuje expertní neurčitostí, přičemž matematický aparát fuzzy množin umožňuje tuto neurčitost zpracovat. Jazykovou proměnnou lze popsat uspořádanou trojicí:

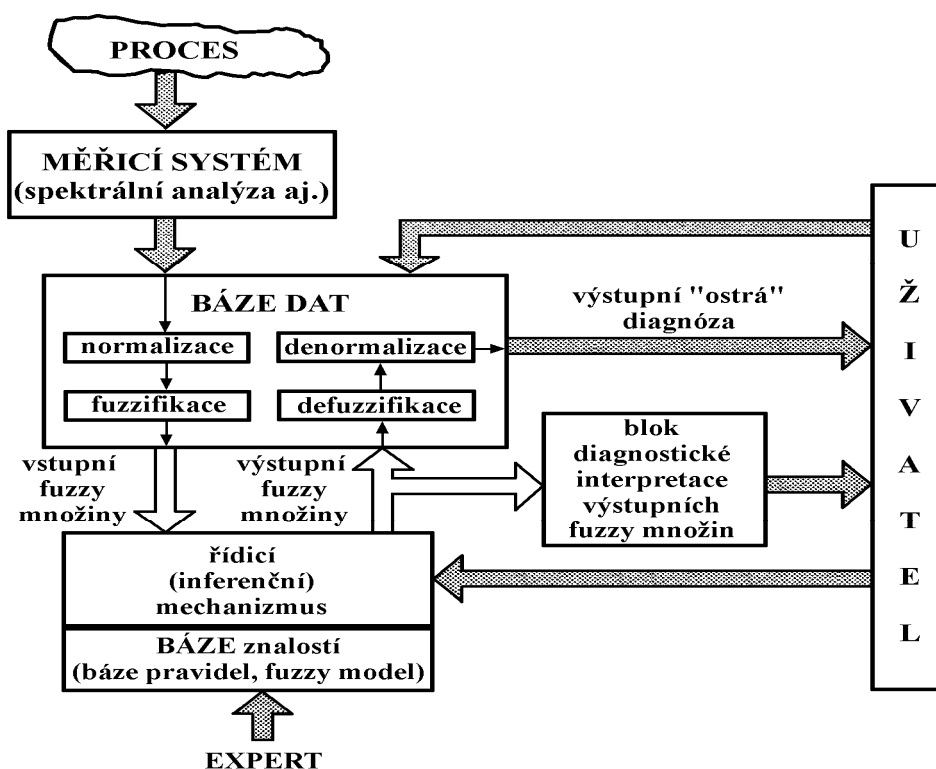
$$\langle J, SH, U \rangle,$$

kde

- J ... jméno jazykové proměnné, např. teplota oleje v převodovce, technický stav převodovky,
- SH ... množina slovních hodnot jazykové proměnné J , nazývaná množina termů, např. v případě teploty oleje v převodovce „velmi nízká“, „nízká“, „provozní“, „zvýšená“, „vysoká“. Počet termů je obvykle omezen rozlišovací schopností člověka, maximální počet je 9, optimální 5 – 7.
- U ... je struktura univerza, což je v našem případě, např. číselný rozsah hodnot teplot.

3. 2 Fuzzy expertní systém

Jazyková proměnná je veličina, která může nabývat svých slovních hodnot na základě konzultace s expertem. Prostřednictvím jazykových proměnných a jejich slovních hodnot lze provést popis diagnostického modelu. Zavedením funkce příslušnosti dochází k transformaci slovní hodnoty na fuzzy množinu, jazyková proměnná se stává fuzzy proměnnou a diagnostický model fuzzy modelem. Fuzzy model pak může být součástí celého fuzzy expertního systému. Schéma fuzzy expertního systému je uvedeno na obr. 3. 2.



Obr. 3. 2 Možné schéma fuzzy expertního systému

Znalostní báze

Aby bylo možné se systémem pracovat, je nutné naplnit znalostní bázi, která se skládá z báze dat a báze pravidel. Při naplňování znalostní báze je třeba konzultovat s expertem, zabývajícím se problematikou diagnostikovaného objektu. Báze dat umožňuje správné fungování fuzzifikačního, defuzzifikačního bloku a báze pravidel. Báze dat obsahuje informace o funkcích příslušnosti vstupních a výstupních fuzzy množin (funkce příslušnosti reprezentují slovní hodnoty jednotlivých jazykových proměnných), o jednotlivých univerzech vstupních a výstupních veličin, a případně o měřítkách použitých při normalizaci a denormalizaci. Při návrhu báze pravidel je třeba definovat diagnostické veličiny reprezentující stav diagnostikovaného objektu, zvolit hodnoty jazykových proměnných diagnostických veličin, určit obsah antecedentů a konsekventů pravidel a sestavit všechna pravidla.

Fuzzifikační blok

Hodnoty vstupních diagnostických veličin se pohybují většinou v různých rozsazích. Normalizace představuje transformaci těchto veličin do normalizovaného univerza, což může být např. interval $\langle 0, 1 \rangle$, $\langle -1, 1 \rangle$, $\langle 0, 10 \rangle$ apod. Přepočítání se provádí na základě měřítka.

Normalizace není nutná, lze také pracovat přímo v hodnotách fyzikálních veličin. V procesu fuzzifikace se přiřadí každé hodnotě normalizované vstupní veličiny stupeň příslušnosti do jedné nebo více fuzzy množin, odpovídajících jednotlivým termům v pravidlech. Tyto fuzzy množiny se stávají antecedenty fuzzy pravidel. Ve fuzzy expertním systému, chápeme fuzzifikaci jako přiřazení funkcí příslušnosti jednotlivým diagnózám na univerzech vstupních diagnostických veličin.

Inferenční mechanismus

Je to mechanismus využívající ke své činnosti fuzzy pravidla uložená v bázi pravidel, která jsou ve tvaru (fuzzy implikace)

$$\text{IF } X \text{ je } A \text{ THEN } Y \text{ je } B \equiv \text{IF (fuzzy výrok) THEN (fuzzy výrok),}$$

kde X, Y jsou fuzzy proměnné,

A, B jsou jazykové hodnoty (termy).

Tento fuzzy podmíněný výrok lze označit jako fuzzy implikaci, jehož levá část se nazývá antecedent a pravá část konsekvent. Antecedent tvoří podmíněnou část pravidla, tzv. fuzzy předpoklad a konsekvent důsledkovou část pravidla neboli závěr. Antecedent je zpravidla složená logická podmínka, ve které jsou pravidla vázána logickými spojkami (AND, OR aj.), z nichž je potom vyvozována druhá logická podmínka jako konsekvent pravidla. V případě, že pravidlo obsahuje více podmínek, je nutné z více stupňů příslušnosti získat stupeň jediný. Každé pravidlo může mít určenu také váhu w , tj. číslo v intervalu $\langle 0, 1 \rangle$, které je aplikováno k číslu danému stupněm příslušnosti určitého antecedentu nebo k výsledku pravidla.

Inference je proces zpracování jednoho nebo více pravidel pro odvození určitých výroků z jiných výroků. Fuzzy inference používá soubor inferenčních pravidel založených na fuzzy logice, která popisují v případě diagnostiky funkční závislosti mezi vstupními diagnostickými veličinami a výstupními diagnózami. Diagnostické veličiny mohou být digitalizované diagnostické signály, údaje od uživatele, atd. Výstupní diagnostická fuzzy množina pak obsahuje, prostřednictvím odpovídající funkce příslušnosti, informaci o technickém stavu objektu. Jestliže dvě nebo více pravidel ovlivňují, obvykle přes operátor OR, stejnou výstupní fuzzy množinu, je třeba provést operaci slučování konsekventů, kterou označujeme jako agregaci. Vstupem agregačního procesu je soubor implikacemi tvarovaných výstupních množin dle jednotlivých pravidel. Pro agregaci se obvykle využívá operace sjednocení. Průběh výstupní funkce příslušnosti je dán volbou fuzzy implikace. Výsledná hodnota závisí také na tom, jaký typ fuzzy implikace použijeme. V současné době jsou známy

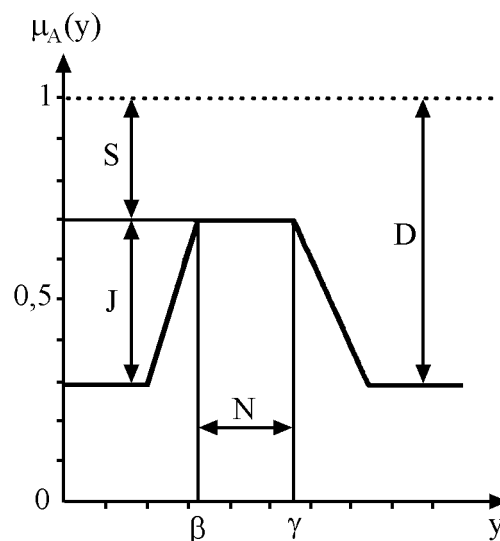
desítky druhů fuzzy implikací. K nejznámějším patří Mamdaniho, která je nejpoužívanější, Larsenova, Lukasiewiczova, Zadehova a další.

Defuzzifikační blok

Cílem defuzzifikace je získat z výstupní fuzzy množiny "ostrou" hodnotu dané veličiny, což lze řešit různými metodami. Mezi nejznámější patří metoda těžiště sjednocené plochy, kdy je výstupní "ostrá" hodnota určena jako souřadnice těžiště plochy tvořené výslednou fuzzy množinou, dále pak metoda prvního maxima, metoda posledního maxima, výšková metoda a další. V případě diagnostiky odpovídá výstupní "ostrá" hodnota, neboli výstupní diagnóza, např. procentuálnímu opotřebením sledovaného zařízení. Denormalizace převádí výstupní normalizovanou hodnotu na základě měřítka použitého při normalizaci, v případě, že byla normalizace aplikována.

Interpretace výstupní fuzzy množiny

Defuzzifikací, která tvoří základní operaci ve fuzzy regulátorech, se z hlediska zodpovězení expertního dotazu na diagnózu ztrácí informace podobně jako při náhradě pravděpodobnostní funkce střední hodnotou. Na obr. 3. 3 je znázorněn možný způsob přímé interpretace závěrů pravidel.



Obr. 3. 3 Příklad interpretace výstupní fuzzy množiny

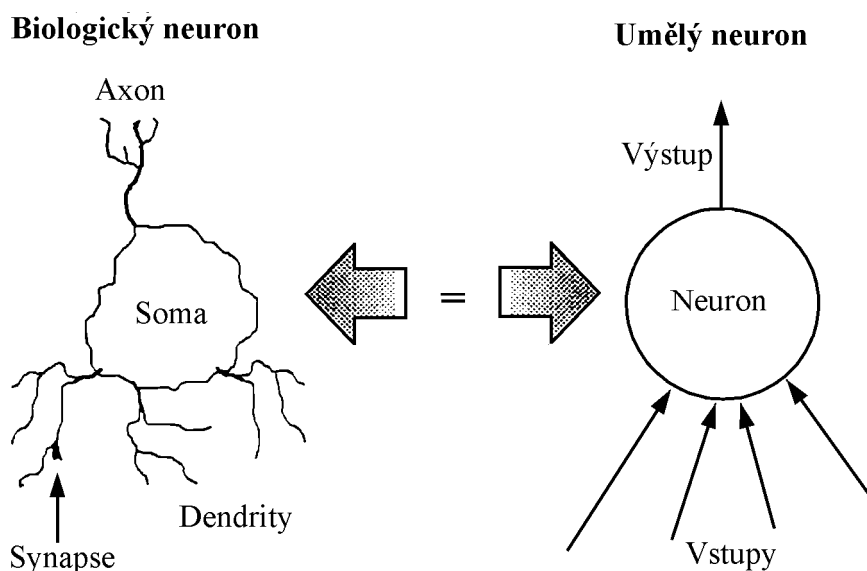
Legenda:

Sporná odpověď: $S = 1 - \max \mu_A(y)$; *Neurčitá informace:* $N = \beta - \gamma$ *Důvěryhodná informace:* $D = 1 - \min \mu_A(y)$; *Jasná odpověď:* $J = \max \mu_A(y) - \min \mu_A(y)$

Fuzzy logika nabízí robustní techniku pro měření nejistých a chybami značně zatížených signálů, je osvědčenou technologií pro typické heuristické znalosti a automatizaci subjektivních rozumových operací.

3.3 Neuronové sítě

Neuronové sítě vychází z biologických neuronových sítí, využívají distribuované, paralelní zpracování informací, znalosti jsou do nich ukládány prostřednictvím síly vazeb mezi jednotlivými neurony a jejich základní vlastností je schopnost učení. Jsou to datové systémy obsahující velké množství jednoduchých, vysoce vnitřně propojených procesních částí v architektuře založené na struktuře mozku. Na základě výsledků topologie systému a způsobu, jak jsou informace uchovávány a jak se s nimi nakládá, neuronové sítě jsou často schopny zpracovávat věci, jevy a procesy, které člověk zpracovává dobře, ale běžná diagnostická technika s nimi neumí pracovat. Neuronové sítě nahrazují stav, kdy chybí data a systém je „trénován“ ve vytváření vstupních a výstupních vztahů procesů nebo systémů. Mají také schopnost odpovídat v reálném čase na změny stavu systému, popisované a poskytované např. pomocí trvalých vstupů sensorů. Podobnost biologického a umělého neuronu je znázorněna na obr. 3. 4.

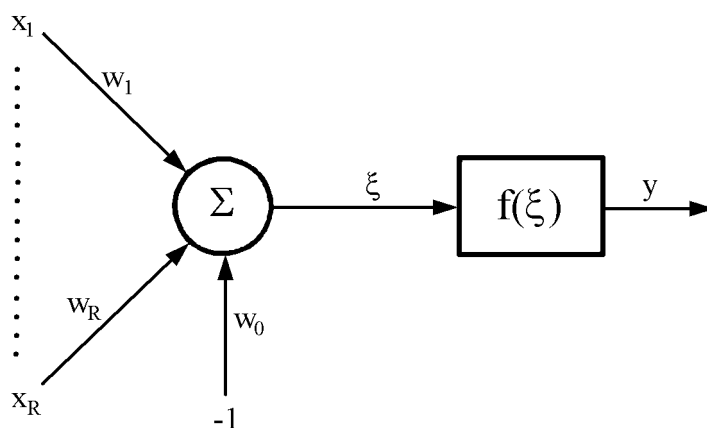


Obr. 3. 4 Podobnost biologického a umělého neuronu

Legenda:

Soma = tělo, dendrity = vstupy, synapse = zesiluje, zeslabuje a přenáší signál , axon = výstup;

Matematický model neuronu (přenos signálu přes neuron) je uveden na obr. 3. 5.



Obr. 3. 5 Model přenosu signálu neuronem

Vybrané přenosové funkce neuronu jsou na obr. 3. 6. Činnost neuronu lze vyjádřit vztahy

$$y = f(\xi) , \quad (3. 1)$$

a

$$\xi = \sum_{j=1}^R w_j x_j - w_0 , \quad (3. 2)$$

kde $x_1, \dots, x_R \dots$ jsou vstupní signály,

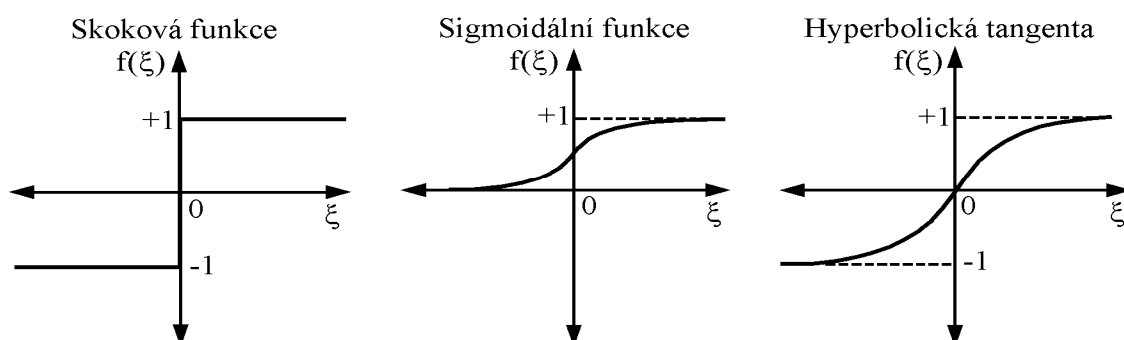
$w_1, \dots, w_R \dots$ jsou koeficienty vah,

$w_0 \dots$ prahová úroveň signálu aktivující neuron,

$f(\xi) \dots$ nelineární přenosová funkce neuronu,

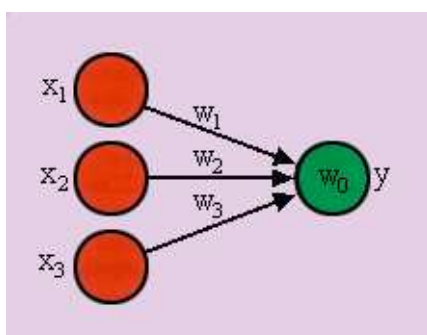
$y \dots$ výstupní signál,

$t \dots$ čas.

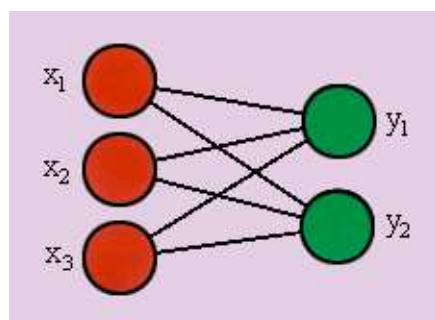


Obr. 3. 6 Přenosové funkce neuronu

Obvykle neumíme strukturu nervových tkání živého organismu, pro vysoký stupeň provázanosti jednotlivých nervových buněk, znázornit. Strukturu umělé neuronové sítě naopak znázornit umíme. Umělé sítě nemají za cíl přesně napodobit mozek člověka, popř. jeho část, cílem je realizovat co nejjednodušší síť, která ještě je schopna řešit daný problém. Jak bylo řečeno neuronová síť je znázorněna pomocí symboliky teorie grafů. Na obr. 3. 7 je schéma elementární sítě tvořené jedním výstupním neuronem napájeným ze tří vstupních neuronů. Hodnoty signálů na vstupu do sítě jsou označeny x_1 , x_2 , x_3 , hodnota výstupního signálu je y . Směr toku signálu ze vstupů k výstupu je znázorněn šipkami u jednotlivých hran spojujících uzly a w_0 , w_1 , w_2 a w_3 jsou hodnoty vah, které hrají roli při výpočtu výstupní hodnoty y z hodnot x_1 , x_2 , x_3 .



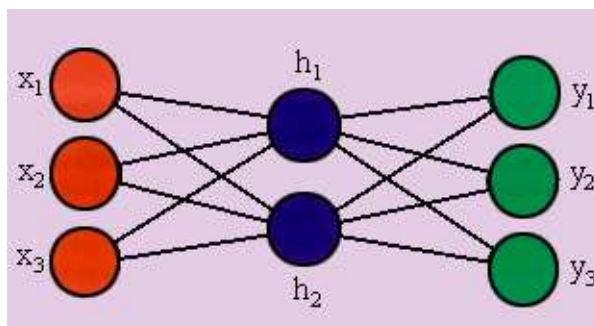
Obr. 3. 7 Umělý neuron jako dvouvrstvá neuronová síť s topologií 3 – 1
 Do vstupních neuronů jsou jako vstupní data pro řešení příslušné úlohy přiváděny signály z okolí. Do výstupního neuronu pak vstupuje signál, jehož hodnota představuje číselnou formu řešení. Výstupních neuronů může být několik a společně vytvářejí druhou vrstvu sítě viz obr. 3. 8 (jsou zde vynechány symboly vah a orientace směru toku signálu – obvykle se předpokládá směr zleva doprava).



Obr. 3. 8 Neuronová síť s topologií 3 - 2

Dvouvrstvé sítě se snadno učí a umějí dobře zobecňovat, ale nedokážou se zcela přizpůsobit každé situaci. To souvisí s nelineární podstatou obecného rozhodovacího procesu. Proto se

pro řešení mnoha úloh užívají třívrstvé a vícevrstvé neuronové sítě. První vrstva se nazývá vstupní, poslední vrstva výstupní a mezilehlé vrstvy se označují jako skryté (hidden – h). Na obr. 3. 9 je třívrstvá síť se třemi vstupními, dvěma skrytými a třemi výstupními neurony.



Obr. 3. 9 Hierarchická se skrytou vrstvou a topologií 3 – 2 - 3

Zpracování signálu neuronem

Pro konstrukci neuronových sítí se používají velmi zjednodušené matematické modely, které jsou nástrojem umělé inteligence schopným řešit danou třídu úloh. Základní způsoby zpracování signálů jsou uvedeny v tab. 3. 1.

Tab. 3. 1 Způsoby zpracování signálů

Použitý symbol	Způsob zpracování	Použitý symbol	Způsob zpracování
-	Chybí vrstva	S	Sigmoida
*	Žádné	G	Gaussova funkce
L	Lineární kombinace	E	Exponenciála
V	Vzdálenost	MIN	Nejmenší vyhrává
Z	Znaménko	MAX	Největší vyhrává

Neurony vstupní vrstvy pouze archivují současné hodnoty jednotlivých vstupů, ale žádné hodnoty v nich nejsou zpracovávány. Nejjednodušším způsobem je signál zpracován v lineárním neuronu. Vstupní hodnota je dána vztahem $y = s$, tedy $s = w_0 + w_1x_1 + \dots + w_nx_n$, kde n je počet vstupů neuronu. Někdy se místo hodnoty součtu zveřejňuje její znaménko podle vztahu $y = \text{sign}(s)$. Potom pro každý kladný součet platí $y = +1$, zatímco pro záporný součet platí $y = -1$. Tím vznikne tzv. bipolární neuron, kdy vstupní hodnota $+1$ symbolizuje logické ANO, hodnota -1 symbolizuje logické NE a hodnota 0 symbolizuje NAPŮL. S použitím bipolárního neuronu lze realizovat základní logické funkce AND, OR, NAND, NOR a MAJ (většina z lichého počtu vstupů), a to za použití vztahů:

$$\text{AND}(x_1, \dots, x_n) = \text{sign}(1 - n + x_1 + \dots + x_n)$$

$$\text{OR}(x_1, \dots, x_n) = \text{sign}(n - 1 + x_1 + \dots + x_n)$$

$$\text{NOT}(x_1) = \text{sign}(-x_1)$$

$$\text{NAND}(x_1, \dots, x_n) = \text{sign}(n - 1 - x_1 - \dots - x_n)$$

$$\text{NOR}(x_1, \dots, x_n) = \text{sign}(1 - n - x_1 - \dots - x_n)$$

$$\text{MAJ}(x_1, \dots, x_n) = \text{sign}(x_1 + \dots + x_n)$$

$$\text{XOR}(x_1, x_2) = \text{sign}(1 + h_1 + h_2), \text{ kde: } h_1 = \text{sign}(-1 + x_1 - x_2) \text{ a } h_2 = \text{sign}(-1 - x_1 + x_2)$$

Při řešení libovolného problému lze vždy realizovat příslušný kombinační nebo sekvenční obvod pomocí neuronové sítě složené pouze z bipolárních neuronů. Kombinací uvedených principů je možno sestavit velký počet klasických neuronových sítí. V tabulce 3. 2 je uvedeno základních devět sítí, které jsou v praxi nejvíce využívány.

Vlastnosti příslušné neuronové sítě určuje její dynamika, kterou uvažujeme ve dvou základních etapách:

a) Etapa učení - dochází při ní působením vstupních a výstupních signálů k adaptabilní změně vah a prahů neuronů v síti a rovněž ke změně její struktury. Etapa se obvykle rozčleňuje na dvě části:

- generování základní struktury propojení neuronů,
- adaptace, kdy se určuje potřebný stav sítě, hlavně hodnoty jednotlivých vah.

Tab. 3. 2 Základní typy neuronových sítí

Typ sítě	Vstup	Skrytá vrstva	Výstup	Autor
OLAM Optimální lineární asociativní paměť	*	-	L (+Z)	Haykin
HEBB Hebbova síť	*	-	L + Z	Hopfield
HAMM Hammingova síť	*	L + MAX	L + Z	Lipmann
MLP 1 Několikavrstvá síť s bipolárními neurony	*	L + Z	L + Z	Widrow, Hoff
MLP 2 Několikavrstvá síť se spojitým chováním	*	L + S	L + S	Rummelhart
SOM Kohonenovy mapy	*	-	V + MIN	Kohonen
RBF Síť s radiální bází	*	V + G	L	Poggio, Girosi
MOD Modulární síť	*	L + E	L	Jacobs, Jordán
COUNT Síť se zpětným šířením	*	V + MIN	L	Nelson

Podle algoritmu učení lze dělit síť na učení s učitelem a bez učitele:

1.) Učení s učitelem znamená, že se síť snaží přizpůsobit svoji odezvu na vstupní informace tak, aby se její výstup co nejvíce podobal požadovanému originálu. Je to jako když učíme dítě číst, tj. ukážeme mu vstup, např. písmenko A přitom vyslovíme např. „ááá“ – požadovaný výstup. Dítě se nás snaží napodobit – učí se. Učitelem zde není myšlen onen dospělý, ale princip předložení fonetického vzoru a požadování jeho zopakování. Exaktně tento princip můžeme objasnit se zavedením tzv. trénování množiny

$$TM = (x_i, y_i), i = 1, 2, \dots, L,$$

kde x_i ... vstupní vektory,

y_i ... vzorové výstupní vektory,

L Odpovídající počet dvojic vstupní – výstupní vektor.

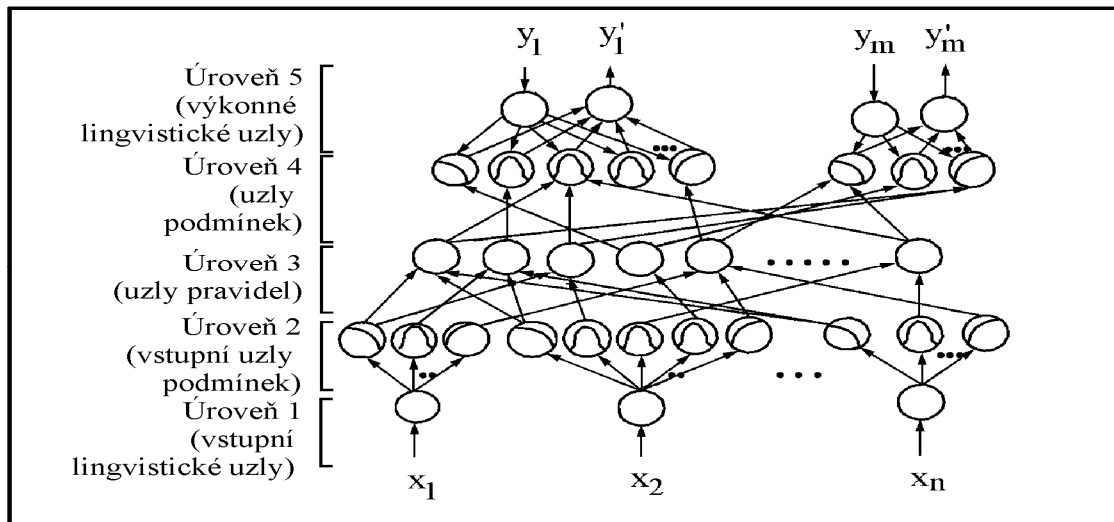
Neuronová síť si při učení snaží „zapamatovat“ výstupní vektor, který odpovídá vstupnímu vektoru a to pro všechny vstupní vektory obsažené v trénování množině. Je zřejmé, že při daném vstupním vektoru $x_i = (x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{ij}, \dots, x_{in})$ lze nastavit libovolný výstup. Proces učení tedy spočívá ve vhodné změně vah a prahů jednotlivých neuronů, aby bylo dosaženo požadovaného výstupu.

2.) Učení bez učitele je proces, ve kterém síť vychází z informací, které jsou obsaženy ve vstupních vektorech. Je to totéž, jako když vysypeme na jednu hromadu různé tvary kostek (krychličky, kuličky, válečky aj.) a jejich zdeformované variace a máme za úkol hromadu roztrždit na předem neurčený počet hromádek podle tvaru (např. Popelka měla roztrždit hrách a popel). Jedná se o problém, který jsme nikdy neřešili a nikdy nebylo řečeno, kolik hromádek a jakých tvarů máme udělat – nebyly stanoveny „podmínky“ učitele a proto se jedná o učení bez učitele. Tedy při procesu učení bez učitele neexistují odpovídající vzorové výstupní vektory, tento proces učení můžeme využít pro klasifikaci do tříd. Na vstup se vkládají jednotlivé vstupní vektory a váhy se nastavují tak, aby síť odpovídala podobně na podobné vektory.

b) Etapa aktivace – síť si vybavuje odezvy na jednotlivé signály, ale nemění se již konfigurace ani váhy jednotlivých neuronů v síti.

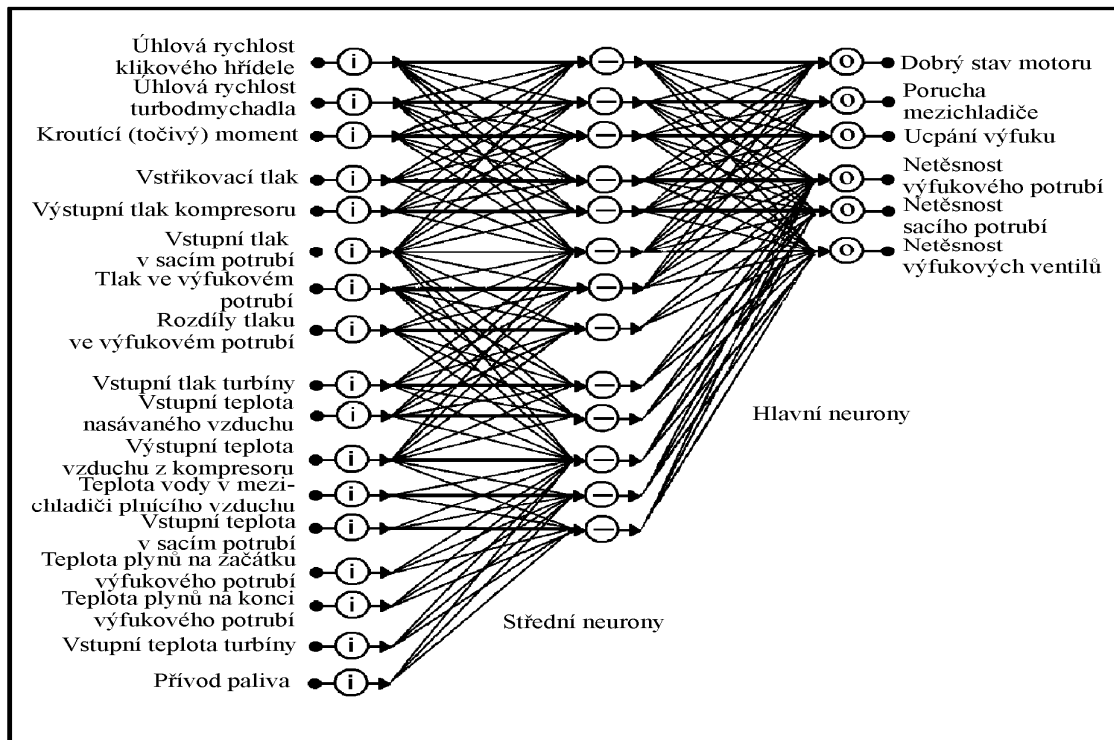
Spojení fuzzy logiky, neuronových sítí a užití znalostních systémů, které mohou být adaptovány nebo optimalizovány podle zkušebních dat, přináší novou kvalitu diagnostiky. Základní rámec pro adoptivní fuzzy deduktivní systém pro sledování technického stavu a poruchové diagnostiky je na obr. 3. 10. Systém má celkem 5 úrovní. Uzly v úrovni 1 jsou vstupní lingvistické uzly, které reprezentují vstupní lingvistické proměnné, včetně všech symptomů, např. znečištění oleje je vyšší, viskozita oleje je normální. 5-tá úroveň je výstupní, včetně všech provozních podmínek motoru a všech poruch, např. vynechávání vznětu,

netěsností, zhoršení emisí aj. Uzly v úrovni 2 a 4 jsou uzly podmínek, které působí jako členové reprezentující termíny náležející lingvistickým proměnným. Každý uzel ve vrstvě 3 je uzlem pravidel, který reprezentuje jedno fuzzy pravidlo, např. teplota oleje je vysoká, pak důsledek je vážný, tj. jestliže je teplota oleje vysoká, pak chladicí systém je špatný. Ramena v úrovni 3 definují předběžné podmínky pravidel uzlů a úroveň 4 definuje následky pravidel uzlů. Ramena a úrovně 2 a 5 spojují lingvistické uzly s korespondujícími uzly lhůt.



Obr. 3. 10 Neuronová síť systému založená na rozhodování pomocí fuzzy logiky

Model neuronových sítí např. pro vznětový motor a diagnostiku poruch je na obr. 3. 11.



Obr. 3. 5 Neuronová síť diagnostického modelu motoru

4. DIAGNOSTICKÝ MODEL, ROZPOZNÁVÁNÍ V DIAGNOSTICE

4.1 Diagnostický model

Modelováním rozumíme zjednodušené účelové zobrazení originálu jiným systémem tzv. modelem. Využívá se v diagnostice ke studiu struktury, relací, vztahů a chování originálu, resp. k simulaci, tj. k řízenému sledování vlastností originálu při změně vstupních veličin modelu. Přitom simulace často nahrazuje technicky složitý a finančně nákladný experiment. Pokud je zobrazení originál – model vzájemně jednoznačné, nazýváme ho modelem izomorfním, v případě, že není zachována vzájemná jednoznačnost, jedná se o zobrazení homomorfní. Diagnostickým modelem rozumíme homomorfní zobrazení poruchových a bezporuchových stavů a chování objektu diagnostiky, resp. jeho prvků. Chování objektu diagnostiky znamená časově proměnné reakce systému na vstupní podněty a okolí. Diagnostické modely se využívají pro:

- Simulaci poruch objektu diagnostiky a analýzu vlivu těchto poruch na chování, vztahy, relace a funkce objektu,
- Výběr minimálního potřebného počtu vhodných strukturních, funkčních a diagnostických parametrů a veličin,
- Nalezení a ověření diagnostických algoritmů,
- Prognózu vývoje technického stavu objektu diagnostiky,
- Porovnání diagnostikovaného objektu s modelem aj.

Modely můžeme rozčlenit na:

- Fyzikální, tj. hmotný a reálný model založený na stejném nebo analogickém principu jako objekt diagnostiky,
- Abstraktní, tj. matematický model založený na hypotézách, které jsou vyjádřené formou rovnic a nerovností, vyjadřující relace, struktury, chování aj. mezi objektem diagnostiky, jeho systémy, okolím, diagnostickými veličinami aj. v poruchovém a bezporuchovém stavu.

Matematický diagnostický model

Matematické modely lze členit na:

- Analytické, které popisují systém soustavou algebraických (statický model) nebo diferenciálních rovnic (dynamický model),
- Empirické, které jsou odvozeny na základě experimentálně naměřených dat z reálného OD (parametrický a neparametrický),

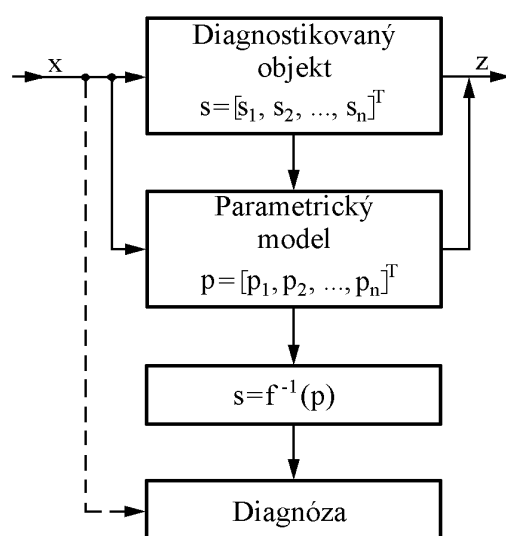
- Logické, které zobrazují objekt diagnostiky (systém) prostřednictvím aparátu matematické logiky (provozní schopnost = log. 1 a porucha = log. 0)
- Topologické, které mají formu orientovaných grafů s vrcholy, hranami, relacemi aj.

Analytický model

Analytický model lze členit dále podle různých kritérií např. na: model strukturní nebo procesního chování (funkční), statický nebo dynamický, lineární nebo nelineární, stochastický nebo deterministický, parametrický nebo neparametrický, spojitý nebo diskrétní aj. Analytický model předpokládá relativně podrobnou znalost matematických, fyzikálních, chemických aj. zákonitostí a konstant charakterizujících objekt diagnostiky, jeho chování, vztahy aj. Někdy jej lze vytvořit (odvodit) na základě experimentálně naměřených vstupních a výstupních dat z reálného objektu diagnostiky (tzv. empirický analytický model). Analytické modely jsou však obvykle složité a jejich použití z důvodů neznalosti všech potřebných zákonitostí a vztahů je omezené.

Parametrický model

Parametrický model je analytickým modelem jehož parametry, konstanty, koeficienty aj. jsou získány statistickým vyhodnocením naměřených dat, dynamických odezev, frekvenčních charakteristik aj. Z přibližné znalosti struktury a uspořádání objektu diagnostiky odhadneme fyzikální zákonitosti a stanovíme matematické rovnice a potom určíme parametry těchto rovnic na základě experimentu s reálným objektem diagnostiky. U lineárních dynamických systémů lze využít vektorově maticové vyjádření ve stavovém prostoru. Příklad parametrického modelu je na obr. 4. 1.



Obr. 4. 1 Parametrický diagnostický model

Legenda:

p vektor parametrů, s vektor strukturních parametrů OD, $p = f(s)$ relace mezi strukturními parametry OD a parametry modelu

Logický model

Logický model zobrazuje objekt diagnostiky prostřednictvím aparátu matematické logiky. Jeho výhodou je možnost definovat vztahy mezi veličinami bez ohledu na jejich fyzikální podstatu. Nevyskytují se v něm fyzikální veličiny, ale pouze vstupní, výstupní a stavové (vnitřní) veličiny, které nabývají binárních hodnot. Při konstrukci modelu se využívá logických funkcí a Booleovská algebra.

Základní výrokové operátory (logické spojky) jsou:

Konjunkce spojuje dva výroky a a b v jeden celek. Konjunkcí získaný výrok je pravdivý pouze tehdy, jsou oba výroky pravdivé. Konjunkci odpovídá v češtině spojka „a“, popř. „a zároveň“. Např.: výrok a : $x < 1$; výrok b : $x \geq 0$; průnik $a \cap b$: Pro číslo x platí: $x < 1$ a zároveň $x \geq 0$; pak platí $0 \leq x < 1$; Symbolický zápis konjunkce „a“ a „b“ ... $a \cap b$;

Disjunkce (alternativa) spojuje dva výroky. Disjunkcí získaný výrok je nepravdivý pouze tehdy, jsou-li oba výroky nepravdivé. Disjunkci odpovídá v češtině spojka „nebo“. Např. výrok a : ΔABC je pravoúhlý; výrok b : ΔABC je rovnoramenný; sjednocení $a \cup b$: ΔABC je pravoúhlý nebo rovnoramenný, to znamená, že: ΔABC je jen pravoúhlý nebo jen rovnoramenný nebo pravoúhlý i rovnoramenný zároveň. Symbolický zápis disjunkce „a“ a „b“ ... $a \cup b$;

Implikace spojuje dva výroky. Implikace je nepravdivá jen tehdy, je-li přední výrok v implikaci pravdivý, zatímco zadní výrok v implikaci je nepravdivý. Implikaci v češtině odpovídají výrazy, např. „jestliže ..., potom“, „když ..., pak“ aj. Např. výrok a : jestliže je číslo dělitelné 9, výrok b : pak je dělitelné i 3; a je předpoklad, b je tvrzení; a je postačující podmínkou pro b , b je nutnou podmínkou pro a . Symbolický zápis implikace „a“ a „b“ ... $a \rightarrow b$;

Ekvivalence spojuje dva výroky. Ekvivalence je pravdivá, jsou-li dva výroky současně pravdivé nebo současně nepravdivé. Ekvivalenci odpovídá v češtině např. „jestliže“, „když“, „právě tehdy“, „tehdy a jen tehdy“ aj. Např.: výrok a : číslo je dělitelné 6. právě tehdy když je zároveň výrok b : dělitelné 2 a 3.; a je nutnou a postačující podmínkou pro b (platí i obráceně); Symbolický zápis ekvivalence „a“ a „b“ ... $a \leftrightarrow b$;

Negace převádí pravdivostní negovanou hodnotu výrazu v opak. Negací pravdivého výroku je výrok nepravdivý a negací nepravdivého výroku je výrok pravdivý. Např.: $\sim a$: ΔABC není pravoúhlý; není pravda, že ΔABC je pravoúhlý. Symbolický zápis negace „a“ ... $\sim a$;
 Při slovním vymezení jednotlivých logických spojek můžeme přesně definovat jejich význam pomocí pravdivostních tabulek tab. 4. 1.

Tab. 4. 1 Pravdivostní tabulka logických spojek

Výrok a	Výrok b	A∩b	a∪b	a→b	a↔b	~a
0	0	0	0	1	1	1
0	1	0	1	1	0	1
1	0	0	1	0	0	0
1	1	1	1	1	1	0

Při sestavování modelu se užívá výchozí tabulka, která jednoznačně binárně popisuje vlastnosti každého prvku objektu diagnostiky z hlediska poruchy (log. 0) a provozuschopnosti (log. 1). Logický model je vhodný pro objekty diagnostiky s vyznačenou funkční a blokovou strukturou, která má definované vstupy a výstupy. Příklad logického modelu (pravdivostní tabulky) je v tab. 4. 2.

Tab. 4. 2 Pravdivostní tabulka model

Senzor	Diagnostická veličina		Stav objektu						
	Analog.	Bool.	Bezporuchový stav p^0	p^1	p^2	p^3	p^4	...	p^i
1	d_1	b_1	1	0	1	0	1	...	
2	d_2	b_2	1	1	0	0	0		
3	d_3	b_3	1	1	0	1	1		
4	d_4	b_4	1	0	1	0	0		
	x_1	b_{10}	1						
	x_2	b_{11}	1						
	x_3	b_{12}	1						

Topologický model

Topologický model se užívá u složitých objektů diagnostiky, kdy lze popsat kauzalitu vlastností a chování prvků např. formou orientovaného grafu. Orientovaný graf G je určen trojicí, popř. dvojicí množin

$$G = \langle V, H, R \rangle \equiv \langle V, \Theta \rangle \quad (4. 1)$$

kde

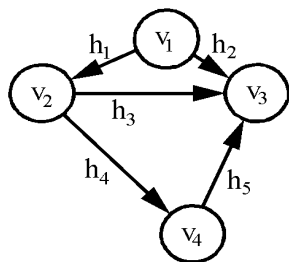
V ... množina vrcholů (uzlů) grafu, H ... množina hran, R ... množina relací (vztahů), kterými jsou hranám přiřazovány vrcholy a naopak, Θ ... topologie grafu;

Pro počítačové operace s grafy se využívají vhodné incidenční (vrcholy spojené hranou) matice, matice dostupnosti, matice souslednosti, matice nejkratších cest aj. Ohodnocený graf je takový, kdy hranám a vrcholům jsou přiřazeny číselné hodnoty, které reprezentují předem definované ohodnocení. Binárně pojatou relaci grafu lze vyjádřit, resp. zobrazit incidenční maticí A , maticí souslednosti B a maticí dostupnosti D .

Pro incidenční matici platí: 1 ... je-li vrchol výchozím vrcholem hrany, -1 ... je-li vrchol koncovým vrcholem hrany; 0 ... v ostatních případech;

Pro matici souslednosti platí: 1 ... je-li výchozí vrchol spojen s koncovým vrcholem; 0 ... v ostatních případech;

Pro matici dostupnosti platí: 0 ... je-li vrchol dostupný z jiného vrcholu; 0 ... v ostatních případech.



V \ H	h ₁	h ₂	h ₃	h ₄	h ₅
v ₁	1	1	0	0	0
v ₂	-1	0	1	1	0
v ₃	0	-1	-1	0	-1
v ₄	0	0	0	-1	1

a)

V \ V	v ₁	v ₂	v ₃	v ₄
v ₁	0	1	1	0
v ₂	0	0	1	1
v ₃	0	0	0	0
v ₄	0	0	1	0

b)

V \ V	v ₁	v ₂	v ₃	v ₄
v ₁	0	1	1	1
v ₂	0	0	1	1
v ₃	0	0	0	0
v ₄	0	0	1	0

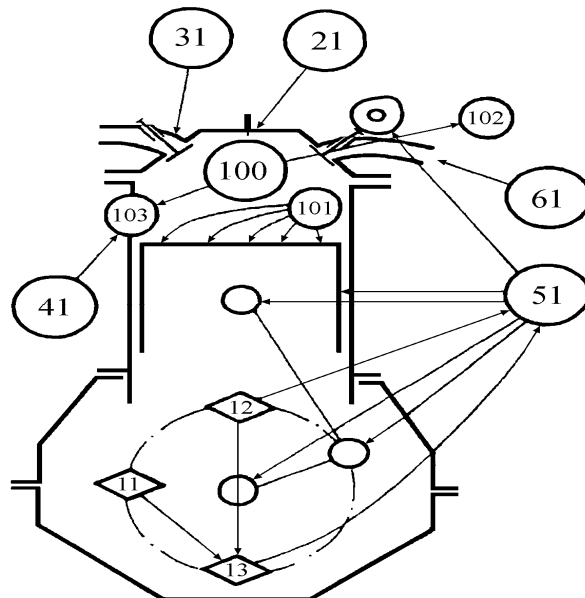
c)

Obr. 4. 3 Orientovaný graf a postup získání: a) incidenční matice, b) matice souslednosti
c) matice dostupnosti

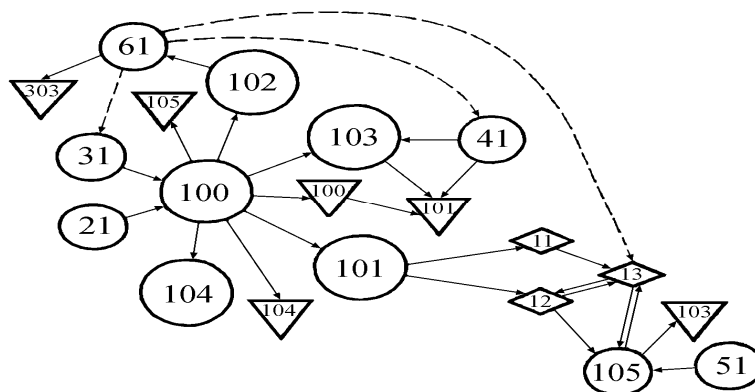
Základem topologického modelu je orientovaný graf G , v němž vlastnosti, činnosti a stavy prvků OD tvoří vrcholy a odpovídající příčinné vztahy tvoří hrany. Při tvorbě modelu vycházíme ze základních vlastností prvků a vyšších celků struktury OD. Druhým krokem je

rozšíření grafu o méně podstatné vlastnosti (účinnost soustavy, frekvenční spektra aj.). Třetím krokem je rozšíření modelu z prostoru vlastností, stavů, charakteristik a procesů do prostoru parametrů, tj. proměnných, které kvantitativně, popř. jen kvalitativně vyhodnotí vlastnosti, stavy, charakteristiky a procesy. Takto vytvořený topologický model doplníme množinou poruch. Závěrečným krokem je ohodnocení grafu na základě vah vyjadřujících efektivnost, významnost, věrohodnost, nákladovost, míru informace aj. Schéma spalovacího motoru s možným vyznačením jeho funkcí je na obr. 4. 4 a odpovídající topologický model je na obr. 4. 5. Cílem ohodnocení topologického modelu je:

- vyjádření kauzality vlastností a stavů v prostoru parametrů,
- výběr jednoznačných a postačujících veličin charakterizujících TS s dobrou rozlišovací schopností,
- zjistit citlivé cesty šíření informací o stavech prvků.



Obr. 4. 4 Schéma spalovacího motoru s vyznačením funkcí a charakteristik



Obr. 4. 5 Topologický model spalovacího motoru

4. 2 Rozpoznávání v diagnostice

Podstatou rozpoznávání (diagnózy, třídění, identifikování, rozlišování) TS v diagnostice je přiřazení hodnoty diagnostické veličiny určité diagnóze, uložení do paměti počítače a komparací vzorové a naměřené hodnoty rozpoznání technického stavu OD. U složitých OD rozpoznáme TS na základě nepřímo změřených parametrů metodou rozpoznávání obrazů metodou (Pattern Recognition), která patří do metod umělé inteligence. Rozpoznání je pak zařazování (třídění) věcí, jevů a procesů reálného světa do tříd (skupin), které mají stejné vlastnosti. Výsledkem rozpoznávání je obraz skutečnosti, ne skutečnost sama. V TD strojů se užívají tzv. příznakové metody, které využívají k rozpoznání věci, jevu nebo procesu uspořádanou množinu čísel (příznaků) charakterizující vlastnosti daného OD. V TD je rozpoznávání TS základním předpokladem pro stanovení diagnózy, tj. určení provozuschopnosti nebo neprovozuschopnosti OD, resp. lokalizace poruchových stavů. Úkolem je přiřazení určité diagnózy změřeným příznakům OD stejného typu nebo u jednoho OD v různých časových obdobích. Při rozpoznávání obrazů jsou obvyklé následující terminologické pojmy:

- Vektor příznaků je vektorem hodnot diagnostických veličin, je to tedy obraz technického stavu jemuž odpovídá příslušná diagnóza.
- Obraz je popis tzv. reprezentace konkrétního jevu na základě konkrétních příznaků, tj. obraz technického stavu OD. V maticovém tvaru je dán vektorem

$$x = [x_1, x_2, \dots, x_n]^T, \quad (4.2)$$

kde x_1, x_2, \dots, x_n jsou hodnoty diagnostických veličin

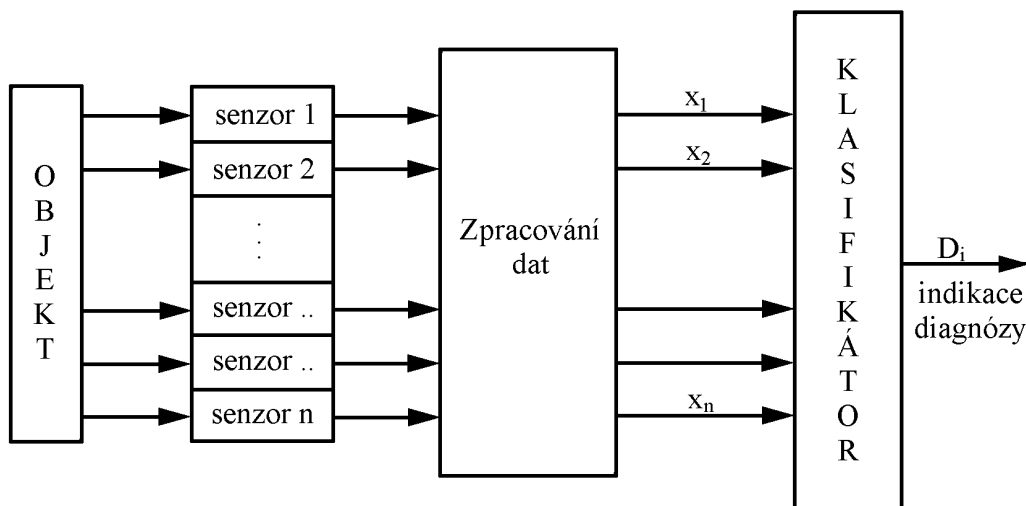
- Třída (diagnóza) je skupina věcí, jevů nebo procesů, které mají stejné, předem určené vlastnosti. Je to diagnóza, tj. skupina vlastností definující určitý TS. Jednotlivým třídám v procesu rozpoznávání odpovídají jednotlivé diagnózy technických stavů OD. Množině tříd diagnóz $D = \{D_1, D_2, \dots, D_R\}$ je přiřazena množina indikátorů třídy (diagnózy), tj. symbolu jednoznačně označující třídu každého vektoru příznaků $D = \{D_1, D_2, \dots, D_R\}$.
- Etalon je vzorovým příznakem stanoveným pro určitou diagnózu (třídu), bývá heuristický, analytický, změřený na OD se známou diagnózou, simulovaný na reálném OD nebo na jeho modelu aj.

- Rozhodovací pravidlo pak přiřazuje každému konkrétnímu příznaku odpovídající indikátor diagnózy $D_i = d(x)$. Zařazování OD do jednotlivých diagnóz (tříd) se provádí tzv. klasifikátorem, což je zařízení se vstupy odpovídajícími počtu snímaných diagnostických veličin a pouze jedním výstupem, který udává identifikátor diagnózy, do které klasifikátor podle použitého algoritmu zařadil obraz technického stavu. Možný systém pro příznakové rozpoznávání obrazů TS OD je na obr. 4. 6.

Aplikace metod příznakového rozpoznávání obrazů vyžaduje:

- zvolit dostatečné množství diagnostických veličin pro potřebnou rozlišovací schopnost s minimem veličin a měřených dat,
- najít vhodný algoritmus, tj. pravidla pro klasifikaci do jednotlivých diagnóz.

V praxi se využívá obvykle deterministických metod klasifikace s využitím neuronových sítí nebo statistických metod klasifikace např. Bayesovských aj., podrobnosti jsou uvedeny např. v [41] aj.



Obr. 4. 6 Systém příznakového rozpoznání obrazu TS OD

5. ROZDĚLENÍ, ŘEŠENÍ A VYUŽITÍ TECHNICKÉ DIAGNOSTIKY

Technickou diagnostiku lze, v závislosti na různých hlediscích rozdělit např. podle obr. 5. 1. Z hlediska účelu se TD dělí na:

- provozní diagnostiku,
- dílenskou diagnostiku,
- výzkumnou a zkušební diagnostiku.

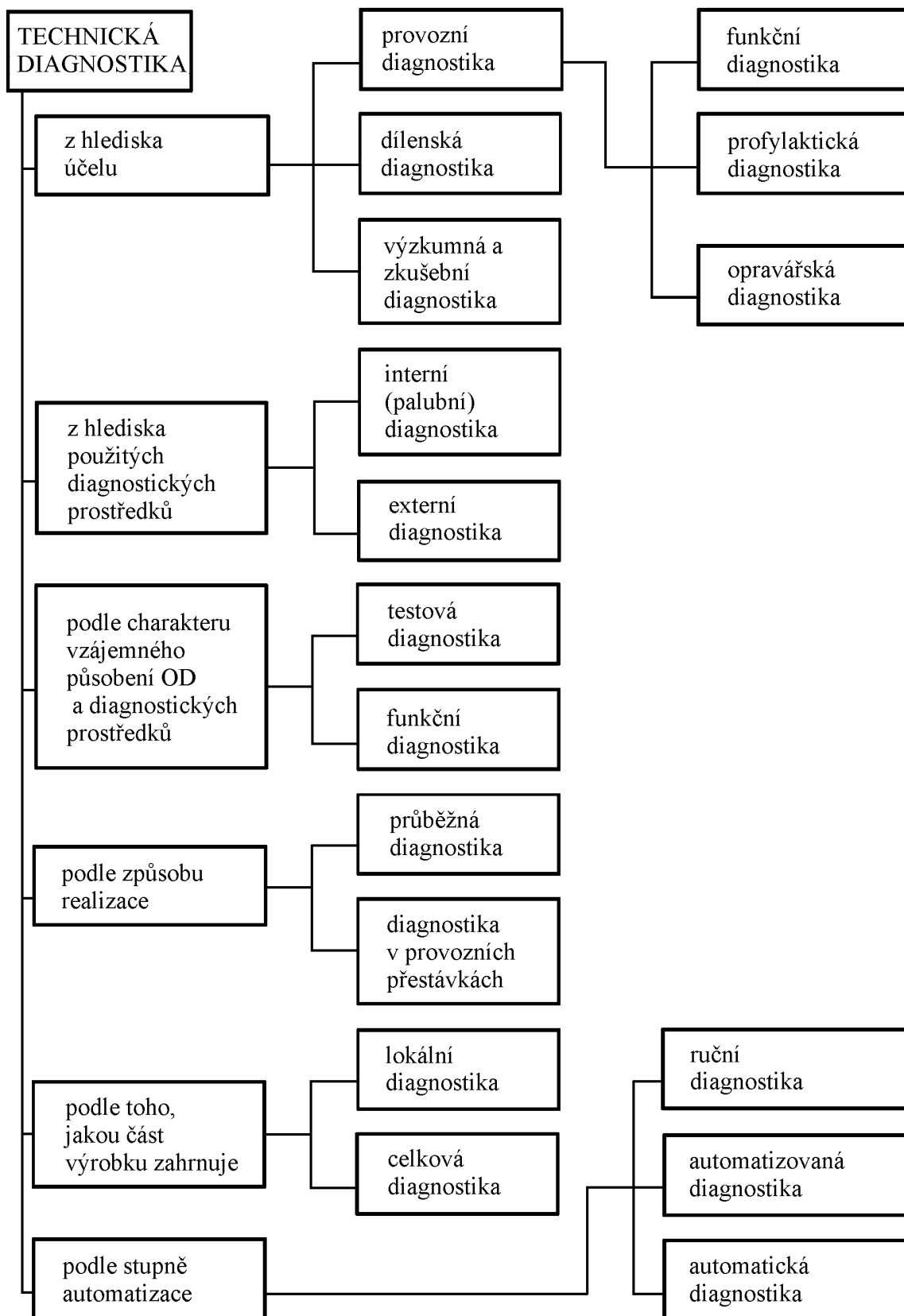
Provozní diagnostika je část TD, určená k zabezpečení spolehlivého provozu objektu diagnostiky u uživatele. Předmětem zkoumání je pro ni objekt (vozidlo) jako celek. Při realizaci diagnostického procesu nejsou z objektu diagnostiky vyjímány žádné prvky. Demontážní práce jsou prováděny zcela výjimečně, zpravidla pro zabezpečení přístupnosti ke kontrolním místům. Provozní diagnostika se dále člení na diagnostiku funkční, profylaktickou a opravářskou.

Funkční diagnostika (někdy označovaná jako expresní nebo diagnostika 1. stupně) je část provozní diagnostiky, zabývající se rozpoznáváním kvality plnění předepsaných základních funkcí objektu diagnostiky. Jejím úkolem je stanovení, zda se objekt nachází v bezporuchovém nebo poruchovém stavu. Hodnotí pouze okamžitý stav objektu diagnostiky. Informace, získané prostředky funkční diagnostiky, jsou podkladem pro rozhodnutí o potřebě opravy nebo údržby.

Profylaktická diagnostika (označovaná jako diagnostika 2. stupně) je část provozní diagnostiky, zabývající se objekty diagnostiky z hlediska prevence jejich závad a poruch v průběhu dalšího provozu. Zabývá se provozuschopnými objekty a obvykle vychází z výsledků funkční diagnostiky. Informace, získané prostředky profylaktické diagnostiky, umožňují ohodnotit ekonomické důsledky narůstajícího opotřebení jednotlivých prvků objektu diagnostiky a jsou podkladem k individuálnímu stanovení rozsahu preventivní údržby nebo opravy objektu a k prognóze jeho budoucího technického stavu v průběhu dalšího využívání.

Opravářská diagnostika je část provozní diagnostiky, zabývající se objekty diagnostiky v poruchovém stavu. Jejím úkolem je rozpoznávání poruch na objektu diagnostiky a specifikace jejich míst a příčin. Vychází z výsledků získaných aparátem funkční diagnostiky. Informace získané opravářskou diagnostikou jsou podkladem pro stanovení nutné opravy nebo údržby objektu s cílem odstranění zjištěných poruch.

Dílenská diagnostika je část technické diagnostiky, pro níž jsou předmětem zkoumání (objektem diagnostiky) soustavy nebo prvky demontované z objektů (např. skupiny, podskupiny, soustavy vozidla aj.). Diagnostický proces je na nich realizován



Obr. 5. 1 Možné dělení technické diagnostiky

nezávisle na objektu, z něhož byly demontovány, nebo do něhož budou zabudovány. Dílenská diagnostika je určena pro potřeby výrobních a opravárenských podniků, opraven a dílen.

Výzkumná a zkušební diagnostika je část technické diagnostiky určená pro splnění úkolů spojených s výzkumem, vývojem a zkoušením objektu diagnostiky. Jednotlivé diagnostické metody nebo prostředky výzkumné a zkušební diagnostiky mohou, ale nemusí být po zavedení objektu do normálního používání využity v provozní nebo dílenské diagnostice.

5. 1 Zásadní a náhradní řešení technické diagnostiky

Zásadní řešení technické diagnostiky znamená, že objekt diagnostiky (vozidlo) je již z hlediska své konstrukce vyřešen tak, že je přizpůsoben pro provádění diagnostických měření.

Náhradní řešení znamená, že otázky diagnostiky jsou uvažovány vynuceně až poté, co je výrobek vyprojektován, vyroben a zaveden do běžného používání (např. u motorových vozidel již zavedených v dopravních podnicích, zemědělských závodech, aj.), a to obvykle aplikací známých diagnostických metod a prostředků. Toto řešení je kompromisem mezi potřebou a možnostmi a nedovoluje včas realizovat ty změny a doplňky, které je vhodné v objektu uskutečnit k tomu, aby byla zajištěna jednoduchost a snadnost diagnostiky jeho technického stavu ve všech údobích technického života.

Nedocení důležitosti hlubokého propracování otázek organizace efektivních diagnostických postupů již v etapě projektování objektu, včetně případné automatizace vyhledání poruch nebo závad u složitých objektů, vede k neproduktivním ztrátám, ztrátám času a kvalifikované pracovní síly při údržbě a opravách. Mezi objektivní příčiny takového stavu patří nedostatečný rozvoj teorie a metod technické diagnostiky, nedostatečné propracování principů sestavení technických diagnostických prostředků a také nedostatečná výroba těchto prostředků. Tyto skutečnosti se ještě prohlubují tím, že propracování uvedených otázek často není požadováno ani v oficiálních požadavcích k projektu nových objektů. To vše vede ke skutečnosti, že složité objekty jsou často bez dobře organizovaných systémů kontroly správnosti stavu a funkce a odhalování závad a poruch. Mnohé z výše uvedených nedostatků se nebudou vyskytovat, jestliže budou úkoly diagnostiky řešeny již v etapě projektování objektů. Jinak řečeno, rozpracování diagnostických systémů a diagnostických prostředků musí být stejně významnou a závažnou součástí projektu nového objektu, jako je rozpracování vlastního objektu. Otázku zásadního řešení technické diagnostiky vozidel je třeba chápat ve všech souvislostech. Je potřeba vytvořit podmínky pro vývoj, výrobu a dodávky motorových vozidel, upravených pro uplatnění progresivních metod

údržby a oprav, včetně technické diagnostiky. Je třeba vyvíjet nové, nekonvenční měřicí metody, které budou využívat nepřímé metody měření, a zabezpečit vývoj a výrobu zařízení (přístrojů) k realizaci těchto metod. Již při konstrukci a výrobě lépe přizpůsobovat a vybavovat vozidla pro aplikaci bezdemontážní diagnostiky, např. využitím palubních počítačů, přizpůsobováním vozidel pro připojení snímačů nebo je již přímo při výrobě snímači vybavovat, soustřeďovat měřicí místa apod. Současně s vozidly předávat i směrodatné hodnoty a pokyny pro diagnostiku v praxi. Při návrhu diagnostické metody respektovat i některé poznatky z ověřovacího a vývojového provozu vozidel i z teoretické analýzy vypracované při jejich konstrukčním řešení. Bude-li těmto otázkám věnována dostatečná pozornost při projekci a výrobě, může být vozidlo ještě před uvedením do provozu uzpůsobeno tak, že snímače budou umístěny v optimálních místech a upevněny definovaným reprodukovatelným způsobem. Zejména připojení snímačů vibrací je nutno věnovat veškerou odbornou péči, neboť jinak jsou do měření zanášeny nedefinovatelné chyby.

5. 2 Využití TD při praktické diagnostice vozidel

Možnosti využití technické diagnostiky jsou mnohostranné a směřují do oblastí výzkumu, vývoje, výroby, provozu, údržby, oprav a skladování vozidel. Technická diagnostika vozidel umožňuje zjistit provozní schopnost vozidla, přesně zjišťovat stav jeho jednotlivých prvků, lokalizovat a specifikovat poruchy a závady vozidel, popř. činit závěry o možnostech jeho dalšího bezporuchového provozu. V tabulce 5.1 jsou uvedeny možné etapy technického života výrobků (vozidla) a příklady možného využití technické diagnostiky v nich. V provozu motorových vozidel se předpokládá hlavní využití technické diagnostiky vozidel v návaznosti na systém jejich efektivní údržby a oprav. Její zavedení by mělo umožnit to, že vozidlo bude vyřazováno z provozu nikoliv v pravidelných obdobích preventivní, z hlediska obsahu pevně stanovené údržby a oprav, ale pouze tehdy, nastane-li zhoršení jeho parametrů nad stanovenou mez a nebo tehdy, vyskytne-li se na vozidle porucha. To znamená princip provádění údržby a oprav vozidel a jejich částí podle skutečného technického stavu.

Technickou diagnostiku je třeba chápat nikoliv jen jako soubor metod a prostředků pro objektivní zjišťování technického stavu vozidel, nýbrž především jako jistý, relativně samostatný blok technických i organizačních opatření, tvořících část komplexního a nadřazeného systému racionální údržby a oprav.

V současné době jsou známy a v praxi uskutečňovány následující tři základní systémy údržby a oprav vozidel:

Tab. 5. 1 Etapy technického života výrobku a možné využití technické diagnostiky

ETAPA ŽIVOTA VÝROBKU (VOZIDLA)	MOŽNÉ VYUŽITÍ TECHNICKÉ DIAGNOSTIKY
VÝROBA	<ul style="list-style-type: none"> - výstupní kontrola kvality výrobku - přijímací zkouška před začátkem využívání v provozu - poskytnutí přesných výchozích dat pro sledování změny parametrů vozidla v následujícím provozu
PROVOZ (JÍZDA)	<ul style="list-style-type: none"> - kontrola provozuschopnosti - kontrola provozních parametrů, charakterizujících bezpečnost, hospodárnost a výkonnost - získání podkladů pro údržbu - opravy - poruchová signalizace složitých zařízení
PROVOZNÍ PŘESTÁVKY KE ZJIŠTĚNÍ STAVU	<ul style="list-style-type: none"> - kontrola provozuschopnosti - kontrola k získání podkladů pro realizaci údržby a oprav - kontrola stavu za účelem stanovení prognózy jeho změny v dalším provozu - získání podkladů pro vyřazení vozidla z používání - získání podkladů pro zlepšení kvality konstrukce a výroby - získání podkladů pro úpravu provozních podmínek užívání vozidla
PROVOZNÍ PŘESTÁVKY K PROVEDENÍ ÚDRŽBY A OPRAV	<ul style="list-style-type: none"> - detekce a lokalizace závad a poruch - analýza příčin závad a poruch - kontrola před provedením údržby – opravy - kontrola kvality údržby – opravy - kontrola při přijímce po provedené opravě
SKLADOVÁNÍ – ULOŽENÍ (U SPECIÁLNÍCH VOZIDEL)	<ul style="list-style-type: none"> - kontrola stavu před provedením konzervace - kontrola stavu během skladování (uložení) - kontrola stavu po vyjmutí z uložení

a) Údržba a opravy vykonávané po pevně stanovených časových intervalech tzv. HTL údržba (Hard Time Limits), někdy nazývaná údržba podle časového plánu (Time Based Preventive Maintenance). Podkladem pro stanovení pevných časových intervalů jsou zkušenosti výrobců a provozovatelů a zejména statistické informace. Pro vozidla je za časový interval pokládáno množství spotřebovaného paliva, nebo počet ujetých km - proběh aj. Pevné stanovení intervalů (spotřeby, proběhů aj.) má v systému údržby preventivní charakter, tzn., že chrání jednotlivé části vozidla před vstupem do zóny mezního opotřebení. Tento způsob údržby je ekonomicky nevýhodný, k údržbě jednotlivých prvků dochází pozdě nebo příliš brzy, technické parametry se mohou zhoršovat pouhou demontáží a montáží aj. Hlavní

výhodou je však jednoduchost, jednoznačnost, dlouhodobé zkušenosti, bezpečnostní důvody, kdy pravidelně kontrolujeme stav systémů důležitých pro bezpečnost provozu aj.

b) Údržba a opravy vykonávané podle skutečného technického stavu vozidla tzv. OC údržba (On Condition). Tento systém předpokládá, že před provedením údržby resp. opravy je zjištěn skutečný technický stav vozidla metodami technické diagnostiky. Tento způsob údržby je technicky i ekonomicky nejvýhodnější.

c) Princip údržby po poruše, tzv. „jezdí do poruchy“ (Run to Breakdown). Do tohoto systému je vhodné začlenit všechny části vozidel, jejichž provozní spolehlivost nemůže být ovlivňována ani pevně stanovenými intervaly (proběhy) do vykonání údržby a oprav, ani kontrolami technického stavu (např. dynamické části, elektrické a elektronické části aj.), a ty, jejichž poruchy neovlivní bezpečnost provozu a jejichž kontrola s využitím metod technické diagnostiky by byla příliš složitá a nákladná.

V podmínkách provozu vozidel v ČR zatím převažuje systém údržby a oprav po pevně stanovených intervalech provozu. Určování periodicity a náplně údržby nebo oprav je v současné době řešeno většinou na základě zkušeností a praxe, tedy zpravidla subjektivně. Tento systém údržby a oprav nebere dostatečným způsobem v úvahu rozdílné podmínky v provozu, vliv obsluhy a skutečný technický stav vozidel a obvykle vede k nezdůvodněnému plýtvání finančními a materiálními prostředky a ke zbytečnému vynakládání lidské práce. Jak ukazuje výzkum, skutečná potřeba prací při technické údržbě vozidel se může v závislosti na technickém stavu měnit 1,5 až 2krát. Náklady na údržbu vozidla překračují během jeho technického života několikanásobně jeho pořizovací náklady.

Při optimalizaci údržby a oprav vozidel má mimořádně důležitou úlohu technická diagnostika, neboť se předpokládá relativně rychlý přechod na údržbu a opravy podle skutečného technického stavu vozidla. V takovémto systému bude technická diagnostika přímou součástí technologického postupu technické údržby, resp. oprav každého vozidla a bude zaměřena na určování nezbytného objemu prací této údržby (oprav) popř. termínu jejich provádění.

Při tomto začlenění diagnostika umožňuje včasné odhalení závad, vedoucích k poruše (havárii) objektu diagnostiky (vozidla). Pokud je mezi stavem objektu a měřenou veličinou přímá a jednoduchá závislost, stačí k sledování předhavarijní signalizace (např. kontrolní svítlna tlaku oleje v motoru). Závady (poruchy), které mají pomalejší průběh, je možno zjišťovat periodicky ve vhodných intervalech za provozu nebo v provozních

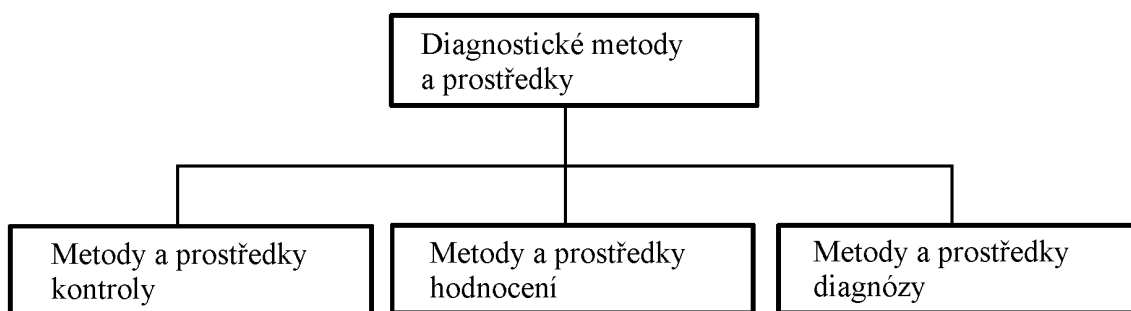
přestávkách. Účelem je určení rozsahu prací preventivní údržby v závislosti na prognóze bezporuchového provozu do příští diagnózy nebo obnovy.

Při prognózování se hodnotí budoucí stav objektu (vozidla) na základě údajů zjištěných v přítomnosti a minulosti. Cílem prognózování je určit rezervu provozuschopnosti vozidla na základě zhodnocení jeho stávajícího stavu a jeho základem je analýza a zobecnění údajů o změně hodnot diagnostických parametrů v čase.

5.3 Metody a prostředky technické diagnostiky

Jsou to metody a technická zařízení, sloužící k realizaci diagnostického procesu. Musí umožňovat provedení kontroly objektu diagnostiky, vyhodnocení výsledků této kontroly a stanovení diagnózy. Základní členění diagnostických metod a prostředků je na obr. 5. 2.

Diagnostické metody představují nástroje realizace diagnostických algoritmů. Rozdělení diagnostických metod je zřejmé z obr. 5. 3. Při diagnostice vozidel se využívá celá řada diagnostických metod.



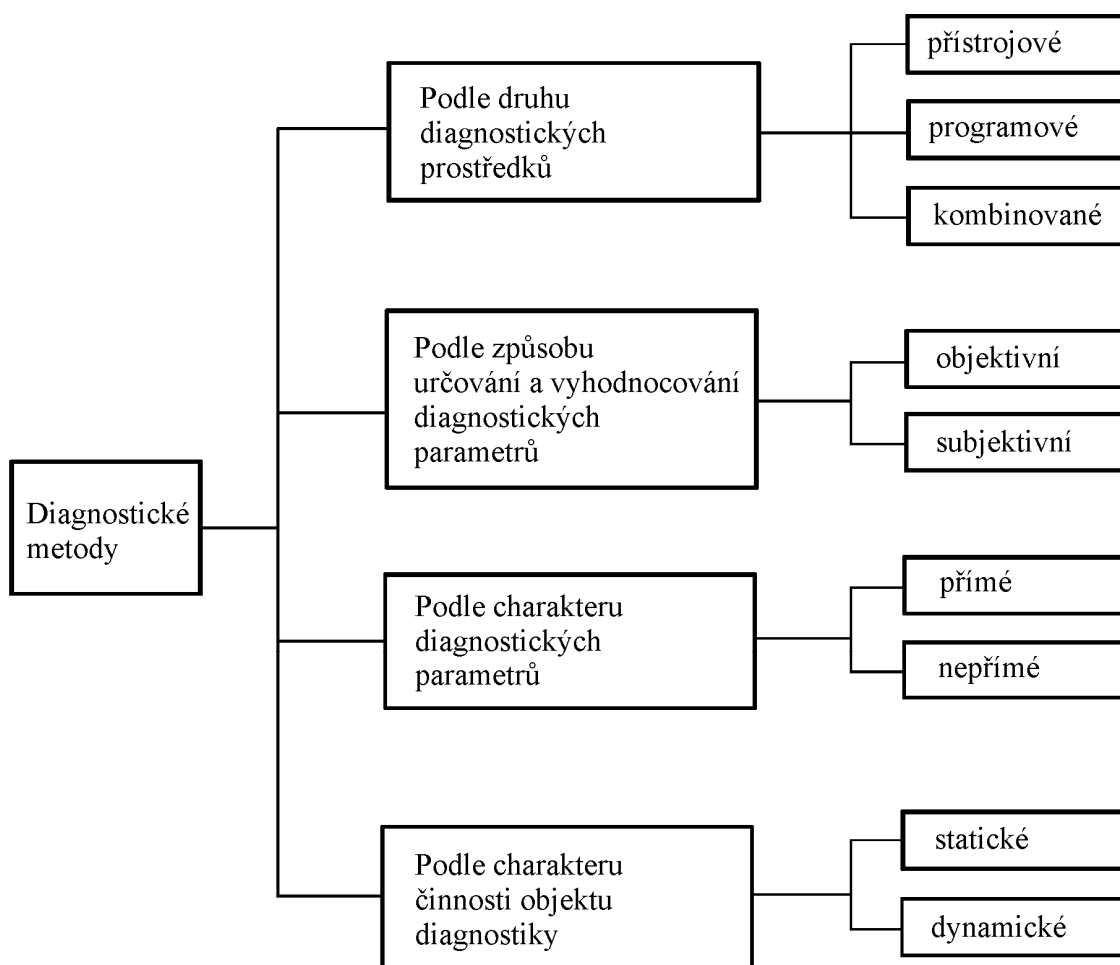
Obr. 5. 2 Členění diagnostických metod a prostředků

Představují měření a vyhodnocování řady fyzikálních veličin, které jsou charakteristické pro určení technického stavu vozidla, jeho skupin a prvků. Tyto veličiny lze měřit mechanicky nebo elektricky, obvykle převedením mechanické veličiny na elektrickou. Elektrické měřicí metody poskytují návaznost na zpracování dat výpočetní technikou. Vybrané metody užívané při diagnostice vozidel jsou uvedeny v dalším textu, resp. ve specializované literatuře. Diagnostické prostředky jsou přístroje, pomůcky a pomocná zařízení sloužící k realizaci diagnostických metod. Klasifikace přístrojových diagnostických prostředků je uvedena na obr. 5. 4. Základem diagnostických prostředků jsou diagnostické přístroje, sloužící ke zjištění hodnot a vyhodnocení diagnostických parametrů.

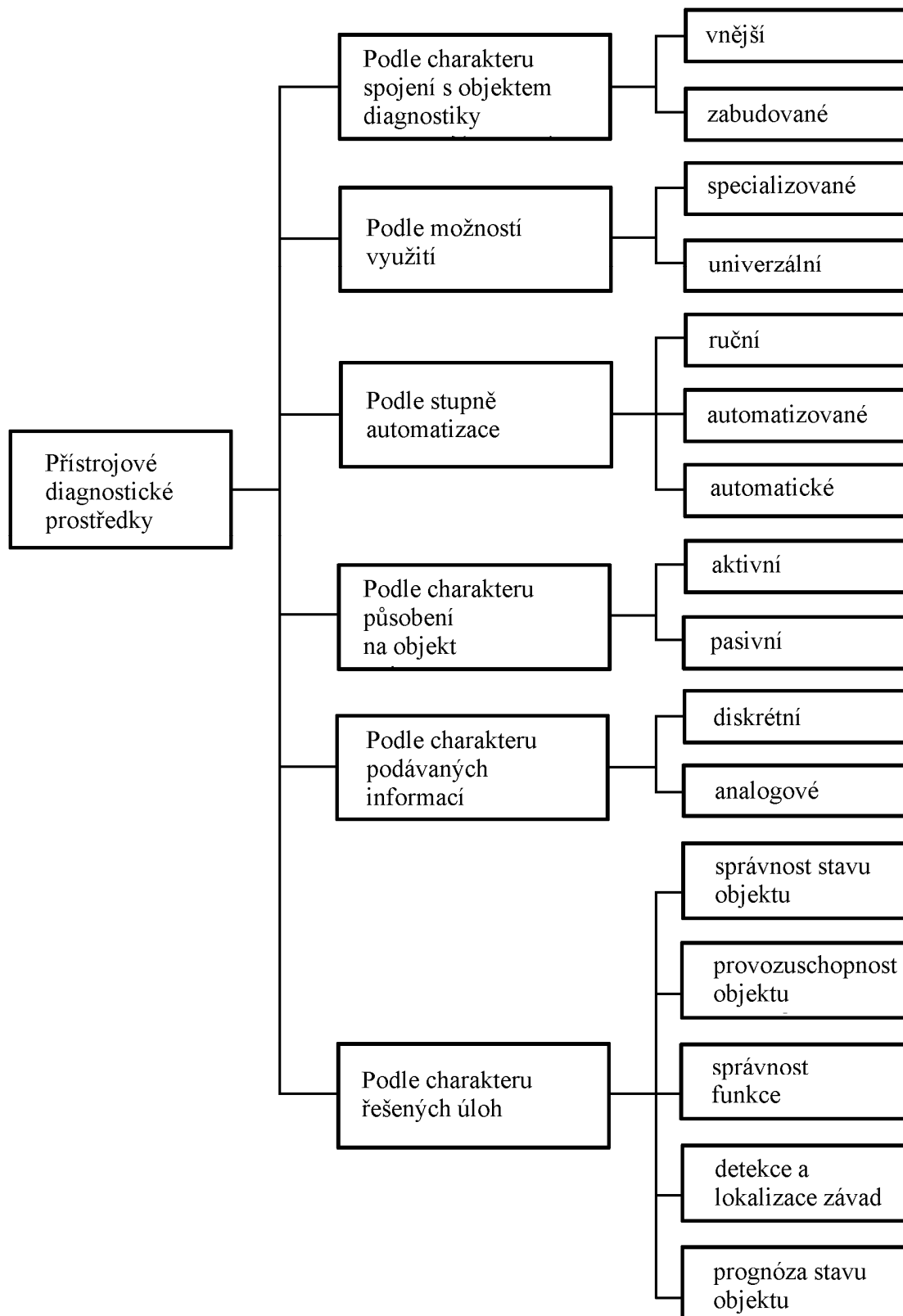
Diagnostické prostředky se zpravidla umísťují na diagnostická pracoviště. Ta mohou být umístěna ve stálých objektech a nebo mohou být mobilní. Diagnostické prostředky musí zabezpečit zejména:

- objektivnost kontroly a hodnocení diagnostických parametrů,
- přesnost, věrohodnost a stálost zjištěných hodnot,
- možnost měření bez demontáže objektu, případně měření při jeho činnosti,
- minimální dobu pro přípravu přístroje a k provedení měření,
- jednoduchost užití a obsluhy aj.

Způsob využití diagnostických prostředků plyne z charakteristiky činností, ke kterým jsou určeny.



Obr. 5. 3 Rozdělení diagnostických metod



Obr. 5. 4 Možná klasifikace přístrojových diagnostických prostředků

6. VYBRANÉ FYZIKÁLNÍ METODY TECHNICKÉ DIAGNOSTIKY

6.1 Akustické metody diagnostiky

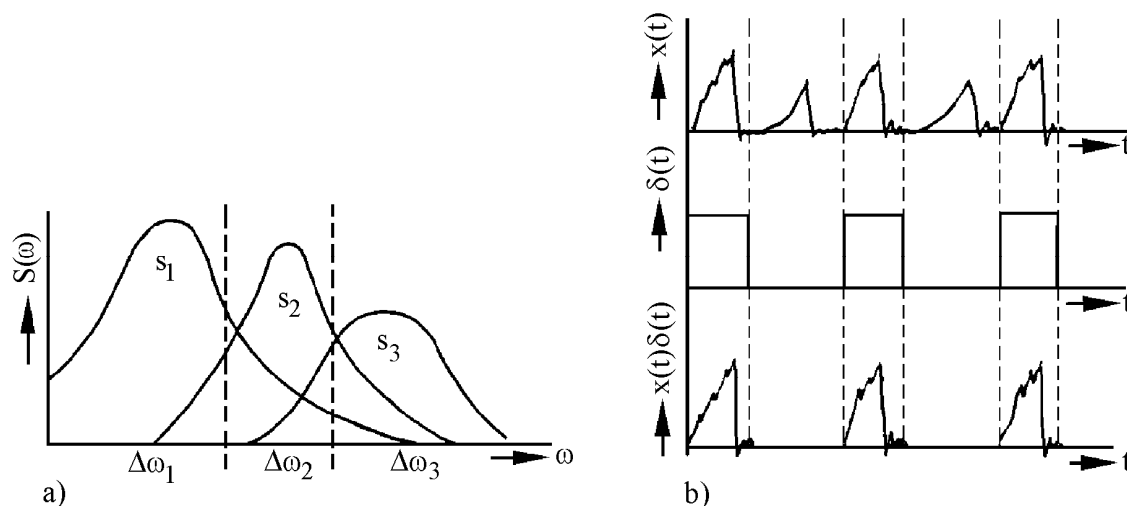
Akustické metody se opírají o měření veličin, popisujících kmity a vlnění v plynném prostředí, obvykle ve vzduchu, a to v rozsahu 20 Hz až 20 kHz, resp. 16 Hz až 16 kHz. Výběr akustických jevů jako zdrojů informace o technickém stavu objektu (vozidla) je určen několika důvody:

- Akustické jevy jsou odrazem nejpodstatnějších fyzikálních procesů, probíhajících uvnitř objektu (deformace, napětí, tření aj.);
- Akustické jevy mají velkou informační kapacitu, široké spektrum, signál tvoří mnoha složkový vektor;
- Akustické signály lze relativně snadno registrovat v přirozených podmínkách práce objektu;

Pohybující se části zařízení budí kmity povrchu a dochází k přenosu energie do okolí. Na hluku se podílejí mikroskopické silové impulsy, způsobené vzájemným pohybem nepřesných nebo opotřebovaných ploch v místě styku párových součástí a měnicí se třecí síly. Hluk se šíří nejen pevnými látkami, ale také kapalnými a plynnými. Většina zdrojů hluku tvoří zdroje vyšších řádů a má směrové účinky. Specifickými zdroji hluku jsou především ložiska, převodovky, spalovací motory, kompresory, elektrické stroje točivé aj. Postup diagnózy objektu spočívá v rozpoznávání (identifikaci) signálu produkovaného objektem. Přitom množina všech stavů, ve kterých se objekt může nacházet, je nekonečně velká a nespočetná. Snížení mohutnosti množiny stavů dosahujeme klasifikací stavů. V důsledku této klasifikace různé stavy objektu, vyznačující se určitým příznakem, patří do jedné třídy, tj. berou se jako jediný stav a nerozlišují se při diagnóze.

Je zřejmé, že každá třída má velký počet gradací. Nelze tedy očekávat, že by všechny objekty, které patří do jedné z těchto tříd, vyzařovaly stejný akustický signál. Mezi stavem objektu (stroje, vozidla) a jeho výchozím signálem není tedy úplná jednoznačnost. Jednomu a témuž stavu odpovídá celá množina možných signálů. Variace signálů v mezích jedné třídy stavů je způsobena nepodstatnými rozdíly ve stavech, sjednocených do jediné třídy. Tuto variaci nazýváme šumem, který ztěžuje identifikaci stavu objektu na základě zaznamenaného akustického signálu. Zdrojem šumu může být např. hluk ostatních elementů objektu na signál diagnostikovaného uzlu aj. Je proto potřebné ze složitějšího akustického signálu, detekovaného snímačem, oddělit signál užitečný, a to nejčastěji metodou frekvenční filtrace nebo metodou časové selekce.

Jestliže se spektra signálů (spektrální hustota $S(\omega)$, spektrum signálu $x(t)$), emitované různými uzly mechanismu zcela nepřekrývají, je možné pomocí pásmového filtru propouštět do diagnostického systému pouze tu část signálu (a část šumu), která náleží frekvenční oblasti užitečného signálu, zatímco složky šumu, ležící mimo tuto oblast filtr zadrží viz obr. 6. 1a.



Obr. 6. 1 Metody získání užitečného akustického signálu

V některých případech signály, náležející jednotlivým uzlům, jsou rozloženy v čase (uzly v různých okamžicích začínají a končí činnost apod.). Pak lze tzv. strobováním signálu odstranit šum, rozložený mezi impulsy užitečného signálu, viz obr. 6. 1b.

Při akustické diagnostice jsou nejčastěji měřenými veličinami časové průběhy hladin akustického tlaku p , hladiny intenzity zvuku I a akustického výkonu P . Základní veličiny a charakteristiky akustické diagnostiky jsou uvedeny v tab. 6. 1.

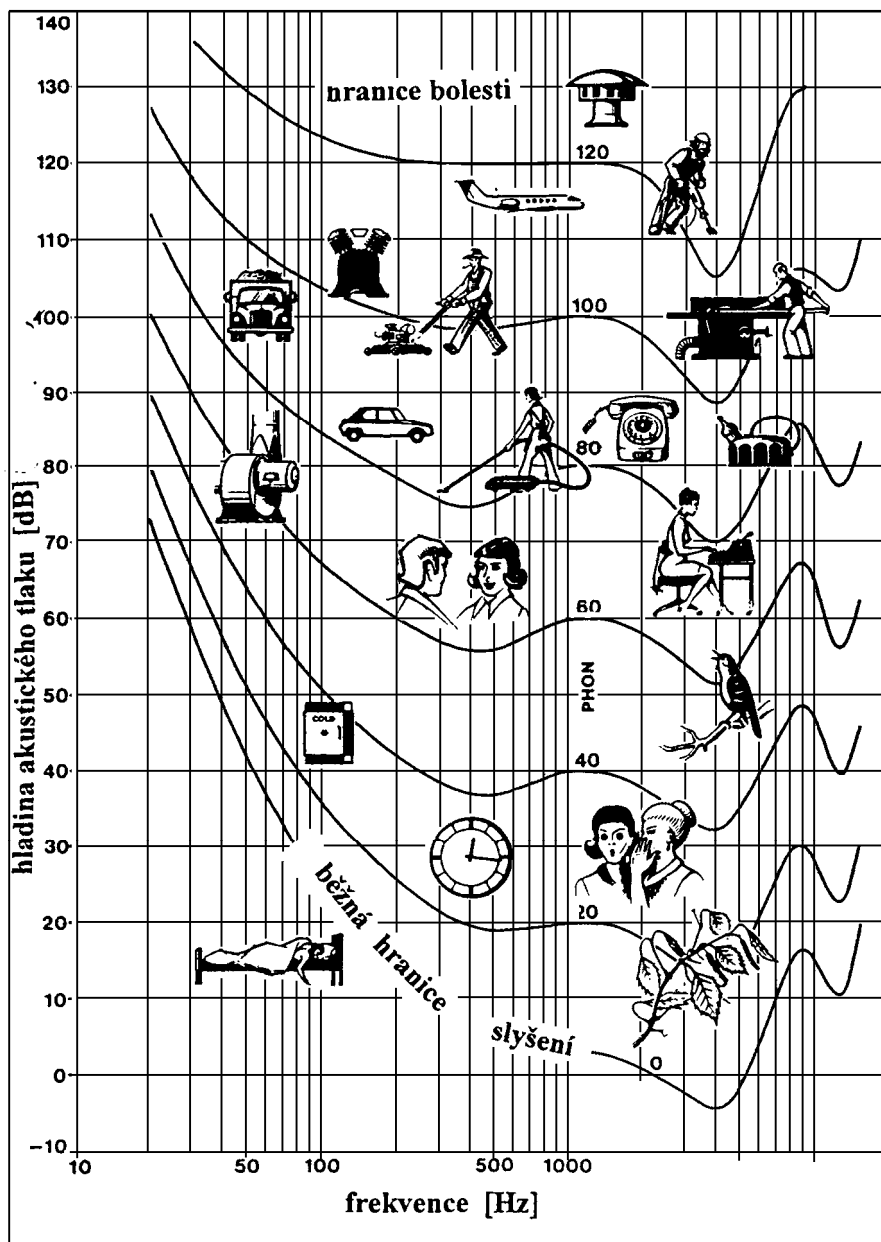
Tab. 6. 1 Vybrané akustické veličiny

Název	Vztah	Jednotka
Hladina akustického tlaku	$L = 20 \log \frac{P}{P_0}$	dB
Intenzita zvuku	$I = p \cdot v$	Wm^{-2}
Prahová intenzita	$I_0 = 1 \cdot 10^{-12}$	Wm^{-2}
Hladina intenzity zvuku	$L_j = 10 \log \frac{I}{I_0}$	-
Akustický výkon	$P = I \cdot S$	W

Legenda: v ... akustická rychlost (ms^{-1}),

S ... celková plocha na níž je zvuk vyzařován (m^2).

Prahem slyšitelnosti pro lidské ucho je hodnota akustického tlaku $p_0 = 20\mu Pa$. Příklad typické hladiny akustického tlaku různých zdrojů hluku je na obr. 6. 2.



Obr. 6. 2 Typické hladiny akustického hluku

Příklady metod akustické diagnostiky:

A.) Diagnostika porovnáním naměřeného akustického signálu $x(t)$ s etalony

Nechť je s každým stavem w_i ($i = 1, 2, \dots, n$) spjat určitý standardní akustický signál $S_i(t)$. Standardní signály $S_i(t)$ (etalony - vzorové průběhy) jsou uchovávány např. v magnetické páskové paměti. Hluk diagnostikovaného objektu je snímán snímačem a přes

zesilovač a zpoždovací člen postupuje do násobícího bloku. Tam pomocí komutačního ústrojí přicházejí jednotlivé standardní signály $S_i(t)$. Korelátor stanoví vzájemnou korelační funkci vyjadřující shodu hluku mechanismu reprezentovaného signálem $x(t)$ a porovnávacích signálů $S_i(t)$. Vzájemná korelační funkce nabývá hodnot mezi 0 (zcela rozdílný průběh) a 1 (naprostá shoda signálů). Logické ústrojí pak porovná mezi sebou maxima vypočtených vzájemně korelačních funkcí a stanoví pro mechanismus ten stav w_i , jehož typový signál má největší korelaci s hlukem mechanismu.

Tato metoda akustické diagnostiky je vhodná především pro ty objekty a jejich uzly, jejichž hluk se vyznačuje výraznou periodickou strukturou. Jestliže je hluk mechanismu čistě náhodný proces, pak mezi libovolnými realizacemi nemůže být korelace a uvedené diagnostické zařízení nemůže odhalit jejich podobnost.

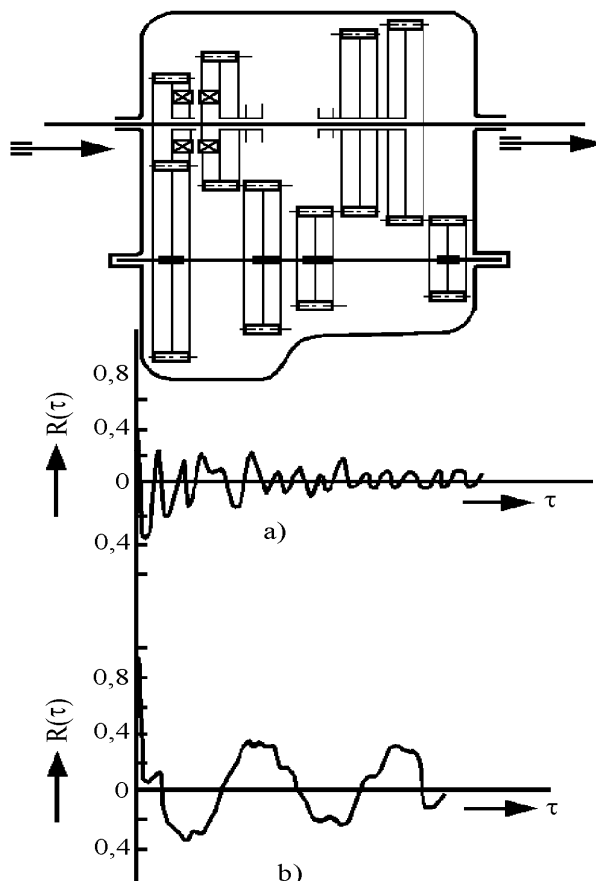
B.) Diagnostika prováděná odhalováním skryté periodické složky v náhodném akustickém signálu objektu

Hluk objektu (vozidla, stroje) vzniká vzájemným působením jeho částí. Pro mnohé mechanismy tato vzájemná působení představují náhodné, neuspořádané impulsy řádově stejné velikosti, které vybuzují v bezporuchovém stavu v částech stroje kmitání širokého a poměrně rovnoměrného spektra. Pokud se na objektu objeví porucha, vzniká mezi náhodnými hlukovými impulsy uspořádaná periodická posloupnost impulsů, jejichž velikost je podstatně větší než impulsů náhodných. Taková situace vzniká např. při nadměrné vůli hřídele převodovky v ložisku při tzv. "pittingu" v ložiskové dráze valivého ložiska, při poškození zubu některého pastorku aj. Lze říci, objeví-li se periodicitu v dosud náhodném průběhu hluku objektu diagnostiky, je to obvykle spjato se vznikem lokálního defektu viz obr. 6. 3.

C.) Diagnostika objektu porovnáním autokorelační funkce akustického signálu s etalony autokorelačních funkcí

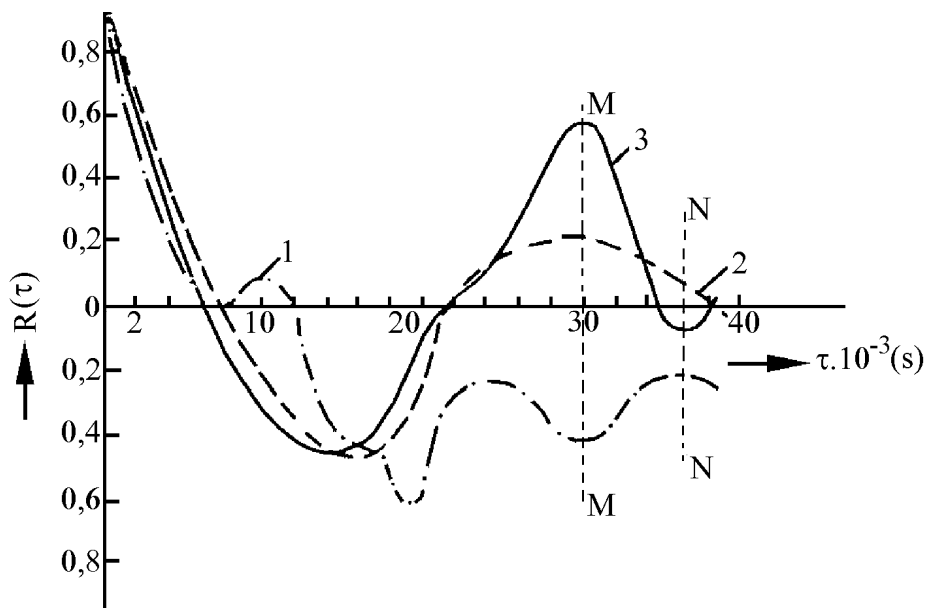
U řady objektů a jejich částí je akustický signál, který produkují, signálem náhodným. Znamená to, že v takovém případě porovnáním časových průběhů akustických signálů dvou objektů téhož typu a stejného technického stavu nenajdeme mezi signály shodné rysy. Signály se neshodují, jejich vzájemná korelační funkce je rovna 0. I časový průběh akustického signálu téhož objektu pak během krátkého časového intervalu vykazuje různě se měnící podobu. V tomto případě musíme pro náhodné časové průběhy akustického signálu $x(t)$

stanovit statistickou charakteristiku signálu, např. autokorelační funkce $R(\tau)$, která má nenáhodný průběh. Statistická charakteristika náhodného signálu je popisem základních (skrytých) vlastností signálu a umožňuje nám různé náhodné signály $x(t)$ mezi sebou rozlišovat, resp. najít signály shodné.



Obr. 6. 3 Diagnostika odhalením skryté periodické složky v náhodném akustickém signálu

Abychom získali vzorové průběhy $R(\tau)$, odpovídající jednotlivým technickým stavům objektu, vybereme z řady objektů představitele různých technických stavů, popř. objekt do různých technických stavů uměle uvedeme. Změříme průběhy signálu $x(t)$ pro jednotlivé technické stavy a pomocí korelátoru, získáme příslušné průběhy autokorelační funkce $R(\tau)$. Tyto funkce dále slouží jako etalony $R_i(\tau)$ i-tého stavu od korelační funkce, získané při diagnóze. Na obr. 6. 4 je znázorněn průběh autokorelační funkce akustického signálu startéru vozidla při různém technickém stavu daném zvětšující se radiální vůlí ložisek rotoru.



Obr. 6. 4 Autokorelační funkce rotoru startéru

Legenda: 1 ... normální stav – vůle 0,01 mm; 2 ... přípustný stav – vůle 0,03 mm; 3 ... poruchový stav vůle 0,06 mm;

6. 2 Vibrační metody diagnostiky

6 .2. 1 Úvod

Obecnou vlastností hmoty je její pohyb, jako změna stavu hmoty. Přitom nejčastější formou pohybu hmotných objektů je pohyb kmitavý. Kmitáním (vibracemi, chvěním) pak rozumíme periodicky se opakující změnu stavu. Při mechanickém kmitání se jedná o dynamický jev, kdy hmotný bod nebo tuhé těleso zaujímají v čase různé polohy v prostoru tak, že se pohybují v určitém intervalu vzdáleností, který nepřekročí, kolem rovnovážné střední polohy. Jedná se o vratný pohyb kolem klidové rovnovážné polohy. Fyzikální podstata procesů, ve kterých se projevují kmity, je velmi různorodá. Základní zákony kmitů jsou však vždy totožné. Objekt, v němž kmitavý pohyb nastává, se nazývá kmitavá soustava, popř. oscilátor. Podle vnějších znaků dělíme kmitání na periodické a neperiodické. Periodicky kmitá např. kyvadlo hodin, zdravé lidské srdce aj., neperiodicky např. větve stromů při větru, hladina moře aj. Kmitavý pohyb je periodický, jestliže veličina charakterizující kmitání je

periodickou funkcí času t a platí-li relace $f(t + T) = f(t)$. Časový interval T , po jehož uplynutí se celý proces opakuje se nazývá periodou (tj. dobou kmitu, což znamená, že se jedná o čas, který uplyne mezi dvěma po sobě následujícími stejnými stavy pohybu). Převrácená hodnota periody se nazývá kmitočtem nebo frekvencí a platí $f = 1/T$. Kmitočet je plný počet cyklů kmitavého pohybu za 1s a vyjadřuje se v Hz, tj. kmitočet tedy nese informaci o tom, kolikrát se periodický děj opakuje během jedné sekundy. Úhlová frekvence je pak dána vztahem $\omega = 2\pi f$, resp. $\omega = 2\pi/T$ [s^{-1}]. Kmitání lze tedy popsat polohovým vektorem tj. výchylkou (amplitudou) a úhlem (fází) v časovém okamžiku. Mezi periodickými kmity mají zvláštní místo kmity harmonické. Kmitání, které je harmonickými funkcemi času, lze vyjádřit funkcí sin, popř. cos, kdy argument funkce je lineární funkcí času. Např. při mechanickém kmitání v jednom směru lze okamžitou výchylku s vyjádřit rovnicí, která je odvozena v odstavci 6.2.2.2.

$$s = s_0 \sin(\omega t + \varphi_0), \quad (6.1)$$

kde s_0 ...amplituda, tj. maximální výchylka z rovnovážného stavu,

ω ...úhlová (kruhová) frekvence vlastních kmitů,

φ_0 ...počáteční fáze v čase $t = 0$,

$(\omega t + \varphi_0)$...fázový úhel (fáze).

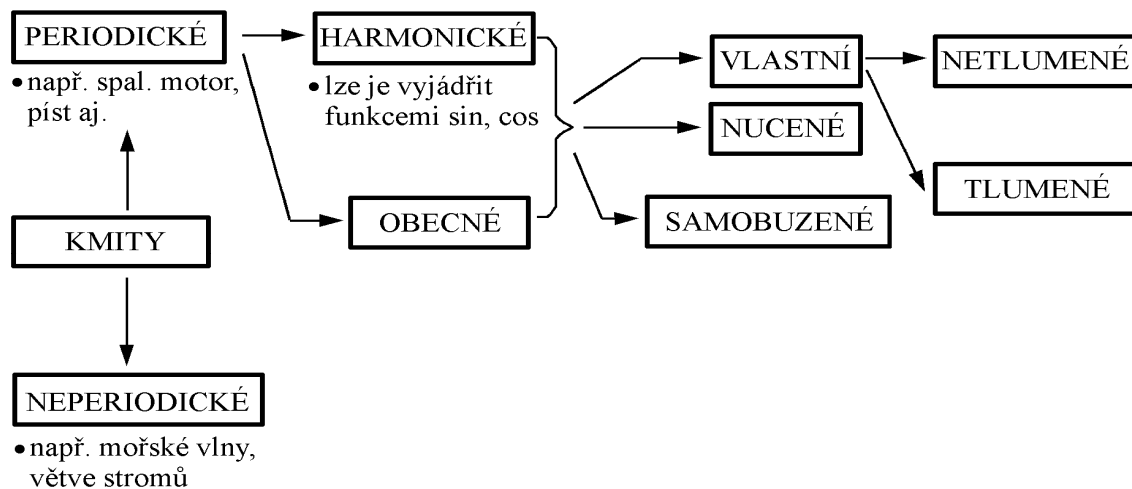
Kmity můžeme dělit podle toho, zda jsou v závislosti na počátečních podmínkách závislé jen na vlastnostech samotné kmitavé soustavy nebo také na interakci s okolím. Podle tohoto kritéria dělíme kmity na:

- **volné (vlastní)** tlumené nebo netlumené, které vznikají počátečním vnějším podnětem v izolovaných soustavách. Jejich charakter závisí pouze na vnitřních silách soustavy. Počáteční energii získávají volné (vlastní) kmity počátečním vnějším podnětem.
- **nucené**, které se realizují pod vlivem trvalých vnějších periodických podnětů – sil, které jsou nezávislé na vlastních kmitech soustavy. Charakter těchto kmitů závisí nejen na vlastnostech kmitající soustavy, ale také na vnějších periodických podnětech. Energií nuceným kmitům dodává vnější podnět – síla.
- **samobuzené** kmity mají vlastní zdroj energie, z něhož ji odebírají v rytmu vlastních kmitů. Jejich vlastnosti se dají zjistit rozбором pohybové rovnice, což je však mimořádně obtížné, protože jde o nelineární diferenciální rovnici, jejíž tvar je případ

od případu jiný. Vlastnosti samobuzených kmitů lze určit z fázového obrazu ve fázové rovině s využitím zobecněných souřadnic, popř. z energetické bilance, což jsou řešení mimo rozsah tohoto materiálu.

Matematicky se kmity vyjadřují diferenciálními rovnicemi, které jsou pohybovými rovnicemi kmitů a popisují je z hlediska dynamiky, tj. z hlediska jejich příčiny. Řešením diferenciálních pohybových rovnic jsou tzv. vlnové funkce kmitů. Řešení popisuje kmity z hlediska kinematiky, tj. popisuje časovou závislost veličin charakterizujících kmity. Podle tvaru pohybových rovnic kmitů dělíme kmity na kmity v lineárních a nelineárních soustavách. Rozdíl spočívá v tom, že v lineární kmitavé soustavě můžeme na základě analýzy jednoho procesu činit obecné závěry pro všechny obdobné kmitavé procesy. V nelineárních soustavách tento postup možný není.

Častým případem je skutečnost, že jednotlivé kmitavé soustavy jsou ve vzájemné interakci, tj. vzájemně se ovlivňují. Interakce se projevuje obvykle vzájemnou časovou závislostí amplitud jednotlivých kmitavých soustav. Příčinu této vzájemné interakce nazýváme vazbou. Dělení kmitů podle vnějších znaků a interakce s okolím je uvedena na obr. 6. 5



Obr. 6. 5 Dělení kmitů podle vnějších znaků a interakce kmitavých soustav s okolím

6. 2. 2 Periodické harmonické vlastní (volné) netlumené kmity

V reálných kmitavých soustavách dochází k rozptylu (disipaci) a přeměně energie, která se obvykle mění na energii tepelnou.

6. 2. 2. 1 Lineární harmonická kmitavá soustava a její pohyb

Lineární harmonická kmitavá soustava je plně popsána lineární diferenciální rovnicí. Mějme malou hmotnou částici připevněnou na pružině o zanedbatelné hmotnosti. Při malé

deformaci pružiny (v tahu nebo tlaku) vznikne v pružině síla, která, podle Hookova zákona, je přímo úměrná velikosti deformace. Tato síla pružnosti pak působí jako vratná síla, která, při uvolnění deformované pružiny, se snaží obnovit rovnovážný stav, tj. původní délku pružiny. Pružina s hmotnou částicí však vlivem setrvačnosti projde rovnovážnou polohou do druhé krajní výchylky a celý proces se opakuje v opačném směru. Z tohoto příkladu je zřejmé, že volné kmity mohou nastat v takových soustavách, ve kterých existuje rovnovážný stav. To však nestačí, jsou-li takové soustavy vychýleny z rovnovážného stavu, musí v nich vzniknout síly, které opět nutí soustavu k návratu do původního (rovnovážného) stavu. Pro realizaci vlastních kmitů je nutná existence dvou faktorů:

- pružnosti soustavy (tuhosti pružiny) a
- setrvačnosti (hmotnosti).

Pružnost uskutečňuje návraty do rovnovážného stavu a setrvačnost uskutečňuje překmitávání rovnovážným stavem.

6. 2. 2. 2 Pohybová rovnice harmonických kmitů

Síla pružnosti soustavy je reakcí na vnější podnět (sílu), který narušil rovnovážný stav. Okamžitou výchylku z rovnovážného stavu označíme s . V mechanických soustavách využijeme Newtonovy pohybové zákony, kdy podle třetího Newtonova pohybového zákona je reakční síla stejně velká jako vnější síla, ale má opačnou orientaci. Zároveň z Hookova zákona dostaneme

$$F = -ks, \quad (6.2)$$

kde sílu F nazýváme vratnou (direkční) silou a součinitel k je tuhost (pružnost) soustavy. Podle druhého Newtonova pohybového zákona platí

$$F = m \frac{d^2s}{dt^2}, \quad (6.3)$$

kde m je hmotnost.

Spojením rovnic (6.2) a (6.3) dostaneme

$$ma + ks = 0 \quad (6.4)$$

a po úpravě

$$a + \frac{k}{m}s = 0. \quad (6.5)$$

Soustavy popsané rovnicí (6.5) nazýváme lineární harmonické kmitavé soustavy. Ukazuje se, že kmity kmitavé soustavy budou harmonické, když vratná (direkční, někdy

nazývaná direktivní) síla bude přímo úměrná výchylce s a má, vzhledem k výchylce, opačnou orientaci. Je-li síla uvedených dvou vlastností vyvolána pružností soustavy, pak ji nazýváme silou **elastickou**. Každá jiná síla, která není vyvolána pružností soustavy, ale má obě popsané vlastnosti, je silou kvazielastickou. Rovnice (6. 5) je lineární diferenciální rovnice 2. řádu s konstantními koeficienty a nulovou pravou stranou pro lineární netlumené harmonické kmitavé děje (soustavy). Jejím řešením je vlnová funkce, která je harmonickou funkcí času. Rovnici vyhovují partikulární integrály

$$s_1 = \cos \omega t \quad a \quad s_2 = \sin \omega t, \quad (6. 6)$$

kde ... $\omega^2 = \frac{k}{m}$ je druhá mocnina úhlové (kruhové) frekvence kmitů.

Obecný integrál je lineární kombinací partikulárních integrálů

$$s = C_1 \cos \omega t + C_2 \sin \omega t. \quad (6. 7)$$

Koeficienty C_1, C_2 jsou libovolné konstanty, které můžeme zvolit např. ve tvaru

$$C_1 = s_0 \sin \varphi_0 \quad a \quad C_2 = s_0 \cos \varphi_0,$$

kde s_0 a φ_0 jsou konstanty.

Dosadíme-li do (6. 7) a upravíme, pak dostaneme

$$s = s_0 \sin (\omega t + \varphi_0). \quad (6. 8)$$

Z rovnice (6. 8) vyplývá, že konstanta s_0 má význam maximální výchylky z rovnovážného stavu a nazývá se amplituda. Argument funkce sin, tj. $(\omega t + \varphi_0)$ se nazývá fázový úhel neboli fáze, přitom φ_0 je počáteční fáze, tj. fáze v okamžiku $t = 0$. Z vlastností goniometrických funkcí plyne, že vzroste-li fáze o 2π , výchylka se opakuje. To nastane vždy po uplynutí časového intervalu T , určeného vztahem $\omega T = 2\pi$, kde T je perioda kmitů pro níž platí

$$T = \frac{2\pi}{\omega}. \quad (6. 9)$$

Veličina ω je úhlová (kruhová) frekvence vlastních kmitů a souvisí s frekvencí f vztahem

$$f = \frac{1}{T} = \frac{\omega}{2\pi}. \quad (6.10)$$

6. 2. 2. 3 Rychlost a zrychlení harmonických kmitů

Z definice pro rychlost platí $v = \frac{ds}{dt}$

$$v = \omega s_0 \cos(\omega t + \varphi_0) = v_0 \sin(\omega t + \varphi + \frac{\pi}{2}), \quad (6. 11)$$

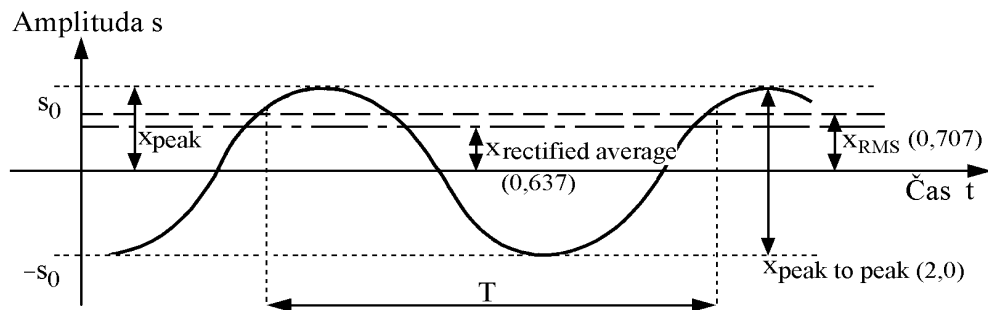
a pro zrychlení platí $a = \frac{dv}{dt} = \frac{d^2s}{dt^2}$

$$a = -\omega^2 s_0 \sin(\omega t + \varphi_0) = a_0 \sin(\omega t + \varphi + \pi). \quad (6. 12)$$

Z těchto rovnic plyne

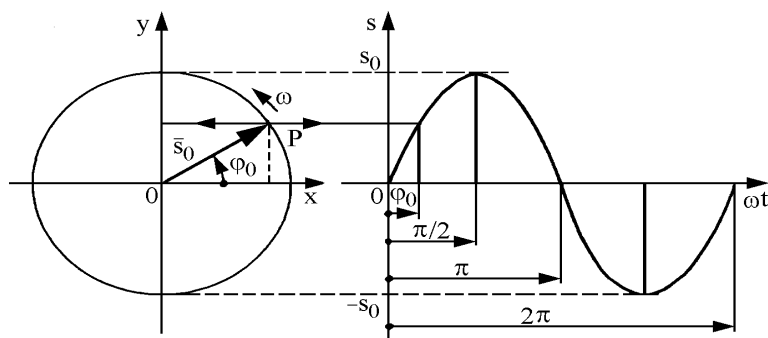
$$a_0 = \omega^2 s_0 \quad \text{a} \quad v_0 = \omega s_0. \quad (6. 13)$$

Z rovnic (6. 8), (6. 11) a (6. 13) vidíme, že zrychlení předbíhá rychlost o $\frac{\pi}{2}$ a výchylku o π , rychlost předbíhá výchylku o $\frac{\pi}{2}$. Časové rozvinutí okamžité výchylky a její popis z hlediska diagnostických signálů je na obr. 6. 6.



Obr. 6. 6 Časové rozvinutí okamžité výchylky s harmonických kmitů a její popis z hlediska diagnostických signálů

Harmonickou změnu hodnoty libovolné veličiny, s okamžitou hodnotou $s = s_0 \sin \omega t$, můžeme modelovat např. kolmým průmětem rovnoměrného pohybu bodu (P) po kružnici o průměru $r = s_0$, do libovolného průmětu kružnice, např. do osy y, obr. 6. 7.



Obr. 6. 7 Harmonické kmitání jako průmět rovnoměrného kruhového pohybu bodu P

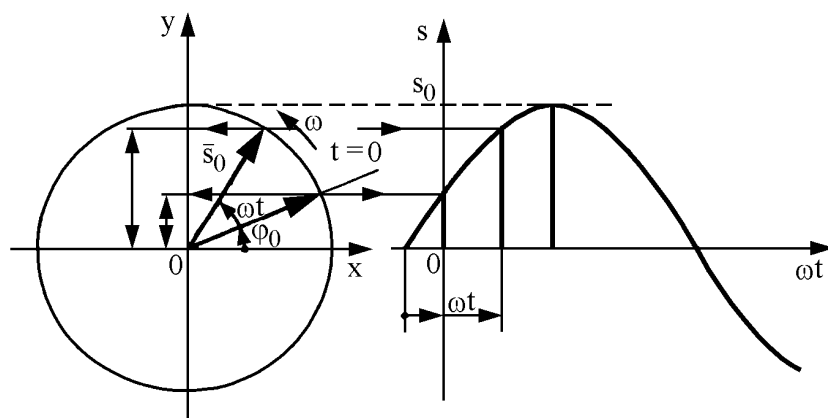
Okamžitá poloha bodu P je určena vektorem s_0 s počátkem ve středu křivosti kružnice O. Vektor amplitudy harmonické změny hodnot veličiny s se otáčí zároveň s bodem P stálou úhlovou rychlostí ω . Takovému rotujícímu vektoru, který je obrazem veličiny, někdy říkáme fázor. Průmět rotujícího vektoru s_0 do osy y určuje okamžitou hodnotu příslušné veličiny s , kdy platí

$$s = s_0 \sin \omega t .$$

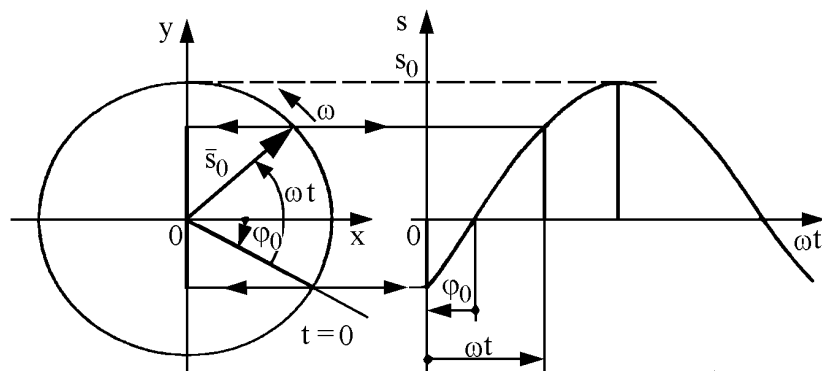
Průmět téhož vektoru do osy x popisuje harmonické kmity s okamžitou výchylkou vyjádřenou vztahem

$$s = s_0 \cos \omega t .$$

Počáteční fázi φ_0 harmonické změny $s = s_0 \sin (\omega t + \varphi_0)$ můžeme vyjádřit takovou (počáteční) polohu rotujícího vektoru s_0 v okamžiku $t = 0$, v níž svírá s kladným směrem osy x úhel φ_0 viz obr. 6. 8 a 6. 9.



Obr. 6. 8 Rotující vektor s_0 s kladnou počáteční fází φ_0



Obr. 6. 9 Rotující vektor s_0 se zápornou počáteční fází φ_0

6. 2. 2. 4 Energie mechanické harmonické kmitavé soustavy

Spojme rovnice (6. 2) a (6. 3) do tvaru

$$-ks = m \frac{d^2 s}{dt^2}$$

a aplikujme ji na kmitající pružinu. Vynásobíme-li rovnici rychlosti kmitů $\frac{ds}{dt}$, dostaneme

$$-ks \frac{ds}{dt} = m \frac{d^2 s}{dt^2} \frac{ds}{dt} .$$

Po integraci máme

$$C - \frac{1}{2} k s^2 = \frac{1}{2} m \left[\frac{ds}{dt} \right]^2 , \quad (6. 14)$$

kde C ...integrační konstanta.

Pravá strana rovnice (6. 14) vyjadřuje kinetickou energii mechanické harmonické kmitavé soustavy $W_K = \frac{1}{2} m v^2$. Proto levá strana rovnice musí vyjadřovat potenciální energii této

kmitavé soustavy $W_P = \frac{1}{2} k s^2$.

Rovnici (6. 14) upravíme do tvaru

$$C = \frac{1}{2} m v^2 + \frac{1}{2} k s^2 , \quad (6. 15)$$

Dosadíme-li do (6. 15) vztahy (6. 8) a (6. 11) pak po úpravě máme

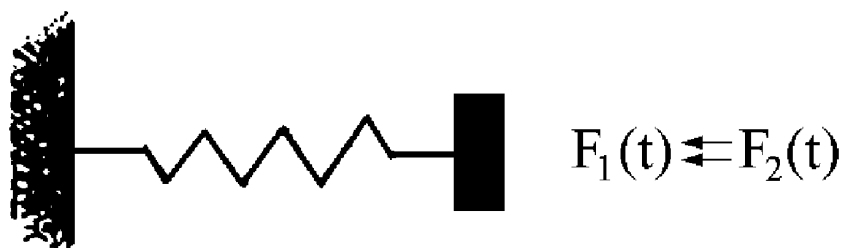
$$C = W_K + W_P = \frac{1}{2} m \omega^2 s^2. \quad (6.16)$$

Celková mechanická energie mechanické lineární harmonické kmitavé soustavy je úměrná čtverci amplitudy a frekvence, ale nezávisí na počáteční fázi. W_K je maximální, když rychlost mechanických kmitů soustavy je maximální (tj. v okamžiku, když soustava prochází rovnovážným stavem). W_P je maximální, když okamžitá výchylka z rovnovážného stavu je maximální.

6. 2. 2. 5 Skládání harmonických kmitů

Častý případ jsou kmitavé soustavy, které současně konají více vzájemně nezávislých kmitavých pohybů. Platí princip superpozice, kdy kmity se skládají ve výsledný kmit (pohyb), aniž se přitom dělčí kmity vzájemně ovlivňují. Okamžitá výsledná výchylka kmitů je rovna součtu dílčích okamžitých výchylek. Jsou-li kmity stejnosměrné obr. 6. 10, lze okamžité dílčí výchylky sčítat algebraicky. Mají-li kmity různý směr, musíme je sčítat vektorově (geometricky). Pro názornost uvádíme pouze skládání stejnosměrných harmonických kmitů se stejnými frekvencemi. Kmity probíhají pouze v jednom směru, ale jejich smysl se periodicky mění. Uvažujeme lineární kmitavou soustavu, která koná dva stejnosměrné harmonické kmitavé pohyby se stejnými frekvencemi, ale různými amplitudami a různými počátečními fázemi, platí

$$\left. \begin{aligned} s_1 &= s_{o1} \sin(\omega t + \varphi_{01}) \\ s_2 &= s_{o2} \sin(\omega t + \varphi_{02}) \end{aligned} \right\} \quad (6.17)$$



Obr. 6. 10 Příklad jednoduché stejnosměrné harmonické kmitavé soustavy

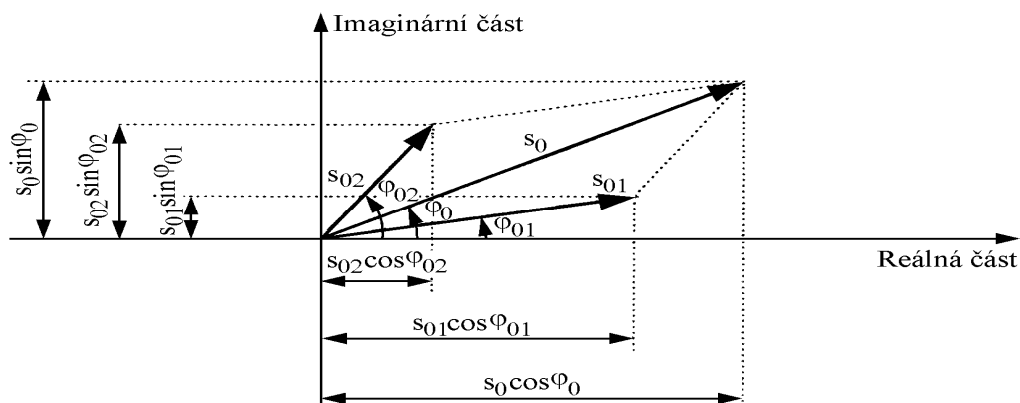
Protože výchylky jsou stejnosměrné můžeme rovnice (6. 17) sečíst algebraicky, kdy platí

$$s = s_1 + s_2 \quad (6.18)$$

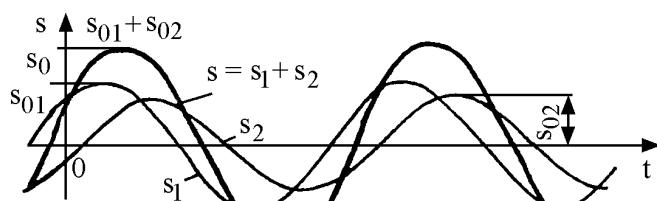
po úpravách dostaneme

$$s = s_0 \sin(\omega t + \varphi_0) \quad (6.19)$$

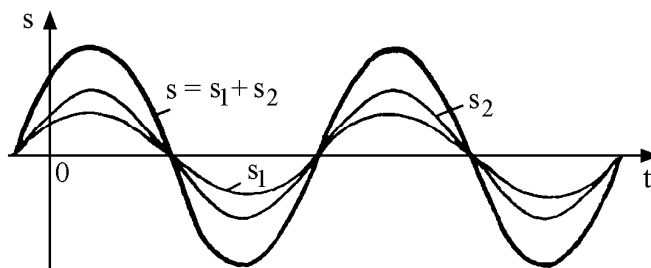
tj. výsledné kmitání je opět harmonické s novou amplitudou s_0 , frekvencí ω obou skládaných kmitů a novou počáteční fází φ_0 . Tytéž kmity lze složit graficky v rovině komplexních čísel viz obr. 6. 11.



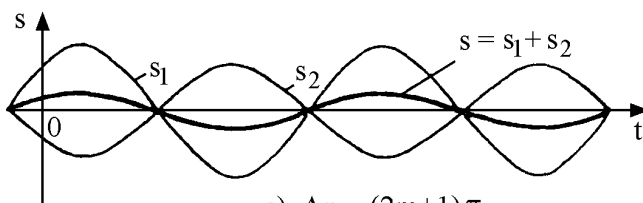
Obr. 6. 11 Grafické skládání dvou stejnosměrných harmonických kmitů



a) $\Delta\varphi \in (0, \pi)$



b) $\Delta\varphi = 2m\pi$



c) $\Delta\varphi = (2m+1)\pi$

Obr. 6. 12 Časový průběh kmitů s různými amplitudami s_1 , s_2 , stejnými frekvencemi, kdy výsledná amplituda s_0 závisí na fázovém rozdílu $\Delta\varphi$ ($m = 0, \pm 1, \pm 2 \pm \dots$)

6. 2. 3 Periodické harmonické vlastní tlumené kmity

Každá kmitavá soustava má tři základní vlastnosti a to: tuhost, setrvačnost a tlumení. Obecně tlumení kmitavých procesů je žádoucí (úmyslné např. tlumiče vozidel, měřících přístrojů aj.) nebo nežádoucí (přirozené). Průběh tlumeného kmitání závisí na odporových silách, které mohou být konstantní (např. odpor proti vlečení aj.) nebo jsou úměrné rychlosti. Energie vlastních (volných) kmitů kmitavé soustavy se vlivem odporů mění obvykle v teplo. Přísně rozlišeno, takové kmity již nejsou harmonické, protože není splněna podmínka periodičnosti, tj. kmitavý pohyb se po uplynutí periody T , již přesně neopakuje. Amplituda vlastních harmonických tlumených kmitů s časem klesá.

6. 2. 3. 1 Pohybová rovnice vlastních tlumených kmitů

Předpokládáme, že se mechanická lineární harmonická kmitavá soustava nachází v prostředí, jehož síla odporu, kterou klade kmitům, je přímo úměrná rychlosti kmitů. Tato úměra mezi odporem a rychlosti pohybu platí pro malé rychlosti, což v praxi bývá často splněno. Podle druhého Newtonova zákona platí

$$F_{\text{pružnosti}} + F_{\text{odporu}} = ma \quad \text{tj.} \quad -ku - R \frac{ds}{dt} = m \frac{d^2s}{dt^2},$$

kde s ... okamžitá výchylka,

R ... součinitel odporu prostředí [kg/s].

Po úpravě dostaneme pohybovou rovnici tlumených kmitů

$$\frac{d^2s}{dt^2} + 2\delta \frac{ds}{dt} + \omega^2 s = 0, \quad (6. 20)$$

kde $\delta = \frac{R}{2m}$... součinitel tlumení (konstanta útlumu) [s^{-1}],

$\omega = \sqrt{\frac{k}{m}}$... úhlová frekvence vlastních netlumených kmitů soustavy.

Ze vztahu pro δ plyne, že při daném R je kmitavá soustava s větší hmotností m (setrvačností) tlumena méně než s menší hmotností. Jednotkou konstanty útlumu $1 s^{-1}$. Rovnice (6. 20) je lineární diferenciální rovnicí druhého řádu s konstantními koeficienty a nulovou pravou stranou. Každé takové rovnici vyhovuje integrál

$$s = Ce^{\lambda t}, \quad (6. 21)$$

kde λ je kořen tzv. **charakteristické rovnice** vzniklé dosazením (6. 21) do (6. 20)

$$\lambda^2 + 2 \delta \lambda + \omega^2 = 0 . \quad (6.22)$$

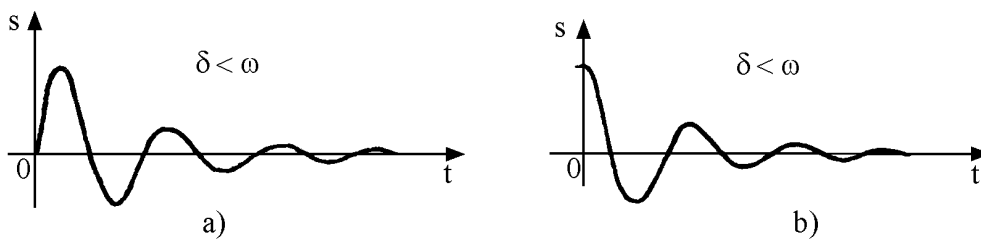
Řešením rovnice (6. 20) je

$$\lambda_{1,2} = - \delta \pm \sqrt{\delta^2 - \omega^2} \quad (6.23)$$

Protože δ a ω jsou vzájemně nezávislé veličiny existují celkem tři řešení:

1) **Pro $\delta < \omega$** (slabý útlum) dostaneme dva komplexně sdružené kořeny, kdy platí

$$s = s_0 e^{-\delta t} \sin (\omega_{t1} + \varphi_0) . \quad (6.24)$$



Obr. 6. 13 Časový průběh tlumených kmitů pro: a) $s_{t=0} = 0, v_{t=0} \neq 0$; b) $s_{t=0} \neq 0, v_{t=0} = 0$.

Perioda tlumených kmitů je větší než u netlumené kmitavé soustavy a platí

$$T_{tl} = \frac{2\pi}{\omega} = \frac{2\pi}{\sqrt{\omega^2 - \delta^2}} . \quad (6.25)$$

Poměr dvou výchylek kmitavé soustavy na tutéž stranu od rovnovážné polohy je definován vztahem

$$\lambda = e^{\delta T} \quad (6.26)$$

a nazývá se útlum.

Přirozený logaritmus útlumu se nazývá logaritmický dekrement A a platí

$$A = \ln e^{\delta T} = \delta T . \quad (6.27)$$

2) **Pro $\delta = \omega$** (kritické tlumení) dostaneme dvojnásobný kořen $\lambda_1 = \lambda_2 = - \delta$. Obecné řešení rovnice (6. 20) je dáno superpozicí exponenciálních křivek, je neperiodické a s časem $s \rightarrow 0$ a platí

$$s = (s_{01} + s_{02} t) e^{-\delta t} . \quad (6.28)$$

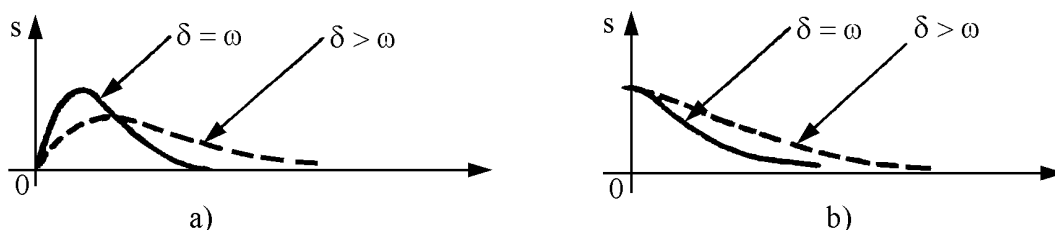
Průběh kritického tlumení je znázorněn na obr. 6. 14 (plné čáry).

- 3) Pro $\delta = \omega$ silné, tzv. nadkritické tlumení viz obr. 6. 14 (přerušované čáry) dostaneme dva různé záporné kořeny charakteristické rovnice, pohyb je neperiodický, obecné řešení rovnice (6. 20) je dáno opět superpozicí dvou exponenciálních křivek a platí

$$s = s_{m1} e^{-\delta_1 T} + s_{m2} e^{-\delta_2 T}, \quad (6. 29)$$

kde

$$\lambda_{1,2} = -\delta \pm \sqrt{\delta^2 - \omega^2} < 0. \quad (6. 30)$$



Obr. 6. 14 Průběh kmitů s kritickým tlumením (plné čáry) a nadkritickým tlumením (přerušované čáry) pro: a) $s_{t=0} = 0, v_{t=0} \neq 0$; b) $s_{t=0} \neq 0, v_{t=0} = 0$.

6. 2. 4. Úvod do vibrodiagnostiky strojů

Kmitání (vibrace, chvění) stroje je velmi citlivým ukazatelem namáhání, technického stavu stroje a jeho funkce. Týká se to zejména ložisek, hřídelů, klikových ústrojí, vačkových mechanismů, nevyvážených rotačních součástí, vřelí rotačních součástí aj. Tato skutečnost je masivně využívána pro monitorování stavu strojů a jejich diagnostiku. Nejjednodušší formou je realizace širokopásmových **měření celkových úrovní vibrací**. Většinou v definovaném rozsahu podle platných norem, či doporučení výrobců a uživatelů pro dané konkrétní zařízení. Více informací můžeme získat na základě tzv. **kmitočtové analýzy**. Zde se využívají složitější metodiky a přístrojové vybavení pro získání **charakteristického kmitočtového spektra vibrací** stroje. Měření se provádí systematicky, cíleně, obvykle nejprve na stroji v bezvadném technickém stavu s dalšími opakováními s časovou periodou danou konkrétním typem stroje a druhem jeho provozu. Jak se postupně mění (zhoršuje) technický stav stroje, mění se i charakteristické kmitočtové spektrum, resp. především jeho jednotlivé složky mající

vztah k jeho jednotlivým částem (ozubená kola, ozubená soukolí, hřídele, ložiska, rotory, setrvačnický, klouby aj.). Na základě sledování a analýzy těchto změn spekter lze bezdemontážním způsobem velmi účinně diagnostikovat, detekovat, identifikovat, lokalizovat a popř. prognózovat vznikající poruchu.

6. 2. 4. 1 Kvantitativní hodnocení vibrací v časové oblasti

V praxi se používají následující metodiky pro hodnocení amplitud vibrací v časové oblasti, (obr. 6. 15) které přímo odhalují škodlivost a v některých případech i nebezpečnost vibrací. V časové oblasti se obvykle jedná o:

- Vrcholovou hodnotu (Peak Level - X_{peak} , popř. S_{peak}), která udává maximální amplitudu a obvykle se využívá pro popis mechanických rázů, resp. dalších relativně krátkodobých jevů. X_{peak} však pouze indikuje přítomnost špičky, ale nese informace o časovém průběhu ani o kmitočtovém složení hodnocených vibrací.
- Maximální rozkmit (peak to peak - $X_{\text{peak-to-peak}}$, popř. $S_{\text{peak-to-peak}}$), tzv. dvojitá amplituda, která se využívá pro posouzení maximálně přípustného mechanického namáhání a vůlí dané konstrukce.
- Střední hodnota (Average Level - $X_{\text{rectified average}}$, popř. $S_{\text{rectified average}}$), která popisuje časový průběh sledovaných vibrací – tato hodnota má omezený význam, protože nepopisuje žádné důležité fyzikální procesy.
- Efektivní hodnota (Root Mean Square - X_{RMS} , popř. S_{RMS}) je často užívanou hodnotou, protože nese informace o časovém průběhu vibrací a je v přímém vztahu k energetickému obsahu měřených vibrací.
- Crest Factor, který definuje poměr mezi vrcholovou a efektivní hodnotou. Pro harmonické kmitání (sinusový průběh) je Crest Factor roven odmocnině z 2. Pro náhodné signály Crest Factor roste v souvislosti s opotřebením, pittingem, lomy, trhlinami aj. což se v diagnostice s výhodou využívá.

Popis vybraných signálů pro harmonické kmitání je uveden na obr. 6. 6.

Jako určujících veličin harmonického kmitání se používá nejčastěji efektivních hodnot výchylky, rychlosti a zrychlení s_{ef} , v_{ef} , a_{ef} . Dále se používá amplitud výchylky s_0 , rychlosti v_0 a zrychlení a_0 , resp. jejich absolutní hodnoty.

Aritmetický průměr absolutní hodnoty výchylky je dán vztahem

$$|s|_a = \frac{1}{T} \int_0^T s^2(t) dt, \quad (6.31)$$

přítom s je funkcí proměnné t . Obdobné vztahy platí i pro aritmetický průměr hodnoty rychlosti a zrychlení.

Nejužívanější určující veličinou je efektivní hodnota, pro kterou platí

$$s_{ef} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T s^2(t) dt}. \quad (6.32)$$

Dosažením a provedením výpočtů dostaneme vztahy

$$s_{ef} = \frac{s_0}{\sqrt{2}} = \frac{\pi}{2\sqrt{2}} |s|_a = \frac{1}{F_c} s_0 = F_f |s|_a, \quad (6.33)$$

kde F_f ... činitel tvaru

F_c ... špičkový faktor

Pro harmonické kmitání platí $F_f = \frac{\pi}{2\sqrt{2}} = 1,11$ a $F_c = \sqrt{2} = 1,414$.

V souvislosti s častým hodnocením mechanického kmitání, které působí na člověka, se používá tzv. hladina určující veličiny, která je definovaná jako dvacetinásobek dekadického logaritmu určující veličiny k její referenční hodnotě. Jednotkou je dB. Např. pro hladinu zrychlení platí

$$L(a) = 20 \log \frac{a_{ef}}{a_{0ef}}, \quad (6.34)$$

kde a_{0ef} ... efektivní hodnota referenčního zrychlení

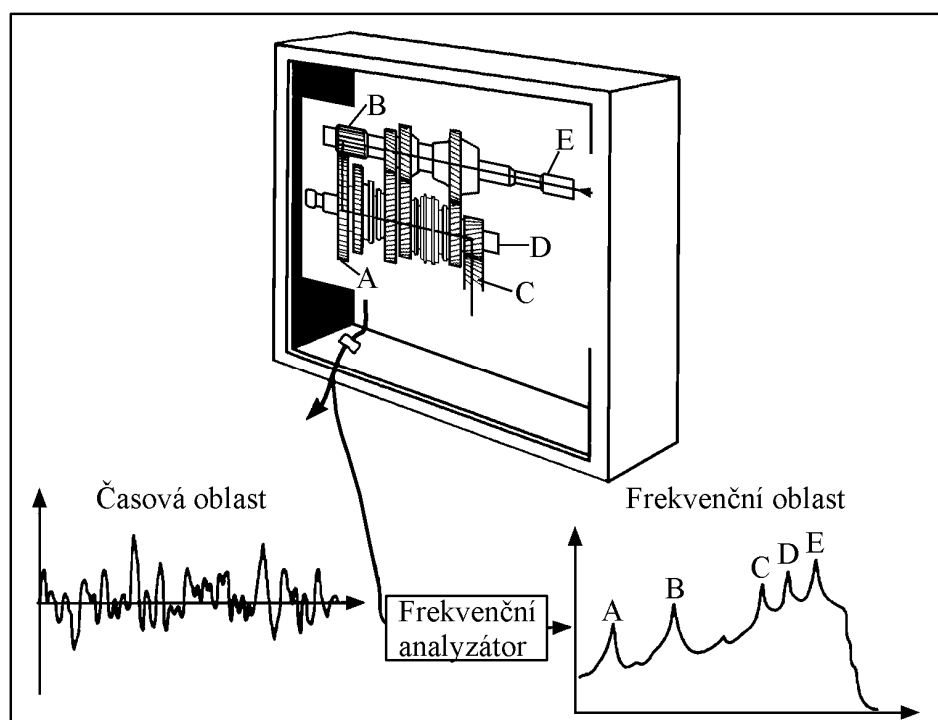
Uvedené a vybrané další veličiny a vztahy mechanického kmitání jsou uvedeny v tab. 6. 1

Tab. 6. 1 Vybrané veličiny a vztahy mechanického kmitání

Značka	Jednotka	Název a vysvětlení
S, X	m	okamžitá výchylka kmitů, tj. vzdálenost kmitajícího bodu (tělesa) od zvoleného bodu (displacement)
s_0, x_0	m	amplituda kmitání, tj. maximální hodnota určující veličiny harmonického kmitání (amplitude)
x_{peak} (1,0)	m	výkmit, tj. maximální hodnota určující veličiny v daném časovém intervalu (peak – x_{peak})
$x_{peak\ to\ peak}$ (2,0)	m	rozkmit, (dvojitá amplituda) tj. maximální rozdíl výkmitů v daném časovém intervalu (peak to peak – $x_{peak\ to\ peak}$)
φ	rad	fáze harmonické veličiny v čase $t = 0$; (phase angle)
ω		úhlový kmitočet, úhlová frekvence (angular frequency), $\omega = 2\pi f$
$\dot{\omega}$	rad.s ⁻¹	úhlová rychlost, $\dot{\omega} = d\varphi/dt$
T	s	perioda, tj. nejkratší doba, po níž se kmitavý děj a tedy také každá hodnota určující veličiny pravidelně opakuje (period); (pozn.: základní perioda kmitání je z hlediska spektrální analýzy nejdelší perioda kmitání) (period of vibration)
F	Hz	frekvence, kmitočet, platí: $f = 1/T$ (frequency)
V	m.s ⁻¹	rychlost kmitání $v = ds/dt$ (velocity); pro harmonické kmitání platí $v_0 = \omega s_0$; složené periodické kmitání lze po rozkladu na jednotlivé harmonické složky definovat efektivní hodnotou rychlosti dle vztahu: $v_{ef}^2 = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n v_{0i}^2$
V, u	m.s ⁻¹	mohutnost kmitání, tj. maximální efektivní hodnota rychlosti kmitání v daném časovém intervalu na vybraných místech (severity)
A	m.s ⁻²	zrychlení kmitání $a = dv/dt$ (acceleration); pro harmonické kmitání měřeného objektu platí: $a_0 = \omega v_0 = \omega^2 s_0$ $a_{ef} = \omega v_{ef}$
B	m.s ⁻³	ryv, tj. veličina udávající časovou změnu zrychlení $b = da/dt$ (jerk)
\bar{x} $X_{rectified\ average}$ $S_{rectified\ average}$ (0,637)		střední hodnota určující veličiny (mean value) $\bar{x} = \frac{1}{T} \int_0^T x(t) dt$ $\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i$ $x(t)$ je určující veličina mechanického kmitání; x_i jsou diskrétní hodnoty veličiny; T je daný časový interval pro $x(t)$; (platí jak pro periodické, neperiodické tak i náhodné kmitání)
x_{ef} X_{RMS} S_{RMS} (0,707)		efektivní hodnota určující veličiny (RMS: Root-Means-Square) $x_{ef}^2 = \frac{1}{T} \int_0^T x^2(t) dt$ $\bar{x}_{ef}^2 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i^2$ $x(t)$ je určující veličina mechanického kmitání (amplituda, častěji však rychlost nebo zrychlení); x_i jsou diskrétní hodnoty veličiny; T je daný časový interval pro $x(t)$; (platí jak pro periodické, neperiodické tak i náhodné kmitání)
L	DB	hladina určující veličiny kmitání $L = 20 \log \frac{A}{A_0}$, kde A_0 je referenční hodnota určující veličiny; referenční hodnota pro rychlost je $v_0 = 10^{-8}$ m/s; referenční hodnota pro zrychlení je $a_0 = 10^{-5}$ m/s ²

6. 2. 4. 2 Kmitočtová analýza

Časový průběh kmitání je výhodné transformovat do frekvenční oblasti, tj. vibrace nahradit posloupností jeho kmitočtových složek. Vhodnou představu o účelnosti kmitočtové analýzy získáme, když si uvědomíme rozdíl mezi informací obsaženou v časovém signálu a kmitočtovém spektru. Lze konstatovat, že časový signál obsahuje informaci o tom, kdy se daný jev stal, ale kmitočtové spektrum obsahuje informaci o tom, jak často se tentýž jev objevuje ve sledovaném signálu. Obecný zjednodušený princip časové a frekvenční analýzy je na obr. 4. 15. Operace, která komplexní signály rozkládá na jejich kmitočtové složky se nazývá kmitočtovou analýzou, která využívá buď selektivních pásmových propustí (analogově nebo digitálně) nebo častěji rychlou Fourierovu transformaci (FFT).



Obr. 6. 15 Princip časové a frekvenční analýzy

Periodický signál má diskrétní kmitočtové spektrum obsahující základní kmitočet a jeho celistvé násobky (n - vyšších harmonických), na něž lze průběh rozložit

$$\left. \begin{aligned} x(t) = & x_0 + x_1 \sin(\omega t + \varphi_1) + x_2 \sin(2\omega t + \varphi_2) + \\ & + x_3 \sin(3\omega t + \varphi_3) + \dots + x_n \sin(n\omega t + \varphi_n), \end{aligned} \right\} \quad (6. 35)$$

kde

x_0 ... stejnosměrná složka,

x_1 ... první harmonická,

x_2 až x_n ... druhá až n-tá harmonická.

resp.

$$y(t) = a_0 + \sum_{n=1}^{\infty} c_n \sin(n\omega t - \varphi_n), \quad (6.36)$$

kde a_0 ... statistická složka amplitudy signálu $y(t)$,

c_n ... koeficienty Fourierovy řady.

Náhodné signály mají časový průběh takový, že okamžitou hodnotu v čase t lze stanovit jen s jistou pravděpodobností. Frekvenční spektrum mají tyto signály spojité. Náhodný signál je popsán svými statistickými charakteristikami, např. **střední kvadratickou hodnotou**, informující o intenzitě děje, definovanou vztahem

$$\psi_x^2 = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T x^2(t) dt \quad (6.37)$$

hustotou pravděpodobnosti, informující o amplitudovém rozložení signálu, definovanou vztahem

$$p(x) = \lim_{\Delta x \rightarrow 0} \frac{P(x + \Delta x) - P(x)}{\Delta x}, \quad (6.38)$$

autokorelační funkcí $R(\tau)$, která popisuje souvislost mezi okamžitými hodnotami náhodné proměnné, která leží v odstupě τ na časové ose. Autokorelační funkce umožňuje rozlišit náhodné procesy a periodické procesy a zjistit periodickou složku ve směsi s náhodnou složkou. Pro stacionární ergodické stochastické procesy platí

$$R(\tau) = \frac{1}{T} \int_0^T x(t)x(t-\tau) dt, \quad (6.39)$$

a **spektrální hustotou** informující o kmitočtovém rozložení danou vztahem

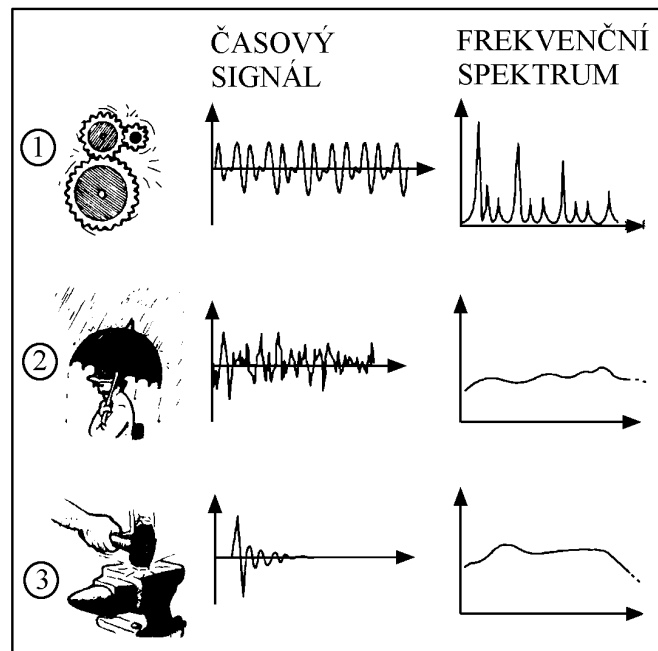
$$S_x(f) = 2\pi \int_{-\infty}^{\infty} R_x(\tau) \exp(-j2\pi f\tau) d\tau. \quad (6.40)$$

Pro praktické využití náhodných signálů v diagnostice přibývá k požadavku stacionarity ještě požadavek ergodičnosti. Za ergodický považujeme signál, u něhož lze pravděpodobnostní charakteristiky, např. autokorelační funkci, stanovit z jednoho měření dostatečné délky. Většinou podmínky ergodičnosti diagnostického signálu odpovídají stabilnímu režimu práce objektu diagnostiky. U nestacionárních signálů se setkáváme převážně se signály

transientními. Často se zpracování tohoto signálu převádí na zpracování signálu periodického s periodou T tak, že se signál pro zpracování neustále opakuje s opakovací dobou T .

Analýza signálů

Na obr. 6. 16 jsou uvedeny ukázky typů signálů s typickými časovými a frekvenčními projevy.



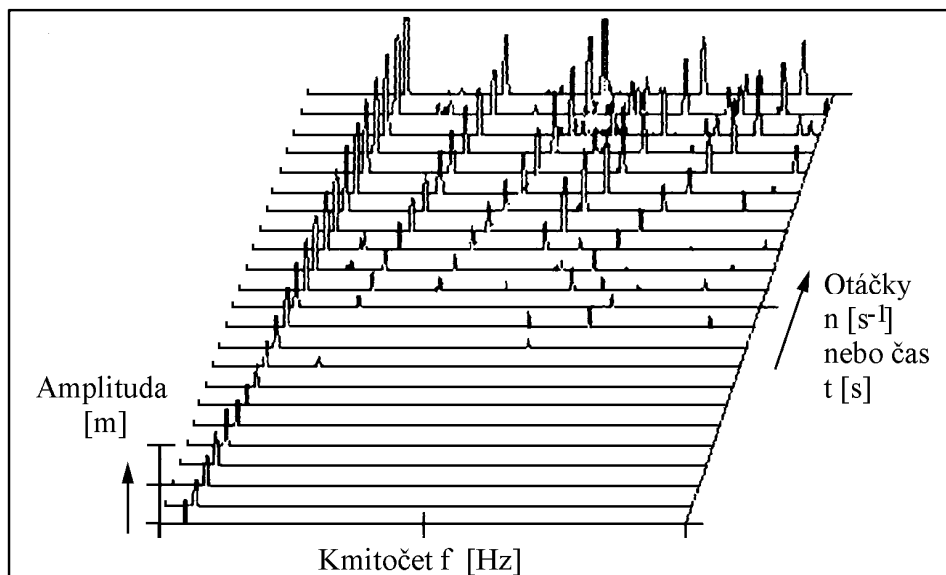
Obr. 6. 16 Ukázka typů signálů

Legenda:

1. *Stacionární periodické deterministické nespojité, čárové spektrum*
2. *Stacionární náhodné spojité spektrum*
3. *Nestacionární přechodové spojité spektrum*

Z obrázku je zřejmé, že pouhá frekvenční analýza není dostačujícím nástrojem pro náhodné a přechodové signály. Frekvenční analýza je však základním nástrojem pro následující metody, které jsou pouze vyjmenovány:

- Rozdělení signálu na kvazi-stacionární časové úseky, zaznamenání a zpracování metodou „skenování“ a zobrazení v 3D tzv. „waterfall“ diagramu viz obr. 6. 17, popř. analýza v reálném čase a zobrazení např. v Campbellově diagramu.

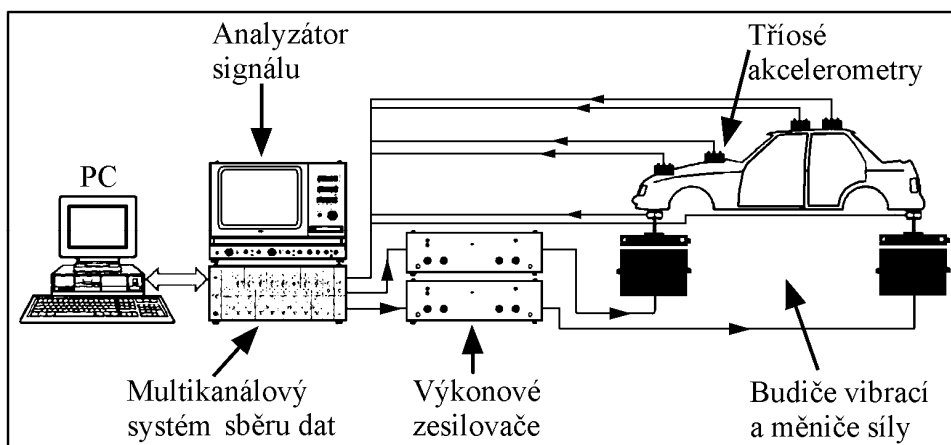


Obr. 6. 17 Diagram tzv. waterfall

- Hradlové průměrování spektra, tj. analýza individuálních jevů v celkovém ději a jejich průměrování s periodou těchto jevů (odhaluje např. rázy od osamocených porušení ozubených kol aj.).
- Řádová analýza umožňující identifikaci násobků frekvence, užívá se pro analýzu rozběhových a doběhových charakteristik.
- Časově – frekvenční analýza, kde frekvenční analýza je doplněna o další údaj nutný pro popis nestacionárních dějů.

6. 2. 4. 3 Strukturální (modální) analýza

S masivním rozvojem techniky ve všech oblastech dochází také k podstatným změnám v přístupu ke konstruování. Znamená to přechod od klasického statického dimenzování k projektování založeném na vyšetřování a modelování dynamických sil. Dynamické problémy strojů jsou nejdříve presentovány zvýšenou hladinou hluku a vibrací. Při studiu těchto jevů zjišťujeme přímou vazbu na dynamické síly, které jsou strukturou ovlivňovány díky inherentním vlastnostem – statické a dynamické stabilitě, tuhosti, tlumení aj. Analýzou signálů se dostáváme od projevů k analýze struktur – tedy k příčinám. Na obr. 6. 18 vidíme princip tzv. modální analýzy.



Obr. 6. 18 Uspořádání systému pro strukturální (modální) analýzu – multireferenční vstup a výstup tzv. MIMO (Multiple Input Multiple Output)

Provozní tvary kmitů strojů

Jedná se o metodu založenou na principu měření přenosových vlastností struktur, jejich částí aj., kdy buzení je přímo dáno funkcí samotného stroje (vozidla) nebo jeho části. Předností je reálné vyšetřování pohybu v určitých frekvenčních pásmech či určitých frekvencích. Při provádění měření se používá dvoukanalový FFT analyzátor, což je jednodušší než při modální analýze.

6. 2. 5 Provozní vibrodiagnostika strojů

Hodnocení technického stavu strojů (vozidel) na základě mechanického kmitání má dlouhou tradici. V praxi užívané metody se stále zdokonalují, od metod využívajících poslechu a stetoskopů až k dnešním automatizovaným centrálním systémům monitorování technického stavu. Činnost těchto zařízení už nezáleží na kvalifikaci a zkušenostech obsluh, tzv. on-line systémy jsou téměř nezávislé na lidském faktoru. Provozní diagnostiku technického stavu strojů (vozidel) na základě vibrací lze rozčlenit do následujících skupin:

- Metody umožňující včas identifikovat a odhalit poruchy na základě spekter s konstantní relativní šířkou pásem CPB – spekter vibrací
- Metody umožňující vyhledat poruchy a jejich příčiny s využitím rychlé Fourierovi transformace FFT

Z hlediska monitorování a předcházení poruchám (ochrany proti poruchám) lze metody rozdělit na:

- Metody využívající tzv. procesní proměnné např. tlak, teploty, seřízení, pozice, otáčky aj.
- Metody využívající vibrace a posuvy v definovaných frekvenčních pásmech, měření fází a amplitud typických řádů, měření absolutních a relativních posuvů aj.
- Základní diagnostiku tj. autospektra FFT, CPB spektra, obálková spektra, hradlová spektra, kepstra.
- Speciální diagnostiku např. rozběhová a doběhová autospektra v 3D zobrazení, sledování orbitů hřídelů, měření vibrací v časové oblasti aj.

6. 2. 5. 1 Detekce poruch

Základem klasické diagnostiky poruch bylo porovnání efektivních hodnot rychlosti vibrací s výsledky předchozích měření nebo normativně stanovenými mezními hodnotami obr. 6. 19. Tato metodika je založena na předpokladu, že mechanické vibrace zařízení (strojů) určité skupiny (kategorie, např. určitého výkonu aj.) má podobné nebo dokonce stejné hodnoty amplitud, rychlosti nebo zrychlení v daném frekvenčním pásmu (obvykle od 10 Hz do 1 kHz). Tento přístup však neumožňuje dobrou identifikaci poruch v počáteční fázi jejich vzniku. Využívá se však s úspěchem pro orientační určování technického stavu rotačních strojů.

Pro dokonalejší posouzení skutečného technického stavu stroje, diagnózu, detekci, identifikaci a lokalizaci poruch je nutná analýza na základě frekvenčních metod. Na obr. 6. 19 je příklad ukazující základní princip diagnostiky založené na frekvenční analýze.

Oblast nízkých frekvencí (kmitočtů), kterou pro naše potřeby chápeme jako frekvence od, resp. pod rychlostí otáčení nejpomalejších hřídelů až po oblast tvořenou nižšími 4 až 6 harmonickými násobky hřídelů s maximálními otáčkami. Tato oblast nese informace o poruchách způsobených nevyvážeností, ohybem hřídelů, jejich přesazením, nestabilitou radiálních ložisek, uvolněním mechanických vazeb aj.

Oblast středních kmitočtů nad pásmem oblasti nízkých kmitočtů (až do asi 5 kHz) můžeme získat informace o poruchách ozubených kol, převodovek, rozvodovek aj.

Oblast vysokých kmitočtů dává informace o počínajících poruchách valivých ložisek (trhlínky, poškození kroužků, valivých elementů aj.), což se projevuje úzkými, ostrými

impulsy, které vyvolávají rezonance v jiných částech stroje aj. Příklady poruch jsou uvedeny na obr. 6. 25 – 6. 34.

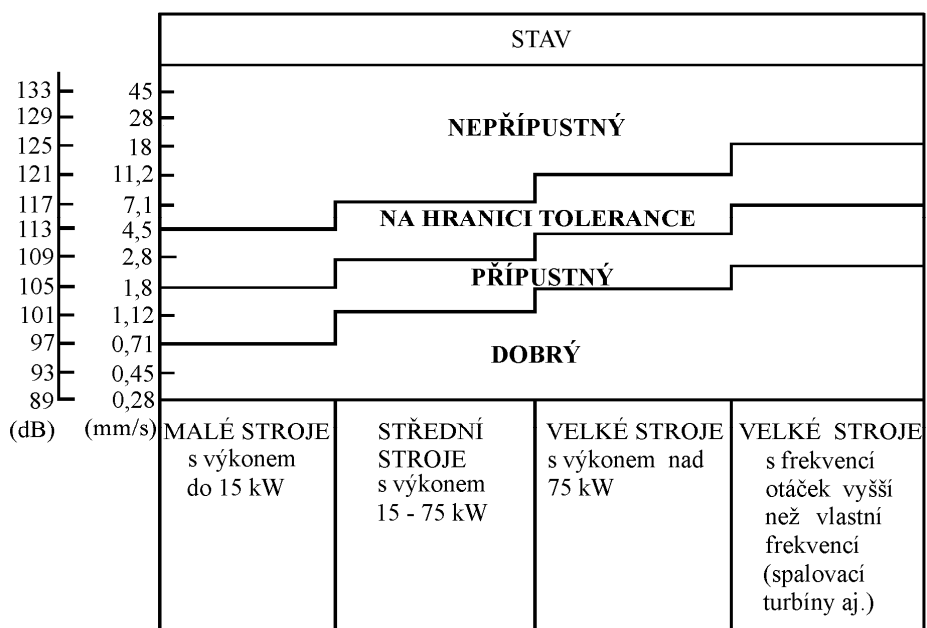
6. 2. 5. 2 Příklady vibrodiagnostických metod:

Příklad měření mohutnosti kmitání stroje

Jde o stanovení efektivní hodnoty rychlosti kmitání ve frekvenčním rozsahu 10 - 1000 Hz. Naměřenou hodnotu pak k posouzení provozuschopnosti stroje porovnáme:

- s mezními hodnotami z norem a směrnic viz obr. 6. 19.
- s mezními hodnotami, danými výrobcem stroje nebo vyplývající ze zkušenosti uživatele.

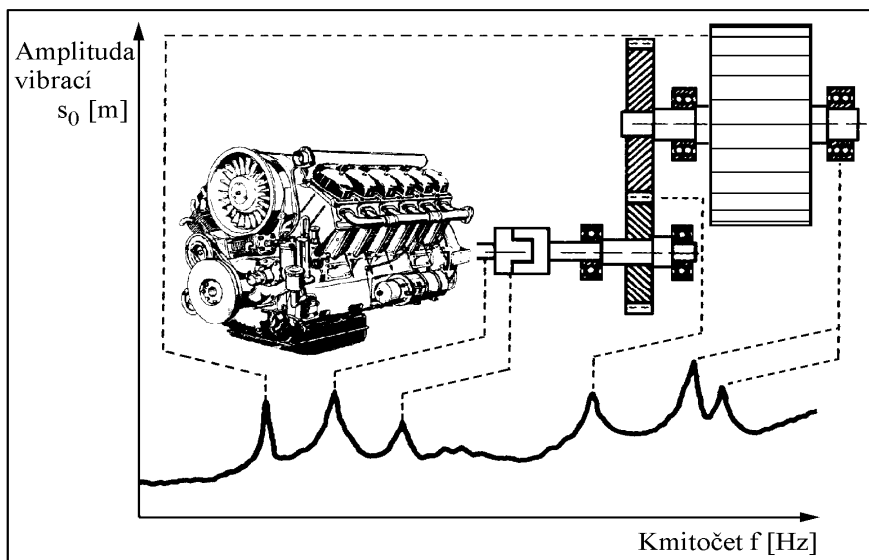
Měření mohutnosti kmitání je jednoduchá, rychlá a levná metoda, nevyžadující složitou aparaturu. Metoda umožňuje orientační posouzení provozuschopnosti stroje u uživatele, popř. je vhodným doplňkem k posouzení kvality výroby a montáže před expedicí u výrobce. Neumožňuje však sama lokalizovat příčinu případného neuspokojivého technického stavu.



Obr. 6. 19 Tabulka mohutnosti kmitání určující provozuschopnost objektu (ISO 2372 a 3945)

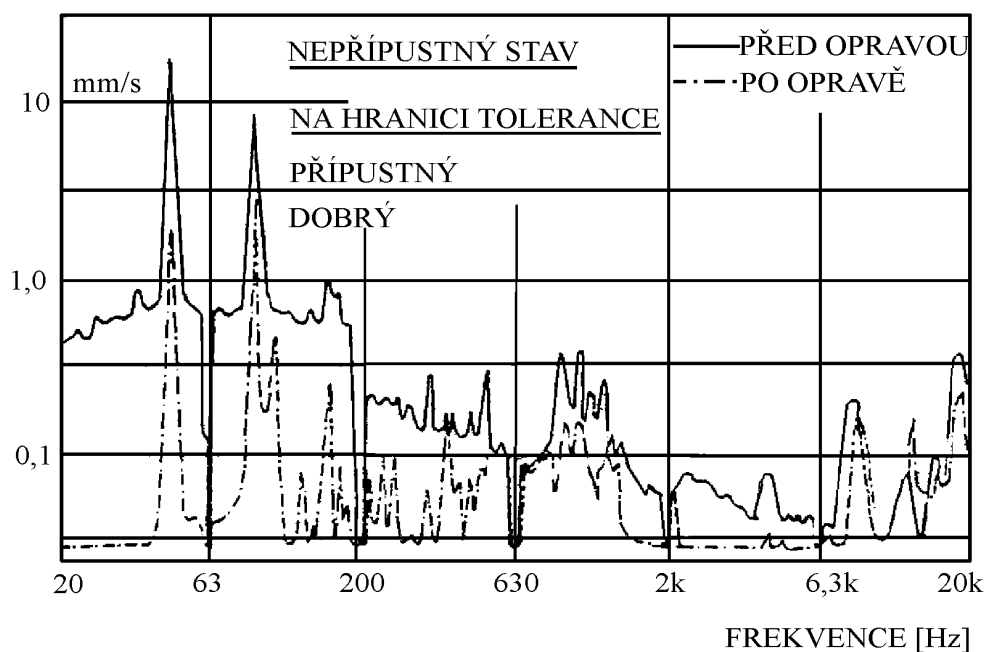
Příklad spektrální analýzy vibrací stroje

Nejčastější a nejvýznamnější metodou vibrační diagnostiky je frekvenční analýza snímaného vibračního signálu. Metoda spektrální analýzy vibrací rozkládá naměřený složitý signál, obsahující řadu harmonických složek, na jednotlivé složky podle (6. 35), resp. (6. 36) tak, aby výsledkem byla např. amplitudová frekvenční charakteristika podle obr. 6. 21.



Obr. 6. 20 Základ diagnostiky – přiřazení dominantních frekvencí jednotlivým uzlům stroje

Uspořádaná řada hodnot c_n tvoří amplitudovou (frekvenční) charakteristiku signálu, posloupnost hodnot φ_n pak fázovou spektrální charakteristiku. Efektivnější měření je s úzkopásmovým paměťovým analyzátozem, který převádí digitalizovaný složitý časový průběh snímaného signálu na spektrální charakteristiku pomocí matematických aproximačních postupů, např. FFT aj.



Obr. 6. 21 Příklad frekvenční amplitudové charakteristiky stroje

Při hodnocení provozuschopnosti pak v amplitudové spektrální charakteristice:

- buď porovnáme velikost naměřených amplitud s mezemi, stanovenými pro celý frekvenční rozsah nebo jednotlivá frekvenční pásma,
- nebo porovnáme naměřenou charakteristiku s charakteristikou zjištěnou ve výchozím, prokazatelně provozuschopném stavu; přitom obvykle nárůst dvoj až trojnásobný je pro nás alarmující hodnota, pěti až desetinásobek pak hodnota mezní.

Pro lokalizaci poruch porovnáme v základním spektru amplitudově výrazné složky s frekvencí kmitání, které generují podle výpočtů rotující a oscilující součásti. Tímto postupem lze identifikovat většinu příčin poruch mechanických částí pohonů a rotačních strojů. Je však třeba zdůraznit, že relativní snadnost získání spekter kmitů je věc jedna, interpretace výsledků však záležitost druhá a složitější, vyžadující znalosti poruchových mechanismů, dynamiky a zkušenosti z měření. Spektrální analýza vibrací umožňuje bezdemontážně odhalit zejména:

- stav zubů ozubených kol, popř. zubových spojek,
- excentricity hřídelů, ozubených kol aj.,
- nevyváženosti rotujících částí,
- nesouososti hřídelů,
- ohyby hřídelů aj.

Příklad keprstrální analýzy vibrací stroje

V některých případech se porucha rotačních částí objektu diagnostiky ohlašuje na naměřené spektrální charakteristice ani ne tak příliš výrazným růstem amplitudy na některé vlastní frekvenci soustavy, ale růstem postranních frekvenčních pásem vedle jednotlivých harmonických základního průběhu viz obr. 6. 22. Snadnější rozlišení těchto postranních frekvencí umožňuje tzv. keprstrální analýza. Kepstrální analýza vychází ze základních statistických charakteristik signálu (zrychlení, rychlost, výchylka), který je stacionárním náhodným procesem, tj. jedná se o spektrální hustotu $S(\omega)$, výkonovou spektrální hustotu $G(\omega)$ a autokorelační funkci $R(\tau)$, aj. Kepstrem rozumíme výkonové spektrum logaritmického výkonového spektra

$$C(\tau) = |F\{\log|G(t)|\}|^2, \quad (6. 41)$$

kde $G(t)$... výkonové spektrum signálu $f(t)$, pro něž platí

$$G(t) = |F\{f(t)\}|^2, \quad (6.42)$$

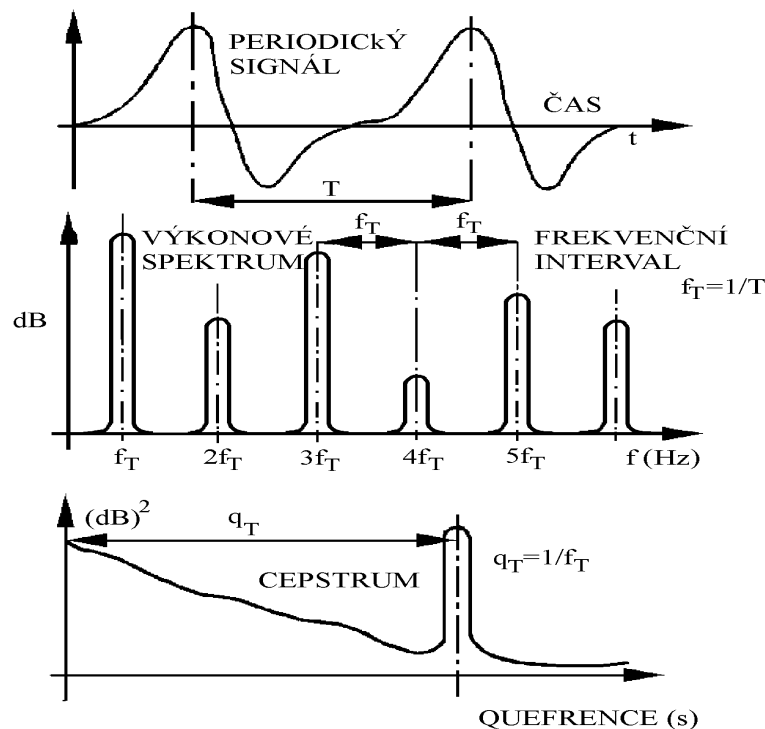
kde F ... značí Fourierovu transformaci veličiny uvedené v závorce.



Obr. 6. 22 Vznik postranních frekvenčních pásem

Nezávisle proměnná τ keprsta $C(\tau)$ má rozměr času (s), ale nazývá se "quefrence" (čti kvefrens). "Vysoká" quefrence představuje rychlé změny spektra (malé intervaly postranních frekvencí), zatímco "nízká" quefrence reprezentuje pomalé změny spektra (velké intervaly postranních frekvencí). Quefrence je vlastně převrácenou hodnotou frekvenčního intervalu v (Hz) v původním frekvenčním spektru, převrácená hodnota quefrence pak odpovídá modulační frekvenci viz obr. 6. 23.

Příklad keprální analýzy:



Obr. 6. 23 Průběh periodického signálu, jeho logaritmického výkonového spektra a keprsta

Zkoumané převodové ústrojí s ozubenými koly, které má excentricitu jednoho ozubeného kola, což vede k amplitudové modulaci signálu o zubové frekvenci a jejích vyšších harmonických. Změny tlaku mezi zuby, vyvolané touto amplitudovou modulací, vyvolávají změny otáčivé rychlosti, vedoucí k frekvenční modulaci zubové frekvence. Obě popsané změny vedou ke vzniku postranních frekvencí (kromě zubové frekvence a jejích harmonických). Horní a dolní postranní pásma mají kmitočty

$$f = f_z + f_n, \quad (6.43)$$

kde f_z ... zubová frekvence kola $f_z = \frac{zn}{60}$,

f_n ... otáčková frekvence $f_n = \frac{n}{60}$.

Druhá postranní pásma mají frekvenci $f = f_z + 2f_n$.

Vyšší harmonické složky mají kmitočty $2f_z + f_n$, $2f_z + 2f_n$ atd.

Tato postranní frekvenční pásma obsahují základní diagnostickou informaci o zdroji modulace (a tedy i poruchy). Jsou ovšem ovlivněna řadou modulačních efektů, kde excentricity vyvolávají především modulaci amplitudy, ostatní geometrické chyby převodů a torzní deformace způsobují jak amplitudovou, tak frekvenční modulaci. Pokud je pohon v pořádku, pak jeho spektrum obsahuje postranní frekvence, jejichž signál je stálý. Změna počtu a amplitudy postranních frekvencí bývá příznakem změny provozního stavu ústrojí. Frekvenční interval v těchto postranních pásmech je cenným zdrojem informací o zdroji poruchy. Grafické znázornění keprstrální analýzy převodovky je na obr. 6. 24.

Spektrum (po opravě) ukazuje nový provozní stav. Dominuje v něm zubová frekvence a její "stínová" (zdvojená) složka, ležící o 96 Hz výše. Původ této stínové složky je v kinematické chybě dělicího převodu stroje, který vyráběl příslušné ozubené kolo. Porovnáním keprtra před opravou a po opravě vidíme, že před opravou jsou význačné složky 40 ms a 120 ms quefrence, které ukazují, že základními modulačními složkami spektra je složka 25 Hz a 8,3 Hz. Složka 8,3 Hz přísluší pravděpodobně chybě rotace hřídele, složka 25 Hz pak měřitelné chybě profilu ozubení na jednom ozubeném kole.

Spektrum (před opravou) má vzhledem ke spektru po opravě některé typické projevy degradačních poruch v ozubení, např., že.:

- celková úroveň signálu je vyšší,

- zubová frekvence (a hlavně její vyšší harmonické), vykazují ve spektru viditelný vzestup,
- postranní pásma frekvencí jsou značně širší,
- přesnější lokalizace poruchy není možná, protože neexistují další příznaky.

6. 2. 5. 3 Využití parametru $K_{(t)}$

Pro diagnostiku ložisek se s výhodou rovněž používá tzv. metoda $K_{(t)}$, která je založena na vyhodnocení četnosti rázů a jejich výkmitů. Parametr $K_{(t)}$ je dán rovnicí

$$K_{(t)} = \frac{a_{r(0)} a_{ef(0)}}{a_{r(t)} a_{ef(t)}} \quad (6. 44)$$

kde $a_{r(0)}$... počáteční hodnota zrychlení nového ložiska po montáži, není-li známa

doporučuje se $a_{r(0)} = 40 \text{ m.s}^{-2}$,

$a_{ef(0)}$... počáteční efektivní hodnota zrychlení po montáži ložiska, není-li známa

doporučuje se $a_{ef(0)} = 10 \text{ m.s}^{-2}$,

$a_{r(t)}$... hodnota zrychlení během provozu,

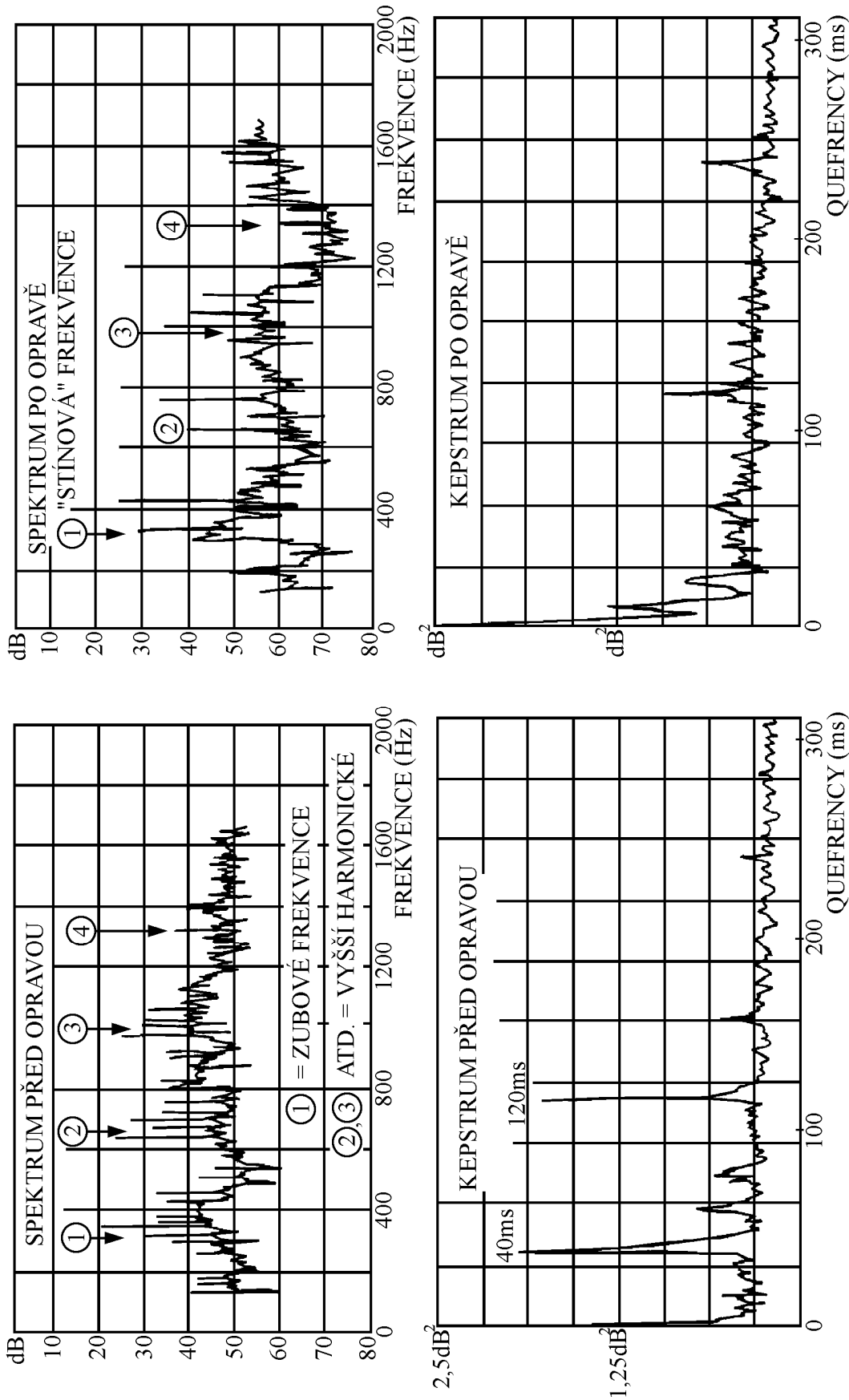
$a_{ef(t)}$... efektivní hodnota zrychlení během provozu.

Diagnóza na základě parametru $K_{(t)}$:

$K_{(t)} < 0,02$... havarijní stav

$0,02 < K_{(t)} < 0,2$... poškozené ložisko

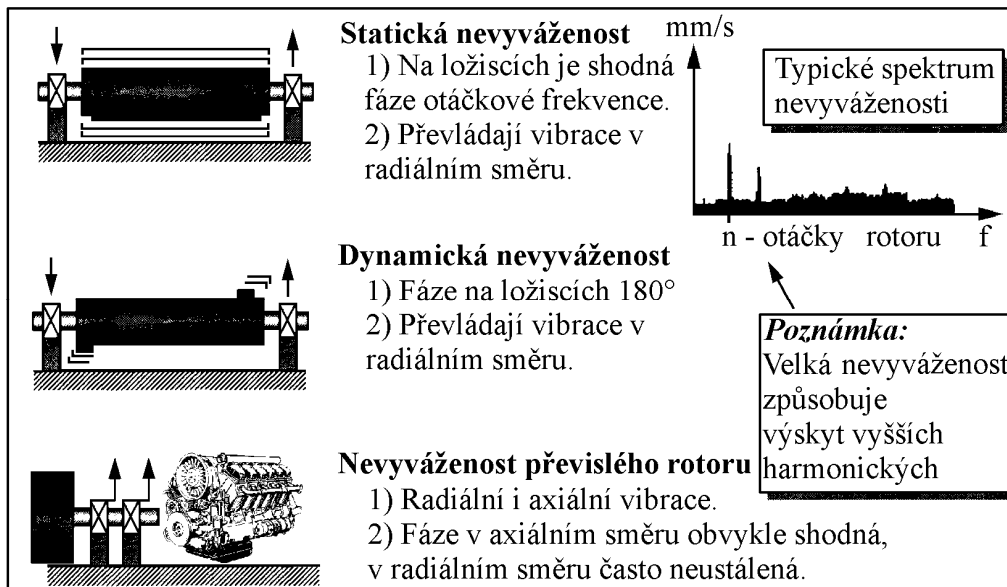
$0,20 < K_{(t)} < 1,0$... dobrý stav



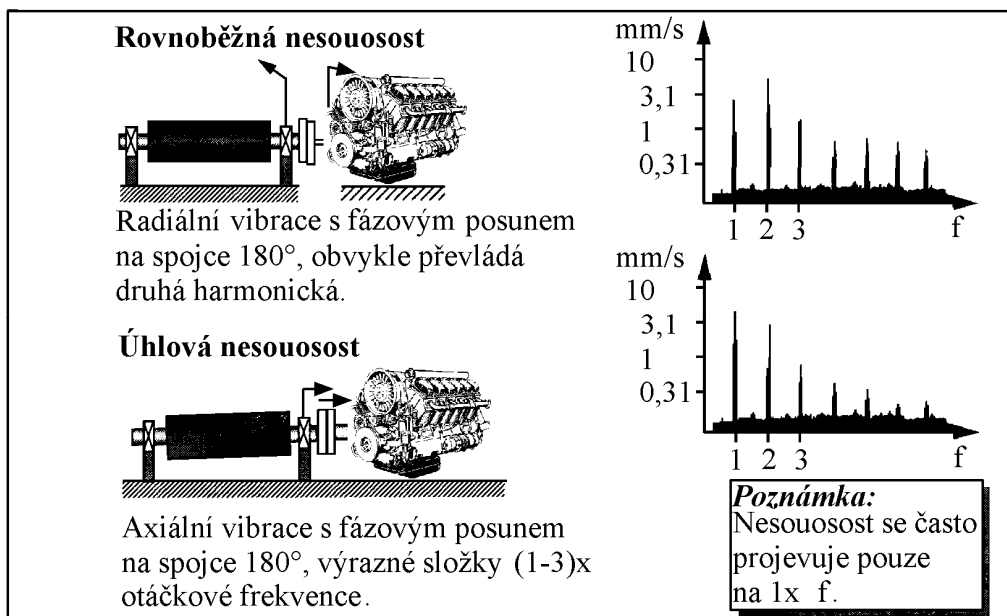
Obr. 6. 24 Kepstrální analýza převodovky

6. 2. 6. Příklady spekter typických poruch

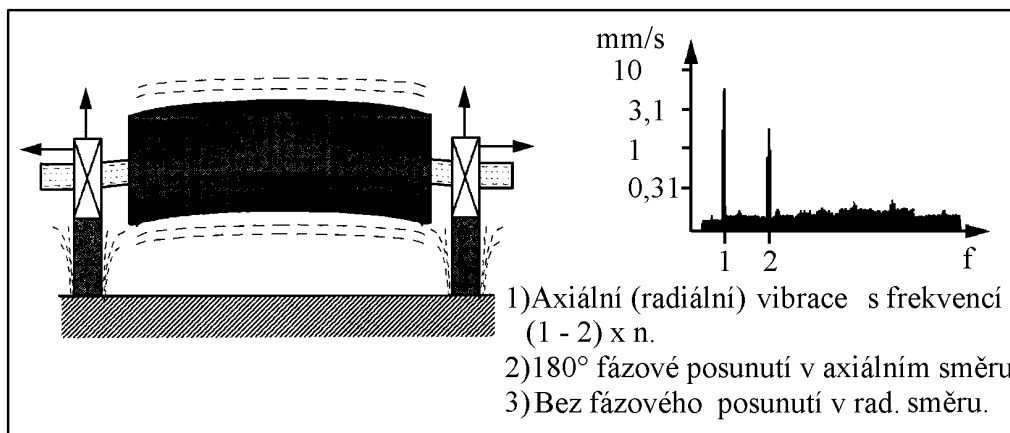
Příklady spekter typických poruch rotačních součástí [61] jsou uvedeny na obr. 6. 25 – 6. 33. Příklady ukazují nevyváženost, nesouosost, ohnutí, excentricitu, mechanické uvolnění, zadírání rotoru, poruchy kluzných ložisek, poruchy valivých ložisek a poruchy převodovky.



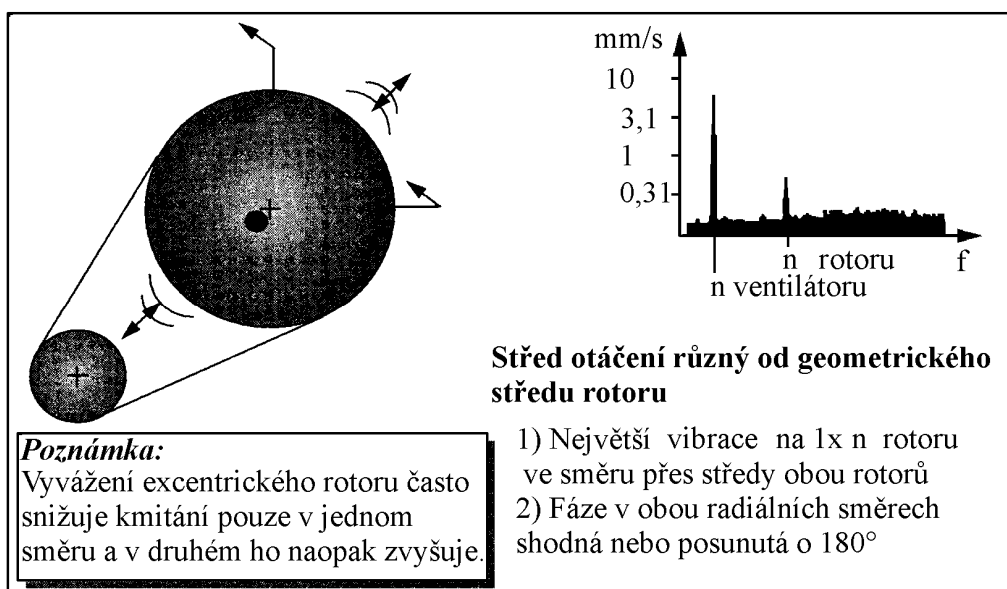
Obr. 6. 25 Statická a dynamická nevyváženost rotačních součástí



Obr. 6. 26 Nesouosost rotačních součástí



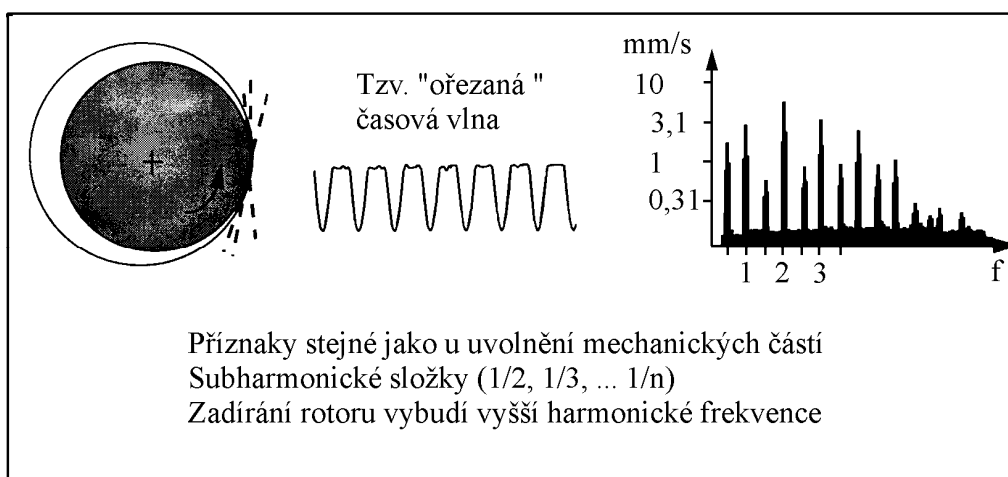
Obr. 6. 27 Ohnutí rotační součásti (hřídele)



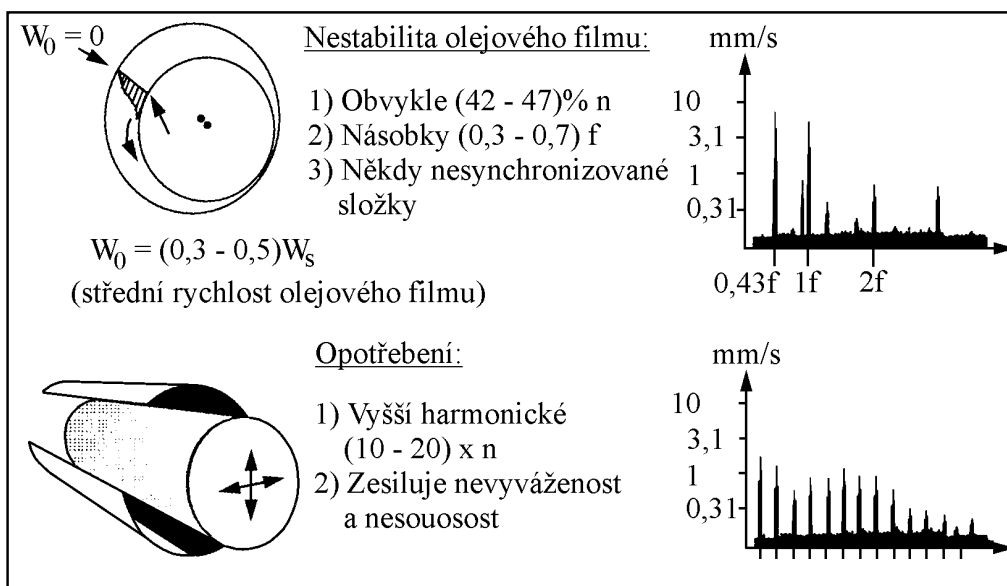
Obr. 6. 28 Excentricita rotační součásti



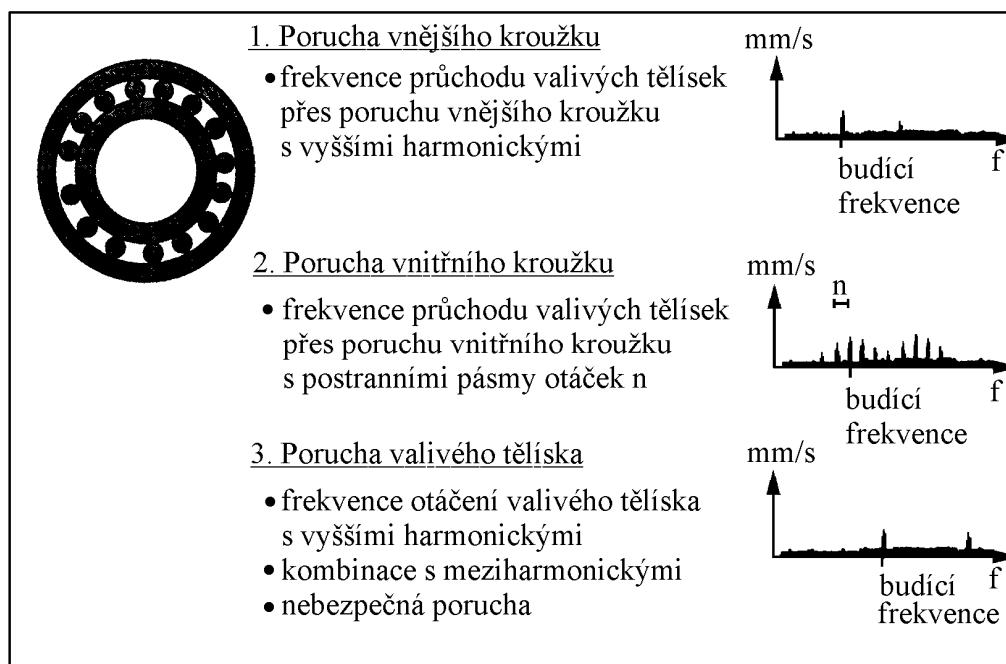
Obr. 6. 29 Uvolnění mechanických částí



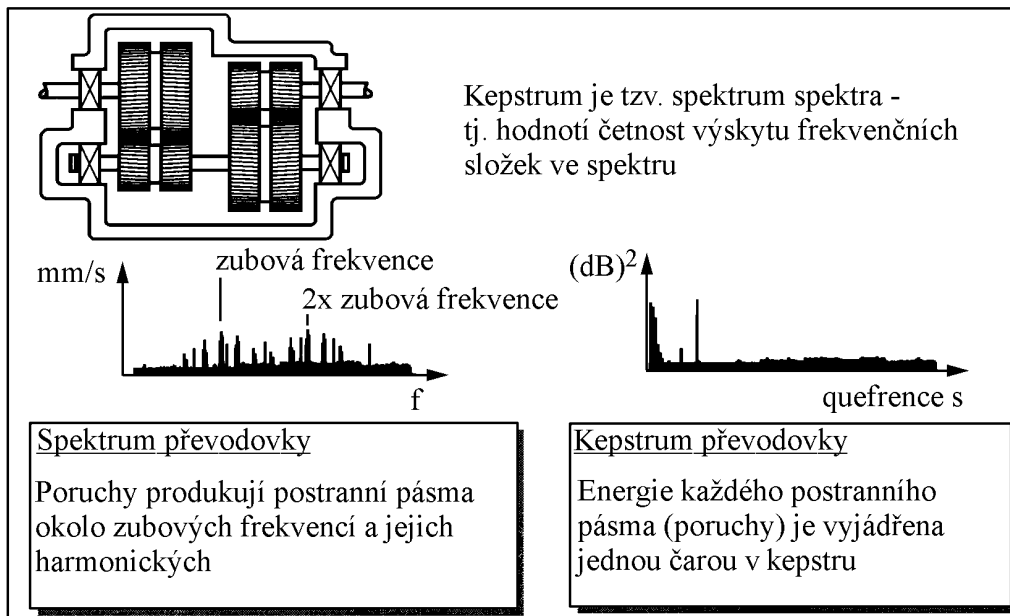
Obr. 6. 30 Zadírání rotoru



Obr. 6. 31 Porucha kluzných ložisek



Obr. 6. 32 Porucha valivých ložisek



Obr. 6. 33 Poruchy převodovek

Příklad vibrodiagnostické metody pro zjišťování provozuschopnosti valivých ložisek

Jedním z klíčových prvků, z hlediska spolehlivosti vozidel, jsou valivá ložiska. V praxi byla vyvinuta řada metod a přístrojů, zaměřených na bezdemontážní on-line diagnostiku ložisek. Metody vychází při hodnocení stavu valivého ložiska z poznatku, že k poruchám ložisek dochází většinou na základě únavového poškození oběžných drah, resp. valivých tělísek ložiska, a to se pak stává výrazným budičem kmitání. Kmity jsou buzeny rázy, vyvolanými pittingy při odvalování, tedy např. vniknutím valivého tělíska do "důlku" v oběžné dráze v zatížené oblasti (se současným skluzem v ložisku). Měřicí metody měří vybrané charakteristiky kmitání, např. efektivní hodnotu rychlosti kmitání, střední a špičkovou hodnotu zrychlení kmitů aj., resp. vypočítávají z nich určitou srovnávací veličinu, umožňující podle speciální metodiky hodnotit stav ložiska. Často využívanou diagnostickou metodou hodnocení technického stavu valivých ložisek je spektrální analýza FFT analyzátozem. Ve frekvenčním spektru rotačních částí objektu diagnostiky se vady ložisek projevují amplitudovými špičkami chvění obvykle v pásmu vysokých frekvencí (do 22 kHz). Vyhodnocování vad ložiska FFT analýzou vibrací v reálném čase na funkčních analyzátozech je možné, existují však těžkosti, které znesnadňují diagnózu, např. šum pozadí, zhuštění logaritmické stupnice frekvencí na vyšších frekvencích, neznalost dobrých a mezních hodnot ložiska aj. Diagnostika je relativním porovnáním naměřených amplitud a počátečních

amplitud na ložiskových frekvencích určených výpočty. V nich frekvenci, vyplývající z poruchy vnitřního oběžného kroužku vypočteme podle vztahu

$$f_i = k[(n_i - n_s)(1 - s)]z \quad (6.45)$$

kde s ... skluz poškozeného ložiska (5 - 20 %),

z ... počet valivých těles v jedné řadě,

$k = 1, 2, 3$... řád harmonické složky vyplývající z počtu poruch.

Pro frekvenci rázu v důsledku vad vnějšího oběžného kroužku plyne

$$f_e = k[(n_s - n_e)(1 - s)]z \quad (6.46)$$

Frekvence kmitání, způsobená vadami valivého tělesa je dána vztahem

$$f_d = kn_s(1 - s) \quad (6.47)$$

Frekvence parametrického buzení nepoškozeného ložiska, vyplývající z periodické změny tuhosti ložiska pod zatížením (mezera mezi tělisky pod zatížením) je dána vztahem

$$f_p = zn_s \quad (6.48)$$

kde n_s ... otáčky klece s valivými tělesy.

Přitom otáčky klece s valivými tělisky kolem osy ložiska lze vyjádřit

$$n_s = \frac{1}{2} [n_i(1 - \delta) + n_e(1 + \delta)] \quad (6.49)$$

kde n_i ... otáčky vnitřního kroužku ložiska,

n_e ... otáčky vnějšího kroužku ložiska.

V praxi jsou obvykle jedny z otáček (n_i , n_e) nulové. Dále platí

$$\delta = \frac{d_0}{d_s} \cos a \quad (6.50)$$

kde d_0 ... průměr valivého ložiska,

d_s ... střední průměr ložiska,

a ... úhel styku ložiska.

V praxi existuje několik dalších metod k určování technického stavu valivých ložisek, tyto metody se však využívají především v diagnostice výrobních strojů, automatických linek a podobně. Z těchto důvodů jim nebudeme dále věnovat pozornost

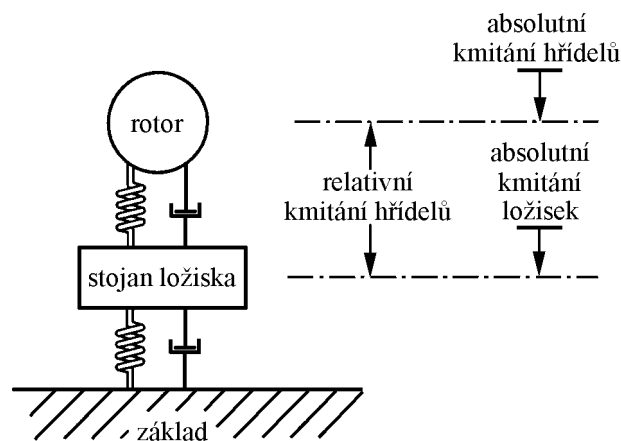
a zájemce odkážeme na specializovanou literaturu. Pro základní názor uvedeme pouze jejich přehled:

- metoda rázových pulsů SPM (Shock Pulse Method),
- metoda KURTOSIS,
- metoda špičkové energie SE (Spike Energy),
- metoda CREST-faktor,
- metoda Q-faktor aj.

6. 2. 7 Měření vibrací

6. 2. 7. 1 Snímače vibrací

Podle konstrukce rozlišujeme snímače absolutní a relativní, podle principu pak elektrické, mechanické a optické. U absolutního kmitání je pohyb tělesa vztahován ke gravitačnímu poli země, tzv. pevný fixní bod a u relativního kmitání ke zvolenému reálnému bodu (který může rovněž kmitat), viz obr. 6. 34.

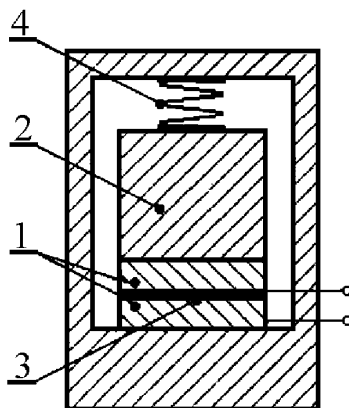


Obr. 6. 34 Schéma absolutního a relativního kmitání

Absolutní snímače využívají pro měření setrvačnou hmotu snímače (jako relativně klidné těleso), který je spojen s kmitajícím objektem prostřednictvím článku s malou tuhostí a s tlumením. Snímače amplitudy vibrací pracují obvykle vysoko nad rezonancí a s malým poměrným tlumením, u snímačů zrychlení je tomu naopak.

Nejvíce rozšířené pro snímání mechanických kmitů jsou piezoelektrické snímače zrychlení (akcelerometry). Mají obvykle velkou tuhost, proto pracují v podrezonanční oblasti, měří zrychlení a pro získání amplitud a rychlosti používají integraci měřeného signálu. Schéma piezoelektrického snímače vibrací je na obr. 4. 35, kde 1 je piezoelektrický krystal, 2

je zatěžující hmota, 3 je deskový snímač napětí z krystalů a 4 je přítlačná pružina. Piezoelektrické snímače vibrací nepotřebují vnější zdroj energie, mají široký dynamický a frekvenční rozsah, definovanou linearitu, jsou časově stabilní, citlivé, přesné a spolehlivé.



Obr. 6. 35 Piezoelektrický snímač vibrací

Další typy snímačů:

Indukční snímače rychlosti vibrací jsou založené na principu změny magnetického toku v obvodu při změně magnetické impedance, jejich rezonanční frekvence je kolem 500 Hz. Jedná se o přísně omezený frekvenční a dynamický rozsah. Obvykle směrově orientované a proto je nelze libovolně připevňovat na měřený povrch.

Kapacitní snímače pracují na principu změny kapacity desek kondenzátoru, mají malou přesnost měření a omezený dynamický rozsah. Jedná se o bezkontaktní snímače výchylky s vysokou citlivostí a širokým frekvenčním rozsahem. Podmínkou je elektrická vodivost povrchu měřené součásti.

Tenzometrické snímače používají, tzv. pomocný člen, na němž je uložen tenzometr, který snímá deformace způsobené v tomto členu namáháním (tahem, tlakem, krutem, ohybem).

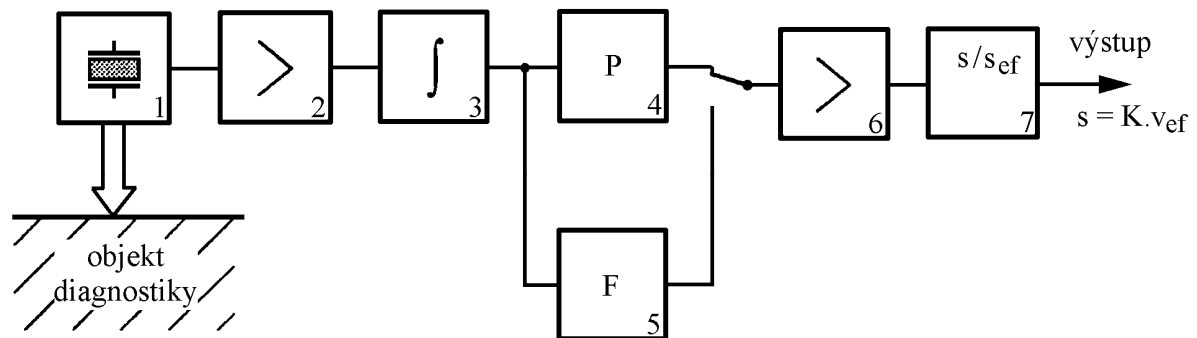
Piezoodporové snímače slouží k měření amplitudy zrychlení, pracují v podrezonanční oblasti. Frekvenční a dynamický rozsah je poměrně široký. Bývají vybaveny viskózním tlumením pro zvýšení odolnosti proti rázům.

Elektrodynamické snímače se používají k měření amplitud rychlosti, jejich rezonanční frekvence je kolem 5 Hz. aj.

6. 2. 7. 2 Zařízení k měření vibrací

Na obr. 6. 36 je uvedeno schéma klasického měřicího řetězce s analogovými obvody. Dnes již existuje široké spektrum techniky pro provádění měření a analýz signálů, obecně lze tuto techniku rozdělit na:

- zařízení na zjišťování statistických hodnot snímaného signálu
- jednoúčelové analyzátoři
- měřicí karty a softwarové vybavení pro PC
- přenosné univerzální vícekanálové analyzátoři
- multikanálové analyzátoři
- otevřené multianalyzátorové systémy s vysokým stupněm automatizace



Obr. 6. 36 Blokové schéma měřicího řetězce pro vyhodnocení celkového kmitání stroje

Legenda:

1 – piezoelektrický akcelerometr; 2 – zesilovač; 3 – integrační člen; 4 – pásmová propust; 5 – externí filtr; 6 – zesilovač; 7 – převodník skutečné efektivní hodnoty.

6. 3 Ultrazvukové metody diagnostiky

Dělí se na metody aktivní a pasivní. Pasivní metody jsou metodami klasické defektoskopie, proto další informace jsou uvedeny v kap. 7. 7. Dělí se na metody průchodové a odrazové. Aparatura je složena z:

- zdroje ultrazvukového vlnění,
- snímacího zařízení,
- vyhodnocovacího zařízení.

Průchodové ultrazvukové metody slouží k odhalování poruch (nehomogenit) zkoumaného materiálu, tj. trhlin, dutin, vměstků aj.

Odrazové ultrazvukové metody vyhodnocují odrazy ultrazvukového vlnění, procházejícího objektem diagnostiky, od nehomogenit materiálu (defektů).

Aktivní ultrazvukové metody diagnostiky diagnostikují objekt během jeho funkce. Zdrojem ultrazvukového vlnění je samotný objekt diagnostiky. Tyto metody se opírají především o možnosti generování ultrazvukového vlnění během činnosti objektu:

- únikem stlačeného plynu nebo kapaliny netěsností nebo trhlinou,
- vznikem kavitace v kapalinách,
- na základě dynamického namáhání mechanického systému rázy, vibracemi aj.

A. Diagnostika úniku plynu nebo kapaliny

Při úniku stlačeného plynu nebo kapaliny netěsnostmi nebo malými trhlinami dochází k turbulentnímu proudění, které generuje ultrazvukové vlnění. Frekvenční rozsah tohoto vlnění se pohybuje řádově od jednotek do desítek kHz a je ovlivněn tvarem a rozměry defektu. Energie ultrazvukového vlnění závisí na přetlaku unikající látky; ultrazvukové vlnění může být značně ztlumeno, nebo i pohlceno, např. vrstvou izolace na potrubí aj.

B. Diagnostika kavitace v kapalinách

V hydrodynamických systémech vlivem značného dynamického namáhání dochází k periodickému vzniku a zániku kaveren (bublin), jestliže tlaková či tahová napětí překročí kohezní (přitažlivé) síly mezi sousedními molekulami. Tento jev se nazývá kavitace (latinsky *cavitas* = dutina).

Zánik (kolaps) kavitačních kaveren způsobuje rázy v kapalině a vznik tlakových impulsů, mnohonásobně převyšujících běžné provozní tlaky (řádově stovky MPa), přičemž zároveň dochází k mžikovému lokálnímu zvýšení teploty v místě zaniklé kaverny (až 10.000 K). Kavitace na povrchu pevných látek (rotory čerpadel, ložiska, plochy hydraulických systémů aj.) vlivem tlakových a teplotních rázů způsobuje intenzivní rozrušování povrchu (erozi). Druhotnými projevy zániku kavitačních kaveren je vznik akustických šumů se širokým spektrem kmitočtu od oblasti slyšitelné až do několika set kHz.

C. Diagnostika dynamického namáhání mechanických systémů

Dynamické procesy (vibrace, rázy) probíhající v namáhaných mechanických systémech vozidel jsou zdrojem elastických kmitů se širokým spektrem kmitočtů od desítek Hz do několika set Hz. Ač je mechanismus těchto "šumů" jiný, než tomu bylo u kavitace v hydraulických systémech, lze užít obdobné metody sledování ultrazvukové části spektra, nemaskované provozními hluky vozidla v oblasti asi 30 Hz. Snímání signálu z diagnostikovaného uzlu je realizováno tzv. vlnovodem, což je součást vhodného tvaru a

délky, která slouží jako akustický transformátor amplitudy, resp. rychlosti. Na konci vlnovodu vzroste nejen amplituda výchylky, ale i rychlost kmitání. Při této metodě je potřebné vycházet ze znalosti konstrukce diagnostikovaného uzlu a volit vhodné místo sondy, např. tak, aby signál přecházel přes co nejmenší počet rozhraní dvou prostředí aj. U všech uvedených metod (ad. A, B, C) se jedná o diagnostiku relativní, kdy porovnáváme ultrazvuková spektra, resp. jeho charakteristiky, se spektry odpovídajícími provozuschopnému stavu, resp. některým typickým závadám. Získané diagnostické informace platí pro daný typ objektu (vozidla, stroje) a pro dané umístění snímače. Pokud se týká prostředků pro ultrazvukovou diagnostiku, v ČR jsou dostupné různé přístroje.

6. 4 Tepelné metody diagnostiky

Při aplikacích technické diagnostiky je teplota jednou z rozhodujících veličin, která charakterizuje změny (zhoršování) technického stavu strojů, další informace jsou uvedeny v kap. 7. 5. Teplota je jednou ze základních stavových veličin – je mírou kinetické energie pohybujících se částic a ovlivňuje téměř všechny procesy. Za nejnižší teplotu považujeme takový stav, kdy ustává veškerý pohyb v hmotě – tento stav je definován jako absolutní teplotní nula. Pro měření teploty se užívalo v minulosti několika stupnic, založených na vlastnostech základní teploměrné látky. Protože je však potřebné, aby teplotní stupnice byla nezávislá na teploměrné látce, vycházíme obvykle z termodynamické stupnice založené na účinnosti ideálního Carnotova cyklu. Jsou-li dva systémy v termodynamické rovnováze (tj. ve stavu, kdy se nemění) do doby, pokud se nemění vnější podmínky, nedochází mezi nimi k výměně tepla. Pak říkáme, že oba systémy mají stejnou teplotu. Pokud máme několik systémů v termodynamické rovnováze, pak kterýkoli můžeme označit jako standard pro měření teploty – **teploměr** (správněji asi teplotoměr) a s jeho pomocí sestavit stupnici stavů. Teplotním intervalem pak nazýváme dělení mezi dvěma rozdílnými stavy. Základem každé teplotní stupnice jsou její základní body dané určitými teplotními stavy. Nejznámějšími jsou např.:

- Rovnovážný stav mezi ledem a vodou při normálním tlaku, tzv. trojný bod vody, označovaný jako bod mrazu,
- Rovnovážný stav mezi vodou nasycenou vodní parou za normálního tlaku, označovaný jako bod varu.

Těmto stavům jsou pak přiřazeny určité číselné hodnoty podle různých autorů. Známá celsiova stupnice těmto bodům přiřazuje 0° a 100° . Farenheitova stupnice pak $+32^{\circ}$ a 212° .

Gay-Lusacův zákon stanoví, že všechny plyny při stejném zahřátí, za stálého tlaku zvětšují svůj objem ve stejném poměru – tj. stejně se roztahují. Teplotu pak můžeme definovat podle roztažnosti libovolného plynu, kdy platí

$$V_t = v_0(1 + \alpha t), \quad (6. 51)$$

kde α je součinitel tepelné roztažnosti a má pro všechny plyny stejnou hodnotu.

Zavedeme-li absolutní teplotu T jako

$$T = t + 1/\alpha, \quad (6. 52)$$

pak dostane Gay-Lusacův zákon zvláště jednoduchý tvar

$$V = V_0 \cdot T / T_0 \quad (6. 53)$$

Součinitel tepelné roztažnosti pro ideální plyny se dá stanovit jako $\alpha = 3,66 \cdot 10^{-3}$, ($^{\circ}\text{C}^{-1}$), pak platí

$$T = t + 273,16 \text{ (K)} \quad (6. 54)$$

což označíme jako absolutní teplotu Kelvínovu. Základní jednotkou termodynamické teploty je 1 K – kelvín, definovaný jako 273, 16 díl teploty trojného bodu vody. Zavedením absolutní teplotní stupnice odpadá označování záporných hodnot, jako je tomu u stupnice Celsiovy. Pro praktické měření teplot lze využít libovolného měřitelného fyzikálního procesu. Teploměry můžeme rozdělit podle různých hledisek např. podle tab. 6. 2.

Tab. 6. 2 Rozdělení teploměrů

Dotykové	Bezdotykové	Zvláštní
<u>dilatační</u> – skleněné, tlakové tyčové, dvojkovové aj.	pyrometry – radiační pásmové spektrální	Keramické žároměrky
<u>elektrické</u> – odporové, termo-elektrické, aj.	Infrafotoografie	Teploměrná tělíška
<u>speciální</u> – krystalové, teplo-měrné barvy, nálepky, tablety, aj	Termovize	

Obecně jsou metody měření teplot založené na:

- bodovém měření teploty, sledujícím vývin tepla v určitém prvku či uzlu vozidla (stroje),
- snímání a analýze teplotních polí na povrchu diagnostikovaného objektu (motoru, převodném ústrojí aj.).

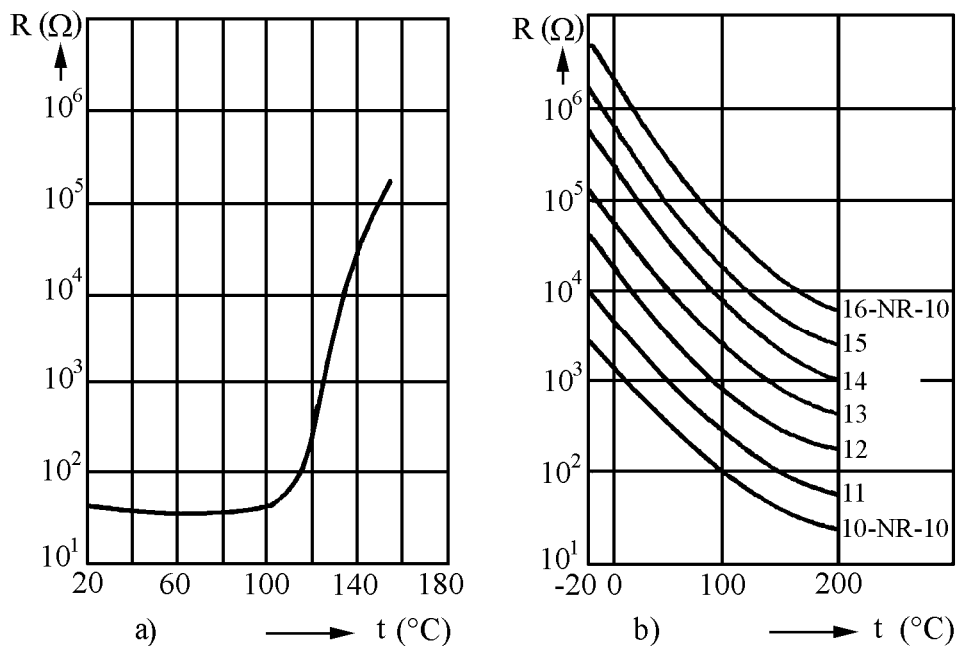
Uvedené metody umožňují sledovat např. stav uložení klikového hřídele, stav ložisek převodovky, tepelné poměry na různých místech motoru, stav a přehřátí elektrických obvodů, jsou základem systému protipožární ochrany speciálních vozidel aj.

Podle způsobu zjišťování teplotních charakteristik dělíme tepelné metody na kontaktní a bezkontaktní.

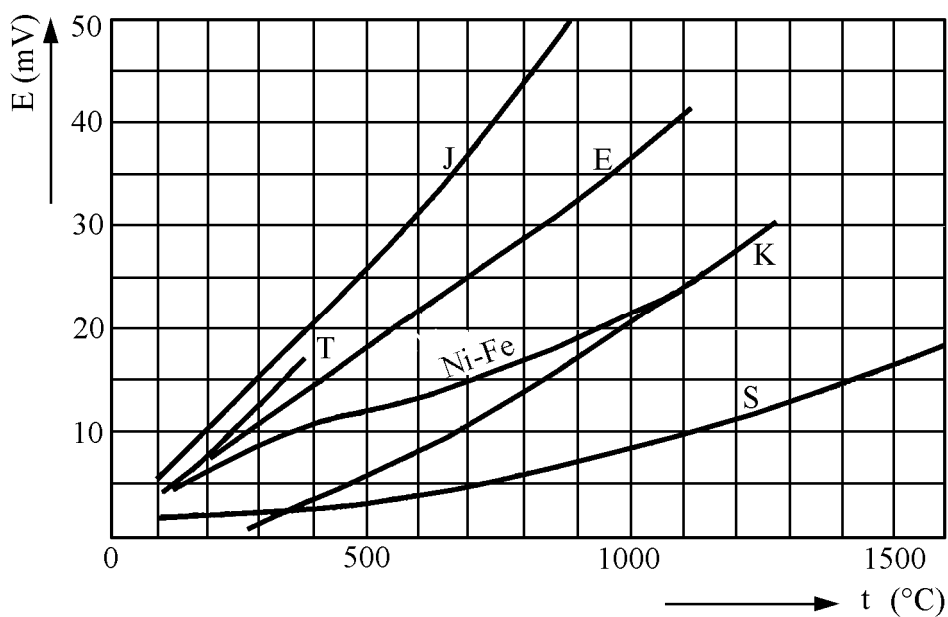
1. Kontaktní metody měření teploty a teplotních polí

a) Metody měření, převádějící změny teplot na změny některé elektrické veličiny; zde se používají:

- odporové snímače, využívající růstu odporu některých materiálů (platiny, mědi, niklu aj.) s teplotou. Snímač je tvořen např. odporovým drátkem, stočeným do šroubovice a zataveným do skla. K měření se užívá můstkových metod. Rozsah měření bývá značný např. od -200°C až po $+800^{\circ}\text{C}$.
- termistory, což jsou polovodičové snímače teploty s kladným nebo záporným součinitelem změny teploty. Jedná se o polykrystalická čidla, vyrobená technologií práškové metalurgie – spékáním oxidů kovů; v posledních letech se začínají využívat také monokrystalické odporové teploměry. Jejich výhodou je 5 – 50krát vyšší koeficient teplotní závislosti odporu termistoru oproti kovovým odporům. Jejich předností je také velká citlivost, malá hmotnost a rozměry. Nevýhodou je nelinearita závislosti odporu na teplotě a rozptyl vlastností termistorů ve výrobní sérii. Teplotní charakteristika polovodičového termistoru s kladnou orientací je na obr. 6. 37a a se zápornou orientací na obr. 6. 37b.
- termoelektrické snímače (bimetalové teploměry), využívají jevu, kdy na obvodu, tvořeném dvěma vybranými kovy (železo – konstantan) na obou koncích spojenými, vede rozdíl teplot těchto spojů ke vzniku elektromotorické síly, resp. termočláňkového napětí, jehož závislost se dá popsat polynomem II. řádu. Předností termoelektrických snímačů je široký rozsah měřených teplot a malý rozptyl měření. Nevýhodou je malá citlivost. Teplotní závislost různých termoelektrických teploměrů je znázorněna na obr. 6. 38.



Obr. 6. 37 Charakteristiky termistorů



Obr. 6. 38 Teplotní závislost termoelektrických teploměrů vyrobených z různých materiálů

b) Metody využívající tepelně citlivé barvy, tzv. termokomory pro stálou indikaci teplot (s vratným cyklem) a termokomory pro jednorázové použití (s nevratným cyklem), jejichž odstín barvy se změní při překročení nominální teploty, ale po následujícím poklesu teploty už zůstává stejný.

Existuje široké spektrum barev různých odstínů pro značný rozsah teplot (+ 40 až + 1400° C). Přesnost indikace teploty je asi 5° C.

c) Metody využívající organické sloučeniny, které ohřevem nepřecházejí do kapalného stavu, ale vytvářejí mezifázi, v níž si zachovávají určité molekulární uspořádání. Jde o tzv. kapalné krystaly, jejichž barva se vratně mění s teplotou. Pomocí kapalných krystalů lze vysledovat na objektu diagnostiky místa s maximální teplotou, izotermy, směr postupu tepla aj., tedy obraz teplotního pole.

Tato metoda však umožňuje pouze relativní měření teplot. Ve vztažném bodě musíme absolutní hodnotu změřit některou jinou metodou. Obvyklé je měření v rozsahu 10 až 100° C s rozlišitelností 0,1° C.

2. Bezkontaktní měření teplot a teplotních polí

Je založeno na detekci a vyhodnocování té části elektromagnetického záření, která je vyvolána teplotou objektu. Jde o infračervené záření, jehož oblast vlnových délek leží asi od 0,8 μm do 1 mm. Při bezkontaktním snímání teplot buď vyhodnocujeme výši teploty v jediném místě (pyrometry), nebo snímáme teplotní pole.

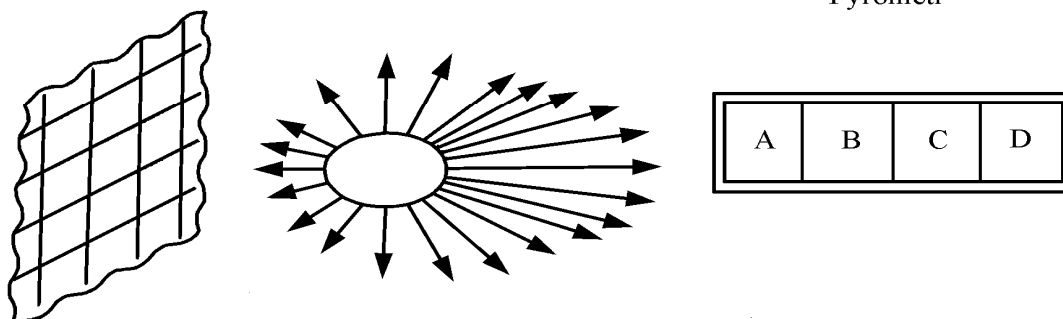
a) Pyrometry

Radiační pyrometry úhrnně vychází ze Stefan–Boltzmanova zákona, podle nějž zářivá energie, která se vymění při měření mezi měřenou plochou tělesa a ploškou čidla pyrometru je úměrná rozdílu 4. mocnin jejich teplot. Blokově je měření radiačním pyrometrem znázorněno na obr. 6. 39.

Radiační pozadí

Měřený objekt

Pyrometr



Obr. 6. 39 Schéma měření radiačním pyrometrem

Legenda: *A – optická soustava, B – transformace zářivé energie na elektrický signál, C – zpracování signálu, D – výsledky měření teploty.*

Problematika správného určení teploty tělesa bezkontaktním způsobem je poměrně složitá. Hlavní potíž je, zhruba řečeno, v tom, že měřený objekt nemívá vlastnosti tzv. absolutně černého tělesa, takže údaj teploty na pyrometru by byl nižší, než odpovídá teplotě skutečné. Korekci proto vnášíme do měření tím, že na pyrometru nastavujeme poměrnou emisi objektu – tzv. emisivitu ϵ , kterou lze pro daný materiál a charakter povrchu najít ve speciálních tabulkách. Protože však velikost ϵ je záležitost složitější (vliv barvy, tvaru, teploty, vlnové délky apod.), u přesnějších měření se neobejdeme bez cejchování jinou metodou. Optickou částí pyrometru je konkávní zrcadlo, soustředující záření na snímač, nebo objektiv. Kvůli propustnosti infračerveného záření v dostatečně širokém spektru je materiál objektivu často jiný, než sklo (např. fluorid lithný apod.). Transformaci zářivé energie na elektrický signál provádí snímač.

Úhrnné pyrometry užívají tepelných snímačů. Tepelné záření je zde optickou soustavou koncentrováno na snímač (termočlánek, termistor apod.), jehož teplota v důsledku toho roste. Na základě následných změn elektrických parametrů snímače hodnotíme výši teploty. Vyhodnocení je zde neselektivní, přibližně z celého vlnového rozsahu záření. Časová konstanta měření je poměrně značná.

Pásmové pyrometry pracují s tzv. kvantovými snímači, které jsou založeny na fotoelektrickém jevu. Absorpce kvanta záření, přivedeného optikou na čidlo, vede u snímače ke zvýšení elektrické vodivosti (fotoodpory PbS) nebo ke vzniku hradlového napětí (hradlové selenové fotočlánky). Tepelné záření se hodnotí selektivně, jen v pásmu vymezeném především spektrální citlivostí čidla.

Uvedené parametry jsou poněkud citlivější, pracují na rozdílu teplot diagnostikovaného objektu a okolí již od 12° C, časová konstanta je proti předchozím podstatně kratší (asi 0,5 s).

b) Systémy snímání teplotních polí

Pracují tak, že buď rozkládají teplotní obraz objektu diagnostiky, nebo pracují bez rozkladu. Systémy, které zviditelní obraz objektu bez rozkladu, přímou cestou, jsou méně užívané, patří sem:

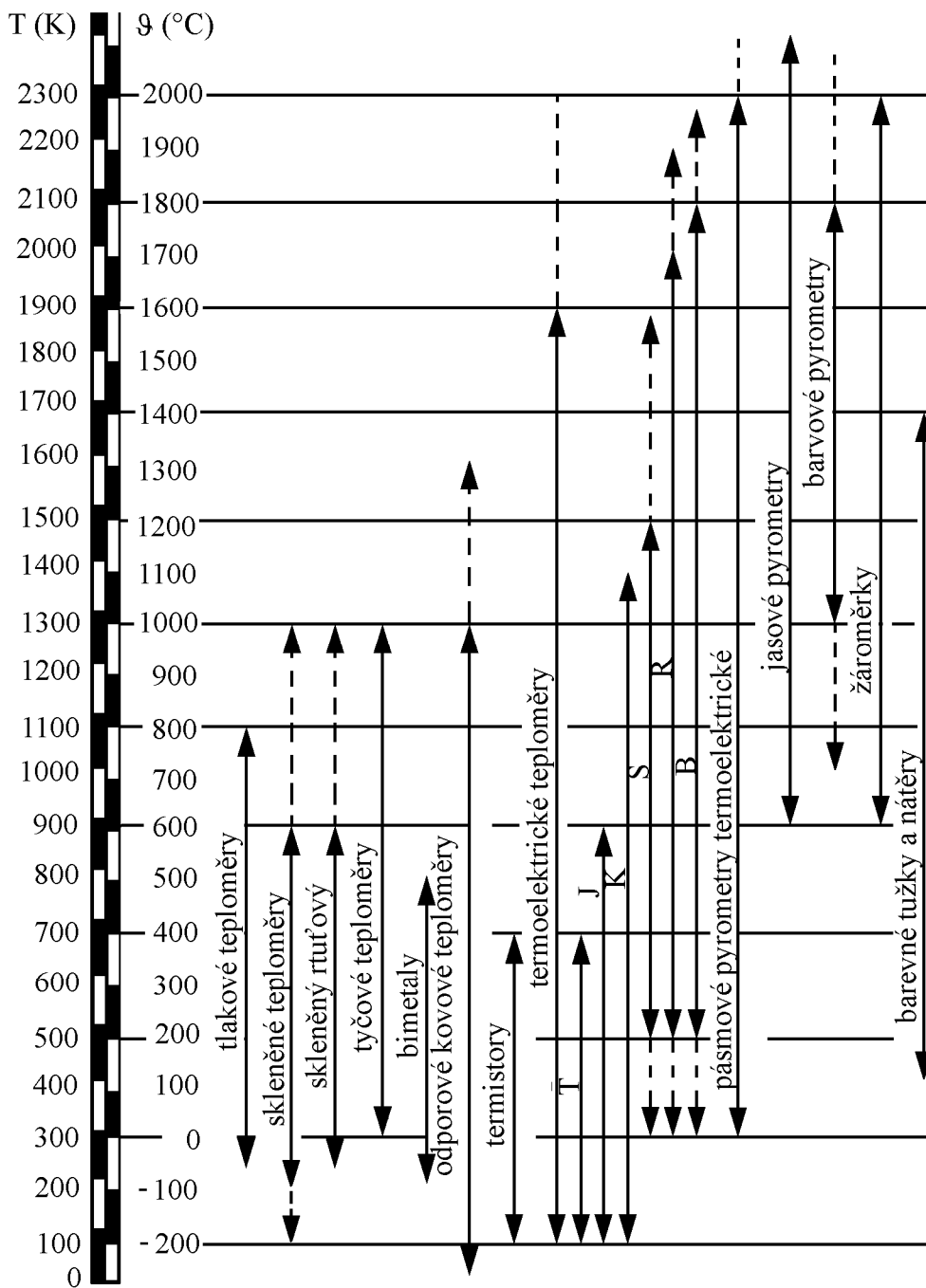
- obrazové měniče, využívající fotoemise a sekundární emise elektronů. Tepelné záření objektu je promítáno na fotokatodu. Emise elektronů v každém jejím bodě je pak funkcí ozáření. Elektrony jsou optikou usměrňovány na luminiscenční stínítko, kde vytvářejí viditelný obraz teplotního pole.
- systémy, založené na infra fotografii, využívající fotografický materiál citlivý na infračervené záření. Tímto způsobem se vyhodnocují teploty nad 250° C.
- tzv. evapografy, založené na přeměně tepelného záření objektu ve viditelné zobrazení vypařováním či kondenzací tekutiny na tenké membráně. Jejich výhodou je vysoká rozlišovací schopnost teplot.

Systémy pracující s rozkladem obrazu. Využívají většinou principu televizního rozkladu obrazu (horizontální – řádkový rozklad, vertikální – snímkový rozklad) a nazývají se termovizními systémy. Skládají se obvykle z kamery (scanner), vyhodnocovacího elektronického zařízení, monitoru, přídatného zařízení (předsádky, filtry, fotopřístroj aj.), popř. PC a software CATS (Computer Aided Thermography Software). Rozsah měření teplot od -30° do +1500° C, teplotní rozlišitelnost 0,1° až 0,05° C, přesnost měření + 2 %. Vyhodnocovací zařízení, zejména ve spojení s PC, umožňuje rychlou analýzu v reálném čase (až 25 termogramů za sekundu).

Počítačová analýza umožňuje v termogramu:

- bodové měření teplot,
- profilové řezy (teplotní analýza ve vertikálách či horizontálách, popř. v kříži),
- histogramy (zastoupení teplot ve vybrané ploše),
- isotermy (až 16 odstínů barev v nastaveném rozsahu teplot),
- uložení termogramů do paměti - databanky,
- operace s termogramy (např. rozdíly mezi termogramem naměřeným a termogramem uloženým v paměti aj.).

V technické diagnostice nevystačíme pro měření teplot s jedinou metodou, popř. přístrojem. V praxi se jednotlivé skupiny metod a přístrojů doplňují, kombinují a překrývají. Použití různých teploměrů a jejich měřicí rozsahy jsou uvedeny na obr. 6. 40.



Obr. 6. 40 Příklady použití teploměrů a jejich měřící rozsahy

7. DEFEKTOSKOPICKÉ METODY DIAGNOSTIKY

Defektoskopické metody jsou používány pro nedestruktivní zkoušky skrytých vnitřních a povrchových vad součástí motorových vozidel. Využívají se rovněž pro provozní účely, zvláště u namáhaných součástí vozidel. Defektoskopické metody jsou založeny na řadě fyzikálních principů a lze je rozdělit do následujících skupin:

1. Metody umožňující detekci povrchových a podpovrchových vrstev materiálu, trhlin, koroze a jiných porušení celistvosti – zejména na povrchu a v blízkosti povrchu:

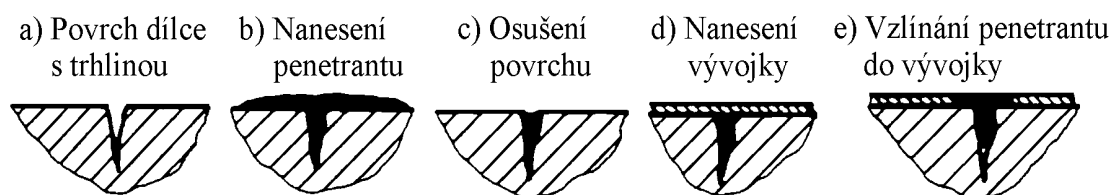
- kapilární metody
- odporové metody
- elektromagnetické metody
- magnetické
- tepelné (IČ) metody
- optické

2. Metody umožňující detekci trhlin a jiných defektů (necelistvosti) uvnitř materiálu:

- ultrazvukové
- prozařovací (radioskopie, tomografie, roentgenovo záření, gama záření, tok neutronů)

7.1 Kapilární metody

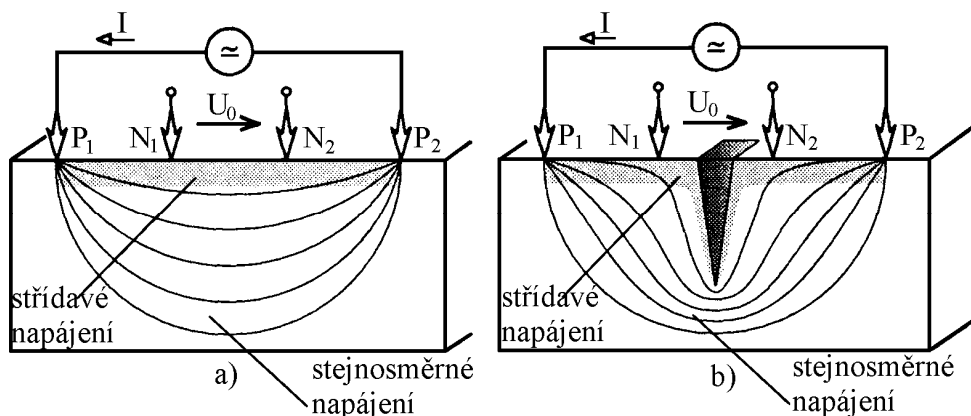
Využívají schopnost kapalin vzlínat v tenkých vlasových trhlinách (kapilárách). Principem je nanesení detekční kapaliny, tzv. penetrantu, která zateče do povrchových vrstev zkoušené součásti. Po 5 až 20 minutách se detekční kapalina setře z povrchu. Penetrant vlivem kapilárních sil vzlíná do tzv. vývojky a zřetelně vyznačí tvar vady. Metoda se využívá pro indikaci vlasových trhlin. Jako penetrantu se používá látka s vhodnou viskozitou (dříve petrolej, nyní benzol a olej s barvivem – spreje), která vytváří barevný nebo fluorescenční kontrast s vývojkou, popř. fluoreskující při ozáření ultrafialovými paprsky. Vývojka je látka na bázi oxidu zinečnatého, popř. kaolinu, bílého mastku, bentonitu aj. a nosného prostředí, kterým je vzduch, líh, aceton aj. Nanáší se na povrch zkoušené součásti po odstranění přebytku penetrantu. Kromě těchto základních prostředků se používají různé odmašťovače, čističe (odmaštění a očištění povrchu součásti) a emulgátory (odstranění emulgátoru z povrchu součásti). Použití kapilárních metod je jednoduché, univerzální a umožňuje zjištění většiny povrchových defektů součástí. Princip kapilární metody je na obr. 7. 1.



Obr. 7. 1 Kapilární metody

7. 2 Odporové metody

Odporové (potenciometrické) metody se používají pro elektricky vodivé materiály. Do zkoušeného materiálu se přivádí stejnosměrný, popř. nízkofrekvenční střídavý proud (elektrodami P_1 a P_2) a prostřednictvím napěťových elektrod N_1 a N_2 se měří napětí U_0 . Napětí U_0 je dáno Ohmovým zákonem, tj. délkou proudových čar, průřezem materiálu a konduktivitou, v případě trhliny a materiálu se elektrické pole deformuje, dráha proudnic se prodlouží a měřené napětí klesne. Rozlišovací schopnost odporové metody je až 0,1mm, umožňuje zjišťovat vady materiálu do hloubky až 60 mm s přesností asi 10 %. Na obr. 7. 2 je princip odporové defektoskopické metody.

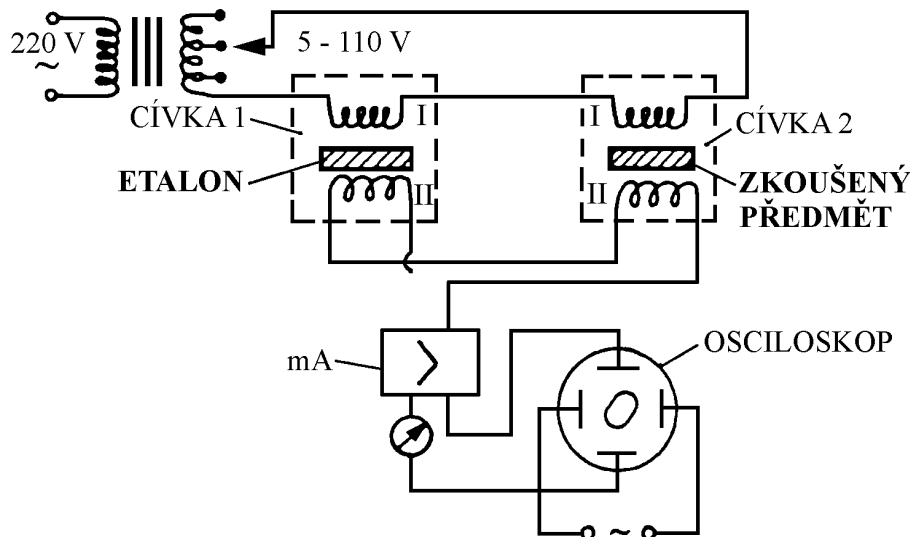


Obr. 7. 2 Princip odporové defektoskopické metody

7. 3 Elektromagnetické metody

Elektromagnetická metoda umožňuje lokalizovat povrchové a podpovrchové trhliny, poškození nekovových povlaků, diagnostikovat korozi aj. bezdotykovým měřením. Principem je využití vířivých proudů, které v materiálu vytvářejí magnetické pole působící proti (zeslabující) budícímu poli. Je-li v materiálu trhlina, vířivé proudy ji obtékají, jejich dráha se prodlužuje a proudová hustota zeslabuje. Důsledkem defektu je snížení intenzity magnetického pole, které lze vyhodnotit absolutně nebo výhodněji diferenčně, tj. porovnáním s etalonovým magnetickým polem. Princip metody je na obr. 7. 3. Etalon je vložen do cívky 1, zkoušený předmět do cívky 2. Do primárních vinutí cívky (I) je vedeno střídavé napětí, v sekundárních vinutích (II) cívky se indukují sekundární napětí, jehož úroveň je dána intenzitou indukovaného magnetického pole. Ta závisí na vlastnostech etalonu a zkoušeného předmětu a dalších veličinách, např. vzdálenosti cívky a tělesa, permeabilitě a konduktivnosti materiálu, budícím kmitočtu aj. Při shodnosti etalonu a zkoušeného materiálu je napětí

v cívkách stejné. Na osciloskopu se tato shodnost projeví jako přímka odpovídající časové základně. Pokud jsou vlastnosti etalonu a zkoušeného materiálu různé, je v cívkách indukováno rozdílné napětí a tato diference napětí se projeví na osciloskopu jako křivka. Z velikosti difference napětí lze usoudit na úroveň odlišností etalonu a zkoušeného materiálu (póry, nehomogenity, strukturální defekty, trhliny, ale i rozdílné mechanické vlastnosti např. tvrdost aj.).



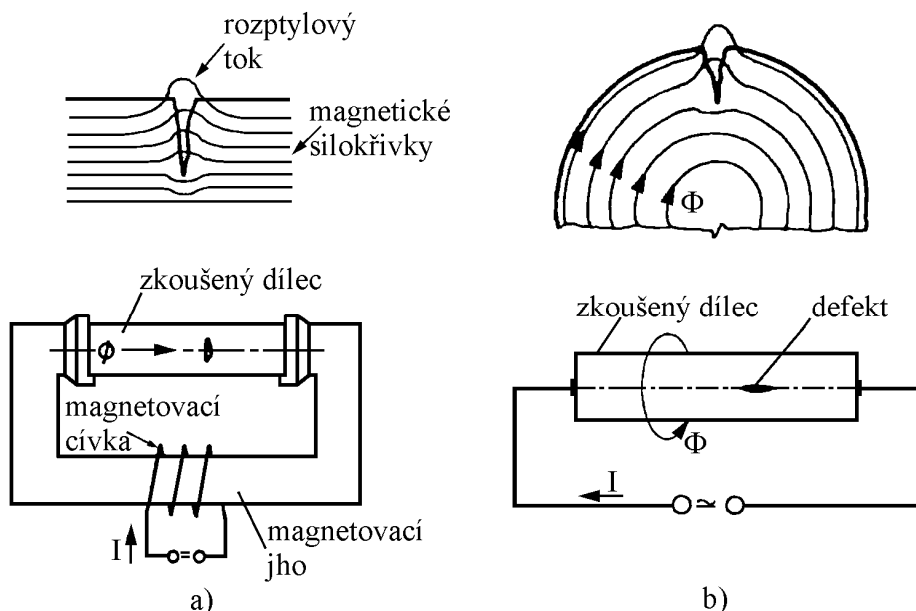
Obr. 7. 3 Zařízení pro elektromagnetickou induktivní defektoskopii vířivými proudy

7. 4 Magnetické metody

Magnetické metody jsou vhodné pro detekci vad ve feromagnetických materiálech. Využívají rozptylu magnetického pole v místě nehomogenity materiálu (trhlina, vměstek aj.). Magnetická defektoskopie je založena na zviditelnění a změření rozptylového magnetického pole. Metodika spočívá ve způsobech odmagnetování a následném zmagnetování materiálu (podélné – pólové, příčné – cirkulární a kombinované) a také na změření (indikaci) rozptýleného magnetického pole. Na obr. 7. 4 jsou znázorněna rozptylová magnetická pole při: a) podélném (pólovém) magnetování a b) příčném (cirkulárním) magnetování. Zviditelnění polohy a tvaru defektu se v praxi provádí několika metodami:

- práškovou (polévací) metodou, která záleží v nanesení speciální tekutiny s rozptýlenými feromagnetickými částicemi na povrch zmagnetované součásti. Částice se seskupí na součásti podle magnetických siločar a zviditelní defekty. Citlivost metody lze zvýšit užitím fluorescenční kapaliny, která při ultrafialovém ozáření vytváří fluoreskující obraz defektů.

- zaznamenáním magnetického pole na tzv. magnetografický materiál (obdobu magnetofonového pásu).
- využitím speciální elektroinduktivní snímací obvykle feromagnetické sondy, v níž se časově proměnným magnetickým polem indukuje elektrické napětí.
- speciálními sondami, odpory a diodami.



Obr. 7. 4 Rozptylová magnetická pole při a) podélném a b) příčném magnetování

7. 5 Tepelné (IČ) metody

Fyzikální podstatou těchto metod je bezdotykové měření teploty povrchu součástí neboli snímání a vyhodnocování určité oblasti elektromagnetického vlnění (infračerveného záření, tj. oblast spektra od 0,78 μm do 1 mm), které vyzařuje měřený objekt. Známe-li rozložení teplotního pole součásti lze kontrolovat funkce, jejich činnost je spojena s vývinem nebo absorpcí tepla. Tak lze lokalizovat materiálové vady, opotřebení, vnitřní defekty, stav izolátorů aj. V defektoskopii se využívá technika snímání tepelného obrazu, kdy se součást ohřeje na vyšší teplotu než je teplota okolí a pak se během ochlazování snímá termokamerou. Nehomogenity mají rozdílnou tepelnou kapacitu a vodivost a to se promítne jako odchylka v tepelném obrazu snímaného povrchu.

7. 6 Optické metody

Endoskopy jsou zařízení pro diagnostiku obtížně přístupných prostorů a umožňují vizuální kontrolu s možností zvětšení obrazu. K osvětlení prostoru užívají optická vlákna a

halogenové, popř. xenonové lampy a výbojky, jejichž spektrum se blíží spektru denního světla, což umožňuje věrnou reprodukci obrazu. Jsou přenosné a vhodné pro diagnostiku např. lopatek turbín, vnitřních prostorů spalovacích motorů a převodovek, svárů, tlakových nádob, nádrží, konstrukcí aj. Dělí se na boroskopy (pevné endoskopy), fibroskopy (vláknové flexibilní endoskopy) a videoskopy (osazené CCD senzorem, umožňující zobrazovat odpovídající 3D modely).

Holografie je diagnostická metoda umožňující zviditelnění velmi malých tvarových deformací povrchu, tj. 3D zobrazení, tzv. hologram. Snímáním v časové řadě pak umožňuje diagnostikovat dynamické změny a vyhodnocovat mechanické kmitání těles, zviditelnit amplitudy kmitání aj. Principem je osvětlení objektu diagnostiky koherentním monochromatickým světlem. Odražená vlna interferuje s referenční vlnou a hologram je záznam této interference na optickém paměťovém médiu (speciální skleněná deska aj.). V současné době se využívají v technické diagnostice laserové interferometrické vibrometry, umožňující bezdotykově měřit amplitudu kmitání objektu diagnostiky, jedná se např. o heterodynní laserový vibrometr nebo měřiče torzních kmitů (principem je využití Dopplerova jevu) aj.

7. 7 Ultrazvukové metody

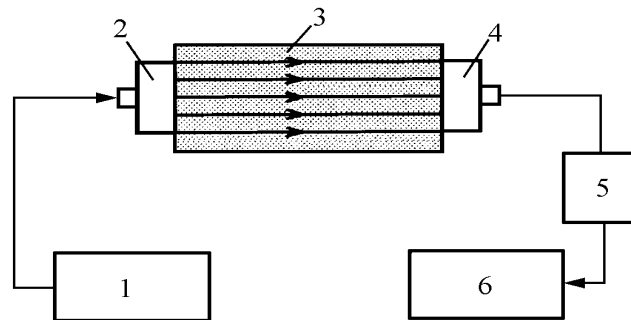
Ultrazvuková defektoskopie je založená na mechanickém kmitání objektu diagnostiky a jevech, které nastávají při průchodu ultrazvukových vln materiálem. Pro defektoskopii je významným diagnostickým parametrem akustický tlak (podrobnosti uvedeny v kap. 6. 1.). Šíření ultrazvukových vln provází útlum vln, který se projevuje snižováním amplitudy, ohyb při setkání s překážkou, která je menší než délka vlny, odraz a lom na rozhraní dvou odlišných prostředí. Podle směru kmitání objektu diagnostiky vůči směru šíření vlny dělíme ultrazvukové vlny na:

- podélné
- příčné
- povrchové
- deskové

V ultrazvukové defektoskopii se používají dvě základní metody:

Průchodová, která je založena na průchodu ultrazvukových vln z vysílací na přijímací sondu, případná vada vyvolá pokles akustického tlaku. Aby se neprojevil útlum materiálu, měření se porovná srovnávací metodou na místě, které je zaručeně bez vad. Princip

průchodové metody na obr. 7. 5. Nevýhodou je nemožnost přesně lokalizovat vadu. Je vhodná zvláště pro diagnostiku tenkých materiálů.



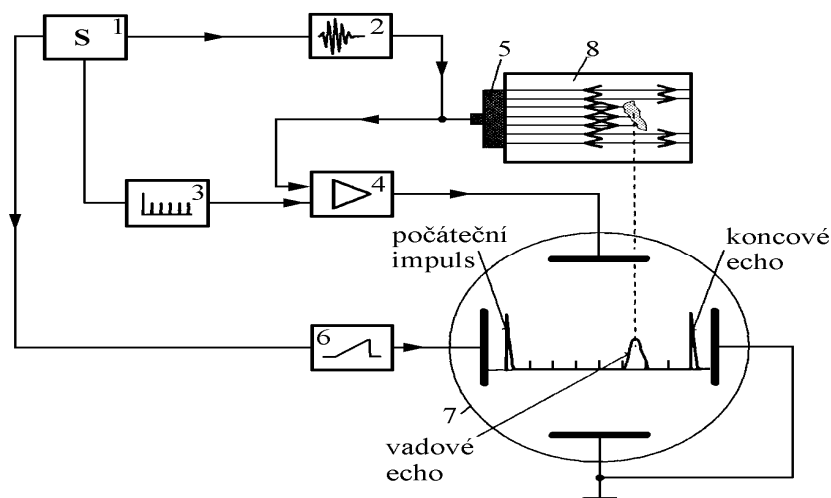
Obr. 7. 5 Princip průchodové metody

Legenda:

1 – generátor ultrazvukových vln, 2 – vysílací sonda, 3 – objekt diagnostiky, 4 – přijímací sonda, 5 – zesilovač, 6 – indikátor

Odrazová (impulzová) metoda, obr. 7. 6, je založena na principu průchodu a odrazu. Na rozhraní prostředí je impuls odražen, zachycen sondou a zobrazen na časové ose monitoru. Rychlost šíření ultrazvuku je konstantní, a proto lze z doby návratu odraženého signálu stanovit:

- tloušťku zkoušeného materiálu,
- výskyt vady,
- lokalizaci vady (hloubku pod povrchem),
- přibližně typ vady.



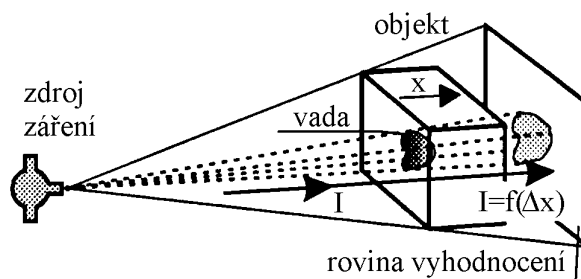
Obr. 7. 6 Princip odrazové (impulsové) ultrazvukové metody

Legenda:

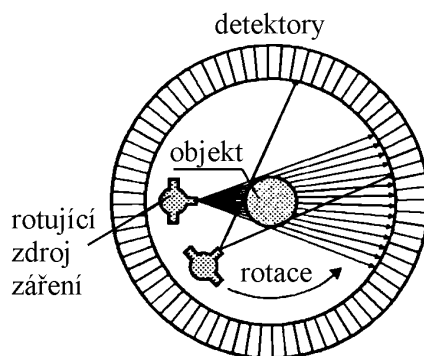
1 – synchronizační jednotka, 2 – generátor impulsů, 3 – generátor časových značek, 4 – zesilovač, 5 – sonda, 6 – generátor časové základny, 7 – monitor, 8 – objekt diagnostiky)

7. 8 Metody prozařovací

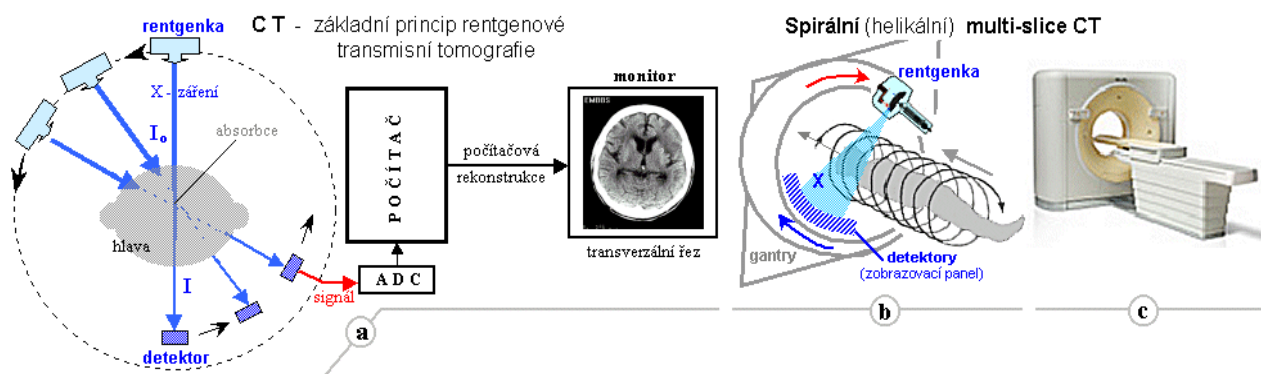
Jsou založeny na prozařování ionizačním zářením a vyhodnocení absorpce tohoto záření při průchodu objektem diagnostiky. Jako zdroj je užíváno roentgenovo záření a tok neutronů. K vyhodnocení se používá radiografická metoda umožňující přímou kontrolu objektu diagnostiky na monitoru. Výhodou je možnost číslicového zpracování signálu. Princip prozařovací metody je na obr. 7. 7. Do prozařovacích metod patří také počítačová tomografie (Computer Tomography) obr. 7. 8 a 7. 9. umožňující zobrazení tenké vrstvy v průřezu objektu diagnostiky v rovině svazků různých typů záření nebo vlnění procházejících objektem diagnostiky. Podstatou je počítačová rekonstrukce zobrazení určitého řezu objektu diagnostiky z naměřených dat, získaných při měření svazku záření v řadě projekcí při současné rotaci objektu diagnostiky, detektorů, resp. v poslední době zdroje záření.



Obr. 7. 7 Princip prozařovací defektoskopické metody



Obr. 7. 8 Princip počítačové tomografie (CT)



Obr. 7. 9 Roentgenová počítačová tomografie – příklad lékařské aplikace diagnostiky

8. TRIBOTECHNICKÁ DIAGNOSTIKA

8.1 Úvod do tribodiagnostiky

Tribotechnika je oborem využívajícím poznatků z výzkumu tření, opotřebení a mazání k tomu, aby bylo možno zmenšit součinitele tření, resp. optimalizovat průběh tření a snížit opotřebení vzájemně se po sobě pohybujících těles. Tribotechnické metody diagnostiky využívají mazacího média, u složitých mechanických uzavřených soustav, jako zdroje vícerozměrných, komplexních informací o dějích, změnách a režimu opotřebení, které v soustavách probíhají. Tribotechnická diagnostika řeší dva velké okruhy problémů:

- Zjišťování stavu, prodloužení použitelnosti a prognózování degradace mazacích olejů.
- Zjišťování režimu, místa a trendu opotřebení mechanického systému (vozidlový spalovací motor, převodovka, hydraulická soustava aj.) cestou vyhodnocení výskytu cizích látek v mazivu, a to jak z hlediska kvantitativního, tak kvalitativního.

Sledování provozní degradace olejů se provádí jednoduchými provozními metodami (rychlometodami), klasickými chemickými (analytickými) metodami (normovanými státní normou) a speciálními tribodiagnostickými metodami.

Zjišťování opotřebení mechanických systémů mazaných olejem je založeno na poznatku, že olej po určité době provozu vykazuje určité procento příměsí. Je to především kovový otěr (částice opotřebení), který je rozptýlen v oleji a který po kvantifikaci některou vhodnou metodou (např. spektrální analýzou, polarografií, feroografií aj.) umožní nepřímé sledování mechanických změn v systému, ve kterém je olej použit. Ze zjištěného množství kovového otěru, intenzity nárůstu, tvaru, velikosti a materiálového složení aj., vyvozujeme určité závěry - shoduje-li se nárůst a další parametry s nominálními hodnotami stanovenými pro daný mechanický systém (stanovenými výpočtem nebo dlouhodobým sledováním aj.), lze důvodně usuzovat na normální průběh opotřebení bez zvýšeného rizika selhání systému. Abnormální, resp. náhlý nárůst kovových částic aj., signalizuje mimořádný děj. Z velikosti, tvaru, rychlosti nárůstu a dalších parametrů lze usuzovat na závažnost poruchy a naléhavost nápravných opatření. Významnou diagnostickou okolností je možnost lokalizovat místo vzniku zvýšeného otěru. Podle druhu kovového otěru je možné, známe-li materiál částí soustavy mazané a oplachované olejem, stanovit třecí dvojici, v níž dochází k prudkému zvýšení degradačního opotřebení. K tomu existují různé speciální metody, podrobnosti např. v lit. [47] aj. Pokud nelze lokalizovat místo zvýšeného otěru tímto způsobem, je zjištění

nadměrného otěru signálem pro aplikaci některé z dalších metod technické diagnostiky, vhodné k lokalizaci poruchy.

Obecně jsou považovány tribotechnické metody diagnostiky za nejvýznamnější v provozu vozidel, lze to mimo jiné dokumentovat na následujících faktech:

- ročně dochází následkem neúměrně vysokého tření k obrovským ztrátám vyřazováním vozidel a strojů z provozu. Procesy opotřebení rozhodujícím způsobem ovlivňují životnost vozidel a dalších strojů, dobu jejich bezporuchového provozu, náklady na údržbu a opravy aj. Tribotechnická diagnostika svými důsledky příznivě ovlivňuje proces tření a opotřebení mechanických systémů.
- optimální využívání ropných produktů, k nimž většina motorových a převodových olejů, hydraulických kapalin a průmyslových maziv náleží, je v současnosti i budoucnosti velmi naléhavým problémem zvláště proto, že ČR je zcela odkázaná na dovoz ropy. Dosud jsou v mnoha případech maziva, aplikovaná ve vozidlech a strojích, měněna v pevných lhůtách stanovených na základě zkušeností a předpokládané průměrné životnosti olejů. Sledování provozní degradace olejů tribotechnickými metodami dovoluje podstatně intenzivnější využívání olejů do vyčerpání jejich životnosti bez rizika poruch z těchto důvodů. U motorových olejů využívaných v automobilech je možno prodloužit výměnné lhůty dvakrát až třikrát.
- využívání metod tribotechnické diagnostiky s sebou druhotně nese zvýšení pořádku v hospodaření s mazivy a v jejich aplikaci, rovněž dochází k menšímu znečišťování vody a půdy aj.

8. 2 Jednoduché provozní metody (rychlometody) - souprava TRIBO - I

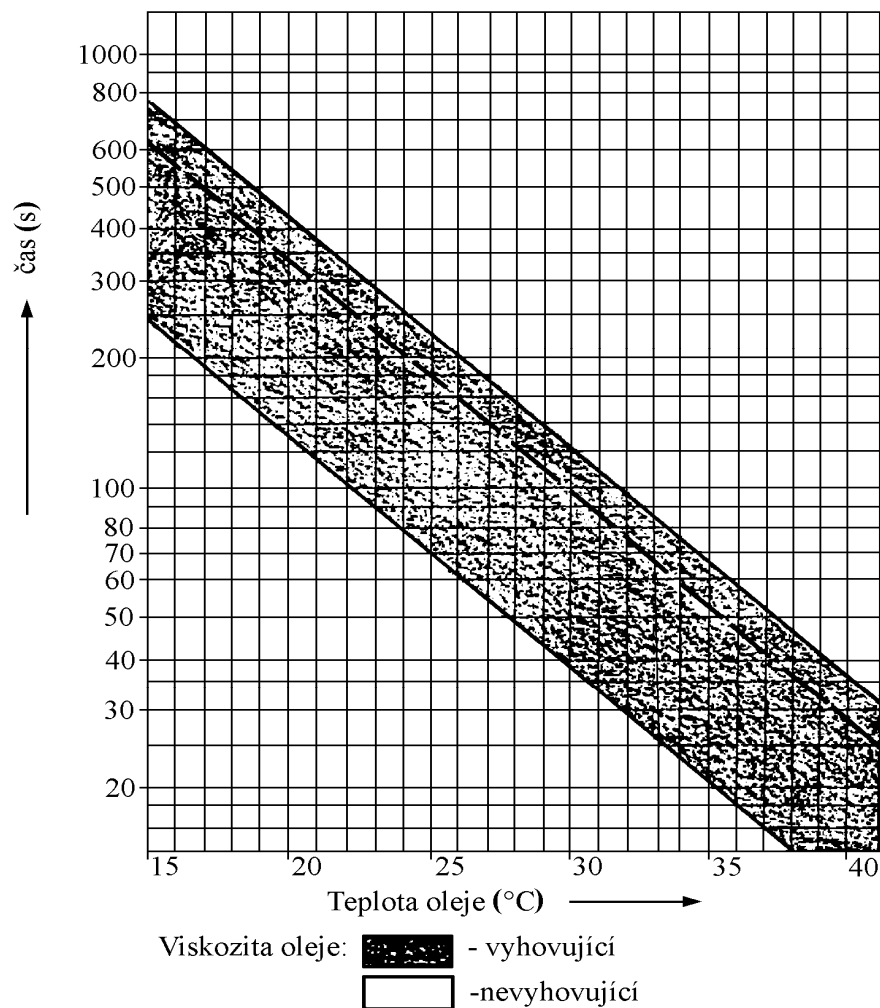
Souprava je určena k realizaci tribotechnické diagnostiky spalovacích motorů aj. v provozních podmínkách. Pomůcky, přípravky a přístroje, které souprava obsahuje, umožňují stanovit smluvní viskozitu, obsah vody, celkové znečištění a detergentně-disperzní vlastnosti. Součástí soupravy je i přípravek pro odběr vzorku oleje z motoru, převodovky aj. Souprava umožňuje měření následujících parametrů:

Stanovení smluvní viskozity (reologických vlastností)

Principem měření je stanovení doby průtoku stálého objemu oleje kalibrovanou tryskou při známé teplotě na viskozimetru oceňovaném nepoužitým olejem. Základními údaji je doba průtoku oleje a jeho teplota. Smluvní viskozita se odečte z grafu na obr.8. 1.

Při překročení mezních hodnot musí být olejová náplň vyměněna. V praxi může dojít k:

- snížení viskozity vlivem průniku paliva do oleje (špatný stav palivové soustavy, netěsnosti, studené starty aj.),
- zvýšení viskozity přítomností primárního znečištění (produkty termooxidačních reakcí, karbonické látky, saze aj.) a sekundárního znečištění (částice prachu ze vzduchu, produkty opotřebení třením, chladicí kapalina aj.).



Obr. 8. 1 Diagram k hodnocení viskozity oleje

Celkové znečištění

Tato metoda je založena na měření dielektrických vlastností oleje. Olej tvoří dielektrikum speciálního kapacitního snímače, jeho kapacita se měří pomocí mostového obvodu a vestavěného kapacitního normálu. Výsledek zkoušky je negativně ovlivněn přítomností vody. Vyhodnocení se provede odečtením počtu dílků na stupnici přístroje. Mezní

hodnoty celkového znečištění pro vybrané oleje jsou uvedeny v tab. 8. 1. Výsledek zkoušky: vyhovuje nebo nevyhovuje - má pouze informativní význam.

Tab. 8. 1 Příklady vyhodnocení celkového znečištění

Druh oleje	Mezní hodnota
TRYSK M6 ADS III	95
Shell Helix Plus	65

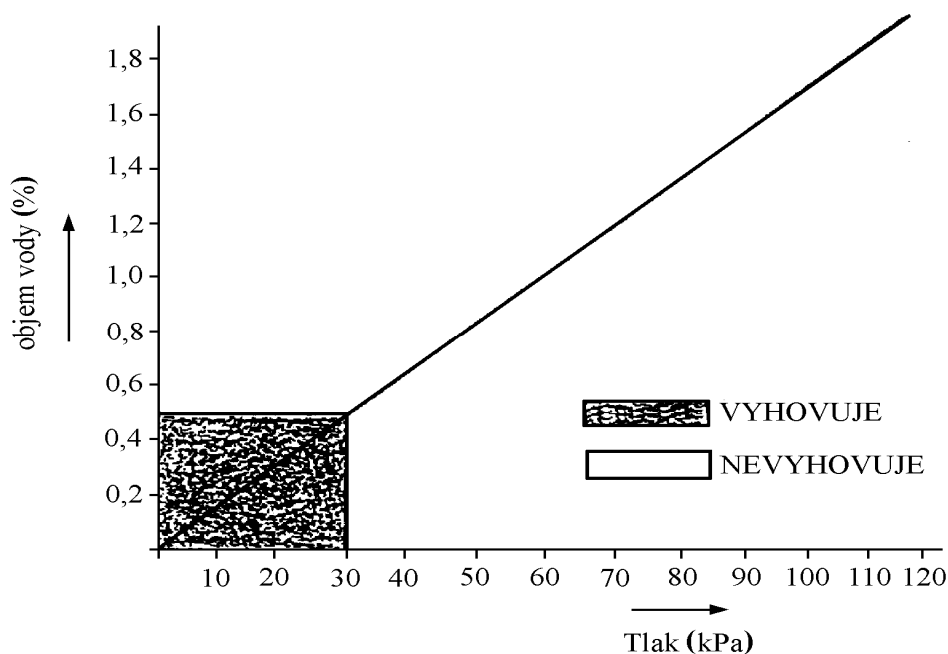
Obsah vody v oleji

a) Informativní test

Přítomnost vody se zjišťuje informativním "prskacím" testem, kdy působíme zvýšenou teplotou na olej nakapaný na podložku. V pozitivním případě stanovíme obsah vody v oleji.

b) Stanovení obsahu vody v oleji

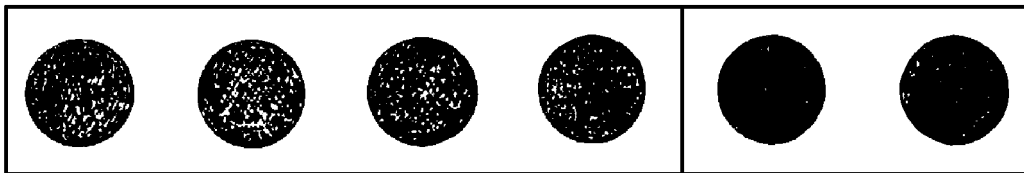
Principem je reakce vody, obsažené v oleji, s hydridem kovu (hliníku), při které dochází ke vzniku vodíku, který v uzavřené nádobce vytváří tlak, jehož velikost je úměrná obsahu vody. Z tlaku na diagramu obr. 8. 2 odečteme obsah vody v %. Mezní hodnota je 0,5 % objemu vody.



Obr. 8. 2 Graf pro stanovení obsahu vody v oleji

Obsah látek nerozpustných v hexanu

Jedná se o orientační zkoušku, která doplňuje měření celkového znečištění. Stanovený objem oleje se rozpustí v daném objemu hexanu a roztok se přefiltruje přes membránový filtr (velikost pórů 0,4 μm) vakuovou filtrací. Výsledky ztmavnutí se porovnají se standardy viz obr. 8. 3. Výsledek zkoušky: vyhovuje nebo nevyhovuje - informativní charakter.

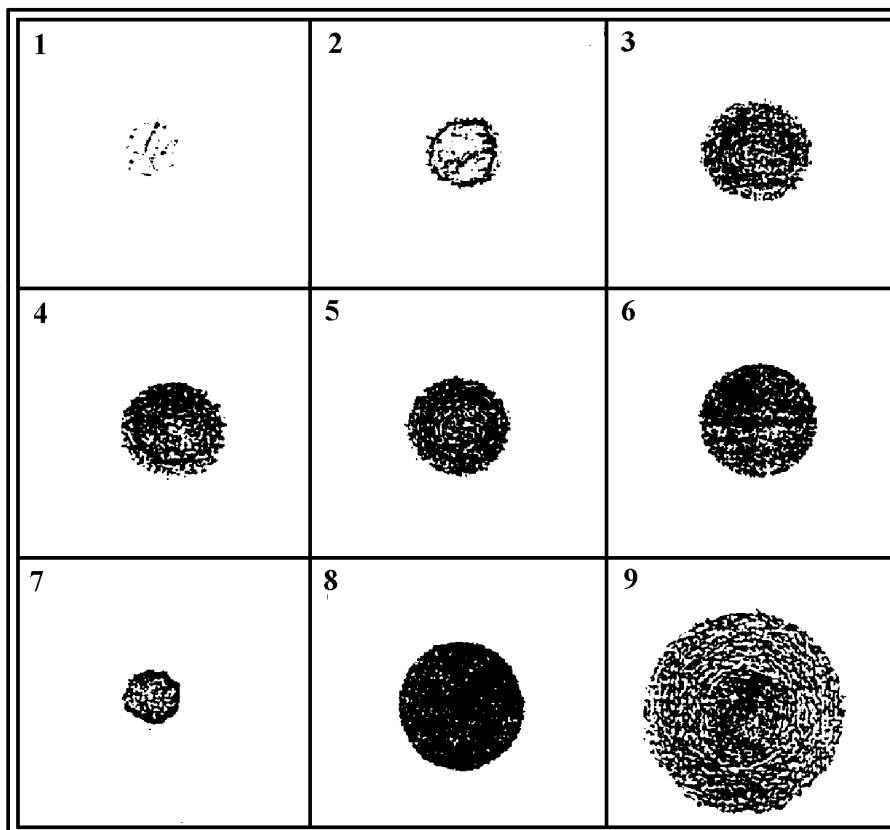


Hustota netransparentního materiálu (DENZITA) (D)

Hmotnost nečistot vzorku (g)

0-0,10	0,10-0,30	0,30-0,50	0,50-0,70	0,70-1,00	1,00-1,30
0-0,0003	0,0003-0,0008	0,0008-0,0016	0,0016-0,0024	0,0024-0,0030	0,0030<

Obr. 8. 3 Standardy pro vyhodnocení látek nerozpustných v hexanu



Obr. 8. 4 Vzory pro posouzení kapkové zkoušky

Detergentně disperzní vlastnosti

Hodnotí se tzv. kapkovou zkouškou na chromatografickém papíru a má informativní význam. Kapková zkouška se provádí nanesením kapky oleje na papír a sledováním tmavosti, rozsahu vsáknutí a charakteru okraje skvrny. Hodnocení se provádí porovnáním se vzorovou stupnicí obr. 8. 4. Mírnému znečištění odpovídá trojice skvrn 1, 2 a 4. Střední znečištění odpovídá číslům 3 a 5. Velmi znečištěný olej představují skvrny číslo 6, 8 a 9. Přítomnost vody v oleji signalizuje ostře ohraničená a roztřepená skvrna č. 7.

8. 3 Základní analytické metody

A.) Stanovení viskozity (ČSN 65 6216)

Viskozita je rozhodující vlastností maziva v oblasti hydrodynamického tření a je hlavním zkušebním údajem mazacích olejů užívaných ve vozidlech a základem jejich třídění a výběru. Měření viskozity je možné provádět několika druhy viskozimetrů; u nás jsou rozšířeny viskozimetry kapilární. Kinematická viskozita je udávána v jednotkách $\text{mm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$. Pro správné stanovení viskozity je nutné, aby vzorek byl homogenní. Nejdůležitější podmínkou je dodržení předepsané teploty vzorku. Temperace oleje ve viskozimetru musí být dokonalá a trvá až 20 minut. V současné době se využívají nejvíce automatizované viskozimetry, které jsou založeny na principu viskozimetru Ubbelohdeho; jejich předností je:

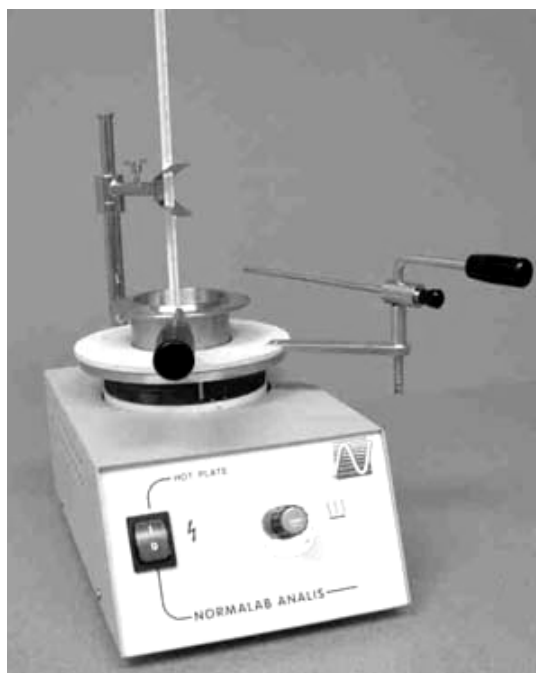
- automatické měření doby průtoku oleje s digitální indikací naměřeného času,
- krátká doba temperace vzorku oleje,
- snadné čištění viskozimetru od zbytků oleje, který ulpí na viskozimetru aj.

Kromě automatizovaných viskozimetrů se v provozní praxi využívá jednoduchých kapilárních viskozimetrů. Měření s nimi je jednoduché a pro potřeby technické diagnostiky skupin vozidel dostačující. Rovněž lze využívat k měření viskozity rychlometod a jednoduchých zařízení. Získané hodnoty jsou pak jen orientační. Základním problémem v tomto případě je udržení stanovené teploty, neboť změna viskozity z teplotou bývá značná (průměrně na 1°C změna viskozity o 5 %).

B.) Stanovení bodu vzplanutí oleje (ČSN 65 6212, 65 6244, 65 6188)

Bod vzplanutí je nejnižší teplota, při které za stanovených podmínek zahříváním v předepsaném přístroji, obr. 8. 5, přechází nad hladinu tolik hořlavých par, že vzniklá směs se vzduchem přiblížením plaménku vzplane a opět zhasne. Bod hoření je nejnižší teplota, při

níž se zahříváním oleje vyvíjí tolik par, že přiblížením plaménku vzplanou a hoří bez přerušení alespoň 5 sekund. Hodnoty bodu vzplanutí a bodu hoření se uvádějí ve ° C. Ke zkoušce je třeba asi 100 ml oleje. V provozních podmínkách se často používají rychlometody, kdy malá množství oleje jsou zahřívána v kelímku a stanovuje se, je-li hodnota bodu vzplanutí nižší než požadovaná (špatný olej) nebo vyšší než požadovaná (dobrý olej). U motorových olejů se připouští minimální hodnota bodu vzplanutí 170° C.



Obr. 8. 5 Příklad přístroje pro stanovení bodu vzplanutí podle Clevelanda

C.) Číslo kyselosti TAN (ČSN 65 6070)

V ropě, která je výchozí surovinou pro výrobu většiny olejů, jsou obsaženy naftenové kyseliny a v menší míře i mastné kyseliny a fenoly. Stárnutím oleje a jeho oxidací za provozu vznikají v něm vyšší i nižší organické kyseliny a jejich zmydlnitelné deriváty. Volné organické kyseliny jsou za všech podmínek korozivním činitelem a jejich přítomnost ve všech ropných produktech je závadná. Obsah kyselin v oleji se obvykle stanovuje titrací. K titraci se používá 5 až 20 gramů oleje, rozpuštěného v lihobenzinové směsi v poměru 1 : 2, s alkalickou modří jako indikátorem. Promíchaný vzorek se titruje alkoholickým roztokem KOH. Bod ekvivalence je určen barevným přechodem indikátoru z modrého do červeného zbarvení. Výsledkem je číslo kyselosti, vyjádřené v miligramech hydroxidu draselného, potřebného pro

neutralizaci přítomných kyselin v 1 g oleje (mg KOH/g vzorku). V poslední době se k stanovení čísla kyselosti stále více používá tzv. konduktometrická titrace, která využívá rozdílné vodivosti iontů. Její princip a postup je mimo rámec tohoto textu. Z hlediska přípustných hodnot čísla kyselosti se udává, že maximální hodnota čísla kyselosti u olejů je 1,5 mg KOH/g, resp. 1 mg KOH/g, je-li současně v oleji zjištěna vázaná voda.

D.) Stanovení procenta vody v oleji (ČSN 65 6062)

Výsledek zkoušky na obsah vody v oleji je jedním z rozhodujících činitelů při testování možnosti dalšího použití maziva. V diagnostické praxi obvykle přítomnost vody zjišťujeme některou rychlometodou viz část „Jednoduché provozní metody tribotechnické diagnostiky“. Kvantitativní stanovení vychází z destilace směsi vzorku oleje s rozpouštědlem. Páry rozpouštědla strhávají s sebou páry vody, kondenzát se shromažďuje v kalibrované části destilačního nástavce. Po skončení destilace a ustálení kondenzátu se oddělí voda a stanoví se její obsah ve vzorku. Měrnou jednotkou je hmotové, případně objemové % vody ze vzorku. Rozpouštědlem je technický benzin. Metoda se nehodí pro stopové množství vody. Pokud vzorek obsahuje stopové množství vody, resp. je třeba přesné stanovení, využívá se tzv. Fischerova činidla. Tato metoda poskytuje přesné a spolehlivé výsledky v krátké době. Stanovení využívá polarimetrické titrace se dvěma polarizovatelnými elektrodami. Při titraci dochází v těsné blízkosti bodu ekvivalence k náhlé změně hodnoty proudu. Obvykle se připouští v olejových i hydraulických náplních max. 0,2 % vody.

8. 4 Speciální tribodiagnostické metody

K nečistotám v oleji počítáme všechny cizorodé látky, ať už jde o plyny, kapaliny či tuhé látky. Z hlediska tribotechnické diagnostiky nás zde zajímají především mechanické nečistoty. Nečistoty v oleji porušují souvislost mazacího filmu, způsobují opotřebení, zvyšují pracovní teploty, mohou způsobit ucpání mazacích kanálů a zadření mechanismů. V hydraulických soustavách nečistoty ohrožují plynulý chod hydraulických prvků, zanášejí filtry, ucpávají trysky aj. Zdrojem nečistot v oleji je především vlastní provoz. V oleji nacházíme nečistoty dvojího druhu:

- primární, které vznikají jako následek chemických oxidačních procesů v oleji při jeho stárnutí. Jsou to látky povahy laků, pryskyřic apod.
 - sekundární, které se dostávají do systému při plnění, netěsnostmi těsnících kroužků aj.
- K sekundárním nečistotám řadíme otěrové částice, které vznikají za provozu.

Podle vlastností dělíme nečistoty na:

- měkké, jsou to ty, které zahrnují produkty stárnutí, tj. pryskyřice, laky, uhlíkaté úsady, zbytky degradovaných olejových přísad aj.
- tvrdé, které mají abrazivní charakter, patří sem nečistoty anorganického původu, např. kovy, prach aj., popř. organického původu, např. tvrdý karbon (spalovací motory) aj.

Při stanovování nečistot v oleji je úkolem tribotechnické diagnostiky zjistit:

- celkový obsah nečistot v oleji,
- složení (morfologii, velikost, nárůst, aj.) částic.

Pro stanovení celkového obsahu nečistot existuje řada metod různě složitých a přesných.

I. Metody filtrační

Vzorek oleje, naředěný rozpouštědlem, se filtruje filtračním kelímkem přes předepsaný papírový filtr. Celkové množství nečistot se stanoví vážením vzorku oleje před filtrací a po ní. Někdy se využívají další modifikace této metody, např. filtrace vzorku přes filtr s definovanou velikostí pórů za konstantního podtlaku aj. Obecně je však filtrační metoda poměrně technicky náročná se značnou možností chyb.

II. Metody využívající odstředování vzorku oleje

Jde např. o metodu HEO, využívající k naředění oleje speciálního rozpouštědla na bázi hexanu. Naředěný vzorek se odstředuje a zbytek se za přesně definovaných podmínek váží. Metoda je značně časově náročná.

III. Metody optické

Pro zjištění a rozlišení nečistot v oleji se používá často fotometrického principu měření. Orientační metodou je určování celkového obsahu nečistot na základě úbytku intenzity světla z konstantního zdroje, procházejícího vzorkem oleje. Pro měření se používá jednoduchého fotometru. Maximální přípustná hodnota nečistot v oleji bývá asi 1 %. Příkladem optického počítáče částic je přístroj HIAC s nezávislou regulací prahové hodnoty velikosti částic. Existují zařízení schopná analyzovat tvar částic, částice se objevují na obrazovce, přístroj umožňuje rovněž statistické zpracování výsledků rozborů aj.

Stanovení kovů v opotřebeném mazivu:

Určení množství a druhu kovů v oleji, resp. velikosti a morfologie kovových částic náleží k nejdůležitějším tribodiagnostickým zkouškám. Pro tento účel byla vyvinuta, resp.

využita řada metod, které odpovídají množství prováděných rozborů a nárokům na ně kladeným.

I. Atomová emisní spektrální analýza

Při emisní spektrální analýze je vzorek oleje v jiskrovém nebo obloukovém zdroji přiveden do plynného stavu a atomizován. Elektrony jednotlivých atomů pohlcením kvanta energie nebo v důsledku srážek přecházejí od základního stavu do excitovaného stavu. Při zpětném přechodu do základního stavu vyzáří atomy energii, rovnou rozdílu příslušných energetických hladin ve formě světelné energie. Hodnota frekvence, resp. vlnové délky světla, je charakteristická pro každý prvek. Spektrální přístroj toto vyzářené světlo rozkládá na monochromatické složky. Podle způsobu registrace spektrálních čar rozeznáváme:

- a) spektrografy - emisní spektrum se zachycuje na fotografickou emulsi,
- b) spektroskopy - spektrum se pozoruje okulárem,
- c) kvantometry - spektrum je registrováno fotoelektricky.

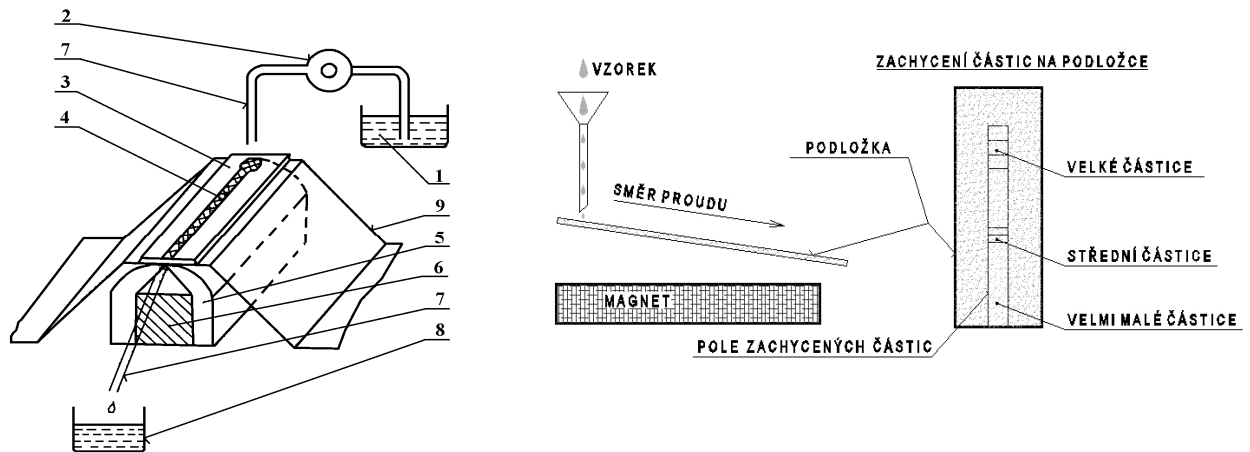
Jde obvykle o dokonalé přístroje řízené počítači, s automatickou výměnou vzorku, kterým trvá analýza jednoho vzorku s obsahem až 24 prvků do 2 minut. Jsou však velmi drahé a jejich ekonomické využití předpokládá analyzovat velké množství vzorků - uplatňují se v centrálních tribolaboratořích aj.

II. Atomová absorpční emisní spektrální analýza

Jde o běžně užívanou metodu ke stanovení přítomnosti a obsahu částic některých kovů, především Fe, Pb, Cu, Al, Zn, aj. Přístroj obsahuje zdroj záření (výbojky s dutou katodou), obsahující stanovený prvek nebo kombinaci prvků. Při analýze je rozprašovačem vhnán zkoumaný vzorek do plamene o teplotě 2100° C, popř. 3000° C. V plameni dochází k vytvoření absorbujícího sloupce par, kterým prochází záření ze zmíněné výbojky a vstupuje do monochromátoru, přivádějícího na detektor pouze izolovanou rezonanční čáru zkoumaného prvku. Při provádění analýzy měříme podíl světelných toků, které propouštějí plamen s analyzovaným vzorkem a plamen bez vzorku. Logaritmus podílu světelných toků je roven absorpci a ta je úměrná koncentraci stanoveného prvku. Tato metoda je jednoduchá, cenově dostupná a stala se častou metodou tribotechnické diagnostiky. Jisté potíže však způsobuje příprava vzorků analyzovaného oleje. Existuje několik postupů, pro účely tribotechnické analýzy se využívá tzv. přímá metoda analýzy vzorku oleje rozpuštěného v organickém rozpouštědle. Kalibrace je vázána na organokovové standardy.

III. Ferrografie

Společným nedostatkem předchozích metod je pouhá kvantifikace částic opotřebení jednotlivých kovů, neschopnost rozlišit tvar částic, jejich původ, místo vzniku (lokalizaci opotřebení), morfologii aj. Tyto nedostatky se snaží eliminovat metoda zaměřená na analýzu feromagnetických otěrových látek v mazivu pomocí magnetického pole - tzv. ferrografie, která je technikou separace kovových (i nekovových) látek z opotřebeného oleje. Schéma a základní princip ferrografie je uveden na obr. 8. 6. Při ferrografické analýze necháváme stékat rozředěný vzorek oleje po šikmo skloněném sklíčku, pod nímž je umístěn velice silný magnet. Sklon sklíčka způsobí vlivem proměnné síly magnetického pole distribuci částic podle velikosti podél sklíčka. Na začátku se zachycují "velké" částice ($> 15 \mu\text{m}$), pak postupně částice menší a menší (na konci 1 - 2 μm).



- | | |
|----------------------------|---------------------|
| 1 - vzorek oleje | 5 - pólové nástavce |
| 2 - dávkovací zařízení | 6 – magnet |
| 3 - transparentní podložka | 7 – trubička |
| 4 - stopa nečistot | 8 - sběrná nádobka |
| | 9 – stojan |

Obr. 8. 6 Schéma ferrografu a princip ferrografické analýzy

Přímočtená ferrografie (Direct Reading Ferrography, DR-F) dává rychlý odhad množství otěrových částic feromagnetických slitin kovů vyskytujících se ve vzorku oleje. Využívá sedimentace částic při průtoku vzorku oleje v silném nehomogenním magnetickém poli. Po průchodu vzorku oleje, odplavíme olej speciálním rozpouštědlem a pak transparentním lakem fixujeme částice na transparentní podložce, tím získáme tzv. ferogram. Ferogram nám

umožňuje posoudit velikost částic, poměr velkých částic (10 – 100 μm) k malým částicím, morfologickou (tvarovou) charakteristiku částic aj. Vyhodnocení ferogramu se provádí jednak ferodenzimetry, jednak feroskopicky. Ferodenzimetrické vyhodnocení se opírá o analýzu optické průchodnosti ferogramu pomocí fotodenzimetru. Zde světlo z ferogramu, prosvěcovaného stabilizovaným zdrojem, je opticky v upraveném mikroskopu přiváděno na čidlo (fotodiodu), které je spojeno s analogovým měřicím přístrojem pro vyhodnocení optické denzity (hustoty) ferogramu podél celé jeho délky. Výsledek lze vyjádřit tzv. indexem intenzity (významnosti) opotřebení I_0 . Je to indikátor poměru počtu velkých částic k malým – v angl. literatuře označovaný jako Wear Severity Index, (WSI). Označíme-li % plochy pokryté velkými částicemi A_L a % plochy pokryté malými částicemi A_S , pak součet $A_L + A_S$ indikuje úroveň opotřebení, rozdíl $A_L - A_S$ indikuje normalitu, resp. abnormalitu opotřebení (existence velkých částic = zadírání). Průběh opotřebení je posuzován pomocí indexu intenzity opotřebení

$$I_0 = (A_L + A_S)(A_L - A_S) = A_L^2 - A_S^2 \quad (8.1)$$

Vzhledem ke konstrukci výrazu, index I_0 citlivěji reaguje na přítomnost velkých částic, a tedy na nepříznivé režimy opotřebení, než jiné metody.

Feroskopické vyhodnocení ferogramu nám umožňuje detailnější analýzu morfologie částic, jejich druhu, povrchu atd. pomocí speciálních mikroskopů, tzv. feroskopů. Na základě feroskopie, resp. feroskopie a ferodenzimetrie můžeme určit režim opotřebení mechanické soustavy (motor, převodovka aj.) viz tab. 8. 2.

Tab. 8. 2 Příklad možností určení režimu opotřebení mechanické soustavy

Režim opotřebení	Index intenzity I_0	Morfologie otěrových částic	Množství částic v 1 ml
I. záběhový	10 - 100	Husté adhezivní řetízky, abrazivní srpečky a mečíky, volné laminární částice	0 – 4
II. nepatrný	0 - 10	Adhezivní částice tvořící lesknoucí se řetízky do velikosti 15 μm	0 – 1
III. velmi mírný	10 - 100	Lístkové adhezivní částice tvořící lesknoucí se řetízky	1 – 2
IV. střední	100 - 500	Laminární zářící částice o velikosti do 150 μm	2 – 3
V. střední až velký	500 - 1000	Velké nepravidelně ohraničené částice hroznovitého seskupení, tmavé oxidy a sféroidy, povrch rozrytý a zoxidovaný	3 – 4
VI. velký až mezní	1000 - 2000	Velké částice nepravidelného tvaru, barvy tmavé až černé velikost nad 150 μm	4 – 5
VII. havarijní	nad 2000	Makroskopické třírozměrné částice, sféroidy a abrazivní částice, velikost až 1 mm	nad 5

Analytická ferrografie (Analytical Ferrography, AF) navazuje na tzv. přímočtenou. Vypovídá o skutečném technickém stavu mazací soustavy a mazaných dílů i o způsobu opotřebení jednotlivých třecích dvojic. V rámci analytické ferrografie jsou mikroskopicky hodnoceny jednotlivé částice, které nesou informaci o skutečném technickém stavu mazací soustavy a mazaných dílů i o způsobu opotřebení jednotlivých třecích dvojic. Hodnocení ferrogramu se provádí na bichromatickém mikroskopu – speciálním mikroskopu, tvořeném kombinací biologického mikroskopu pro zkoumání transparentních preparátů, kde procházející světlo zespu prosvěcuje preparát a poté vstupuje do objektivu, a metalografického mikroskopu pro zkoumání mikrovýbrusů, kde je preparát osvětlován objektivem a odražené světlo je objektivem vedeno zpět. Bichromatické mikroskopy mají v reflexním osvětlení nejčastěji červený filtr a v transmitantním filtr zelený. To umožňuje rozlišení průhledných, průsvitných, slabě průsvitných a neprůsvitných částic na ferrogramech. Většina ferromagnetických částic leží v oblasti od vtoku oleje na podložku do vzdálenosti zhruba 2 až 5 mm. Ke zjišťování velikosti částic je vhodné využít objektivový mikrometr – skleněnou destičku formátu podložního skla, opatřenou mikrometrickou stupnicí, kde je 1 mm rozdělen na 100 dílků, tj. 1 dílek = 0,01 mm = 10 mikrometrů; stupnice je chráněna krycím sklem. Objektivový mikrometr slouží zejména jako délkový standard. V závislosti na velikosti částice je její poloha na podložní folii dána magnetickou susceptibilitou, souvisí tedy materiálovým složením částice. Lze ihned rozlišit ferromagnetické kovy (Fe, Co, Ni) a jejich slitiny (zejména oceli nízko- i vysokolegované) od paramagnetických slitin (žáropevné a nerezové oceli) a nemagnetických částic. Ferromagnetické částice o velikosti 15 mikrometrů a více jsou vždy usazeny do 2 mm od vtoku oleje na ferrogram. Menší ferromagnetické částice tvoří příčně k proudu oleje řetízky (strings) lokalizované podél siločar magnetického pole. Paramagnetické částice s nízkou susceptibilitou (např. hliník a jeho slitiny, dural, bronz, stříbro a chrom, olovo a jeho kompozity atd.) leží mimo tyto řetízky a jsou vždy mnohem větší než blízko sebe ležící ferromagnetické částice v řetízcích. Na konci sedimentační stopy bývají nahromaděny částice oxidů kovů, křemičitany, vlákna buničiny nebo polyethylenu, polyesteru a dalších materiálů filtračních vložek apod. Provozní podmínky, zejména účinnost vzduchového filtru, přítomnost vody v oleji a celkově péče technické obsluhy o zařízení, se zřetelně projeví na konci sedimentační stopy na ferrogramu. Pro kvantitativní hodnocení ferrogramů lze využít obrazovou analýzu.

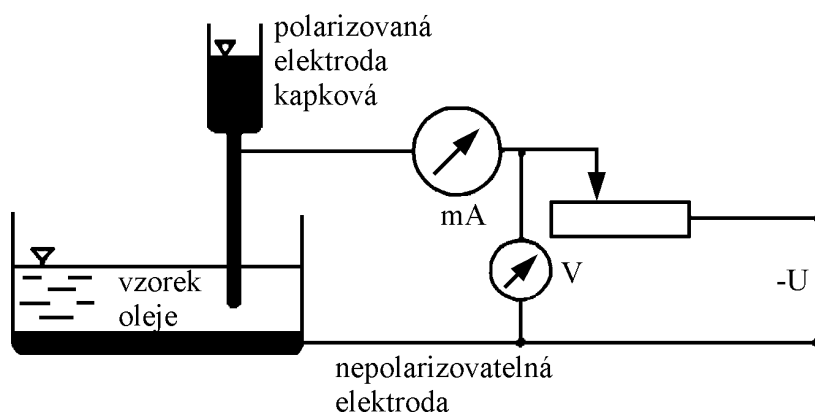
Předností ferrografických metod je možno shrnout takto:

- Lze určit druh a režim opotřebení mechanické soustavy a jejích částí (motoru aj.),

- lze určit druh a původ částic (lokalizovat opotřebení) a to i v případě, že jsou všechny součásti ze stejného kovu, což jinak je možné jen pomocí nákladných metod, jako je např. použití radionuklidů,
- lze určit trend opotřebení a preventivními opatřeními zabránit havarijním následkům,
- lze určit vliv maziva, resp. vliv provozních podmínek na intenzitu opotřebení způsobem mnohem citlivějším, než je pouhé stanovení otěrového kovu v mazivu aj.

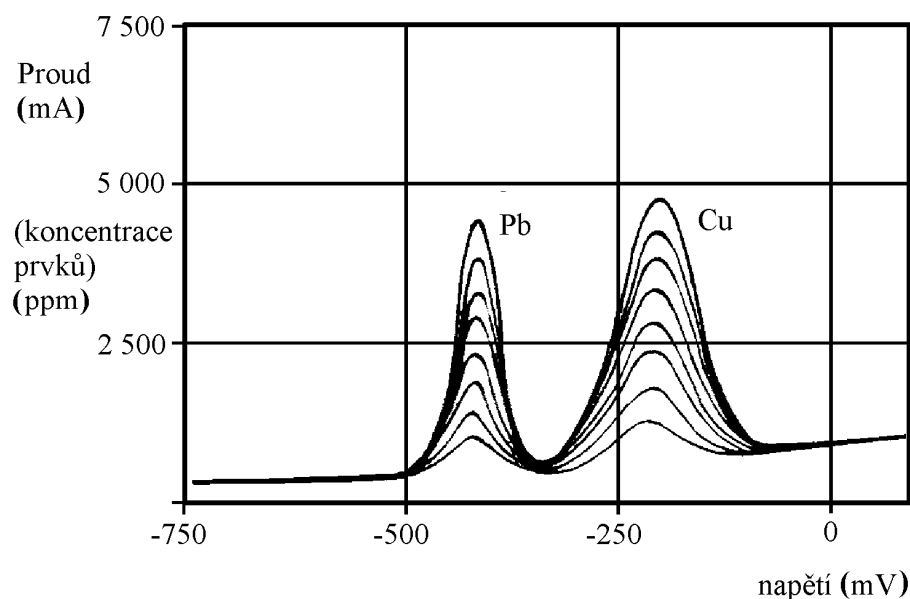
IV. Polarografická analýza

Polarografie je vysoce citlivá elektrochemická analytická metoda studia efektů, vznikajících na polarizovaných elektrodách umístěných v měřeném roztoku. Elektrodotový systém tvoří dokonale polarizovaná, obvykle kapková rtuťová měrná elektroda (čidlo) a dále referenční, dokonale nepolarizovaná elektroda. Mezi elektrody se řízeným způsobem vkládá elektrické napětí a sleduje se závislost vznikajícího elektrického proudu na vkládaném napětí. Využívá se především tzv. pulzní polarografie, u níž závislost proudu na vkládaném potenciálu má tvar klidné základny, z níž výrazně vystupují "píky" (zákmity), jejichž poloha charakterizuje druh látek obsažených v roztoku. Každá látka (prvek) má "pík" při určitém potenciálu, který je při daných experimentálních podmínkách charakteristický. Výška "píku" je obvykle lineární funkcí koncentrace látky v roztoku. Principiální schéma polarografu je uvedeno na obr. 8. 7.



Obr. 8. 7 Principiální schéma polarografu

Křivky závislosti intenzity proudu na napětí, získané kapkovou elektrodou, jsou plně reprodukovatelné a udávají kvalitu i kvantitu mnoha látek obsažených v roztoku. Za přítomnosti látek, které podléhají elektrolýze (tzv. depolarizátory), roste proud při určitém napětí a lze určit druh látky a její množství. Příklad polarografické křivky je na obr. 8. 8.



Obr. 8. 8 Příklad polarografické křivky

V současné době je možno využít polarografické soupravy české výroby, která umožňuje:

- určovat kvalitativní i kvantitativní obsah složek roztoku oleje, i jiných kapalin, např. vody,
- získat objektivní výsledky z velmi malého množství vzorku (0,005 ml),
- velkou rychlost analýzy, relativně jednoduchou přípravu vzorku, velkou přesnost a reprodukovatelnost.

V. Infračervená spektrometrie

Tato analytická technika je určena především pro identifikaci a strukturní charakterizaci zejména organických sloučenin. Infračervená spektrometrie měří pohlcení infračerveného záření o různé vlnové délce analyzovaným materiálem. Infračerveným zářením je elektromagnetické záření v rozsahu vlnových délek λ 0.78-1000 mm, což odpovídá rozsahu vlnočtů $1/\lambda$ 128000-10 cm^{-1} . Celá oblast bývá rozdělena na blízkou (13000-4000 cm^{-1}), střední (4000-200 cm^{-1}) a vzdálenou infračervenou oblast (200-10 cm^{-1}), přičemž nejpoužívanější je střední oblast.

Principem metody je absorpce infračerveného záření při průchodu vzorkem, při níž dochází ke změnám rotačně vibračních energetických stavů molekuly v závislosti na změnách dipólového momentu molekuly. Analytickým výstupem je infračervené spektrum, které je grafickým zobrazením funkční závislosti energie, většinou vyjádřené v procentech transmitance (T) nebo jednotkách absorbance (A) na vlnové délce (λ) dopadajícího záření.

Transmitance (propustnost) je definována jako poměr intenzity záření, které prošlo vzorkem (I), k intenzitě záření vycházejícího ze zdroje (I_0).

$$T = \frac{I}{I_0} \quad (8.2)$$

Absorbance je definována vztahem jako dekadický logaritmus $1/T$. Závislost energie na vlnové délce je logaritmická, proto se používá vlnočet, který je definován jako převrácená hodnota vlnové délky.

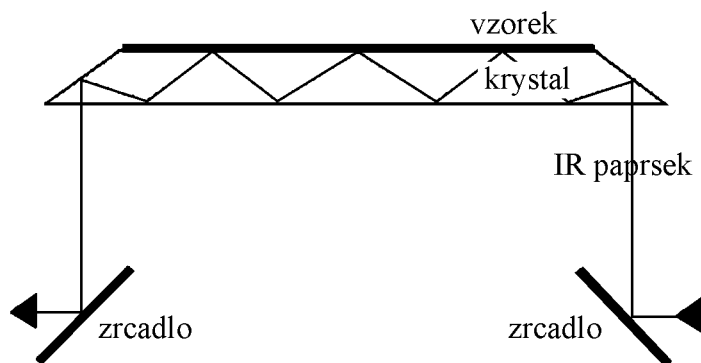
$$A = -\log \frac{I}{I_0} \quad (8.3)$$

Absorpční pásy, mající vrchol v intervalu $4000-1500 \text{ cm}^{-1}$, jsou vhodné pro identifikaci funkčních skupin (např. $-\text{OH}$, $\text{C}=\text{O}$, A-H , CH_3 aj.). Pásy v oblasti $1500-400 \text{ cm}^{-1}$ jsou nazývané oblastí „otisku palce“ (fingerprint region). Pomocí speciálního softwaru a digitalizovaných knihoven infračervených spekter je možno identifikovat neznámou analyzovanou látku. Infračervená spektroskopie je používána k identifikaci chemické struktury látek již od 30. let 20. století. Avšak spektrometry, pracující na principu rozkladu světla (disperzní spektrometry), neumožňovaly analýzu silně absorbujících matric. S rozvojem výpočetní techniky v 80. letech 20. století dochází k praktickému rozšíření infračervených spektrometrů s Fourierovou transformací (FTIR spektrometry). Jedná se o přístroje pracující na principu interference záření, které na rozdíl od disperzních přístrojů měří interferogram modulovaného svazku záření po průchodu vzorkem. Tyto přístroje vyžadují aplikaci matematické metody Fourierovy transformace, aby výsledkem byl klasický spektrální záznam. FTIR spektrometry vykazují celou řadu výhod. Při měření dopadá na detektor vždy celý svazek záření. Takové uspořádání umožňuje i experimenty, při nichž dochází k velkým energetickým ztrátám, tj. měření silně absorbujících vzorků nebo měření s nástavci pro analýzu pevných či silně absorbujících kapalných vzorků v odraženém záření – reflektanční infračervená spektroskopie.

Zeslabená úplná reflektance (ATR)

K měření vzorků, které silně absorbují infračervené záření, je výhodná technika zeslabené totální reflektance (ATR – Attenuated Total Reflectance). Jedná se o účinnou rychlou metodu, která vyžaduje minimální přípravu vzorku pro analýzu. ATR analýza vzorků FTIR spektrometrií je rychlá, může být automatizována a eliminuje použití toxických rozpouštědel.

Technika je založena na principu násobného úplného odrazu záření, obr. 8. 9, na fázovém rozhraní měřeného vzorku a měřícího krystalu z materiálu o vysokém indexu lomu. Krystal je většinou planární, ve tvaru lichoběžníkového hranolu. Svazek paprsků je přiveden do krystalu soustavou zrcadel tak, aby úhel dopadu na fázové rozhraní vyhověl podmínce totálního odrazu. Měřený vzorek je v dokonalém kontaktu s ATR krystalem a záření proniká částečně do analyzovaného materiálu. Při totálním odrazu na rozhraní opticky hustšího prostředí (ATR krystal) s prostředím opticky řidším (zkoumaný vzorek) vzniká tzv. evanescentní vlna elektromagnetického záření v oblasti absorpce. Protože intenzita evanescentní vlny klesá exponenciálně se vzdáleností od rozhraní (řádově μm), musí být dosaženo těsného kontaktu mezi vzorkem a krystalem. To lze zajistit u kapalných vzorků. Pokud měřený vzorek absorbuje záření o určité frekvenci, pak tato složka je v totálně odraženém záření zeslabena. Takto získané spektrum se do značné míry podobá spektru změřenému v transmittančním režimu. Penetrační hloubka do povrchu vzorku je řádově v jednotkách μm , tzn. charakterizujeme pouze velmi tenké povrchové vrstvy, avšak vzhledem k násobnému odrazu na fázovém rozhraní získáme velmi kvalitní spektrum, ekvivalentní transmisnímu spektru měřenému při tloušťce vzorku řádově desítek μm . Používají se krystaly např. ze ZnSe, AgCl, Si, Ge, safíru, KRS-5 (směs halogenidů thalných) Dnes se jako standardní měřicí technika používá převážně lichoběžníkového ZnSe krystalu v horizontálním uspořádání.



Obr. 8. 9 Princip zeslabené totální reflektance (ATR)

ATR spektrum vzorku je ovlivněno vlnovou délkou infračerveného záření (λ), poměrem indexů lomu měřeného vzorku a ATR krystalu, efektivní dráhou záření (EPL), úhlem dopadu záření na fázové rozhraní (Θ) a kontaktem mezi měřeným vzorkem a ATR krystalem. Výsledná hloubka penetrace záření do vzorku je definována vztahem (8. 4) a je to

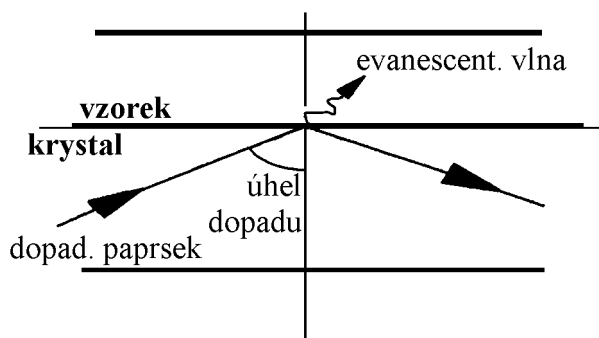
vzdálenost od rozhraní vzorek/kryстал, kde intenzita evanescentní vlny klesne na 1/e, tj. přibližně 37 % své původní hodnoty:

$$d_p = \frac{\lambda}{2\pi n_k \sqrt{\sin^2 \Theta - \left(\frac{n_v}{n_k}\right)^2}} \quad (\text{mm}) \quad (8.4)$$

d_p	...	hloubka průniku záření	(mm)
λ	...	vlnová délka záření	(mm)
Θ	...	úhel dopadu záření na fázové rozhraní	(°)
n_k	...	index lomu krystalu	(-)
n_v	...	index lomu vzorku	(-)

K totálnímu odrazu, obr. 8. 10, dojde v případě, že úhel dopadu Θ je větší než mezní úhel Θ_m podle vztahu (8. 5):

$$\Theta \geq \Theta_m \quad \text{kde} \quad \sin \Theta_m = \frac{n_v}{n_k} \quad (8.5)$$



Obr. 8. 10 Totální odraz záření v krystalu

Z uvedených výrazů (8. 4) a (8. 5) je patrné, že penetrační hloubka infračerveného záření do vzorku závisí na vlnové délce záření. S vlnovou délkou záření se zvyšuje hloubka penetrace. Z toho pak plyne, že se relativní intenzity pásů ve spektru snižují s rostoucími hodnotami vlnových délek. Tento jev je matematicky kompenzován, ATR korekce je standardní součástí softwarového vybavení FTIR spektrometrů. Index lomu krystalu má dva účinky. Se vzrůstem indexu lomu krystalu klesá kritický úhel a snižuje se penetrační hloubka záření; např. výměnou krystalu ZnSe ($n = 2,4$) za krystal Ge ($n = 4$). Současně se tím sníží efektivní dráha paprsku a relativní intenzita pásů ve spektru. Zatímco intenzita pásů v transmittančním spektru je ovlivněna tloušťkou vzorku, v ATR technice je obdobnou veličinou tzv. efektivní dráha průniku (EPL – Effective

Penetration Length), která je definována jako penetrační hloubka (d_p) násobená počtem reflexí (A) infračerveného záření v ATR krystalu podle vztahu (8. 6):

$$EPL = d_p N \quad (\text{mm}) \quad (8. 6)$$

Počet reflexí lze vypočítat podle vztahu (8. 7):

$$N = \frac{l}{t} \cot g\Theta \quad (-) \quad (8. 7)$$

l	...	délka krystalu	(mm)
t	...	tloušťka krystalu	(mm)
Θ	...	úhel dopadu záření na rozhraní	(°)

Z výrazu plyne, že s větším úhlem dopadu se snižuje počet reflexí a tím i intenzita pásů ve spektru. Vzhledem k tomu, že je hloubka penetrace záření do vzorku řádově v mikrometrech, je velmi důležité dodržovat dobrý kontakt vzorků s krystalem. To platí zejména pro pevné vzorky. Pro zajištění reprodukovatelnosti měření je nutné pokrýt celou plochu krystalu vzorkem. Závěrem lze tedy shrnout, že mezi faktory ovlivňující ATR absorpci patří: vlnová délka IČ záření, index lomu vzorku, hloubka průniku záření, efektivní délka průniku záření, úhel dopadu záření na rozhraní, kontakt vzorku s krystalem a materiál krystalu (index lomu, propustnost pro IČ záření).

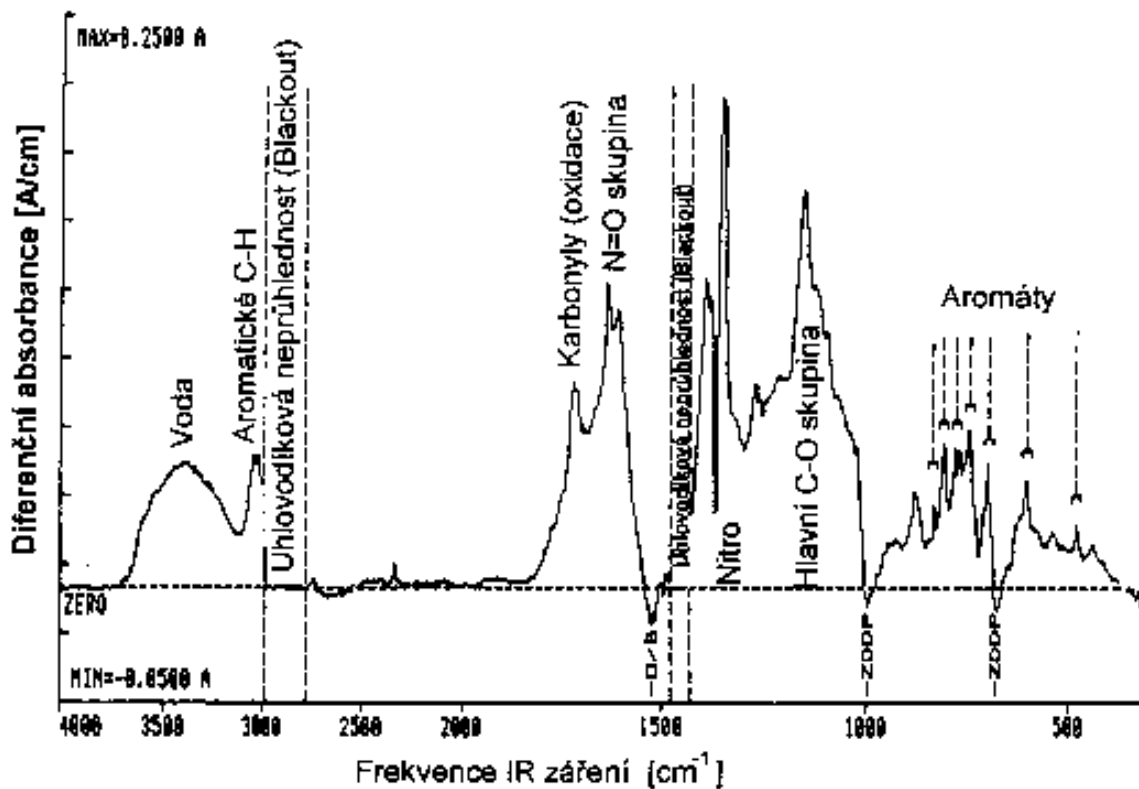
Polohy pásů sloučenin a strukturních skupin v IR spektrech

Při analýze spekter se vychází ze znalosti vlnových délek (vlnočtů), obr. 8.11, odpovídajících konkrétním sloučeninám nebo charakteristickým strukturním skupinám. Přehled typických skupin a sloučenin charakteristických pro motorové oleje v tab. 8. 3.

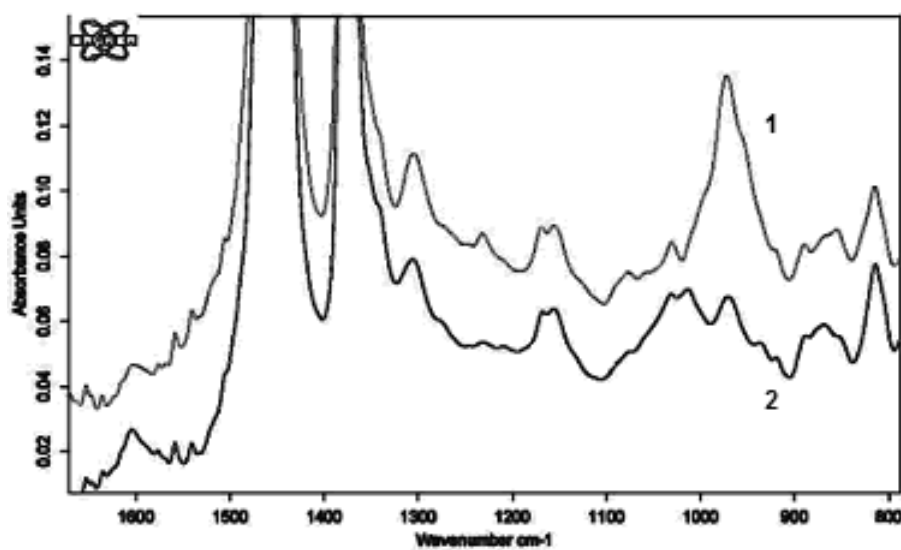
Tab. 8. 3 Vlnočty charakteristických sloučenin a strukturních skupin

Poloha (cm^{-1})	Sloučenina	Poznámka
3640 – 3540	Voda	V esterových olejích
3600 – 3150 (max. 3400)	Voda	V ropných olejích
3540	Rozklad esterů	
2000	Saze	
1800 – 1670	Oxidační produkty	
1748	Estery	Syntetické oleje
1650 – 1600	Nitrosloučeniny	
1180 – 1120	Sírné sloučeniny	Sírné přísady, síra z paliva
1070, 1040 (dvojice)	Ethylenglykol	Chladicí kapalina
1025 – 960	Protiotěrové přísady	(ZDDP)
1000	Vysokoteplotní antioxidant	(ZnDDF)
990 – 960	Protiotěrové přísady	(TCP – trikresylfosfát)
815 – 805	Nafta	
755 – 748	Petrolej	Lehčí složky

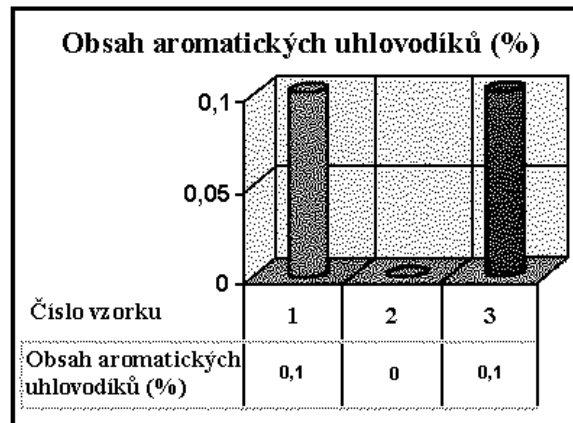
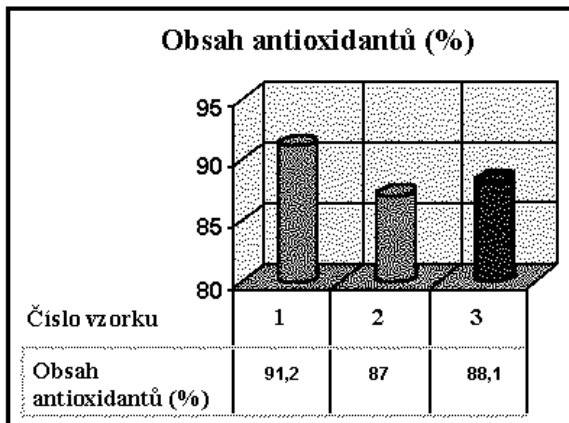
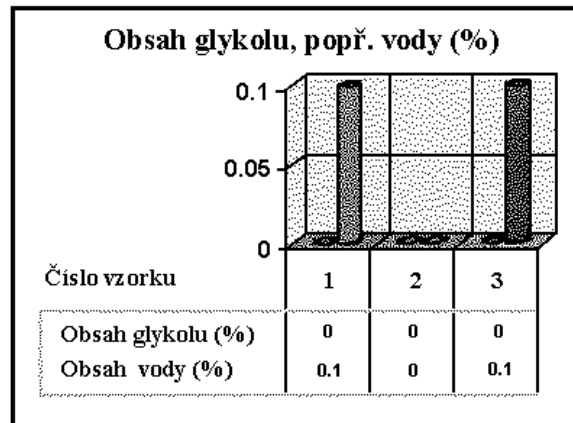
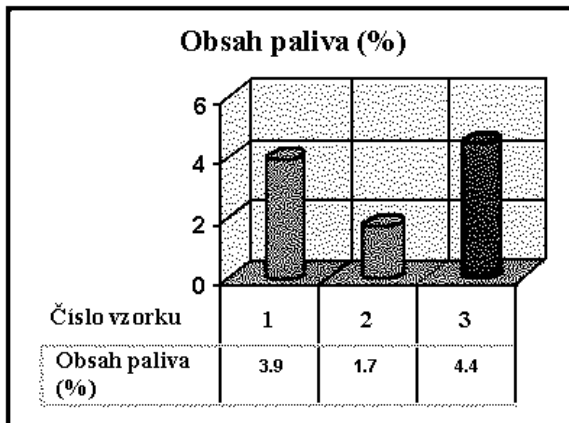
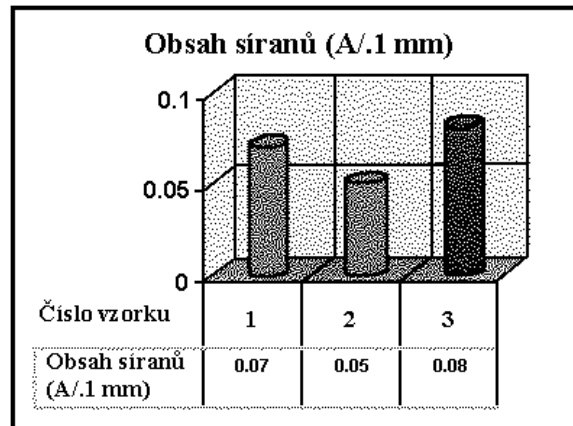
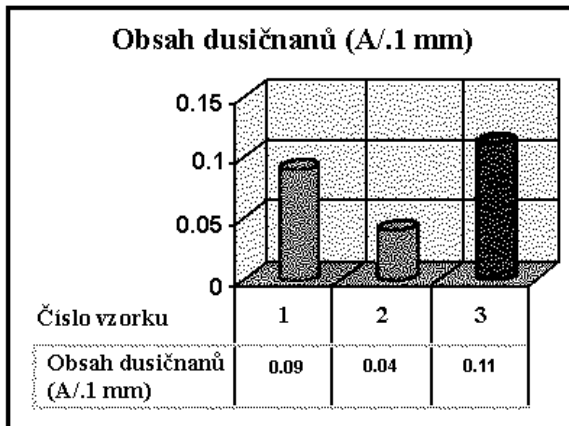
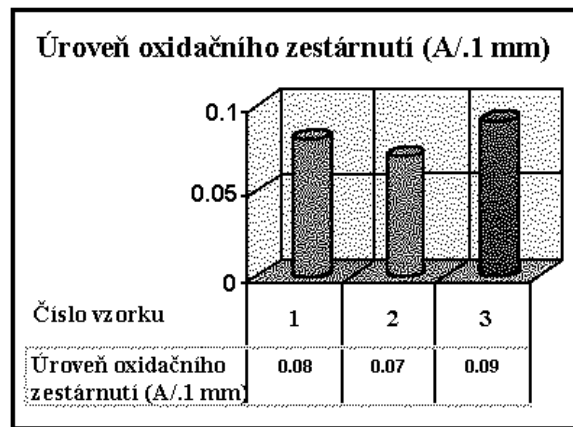
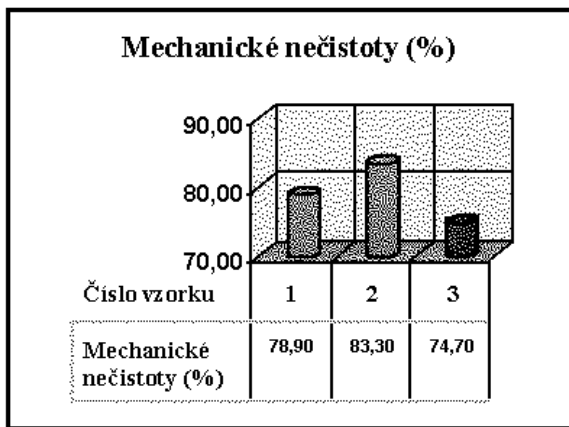
Pozn.: Při analýze je potřeba brát v úvahu i tzv. nepravé pásy. Ty nemusí patřit vzorku, ale bývají způsobeny buď přístrojovými efekty, metodou přípravy vzorku nebo nenadálými jevy.



Obr. 8. 11 Typické oblasti IČ spektra, využívané při tribotechnické diagnostice



Obr. 8. 12 Úbytek aditiv v důsledku provozního opotřebení motorového oleje SAE 15W-40, projevující se poklesem absorbance v oblasti 1050 – 950 cm⁻¹



Obr. 8. 13 Příklad analýzy zestárnutí a kontaminace použitých olej

VI. Rentgenová fluorescenční analýza

Kromě primárního rentgenového záření existuje tzv. sekundární nebo fluorescenční rentgenové záření, které vzniká tak, že na vzorek necháme dopadat primární rentgenové záření určité vlnové délky. Ve vzorku je kvanty primárního rentgenového záření vybuzeno záření sekundární, jehož intenzita je asi 1000 krát menší, než záření primárního, a není provázáno spojitým zářením, tzv. pozadím, jako u primárního záření.

Principem fluorescenční analýzy je měření energie fluorescenčního rentgenového záření. Každý prvek má svou charakteristickou energii fluorescenčního záření, čehož se využívá pro kvalitativní analýzu. Měření intenzity emitovaných sekundárních rentgenových paprsků (jejich počtu) je principem analýzy kvantitativní. Rentgenová fluorescenční analýza je vysoce citlivou metodou, např. je schopná odhalit nejnižší koncentraci pro Cu 0,00001 %, pro Fe, Pb, Si, Ti, Mn, Mo, Sn aj. 0,001 %.

VII. Sledování opotřebení pomocí radionuklidů

Tato metoda využívá specifických vlastností radionuklidů, především jejich schopnosti být detekovány bez ohledu na fyzikální nebo chemickou formu, ve které se vyskytují. Účinnost detekce a citlivost metody je velmi vysoká. Aktivace sledovaných součástí se realizuje:

- v reaktoru, což však sebou nese technické a hygienické potíže,
- povrchovou aktivací nabitými částicemi (celková aktivita součástí je o tři řády nižší než po ozáření v reaktoru).

Způsob detekce radionuklidů:

- radiometrická detekce (měří se celková aktivita Geigerovými-Müllerovými trubicemi, scintilační detektory),
- spektrometrie záření (měří se aktivita pouze jednoho radionuklidu vyhodnocením velikosti plochy energetického píku, který je příslušný sledovanému radionuklidu),
- autoradiografie (využívá fotochemických účinků ionizačního záření).

VIII. Metoda RAMO (rychlá analýza mazacích olejů)

Metoda patří k provozním zkouškám, neklade si žádné nároky na přístrojové vybavení, ani na kvalifikaci obsluhy, přitom poskytuje přiměřeně přesné a srovnatelné výsledky. Její výhodou je malá časová náročnost a přenosnost soupravy.

Principem metody je selektivní kvantitativní extrakce otěrových kovů do vodní fáze a následně jejich kolorimetrické stanovení. K extrakci se používá směs kyseliny dusičné a chlorovodíkové. Obsah železa a mědi se určuje fotometricky pomocí vizuálního komparátoru. Reprodukovatelnost zbarvení umožňuje používat stabilní kalibrace. Syntetické standardní vzorky jsou upraveny do sady jako vodní filtry a jsou zalepeny do skleněných kyvet. Souprava RAMO umožňuje určit obsah kovů (Fe, Cu, Al, Pb) s přesností ± 5 ppm, což plně vyhovuje pro provozní podmínky.

8.4 Proces opotřebení vozidlového spalovacího motoru

Opotřebení není obecně závislé pouze na charakteru tření (valivé nebo kluzné), ale jedná se o složitý fyzikálně - chemický proces probíhající na kluzných površích tribologické jednotky. Vnější, nežádoucím produktem činnosti třecího systému je velmi široké spektrum částic opotřebení. Z diagnostického hlediska je důležité, že tyto částice nesou vícerozměrné komplexní informace o tom, v jaké vzájemné souvislosti se jednotlivé prvky takového systému nacházejí, jaký je režim opotřebení v třecích dvojicích. Spalovací motor se vyznačuje současným kontaktem mnoha třecích dvojic, tím i současnou produkcí otěrových částic ze všech těchto míst. Úkolem je na základě počtu, tvaru, velikosti, zbarvení částic aj. určit, jaké tribologické procesy v motoru probíhají. Dynamiku opotřebení lze hodnotit podle:

- intenzity tvorby částic,
- materiálového složení částic,
- distribučního rozložení velikostních skupin částic,
- morfologie a tvaru povrchových znaků částic, aj.

Produkty opotřebení (částice) lze obecně členit do následujících kategorií:

Adhezivní částice (rubbing wear particles)

Jsou „jednorozměrné“ částice, jejichž délka a šířka je přibližně stejná (5-15) μ m, jejich tloušťka je však velmi malá (0,25 - 0,75) μ m. Tyto částice jsou charakteristické pro

opotřebením ocelových součástí, proto mají velmi dobré magnetické vlastnosti. Při ferografické analýze je lze téměř vždy zachytit. Genetický původ mají v Beilbyho vrstvičce, z níž se postupně „odlupují“ a jsou mazivem odplavovány. Jejich počet a zejména velikost charakterizuje intenzitu adhezivního opotřebením.

Abrazivní částice (cutting wear particles)

Charakterizují vždy nesprávný režim činnosti motoru. Z tribotechnického hlediska lze indikovat abrazivní částice dvojího původu:

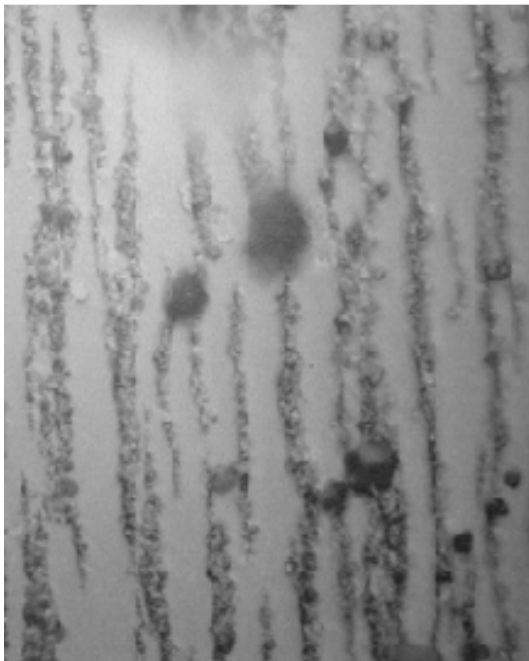
- a) Působení cizorodé částice mezi třecími povrchy má za následek výrazné rýhování povrchu, změny tribologického režimu a rychlé opotřebením třecích povrchů. Původem abrazivního opotřebením bývají např. křemičité prachové částice pronikající do motoru přes vzduchové čističe netěsnostmi.
- b) Penetrace tvrdšího materiálu třecí dvojice do měkčího. Pravděpodobnost vzniku částic tímto způsobem se zvyšuje při kontaktu třecích dvojic s velkým rozdílem tvrdosti povrchů.

Abrazivní částice mají v každém případě charakteristický tvar v podobě „mikrošpony“ nebo „drátku“ stočeného do spirálky. Z hlediska tvaru se výrazně odlišují abrazivní částice vniklé do motoru po dílčí nebo úplné demontáži, tj. při záběhovém režimu (cutting wear).

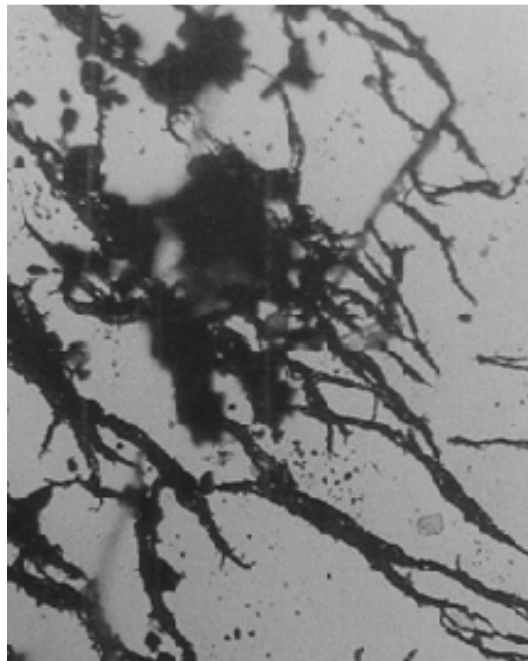
Mají tvar srpečků nebo mečků s ostrými výčnělky na koncích. Celkově se velikost abrazivních částic pohybuje v rozmezí (50 - 300) μm při velmi malé tloušťce 0,25 μm .

Sférické částice (spherical debris)

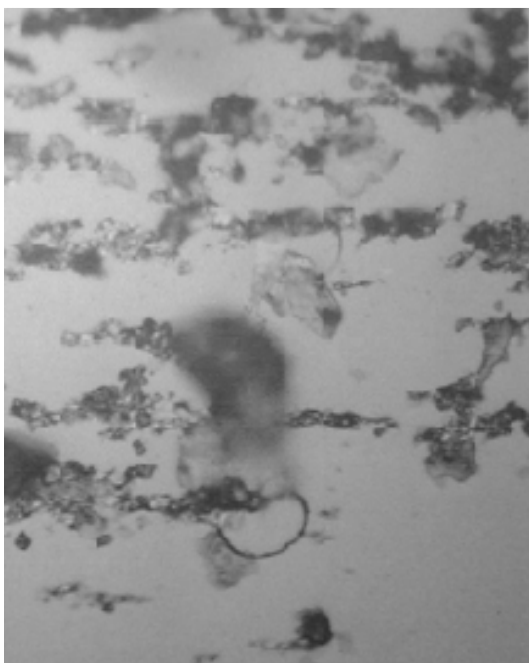
Patří mezi hlavní typy částic vznikajících v důsledku únavového opotřebením valivého charakteru. Zpravidla vznikají v důsledku únavy Beilbyho vrstvičky na povrchu vnitřních nebo vnějších povrchů ložisek. Rozměry sféroidů jsou relativně malé \varnothing 2 - 5 μm . V objektivu feroskopu se jeví jako maličké černé body, při větším zvětšení je patrný vyleštěný povrch s odleskem uprostřed. Výskyt těchto částic na ferogramu signalizuje nastupující poruchu valivých ložisek. Experimentálně bylo ověřeno, že jediný valivý element je schopen produkovat (6 - 7) milionů sféroidů, než dojde k jeho poruše.



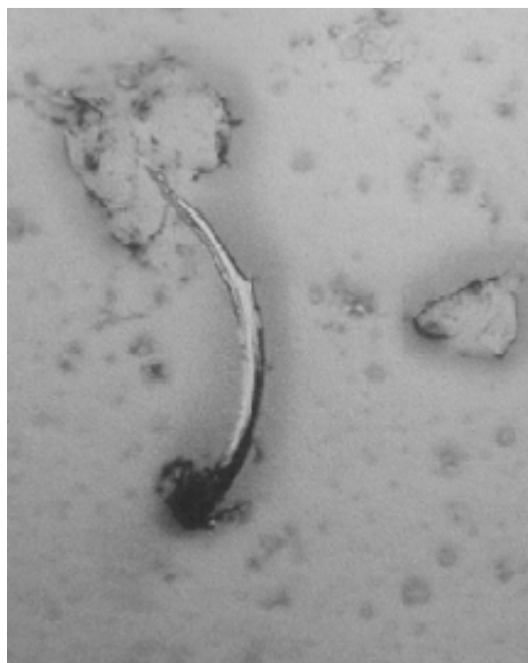
Obr. 8. 14 Adhezivní opotřebení – řetízky feromagnetického otěru vznětového motoru – dobrý stav. Zvětšeno 100 x.



Obr. 8. 15 Adhezivní opotřebení – řetízky paramagnetických částic (Pb-Sn kompozice ložiskového kovu) v oleji zážehového motoru automobilu po 10.000 km bez výměny. Zvětšeno 100 x.



Obr. 8. 16 Velké dlouhé, štíhlé částice podobné drátkům se objevují během záběhu jako výsledek adhezivního a mírně abrazivního opotřebení. Zvětšeno 1000 x.



Obr. 8. 17 Ocelová částice řezného opotřebení, tzv. dvoubodová abraze. Zvětšeno 1000 x.

Laminární částice (laminar particles)

Nejčastěji vznikají v důsledku redistribučních procesů v mazacích soustavách. Opakovaný průchod oleje a tím i částic soustavou má za následek plastickou deformaci částic (např. mezi valivým elementem a dráhou kroužku). Rozválcováním sféroidů i jiných třírozměrných částic vznikají tenké ploché lupínky malé tloušťky. Jejich délka se pohybuje od 40 do 250 μm a šířka od 10 do 50 μm . Částice mají hladký povrch a nepravidelné okraje. Výskyt těchto částic je zpravidla doprovázen výskytem sféroidů, v těchto případech nastal proces postupné poruchy valivého ložiska.

Únavové částice (fatigue particles)

Charakterizují nejčastější poškození ozubených kol. Jedná se o trojrozměrné částice se srovnatelnou délkou, šířkou i tloušťkou. Povrch částic je nepravidelný, rýhovaný s nepravidelně členěnými okraji. Rozměry těchto částic se pohybují od 10 do 150 μm . Únavové částice lze dále rozčlenit do dvou skupin:

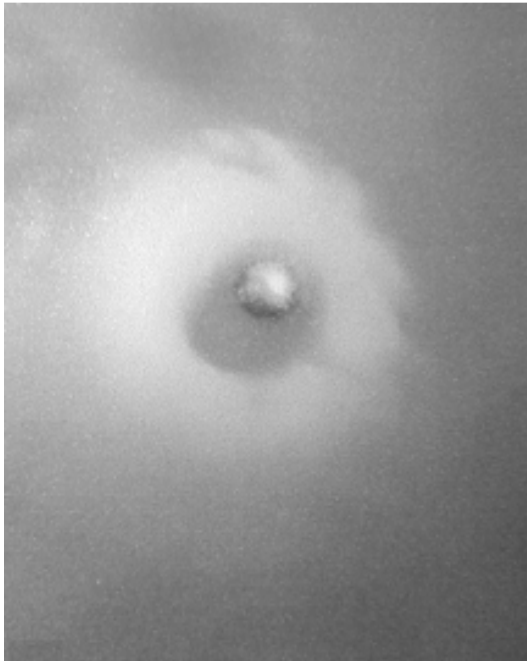
- a) - Typ „chunky“ (mikrohranolky) mají nepravidelně členitý povrch a velikost (10 - 80) μm , na povrchu mívají vměstky sekundárního původu.
- b) - Typ „scuffing“ (vysokoteplotní otěr) vzniká na bocích zubů ozubených kol za působení vysokých tlaků a teplot. Materiál částic bývá tepelně ovlivněn, což se projevuje zabarvením částic odstíny „temperových“ barev.

Abnormální částice (severe wear particles)

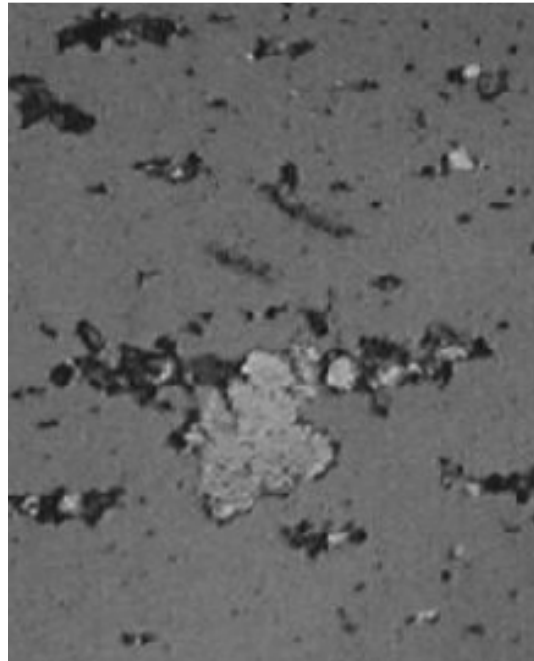
Částice mezního a havarijního opotřebení, které vznikají při zadírání nebo silné abrazi. Vznikají mechanickým rozrušováním Beilbyho vrstvičky za působení nadměrného zatížení. V místě kontaktu třecích ploch nemá tato vrstvička potřebnou únosnost a je odírána. Tempo opotřebení je tak vysoké, že k obnovení Beilbyho vrstvičky vůbec nedochází. Při diagnostické analýze pak nelze zaregistrovat částice adhezivního otěru, které bývají nahrazeny třírozměrnými částicemi vždy s charakteristickou ostrou hranou a rozměry (30 - 70) μm .

Neželezné částice

Vzhledem mohou připomínat abnormální částice, hlavně tvarem a rozměry. Vždy se odlišují zabarvením a magnetickými vlastnostmi. Vznikají v důsledku styku oceli a slitin barevných kovů při adhezivním režimu opotřebení.



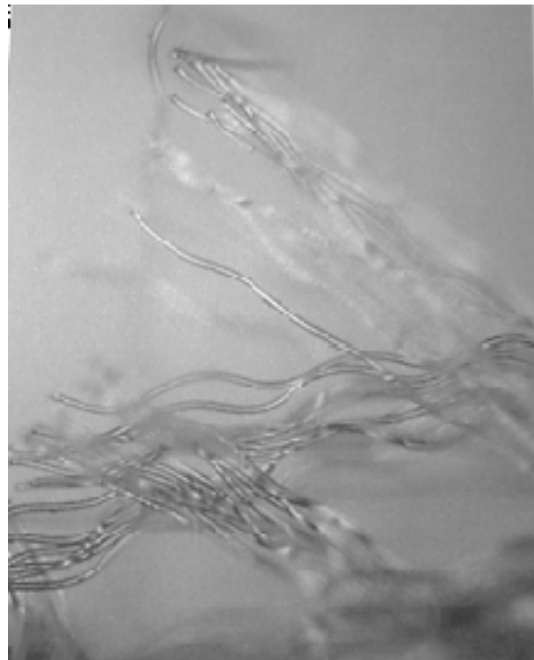
Obr. 8. 18 Ferogram z oleje vznětového motoru po zvětšení 1000 x.
Sféroid – kulička jako výsledek rozvoje únavové trhliny.



Obr. 8. 19 Laminární částice po průchodu valivým kontaktem. Typický je důlkovaný povrch a stopy otisku mikrověstků při válcování ve valivém kontaktu. Zvětšeno 1000 x.



Obr. 8. 20 Částice mezního opotřebení, mají důlkovaný povrch po opakovaném průchodu valivým kontaktem. Vznikají v závěru únavového rozpadu Beilbyho vrstvy. Zvětšeno 500 x.



Obr. 8. 21 Polyesterová (syntetická) vlákna z filtračních vložek. Zvětšeno 100 x.

Oxidy železa

- magnetit Fe_3O_4 vzniká za vysokých teplot a tlaků, převážně v důsledku nedostatečného mazání třecích ploch. Částice mají černý povrch, hladký, obléžkového charakteru, velikost těchto částic se pohybuje kolem $5 \mu\text{m}$. Výskyt vysokoteplotních oxidů je spojen s opotřebením součástí vyrobených z vysokopevnostní oceli nebo oceli ložiskové.
- hematit Fe_2O_3 signalizuje korozi funkčních ploch stroje působením vody. Růžové až červené částice hematitu lze indikovat při analýzách vzorků odebraných při záběhovém režimu činnosti motoru.

Korozivní a jiné částice

Při tribodiagnostických analýzách lze kromě kovového otěru indikovat i přítomnost nekovových částic sekundárního původu.

Prachové částice - malé kulovité nebo hranolovité částice - křemičitany o velikosti do $30 \mu\text{m}$. Jsou průsvitné, čiré.

Tribopolymery - mívají podobu sférických částic nebo válečků v amorfni formě. Jádro tribopolymerů je vždy tvořeno submikronickými ocelovými částicemi. Organickou hmotu částice lze buď rozpustit odpovídajícím rozpouštědlem nebo zahřátím na teplotu nad 300°C .

Vlákna mají původ převážně ve filtračních materiálech. Bavlněná vlákna mají pentlovitý tvar, vlákna syntetického původu jsou rovná, na koncích s výrazným světelným lomem.

Uvedená charakteristika nejvýznamnějších kategorií částic signalizuje tu skutečnost, že indikované částice jsou dvojího původu:

1 - Primární částice - generované přímo třecími dvojicemi. Charakterizují přímo režim opotřebením v souladu s obecně známými poznatky.

2 - Sekundární částice - vznikají přetvořením primárních částic při opakovaném průchodu těchto částic soustavou.

Vzájemný poměr výskytu primárních a sekundárních částic je závislý na několika faktorech, např. na velikosti olejové náplně, počtu a účinnosti olejových čističů v soustavě, účinnosti ostatních procesů odlučování částic ze soustavy, reálné velikosti tepelného a mechanického zatížení motoru, počtu tribologických jednotek, použitým druhu mazacího oleje aj.

Rozdílnost vlivu uvedených faktorů při hodnocení jednotlivých motorů vyžaduje oddělené sledování každého typu i provedení spalovacího motoru.

Pro vyhodnocování režimu opotřebení strojních skupin (motorů, převodovek apod.) se v praxi využívají dva základní strategické přístupy:

1 - Trendové hodnocení režimu opotřebení s využitím časových řad.

2 - Vícerozměrné statistické pozorování a jeho vyhodnocování.

Oba přístupy se vyznačují specifickými vlastnostmi, ani jeden z nich absolutizovat na úkor druhého. Podrobnosti jsou uvedeny ve specializované literatuře.

9. APLIKACE DIAGNOSTIKY V PROVOZU A ÚDRŽBĚ VOZIDLOVÝCH SPALOVACÍCH MOTORŮ

Z hlediska spolehlivosti je spalovací motor rozhodující hlavní skupinou automobilu. Na hospodárnosti a spolehlivosti provozu spalovacího motoru značně závisí možnosti využití vozidla a z toho také plynou určité specifické požadavky na diagnostiku. Mimořádný důraz je kladen na diagnostiku těch prvků, jejichž technický stav má bezprostřední vliv na výkon motoru, kouřivost u vznětových motorů, na složení výfukových plynů u zážehových motorů, hlučnost, spotřebu paliva a maziva a další. V praxi existují rozdíly mezi diagnostikou motoru zážehového a vznětového. V dalším zaměříme pozornost na motory vznětové, které jsou v ČR využívány u většiny vozidel. Zmíníme se pouze o odchylkách, které platí pro motory zážehové. Ve vozidlovém spalovacím motoru existuje několik desítek prvků, jejichž prověrku můžeme zařadit do diagnostického postupu. S ohledem na ekonomičnost, vývoj diagnostické techniky, účelnost a požadavky praxe je nutno zjistit technický stav rozhodujících částí a soustav motoru. Z těchto pohledů lze rozdělit diagnostiku spalovacího motoru do následujících skupin:

- a) Diagnostika oběhu motoru, která zahrnuje otázky těsnosti spalovacího prostoru, stavu vložek válců, pístové skupiny, seřízení a funkce palivové, mazací a chladicí soustavy a soustavy čištění vzduchu.
- b) Diagnostika klikového ústrojí, která zahrnuje stav klikového hřídele, opotřebení ložisek klikového ústrojí (hlavních a ojníčních) a kontrolu jejich technického stavu.
- c) Diagnostika rozvodového ústrojí, která zahrnuje stanovení velikosti vůlí v rozvodovém ústrojí, kontrolu opotřebení částí rozvodů (ventilů aj.) a jejich seřízení.

Spalovací motor je složité zařízení, jehož technický stav je možno komplexně posoudit na základě znalostí značného počtu nezávislých diagnostických parametrů. Tento úkol zatím není komplexně vyřešen, proto se v dalším zaměříme pouze na nejdůležitější, prakticky využívané, parametry technického stavu.

9. 1 Výkon motoru

Výkon motoru je základním parametrem, který určuje správný technický stav motoru. Na základě poklesu výkonu lze usuzovat na abnormální opotřebení rozhodujících částí motoru (pístová skupina, rozvodové ústrojí aj.), popř. na poruchu některé soustavy, která má rozhodující vliv na těsnost spalovacího prostoru, správnou tvorbu palivové směsi, okamžik vznětu nebo zážehu aj.

Rovněž si však musíme uvědomit, že při konkrétně naměřené, resp. přesněji vypočtené, hodnotě výkonu je potřebné se zeptat, s jakou hospodárností a s jakými vedlejšími důsledky bylo výkonu dosaženo. Např. dosažení výkonu v toleranci jmenovité hodnoty, avšak při zvýšené kouřivosti, svědčí o špatném technickém stavu motoru.

Z hlediska diagnostiky je maximální výkon motoru podmínkou nutnou, ale nikoli postačující. Toto konstatování platí zejména u víceválcových motorů. Porucha jednoho válce je u víceválcového motoru na jeho celkovém výkonu sotva měřitelná, resp. je v toleranci přesnosti chyby měření, a tento válec může mít poruchu, která v krátké době způsobí havárii celého motoru.

Z hlediska uživatele je rozhodující informace o velikosti užitečného výkonu. Pokud však chceme odhalit odchylky od normálního stavu, je přesnější porovnání indikovaných výkonů, kdy se vyloučí vliv mechanických ztrát.

Metody přímého stanovení výkonu

A) Měření výkonu na motorové brzdě

Jedná se o běžnou a velmi přesnou metodu, kdy spalovací motor zatěžíme brzdou, jejíž stator je výkyvně uložen. Technický stav zjišťujeme porovnáním rychlostní (otáčkové) vnější charakteristiky motoru s ekvivalentní charakteristikou nového motoru. V praxi měříme sílu F_b na rameni brzdy r_b a točivý moment vypočítáme pomocí rovnice

$$M_T = F_b \cdot r_b \quad (Nm), \quad (9.1)$$

kde: F_b ... síla na rameni brzdy,

r_b ... rameno brzdy.

Užitečný výkon je pak $P_e = M_T \cdot \omega \quad (W) \quad (9.2)$

kde ω ... úhlová rychlost otáčení klikového hřídele.

Schéma motorové brzdy je na obr. 9. 1. Měření výkonu na motorové brzdě je velmi přesné, ale pro provoz nevhodné, neboť vyžaduje demontáž motoru z vozidla.

B) Měření výkonu na válcové zkušebně

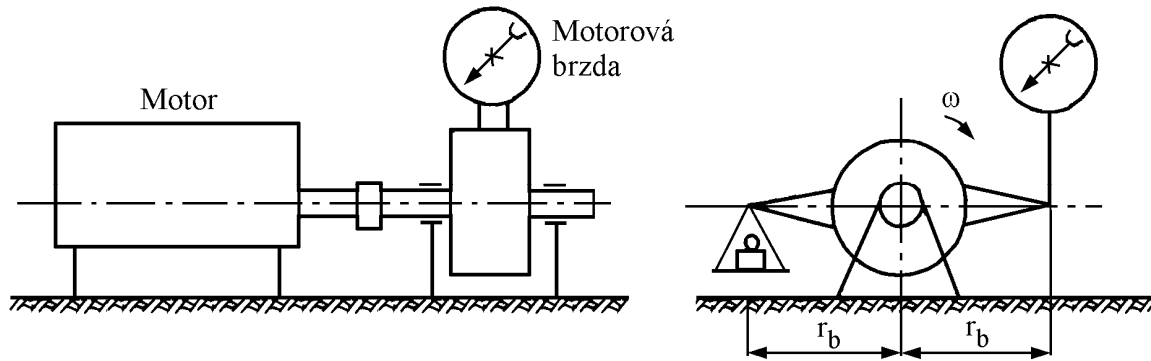
Provádí se bez demontáže motoru z vozidla na výkonových válcových zkušebnách, kde se měří hnací síla na obvodu hnacího kola.

Točivý moment na hřídeli hnacího kola je dán vztahem

$$M_k = F_k \cdot r_d \quad (Nm), \quad (9.3)$$

kde: F_k ... síla na obvodu hnacího kola,

r_d ... dynamický poloměr hnacího kola.



Obr. 9. 1 Schéma motorové brzdy

Výkon na hnacím kole je

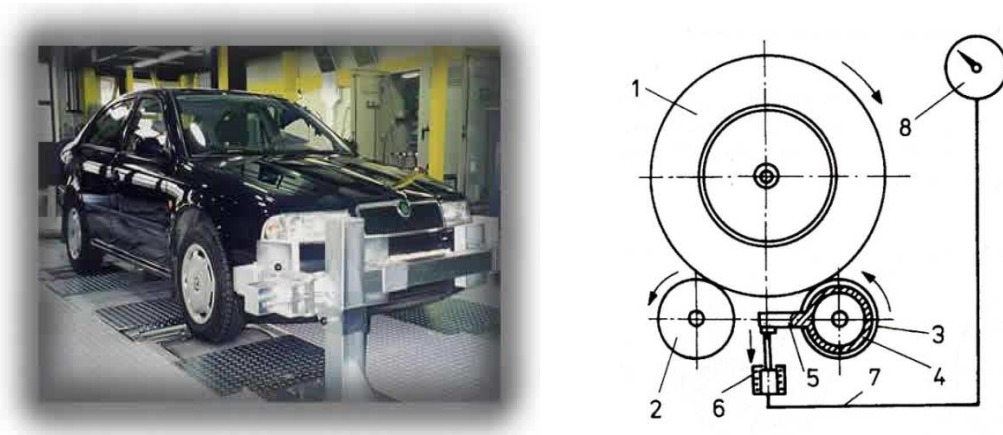
$$P_k = M_k \cdot \omega_k \quad (W), \quad (9.4)$$

kde ω_k ... úhlová rychlost otáčení hnacího kola.

Užitečný výkon stanovíme z rovnice

$$P_e = P_k - P_z, \quad (9.5)$$

kde P_z ... ztrátový výkon.



Obr. 9. 2 Obrázek a schéma výkonové válcové zkušebny s elektrickou brzdou

Legenda:

1 – vozidlové kolo; 2 – podpěrný válec; 3 – měřicí válec; 4 – sator; 5 – rameno; 6 – snímač;
7 – kabeláž; indikační přístroj

Ztrátový výkon změříme obdobným způsobem na válcové zkušebně, při vypnuté spojce a roztočení převodového ústrojí na měřené otáčky. Příklad provedení výkonové válcové zkušebny pro osobní vozidla Ústavu techniky a automobilové dopravy MZLU je v levé části obr. 9. 2. Měření výkonu je vhodné pro automobilovou techniku, pro těžká vozidla s výkonnými spalovacími motory je však příliš drahé.

C) Snímání průběhu spalovacího tlaku ve válcích motoru

Jedná se o nejpřesnější metodu stanovení indikovaného výkonu motoru. Společně s tlakem měříme úhel natočení klikového hřídele. Výkon určíme při znalosti tlaku, plochy pístu a otáček ze vztahu

$$P_i = \frac{i \cdot v_z \cdot p_s \cdot n}{300 \cdot z} \quad (\text{kW}), \quad (9.6)$$

kde i ... počet válců (-),

V_z ... zdvihový objem válce (dm^3),

P_s ... střední indikovaný tlak (Pa),

n ... počet otáček za sekundu (min^{-1}),

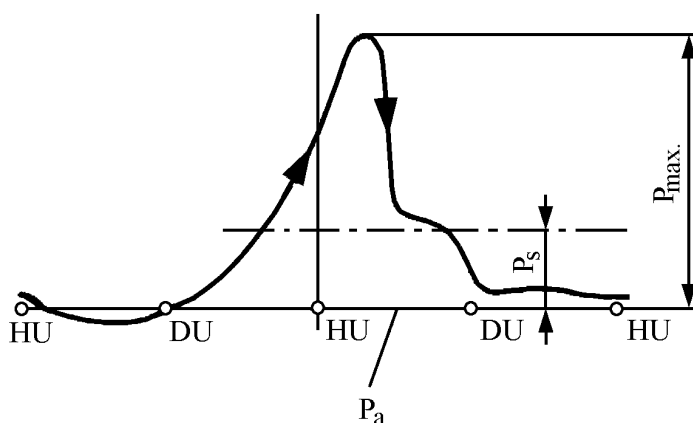
z ... konstanta ($z = 2$ pro dvoudobý motor a $z = 4$ pro čtyřdobý motor).

Průběh tlaku, resp. indikátorový diagram čtyřdobého motoru je znázorněn na obr. 9. 3.

P_a - čára atmosférického tlaku

P_s - střední tlak plynů ve válci

P_{max} - maximální přetlak plynů ve válci



Obr. 9. 3 Indikátorový diagram čtyřdobého motoru

Snímání průběhu tlaku v jednotlivých válcích je v současnosti realizováno u velkých stacionárních motorů, např. u lokomotiv aj. ale běžné využití u vozidlových spalovacích motorů by vyžadovalo zásadní řešení technické diagnostiky, tj. konstrukční vyřešení rutinního sejmutí indikátorového diagramu.

D) Snímání točivého momentu na výstupu motoru

Točivý moment na výstupu z motoru lze měřit pomocí tenzometrických snímačů na výstupním konci klikového hřídele. Měření točivého momentu bývá spojeno s obtížemi, např. s nutností instalace tenzometrů, přenosem signálů z rotační části na stator aj. Je to však způsob relativně přesný, ale pro diagnostické účely v současnosti méně vhodný. Příklad zapojení tenzometrického snímače točivého momentu je ukázáno na obr. 9. 4. Principy vychází z elektronického snímání síly, fungujícího na změně určité veličiny v závislosti napjatosti materiálu – tenzi nebo u odporových tenzometrů se využívá změny odporu mechanicky namáhaného vodiče délky l_0 , průřezu S a rezistivitou ρ . Přitom změna odporu je dána změnou délky vodiče, obr. 9. 5.

Velikost točivého momentu je dána vztahem

$$M_T = \frac{2U_v \cdot G \cdot W_k}{k \cdot E}, \quad (9.7)$$

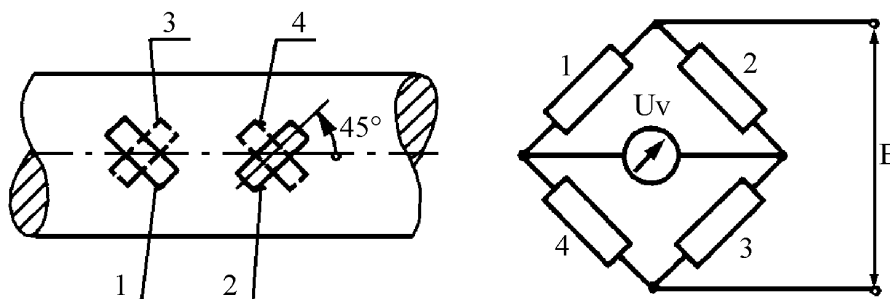
kde U_v ... registrované napětí měřícího můstku,

G ... modul pružnosti ve smyku,

W_k ... průřezový modul hřídele v krutu,

k ... konstanta tenzometru,

E ... vstupní napětí.



Obr. 9. 4 Možné zapojení a princip snímání točivého momentu na výstupu motoru

Pro stanovení velikosti působící síly, musíme znát změnu odporu, kterému je přiřazena určitá velikost síly.

$$K\varepsilon = \frac{\Delta R}{R}, \quad (9.8)$$

kde K ... součinitel deformační citlivosti (pro kovové tenzometry $K = 2$),

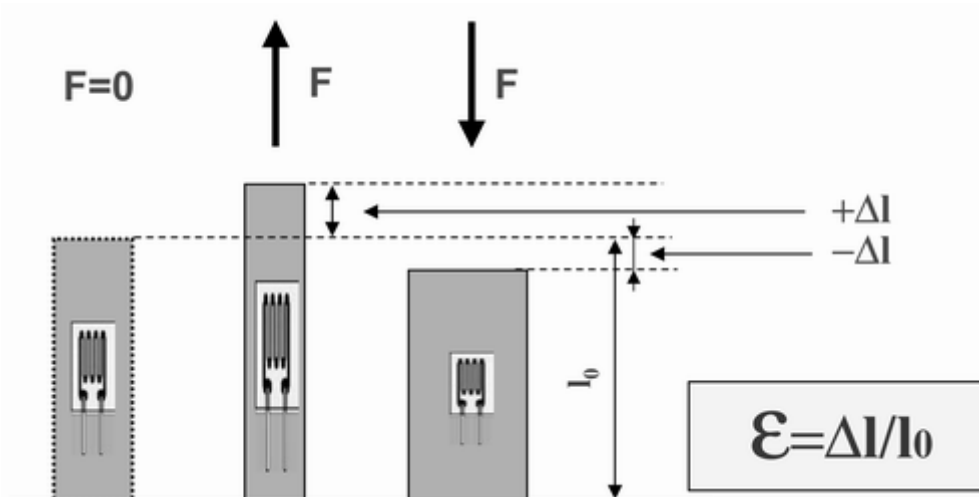
ε ... délková deformace tenzometru – poměrné prodloužení ,

R ... nominální odpor v nenamáhaném stavu ($F = 0$ N).

Pro poměrné prodloužení platí

$$\varepsilon = \frac{\Delta l}{l_0}, \quad (9.9)$$

kde l_0 ... délka vodiče .



Obr. 9.5 Princip odporového tenzometru

Metody nepřímého měření výkonu

A) Měření úhlového zrychlení a zpomalení motoru

Velikost úhlového zrychlení nezátíženého motoru, rozbíhajícího se při definované dodávce paliva z určitých otáček, je významnou diagnostickou veličinou úměrnou výkonu a točivému momentu. Rovněž úhlové zpomalení při nulové dodávce paliva (u vznětových motorů), popř. při vypnutí zapalování (u zážehových motorů), je diagnostickou veličinou odpovídající ztrátovému výkonu a ztrátovému točivému momentu.

Z metodického hlediska lze měřit úhlové zrychlení nebo zpoždění následujícími způsoby:

1.) Akcelerací nezátíženého motoru z volnoběžných otáček na maximální otáčky při plné dodávce paliva a následné deceleraci při nulové dodávce paliva, při průběžném měření úhlového zrychlení a zpomalení klikového hřídele motoru.

2.) Měření akcelerace a decelerace pouze ve vhodně zvoleném úzkém intervalu otáček klikového hřídele motoru.

Při realizaci obou metod lze měřit úhlové zrychlení a zpomalení klikového hřídele při práci celého motoru, popř. při práci motoru s vypínáním jednotlivých válců. V prvním případě pak diagnostikujeme výkon motoru jako celku a v druhém případě diagnostikujeme výkon jednotlivých válců. Při měření zrychlení a zpomalení klikového hřídele celého motoru stanovíme indikované úhlové zrychlení ε_i ze vztahu

$$\varepsilon_i = \varepsilon_a + |\varepsilon_d|, \quad (9.10)$$

kde ε_a ... užitečné úhlové zrychlení (s^{-2}),

ε_d ... úhlové zpomalení nepracujícího motoru (s^{-2}).

Výkon motoru je pak dán vztahem

$$P = J_M (\varepsilon_a + \varepsilon_d) \omega, \quad (9.11)$$

kde J_M ... moment setrvačnosti pohyblivých částí motoru redukováný na klikový hřídel (kgm^2).

Při zjišťování úhlového zrychlení ε_{iv} jednotlivých válců vycházíme ze vztahu

$$\varepsilon_{iv} = \varepsilon_a + \varepsilon_{av}, \quad (9.12)$$

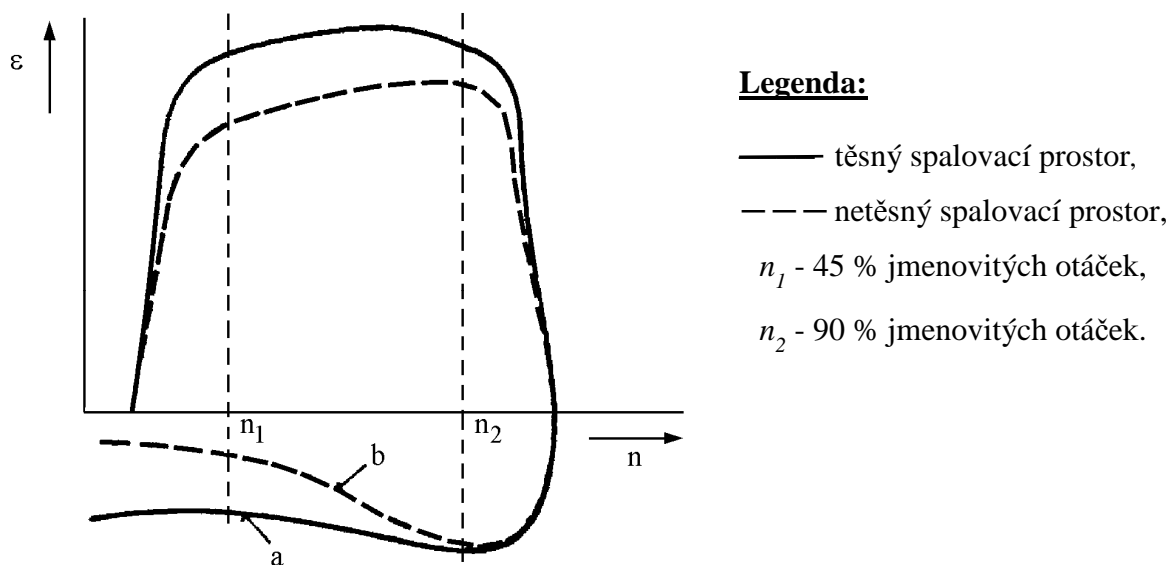
kde ε_{av} ... užitečné úhlové zrychlení motoru pracujícího s odpojeným v-tým válcem.

Měření úhlového zrychlení a zpomalení klikového hřídele je možno realizovat následujícími způsoby:

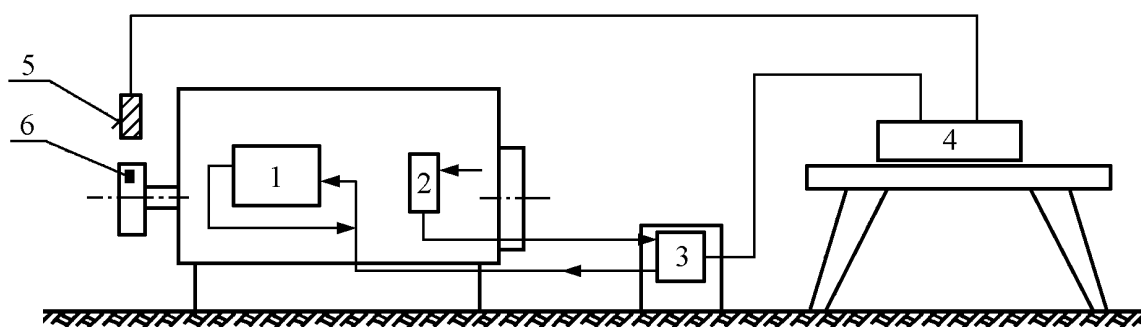
- využitím signálu tachodynamu, kdy úhlová rychlost je přímo úměrná vstupnímu napětí a zrychlení je přímo úměrné derivaci vstupního napětí podle času, provedené elektrickou cestou. Průběh úhlového zrychlení a zpomalení v závislosti na úhlové rychlosti s využitím souřadnicového zapisovače při rozběhu a doběhu motoru je na obr. 9. 6. Tato metoda je výhodná pro svoji jednoduchost, ale je méně přesná.

- bezkontaktním snímáním frekvence impulsů z rotujících částí motoru a jejich průběžném vyhodnocování, metodou cyklů tzv. opakovaných akcelerací. Během každého akceleračního cyklu je při akceleraci měřeno úhlové zrychlení a při deceleraci úhlové zpomalení klikového hřídele a stanoveny jejich střední hodnoty. Během předvoleného počtu

akceleračních cyklů je možno měřit celkovou úhlovou dráhu klikového hřídele a jí odpovídající spotřebu paliva, popř. vyhodnotit hodinovou nebo měrnou spotřebu aj. Schéma metody a zapojení přístrojů je znázorněno na obr. 9. 7.



Obr. 9. 6 Průběh úhlového zrychlení a zpomalení motoru



Obr. 9. 7 Zařízení pro měření úhlového zrychlení a zpoždění klikového hřídele motoru

Legenda: 1 - vstřikovací čerpadlo, 2 - dopravní čerpadlo, 3 - průtokoměr, 4 - vyhodnocovací zařízení, 5 - snímací optoelektronická sonda, 6 - odrazová značka.

Příklad měření (výpočtu) výkonu motoru

Využijeme měření úhlového zrychlení ε_m ($\text{rad}\cdot\text{s}^{-2}$) a znalosti momentu setrvačnosti rotačních hmot motoru, včetně spojky a předlohového hřídele převodovky I ($\text{kg}\cdot\text{m}^2$), kdy vypočteme kroutící moment motoru M_m (Nm) ze vztahu

$$M_m = I \cdot \varepsilon_m, \quad (9.13)$$

pro dílčí indikovaný kroutící moment M_{iv} zkoušeného válce platí

$$M_{iv} = M_z \cdot M_{ev}, \quad (9.14)$$

kde M_z ... mechanické ztráty motoru,

M_{ev} ... efektivní kroutící moment válce.

Můžeme psát

$$M_{iv} = I(\varepsilon_z + \varepsilon_e), \quad (9.15)$$

kde ε_z ... úhlové zpoždění motoru,

ε_e ... užitečné úhlové zrychlení jednoho válce.

Hodnota ε_z se stanoví z doby decelerace nepracujícího motoru v rozmezí stanovených otáček, resp. úhlových rychlostí ω_2 a ω_1 , platí

$$\varepsilon_z = \frac{\omega_2 - \omega_1}{t_z}, \quad (9.16)$$

kde t_z ... doba decelerace (s) z ω_2 na ω_1 ;

Pro akceleraci ε_e platí

$$\varepsilon_e = \frac{\Delta\omega}{t_e}, \quad (9.17)$$

kde t_e ... doba akcelerace (s) z ω_1 na ω_2 ,

$$\Delta\omega = \omega_2 - \omega_1 (\text{rads}^{-1}).$$

V diagnostických přístrojích (např. JT 301 aj.) je $\Delta\omega$ konstantou, časy t_z a t_e se měří automaticky. Platí

$$\varepsilon_{iv} = \Delta\omega \left(\frac{1}{t_z} + \frac{1}{t_e} \right). \quad (9.18)$$

Hodnoty ε_{iv} lze porovnat s grafy charakteristik úhlového zrychlení různých typů motorů, které jsou ve výbavě testeru. Výpočtem pak stanovíme výkon motoru následujícím způsobem:

Celkové indikované zrychlení ε_{im} čtyřválcového motoru je

$$\varepsilon_{im} = \sum_1^4 \varepsilon_{iv} \quad (9.19)$$

Z toho indikovaný kroutící moment M_{im} je

$$M_{im} = \varepsilon_{im} \cdot I . \quad (9.20)$$

Indikovaný výkon motoru P_i

$$P_i = M_{im} \cdot \omega_s \cdot 10^{-3}, \text{ (kW)} \quad (9.21)$$

kde $\omega_s = \frac{\omega_1 + \omega_2}{2}$. (rad.s⁻¹)

Užitečný kroutící moment motoru M_e

$$M_e = M_{im} - M_z \text{ (Nm)} \quad (9.22)$$

a užitečný výkon

$$P_e = M_e \cdot \omega_s \cdot 10^{-3}. \text{ (kW)} \quad (9.23)$$

B) Stanovení výkonu metodou vypínání válců

Princip metody spočívá v tom, že měříme pouze otáčky, na nichž se ustálí nezatížený motor při odpojení určitého počtu válců a při plné dodávce paliva. Za těchto podmínek je dosaženo rovnováhy indikátorového točivého momentu pracujících válců se ztrátovým výkonem motoru a na základě standardní závislosti ztrátového výkonu na otáčkách lze usuzovat na hodnotu indikovaného výkonu pracujících válců. Orientačně můžeme vycházet ze vztahu pro efektivní výkon P_e

$$P_e = P_j - k(n_{ij} - n_{is}), \quad (9.24)$$

kde P_j ... jmenovitý výkon nového motoru,

k ... konstanta daného typu motoru,

n_{ij} ... otáčky nového motoru při práci na i-tý válec,

n_{is} ... skutečně naměřené otáčky při práci na i-tý válec.

Pro přesná měření je potřebné vzít v úvahu přesnou hodnotu ztrátového výkonu. Uvedená metoda není pro provozní využití příliš vhodná, protože výsledky jsou značně závislé na přesném dodržení podmínek měření, např. teplotě motoru aj.

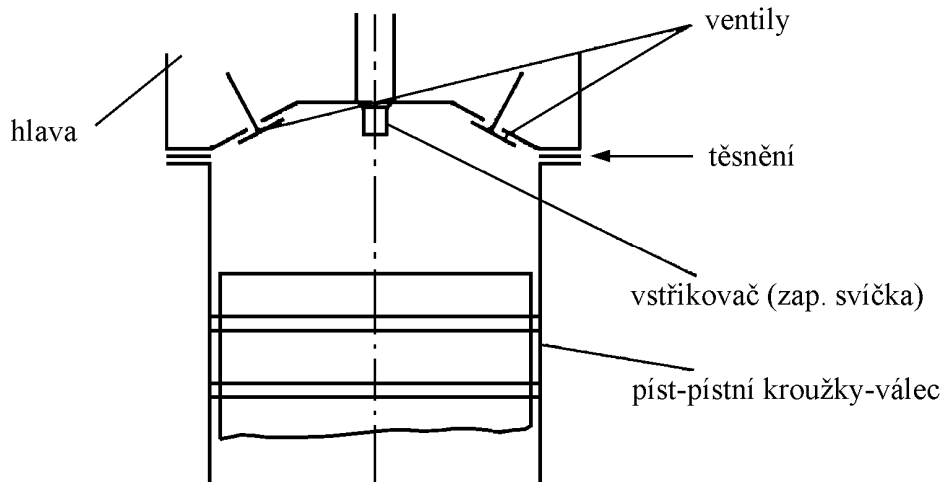
9. 2 Těsnost spalovacího prostoru

Tento parametr je považován za nejdůležitější kritérium technického stavu, resp. opotřebením válců, pístů a pístních kroužků. Kromě toho mohou být příčinou netěsností spalovacího prostoru rovněž:

- netěsné ventily (neseřízená vůle, propálené ventily, nečistoty mezi ventilem a sedlem, prasklá pružina aj.),
- netěsnost mezi hlavou a válcem nebo mezi jednotlivými hlavami ve společném bloku (poškozené těsnění, špatné dotažení hlavy),
- netěsná hlava (praskliny, deformace po přehřátí nebo nesprávném dotažení),
- zkřivený, špatně dotažený vstřikovač nebo svíčka aj.

Místa netěsností spalovacího prostoru motoru jsou ukázána na obr. 9. 8.

Těsnost spalovacího prostoru má přímý vliv na průběh spalovacího procesu, tj. přímo na výkon a další parametry. S poklesem těsnosti vzrůstá spotřeba oleje a paliva, kouřivost, zhoršuje se spouštění motoru aj. Avšak ani těsnost spalovacího prostoru nemusí být zárukou správné funkce motoru, neboť příliš těsný píst ve válci se může v důsledku přehřátí zadřít a způsobit technickou havárii motoru.



Obr. 9. 8 Místa netěsností spalovacího prostoru motoru

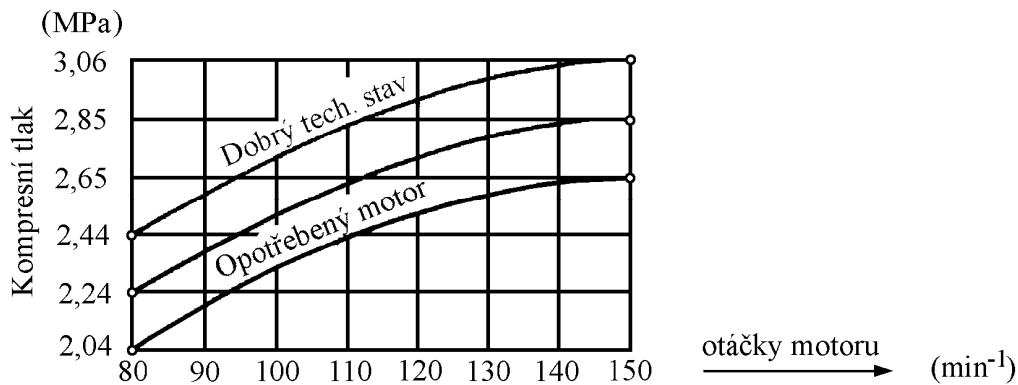
Metody zjišťování těsnosti spalovacího prostoru

Většina dosud známých metod zjišťování těsnosti spalovacího prostoru neumožňuje provést kontrolu bez částečné demontáže.

Přímé metody zjišťování těsnosti spalovacího prostoru

A) Měření kompresního tlaku

Měření maximálních hodnot kompresního tlaku je nejobvyklejší způsob stanovení těsnosti spalovacího prostoru jako celku. K protáčení motoru se nejčastěji využívá vlastního spouštěče motoru. Protože vliv počtu otáček na hodnotu kompresního tlaku je velký, protáčíme motor předepsanými otáčkami při studeném motoru. Příklad závislosti velikosti kompresního tlaku na otáčkách při různém opotřebení spalovacího prostoru je ukázán na obr. 9. 9.



Obr. 9. 9 Závislost kompresního tlaku na otáčkách a opotřebení spalovacího prostoru

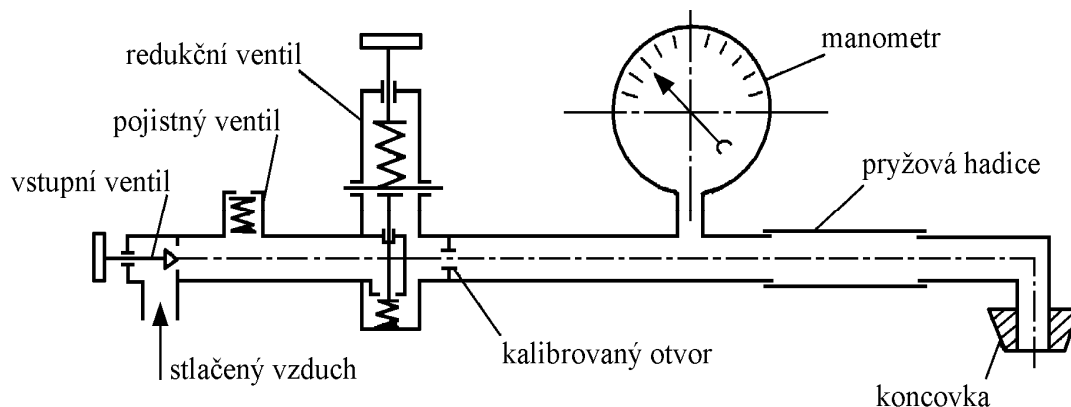
B) Měření těsnosti spalovacího prostoru stlačeným vzduchem

Stlačený vzduch se přivádí do spalovacího prostoru otvorem pro vstřikovač (svíčku) z cizího zdroje. Měření se provádí na zahřátém motoru, aby se vyloučil vliv dilatace pístu.

Kritériem těsnosti je:

- pokles tlaku vzduchu, daný rozdílem množství vzduchu přivedeného do motoru a množství vzduchu, který unikne netěsnostmi; stupeň netěsnosti je úměrný poklesu tlaku na tlakoměru,
- čas poklesu tlaku z počáteční hodnoty na hodnotu konečnou po přerušení přívodu vzduchu. Přitom píst je v horní úvrati kompresního zdvihu.

Příklad zařízení k měření poklesu tlaku vzduchu přiváděného do spalovacího prostoru je na obr. 9. 10.



Obr. 9. 10 Schéma zařízení k měření poklesu tlaku vzduchu

Velikost poklesu tlaku udává výrobce podle vlastních měření. Tato metoda je přesnější než měření kompresního tlaku a navíc můžeme určit místa netěsností tj. nadměrného opotřebení. Výhodou je to, že nemusíme protáčet motorem, kromě nastavení pístu do horní úvrti. Pravděpodobná místa netěsností podle šumu unikajícího vzduchu jsou uvedena v tab. 9. 1.

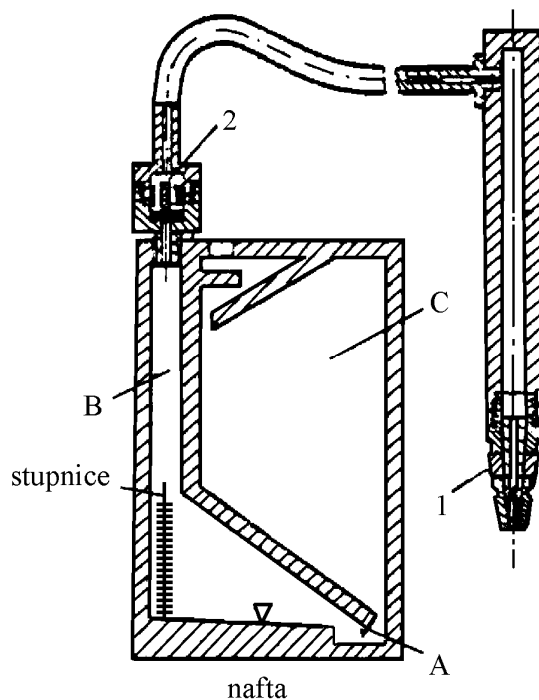
Tab. 9. 1 Místa netěsností spalovacího motoru

Unikající vzduch šumí	Pravděpodobná netěsnost je
v karburátoru	v sacích ventilech
ve výfukovém potrubí	ve výfukových ventilech
v plnicím otvoru oleje a odvětrání klikové skříně	v opotřebeném pístu, pístních kroužcích a válci
v chladiči chladicí kapaliny	v poškozeném těsnění pod hlavou
v sousedních válcích	poškozené těsnění pod hlavou, deformovaná hlava

C) Měření těsnosti pomocí kapalinového úhloměru

Princip metody spočívá ve vyvolání malého přetlaku (podtlaku) ve spalovacím prostoru, který měříme na speciálním přístroji, tzv. kapalinovém úhloměru, obr. 9. 11, sloupcem nafty.

Čas, za který dojde k vyrovnání tlaku s tlakem okolním, je úměrný vůlím (opotřebení) rozhodujících součástí. Vyhodnocení lze provést podle tab. 9. 2.



Obr. 9. 11 Schéma kapalinového úhloměru

Legenda:

1 - snímač, 2 - korkový plováček (brání průchodu nafty, ale propouští vzduch), A - přepážka komor, B - komora, C - komora

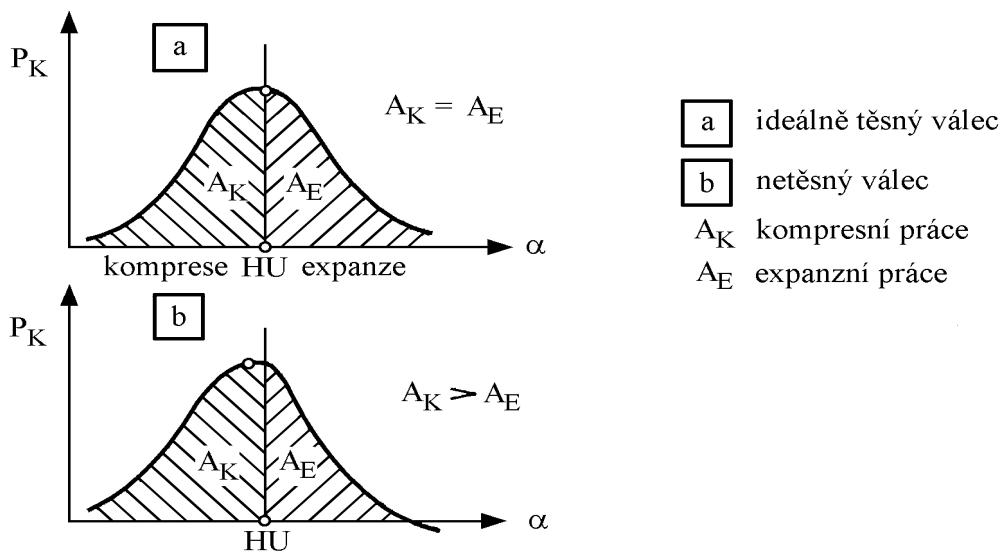
Tab. 9. 2 Vyhodnocení těsnosti spalovacího prostoru podle poklesu hladiny

Pokles hladiny	Těsnost	Pokles hladiny	Těsnost
neklesá	Výborná	1 cm za 2 – 4 s	mezní
1 cm za 5 s	velmi dobrá	1 cm za méně než 2 s	havarijní stav

Nepřímé měření těsnosti spalovacího prostoru

A) Měření těsnosti podle příkonu spouštěče

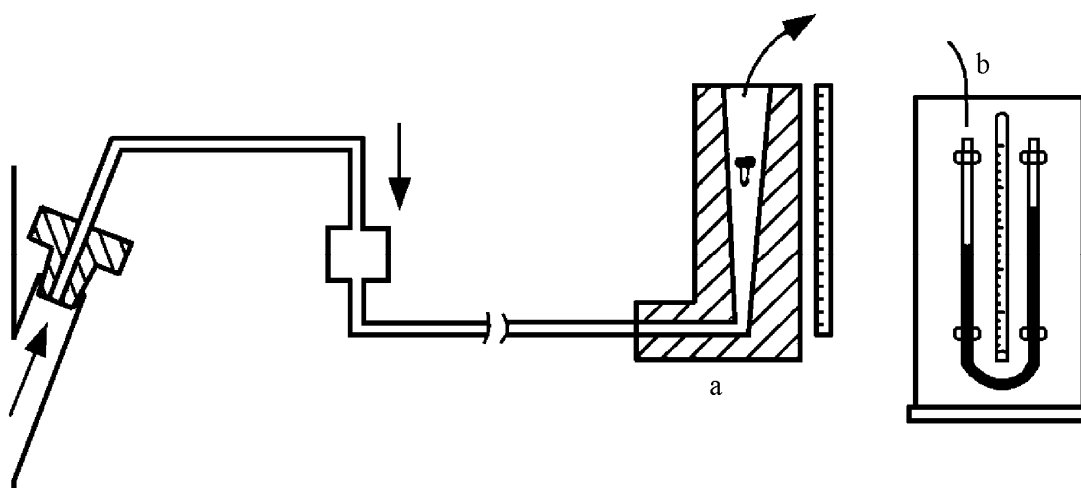
Tato metoda vychází z tzv. "NEVRATNÉ PRÁCE" následkem netěsného pracovního prostoru válce. U netěsného pracovního prostoru je, při vypnutém přívodu paliva, následkem ztráty hmotnosti tepla, expanzní práce menší než práce kompresní. Rozdíl obou prací lze vyhodnotit z proudových hodnot spouštěče motoru, který se k protáčení používá. Princip metody těsnosti spalovacího prostoru podle příkonu spouštěče je schématicky znázorněn na obr. 9. 12.



Obr. 9. 12 Průběh kompresní a expanzní práce

B) Měření průniku plynů do klikové skříně

Metoda zahrnuje dvě varianty, kdy měříme buď průtočné množství plynů (a) nebo přetlak plynů (b) v klikové skříně. Průnik plynů do klikové skříně záleží pouze na netěsnostech pístů a válců, resp. je ovlivněn zatížením, otáčkami, teplotou, předvstřikem (předstihem zážehu) paliva, vlastnostmi a množstvím oleje aj. Schéma měření průniku plynů v obou variantách je znázorněno na obr. 9. 13. Přípustné ztráty průnikem plynů do klikové skříně jsou v rozmezí 0,1 - 0,5 % teoreticky nasátého objemu vzduchu.



Obr. 9. 13 Schéma měření průniku plynů do klikové skříně

9.3 Spotřeba paliva a oleje

Spotřeba paliva je jedním ze základních ukazatelů technického stavu a hospodárnosti spalovacího motoru. Je ovlivňována celou řadou různých faktorů, např.:

- opotřebením pístové skupiny,
- nesprávným seřízením a netěsností palivové soustavy,
- znečištěním čističe vzduchu,
- technikou jízdy aj.

Z uvedeného relativně velkého počtu faktorů, které významně ovlivňují spotřebu paliva vyplývá, že spotřeba paliva není příliš vhodnou metodou k posouzení technického stavu motoru. Spotřebu paliva a motorového oleje můžeme zjistit:

- 1) Výpočtem (teoretickou hodnotu);
- 2) Jízdními zkouškami;
- 3) Laboratorním měřením na válcové stolici.

Ad. 1) Výpočet spotřeby paliva

Výpočet provozní spotřeby paliva S_p vychází z rovnice

$$s_p = \frac{m_p \cdot P_m}{10 \cdot \tau_p \cdot v} \quad (1/100km), \quad (9.24)$$

kde m_p ... měrná spotřeba paliva (g/kW),

P_m ... potřebný výkon motoru (kW),

τ_p ... hustota paliva (kg/l),

v ... rychlost vozidla (km/h).

Poznámka: *Potřebný výkon motoru P_m získáme z celkového výkonu na hnacích kolech P_c a z účinnosti převodového mechanismu μ na příslušném převodovém stupni, kdy platí $P_m = P_c / \mu$ je součtem výkonů na překonání valivého odporu, odporu vzduchu aj.*

Rovněž můžeme k výpočtu využít celkovou charakteristiku motoru (závislost měrné spotřeby na celkovém kroutícím momentu a otáčkách motoru) a rovnice

$$S_p = \frac{2,65 \cdot m_p \cdot F_k}{95490 \cdot \tau_p \cdot \mu_{mp}}, \quad (9.25)$$

kde F_k ... hnací síla (N),

μ_{mp} ... mechanická účinnost převodů (-).

Při měření v laboratoři můžeme vyjít ze změřeného průtoku a odměřeného množství paliva, kdy dostáváme hodinovou spotřebu paliva S_{ph} (kg/h) a spotřebu S_p (l/100 km) vypočteme ze vztahu

$$S_p = \frac{10^5 \cdot S_{ph}}{\tau \cdot v}, \quad (9.26)$$

kde τ ... měrná hmotnost paliva (kg/m³).

Při hmotnostním měření vypočítáme spotřebu paliva podle rovnice

$$S_p = \frac{m_{sp}}{\tau_p \cdot s} 100, \quad (9.27)$$

kde m_{sp} ... hmotnost spotřebovaného paliva (kg)

s ... dráha ujetá při zkoušce (km).

Při objemovém měření vypočítáme spotřebu paliva podle rovnice

$$S_p = \frac{V[1 + a(t_0 - t_k)]}{s} 100, \quad (9.28)$$

kde V ... objem spotřebovaného paliva (l),

a ... součinitel objemové roztažnosti ($a = 0,001$ pro benzín) (°C),

t_0 ... referenční teplota ($t_0 = 20$) (°C),

t_k ... teplota paliva (°C).

Ad. 2) Měření spotřeby jízdními zkouškami

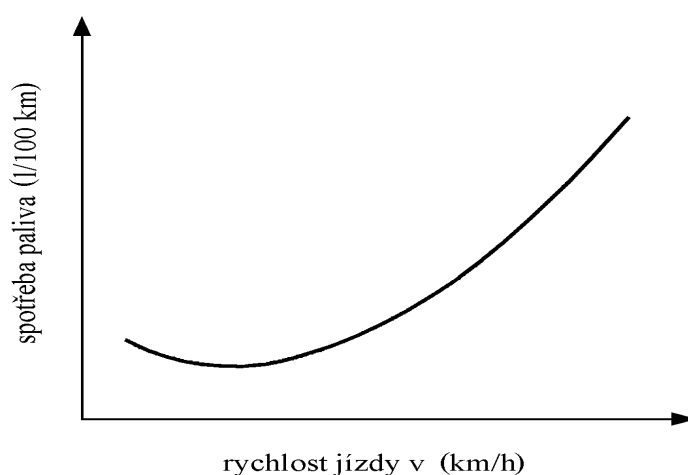
Základní spotřeba vozidel je dána legislativně a je to množství paliva v litrech, které by automobil spotřeboval při ujetí dráhy 100 km, za podmínek uvedených v legislativní normě, tj. rychlost v měřeném úseku udržována na 2/3 maximální rychlosti, popř. není-li maximální rychlost stanovena v dokumentaci, projíždí vozidlo měřícím úsekem při zařazeném nejvyšším rychlostním stupni, řazení během zkoušky není dovoleno. Využívá se následujících zkoušek:

- 1) Zkouška napodobující jízdu v městském provozu;
- 2) Zkouška při stálé rychlosti:
 - a) 70 km/h (pro vozidla s max. rychlostí < 95 km/h);
 - b) 90 km/h;
 - c) 120 km/h (pro vozidla s max. rychlostí > 95 km/h).

Vozidlo musí vyhovovat kritériím stanoveným EHK (seřízení, kvalita paliva, maziva, pneumatik, tlak vzduchu, teplota, použité zařízení pro měření spotřeby, hmotnost vozidla aj.). Zkušební dráha musí mít délku min. 5 km, zkušební jízda se provádí v obou směrech, z celkové spotřeby a celkové dráhy se vypočte spotřeba paliva S_p v (l/100 km). Při měření se často zjišťuje křivka spotřeby paliva v závislosti na rychlosti jízdy, která nám umožní posoudit v jakém rychlostním pásmu je provoz vozidla nejehospodárnější, viz obr. 9. 14.

Ad 3) Laboratorní měření spotřeby na válcové stolici

Měření spotřeby paliva (Směrnice 93/116 ES) je dáno speciálním testem s přesně určeným programem jízdy, který relativně dobře vystihuje jízdu ve městě, popř. v určené oblasti viz obr. 9. 15. Původní způsob zavedený v Evropě řadu let, se kterým se dosud můžeme setkat, vyjadřoval spotřebu třemi čísly v litrech/100 km pro tři provozní režimy, a to pro městský provoz simulovaný unifikovaným jízdním testem na válcovém dynamometru, a pro jízdu stálými rychlostmi 90 a 120 km/h. Metodiku měření stanovil předpis EHK č. 84, resp. směrnice ES 89/491. Podle nich se množství spotřebovaného paliva určuje objemovou nebo hmotnostní metodou a motor je vždy zahřát na provozní teplotu. Někdy se ještě uvádí průměrná spotřeba, vypočtená jako prostý aritmetický průměr těchto tří hodnot, označovaná jako „euromix“.



Obr. 9. 14 Křivka spotřeby paliva v závislosti na rychlosti

Od roku 1997 se užívá nový způsob vyjadřování spotřeby paliva. Jsou to opět tři čísla, ale zjištěná při jiných provozních režimech. První udává spotřebu v městském provozu, simulovaném stejně jako dosud, ale zahájeném se studeným motorem. Před zkouškou podle dále definovaného cyklu, označovaném **UC** (Urban Cycle), se automobil temperuje min. 6 hodin při teplotě 20 až 30 °C. Druhé číslo udává spotřebu při jízdě mimo město, podle unifikovaného testu rovněž na válcovém dynamometru, označovaném **EUC** (Extra-Urban Cycle), popř. **EUDC** (Extra-Urban Driving Cycle), při němž je teplota motoru dána předchozím městským testem. Třetí údaj, vyjadřující spotřebu ve smíšeném provozu, je vypočten jako vážený aritmetický průměr spotřeby při obou předchozích cyklech, a to s podílem 36,8 % UC a 63,2 % EUC. Nový způsob určování spotřeby paliva je závazný pro Evropská společenství (směrnice 93/116ES) u homologací od 1.1.1996 a pro veškerou výrobu od 1.1.1997. Existuje úzká souvislost mezi spotřebou paliva a množstvím emisí, které se měří při stejných jízdních testech. Přitom není problém vypočítat z množství oxidu uhelnatého, uhličitého a uhlovodíků množství spotřebovaného paliva. Při schvalování nového typu vozidla se zkontroluje plnění předepsaných emisních limitů a zároveň se určí spotřeba paliva. Další výhodou tohoto způsobu je, že není třeba zasahovat do palivové soustavy automobilu připojením externího měřiče spotřeby, což u moderních elektronicky řízených soustav není snadné. Nový způsob určování spotřeby paliva vyžaduje měření na speciálním válcovém dynamometru, tedy v laboratoři. Měření nemůžeme uskutečnit na silnici, a to ani na speciální zkušební dráze. Celý zkušební cyklus pro vozidla kategorie M_1 a N_1 je zjednodušeně znázorněn připojeným diagramem (nejsou v něm vyznačeny okamžiky řazení aj.) na obr. 9.15. Skládá se z městského cyklu (UC), čtyřikrát po sobě opakujícího tzv. základní cyklus, a z mimoměstského cyklu (EUC). Za celý cyklus „ujede“ vozidlo teoretickou vzdálenost 11007 m průměrnou rychlostí 33,6 km/h. V městském cyklu se používají první tři rychlostní stupně, průměrná rychlost je 19,0 km/h a ujetá vzdálenost 4052 m. V mimoměstské části cyklu se používají všechny rychlostní stupně, průměrná rychlost je 62,6 km/h, ujetá vzdálenost 6955 m. Časový sled jednotlivých fází základního a mimoměstského cyklu i jejich definice jsou v tab. 9. 3. a 9. 4. Podle této metodiky se spotřeba paliva již neměří, ale vypočítává z naměřených emisí podle následujících vztahů:

a) pro vozidla se zážehovými motory

$$FC = \frac{0,1154}{D} [(0,866.HC) + (0,429.CO) + (0,273.CO_2)] \quad (9. 29)$$

b) pro vozidla se vznětovými motory

$$FC = \frac{0,1155}{D} [(0,866.HC) + (0,429.CO) + (0,273.CO_2)] , \quad (9. 30)$$

kde FC ... spotřeba paliva v (l/100 km),

HC ... změřené emise uhlovodíků v (g/km),

CO ... změřené emise oxidu uhelnatého v (g/km),

CO₂ ... změřené emise oxidu uhličitého v (g/km),

D ... hustota zkušební paliva (referenční palivo normovaného složení).

V souvislosti s novou metodikou měření spotřeby paliva jsou výrobci povinni měřit emise oxidu uhličitého a jeho množství v g/km uvádět spolu se spotřebou paliva. Podle homologované hodnoty CO₂ se kontroluje shodnost sériové výroby s homologovaným typem, zajišťující kvalitu výroby. Uvedená nová metodika lépe postihuje skutečné provozní podmínky, ale ani nová metodika nepostihuje např. podmínky zimního provozu s teplotami pod bodem mrazu nebo provoz v ucpaných ulicích velkoměsta. Rozhodně nelze zaměňovat homologovanou spotřebu se skutečnou provozní, která vypovídá nejen o vlastnostech a technickém stavu vozidla, ale i o kvalitách řidiče a stylu jízdy. Spotřeba změřená na válcové zkušebně neodpovídá spotřebě změřené při jízdách zkouškách. Toto měření však lze kdykoli za stejných podmínek a rychle reprodukovat, resp. simulovat podmínky blízké jízdě zkoušce.

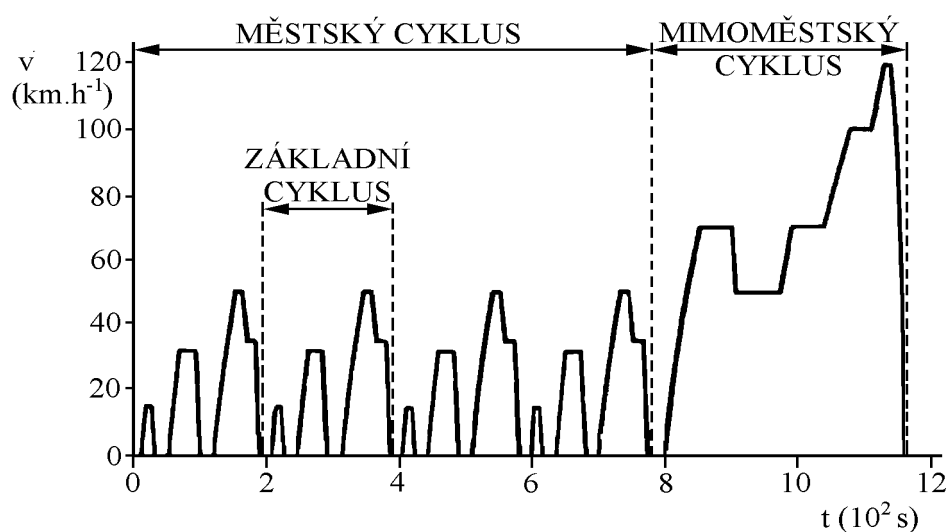
Měření spotřeby motorového oleje

Souhrnným ukazatelem opotřebení pístové skupiny a technického stavu je spotřeba motorového oleje. Udává se, že běžná spotřeba oleje se pohybuje mezi 1 - 2 % spotřeby paliva a mezní hodnotou jsou 3 %. Měření spotřeby motorového oleje je jednoduše proveditelné odvážením (odměřením) rozdílu oleje nalitého před zkouškou a vypuštěného po zkoušce. Jednoznačně musí být definovány podmínky (předehřev motoru, čas stékání, teplota oleje, způsob vážení aj.). Určitým problémem je nezjistitelné množství oleje, které zůstane v mazacím systému po vypuštění a zejména možnost naředění oleje pronikajícím palivem (popř. chladicí kapalinou). Proto je účelné provést posouzení jakosti oleje (viskozita, bod vzplanutí, obsah vody, celkové znečištění).

Tab.9. 3 Základní cyklus

Fáze	rychlostní stupeň	zrychlení (m.s ⁻²)	rychlost (km/h)	doba (s)
Volnoběh	N, 1*)			11
Akcelerace	1	1,04	0 až 15	4
stálá rychlost	1		15	8
Decelerace	1	- 0,69	15 až 10	2
decelerace, spojka vypnuta	1	- 0,92	10 až 0	3
Volnoběh	N,1**)			21
Akcelerace	1	0,83	0 až 15	5
Řazení	2			2
Akcelerace	2	0,94	15 až 32	5
stálá rychlost	2		32	24
Decelerace	2	- 0,75	32 až 10	8
decelerace, spojka vypnuta	2	- 0,92	10 až 0	3
Volnoběh	N,1**)			21
Akcelerace	1	0,83	0 až 15	5
Řazení	2			2
Akcelerace	2	0,62	15 až 35	9
Řazení	3			2
Akcelerace	3	0,52	35 až 50	8
stálá rychlost	3		50	12
Decelerace	3	- 0,52	50 až 35	8
stálá rychlost	3		35	13
Řazení	2			2
Decelerace	2	- 0,86	35 až 10	7
decelerace, spojka vypnuta	2	- 0,92	10 až 0	3
Volnoběh	N			7
Celkem				195

* 6s neutrál – spojka sepnuta a 5s první stupeň – spojka vypnuta; ** 16 s neutrál – spojka sepnuta a 5 s první stupeň – spojka vypnuta



Obr. 9. 15 Zkušební cyklus pro vozidla kategorie M₁ a N₁

Tab. 9. 4. Mimoměstský cyklus

Fáze	Rychlostní stupeň	Zrychlení (m.s ⁻²)	Rychlost (km/h)	Doba (s)
Volnoběh	1*)			20
Akcelerace	1	0,83	0 až 15	5
Řazení	2			2
Akcelerace	2	0,62	15 až 35	9
Řazení	3			2
Akcelerace	3	0,52	35 až 50	8
Řazení	4			2
Akcelerace	4	0,43	50 až 70	13
stálá rychlost	5		70	50
Decelerace	5,4**)	- 0,69	70 až 50	8
stálá rychlost	4		50	69
Akcelerace	4	0,43	50 až 70	13
stálá rychlost	5		70	50
Akcelerace	5	0,24	70 až 100	35
stálá rychlost	5		100	30
Akcelerace	5	0,28	100 až 120	20
stálá rychlost	5		120	10
Decelerace	5	- 0,69	120 až 80	16
Decelerace	5	- 1,04	80 až 50	8
decelerace, spojka vypnuta	5	- 1,39	50 až 0	10
Volnoběh	N***)			20
Celkem				400

*) spojka vypnuta; **) 4 s pátý stupeň, 4 s čtvrtý stupeň; ***) neutrál – spojka sepnuta

Zařízení pro měření spotřeby paliva

Nejjednodušším způsobem změření spotřeby paliva v provozu je metoda využívající doplnění nádrže po okraj, ujetí určitého počtu km, opětné doplnění nádrže po okraj a výpočet podle zjednodušeného vztahu, kdy

$$S_p = \frac{V}{s} \cdot 100 \quad (l/100 \text{ km}), \quad (9.31)$$

kde V ... objem spotřebovaného oleje (l),

s ... ujetá dráha v (km).

Pro měření základní spotřeby motorů s karburátorem se využívají jednoduché přenosné měřiče, které se skládají ze zásobní nádoby, odměrné nádoby a třicestného kohoutu

a vkládáme je mezi palivovou nádrž a palivové čerpadlo. Při rozjezdu odebíráme palivo ze zásobní nádoby, při jízdě po zkušebním úseku pak z odměrné nádoby.

Přesnějším zařízením je objemové čerpadlo, tvořené čtyřmi radiálně uspořádanými písty, jejichž přímočarý pohyb je převáděn na otáčivý pohyb hřídele. Snímač převádí impulsy otáček na objemové jednotky (dm^3). Přístroj se umísťuje mezi dopravní čerpadlo a karburátor.

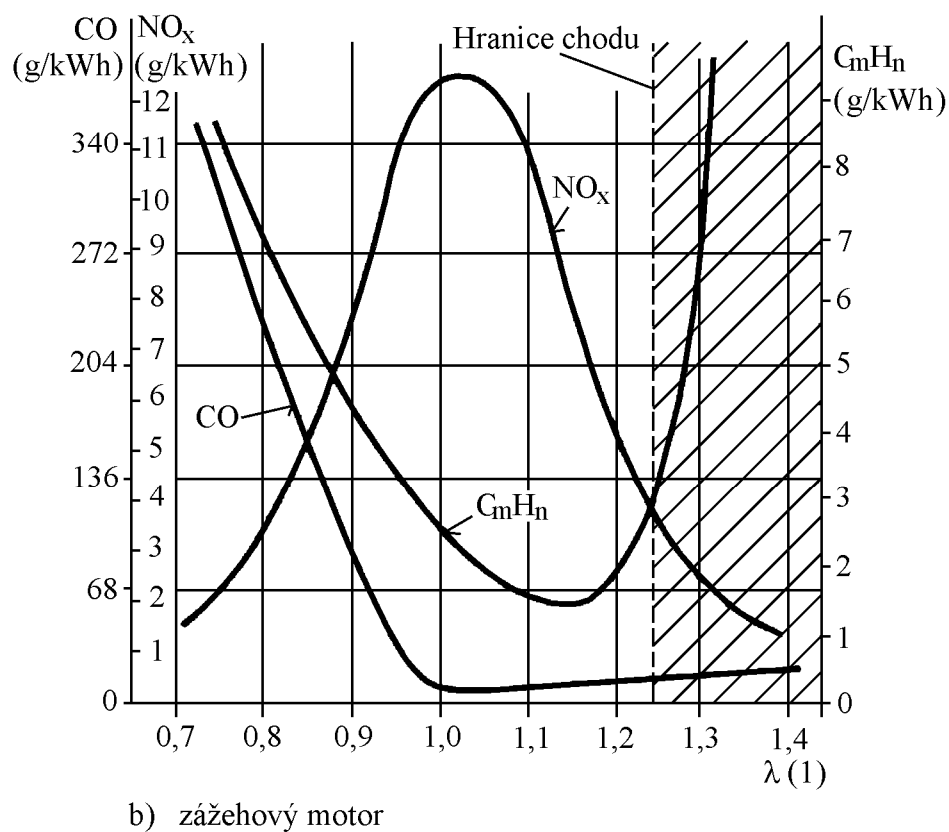
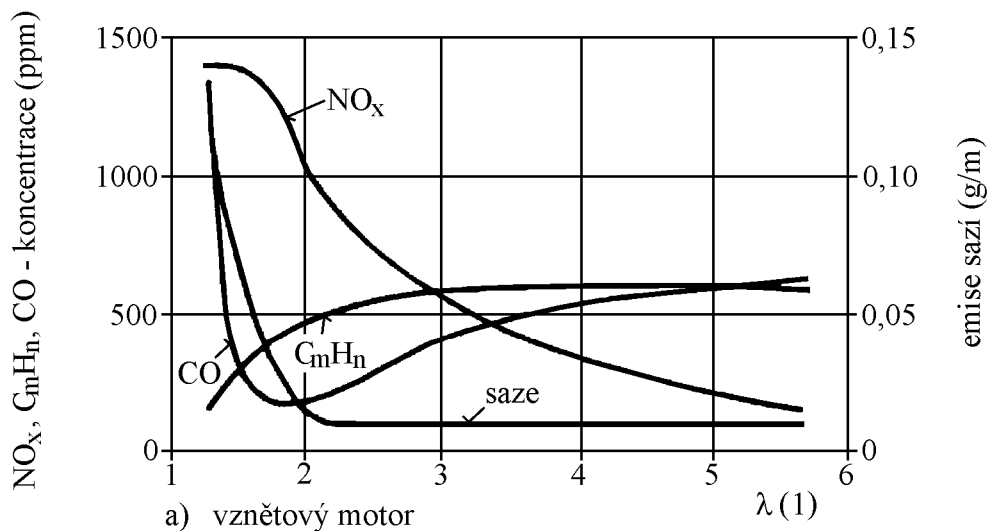
K měření spotřeby u motorů se vstřikováním paliva se využívají zařízení zajišťující konstantní objem nádrže a pak množství, které je třeba doplnit, odpovídá spotřebě. V praxi nádrž o konstantní spotřebě nahrazuje za jízdy výměník tepla. Zařízení je relativně složité a umísťuje se mezi dopravní čerpadlo a jemný čistič paliva spolu s objemovým měřením, které bylo popsáno v předchozím odstavci. Jiným zařízením je zubové čerpadlo, kde počet jeho otáček je úměrný průtoku a umožňuje měření spotřeby v (l/h) nebo v (cm^3).

Moderní funkční válcové zkušebny jsou vybaveny vestavěnými elektronickými měřiči spotřeby paliva. Obecně lze říci, že existuje velké množství měřičů paliva různých konstrukcí, které využívají elektroniku a výpočetní techniku, mají vysokou přesnost a spolehlivost.

Poznámka: *Na spotřebu paliva má vliv mnoho faktorů, zejména celkový technický stav a opotřebení. Je známo, že snížení kompresního tlaku znamená zvýšení spotřeby o 5 %, zakarbonování spalovacího prostoru o 7 %, vyřazení jedné zapalovací svíčky o 25 %, vyřazení dvou svíček o 60 %, pokles teploty chladicí kapaliny až 12 % aj.*

9. 4 Kouřivost motoru a analýza výfukových plynů

Při spalování uhlovodíkových paliv ve spalovacím motoru vlivem nemožnosti dokonalého spalování vznikají škodliviny, které jsou výfukovými plyny emitovány do ovzduší. Jedná se především o následující škodliviny: oxid uhelnatý CO, oxidy dusíku NO_x (oxid dusnatý NO, dusičitý NO_2 , dusný N_2O), nespálené uhlovodíky C_mH_n , oxid siřičitý SO_2 , halogenidy olova Pb, pevné částice velmi malých rozměrů (μm) - saze a anorganické látky, které jsou nosiči nespálených uhlovodíků. Největší pozornost se věnuje emisím CO, NO_x , C_mH_n , u vznětových motorů navíc tvorbě částic. Koncentrace škodlivin ve výfukových plynech jsou závislé především na součiniteli přebytku vzduchu λ . Typické průběhy hlavních škodlivin na součiniteli λ u vznětového a zážehového motoru jsou ukázány na obr. 9. 16.

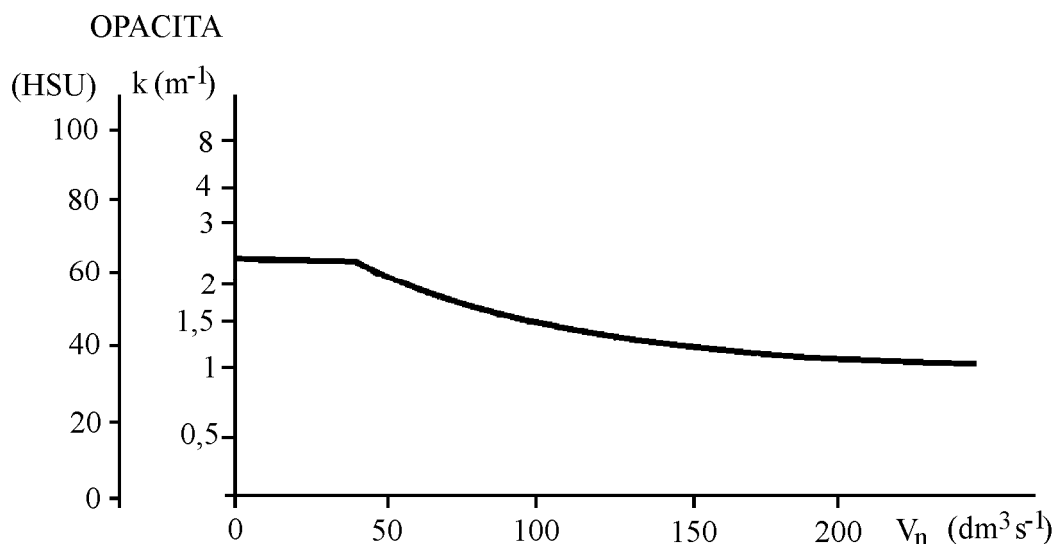


Obr. 9. 16 Závislost hlavních škodlivin na součiniteli přebytku vzduchu

A) Kouřivost vznětových motorů

Při spalování u vznětových motorů dochází k přeměně části uhlíku a kapalných uhlovodíků paliva na pevné částice, tj. saze. Ty potom s plynnými složkami tvoří typický černý kouř. Měření kouřivosti, na rozdíl od měření emisí u zážehových motorů, je snadné.

Kouřivost se nejčastěji udává v lineárních jednotkách HSU (Hartridge Smoke Units), resp. BSU (Bosch Smoke Units) v rozmezí 0 – 100, nebo v absolutních jednotkách součinitele absorpce k (m^{-1}) v rozmezí 0 – ∞ . Pro homologaci motoru se uskutečňuje měření kouřivosti podle předpisu EHK 24 a speciální metodiky (volné akcelerace) s předepsaným opacimetrem (Hartridge Mk 3). Limitní křivka kouřivosti pro tuto zkoušku je uvedena na obr. 9. 17.



Obr. 9. 17 Limitní křivka kouřivosti

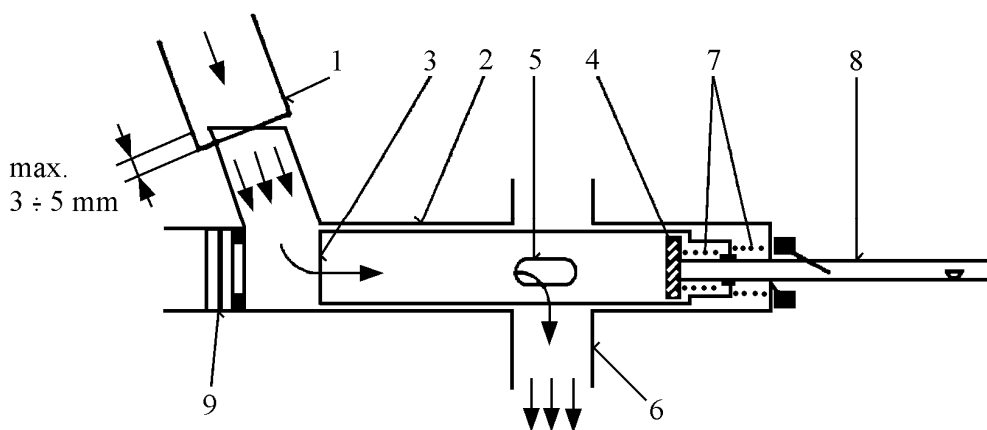
Poznámka: *Vznětový motor pracuje obvykle při velkých přebytečných vzduchu a oproti srovnatelnému zážehovému motoru dosahují emise podstatně nižších hodnot, např. u CO pouze 10 % hodnoty.*

Obecně lze metody měření kouřivosti vznětových motorů rozdělit do čtyř základních skupin:

- posvěcování sloupce výfukových plynů, tato standardní, v současné době používaná metoda využívá pohltivost, tj. absorpci světla po průchodu definovaným sloupcem výfukových plynů.
- vizuální (zrakové) posuzování, které je rychlé, ale nepřesné a málo objektivní; od posuzovatele vyžaduje zkušenost, protože vizuálně porovnává do atmosféry emitovaný kouř s etalony standardní stupnice;
- filtrace výfukových plynů, kdy porovnáváme etalony zbarvení se vzorky získanými zachycením částic kouře na filtračním papíru při projití konstantního objemu výfukových plynů; tato metoda je přesnější než vizuální posuzování, ale nehodí se pro

posuzování kouře, který obsahuje kapalné složky; metoda byla dříve využívána např. u kouřoměru naší výroby NC 112, který je na obr. 9. 18.

- přímé měření hmotnosti pevných a kapalných částí kouře, tato metoda spočívá v určení rozdílu hmotnosti filtru před a po zkoušce (užívá např. firma Caterpillar);



Obr. 9. 18 Filtrační kouřoměr NC 112

Legenda:

1 - *přívod spalin (výfuk)*, 2 - *těleso kouřoměru*, 3 - *posuvný válec*, 4 - *píst*, 5 - *otvor ve válci*, 6 - *výfukové hrdlo*, 7 - *pružiny*, 8 - *pístnice*, 9 - *filtrační papír*.

Při prosvěcování sloupce výfukových plynů poměr zachyceného světelného toku ϕ (lm) k světelnému toku vyslanému ze zdroje světla ϕ_0 nazýváme opacitou. Podle obr. 9. 19 za předpokladu, že stejně malé vrstvy prosvěcovaného kouře dl zeslabí světlo o stejnou poměrnou část, platí

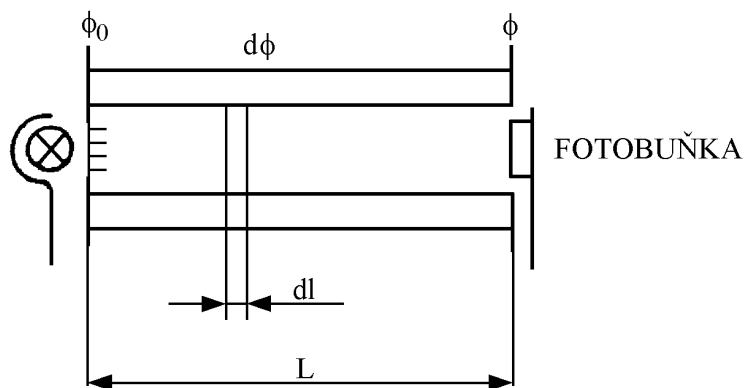
$$-kdl = \frac{d\phi}{\phi} . \quad (9. 32)$$

Součinitel absorpce světla k je funkcí prosvěcovaného prostředí a vlnové délky světla. Celková absorpce v komoře délky L je dána integrálem. Platí vztah

$$\phi = \phi_0 e^{-kL} \quad (9. 33)$$

a z této rovnice vyplývá pro součinitel absorpce vztah

$$k = -\frac{1}{L} \ln \frac{\phi}{\phi_0} . \quad (9. 34)$$



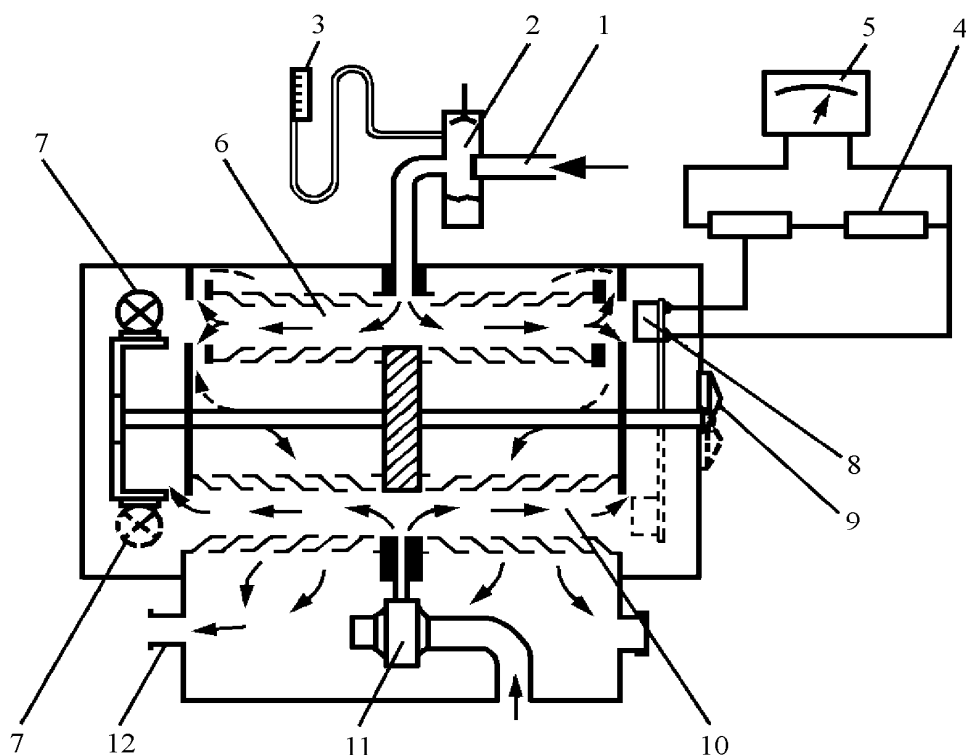
Obr. 9. 19 Ilustrační schéma k určení součinitele absorpce

Vzhledem k tomu, že je výhodné měřit propuštěný tok světla N v % (tedy $\phi = 100 - N$ a $\phi_0 = 100$), můžeme součinitel absorpce k (m^{-1}) určit ze vztahu

$$k = -\frac{1}{L} \ln\left(1 - \frac{N}{100}\right). \quad (9. 35)$$

Součinitel absorpce je logaritmickou funkcí poměru světelného toku, který prošel kouřoměrem a který propustí čistý vzduch. Délka sloupce plynů určuje citlivost opacimetru a musí být přesně stanovená (renomované firmy ji mají patentovanou). Rovněž žárovka musí mít konstantní vlnovou délku. Součinitel absorpce pak vyjadřuje absolutně opacitu jako vlastnost měřeného prostředí – kouře. Pro absolutně černé těleso je nekonečně velký a pro čistý vzduch se rovná nule. Nejrozšířenějším opacimetrem byl přístroj Hartridge, obr. 9. 20. Opacita se odečítá na miliampérmetru připojeném k fotobuňce buď v lineárních jednotkách HSU (0–100) nebo v absolutních jednotkách součinitele absorpce k (m^{-1}). Moderním zařízením pro měření kouřivosti vznětových motorů metodou volné akcelerace, založeném rovněž na měření optické hustoty výfukových plynů, tj. na poklesu intenzity vyzařovaného světla v měřicí komoře zaplněné výfukovými plyny, obsahujícími pevné částice, jsou přístroje firmy Bosch (RTT 100/110). Schéma opacimetru Bosch je na obr. 9. 21. Světlo, vyzařované halogenovou lampou, je vedeno přes optické čočky a křemenná skla k měřicí komoře. Po prosvícení sloupce výfukových plynů dopadne vyzařované světlo na fotoelektrický snímač. Sloupec výfukových plynů absorbuje a rozptyluje část vyzařovaného světla. Zbytek světla dopadající na snímač je změřen a pokles intenzity vyhodnocen ve formě koeficientu absorpce k ($0 - \infty$), v lineárních jednotkách opacity HSU (0 – 100), nebo jako hmotnostní koncentrace

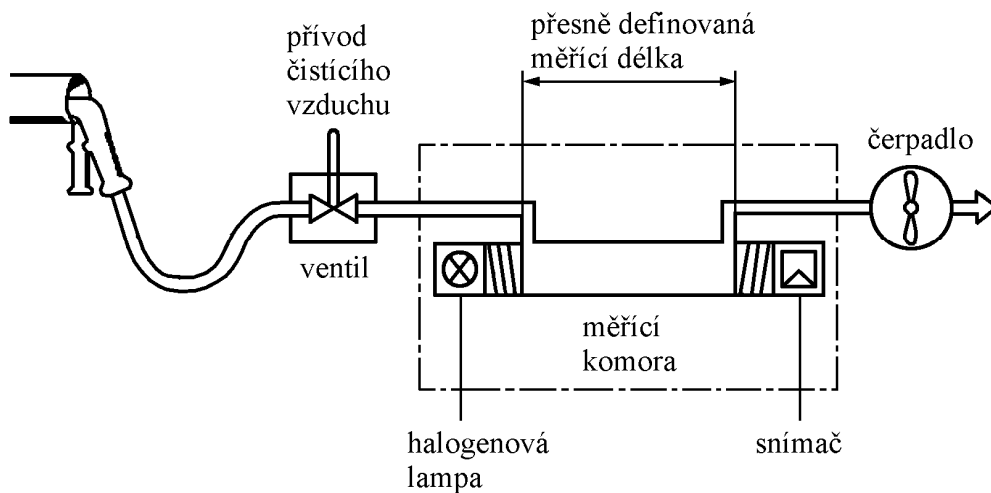
v ($\text{mg}\cdot\text{m}^{-1}$). Vztah koeficientu absorpce k a lineárních jednotek opacitý HSU je uveden v tab. 9. 5.



Obr. 9. 20 Schéma opacimetru Hartridge

Legenda

1 - *přívod výfukových plynů*, 2 - *kondenzační prostor*, 3 - *U-manometr*, 4 - *potenciometr*, 5 - *stupnice kouřivosti*, 6 - *komora spalin*, 7 - *zdroj světla*, 8 - *fotobuňka*, 9 - *přepínač poloh (nastavení nuly nebo měření)*, 10 - *komora s čistým vzduchem*, 11 - *dmychadlo čistého vzduchu*, 12 - *výpustný otvor*.

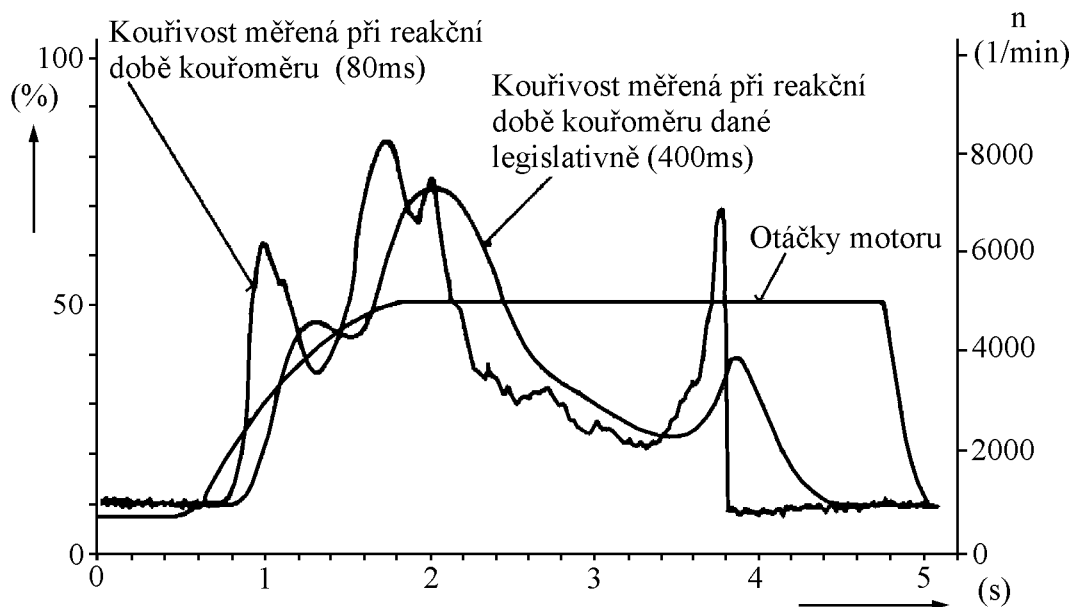


Obr. 9. 21 Schéma opacimetru Bosch

Tab. 9. 5 Porovnání koeficientu absorpce a jednotek HSU

K	0	0,25	0,52	0,83	1,19	1,6,1	2,13	2,80	3,74	5,35	∞
HSU	1	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100

Opacimetr má plně automatizovaný režim měření, v interakci s PC umožňuje komfortní zadávání údajů datovým terminálem aj. Možný grafický výstup umožňující diagnostickou analýzu, je uveden na obr. 9. 22.



Obr. 9. 22 Grafický záznam výsledků kouřoměru Bosch

Dovolená hodnota kouřivosti a její vyhodnocení

Jako vyhovující je hodnoceno vozidlo, u kterého:

- jsou v souladu identifikační znaky s předepsanou dokumentací,
- typové označení vozidla, číslo podvozku a motoru, homologační štítek (udávající mj. součinitel absorpce) jsou v souladu s platným předpisem,
- neporušenost a zajištění proti neoprávněné manipulaci vstříkovačného zařízení,
- nejsou zjištěna poškození těsnosti palivové soustavy, sací a výfukové soustavy, těsnost motoru,
- pravidelnost chodu při volnoběžných a maximálních otáčkách ,
- naměřené hodnoty kouřivosti metodou volné akcelerace nepřevýšily dovolené hodnoty,
- aj.

O výsledku měření vydá pracoviště (STK) provádějící měření kouřivosti protokol, obsahující předepsané údaje a opatří vozidlo kontrolní nálepkou.

Protokol obsahuje následující údaje:

- identifikační o vozidle motoru a zkušebně,
- předepsané a naměřené hodnoty kontrolovaných veličin,
- jednoznačné hodnocení, zda vozidlo vyhovuje, či nikoli,
- datum kontroly, dobu platnosti aj.

Limitních hodnoty kouřivosti pro naftové motory vozidel je uveden v tab. 9. 6..

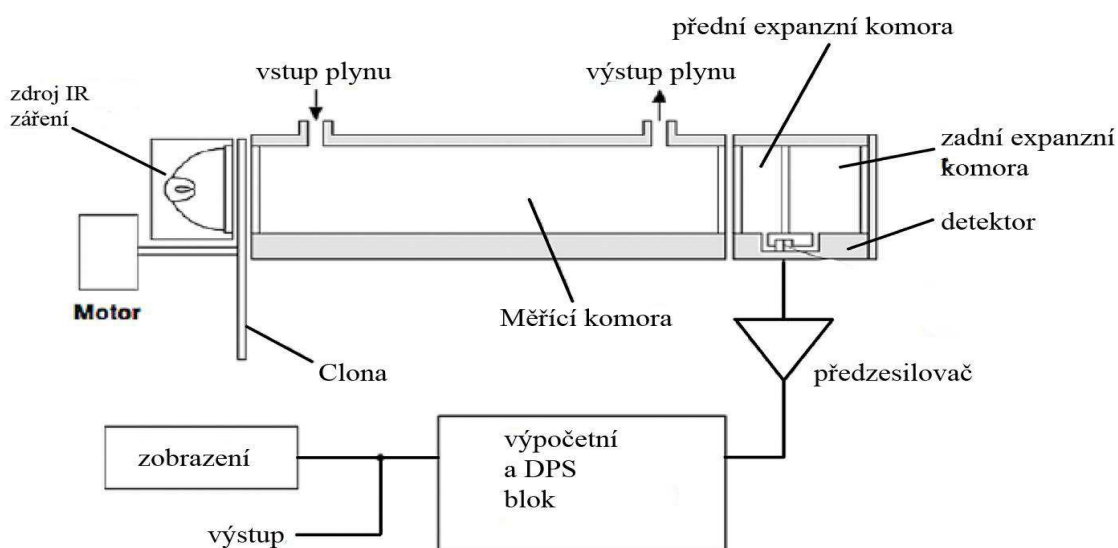
Tab. 9. 6 Limitních hodnoty kouřivosti pro naftové motory vozidel

Typ vozidla	Uvedení do provozu	Limit ČR [m⁻¹]	Limit EU [m⁻¹]
Automobily	před rokem 1980	4	4
Automobily	po roce 1980	2,5 +0,5	2,5
Traktory	po roce 1980	3,5 + 0,5	3,5
Vozidla	po roce 1999	štítkový údaj + 0,5	štítkový údaj

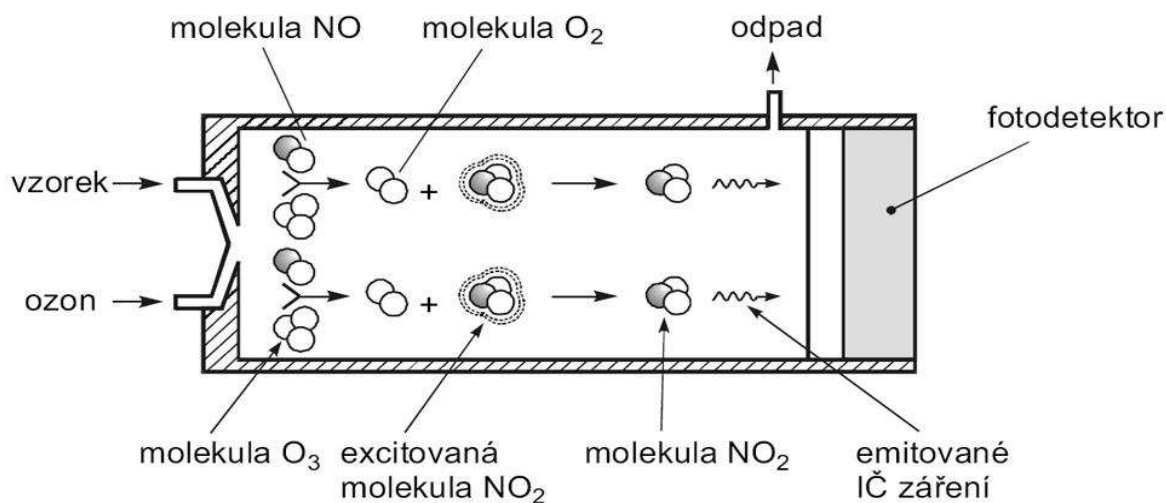
B) Analýza výfukových plynů

Způsoby určování koncentrace oxidů uhlíku (CO, CO₂), oxidů dusíku (NO_x), nespálených uhlovodíků (HC) a kyslíku (O₂) ve výfukových plynech jsou mezinárodně sjednocené (EHK) co do metodiky, kvality, funkčních principů analyzátorů a zásad odběrů

vzorku. Analýza výfukových plynů realizována analyzátory, které pracují na různých fyzikálních nebo fyzikálně chemických principech. Fyzikální princip spočívá v měření některé fyzikální veličiny, jejíž vztah k analyzované látce je přesně definován, je tedy funkcí chemického složení. Nevýhodou je závislost hodnot na tlaku, teplotě, koncentraci doprovázejících složek aj. Obvykle se využívá se vlastností jako je hustota, index lomu, tepelná vodivost, viskozita, absorpce záření, magnetická susceptibilita aj. Fyzikálně chemický princip využívá sledování chemických jevů způsobených chemickou reakcí, kterou měřená složka sama vyvolává, nebo jí podstatně ovlivňuje. Využívá se: reakčního tepla, elektrochemických jevů aj. Schéma analyzátoru, který pracuje na principu pohlcování infračerveného záření je na obr. 9. 23.



Obr. 9. 23 Schéma měřícího zařízení na bázi pohlcování IR záření



Obr. 9. 24 Princip chemiluminiscenčního analyzátoru

V praxi lze nalézt velké množství komerčních analyzátorů výfukových plynů, např. infračervené analyzátory pracující na principu absorpce infračerveného záření, plamenoionizační detektory, chemiluminiscenční analyzátory (obr. 9. 24), plynové chromatografy aj. Hodnoty emisí plynů, které nesmí spalovací motor vozidla překročit, jsou dány legislativně. V různých režimech běhu motoru (jízdy vozidla) existuje různé složení i objem výfukových plynů. Proto je potřebné, aby při analýze výfukových plynů absolvovalo vozidlo určitý komplex jízdních režimů, tzv. jízdní cyklus, který je charakteristický pro jeho provoz. Výsledek analýzy výfukových plynů se přepočítává na celkově emitované množství jednotlivých škodlivin, kdy jednotkami byly (g/test), (g/km), (obj. %), (g/kWh), resp. v současné době jsou (g/km) a (m^{-1}). Kromě předepsaného jízdního cyklu, který platí pro homologaci vozidla, je zvlášť, při analýze výfukových plynů dané legislativně, posuzována produkce CO, resp. další parametry, např.:

a) pro benzínové motory bez řízeného katalyzátoru:

- CO ve volnoběhu (max. 3,5 obj. %),
- úhel sepnutí kontaktů přerušovače a základního předstihu zážehu,
- volnoběžné otáčky aj.

b) pro benzínové motory s řízeným katalyzátorem:

- CO ve volnoběhu (max. 0,5 obj. %) a při zvýšených otáčkách (max. 0,3 obj. %),
- součinitel přebytku vzduchu ($\lambda=1 + 0,25$).

V tab. 9. 7a (vznětové motory) a 9. 7b (zážehové motory) je uveden vývoj limitů škodlivin a platné limity pro motory osobních automobilů platné v době zpracování studijních opor.

Tab. 9. 7a Limity emisí vznětových motorů osobních automobilů

Předpis	Rok zavedení	Limity emisí škodlivin v (g/km)			
		CO	HC + NO _x	NO _x	Částice PE
EURO 1	1992	2,72	0,97	–	0,14
EURO 2	1996	1,0	0,70	–	0,08
EURO 3	2000	0,64	0,56	0,50	0,05
EURO 4	2005	0,50	0,30	0,25	0,025
EURO 5	2009	0,50	0,23	0,18	0,005
EURO 6	2014	0,50	0,17	0,08	0,005

Tab. 9. 7b Limity emisí zážehových motorů osobních automobilů

Předpis	Rok zavedení	Limity emisí škodlivin v (g/km)			
		CO	HC	NO _x	HC + NO _x
EURO 1	1992	2,72	–	–	0,97
EURO 2	1996	2,20	–	–	0,50
EURO 3	2000	1,30	0,20	0,15	–
EURO 4	2005	1,00	0,10	0,08	–
EURO 5	2009	1,00	0,075	0,06	–

9. 5. Teplota výfukových plynů

Teplota výfukových plynů spalovacího motoru dává důležitou informaci o práci a technickém stavu motoru. Během pracovního cyklu kolísá v rozmezí 300 – 400 °C při sání a kompresi, a 500 – 800 °C při výfuku. Teplotu výfukových plynů ovlivňuje velké množství parametrů, např. množství paliva dodaného do válce, druh paliva (výhřevnost, měrná hmotnost aj.), předvstřík (předstih zážehu), časování ventilů, stav palivové soustavy, otáčky motoru, opotřebení pístu a válce, zanesení čističe vzduchu aj. Má-li teplota výfukových plynů charakterizovat činnost a technický stav spalovacího motoru, musí být měřena u každého válce zvlášť. Pro měření teploty výfukových plynů, které jsou rychle se měnícím a pohybujícím prostředím, se využívají přístroje založené na změně fyzikálních vlastností hmoty s teplotou. Jedná se o teploměry:

- dilatační, využívající tepelné dilatace látek pevných, kapalných nebo plyných,
- odporové, kdy teplotu určujeme z elektrického odporu vodiče při měřené teplotě,
- termočlánky, které určují teplotu z termoelektromotorické síly ve spojení dvou vodičů z různých materiálů,
- běžné, založené na principech: optických, magnetických, tavných, popř. teplocitlivé nátěry aj.

Při měření teplot u spalovacích motorů vznikají potíže. Plynou z vysokých teplot, teplotních gradientů, rychlých změn v čase, agresivity výfukových plynů aj.

9. 6 Vibrace a hluk

Vibracemi rozumíme kmitavý pohyb těles nebo mechanického kontinua. Hluk pak souvisí s přeměnou mechanické energie kmitajících soustav v energii akustickou. Vibrace a hluk spolu úzce souvisejí, kmitající soustavy jsou příčinou sekundárně vznikajícího hluku.

Pro kmity a následné vlnění ve spalovacím motoru, související se vznikem sluchového vjemu, bývá používán termín chvění. Příčinou vibrací spalovacího motoru jsou střídavé síly (rázy), vznikající v důsledku vůlí a nepřesností při rotačních pohybech mechanismů, při přeměně tepelné energie v energii mechanickou (změny tlaku ve válci aj.), vůle ventilů, vůle ložisek, činnost ventilátoru a dalších rotačních částí, a dále v důsledku působení setrvačných sil posuvných hmot, nerovnoměrného kroutícího momentu (torzní kmity), krouživého pohybu rotačních ústrojí aj. Jako účinek každého rázu se šíří motorem (mechanickou soustavou) vlna mechanického napětí (tlaková vlna). Je zřejmé, že vibrace a hluk jsou důležitým ukazatelem technického stavu spalovacího motoru. Emitované signály pak mají velký význam z hlediska možného využití jako diagnostické veličiny.

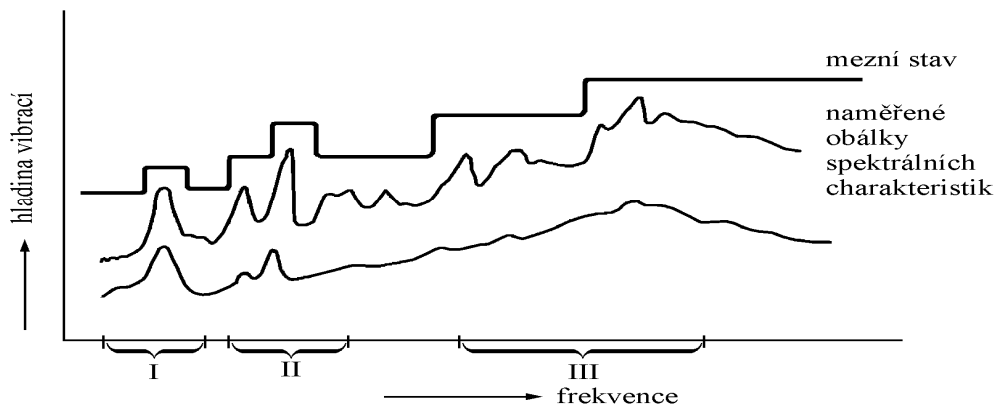
Diagnostické metody pro hodnocení technického stavu spalovacího motoru s využitím vibrací a hluku lze rozčlenit na dvě základní skupiny:

- a) Diagnostické metody pro snímání a analýzu vibrací;
- b) Diagnostické metody pro zjišťování průběhu emitovaného ultrazvukového vlnění, resp. subjektivního posouzení akustických kmitů.

a) Snímání a analýza vibrací

Snímání a analýza vibrací spalovacího motoru se opírá o výsledky měření charakteristických parametrů vibrací, tj. výchylka (amplituda), rychlost a zrychlení (frekvence). Možným způsobem detekce poruchového stavu je srovnání celkové úrovně vibrací se standardními, předem zvolenými kritérii, viz obr. 9. 19. Nevýhoda této metody spočívá v tom, že nemůže podchytit počínající poruchy, které budí signály, jejichž doba trvání je velmi krátká, a proto se neprojeví na vzrůstu celkové úrovně vibrací. Rovněž celková hladina vibrací neposkytuje informaci o lokalizaci poruchy. Nedostatky měření výchylek, rychlosti a zrychlení odstraňuje metoda spektrální analýzy, což je rozklad složitého průběhu signálů na jeho základní složky podle Fourierovy transformace, tj. každý periodický průběh může být nahrazen stejnosměrnou složkou a řadou sinusových funkcí. Takto získáme amplitudovou spektrální charakteristiku a fázovou charakteristiku. Při spektrální analýze mechanických soustav s rotačními částmi (motory, převodovky, ventilátory aj.) má zvláštní

význam výkonové spektrum logaritmického výkonového spektra tzv. kepstrum, podrobnosti v kap. 6. 2. Velké uplatnění při hodnocení technického stavu spalovacích motorů má využití tzv. obálek spektrální charakteristiky. Průběh obálky, naměřený na sledovaném motoru, je porovnán se vzorovým průběhem, odpovídajícím dobrému technickému stavu. Přitom průběh vzorové obálky spektrální charakteristiky získáme měřením v provozních podmínkách. Příklad průběhu spektrální charakteristiky je na obr. 9. 25.



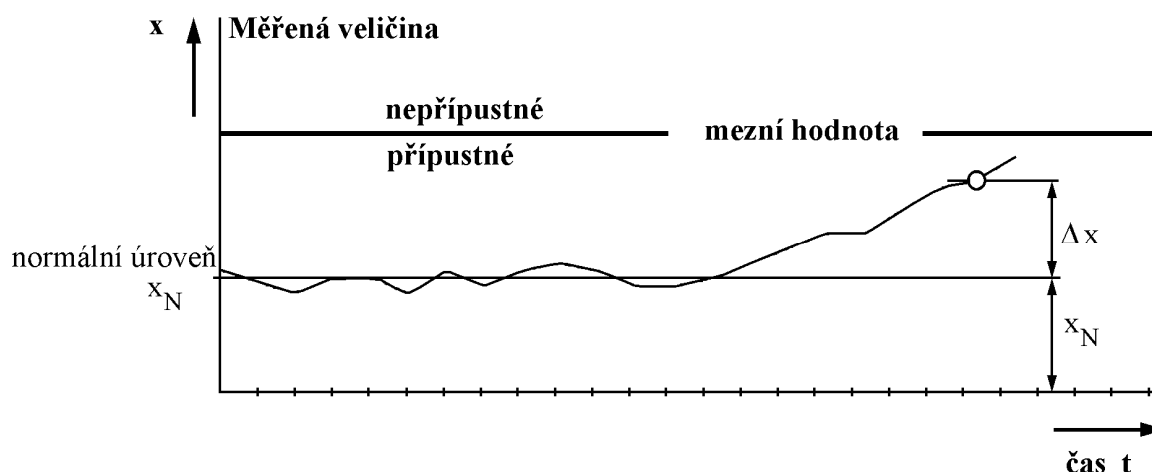
Obr. 9. 25 Obálka spektrálních charakteristik motoru

Legenda: I - oblast frekvence odpovídající otáčkám a udávající nevyváženost,
 II - vibrace indikující stav detailů motoru a nesouosost,
 III - oblast vyšších frekvencí nesoucí informace o stavu valivých ložisek.

Klasickým příkladem uplatnění metody spektrální analýzy jsou valivá ložiska motoru. Lokální poškození ložiska se projeví jednak na frekvencích, které odpovídají rychlosti otáčení hřídele, na němž je ložisko zabudováno, ale také na vyšších frekvencích, souvisejících s vlastními rezonančními frekvencemi určitých částí ložiska. Spektrální i kepstrální analýza, i když velmi účinná, není univerzálně využitelná. Často se osvědčuje v diagnostice spalovacích motorů sledování časových průběhů akustických signálů, které zahrnuje hodnocení:

- základního rozložení signálu v průběhu pracovního cyklu,
- polohy periodicky se opakujících signálů, např. vzhledem k poloze klikového hřídele,
- výskytu opakujících se signálů nesouvisejících s činností motoru a jeho poruchovým stavem,
- velikosti maximální amplitudy signálů a jejich útlum aj.

Poruchové stavy se potom opět identifikují na základě porovnání se vzorovými průběhy (etalony) dobrého stavu, viz obr. 9. 26, popř. typických poruchových stavů, simulovaných v přesně definovaných podmínkách.



Obr. 9. 26 Posuzování stavu motoru podle časové změny hodnot

Vybrané výsledky z provozní diagnostiky spalovacího motoru, resp. dalších skupin automobilu, které umožňují identifikovat pravděpodobné příčiny kmitání na základě charakteristického kmitočtu, jsou přehledně uvedeny v tab. 9. 8.

Tab. 9. 8 Charakteristické frekvence vibrací při poruchách součástí

Příčina kmitání	Frekvence vibrací (kmitočty)							
	0 - 40% f hřídele	40 - 50% f hřídele	50 - 100% f hřídele	f hřídele	Dvojnásobek f hřídele	Celočíselný násobek f hřídele	Různé kmitočty	Velmi vysoké kmitočty
Různé nevyvážky				●	○	○		
Nesouosost hřídele				●	●	○		
Deformace klik. Skříně	○	○	○	●	○			
Vadné valivé ložisko				○			●	○
Vadné axiální ložisko	●	●	●	●	●			
Rezonance klik. Skříně	●	●	●	●	●	●	●	●
Kritické otáčky				●				
Víření a pění oleje	●							
Víry vlivem tření	●	○	○					
Porucha převodovky						○	○	●
Porucha spojky		○		○	○	●		

Legenda: ● ... charakteristické frekvence vibrací,

- ... další možné kmitočty.

b) Zjišťování průběhu emitovaného ultrazvukového vlnění a subjektivní posouzení akustických kmitů

Mechanický ráz vyvolá vlnu mechanického napětí, která se šíří od místa vzniku radiálně do okolí. Její tvar je určen rychlostí rázu a rychlostí šíření zvuku v materiálu (tento stav však platí pouze velmi krátkou dobu - 1 μ s). Amplituda počáteční vlny nezávisí na hmotnosti tělesa ani na jeho geometrických rozměrech, a proto je důležitou diagnostickou veličinou, související s poruchovým stavem objektu. Snímání čela tlakové vlny lze realizovat dvěma způsoby:

- 1) Přímé měření čela vlny v celém frekvenčním rozsahu;
- 2) Nepřímé snímání tlakové vlny prostřednictvím rezonanční frekvence snímače.

ad 1) Metoda snímání tlakové vlny a ultrazvukového vlnění, byla vyvinuta na FEL ČVUT Praha, přístroj nese název DIAGNOST a je tvořen piezoelektrickým snímačem (měničem), který pracuje lineárně v rozsahu 100 kHz - 1 MHz, vlnovodem, vstupní sondou, směšovačem, oscilátorem, děličem, mezifrekvenčním zesilovačem a detektorem, nízkofrekvenčním zesilovačem, voltmetrem a výstupy na osciloskop, popř. měřící magnetofon. Uvedená metoda je využívána pro diagnostiku vstřikovacích čerpadel, kde snímá ultrazvukové vlnění vyvolané hydraulickým rázem na počátku a konci výtlaku paliva. Z analýzy časového průběhu signálu, který je doplněn údajem o úhlu natočení klikového hřídele, lze spolehlivě zjistit počátek dodávky paliva, velikost dodávky a technický stav vstřikovacího čerpadla. Počátek dodávky, daný signálem, vyvolaným hydraulickým rázem při výtlaku paliva před horní úvratí pístu měřeného válce, je indikován např. přímo ve stupních natočení klikového hřídele. Velikost dodávky paliva je úměrná úhlové vzdálenosti signálů, odpovídajících počátku a konci výtlaku paliva, vyvolaných hydraulickými rázy, a je indikována opět ve stupních natočení klikového hřídele. Experimentálně je ověřeno, že vzdálenost těchto signálů je přímo úměrná množství paliva dodávaného vstřikovacím čerpadlem. Jsou-li mezi signály, vyvolanými hydraulickými rázy ještě další výrazné signály, znamená to poruchu např. výtlačného ventilu nebo pohonu vstřikovacího čerpadla aj. Příklad záznamu emitovaných signálů je znázorněn na obr. 9. 27.



Obr. 9. 27 Průběh emitovaných ultrazvukových signálů vstřikovacího čerpadla

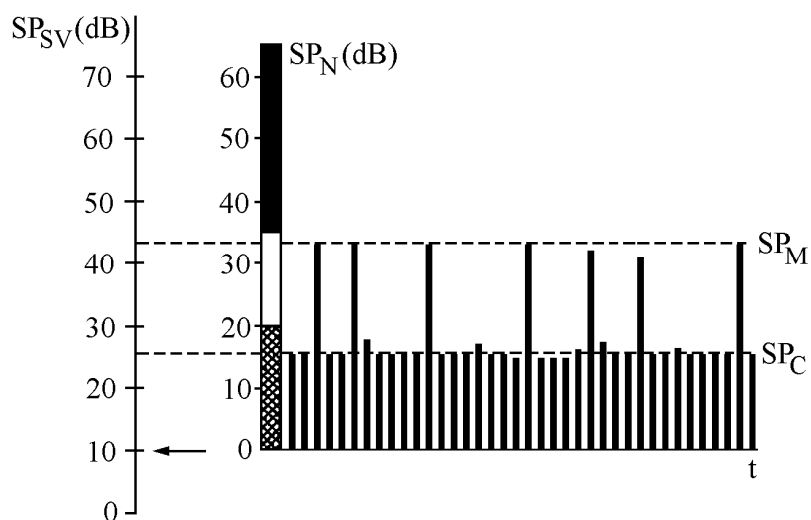
ad. 2) Nepřímé snímání tlakové vlny, princip spočívá v měření a posuzování rázových pulsů SPM (Schock Pulse Method) - krátkodobých tlakových vln, které vznikají mechanickými rázy v soustavách, např. ve valivých ložiscích motoru a převodů. Tyto mechanické rázy se přenáší na další těleso (např. ložiskové těleso) a my měříme nepřímo rychlost rázu, tj. rozdíl rychlosti těles při srážce. Z místa dotyku se okamžitě šíří mechanická tlaková vlna (rázový impuls). Špičková hodnota rázového impulsu závisí na rychlosti impulsu, avšak nezávisí na hmotnosti a stavu těles. Praktická měření ukazují, že existuje jednoduchý vztah mezi technickým stavem soustavy a hodnotou rázového impulsu. Normální technický stav vyvolává sled relativně malých rázových impulsů, které vytvářejí tzv. prahovou hodnotu kmitání SPc. Poškození a počínající porucha vyvolá ojedinělé rázové impulsy v nepravidelných intervalech. Největší hodnota rázového impulsu, zjištěná u soustavy, se nazývá maximální rázový impuls SP_M a podle této hodnoty posuzujeme technický stav soustavy (ložiska aj.).

Příklad posuzování rázových pulsů u spalovacího motoru je na obr. 9. 28. Z důvodů zjednodušení metodiky vyhodnocení technického stavu je výhodné využít logaritmické stupnice a velikost rázu na této stupnici označme SP_{SV} , tato hodnota je základní jednotkou pro měření rázových pulsů. Např. měřením na spalovacím motoru byla získána hodnota $SP_{SV} = 43$ dB, ale tato hodnota nepostačuje k posouzení technického stavu. Je potřebné mít k dispozici základ umožňující porovnání různých technických stavů tzv. normalizovanou hodnotu SP_N . Tuto hodnotu získáme ze vztahu

$$SP_N = SP_{SV} - SP_i, \quad (9. 35)$$

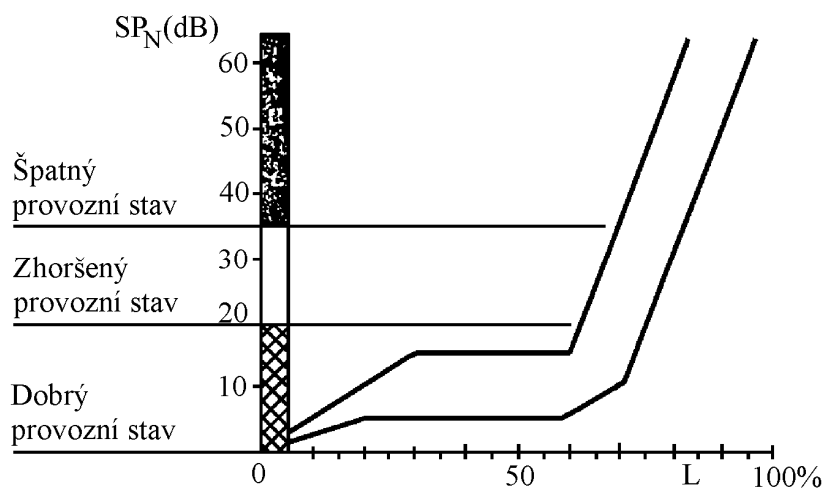
kde SP_i ... počáteční hodnota.

Počáteční hodnota je úměrná otáčkám a průměru příslušného hřídele. Pro náš příklad $SP_i = 10$ dB a $SP_N = 33$ dB.



Obr. 9. 28 Hodnoty rázových pulsů spalovacího motoru

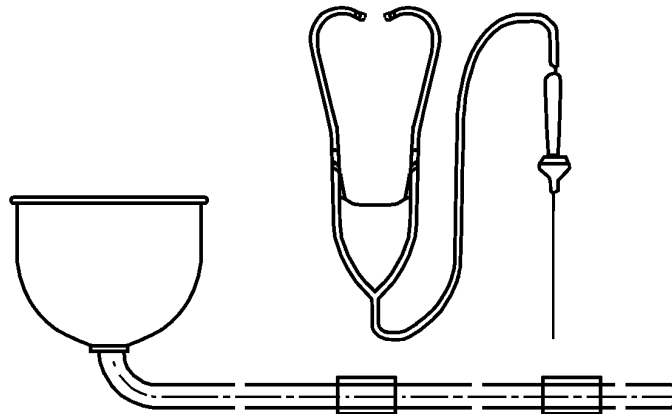
Možný vývoj technického stavu v průběhu provozu a jeho vztah k velikosti rázových pulsů, je znázorněn na obr. 9. 29.



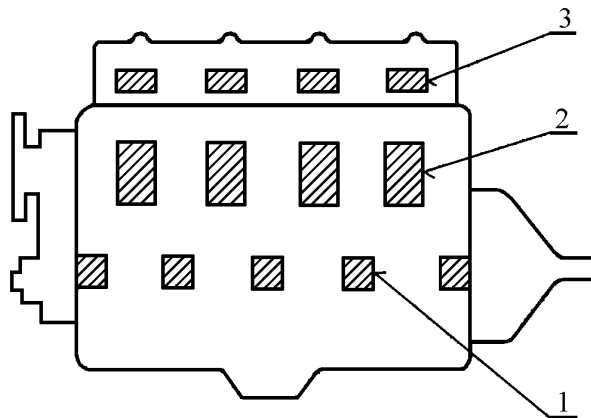
Obr. 9. 29 Vývoj technického stavu valivých ložisek spalovacího motoru během provozu

Subjektivní posouzení akustických kmitů

V rozsahu slyšitelné frekvence (20Hz - 20kHz) lze akustické kmity, vybuzené činností opotřebovaných mechanismů, snímat a využít k subjektivní diagnóze buď přímo, nebo pomocí stetoskopu, viz obr. 5. 30. Na obr. 5. 31 jsou znázorněna místa, kde se na spalovací motor přikládá hrot stetoskopu.



Obr. 9. 30 Provedení technických stetoskopů



Obr. 9. 31 Místa odposlouchávání akustických kmitů motoru

Legenda: 1 ... hlavní a ojnicní ložiska klikového hřídele, rozvodový mechanismus,
2 ... písty, pístní čep a pístní kroužky, 3 ... ventily.

Jednotlivé poruchy se mohou projevovat následujícím způsobem:

- velká vůle hlavních ložisek klikového hřídele způsobuje nevýrazné kovové údery v oblasti 1, zvuky jsou dobře slyšitelné při zvýšeném zatížení motoru, popř. při nízkých otáčkách, kdy již motor pracuje nepravidelně;
- velká vůle ojnicních ložisek klikového hřídele se projevuje méně intenzivními údery než v předchozím případě, nejlépe jsou slyšet při malém zatížení a při náhlém vzrůstu otáček při chodu naprázdno; postupné vyřazování válců z činnosti (uvolnění vysokotlakového potrubí paliva nebo odpojení svíčky) umožňuje rozpoznat, které ložisko je poškozeno;

- velké opotřebenění (vůle) pístu je stetoskopem obtížně zjistitelné, bývá slyšet jako hluché vibrující klepání, vyznačující se nerovnoměrností - obvykle je slyšet několik úderů, pak nastává normální činnost a opět několik úderů atd. Přesně můžeme velkou vůli pístu identifikovat, nalijeme-li do válce malé množství viskózního oleje, ručně protočíme klikový hřídel a potom spustíme motor - zmizí-li výše uvedené akustické projevy, jedná se o velkou vůli pístu;
- velká vůle v uložení pístního čepu se projevuje zvonivým kovovým zvukem při chodu motoru naprázdno, zvuk připomíná údery malého kladívka na kovadlinu - při zvyšování otáček se zvuk zvýrazní;
- velká vůle zdvihátka ventilu v pouzdře se projevuje jako lehké kovové klepání s poloviční frekvencí ve srovnání s ostatními zvuky, zvláště slyšitelné v nízkých otáčkách; klepání podobného charakteru může být též způsobeno velkou vůlí mezi ventilovou tyčkou a vahadlem, v tomto případě zvuky zmizí po správném seřízení vůle ventilů;
- detonační hoření a samozápaly u zážehových motorů se projevují zvonivým kovovým zvukem, který zmizí při použití benzínu s vyšším oktanovým číslem, obohacením směsi, resp. ochlazením motoru.

9.7 Koncentrace produktů opotřebenění v motorovém oleji

Významné místo v diagnostice vozidlových spalovacích motorů, které považujeme za uzavřené mechanické soustavy založené na činnosti třecích prvků mazaných olejem, zauímají metody, které využívají degradace fyzikálně chemických vlastností maziva a dále produktů opotřebenění třecích prvků. Mazací olej je nositelem vícerozměrných diagnostických informací o technickém stavu motoru, převládajícím režimu opotřebenění a umožňuje rovněž prognózu mezního opotřebenění, popř. havarijního stavu. Tyto informace se vyskytují periodicky v závislosti na technickém stavu motoru, počtu ujetých km, výměnné lhůtě oleje, jeho doplňování aj. Z funkčního hlediska působí olej nejčastěji jako mazivo, nebo jako prvek přenosu energie, popř. má funkci chladící, těsnící, čistící, chrání proti korozi, odplavuje nečistoty aj. Změna kvality oleje během provozu se projevuje zejména v obsahu nečistot, jedná se zejména o:

- měkké nečistoty, tvořené převážně ropnými pryskyřicemi a tzv. studenými kaly, obsahujícími produkty oxidace oleje a paliva ve formě velmi jemné suspenze; pro měkké nečistoty je charakteristické, že jsou organického původu a jsou rozpustné v benzenu;

- tvrdé nečistoty, tvořené převážně kovovým otěrem z třecích ploch motoru (Fe, Al, Cu, Sn, Pb aj.), prachovými částicemi křemíkové povahy a tvrdým karbonem; tvrdé nečistoty jsou anorganického původu a v benzenu nejsou rozpustné;
- voda, popřípadě chladicí kapalina, která se dostává do oleje netěsnostmi chladicí soustavy, špatně těsnícím těsněním pod hlavou válce, kondenzací aj.;
- palivo, nafta nebo benzín, které se dostávají do oleje následkem nedokonalého spalování, popř. netěsnostmi v palivové soustavě (vstřikovač, přepadové potrubí aj.);

Motorový olej znehodnocují především otěrové kovy, měkké nečistoty, palivo a voda.

Měkké nečistoty jsou přirozeným produktem stárnutí oleje, přítomnost vody a paliva svědčí o nesprávné funkci motoru. Výsledkem znehodnocení oleje je ztráta mazací schopnosti, zvýšené tření, opotřebení a koroze.

Tvrdé nečistoty jsou zachycovány v čističích (o rozměrech nad 10 μm), pokud se dostanou do mazacího systému, způsobují abrazivní opotřebení.

Významnou příčinou znehodnocení oleje je jeho ředění zbytky nedokonale spáleného paliva, které se usazují na stěnách válců a pístní kroužky je stírají do olejové vany motoru. Tím klesá viskozita a mazací schopnost oleje.

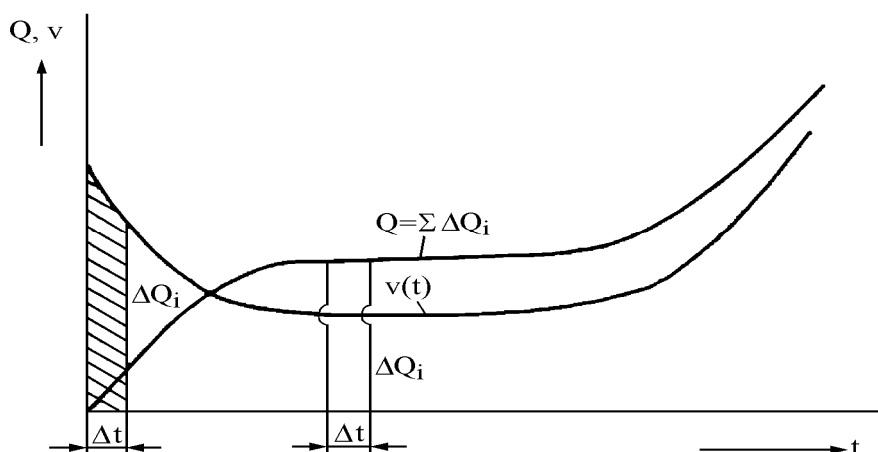
Obecně můžeme konstatovat, že se zplodiny opotřebení motoru dostávají do oleje, jsou jím unášeny a částečně absorbovány v čističích (až 70 % kovových nečistot) a na nefunkčních plochách, popř. odchází se spalinami do výfuku. Usazeniny na nefunkčních plochách bývají zanedbatelné - obvykle se k jejich soustředění využívají magnetické zátky. Při standardní kvalitě čističů a jejich správné údržbě můžeme množství kovových zplodin v oleji považovat za vhodný diagnostický signál, charakterizující vždy opotřebení určité třecí plochy. U každého konkrétního motoru je potřebné zvolit vhodný prvek, popř. prvky, jejíž obsah v opotřebeném oleji jednoznačně vyjadřuje opotřebení příslušné části motoru. Velmi často se takové prvky hledají obtížně, protože obvykle více částí motoru mívá stejné nebo podobné materiálové složení. Např. hliník je obsažen nejen v pístech, ale také v ložiskových pánvích, železo je nejen součástí klikového hřídele, ale též vložek válců aj. Proto nelze přesně rozlišit a lokalizovat opotřebení stejných částí téhož mechanismu, např. opotřebení jednotlivých ložisek klikového hřídele aj. Dalším problémem je stanovení jednoznačné vazby mezi naměřeným obsahem otěrových kovů v oleji a velikosti opotřebení. Obecně lze provést vyhodnocení buď podle kumulativního, nebo okamžitého obsahu otěrových kovů.

Předpokládejme typickou (vanovou) křivku rychlosti opotřebení $v(t)$ v závislosti na době provozu t , jak je uvedena na obr. 9. 32.

V pravidelných intervalech Δt se provádí analýza zplodin otěru v oleji a vždy se stanoví přírůstek Q_i sledovaného prvku. Problém lze zjednodušit tak, že měříme opotřeбенý olej vždy při jeho výměně a jeho přírůstek Q_i je tedy roven absolutnímu obsahu prvku v oleji (při uvážení korekce na vliv čističe a opal oleje). Diagnostickým signálem pak může být kumulativní obsah sledovaného kovu daný vztahem

$$Q = \sum_i \Delta Q_i, \quad (9. 36)$$

který je za uvedených okolností úměrný celkovému úbytku kovu z příslušné třecí plochy, tj. absolutní velikosti opotřebení. Přepočet kumulativního obsahu Q sledovaného kovu na délkovou míru (tloušťku vrstvy) opotřebení je již jednoduchou početní záležitostí, vycházející z konkrétních konstrukčních podmínek motoru.



Obr. 9. 32 Závislost opotřebení a nárůstu produktů opotřebení na době provozu motoru

Uvedené kumulativní hodnocení technického stavu je relativně přesné, ale vyžaduje systematické sledování motoru od začátku provozu a archivaci diagnostikovaných údajů. Poněkud jednodušší je vyhodnocení okamžité, kdy se jako diagnostický signál použije přírůstek ΔQ_i sledovaného kovu za dobu provozu Δt . Přitom vycházíme ze známé empiricky ověřené skutečnosti, že rychlost opotřebení $v(t)$ je na počátku provozu vyšší, potom se ustálí na kvazikonstantní hodnotě a ke konci technického života rychle vzrůstá. Náhlý vzrůst hodnot ΔQ_i je signálem zvýšeného režimu opotřebení motoru. Nedostatkem této metodiky je skutečnost, že hodnoty ΔQ_i zůstávají poměrně velkou dobu provozu konstantní. Na konci normální doby provozu však lze provést správnou diagnózu.

Příklad vyhodnocení obsahu kovu v opotřebeném oleji

Úkolem byla diagnóza poruch klikového hřídele a jeho ložisek. Ložiskovým kovem je zde ocel čepů a slitina povrchové vrstvy pánví. Za diagnostický signál zvolíme obsah významného prvku tvořícího slitinu pánve, tj. měď pro olovnaté bronzy. Kompromisním řešením je sledování obsahu železa, popř. legujících prvků z klikového hřídele, které nejsou obsaženy v materiálu vložek válců (chróm, nikl a molybden). Velmi často jsou stejné legující prvky obsaženy v materiálu klikového hřídele i materiálu vložek válců. Pak použijeme metodu, kdy při řešení vycházíme z následujících údajů, ať:

- a ... daný poměr obsahu sledovaného legujícího prvku k obsahu železa v klikovém hřídeli,
- b ... daný poměr obsahu sledovaného legujícího prvku k obsahu železa ve vložkách válce,
- Q_{Fe} ... naměřený obsah železa v oleji,
- Q_L ... naměřený obsah legujícího prvku v oleji,
- S ... hledaný obsah železa v oleji pocházející z klikového hřídele.

Úvahou stanovíme rovnici

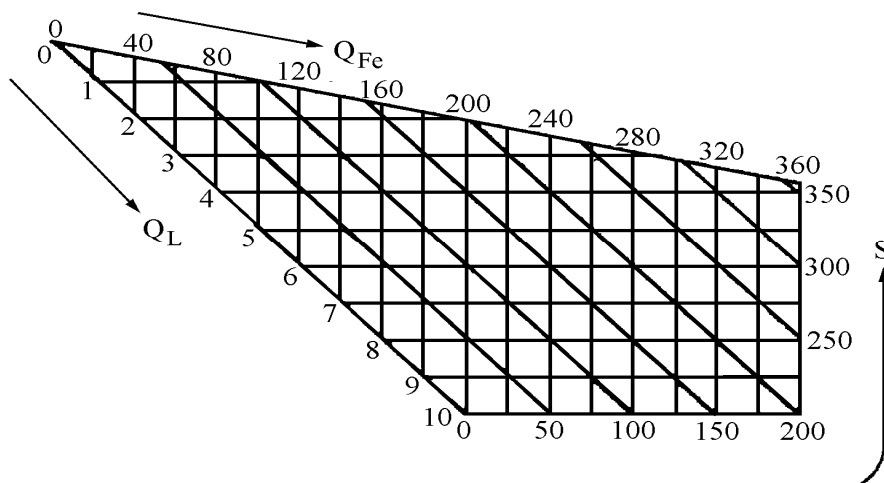
$$aS + b(Q_{Fe} - S) = Q_L, \quad (9.37)$$

- kde aS ... obsah legujícího prvku pocházejícího z klikového hřídele,
- $b(Q_{Fe} - S)$... obsah legujícího prvku v oleji pocházejícího z vložek válců,
- $(Q_{Fe} - S)$... obsah železa v oleji pocházejícího z vložek válců.

Řešením rovnice dostáváme výsledný vztah pro hledaný diagnostický parametr S

$$S = \frac{Q_L - bQ_{Fe}}{a - b}. \quad (9.38)$$

Z výsledného vztahu vyplývá, že přesnost S klesá s poklesem difference $a - b$. V krajním případě, kdy procentuální obsah sledovaného legujícího prvku v klikovém hřídeli a ve vložkách válců je stejný ($a = b$), vyhovuje vztahu libovolná hodnota S a případ je neřešitelný. Na obr. 9. 33 je výsledný vztah znázorněn ve formě nomogramu, umožňujícího stanovit původ železa v opotřebeném oleji. Přibližný obsah sledovaného legujícího prvku v klikovém hřídeli je 1 %, tj. $a = 0,01$ a ve vložkách válců 5 % tj. $b = 0,05$.



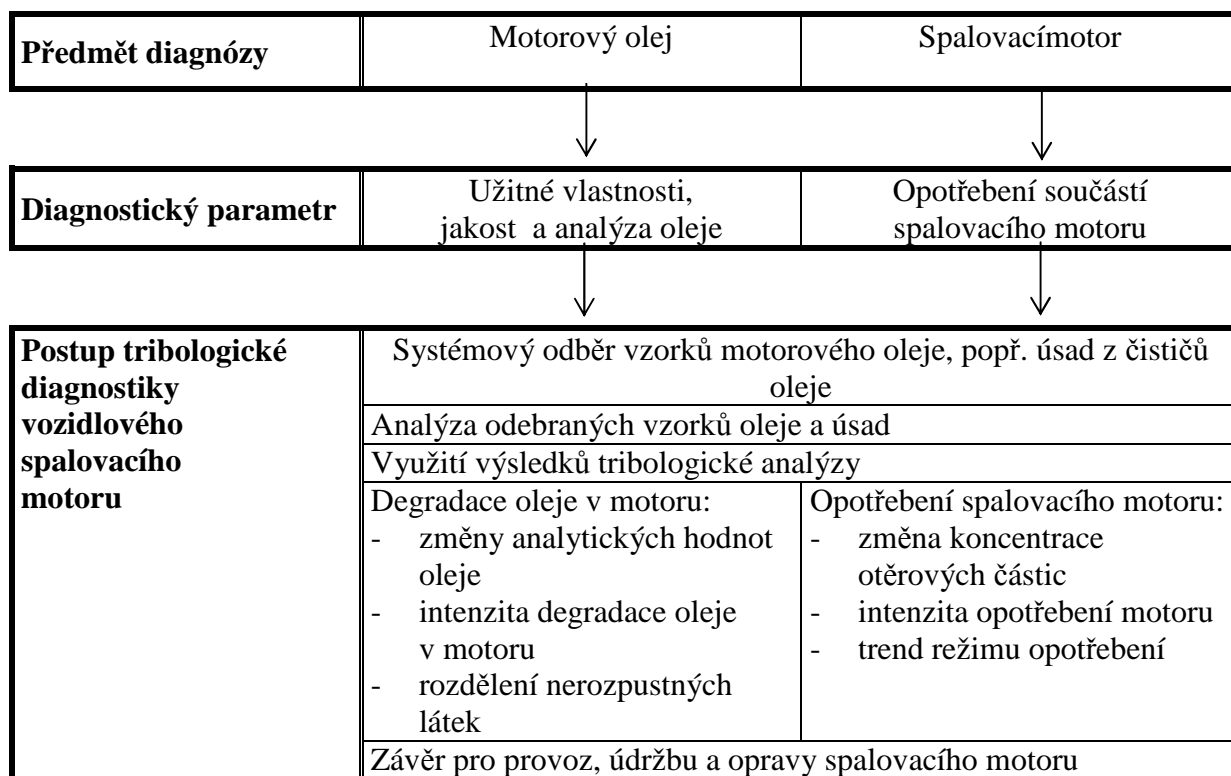
Obr. 9. 33 Nomogram pro určení původu železa v oleji

Obsah legujícího prvku v oleji Q_L a celkový obsah železa v oleji Q_{Fe} lze chápat jako dílčí parametry hledaného obsahu železa z klikového hřídele v oleji S . Obsah kovových příměsí v oleji se pohybuje v závislosti na době provozu a režimu opotřebení v rozmezí jednotek až stovek miliontin hmotnostního podílů (jedna miliontina hmotnostního podílu se označuje zkratkou ppm). Bude-li v našem případě zjištěn obsah legujícího prvku $Q_L = 5$ ppm a celkový obsah železa v oleji $Q_{Fe} = 180$ ppm, připadá z toho příslušná část $S = 100$ ppm na obsah železa pocházejícího z klikového hřídele.

V krajním případě, kdy $Q_L = 2$ ppm a $Q_{Fe} = 200$ ppm, je rovněž $S = 200$ ppm, což znamená, že veškeré železo v oleji pochází z klikového hřídele. Situace, která se blíží tomuto krajnímu stavu, svědčí o havarijním průběhu opotřebení klikového hřídele. Obdobná je situace, kdy $Q_L = 6$ ppm, $Q_{Fe} = 120$ ppm a $S = 0$, což znamená havarijní průběh opotřebení vložky válců.

Tribodiagnostika spalovacího motoru musí, kromě komplexnosti, splňovat podmínku racionálního výběru potřebných metod, jejich jednoduchosti, rychlosti, ekonomičnosti, jednoznačné odpovědi na technický stav (režim opotřebení) a další využitelnost motorového oleje. Možný systém tribodiagnostiky spalovacího motoru je znázorněn v tab. 9. 9.

Tab. 9. 9 Systém tribodiagnostiky spalovacího motoru



Z různých hledisek lze metody tribotechnické diagnostiky, využitelné pro zjištění technického stavu vozidlového spalovacího motoru, rozčlenit následovně:

- a) Jednoduché (expresní) metody a zkoušky;
- b) Standardní (normované) metody a zkoušky;
- c) Speciální tribodiagnostické metody a zkoušky;

Z hlediska podstaty a fyzikálně chemických principů lze metody tribotechnické diagnostiky motorů členit na:

- 1) Metody stanovení koncentrace otěrových kovů:
 - metody spektrální analýzy (AAS, AES, FTIR, aj.),
 - metody polarografické,
 - metody analytické aj.
- 2) Metody hodnocení morfologie a distribučního rozdělení otěrových částic:
 - ferografie,
 - počítače částic aj.
- 3) Metody stanovení fyzikálně chemických parametrů:
 - a) Normované metody:
 - kinematičká viskozita,

- zkouška na vodu a stanovení obsahu vody,
- Conradsonův karbonizační zbytek,
- stanovení neutralizačního čísla (TBN aj.),
- bod vzplanutí a hoření aj.

b) Náhradní (jednoduché) metody:

- obsah paliva v oleji,
- celkové znečištění,
- kapkový test a další zkoušky soupravy TRIBO I aj.

Podrobnější údaje k tribodiagnostickým metodám jsou uvedeny v kap. 8.

V organizacích, kde je systémově realizovaná tribodiagnostika vozidlových spalovacích motorů sledováním vybraných parametrů mazacích olejů lze realizovat dvoustupňový systém:

První (základní) stupeň zahrnuje měření následujících parametrů:

- celkové znečištění,
- bod vzplanutí.

Hodnocení celkového znečištění vybraných druhů vozidel, používané oleje a maximální přípustné doby výměny oleje je uvedeno v tab. 9. 10.

Tab. 9. 10 Příklady hodnocení celkového znečištění oleje pro vybraná vozidla

Typ vozidla	Druh oleje	Hodnocení			Max. příp. doba výměny oleje (km)
		Běžné	Mezní	Havarijní	
Š – Octavie	OA RXT	do 54	55 - 64	≥ 65	15 000 km
Land Rover	MHX 55	do 35	36 - 45	≥ 46	10.000 km
T 815 4x4	M7 ADX	do 54	55 – 64	≥ 65	6450 ± 120
	M6 ADS II	do 69	70 - 79	≥ 80	10320 ± 90
T 815 8x8	M6 ADS II	do 58	59 - 69	≥ 70	13500 ± 75

Pro vyhodnocení výsledků bodu vzplanutí olejů jsou směrodatné následující hodnoty:

- běžné nad 200 °C,
- mezní 170 - 200 °C,
- havarijní pod 170 °C.

Opatření prováděná na základě výsledků měření 1. stupně:

V případě, že výsledek měření celkového znečištění a bodu vzplanutí se pohybuje v oblasti běžných hodnot, je olej použitelný pro další provoz. Pohybuje-li se v oblasti mezních hodnot, provede se diagnostické měření 2. stupně. Na základě tohoto měření se rozhodne o výměně oleje. V případě, že výsledek měření celkového znečištění nebo bodu vzplanutí dosahuje havarijních hodnot, je nutno olej vyměnit a zjistit příčinu tohoto stavu. Např. snížení bodu vzplanutí na rozmezí mezních hodnot svědčí o pronikání paliva do oleje, proto je nutno se zaměřit na palivovou soustavu. Je-li dosažena mezní hodnota celkového znečištění, jedná se pravděpodobně o proniknutí vody do olejové náplně motoru, proto je nutné provést prskací test. Bude-li výsledek negativní, je nutno olej vyměnit a diagnostikou 2. stupně identifikovat závadu.

Diagnostika 2. stupně zahrnuje měření následujících parametrů:

- prskací test orientačně určující přítomnost vody,
- obsah vody (pouze při pozitivním prskacím testu),
- celkové znečištění,
- bod vzplanutí,
- kinematická viskozita,
- detergentně disperzní vlastnosti,
- obsah látek nerozpustných v hexanu.

Vyhodnocení 2. stupně se provádí s využitím postupu při 1. stupni a dále:

Nepřekročí-li žádný z pěti parametrů mezní hodnotu, není nutno další zkoušky provádět. V případě, že bod vzplanutí se pohybuje v oblasti mezních hodnot, provede se kontrola palivového systému. Překročí-li některý z parametrů, tj. prskací test, obsah vody a kinematická viskozita mezní hodnotu nebo celkové znečištění dosáhne havarijní hodnoty, je olej nezpůsobilý pro další provoz a musí se vyměnit. Výsledky zkoušek pak slouží k rozlišení příčin znehodnocení oleje a odhalení závad na motoru.

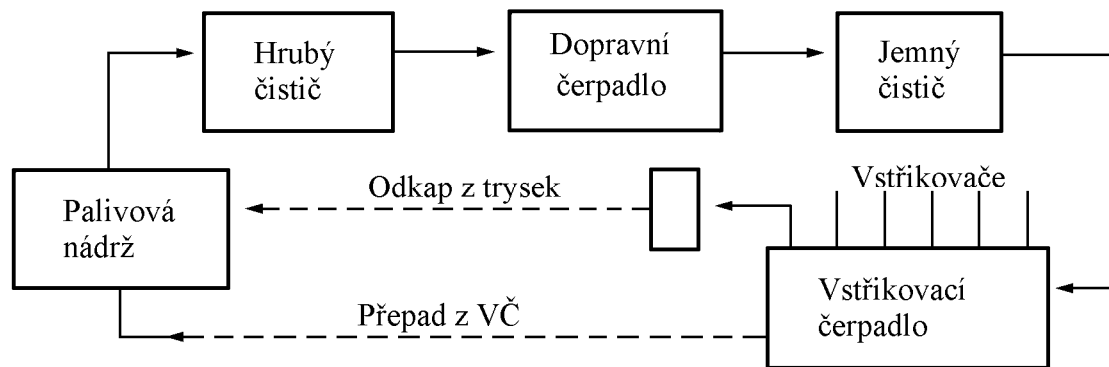
Četnost provádění tribodiagnostiky motorů:

- 1. stupeň při základní údržbě nejpozději však každých 300 - 500 km,
- 2. stupeň v závislosti na výsledcích 1. stupně a při technické údržbě č. 2.

9. 8 Diagnostika soustav spalovacích motorů

Palivové soustavy vznětových motorů

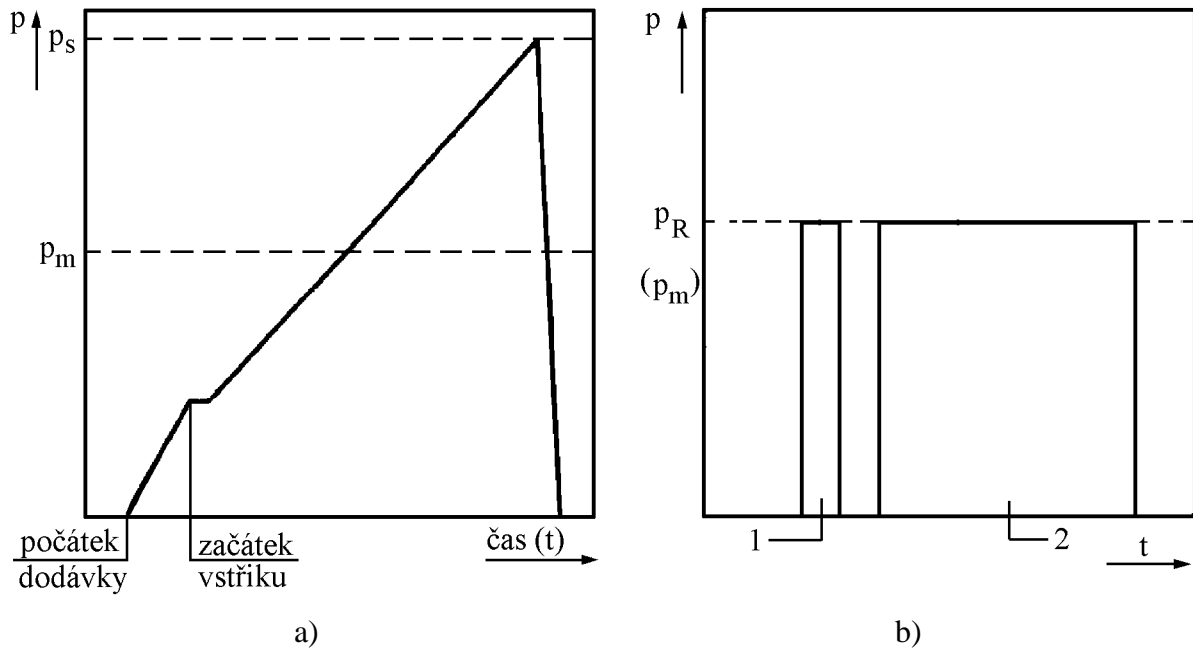
Rozvoj spalovacích motorů, přísná legislativní opatření k zamezení znečišťování ovzduší a rostoucí nároky na provozní spolehlivost vozidel kladou nové požadavky na palivové soustavy a zvláště na vstřikovací zařízení. Blokové schéma palivové soustavy vznětového motoru je na obr. 9. 34.



Obr. 9. 34 Schéma klasické palivové soustavy vznětového motoru

Vstřikovací proces je velmi složitý hydraulický děj. Uspořádání palivové soustavy je závislé na typu motoru, především však na způsobu regulace jeho výkonu. U vznětových motorů je typická kvalitativní regulace, tj. odměřování paliva v širokém rozmezí směšovacího poměru palivo-vzduch. Základními parametry, kterými lze hodnotit palivovou soustavu, resp. vstřikovací soupravu jsou:

- časový průběh množství vstříknutého paliva, tj. zákon vstřiku $q = f(t)$,
- průběh velikosti tlaku paliva v době výstřiku $p = f(t)$,
- další veličiny, např. doba vstřiku, zpoždění vstřiku od geometrického počátku, vstřikovací tlak, předstih vstřiku v závislosti na otáčkách a zatížení motoru aj.



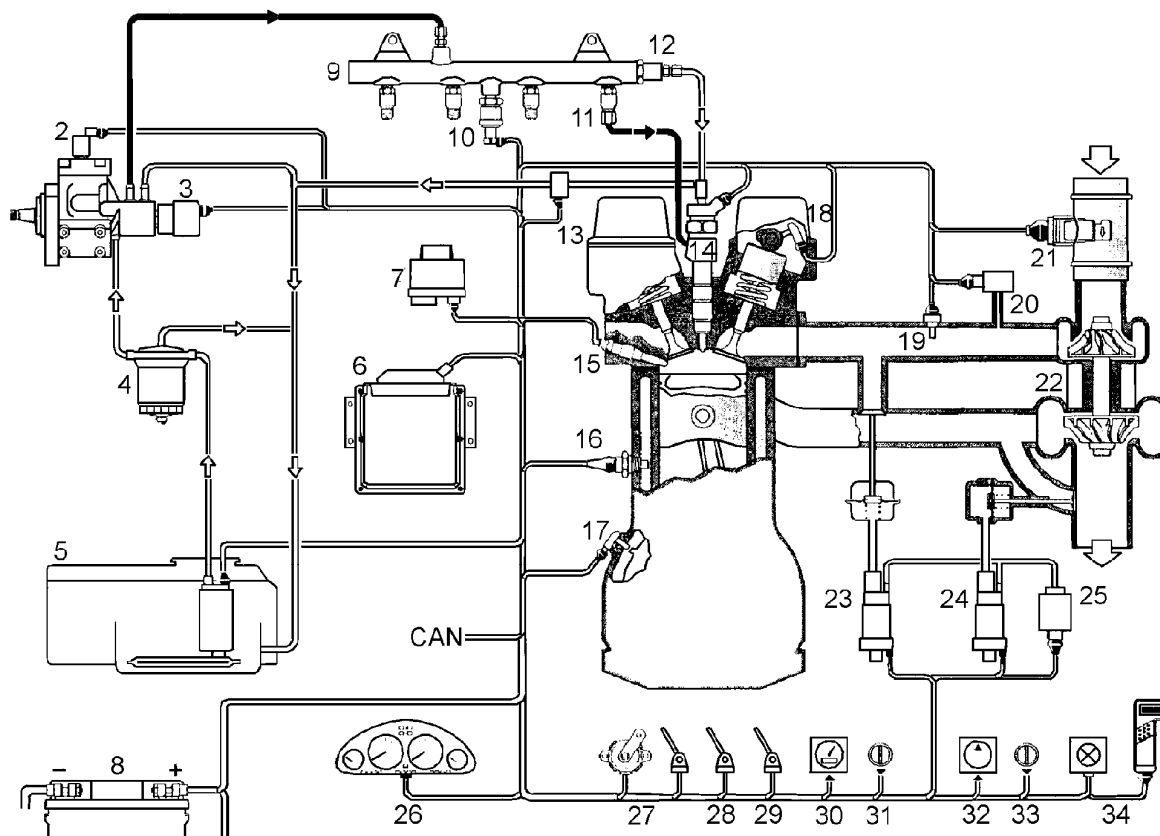
Obr. 9. 35 Průběh vstříku u konvenčního vstřikování (a) a Common Rail (b)

Moderní akumulční vstřikovací soustava Common Rail

Jedná se o regulovanou vysokotlakou vstřikovací soustavu, označovanou jako kompenzační vstřikovací systém, kde je objem paliva v rozdělovací trubce, která tvoří tlakový akumulátor a zaručuje zásobování vstřikovačů velkým průtočným množstvím bez kolísání tlaku. Systém Common Rail (obr. 9. 36) je tvořen nízkotlakým okruhem (palivová nádrž, dopravní čerpadlo s filtračním čističem, výměník tepla a potrubí), vysokotlakou částí (vysokotlaké čerpadlo s vysokotlakým vedením a rozdělovací trubkou, vstřikovači a tryskami), elektronickou řídicí částí (řídicí jednotka, akční členy – elektromagnetické ventily ve vstřikovačích, regulátor tlaku v rozdělovací trubce, regulující v rozmezí asi 40 – 135 MPa, popř. více).

Charakteristikou vstřikovací soustavy Common Rail jsou:

- vysoké vstřikovací tlaky a jejich variabilita v závislosti na provozním režimu,
- programovatelný průběh vstřikování,
- elektronicky řízené vstřikování (začátek, množství, konec),
- systém může být snadno přizpůsoben různým motorům aj.



Obr. 9. 36 Vstřikovací soustava Common Rail

Diagnostika klasické palivové soustavy vznětového motoru

1) Dodávka paliva vstřikovacím čerpadlem (dopravní charakteristika VČ) - je vícerozměrným diagnostickým signálem, který měříme při legislativně stanovených režimech motoru, tj. při jmenovitých otáčkách, otáčkách volnoběhu, otáčkách spouštěcích a při otáčkách odpovídajících maximálnímu kroučicímu momentu motoru. Dále prověřujeme geometrický počátek nebo geometrický konec dopravy paliva, nerovnoměrnost vstřikovaného množství paliva vstřikovacími jednotkami při jmenovitých otáčkách, otáčkách volnoběhu a otáčkách, odpovídajících maximálnímu kroučicímu momentu. Rovněž prověřujeme otáčky, při kterých regulátor začíná zavírat a uzavře dodávku paliva, resp. u vstřikovacích čerpadel s automatickým přesuvníkem vstřiku hodnoty úhlů přesunutí automatického přesuvníku jako funkci otáček. Měří se na zkušební stolici, nebo s využitím dynamometru přímo na motoru.

2) Při měření kouřivosti kontrolujeme činnost regulátoru sledováním volnoběžných a přeběhových otáček, dobu zrychlení aj.

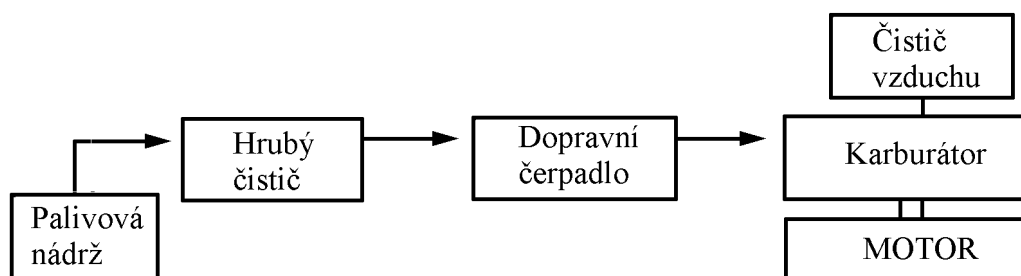
3) Úhel předstihu vstřiku paliva - měří se kapilárou, nebo speciálním přístrojem. Při měření snímáme signál, zachycující průběh vstřiku paliva a otevírací tlak (vzrůst tlaku) ve výtláčném potrubí 1. válce a signál, zachycující úhel pootočení klikového hřídele.

4) Výkon nízkotlaké části palivové soustavy - měří se podle množství paliva dodávaného za jednotku času.

5) Zkoušení vstřikovačů na otevírací tlak, těsnost a činnost (průchodnost) otvorů trysky aj.

Zážehové motory

Kvantitativní regulace, tj. odměřování směsi paliva se vzduchem, je typická u zážehových motorů, kde se nejčastěji vytváří směs před válcem motoru. U klasického zážehového motoru probíhá rozprašování paliva, odpařování a vytváření homogenní směsi paliva se vzduchem ve speciálním zařízení, karburátoru, resp. částečně v plnicím potrubí a válci motoru. Blokové schéma klasické palivové soustavy zážehového motoru je na obr. 9. 37.



Obr. 9. 37 Schéma palivové soustavy zážehového motoru

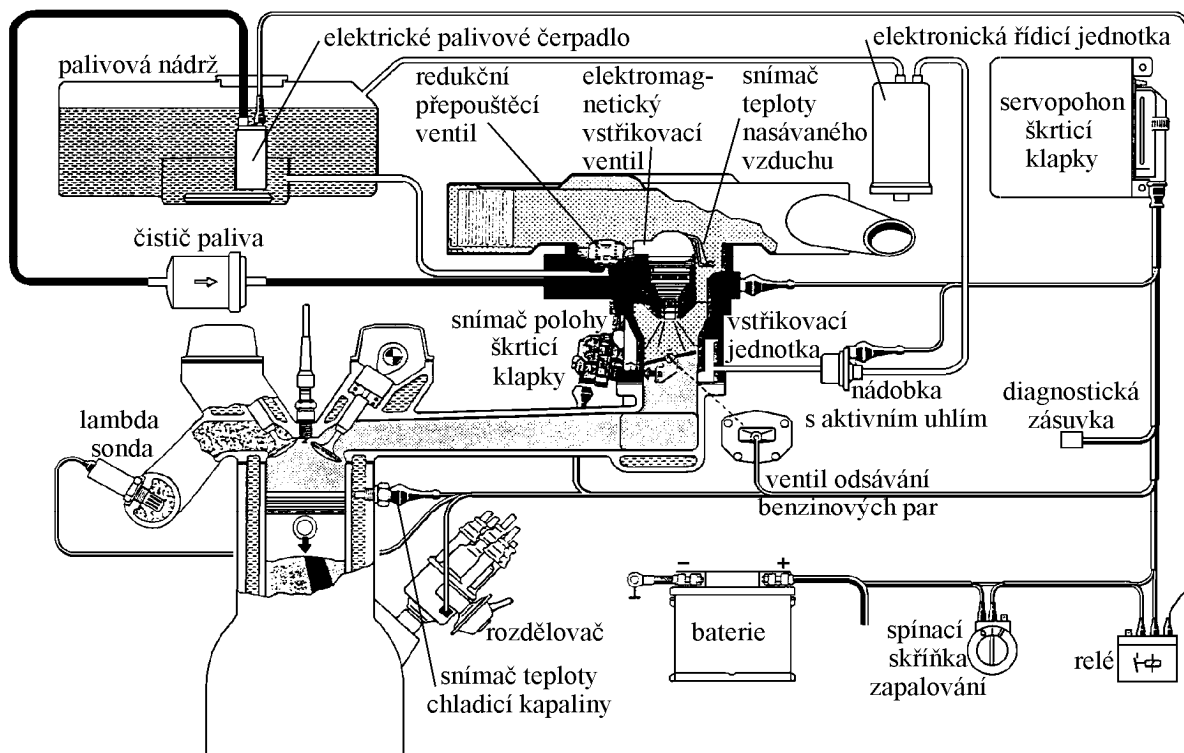
Moderní zážehové motory využívají vstřikování paliva řízené elektronicky. Jedná se o systémy pulsních, sekvenčních, kontinuálních, jedno nebo vícebodových vstřikovacích systémů aj. Schéma uspořádání elektronicky řízeného vícebodového vstřikovacího zařízení je uvedeno na obr. 9. 38.

Hlavní část klasické palivové soustavy tvoří karburátor. Je to velmi komplikované zařízení, které obsahuje např. následující části: odpojovací ventil volnoběhu, topné těleso, zařízení pro elektrický ohřev sacího potrubí, termosplínač, předehříváč nasávaného vzduchu, odlučovač parních polštářů, zpomalovač doběhu škrtkové klapky, startovací zařízení, volnoběžné zařízení, přechodový systém, obohacovací systém, hlavní (dvoustupňový) systém a další.

Diagnostika palivové soustavy zážehového motoru zahrnuje:

- analýzu výfukových plynů,
- kontrolu těsnosti všech částí soustavy,

- očištění povrchu, kontrolu upevnění všech částí soustavy,
- vyčištění čističe paliva a vzduchu,
- seřízení otáček volného chodu motoru,
- promazání akceleračního mechanismu,
- kontrolu funkce palivového čerpadla,
- kontrolu karburátoru (kontrolu typu, velikosti, a osazení karburátoru prvky - difuzér, trysky, vzdušníky aj., kontrolu průtočnosti všech prvků, kontrolu, vyčištění a seřízení všech funkčních okruhů: kontrolu funkce škrťací klapky, kontrolu těsnosti a hmotnosti plováku, jehlového ventilu plováku, kontrolu obohacovacího systému, kontrolu výšky hladiny v plovákové komoře, aj.).

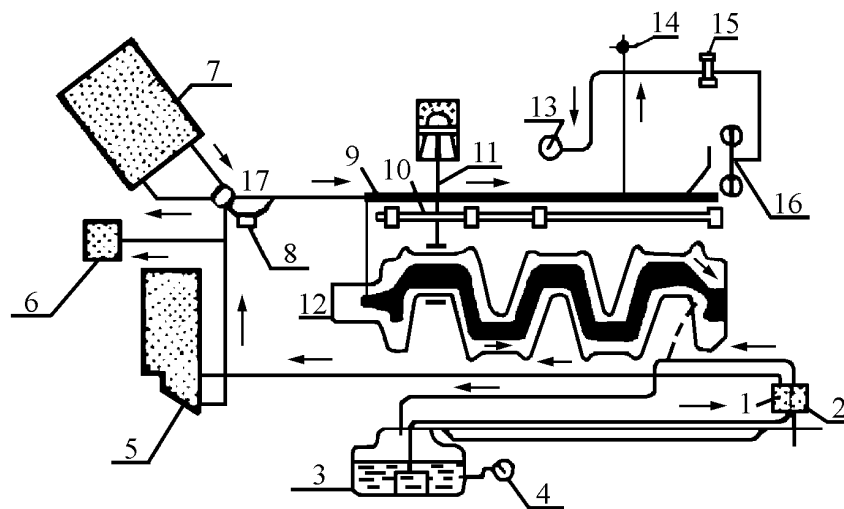


Obr.9. 38 Nepřímé kontinuální vícebodové vstřikování s elektronickým řízením
(KE – Jetronic)

Mazací soustavy

Třecí plochy pohybujících se částí spalovacího motoru musí být dostatečně mazány, aby nevzniklo suché tření, které vždy způsobuje zadírání. Mazáním se mezi třecími plochami

vytvoří tenká vrstva maziva - olejový film. Spolehlivost spalovacího motoru do značné míry závisí na dobrém mazání, je proto nutné, aby olej nepřetržitě a intenzivně procházel vůlemi v třecích plochách součástí motoru a mazal, popř. aby plnil některé další úlohy, např. chladil, utěšňoval, udržoval čistotu motoru, chránil proti korozi, přenášel síly aj. U spalovacích motorů existuje několik druhů mazání, např. mazání mastnou směsí u dvoudobých zážehových motorů, kdy olej je přimíšen do paliva, mazání rozstříkem a zejména tlakové (oběžné) mazání, při němž je olej, který je umístěn buď ve skříni motoru nebo v olejové nádrži, dopravován na mazací místa olejovým čerpadlem. Schéma tlakového mazání vozidlového spalovacího motoru je na obr. 9. 39.



Obr. 9. 39 Schéma mazací soustavy motoru

Legenda:

1 - olejové čerpadlo výtlačné, 2 - olejové čerpadlo odsávací, 3 - olejová nádrž, 4 - teploměr oleje, 5 - plnoprůtočný čistič, 6 - klikové ústrojí motoru, 7 - chladič oleje, 8 - blokový ventil, 9 - mazací kanál (hlavní), 10 - vačkový hřídel, 11 - ojnicní ložiska, 12 - klikový hřídel, 13 - tlakoměr, 14 - tlakový spínač kontrolky mazání, 15 - ovládací termočlánek s čidlem, 16 - kapalinová spojka větráku, 17 - kuželový ventil.

Podle způsobu, jakým je mazací olej přiváděn do ložisek klikového hřídele, můžeme rozlišit dva případy propojení:

- **paralelní**, které je používáno v soudobých automobilech, kdy olej je přiváděn hlavním mazacím kanálem a rozvádí se k jednotlivým mazacím místům (tlaky mezi mazanými místy jsou přibližně stejné);
- **sériové**, kdy olej vstupuje do prvního hlavního ložiska otvory ramen a čepů a pak postupuje k dalším ložiskům (rozdíly mezi vstupním tlakem na prvním ložisku a výstupním tlakem na posledním ložisku jsou značné);

Diagnostika mazacích soustav

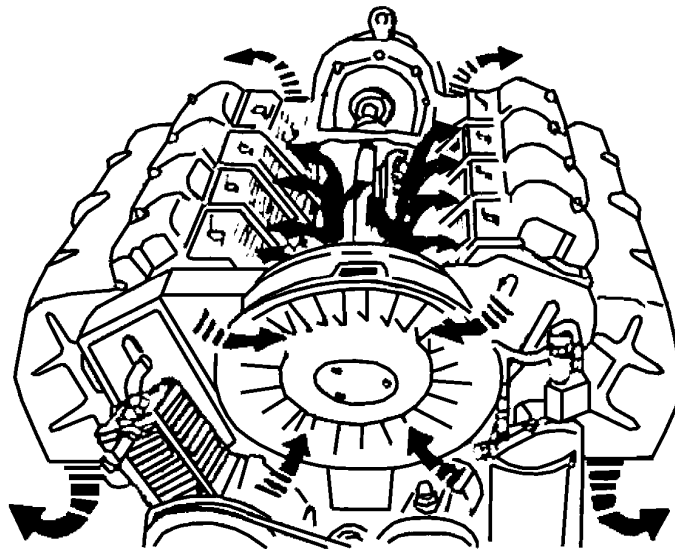
- okamžitý tlak mazacího oleje, měřený palubním tlakoměrem,
- okamžitá teplota mazacího oleje, měřená palubním teploměrem,
- spotřeba oleje (měrný opal) 0,5 % výborný stav, mezní hodnoty opalu 3 - 4 % spotřeby paliva (měří se vážením),
- hodnocení přetlaku oleje, který umožňuje zjistit seřízení redukčního ventilu, funkci palubního tlakoměru oleje, opotřebení olejového čerpadla a těsnost mazací soustavy (měří se speciálním tlakoměrem zapojeným k libovolnému otvoru hlavního mazacího kanálu - kontrolujeme jej při různých otáčkách motoru, minimální přetlak nesmí klesnout u vznětových motorů pod 0,2 MPa, u zážehových motorů pod 0,1 MPa),
- měření průtočného množství oleje speciálním přístrojem, kdy ověřujeme funkci olejového čerpadla, průchodnost redukčního ventilu a čističe oleje,
- měření znečištění odstředivého čističe oleje vážením a porovnáním hmotnosti čistého a znečištěného rotoru,
- hodnocení změn vybraných kvalitativních parametrů motorového oleje,
- havarijní pokles tlaku oleje v mazací soustavě vlivem různých příčin, např. snížením viskozity oleje (naředěním palivem), nedostatkem oleje, poškozením olejového čerpadla, ucpáním soustavy, poruchou (zanesením) přepouštěcího nebo pojistného ventilu, prasklým nebo uvolněným pryžovým spojem aj.

Chladicí soustavy

Při činnosti spalovacího motoru dochází k přeměně tepelné energie na energii mechanickou. Účelem chladicí soustavy je odvádět teplo, které se uvolňuje při spalování a nevyužije na mechanickou práci, popř. neodvede výfukem, cirkulujícím mazivem aj. Podle chladicího média můžeme rozdělit chladicí soustavy na chlazení vzduchem a chlazení kapalinou.

Chlazení vzduchem

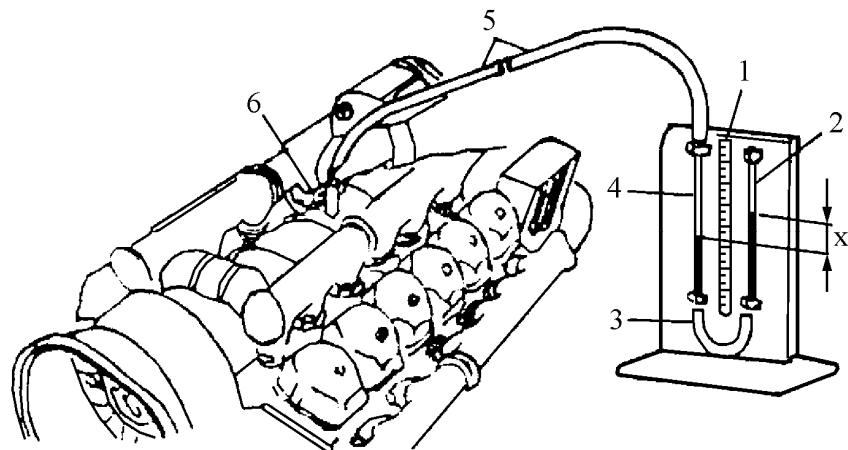
Teplo se odvádí proudícím vzduchem, přitom proud vzduchu se vytváří nápirem vzduchu při jízdě (motory s malým výkonem a motocykly), nebo nuceným pohybem pomocí ventilátoru. Schéma vzduchového chlazení je na obr. 9. 40.



Obr. 9. 40 Chlazení motoru vzduchem

Diagnostika vzduchového chlazení

- kontrola přetlaku ventilátoru chlazení pomocí U-manometru (výsledkem je minimální přípustný tlak vzduchu, např. pro T-815 1,27 kPa tj. 130 mm vodního sloupce při 2200 min⁻¹). Příklad kontroly přetlaku ventilátoru chlazení je na obr. 9. 41.
- kontrola teploměru chlazení,
- kontrola kontrolního snímače teploty,
- kontrola správné činnosti (montáže) ventilátoru chlazení aj.
- kontrola vůle ložisek ventilátoru,
- kontrola napnutí klínových řemenů (alternativně), aj.



Obr. 9. 41 Kontrola přetlaku ventilátoru chlazení

Legenda:

1 - milimetrové měřítko, 2 a 4 - skleněné trubičky, 3 a 5 - pryžové hadice, 6 - otvor pro snímání přetlaku chladícího vzduchu, x - tlak vzduchu v milimetrech vodního sloupce.

Kapalinové chlazení

Kapalinové chlazení je založeno na odvodu tepla kapalinou z tepelně namáhaných míst a následném chlazení kapaliny vzduchem. Podle způsobu oběhu chladící kapaliny rozdělujeme chladicí soustavy na samočinné (termosifonové) a s oběhem nuceným (otevřené a uzavřené). Nejvíce se využívají chladicí soustavy uzavřené s nuceným oběhem. Schéma kapalinové chladicí soustavy je na obr. 9. 42.

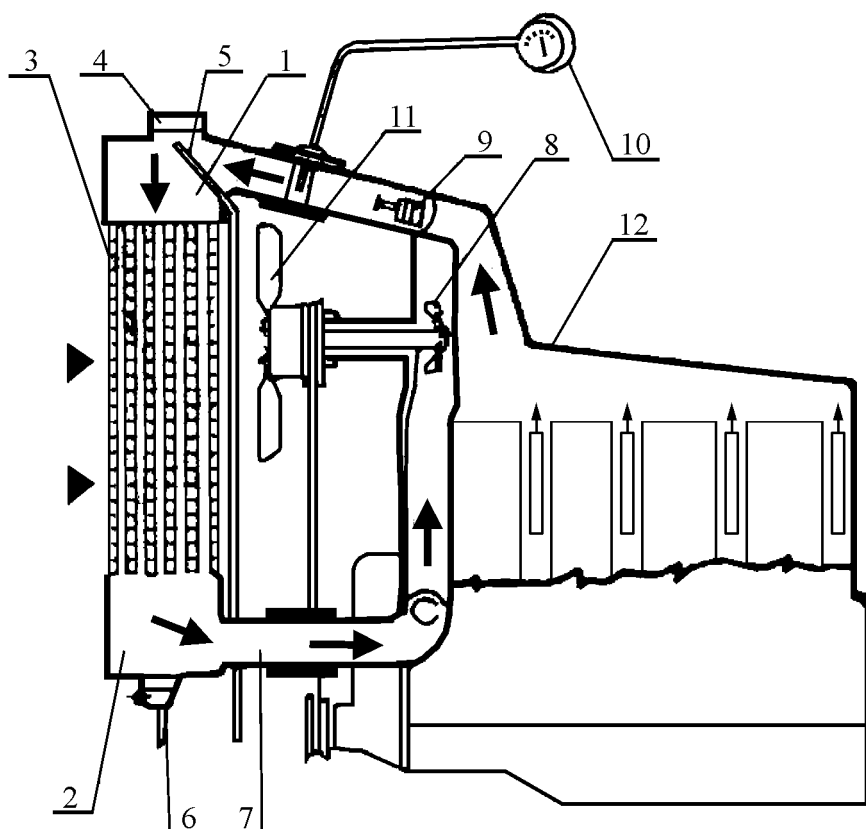
Regulaci teploty motoru možno realizovat:

- změnou průtočného množství chladící kapaliny (kapalinové chlazení),
- změnou průtočného množství chladícího vzduchu (vzduchové i kapalinové chlazení),
- změnou otáček a zatížení motoru (vzduchové i kapalinové chlazení).

Diagnostika kapalinového chlazení

- kontrolu těsnosti chladicí soustavy (vizuálně, stlačeným vzduchem),
- kontrolu množství chladicí soustavy,

- kontrolu teploměru a termostatu,
- kontrolu funkce přetlakového a podtlakového ventilu,
- kontrolu snímače teploty (signalizace).



Obr. 9. 42 Kapalinová chladicí soustava

Legenda:

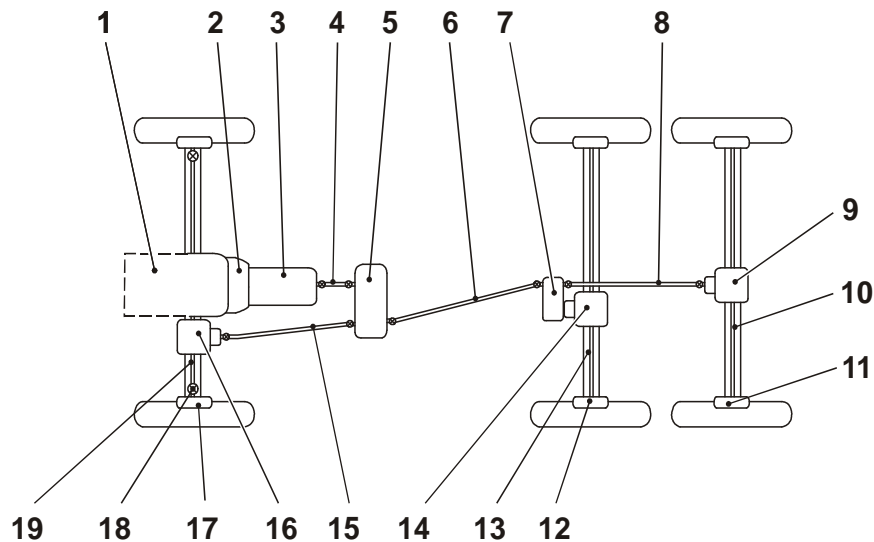
1 - horní komora chladiče, 2 - spodní komora chladiče, 3 - chladicí blok, 4 - plnicí hrdlo, 5 - odpařovací trubka, 6 - vypouštěcí kohout, 7 - spoj. potrubí, 8 - čerpadlo, 9 - termostat, 10 - teploměr kapaliny, 11 - větrák, 12 - chladicí plášť motoru.

Poznámka: Diagnostika a údržba spalovacích motorů a jejich soustav zahrnuje přesně stanovené technologické postupy pro jednotlivé typy motorů a vozidel a dále lhůty provedení, přístroje, speciální nářadí aj. Tyto informace jsou uvedeny v servisních knížkách, předpisech a v literatuře.

10. APLIKACE METOD TECHNICKÉ DIAGNOSTIKY V PROVOZU A ÚDRŽBĚ PŘEVODOVÝCH ÚSTROJÍ VOZIDEL

10. 1 Požadavky na převodová ústrojí vozidel

Převodné ústrojí spojuje motor vozidla s jeho hnacími koly. Tímto spojením se točivý moment motoru převodovým ústrojím přenáší, mění co do velikosti a smyslu, rozděluje, popř. krátkodobě nebo dlouhodobě přerušuje. Možné jednoduché uspořádání převodového ústrojí pro třínápravové vozidlo TATRA 810 6 x 6 je na obr. 10. 1.



Obr. 10. 1 Možné uspořádání převodového ústrojí automobilu

Legenda:

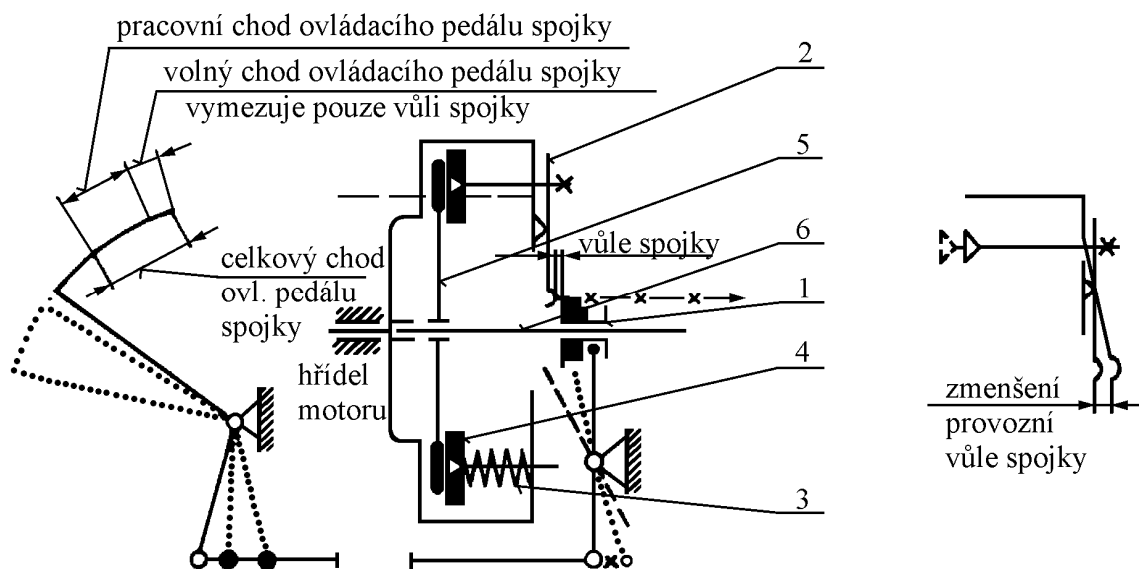
1 – motor; 2 – spojka; 3 – převodovka; 4 – kloubový hřídel;
5 – přídatná převodovka s děličem momentu; 6 – kloubový hřídel; 7 – mezinápravová rozvodovka s mezinápravovým diferencíálem; 8 – kloubový hřídel; 9 – nápravová rozvodovka 2. zadní nápravy; 10 – hnací spojovací hřídel; 11 – kolová redukce; 12 – kolová redukce; 13 – hnací spojovací hřídel; 14 – nápravová rozvodovka 1. zadní nápravy; 15 – kloubový hřídel; 16 – nápravová rozvodovka přední nápravy; 17 – kolová redukce; 18 – stejnoběžný kloub; 19 – hnací kloubový hřídel

Zkušenosti ukazují, že u převážné většiny částí převodových ústrojí je obvyklý trend pozvolného narůstání opotřebení. Převodová ústrojí jsou založena na přenosu hnací síly pomocí ozubených kol, valivých ložisek, třecích mechanismů aj. Ozubené převody pracují obvykle v olejové lázni, jež zabraňuje intenzivnímu abrazivnímu opotřebení. Intenzita abrazivního opotřebení se může rychle zvyšovat vlivem růstu obsahu nečistot v oleji, a naopak znečištění oleje v převodech je důsledkem opotřebení. Na ozubených kolech převodů se často objevuje únavové opotřebení (pitting). Stejným způsobem se únavové

opotřebením projevuje na povrchu valivých tělísek a oběžných drah valivých ložisek. U třecích spojek se projevují všechny druhy opotřebením: nedostatečné mazání ložisek spojky vede k její poruše, přemazání může způsobit znečištění třecích ploch a prokluz spojky. Důsledkem prokluzu je nepříznivé tepelné ovlivnění třecích ploch spojky (spálení, borcení aj.), přítlačného mechanismu, včetně vyhřátí pružin a trvalého snížení jejich přítlačné síly. U kloubových hřídelů dochází ke znečištění prachem, který spolu s vodou způsobuje intenzivní opotřebením ložisek homokinetických kloubů (rázy a intenzivní opotřebením). Velký vliv má rovněž činnost člověka (řidiče), zejména rychlost zapínání spojky, řazení převodových stupňů, brzdění převodovou brzdou, rychlost akcelerace, průjezd nerovností aj.

Spojka

Zajišťuje plynulý rozjezd, přenos kroutícího momentu bez prokluzu, krátkodobé přerušování kroutícího momentu, tlumení kmitů a rázů aj. Schéma jednokotoučové třecí spojky s obvodovými pružinami je na obr. 10. 2.



Obr. 10. 2 Schéma jednokotoučové třecí spojky

Legenda:

1 - vypínací objímka a ložisko, 2 - vypínací páka, 3 - obvodová pružina, 4 - přítlačný kotouč, 5 - lamela spojky, 6 - hnací hřídel převodovky.

Používání spojky má za následek zvýšení teploty třecích částí. V těžkých provozních podmínkách dosahuje teplota třecích částí spojky až 450 °C. Hlavními příčinami nesprávné činnosti spojky během provozu je neúplné zapnutí nebo vypnutí spojky (prokluz), kdy

dochází k nedostatečnému přenosu točivého momentu, zvyšování teploty jednotlivých částí aj. Příčinami prokluzu spojky může být:

- nulová, popř. záporná hodnota vzdálenosti mezi vypínacími páčkami a vypínacím ložiskem spojky - tuto vzdálenost lze měnit prodlužováním nebo zkracováním táhel ovládacího mechanismu spojky a říkáme ji volný chod spojky, viz obr. 10. 2,
- zaolejování obložení lamely (hnaného kotouče) spojky,
- změna charakteristik obvodových pružin spojky, obvykle v důsledku tepelného ovlivnění, únavy aj.,
- spálení obložení nebo deformace lamely spojky aj.

Údržba spojky:

- obnovení předepsané vůle ve vypínacím ústrojí spojky (volný chod spojky) podle druhu spojky a technických podmínek,
- kontrola rovnoměrnosti dosedání vysouvacích páček na opěrný kroužek vypínacího ložiska,
- odvodušnění kapalinového ovládacího systému spojky (posilovače spojky),
- mazání vypínacího ložiska a ovládacího ústrojí spojky,
- kontrola čistoty, popř. vyčištění drenážního otvoru ve spodní části skříně spojky,
- kontrola plynulého záběru spojky.

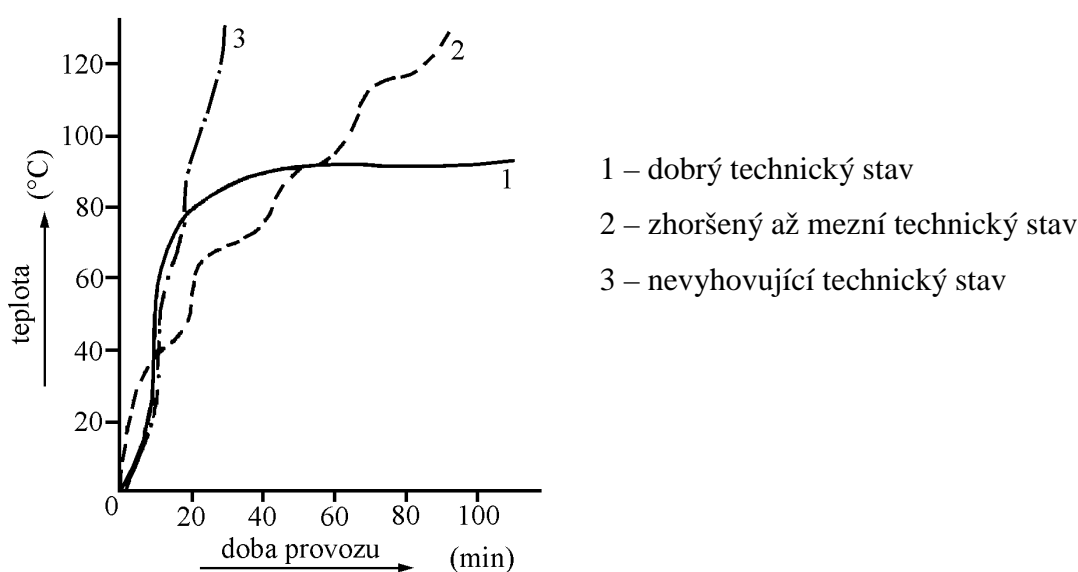
Kloubové a spojovací hřídele

Jsou určeny ke stálému přenosu točivého momentu nesouosých (kloubové hřídele) nebo souosých (spojovací hřídele) částí převodového ústrojí. Kloubové a spojovací hřídele umožňují do jisté míry relativní pohyb převodovky a hnacích náprav, a to ve svislém směru (kývání) i ve vodorovném směru (posuv). Během provozu jsou značně namáhány, jejich provozní poruchy se projevují:

- Přerušovaným a zesilujícím hlukem při zvyšování rychlosti vozidla (porušené vyvážení, ztráta vyvažovacího závaží, ohnutí, deformace hřídele nárazem při průjezdu terénem, porušením souososti konce hřídele, opotřebením jehlových ložisek a čepů křížového kloubu, opotřebením drážkového hřídele aj.)

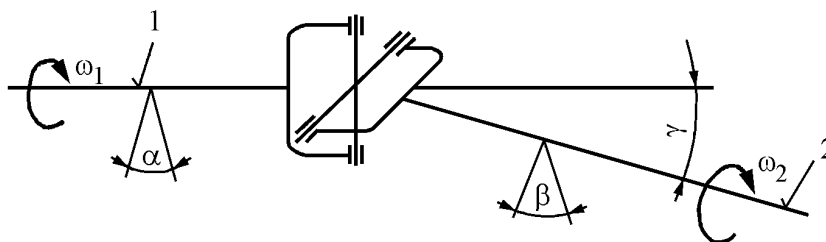
- Klepáním nebo slabými údery při řazení převodových stupňů nebo při jízdě setrvačností vozidla (uvolnění šroubů přírub a křížových kloubů, opotřebené drážkování kloubového hřídele, opotřebení drážky unášeče kloubového hřídele, deformace pružných spojek aj.)

Vyváženost hřídelů je mimořádně důležitá, neboť hřídele, dlouhé i přes 1000 mm, se při přímém záběru otáčejí otáčkami klikového hřídele, běžně až $n = 100 \text{ s}^{-1}$ (6000 1/min). Relativně spolehlivým ukazatelem správné činnosti kloubových a spojovacích hřídelů je jejich teplota v závislosti na době činnosti, což je znázorněno na obr. 10. 3.



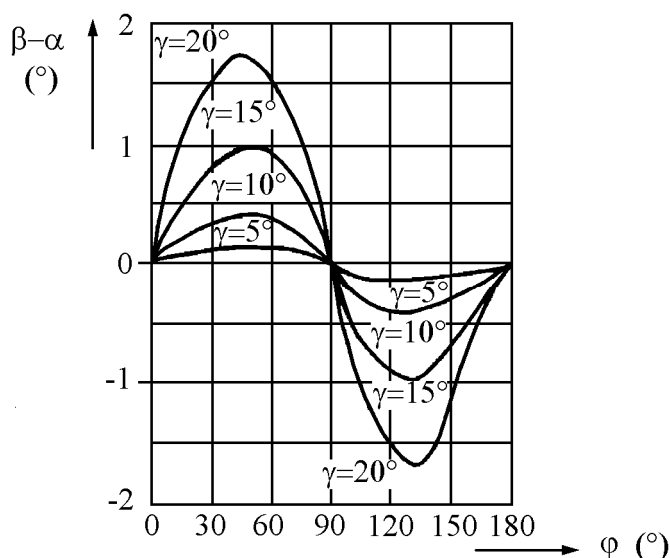
Obr. 10. 3 Závislost teploty kloubového hřídele na době provozu

Kloubové hřídele mají, se zvětšujícím se úhlem různoběžnosti γ hnacího a hnaného konce, nevýhodnou vlastnost, kterou je nestejnoběžnost obou konců kloubu. Potřeba jednoznačné správné montáže kloubového hřídele vychází z kinematiky hřídele a kloubu, viz obr. 10. 4.



Obr. 10. 4 Kinematika kloubového hřídele s jedním křížovým kloubem

Z obr. 10. 4 vidíme, že při pootočení hřídele 1 o úhel α , se pootočí hřídel 2 o úhel β . Přitom je hřídel 1 skloněn k hřídeli 2 o úhel γ . Úhlová rychlost hnaného konce ω_2 se během jedné otáčky, tj. při otáčení o úhel $\varphi = 2\pi = 360^\circ$, dvakrát zvýší na maximum a dvakrát sníží na minimum proti úhlové rychlosti ω_1 hnacího konce, viz obr. 10. 5.



Obr. 10. 5 Závislost rozdílu úhlů pootočení hřídelů $\alpha - \beta$ na úhlu jejich sklonu γ

Zrychlování a zpoždování je způsobeno relativním pohybem kříže kloubu vůči hnacímu a hnanému unášeči (vidlicím); pohyb kloubu vyplňuje část kulového prostoru. Kinematické řešení je realizováno ve sférickém prostoru. Nerovnoměrnost je vyjádřena vztahem:

$$\omega_2 = \omega_1 \frac{\cos \gamma}{1 - \sin^2 \gamma \cdot \cos^2 \varphi} \quad (10. 1)$$

pro $\varphi = 0^\circ$ a 180° je $\cos^2 \varphi = 1$, pak

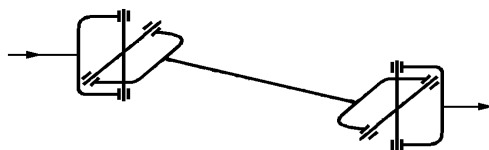
$$\omega_2 = \omega_1 \frac{\cos \gamma}{1 - \sin^2 \gamma} = \omega_1 \frac{\cos \gamma}{\cos^2 \gamma} = \omega_1 \frac{1}{\cos \gamma} = \omega_2 \max \quad (10. 2)$$

pro $\varphi = 90^\circ$ a 270° je $\cos^2 \varphi = 0$, pak

$$\omega_2 = \omega_1 \frac{\cos \gamma}{1 - \sin^2 \gamma \cdot 0} = \omega_1 \cdot \cos \gamma = \omega_2 \min \quad (10. 3)$$

Vážným problémem, který může být příčinou abnormálního opotřebení a předčasného vyřazení, a který dokonce může ohrozit bezpečnost provozu vozidla, je správná

montáž kloubového hřídele. Kloubový hřídel se dvěma křížovými klouby, správně ad. a) a nesprávně namontovanými ad. b), je schematicky znázorněn na obr. 10. 6.



a) Správná montáž

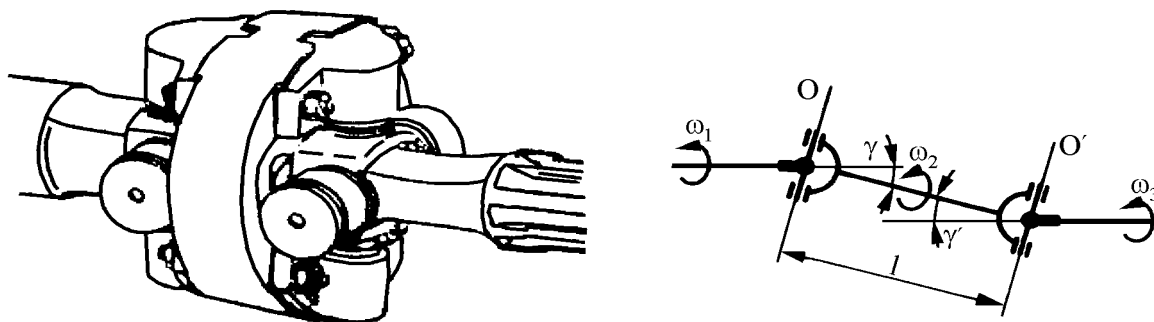


b) Nesprávná montáž

Obr. 10. 6 Správná a nesprávná montáž kloubového hřídele

Z uvedeného je zcela zřejmé, že kloubový hřídel se bude při vychýlení o úhel γ otáčet nerovnoměrně. Tato nerovnoměrnost v průběhu jedné otáčky, při vychýlení např. o $\gamma = 30^\circ$, představuje rozdíl $\omega_2 \max$ a $\omega_2 \min$ asi 30% ω_1 . Aby se tato nerovnoměrnost se svými důsledky nežádoucího kmitavého namáhání nepřenášela do rozvodovky, musí se namontovat kloub na druhém konci hřídele proti hnacímu konci prvního kloubu pootočený o 90° , čímž se dosáhne, že v okamžiku maxima ω_2 vlivem prvního kloubu nastává minimum ω_3 druhého kloubu a nerovnoměrnost je vyrovnána tzv. stejnoběžnými homokinetickými klouby, viz obr. 10. 7. Podmínky stejnoběžnosti tohoto kloubu můžeme definovat následovně

$$\left. \begin{array}{l} l \rightarrow 0, \\ \gamma = \gamma', \\ O \parallel O'. \end{array} \right\} \omega_3 = \omega_1 \quad (10. 4)$$



Obr. 10. 7 Stejnoběžný (homokinetický) kloub – podmínky stejnoběžnosti

Naopak při nesprávné montáži, v extrémním případě shodné polohy obou kloubů při stejném vychýlení γ , nastává znásobení nerovnoměrnosti otáčení

$$\omega_3 \text{ max} = \omega_2 \frac{1}{\cos \gamma} = \left(\omega_1 \frac{1}{\cos \gamma} \right) \cdot \frac{1}{\cos \gamma} = \omega_1 \frac{1}{\cos^2 \gamma} \quad (10. 5)$$

$$\omega_3 \text{ min} = \omega_2 \cdot \cos \gamma = (\omega_1 \cos \gamma) \cdot \cos \gamma = \omega_1 \cos^2 \gamma \quad (10. 6)$$

Nesprávná montáž kloubů tedy značně zvyšuje dynamické namáhání převodového mechanismu, snižuje jeho životnost a může být příčinou porušení celistvosti kloubového hřídele a tím příčinou havárie. Kloubové hřídele jsou konstruovány na tzv. kritické otáčky, které jsou vyšší než maximální provozní otáčky. V náročném provozu (prudké klesání, zařazený nevhodný převodový stupeň aj.) však může dojít k jejich dosažení a překročení. Pak vzniká reálné nebezpečí ztráty stability vychýlením těžiště průřezu kloubového hřídele z jeho osy otáčení. Další průhyb roste progresivně a může dojít k ulomení hřídele. V průběhu provozu dochází rovněž ke změně (snižování) kritických otáček v souvislosti s opotřebením a růstem osově vůle kloubového hřídele. Maximální provozní otáčky se musí pohybovat pouze v rozmezí 50 – 80 % kritických otáček.

Převodovky, přídatné převodovky, rozvodovky, diferenciály a kolové redukce

Převodovky, přídatné převodovky, rozvodovky, diferenciály a kolové redukce jsou skupiny převodů, které umožňují:

- změnu velikosti a smyslu přenášeného točivého momentu,
- dlouhodobé přerušení točivého momentu,
- rozdělení točivého momentu na jednotlivá kola stejné nápravy, popř. skupiny náprav,
- vyrovnat rozdíly v otáčkách kol, vzniklých při jízdě vozidla vlivem nestejných drah (v zatáčkách, na nerovné vozovce aj.),
- pohon všech účelových zařízení (naviják aj.),
- zvětšení světle výšky vozidla aj.

Během provozu dochází v uvedených skupinách převodů k změnám technického stavu, které spočívají v postupném opotřebení funkčních ploch (zubů) ozubených kol, zvětšování vůlí v drážkování hřídelů, opotřebení ovládacích mechanismů, opotřebení ložisek, stárnutí, opotřebení, popř. zničení těsnících kroužků aj. Prakticky se změny technického stavu projevují:

a) V ovládacím ústrojí převodů:

- porušení seřízení (mechanického pákového, popř. elektropneumatického ústrojí řazení aj.),
- porušení funkce pojistného zařízení převodových stupňů (prasklá pružina aj.),
- netěsnosti v pneumatické soustavě elektropneumatických ventilů,
- poruchy elektrického zapojení elektropneumatických ventilů,
- nedostatek tlakového vzduchu,
- poruchy ozubených kol a synchronizačních spojek,
- nemožnost zařadit převodový stupeň, uzavřít diferenciál, přední náhon aj., resp. s vynaložením nepřiměřené síly.
- dochází k samovolnému vysouvání ("vyskakování") převodových stupňů aj.

b) Ve skupinách převodového ústrojí:

- změny seřízení (porušení seřízení) záběru ozubených kol stálého záběru (pastorky a talířová kola aj.) a ostatních ozubených kol,
- deformace hřídelů a poruchy ložisek,
- mechanické ztráty v převodovkách, vznik polosuchého až suchého tření, nadměrný vzrůst teploty a tlaku oleje a další nepříznivé skutečnosti vzniklé vlivem malého nebo příliš velkého množství olejové náplně,
- abrazivní opotřebení ozubených kol, poškození ložisek, hlučnost převodů aj. vlivem nevhodné kvality mazacího oleje,
- stárnutí olejových náplní, snížení viskozity olejů a zhoršení jejich mazací schopnosti, snížení životnosti pryžových těsnících součástí aj. vlivem přehřívání převodného ústrojí aj.

10. 2 Diagnostika převodových ústrojí

a) Subjektivní metody

- **vizuální kontrola** převodového ústrojí - je základním způsobem kontroly, který umožňuje odhalovat poruchy velmi pracně objektivními metodami zjistitelné, např. "spálení" spojkového obložení, mechanické poškození kloubového hřídele, únik maziva, netěsnost skříní, trhliny, zjevné deformace, poškození povrchové úpravy, korozi aj. Povrch sledované součásti, např. skříní převodovky, očistíme a nakřídujeme - průběh hledané trhlinky se nám zřetelně vykreslí. Jednoduchým vizuálním způsobem

lze mnohdy diagnostikovat vnější projevy relativně složitých vnitřních změn mechanismů.

- **technická stetoskopie** - pro subjektivní posouzení stavu skupin převodů vzhledem k jejich hlučnosti, rázům aj. se využívá stetoskopu, který snímá a zesiluje vibroakustické signály,
- **technická endoskopie** - využívající technického zařízení, tzv. endoskopu obr. 10. 8, který umožňuje vizuální kontrolu stavu uvnitř skupin převodného ústrojí, např. stavu ozubených kol převodovky.

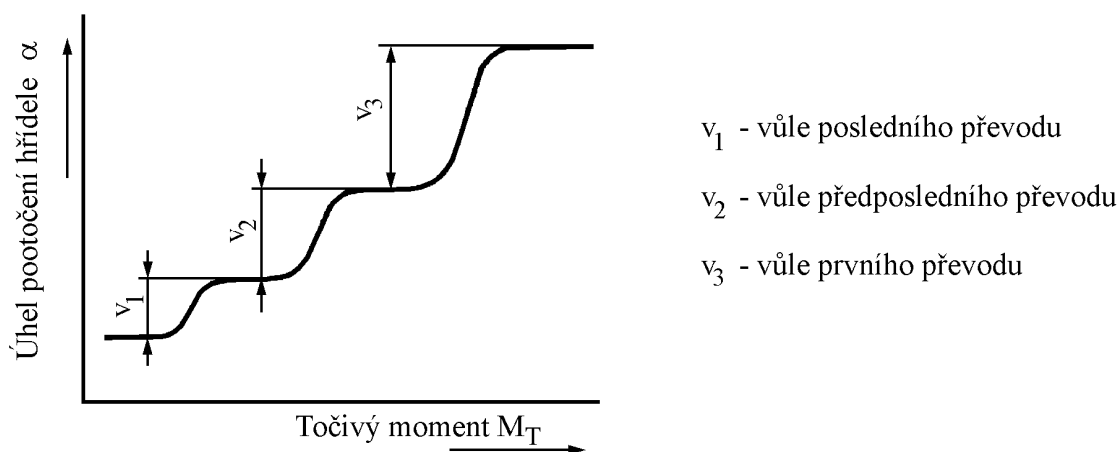


Obr. 10. 8 Technický endoskop s pevným tubusem

V běžné praxi je použití endoskopu značně omezeno, protože konkrétní provedení převodovek, rozvodovek, spojek aj. je natolik kompaktní, že pro tubus endoskopu nebývá místo. Nouzově se využívají nalévací, kontrolní a odvzdušňovací otvory apod. Možnost širšího využití technické endoskopie se objevuje v souvislosti s rozvojem optoelektroniky. Svazek světelně vodivých vláken dokáže vést světelný obraz a přivést světelný tok do objektivu. Běžně se začínají využívat endoskopy s flexibilními světlovody, spojené s obrazovkou průmyslové televize.

b) Objektivní metody

- **celková vůle v převodech**, je nejjednodušším způsobem získání vícerozměrné diagnostické informace. Při měření celkové vůle v převodech se zvedne hnací kolo (kola) na jedné straně vozidla tak, aby jím bylo možno volně otáčet, zařadí se převodový stupeň. Ručním pootočením zvednutého kola na dorazy v obou směrech zjistíme celkovou vůli, buď v podobě délkové míry na obvodě pneumatiky, nebo v podobě úhlu pootočení kola. Takto naměřená vůle je úměrná celkové vůli v zařazených převodech. Výhodnější je protáčet hnacím kolem pomocí citlivého dynamometrického klíče. Při protáčení z jedné krajní polohy do druhé měříme stupňovitě se zvyšující točivý moment v závislosti na tom, jak se jednotlivé páry ozubených kol dostávají po postupném vymezení vůlí do záběru. Lze tedy měřit složky celkové vůle tvořené vůlemi jednotlivých párů ozubených kol. Tyto složky jsou od sebe odděleny výrazným vzrůstem točivého momentu, potřebného k protáčení, viz obr. 10. 9.

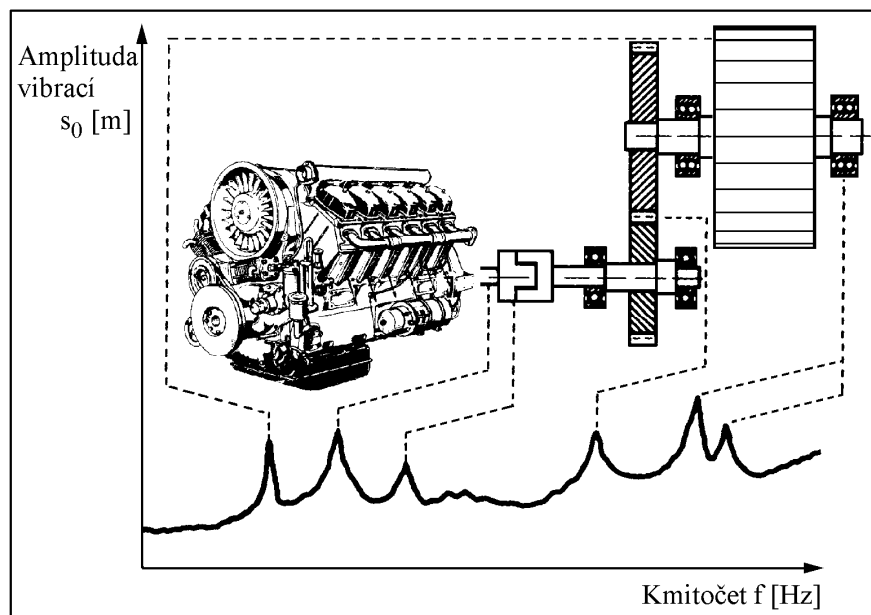


Obr. 10. 9 Přímé měření vůlí převodového ústrojí

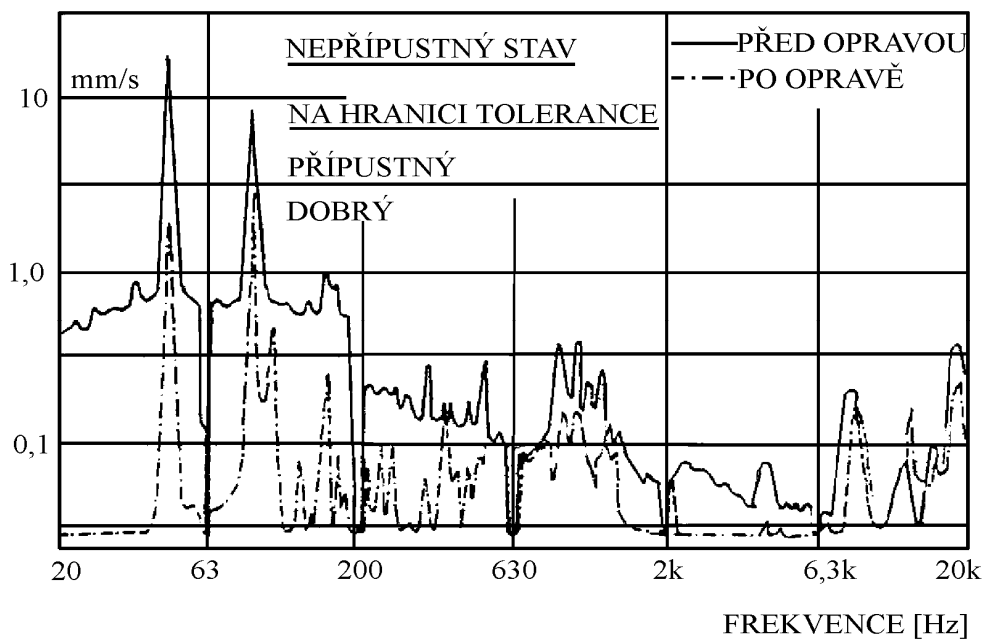
Přesnost metody je asi 10 %, což je mnohdy přijatelné vzhledem k ostatním výhodám metody, zejména její nenáročnosti. Porovnání vůlí při různých zařazených převodových stupních lze stanovit vůle všech ozubených soukolí převodného ústrojí. Jistým nedostatkem je skutečnost, že vůle každého soukolí ovlivňují dva parametry tj. vůle v ozubení a vůle v ložiskách. Tento vliv bychom měli rozlišit, neboť vůle ložisek roste progresivněji.

- **vibroakustický signál** má u mechanických převodů významné použití pro svoji univerzálnost, schopnost rozpoznat poškození a lokalizovat jeho místo. Ozubená

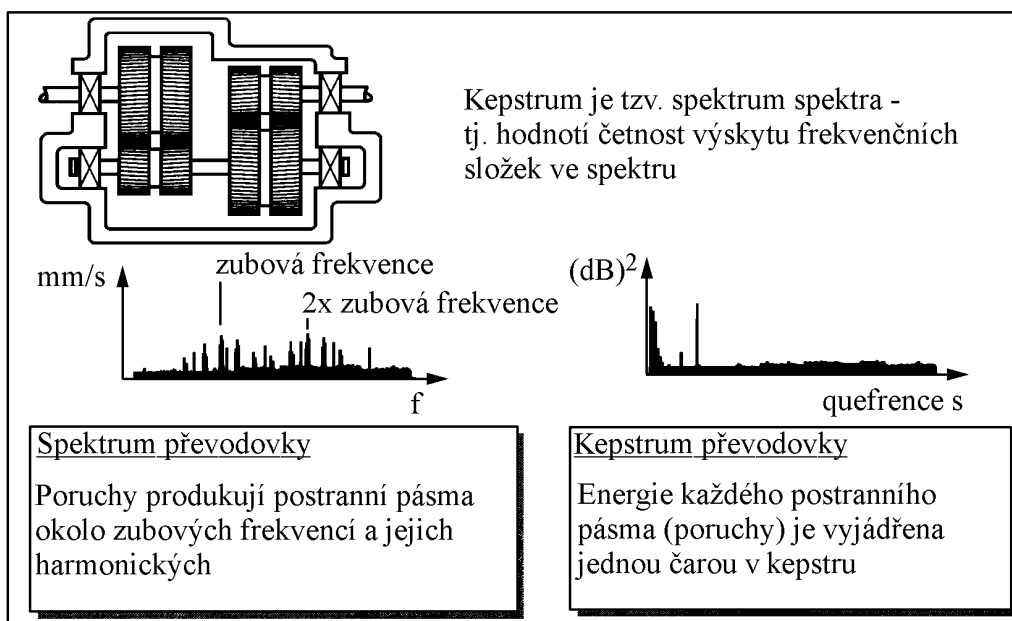
soukolí způsobují při pracovní činnosti vibrace, šířící se hmotou převodovky a vzduchem v podobě akustického signálu. Příčinou je pružnost materiálu ozubení, vzájemný pohyb zubů při záběru, odchylky roztečí a profilu zubů aj. Pružnost zubů způsobuje, že zuby zatížené v záběru určitou silou se ohýbají. Během záběru jednoho páru zubů se dotkový bod přemísťuje na hnacím kole od paty k hlavě zubu a na hnaném kole od hlavy k patě zubu. Určitou deformací se nepatrně mění rozteč k dalšímu nezatíženému zubu. Tento další zub přichází do záběru ze zubem druhého kola dříve a naráží na něj. Nárazy doprovázené vibracemi jsou tím větší, čím více jsou zuby opotřebený nebo nesprávně vyrobeny. Vzájemné odvalování zubů provází skluz, který v pólu záběru mění svůj smysl. Třecími silami se zuby rozkmitávají, což vede ke vzniku akustického signálu. Tento signál, zejména v ultrazvukovém pásmu, umožňuje kvalitativní rozlišení místa poruchy a kvantitativní stanovení jejího rozsahu. K tomuto účelu se na určená místa převodovky umísťují vlnovody, které snímají ultrazvukové signály. Příklad praktické realizace vibroakustické diagnostiky převodovky automobilu je na obr. 10. 10 – 10. 12.



Obr. 10. 10 Příklad přiřazení dominantních frekvencí jednotlivým uzlům převodového ústrojí



Obr. 10. 11 Příklad frekvenční amplitudové charakteristiky převodovky



Obr. 10. 12 Příklad vyhodnocení poruchy převodovky

Jak vyplývá z mechanismu vzniku vibroakustických signálů, je třeba, aby převodovka (převodné ústrojí) byla při diagnostice plně zatížená. Toho lze dosáhnout na válcové zkušebně, popř. na speciálním stavu. Měřicí zařízení vibroakustické diagnostiky se skládá obvykle ze snímače kmitů, registrujícího dráhu, rychlost a zrychlení, bloku rozdělovače signálu na jeho části (frekvenční pásmová filtrace a časová filtrace), bloku měření parametrů

signálu, bloku ovládání a bloku identifikace s přímým odečítáním nebo s registrací výsledků diagnostiky. Technický stav převodového ústrojí je dán amplitudou akustického impulsu a jeho postavením na časové ose, resp. jeho fázovým posunem na časové ose. Fázový posun se udává v úhlu pootočení sledované součásti a není tedy závislý na otáčkách, ale na konkrétním místě opotřebení, např. ozubeného kola.

Současné přístroje pro snímání a analýzu vibroakustického signálu jsou schopny aplikace na mechanické převodovky, rozvodovky, diferenciály, kolové redukce a spojky. Jiným problémem zůstává složitost přístrojů a diskutabilní přesnost měření.

- **obsah nečistot v oleji** je velmi významným diagnostickým parametrem zejména u převodovek, kdy charakterizuje celkový vliv postupně narůstajícího opotřebení. Určitým problémem je lokalizace poškození, protože chemické složení ozubených kol a valivých ložisek se od sebe odlišuje pouze nepatrně, resp. jednotlivá ozubená kola jsou vyrobena ze stejných materiálů. Podrobnosti zjišťování a hodnocení obsahu nečistot (zplodin otěru) v převodovém oleji jsou uvedeny v předchozích kapitolách.
- **teplota převodového oleje a tělesa převodovky.** Zvýšení teploty převodového oleje a tělesa převodovky je způsobeno jejím ztrátovým výkonem. Protože však ztráty výkonu, a tedy i převod tepla, bývají relativně malé a možnosti odvodu tepla do okolního prostředí nejsou jednoznačně definovatelné, je ustálená hodnota teploty oleje nepřesným parametrem, charakterizujícím celkový technický stav převodovky. Významnější místo zde mají hodnoty oteplení jednotlivých ložisek. Porovnání teplot stejných ložisek pracujících v páru, např. umožňuje získat informaci signalizující havarijní opotřebení ložiska.
- **točivý moment přenášený spojkou.** Nejjednodušším způsobem se prověří tak, že při zabrzděném vozidle, zařazeném nejvyšším převodovém stupni a plném sešlápnutí akceleračního pedálu se spojkový pedál pozvolna uvolní, přičemž motor se musí zastavit. Za poněkud drastických podmínek se zde vlastně zkouší, zda spojka je schopná přenést maximální točivý moment motoru. V praxi je však potřebné, aby spojka přenesla točivý moment větší, avšak nikoli za uvedených podmínek, ale za relativního klidu třecí lamely vůči přítláčnému kotouči. Nedostatkem měření točivého momentu přenášeného spojkou je skutečnost, že nezjistíme, do jaké míry je obložení lamely opotřebeno. Pouze v krajním případě, kdy se do styku s přítláčnými kotouči dostávají nýty, výrazně klesá přenášený točivý moment. Pokles točivého momentu však může být zaviněn též znečištěním lamely olejem, což nelze rozlišit.

11. APLIKACE METOD TECHNICKÉ DIAGNOSTIKY V PROVOZU A ÚDRŽBĚ PODVOZKŮ VOZIDEL

Podvozek vozidla tvoří rám s podvěsy, řízením, brzdným zařízením a příslušenstvím. Podvěs tvoří nápravy s koly, pérováním, brzdami, nosnými a suvnými částmi podvěsu a s rejdovým ústrojím. Z hlediska bezpečnosti jsou nejdůležitějšími částmi podvozků brzdy a řízení.

11. 1 Požadavky na technický stav vybraných částí podvozku

Požadavky na technický stav brzd

Technický stav brzd musí být z hlediska bezpečnosti provozu v souladu s platnou legislativou, tj. v době zpracování materiálu se Zákonem č. 38/1995 Sb. O technických podmínkách provozu silničních vozidel na pozemních komunikacích, který navazuje na Předpis EHK/OSN a dále Zákony č. 102/1995 Sb., 103/1995 Sb., 56/2001 Sb., Vyhláškami 301/2001Sb., 302/2001Sb. a 341/2002Sb., aj. Na rozdíl od většiny ostatních strojních prvků podvozku je u brzdové soustavy normativ technického stavu ztotožněn se zákonným ustanovením a je bez právního postihu nepřekročitelný.

Vozidlo musí být vybaveno nejméně dvěma na sobě nezávislými brzdami, z nichž jedna umožňuje účinné a spolehlivé zastavení - provozní brzda a druhá zajišťuje udržení stojícího vozidla - parkovací brzda. Dále musí být automobily vybaveny nouzovou brzdou, která umožňuje jejich zastavení při poruše provozní brzdy. Z kvalitativního hlediska musí brzdění plnit následující úkoly:

- provozní brzdění musí umožnit ovládání pohybu vozidla a jeho účinné, spolehlivé a rychlé zastavení při všech velikostech zatížení a rychlosti a na všech svazích, které v provozu přicházejí v úvahu,
- nouzové brzdění musí umožňovat zastavení vozidla při poruše provozní brzdy,
- parkovací brzdění musí umožnit udržení stojícího vozidla nebo soupravy na svahu (ve stoupání nebo klesání) i za nepřítomnosti řidiče,
- průběžné brzdění vozidel spojených do soupravy je ovládáno jediným orgánem, jedním a týmž zdrojem energie a zajišťuje současné nebo přiměřeně časově odstupňované brzdění jednotlivých vozidel soupravy,
- odlehčovací brzdění umožňuje omezení rychlosti vozidla nebo její udržení při sjíždění svahu - jeho úkolem není zastavit vozidlo,
- samočinné brzdění musí zastavit přípojná vozidla při poruše spojení, včetně zlomu zařízení pro spojení vozidel, aniž by byl ohrožen brzdný účinek zbývajících částí soustavy.

Souhrnným ukazatelem technického stavu brzd je účinek brzdění, souměrné působení brzd a ovládací síla na pedálu při provozním brzdění. Příslušná legislativa zahrnuje 4 typy zkoušek, a to: základní zkoušku pro brzdné účinky – typu „0“, zkoušku zmenšování brzdného účinku – typu „I“, zkoušku chování při brzdění na dlouhých klesáních – typu „II“ a zkoušku brzdných vlastností na dlouhém svahu bez užití provozní, nouzové a parkovací brzdy – typu „IIA“.

Účinek brzdění v rámci diagnostiky se stanovuje při studených brzdách jedním ze dvou rovnocenných způsobů:

1. Měřením brzdné dráhy v závislosti na počáteční rychlosti vozidla na zkušební vozovce, viz tab. 11. 1.
2. Měřením prodlevy a náběhu brzdění a středního plného zpomalení v dílenských podmínkách, viz tab. 11. 2.

Tab. 11. 1 Vybrané legislativní požadavky pro provozní a nouzové brzdy na zkušební vozovce (zkouška 0 s odpojeným motorem)

P a r a m e t r y			Jednotka	Osobní automobily M_1	Auto-busy $M_2 - M_3$	Nákladní automobily aj. s konstrukční rychlostí nad 25 km/h $N_1 - N_3$		
						do 3,5 t	3,5 – 12 t	Nad 12 t
Maximální přípustná síla v ovládacích orgánech	ovládání nožní		N	500	700	700	700	700
	ovládání ruční		N	400	600	600	600	600
Max. brzdná dráha	předepsaná	rychlost v_0	km h ⁻¹	80/80	60/60	80/70	60/50	60/40
		provozní brzdění	m	50,7	36,7	61,2	36,7	36,7
		nouzové brzdění	m	93,3	64,4	95,7	51,0	33,8
	vypočtená podle konstant a & b v případě, kdy je nutno volit nižší v_0 danou max. rychlostí vozidla		a (-)	0,1	0,15	0,15	0,15	0,15
		b (-)	150/150	150/130	150/115	150/115	150/115	
Parkovací brzdění musí zabránit protáčení kol ve svahu nejméně			%	18	18 - samotné vozidlo 12 – souprava			

Poznámka:

První údaj pro rychlost v_0 a součinitel b platí pro provozní brzdění a druhý údaj pro nouzové brzdění.

Přitom platí vztah pro výpočet brzdné dráhy při provozním brzdění

$$s = av_0 + \frac{v_0^2}{b} \quad (11.1)$$

a při nouzovém brzdění

$$s = av_0 + \frac{2v_0^2}{b} \quad (11.2)$$

Tab. 11. 2 Vybrané legislativní požadavky pro zkoušku brzd v dílenských podmínkách

P a r a m e t r y			Jed- not- ka	Osob- ní auta M ₁	Auto- busy M ₂ – M ₃	Automob. s rychl. >25 km/h N ₁ – N ₃
Prodleva a náběh provozního brzdění	Max. doba od začátku působení na brzdu do dosažení 75% asymptotické hodnoty tlaku u nejnepříznivěji umístěného brzdového válce	Vozidlo neurčené k tahání přívěsu	s	0,5	0,5	0,5
		u soupravy tažného vozidla s přívěsem	s	0,6	0,6	0,6
	U samotného tažného vozidla musí být od počátku působení na ovládací orgán dosaženo v ovládací větvi spojovacího potrubí změny tlaku	o 10% asymptotic- ké hodnoty nejvýše za dobu	s	0,2	0,2	0,2
		o 75% asymptotic- ké hodnoty nejvýše za dobu	s	0,4	0,4	0,4
	U samotného přívěsu, měřeno při simulaci změny tlaku v ovládací větvi rychlostí 2,2 MPa.s ⁻¹ , musí od dosažení tlaku 10% asymptotické hodnoty do 75% uplynout dobu nejvýše			s	0,4	0,4
Střední hodnota plného brzdného zpomalení musí u vozidla nebo soupravy dosáhnout (při plném zatížení, bez blokování kol a předepsané ovládací síle)	Provozní	ms ⁻²	5,8	5,0	5,0	
	Nouzová	ms ⁻²	2,9	2,5	2,2	
	Odlehčovací	ms ⁻²	-	0,6	0,5	
	Parkovací	ms ⁻²	2,9	2,0	2,0	

Legislativně, zejména z hlediska bezpečnosti provozu, jsou stanoveny další požadavky:

- vzduchotlaké brzdové soustavy musí mít přípojky pro kontrolní měření tlaku v soustavě,

- provozní brzda musí působit na všechna kola vozidla a její účinek musí být rozdělen na nápravy souměrně tak, aby nedocházelo k blokování některého z kol a aniž by vozidlo vybočovalo ze směru jízdy,
- u osobních automobilů, autobusů, nákladních automobilů, přívěsů a návěsů musí být účinek provozního brzdění rozdělen na jednotlivé nápravy v mezích předepsaných z hlediska bezpečnosti provozu při jakékoliv okamžité hmotnosti vozidla za různých adhezních podmínek,
- další požadavky jsou stanoveny pro rozdělování brzdných sil na nápravy různých kategorií vozidel, která nejsou vybavena protiblokovacím zařízením (podrobnosti jsou uvedeny např. v EHK č. 13 příloha II).

Požadavky na technický stav řízení

Řízení musí podle legislativních ustanovení o podmínkách provozu vozidel na pozemních komunikacích splňovat následující požadavky:

- snadná, rychlá a bezpečná ovladatelnost. Mechanismus říditelné nápravy (náprav) a geometrie řízení musí být konstruovány a provedeny tak, aby nevznikly kmity a rázy v řízení,
- řízená kola se po projetí zatáčky musí samovolně vracet do přímého směru, popř. síla potřebná k vracení kol do přímého směru musí být podstatně menší než síla pro pohyb do zatáčky,
- řídicí ústrojí nesmí mít větší vůle než:
 - 36° u vozidel s max. rychlostí do 25 km/h,
 - 27° u vozidel s max. rychlostí do 100 km/h,
 - 18° u vozidel s max. rychlostí nad 100 km/h.
- pokud není vozidlo vybaveno posilovačem řízení, pak počet otáček volantu z jedné krajní polohy do druhé nesmí být větší než 5, krajní vychýlení kol musí být omezeno dorazy,
- vozidla, u kterých hmotnost připadající na řízenou nápravu činí nejméně 3,5 t, musí být vybavena posilovačem řízení. Při selhání posilovače musí být možno řídit vozidlo svalovou silou řidiče, která nesmí přesáhnout 600 N,

- všechny součásti řízení a zavěšení kol se smějí opravovat pouze tak, aby nebyla nepříznivě ovlivněna struktura materiálu a aby nebyl materiál z pevnostního hlediska nedovoleně zeslaben. Za ovlivnění struktury materiálu je nutno považovat i prosté rovnání ohybem za studena i za tepla, tj. diagnostické zjištění deformace zpravidla znamená jednoznačný závěr - vyřadit součást z provozu,
- opotřebené části řídicího ústrojí a vzniklé vůle musí být tak malé, aby v žádném případě nehrozilo nebezpečí uvolnění spojení. Kritériem zde není ani funkčnost, ani ekonomika, ale pouze bezpečnost provozu.

11. 2 Diagnostika brzdových soustav

Diagnostika brzdových soustav a jejich částí zahrnuje měření některých z následujících parametrů:

Brzdná dráha měřená na zkušební vozovce

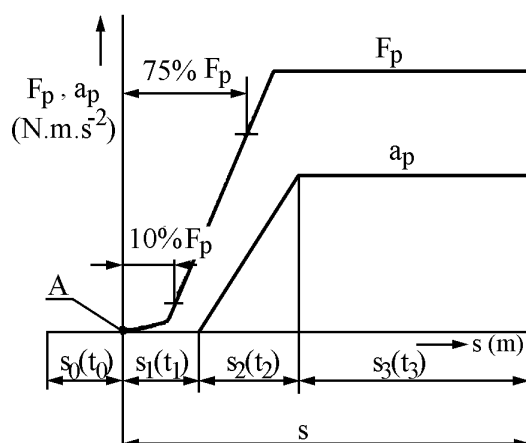
Měření brzdné dráhy na zkušební vozovce je jednou ze základních metod prověrky účinku brzd. Jistým nedostatkem této metody je velká pracnost, závislost na povětrnostních podmínkách a kvalitě zkušební dráhy, popř. nemožnost posoudit účinek brzdění jednotlivých kol vozidla. Zkušební dráha je suchá vozovka s tvrdým a rovným, dostatečně adhezním povrchem, který se při brzdění znatelně nerozrušuje. Pro zkoušku musí být úsek dráhy přímý, nejméně 200 m dlouhý, o sklonu nejvýše 0,5 %. Vozidlo (souprava) se zkouší s předepsaným zatížením, seřízenými brzdami, předepsaným tlakem ve vzduchojemech u vzduchotlakých brzd, na předepsaný tlak nahuštěných pneumatikách aj. Brzdná dráha je dráha projetá vozidlem v době brzdění, tj. od okamžiku, kdy řidič začne působit na pedál brzdy, až do zastavení vozidla, viz obr. 11. 1.

Přesné měření brzdné dráhy vyžaduje relativně složité registrační zařízení (vlečné kolo, značkování barvou palníkovou metodou, bezdotykový snímač dráhy CORREVIT aj.). K vyloučení vlivu sklonu vozovky a větru se provádí zkouška v obou směrech dvakrát. Musí být dodržena počáteční rychlost vozidla s přesností 1 %, ovládací síla na pedál aj. - výsledek se porovná s legislativně stanovenými hodnotami brzdné dráhy (tab. 11. 1), popř. se vypočte podle vzorců pro vozidla s konstrukční rychlostí nižší než stanovené rychlosti v příslušné kategorii.

Pro běžnou praxi postačí měřit brzdnou dráhu tak, že v určitém vymezeném místě vozovky začne vozidlo brzdit z předepsané počáteční rychlosti, odečtené na tachometru.

Délku předepsané brzdné dráhy lze rovněž pro jednotlivé kategorie vozidel na vozovce trvale vyznačit. Přesnost tohoto měření závisí na přesnosti tachometru a reakční době řidiče.

Schéma průběhu brzdění, z něhož jsou příslušné normativy odvozeny, je na obr. 11. 1.



Obr. 11. 1 Schéma průběhu brzdění

Legenda:

A - začátek působení na ovládací orgán, F_p - plná ovládací síla, a_p - plné brzdné zpomalení, $s_0(t_0)$ - reakční dráha, $s_1(t_1)$ - dráha (doba) prodlevy brzd, $s_2(t_2)$ - dráha (doba) náběhu brzd, $s_3(t_3)$ - dráha (doba) plného brzdného zpomalení, $(s_0 + s)$ - dráha pro zastavení, s - brzdná dráha;

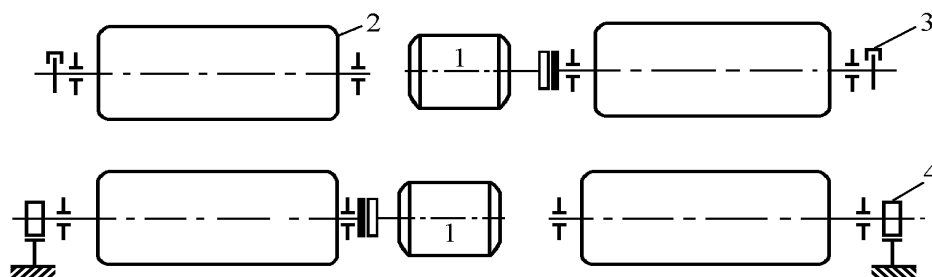
Brzdná dráha měřená na válcové zkušebně

Měřit brzdnu dráhu lze rovněž na speciální (rychloběžné) válcové zkušebně. Princip metody záleží v tom, že válce s velkým momentem setrvačnosti se buď přímo koly vozidla nebo elektromotorem roztočí na předepsanou počáteční obvodovou rychlost dané kategorie vozidla a při brzdění se registruje délka uběhnuté dráhy na obvodu válců až do jejich úplného zastavení. Schéma válcové zkušebny (setrvačnickové) pro měření brzdné dráhy je na obr. 11. 2. Dva páry hnacích válců mají stanovený hmotnostní moment setrvačnosti, který splňuje podmínku

$$I = mr^2 \quad (11. 3)$$

kde r ... poloměr válců,

m ... hmotnost vozidla připadající na prověřovaná kola.



Obr. 11. 2 Uspořádání válcové zkušebny pro měření brzdné dráhy

Legenda: 1 - hnací motor, 2 - válec, 3 - volnoběžka, 4 - snímač otáček válců

Vždy jeden válec každého páru je spojen s hnacím elektromotorem. Aby zkoušené vozidlo mohlo z válců vyjždět vlastní silou, je vždy jeden z válců opatřen volnoběžkou, která umožňuje otáčení pouze v jednom směru, tj. ve smyslu dopředného pohybu vozidla. Na jeden z válců je napojen snímač otáček. Při zkoušení najede vozidlo zkoušenou nápravou na válce. Kola, která jsou mimo válce, je nutno zajistit klíny, neboť se zkouší při vysokých rychlostech, kdy je již nebezpečí vyjetí vozidla z válců působením brzdných sil. Jakmile je dosažena zkušební rychlost, sešlápneme stanovenou ovládací silou brzdový pedál obdobně jako při jízdě zkoušce. Našlápnutím na pedometr se automaticky vypnou elektromotory a kinetická energie otáčejících se válců je mařena brzděním vozidla. Počet otáček válců od okamžiku počátku brzdění, až do zastavení válců, zaznamenávají počítadla. Je-li splněna výše uvedená podmínka ($I = mr^2$), je naměřená dráha na obvodu válců přímo rovna dráze na vozovce. Jinak využijeme údaje počítadel otáček a velikost ovládací síly k vyhodnocení brzdného účinku s rovnicemi, které jsou uvedeny v návodech pro příslušnou válcovou zkušebnu, popř. je najdeme v specializované literatuře.

Brzdná síla na obvodu kol měřená na válcové zkušebně

Při zkouškách brzdové soustavy na válcových pomaloběžných stanicích se měří brzdné síly na obvodech jednotlivých kol. Účinek brzdění se hodnotí podle tzv. poměrného zpomalení (zbrzdění) z , kdy platí

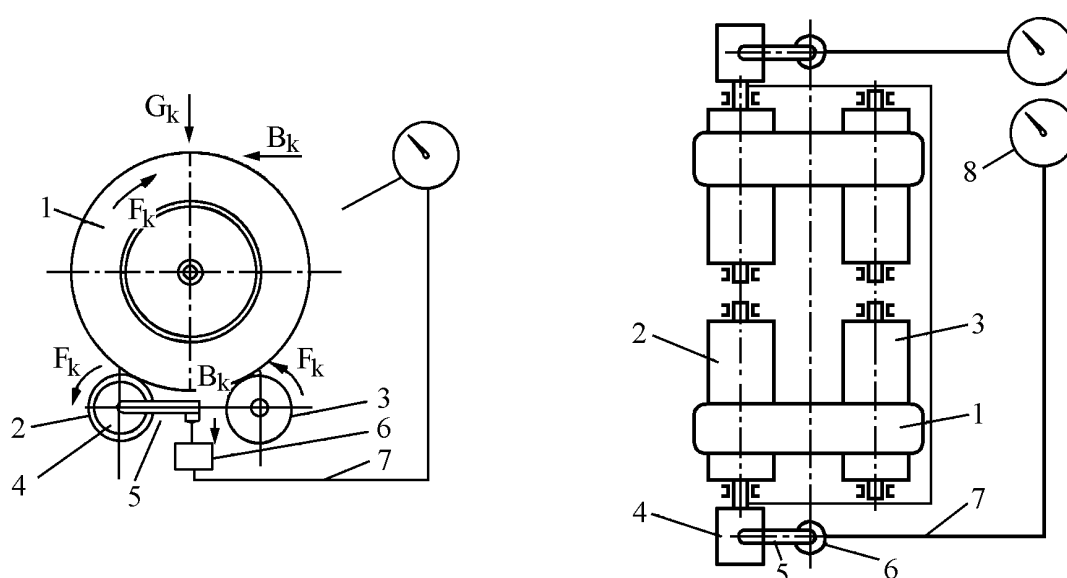
$$z = \frac{\sum B_i}{G} 100 \quad (\%), \quad (11.4)$$

kde $\sum B_i$... součet brzdných sil B_i na obvodech jednotlivých kol,

G ... celková tíha vozidla.

Podle velikosti změřených brzdných sil B_i lze zjistit rozdělení celkové brzdné síly na nápravy a posoudit souměrnost brzdění (rozdíly mezi brzdnými silami na levé a pravé straně nápravy).

Válcovou stolicí pro měření brzdných sil tvoří dva páry hnacích válců, uložených v základové konstrukci, zabudované pod úroveň podlahy. Válce jsou uloženy v rámu; každý z obou párů válců je poháněn samostatným elektromotorem, přičemž elektromotor pohání jeden válec a na druhý válec se otáčivý pohyb přenáší válečkovým řetězem. Mezi elektromotorem a poháněným válcem je převodovka, která není pevně připevněna k rámu, ale natáčí se kolem podélné osy, totožné s osou poháněného válce. Na převodovce je připevněno momentové rameno, jehož vnější konec se opírá o snímač síly, viz obr. 11. 3.



Obr. 11. 3 Válcová stolice pro měření brzdných sil

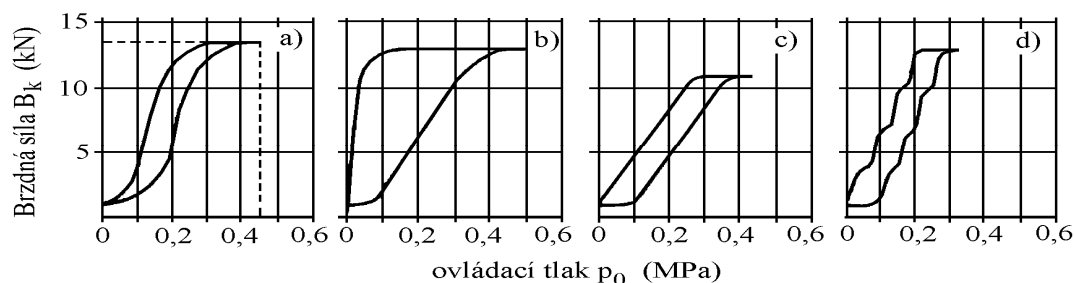
Legenda:

1 - kolo vozidla, 2 - zadní válec, 3 - přední válec, 4 - elektromotor s převodovkou, 5 - momentové rameno, 6 - snímač, 7 - převod na měřicí systém (hydraulický, elektrický, pneumatický aj.), 8 - ukazatel brzdných sil, B_k - brzdná síla na obvodě kola působící proti směru hnací síly, F_k , G_k - tíha vozidla připadající na kolo

Při zkoušce najede vozidlo na měřicí válce, motor neběží, kola se roztočí na stálou rychlost válci poháněnými elektromotory. Brzdná síla, působící na obvodu brzděného kola, vyvolá reakční moment, který působí proti otáčení kola a je úměrný brzdné síle. Reakční moment způsobí natočení hnací jednotky. K měření lze rovněž použít elektrický způsob, který

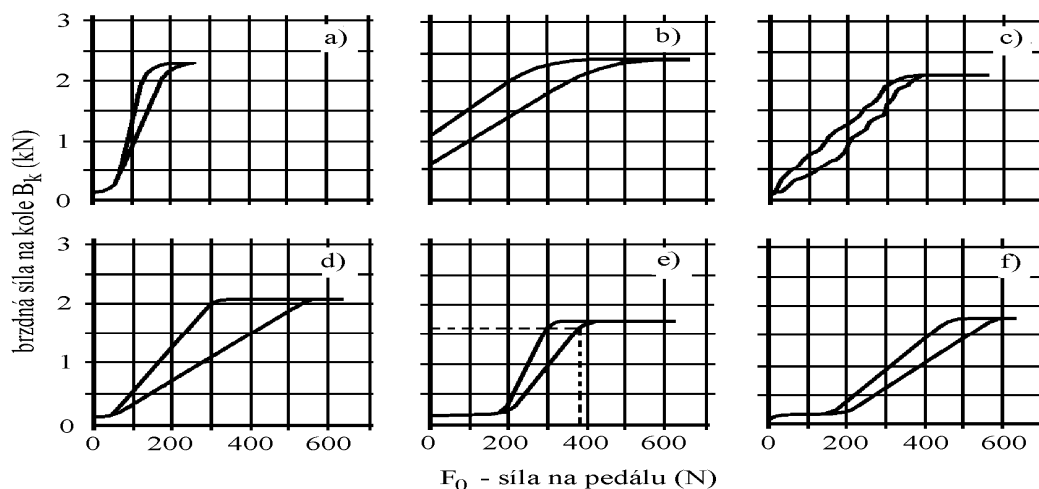
je založen na skutečnosti, že se zvětšující se brzdou silou se zvětšuje příkon elektromotorů, potřebný k udržení konstantní rychlosti otáčení válců. Měřicím přístrojem je v tomto případě wattmetr, který měří příkon elektromotoru, ocejchovaný v jednotkách síly [N].

Při měření brzdných sil na válcích je nutno současně měřit ovládací tlak (vzduchové brzdy) nebo ovládací sílu na pedálu brzdy (kapalinové brzdy). Záznam z měření účinku brzd nákladního automobilu se vzduchovými brzdami je na obr. 11. 4 Z něho můžeme posoudit funkci brzd jednotlivých kol, souměrnost brždění mezi levou a pravou stranou a rozdělení celkové brzdné síly na nápravy vozidla. Na obr. 11. 5 je uveden záznam z měření účinku brzd osobního automobilu s kapalinovými brzdami, kde je vynesena závislost brzdných sil na ovládací síle.



Obr. 11. 4 Měření brzdných sil nákladního automobilu

Legenda: *a - levé přední kolo: dobrý stav brzdy, b - pravé přední kolo: velká hystereze brzdy, c - levé zadní kolo: pomalý nárůst brzdné síly ("tvrdá" brzda) d - pravé zadní kolo: ovalita (házivost) brzdového bubnu*

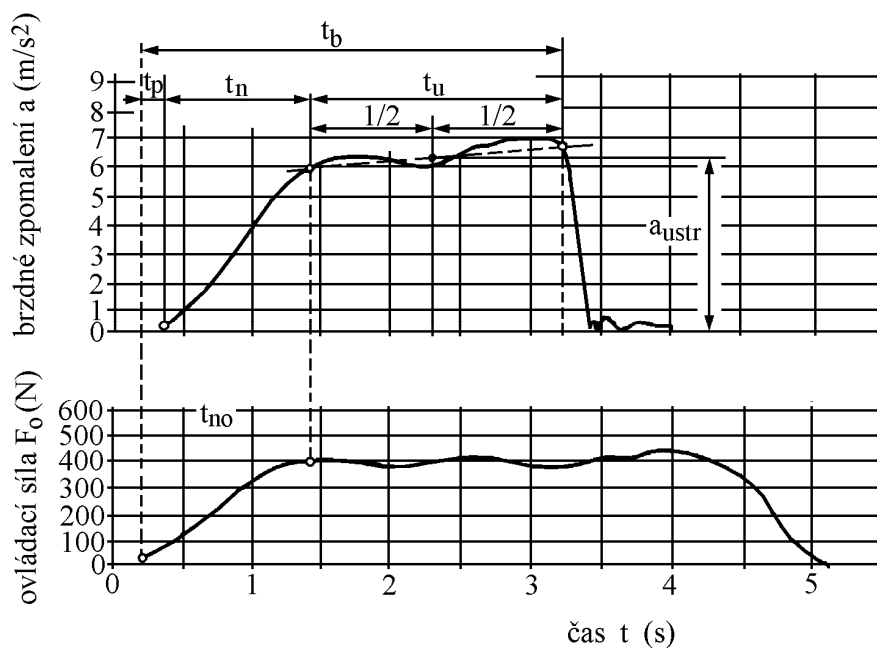


Obr. 11. 5 Měření brzdných sil osobního automobilu

Legenda: *a* - dobrá funkce, *b* - brzda trvale brzdí, *c* - nadměrná ovalita brzdového bubnu, *d* - nadměrná hysterese, *e* - silné vratné pružiny, *f* - mastná brzda

Brzdné zpomalení měřené decelerometrem

Pro pravidelné informativní prověrky účinku brzd je možno využít měřič zpomalení - decelerometr. Decelerometry jsou konstruovány na působení setrvačné síly hmoty závaží nebo kapaliny, proti síle pružiny nebo proti gravitační tíze aj. Poloha závaží nebo hladina kapaliny je v přímém vztahu k okamžité hodnotě zpomalení. Přístroj se pouze jednoduše umístí na podlahu vozidla a podle jeho polohy ke směru jízdy působí buď jako akcelerometr, nebo jako decelerometr. Určitou nevýhodou decelerometru je to, že podobně jako při přímém měření brzdné dráhy nelze rozlišit vliv jednotlivých brzděných kol na výsledné zpomalení. Decelerometry jsou vybaveny registračním zařízením (decelerografy). Příklad záznamu měření je na obr. 11. 6.



Obr. 11. 6 Záznam měření decelerografem

Ze záznamu lze vyhodnotit hodnotu max. zpomalení, střední hodnotu plného brzdného zpomalení a velikost ovládací síly na pedál. Konkrétně doba prodlevy brzd $t_p = 0,2$ s; doba náběhu brzd $t_n = 0,1$ s; doba plného brždění $t_u = 1,85$ s; celková doba brždění $t_b = 3,05$ s; střední plné brzdné zpomalení $a_{ustr} = 6,3 \text{ ms}^{-2}$; max. ovládací síla na pedál $F_{omax} = 400$ N; doba náběhu ovládací síly $t_{no} = 1,2$ s.

Vyhodnocení účinků brzd – zbrzdění

Zbrzdění Z , zjišťované pomocí válcových zkušeben, je hodnotou, kterou porovnáváme s odvozenou hodnotou pro úplné zpomalení z příslušné vyhlášky. Zbrzdění Z je podíl součtu dosažených brzdných sil při stejné ovládací síle a tíhy zkoušeného vozidla v %.

$$z = \frac{\sum F_B}{G} \cdot 100 = \frac{\sum F_B}{m \cdot g} \cdot 100 \quad (\%) \quad (11.5)$$

kde $\sum F_B$ - součet brzdných sil všech kol, zjištěných na zkušebně (N),

G - tíha vozidla, tj. \sum nápravových sil (N),

m - celková hmotnost vozidla při zkoušce (včetně řidiče) (kg),

g - gravitační zrychlení ($9,81 \text{ m/s}^2 \doteq 10 \text{ m/s}^2$).

V uvedené vyhlášce nejsou již uváděna minimální plná brzdná zpomalení, a proto je potřebné je odvodit ze vztahu pro brzdnu dráhu při dané rychlosti. Brzdnou sílu je možno vyjádřit jako každou sílu součinem hmotnosti a zrychlení, platí

$$F_B = m \cdot a \quad (11.6)$$

kde a ... brzdné zpomalení (m/s^2)

Pro zbrzdění po dosažení pak vyplývá:

$$z = \frac{\sum F_B}{G} \cdot 100 = \frac{m \cdot a}{m \cdot g} \cdot 100 = \frac{a}{g} \cdot 100 \doteq \frac{a}{10} \cdot 100 \doteq 10 \cdot a \quad (\%) \quad (11.7)$$

Minimální hodnota zbrzdění z (%) se pak rovná přibližně desetinásobku hodnoty příslušného plného brzdného zpomalení.

Příklad:

Provozní brzdy (tab. 11. 1 a 11. 2) mohou mít maximální brzdnu dráhu u vozidel M_1 rovnou 50,7 m při počáteční rychlosti $v_o = 80 \text{ km/h}$. Přípustná brzdna dráha s je pro tento případ dána vztahem

$$s = 0,1 \cdot v_o + \frac{v_o^2}{150} 2a3,6^2 = 150 \Rightarrow a = 5,8 \text{ m/s}^2, \quad (11.8)$$

kde s ... brzdňá dráha (m),

v_o ... rychlost (km/h).

Druhý člen pravé strany vzorce odpovídá střední hodnotě plného brzdňého zpomalení $5,8 \text{ m/s}^2$ což vyplývá ze vztahu $2a3,6^2 = 150 \rightarrow a = 5,8 \text{ m/s}^2$.

Mají-li vyhovovat brzdy osobních automobilů podle výše uvedených podmínek, musí být zbrzdění $z \geq 58\%$. ($z \geq 59,1\%$ přesně). Obdobně lze odvodit hodnoty zbrzdění i pro všechny ostatní případy, uváděné v platném zákonu (vyhlášce).

Příklad:

Osobní automobil o pohotovostní hmotnosti $m_p = 790 \text{ kg}$ měl naměřené hodnoty brzdňých sil LP 2000 N, PP2500 N, LZ1600 N, PZ1800 N. Pro celkovou hmotnost vozidla se uvažuje s řidičem o hmotnosti $m_r = 75 \text{ kg}$.

$$z = \frac{\sum F_B}{G} \cdot 100 \quad G = m \cdot g = (m_p + m_r) \cdot g$$

$$z = \frac{7900 \cdot 100}{(790 + 75) \cdot 9,81} = 93,1\% \quad \rangle \quad 58\% \quad - \text{ zbrzdění vyhovuje;}$$

Souměrnost působení brzd

Zjišťuje se pro každou nápravu zvlášť a používají se výsledky změřených brzdňých sil na válcové zkušebně. Brzdňý účinek musí být rozdělen souměrně k podélné ose vozidla, aby nedošlo k vybočení vozidla ze směru jízdy při brzdění. Brzdňé síly se na obvodu levého a pravého kola mohou lišit maximálně o 30%, počítáno z větší hodnoty.

Nesouměrnost N je dána vztahem

$$N = \frac{F_{B1} - F_{B2}}{F_{B1}} \cdot 100 (\%) \quad (11.9)$$

F_{B1} ... větší brzdňá síla (na jedné straně nápravy) (N),

F_{B2} ... menší brzdňá síla (N).

Nesouměrnost je v praxi vyhodnocována pomocí grafů nebo nomografů.

Příklad:

- na levém předním kole $F_B = 2000 \text{ N}$

- na pravém předním kole $F_B = 2500 \text{ N}$

$$N = \frac{2500 - 2000}{2500} \cdot 100 = 20\% < 30\%, \text{ hodnota nesouměrnosti vyhovuje.}$$

Hodnocení výsledků zkoušek na válcových zkušebnách

Kapalinové brzdy přímočinné

Jsou vyhodnocovány shodně, jak bylo uvedeno výše podle základních vztahů, neboť jsou používány převážně u osobních automobilů, kde celková hmotnost plně zatíženého vozidla se výrazně neliší od celkové hmotnosti při zkoušce a provoz vozidla s 1 nebo 2 osobami je běžný. K podstatným rozdílům může dojít u užitkových modifikací osobních vozidel a u vozidel užitkových (nákladních), která jsou zkoušena bez nákladu.

U některých vozidel s kapalinovými brzdami, plně nezatížených, se dosáhne při zkoušce hranice blokování již při velmi malé ovládací síle na pedálu brzdy. Jelikož lze uvažovat s přibližně lineární závislostí mezi ovládací silou a dosaženými brzdnými silami, lze vypočítat hodnoty brzdných sil při největší přípustné ovládací síle a tedy při maximální celkové hmotnosti (včetně nákladu) m_c a z toho pak stanovit zbrzdění z . Při výpočtu je nutno uvažovat se silou působící na pedál brzdy při překračování pasivních odporů v brzdové soustavě (pružiny, tření pístů a manžet, tření čelistí o vodítka apod.), projevující se jako tzv. prodleva brzdy. Pro výpočty zbrzdění z se uvažuje síla na překonání prodlevy brzdy $F_{op} = 50$ N, její hodnotu lze zjistit z grafu zkoušky brzd na válcové zkušebně.

Pro vozidlo s přímočinnými kapalinovými brzdami platí

$$z = \frac{\sum F_B}{G} \cdot 100 \cdot \frac{F_{om} - F_{op}}{F_{os} - F_{op}} \quad (\%) \quad (11.10)$$

kde $\sum F_B$... součet brzdných sil na obvodu všech kol, dosažených při stejné skutečné

ovládací síle F_{os} při zkoušce (N),

G ... celková tíže vozidla při max. dovoleném zatížení (N),

F_{om} ... maximální přípustná ovládací síla (N) (F_{om} pro užitková vozidla = 688,5 N, pro osobní vozidla $F_{om} = 490$ N),

F_{os} ... skutečná ovládací síla na pedál, při které byly odečteny brzdné síly (N),

F_{op} ... síla k překonání prodlevy (až 50 N) (N).

Hodnoty jednotlivých brzdných sil F_B lze získat z grafů extrapolací přímkové části závislosti brzdné síly na ovládací síle, jako průsečík souřadnice max. přípustné ovládací síly F_{om} s extrapolovanou přímkou závislosti $F_o - F_B$

Kapalinové brzdy s posilovačem (vzduchokapalinové apod.)

U těchto brzd není lineární závislost mezi ovládací silou a dosaženými brzdnými silami. Proto je nutno provádět zkoušky brzd při plném zatížení. Při měření je nutno použít pedometr pro měření brzdných sil na přední i zadní nápravě, při stejné ovládací síle.

Posouzení účinnosti brzd ze zbrždění z vychází ze základního vztahu

$$z = \frac{\sum F_B}{G} \cdot 100 \quad (\%) \quad (11. 11)$$

Činnost posilovače se ověřuje během zkoušek účinku provozní brzdy na válcové zkušební tak, že se porovnají výsledky měření brzdných sil v závislosti na ovládací síle s posilovačem vyřazeným.

Vzduchotlakové brzdy

Při zkoušení účinnosti vzduchotlakových brzd nezatížených vozidel dochází k blokování kol podstatně dříve než je dosaženo maximálních brzdných sil nutných pro brždění plně zatíženého vozidla. Brzdné síly u těchto brzd nemají lineární závislost na ovládací síle pedálu, nýbrž na ovládacím tlaku vzduchu v brzdových válcích. Proto i na válcových zkušebnách je tento ovládací tlak měřen a v grafech brzdných účinků je závislost „ovládací tlak – brzdná síla“. Tato závislost je takřka lineární a lze ji využít ke stanovení zbrždění z pro plně zatížené vozidlo extrapolací přímkové části grafu zkoušky brzd vozidla, nezatíženého obdobně jako u kapalinových brzd

$$z = \frac{\sum F_B}{m_c \cdot g} \cdot 100 \cdot \frac{(p_v - p_p)}{(p_o - p_p)} \quad (\%) \quad (11. 12)$$

kde $\sum F_B$... součet brzdných sil zjištěných na válcové zkušební při stejném ovládacím tlaku p_o (N),

m_c ... celková hmotnost, tj. vozidla plně zatíženého (kg),

g ... tíhové zrychlení (9,81 m/s²),

- p_v ... výpočetní tlak vzduchu:
 - 0,45 MPa pro jednookruhové soustavy s $p_j = 0,60$ MPa,
 - 0,60 MPa pro dvouokruhové soustavy s $p_j = 0,80$ MPa.
- p_p ... tlak prodlevy brzdy – uvažuje se jednotně 0,04 MPa,
- p_o ... ovládací tlak vzduchu, při němž jsou stanoveny hodnoty F_B (MPa).

Výpočetní tlak vzduchu p_v je nižší o 0,15 MPa, eventuálně o 0,25 MPa proti jmenovitému tlaku p_j , neboť takto je zajišťován určitý bezpečnostní koeficient, zahrnující jistou nelineárnost závislosti $p_o - F_B$, pokles tlaku vzduchu při několikerém použití brzdy v krátkém intervalu, ztráty tlaku v brzdě a vedení (potrubí, ohyby aj.). Z grafů zkoušky brzd lze obdobně, jak bylo uvedeno u kapalinových brzd, stanovit souřadnici p_v hodnoty F_B maximální a z nich stanovit nesouměrnost, případně určit zbrzdění z pomocí základního vztahu při součtu všech maximálních hodnot jednotlivých brzdných sil a při použití hodnoty maximální přípustné celkové hmotnosti vozidla m_c .

Výkon kompresoru

Legislativní dokumenty předepisují dobu potřebnou k naplnění vzduchojemů soustavy z 0 na předepsaný tlak max. za 2,5 minuty při max. regulovaných otáčkách motoru. Před zkouškou je třeba zcela vypustit vzduch ze soustavy a na vzduchojem připojit tlakoměr měřící soupravy s přesností 3 % a spojit tlakoměr s elektrickými stopkami, abychom mohli automaticky zaznamenat čas od začátku plnění do dosažení předepsaného tlaku. U stávajících vozidel je životnost kompresoru značně vyšší než meziopravní norma motoru. Častou příčinou nedostatečného výkonu kompresoru však bývají drobné závady, např. netěsné ventily v hlavě válce, znečištěný čistič vzduchu, opotřebené pístní kroužky aj.

Činnost vyrovnávače tlaku

Vyrovnávač tlaku se zkouší tlakoměrem, připojeným na vzduchojem stejně, jako při prověrci kompresoru. Vyrovnávač musí udržet provozní tlak ve vzduchojemu v mezích stanovených technickými podmínkami. Jedná-li se o dvoukomorový vyrovnávač tlaku, musíme připojit samostatný kontrolní tlakoměr též na pohotovostní vzduchojem. Po dosažení předepsaného tlaku v pohotovostním vzduchojemu má dojít k přepuštění do vzduchojemu zásobního, což se projeví růstem měřeného tlaku. Po dosažení regulovaného tlaku se u správně fungujícího vyrovnávače tlaku pravidelně přepíná kompresor na volný běh s přestávkami 1 až 5 minut. Delší časové intervaly svědčí o netěsné soustavě. Vyrovnávač tlaku

plní zároveň funkci zpětného ventilu, jehož netěsnost způsobí po zastavení kompresoru (motoru) rychlý pokles tlaku.

Na vyrovnávač tlaku se kladou, z hlediska bezpečnosti provozu, vysoké požadavky a nesmí se proto neodborně opravovat. Pokud nedosáhne předepsaných parametrů a nápravy nemůžeme dosáhnout seřizovacím šroubkem regulace tlaku, je nutno vyrovnávač tlaku rozebrat, promýt v petroleji, prohlédnout, popř. poškozené části vyměnit. Před zpětnou montáží je nutno potříit manžety speciálním netuhnoucím tukem.

Technický stav vzduchojemu

Vzduchojemy vozidel podléhají bezpečnostním předpisům pro tlakové nádoby, vydaným na základě legislativy o technickém dozoru. Zkoušku u výrobce a pravidelné revize v provozu provádí úředně pověřený orgán. Vzduchojemy se zkouší vodním přetlakem rovným 1,5 násobku pracovního přetlaku za současného poklepávání kladívkem o hmotnosti 0,5 kg. Při zkušebním přetlaku nesmí vzduchojem po dobu 3 minut jevit známky prolínání vody. Po uspokojivém výsledku zkoušky vodním tlakem se vzduchojemy ještě kontrolují na nepropustnost určeným tlakem vzduchu pomocí mýdlové vody, popř. ponořením do nádrže s vodou.

Činnost brzdových válců vzduchotlakých brzd

Kritériem technického stavu brzdového válce je tlaková zkouška. Při přetlaku 300 kPa nesmí válec vykazat větší pokles tlaku než 5 kPa za 20 minut. Při měření je válec odpojen od přívodu tlakového vzduchu. Zdrojem netěsností brzdového válce bývá především manžeta pístu. Kožené manžety vyžadují při netěsnosti obnovu impregnace. Další závadou je pomalé vracení pístu po odbrzdění. Příčinou bývá tuk, ztuhlý na stěnách, deformovaná stěna válce, popř. mechanická závada klíče brzdových čelistí, prasknutí nebo pokles pružnosti vratné pružiny aj.

Těsnost soustavy vzduchotlakých brzd

Části vzduchotlakých brzd musí nejen plnit svoji funkci, ale veškeré spoje musí být také těsné. Únik vzduchu představuje nejen energetické ztráty, ale hlavně přináší nebezpečí rychlého vyčerpání zásoby vzduchu při potřebě častého brzdění. Při jmenovitém tlaku se za klidu motoru a při nulové síle na pedál brzdy měří rychlost poklesu tlaku v soustavě. Během 10 minut nesmí tlak poklesnout o více jak 10 kPa. Zkoušku je nutno doplnit měřením úniku vzduchu ze soustavy při částečném zabrzdění. Rovněž za klidu motoru sešlápneme pedál tak,

aby v brzdových válcích byl stanovený tlak. V této poloze se pedál zajistí a kontroluje se, zda nastavený tlak zůstane po 3 minuty konstantní. Pokud brzdová soustava jako celek při zkoušce nevyhoví, je nutno ji prověřit po částech při určeném tlaku pomocí mýdlové vody a odhalit tak zdroj netěsnosti.

Činnost kapalinových brzd

Spolehlivá činnost kapalinových brzd je dána především těsností kroužků a manžet hlavního válce, těsností rozvodů, brzdových válečků a potrubí aj. Zvýšené opotřebení pryžových těsnících elementů může způsobit nevhodná brzdová kapalina znečištěná mazadly, popř. smícháním dvou brzdových kapalin různých značek, což vede k oxidaci částí, houštnutí kapaliny, zanesení válečků a potrubí a vyřazení soustavy z činnosti. Netěsnost brzdové soustavy se projeví za provozu rychlým úbytkem kapaliny ze zásobní nádoby. Při kontrole jednotlivých částí soustavy lze odhalit zdroj netěsnosti, projevující se prolínáním kapaliny. Netěsnosti jsou též příčinou vnikání vzduchu do soustavy. Vzduchový polštář se projeví malým odporem pedálu na počátku sešlápnutí, pedál tzv. pruží. Při výrobě a po opravě se prvky brzdové soustavy zkouší krátkodobým přetížením tlakem 17,6 MPa podle ČSN 30 35 02. Jedná se zejména o hlavní brzdové válce a brzdové válečky. Metodika úplné bezdemontážní prověrky kapalinových brzd není zatím vypracována a kapalinové brzdové soustavy nemají možnost připojení měřících přístrojů. Z bezpečnostních důvodů se doporučuje po dvou letech provozu vyměnit pryžové části kapalinových brzd a brzdovou kapalinu.

Stav brzdového obložení

Jediným způsobem opravy brzdového obložení je jeho výměna. Výměna se rovněž doporučuje po znečištění brzdového obložení olejem nebo plastickým mazivem. Vyprání v odmašťovacím prostředku (benzin aj.) sice část mastnoty odstraní, avšak brzda zůstane méně účinná než na druhém kole téže nápravy a při intenzivním brzdění vzniká nebezpečí smyku. Kritériem pro výměnu znečištěného brzdového obložení je normativ 20 % rozdílu v účinku brzd na levé a pravé straně nápravy. Důležitou podmínkou správné funkce brzd je, aby obložení přiléhalo při brzdění celou plochou na činnou plochu brzdového bubnu. K přizpůsobení povrchu obložení brzdovým bubnům se používají speciální stroje (egalizátory), popř. se geometrický tvar upravuje hrubým pilníkem.

Strukturním parametrem brzd je tloušťka brzdového obložení. U vozidel o celkové hmotnosti nad 5,5 t musí být možná kontrola tloušťky brzdového obložení bez demontáže brzdových bubnů nebo celých štítů. Minimální velikost tloušťky brzdového obložení je dána v technických podmínkách pro jednotlivé typy vozidel.

11. 3 Diagnostika řízení

U řízení a řídicího ústrojí jsou strukturní a provozní parametry zpravidla přímo využívány jako diagnostické signály. Je tomu tak zejména proto, že mechanismy podvozku jsou dobře přístupné přímé rozměrové kontrole a z hlediska předpisů o bezpečnosti provozu nelze přímou rozměrovou kontrolu v mnoha případech nahradit. Na říditelnost vozidla, bezpečnost jízdy a opotřebení pneumatik má při jízdě značný vliv geometrická poloha kol vozidla (geometrie zavěšení kol). Geometrie podvozku je obecně dána:

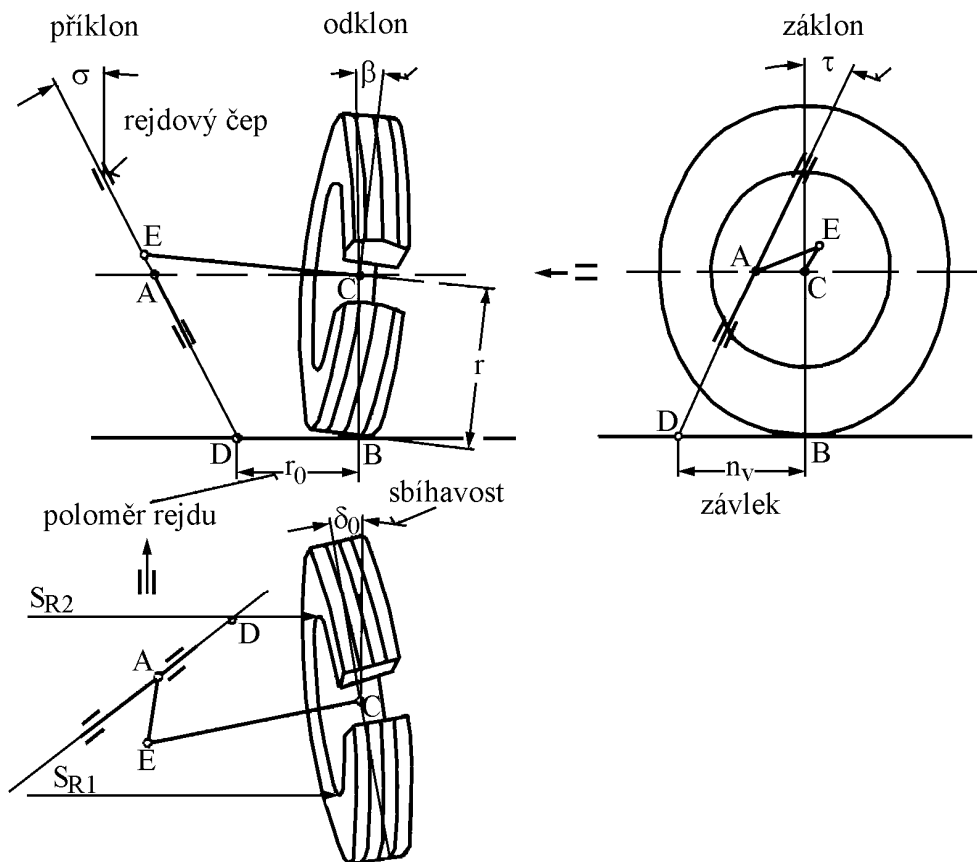
- vzájemnou polohou kol a náprav vozidla,
- geometrií zavěšení kol (geometrií řídicí nápravy),
- geometrií zadní nápravy.

Vzájemnou polohu kol a náprav je zpravidla nutno kontrolovat pouze po havárii nebo po generální opravě vozidla. Během provozu nastávají především změny v geometrii řídicí nápravy (náprav), popř. zadní nápravy (náprav). Při různých způsobech zavěšení kol, používaných v soudobých vozidlech, se zejména přední (řídicí) kola za jízdy pohybují ve velmi složitých prostorových soustavách a dochází také ke složitým přenosům sil z kol na vozovku a naopak; v další části učebnice se však omezíme na zjednodušené vysvětlení praktického významu parametrů geometrie řízení. Jedná se o veličiny, které jsou znázorněny na obr. 11. 7. a jedná se o následující parametry:

1. Sbíhavost (úhel sbíhavosti δ_0);
2. Úhel odklonu kola β ;
3. Příklon rejdové osy (čepu) σ ;
4. Záklon rejdové osy (čepu) τ ;
5. Poloměr rejdu r_o aj.

V praxi existují další parametry, např. rozdíl rejdů, rovnoběžnost náprav, závlek aj. Hodnoty parametrů geometrie řízení se vždy vztahují na určitý stav zatížení vozidla s neunaveným pérováním; pro běžnou praktickou potřebu se tento stav definuje údaji výšky některých bodů

na podvozku vozidla nad vozovkou nebo se vozidlo uvádí do příslušného stavu různými přípravky.



Obr. 11. 7 Schéma geometrie řízení automobilu

Nejčastější příčinou chybných měření, popř. seřízení geometrie řízení, bývá nedodržení podmínek měření. Podmínky pro kontrolu a seřizování geometrie řízení zahrnují:

Činnost před kontrolou:

- ověření, jsou-li na protilehlých kolech kontrolovaného vozidla ráfky a pneumatiky stejných rozměrů,
- kontrola stavu řídicího ústrojí, kloubů řídicích tyčí a pák, zavěšení kol, ložisek aj. (zjistíme-li závady, nemá smysl kontrolovat geometrii řízení před jejich odstraněním),
- kontrola stavu pérování,
- kontrola axiální házivosti ráfků,
- kontrola tlaku vzduchu v pneumatikách, popř. jeho upravení na předepsané hodnoty,
- dynamické vyvážení kol aj.

Kontrola geometrie řízení:

Způsoby kontroly bývají značně odlišné v závislosti na použitých diagnostických přístrojích, nelze proto stanovit jednoznačnou univerzální metodiku, vždy je potřebné dodržet doporučení výrobce diagnostické techniky. Jednotlivé parametry geometrie řízení se do určité míry navzájem ovlivňují, proto kontrolujeme geometrii řízení v pořadí:

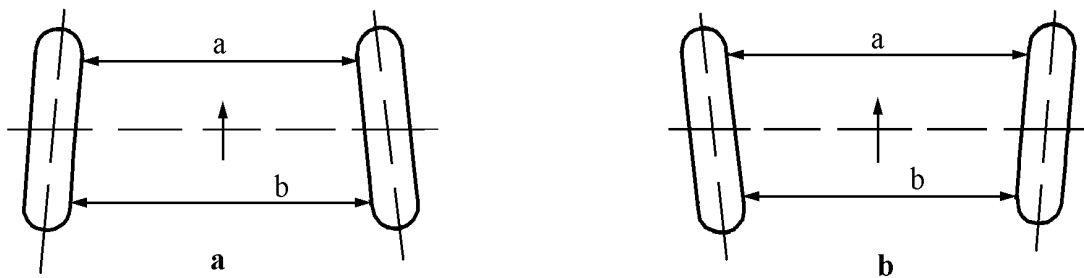
- symetrie a rovnoběžnost náprav,
- úhel sbíhavosti (rozbíhavosti),
- úhel odklonu kol,
- úhly příklonu a záklonu rejdové osy,
- rozdíl rejdů aj.

Jednotlivé parametry geometrie řízení pak seřizujeme (v případě, že to konstrukce umožňuje) v následujícím pořadí:

- úhly záklonu a příklonu rejdové osy,
- úhel odklonu kol,
- úhel sbíhavosti (rozbíhavosti),
- rozdíl rejdů.

Sbíhavost, rozbíhavost (úhel sbíhavosti)

Sbíhavost s je dána vztahem $s = b - a$ (mm), resp. úhel sbíhavosti δ_0 je průmět úhlu mezi podélnou osou vozidla a střední rovinou kola do roviny vozovky, viz obr. 11. 7. Kolo je sbíhavé, jestliže přední část kola je přikloněna k podélné ose vozidla a rozbíhavé, je-li odkloněna, viz obr. 11. 8.



Obr. 11. 8 Sbíhavost kol (a), rozbíhavost kol (b)

Účelem sbíhavosti předních kol je, aby se kola při přímé jízdě odvalovala paralelně. Vlivem úhlu sbíhavosti vzniknou v předních kolech malé boční síly, které se snaží natáčet kolo do přímého směru. Boční síly vyvolávají momenty vzhledem k rejdovým osám, čímž vzniká v mechanismu řízené předpětí. Za jízdy se mírně vychýlené levé kolo snaží běžet po obloukovité dráze s velkým poloměrem a vychýlit vozidlo z přímého směru doprava; protilehlé pravé kolo je však vychýleno opačně a snaží se o totéž v opačném směru, proto se oba vlivy ruší a vozidlo zachovává přímý směr, jako kdyby kola byla přesně rovnoběžná. Proti sobě působící síly přitlačují všechny čepy k uložení a tak vymezují vůle v uloženích a brání rozkmitání kol při vyšších rychlostech. U vozidel s předním pohonem se snaží dopředu směřující hnací síla stlačit kola na přední straně, proto zde může být výhodnější rozbíhavost. Sbíhavost (rozbíhavost) zvyšuje opotřebení pneumatik. Sbíhavost bývá u osobních automobilů 0 - 3 mm (0° - 30') a 3 - 10 mm u nákladních automobilů.

Měření úhlů sbíhavosti (rozbíhavosti)

Sbíhavost se dnes téměř výhradně měří v úhlových mírách. Přesto někteří výrobci dosud předepisují sbíhavost v milimetrech, což je jistým přežitkem z doby, kdy se měřila tyčovým měřidlem. V různých výškách nad vozovkou je vzdálenost okrajů ráfků odkloněných kol různá, takže sbíhavost v mm je nekontrolovatelná, není-li zároveň předepsáno, v kterých místech ráfků (v jaké výšce nad vozovkou) se má měřit; naproti tomu úhel sbíhavosti zůstává všude stejný. Sbíhavost s v (mm), měřenou na okraji ráfku lze přibližně převést na sbíhavost v úhlových minutách podle vztahu

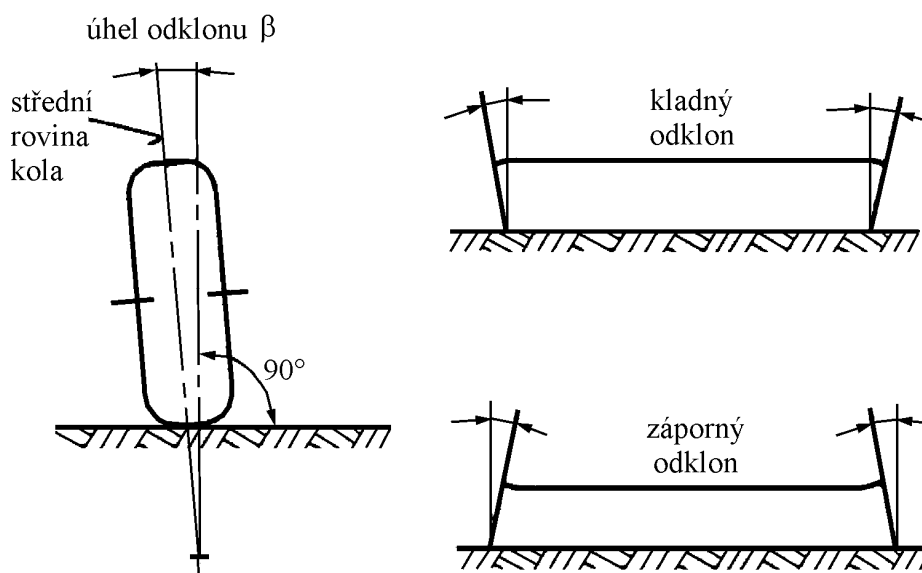
$$\delta_0 = \frac{3400s}{d}, \quad (11.13)$$

kde d ... průměr ráfku (mm).

Sbíhavost má být seřizována tak, aby při střední poloze řízení (páky v převodce řízení) stála kola ve směru přímé jízdy a každé z nich mělo přesně polovinu z předepsané sbíhavosti. Na některých vozidlech bývá pro správné ustavení v převodce řízení značka. Při měření sbíhavosti je často potřebné vyloučit vliv různých vůlí v kloubech řídících pák, tyčí aj. K tomu může sloužit jednoduchý rozpěrný přípravek, opřený zevnitř o pneumatiky předních kol; přípravek kola odtlačuje od sebe a tím jednostranně vymezuje všechny vůle. Sbíhavost se měřila jednoduchým posuvným mechanickým měřidlem, v současné době se používají téměř výhradně přesnější optické nebo elektronické přístroje.

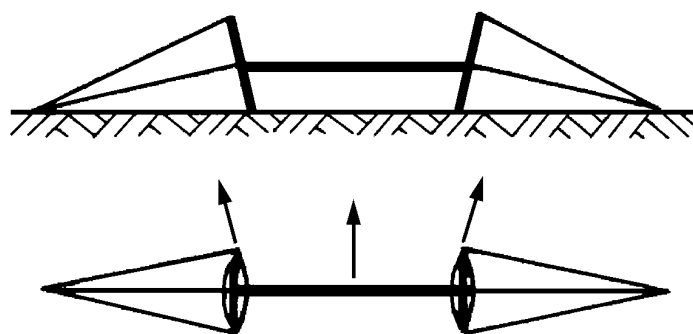
Úhel odklonu kola β

Úhel odklonu kola β je sklon střední roviny kola vůči svislé ose vozidla, obr. 11. 9. Je uvažován kladně, jestliže se kolo naklání vrchem vně vozidla a záporně, jestliže se naklání dovnitř.



Obr. 11. 9 Úhel odklonu kola

Vlivem kladného odklonu tvoří kolo ve styku s vozovkou kuželovou plochu a má snahu se odvalovat po kružnici, jejíž střed leží v průsečíku osy kola s rovinou vozovky, viz obr. 11. 10. Kola se přitom odvalují směrem od sebe, což snižuje sklon ke kmitání.



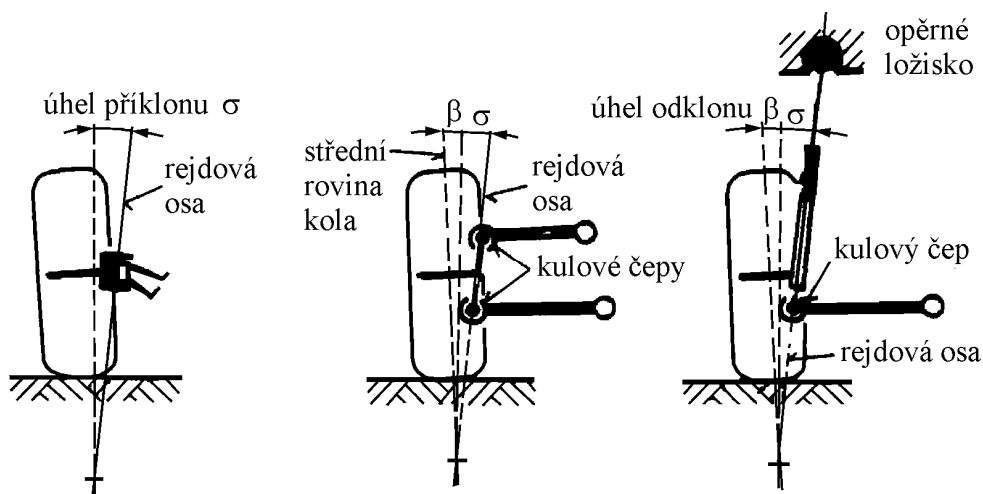
Obr. 11. 10 Odvalování kol při kladném odklonu

Odklon je rovněž vhodný k tomu, aby se pneumatiky odvalovaly po mírně klenuté vozovce kolmo a vznikalo stejné opotřebení. Odklon kola by se neměl měnit při propružení, resp. z důvodu jízdní stability při zatáčení vyšší rychlostí by měla změna odklonu vyrovnávat

naklopení karosérie, aby kolo zůstávalo na vozovce v kolmé poloze a zachycovalo max. boční síly. Nastavení odklonu se provádí excentrickým přestavením uložení příčných ramen, vyrovnávacími podložkami nebo posunutím kulového rejdového kloubu. Změna odklonu kola způsobí vždy změnu příklonu nebo záklonu rejdové osy. Úhel odklonu kola je v současnosti pevně určen konstrukcí čepu a je obvykle neměnitelný (vyjma některých starších vozidel). Úhel odklonu kola měříme optickými přístroji.

Příklon rejdové osy (čepu) σ

Příklon rejdové osy σ je průmět úhlu sevřeného rejdovou osou a svislicí do roviny rovnoběžné s příčnou rovinou vozidla viz obr. 11. 11. U tuhé nápravy je rejdová osa totožná s osou rejdového čepu. Lichoběžníková náprava u osobních automobilů rejdový čep nemá a rejdová osa je dána spojnicí středů horního a spodního kulového čepu. U nápravy McPherson je rejdová osa dána spojnicí středu horního závěsného ložiska a středu spodního kulového čepu uloženého v příčném rameni.



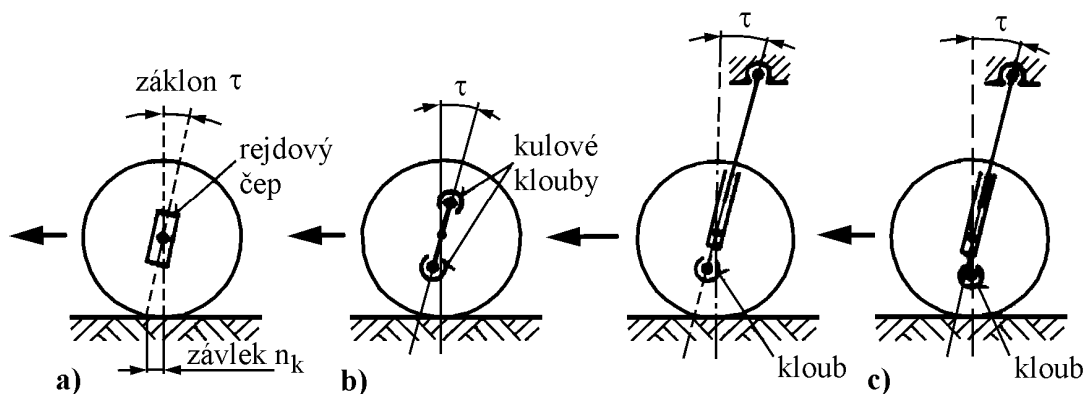
Obr. 11. 11 Příklon rejdové osy a) tuhá náprava, b) lichoběžníková náprava, c) náprava McPherson

Příklon slouží k samočinnému vracení řízených kol do polohy pro přímou jízdu. Vlivem příklonu dochází při natáčení řízených kol k jejich zvedání. Síla k tomu potřebná musí být vynaložena při natáčení volantu. Při uvolňování volantu po zatáčení tlačí zatížení přední nápravy přední kola do přímé polohy, a to účinkem vratného momentu. Příklon rejdové osy je pevně určen konstrukcí čepu kola. Součet úhlů odklonu kola a příklonu rejdové osy je neměnitelný. Měření se provádí obvykle optickými přístroji.

Záklon rejdové osy (čepu) τ a závlek n_k

Záklon rejdové osy je průmět úhlu sevřeného rejdovou osou a svislicí do roviny rovnoběžné s podélnou rovinou vozidla, obr. 11. 12. Je uvažován kladně, je-li rejdová osa skloněna vzad (směrem vzhůru) a záporně, je-li skloněna vpřed (předklon).

Závlek n_k je vzdálenost mezi průsečíkem rejdové osy s rovinou vozovky a středem styku pneumatiky, promítnutá do roviny rovnoběžné s podélnou rovinou vozidla. Uvažujeme jej kladně, je-li průsečík před středem styku pneumatiky a záporně, je-li za ním (tzv. předvlek). Účinek závleku na vracení kola do přímého směru je znám z konstrukce koleček servírovacích stolků, kdy je kolečko vlivem závleku vlečeno a nikoli tlačeno.



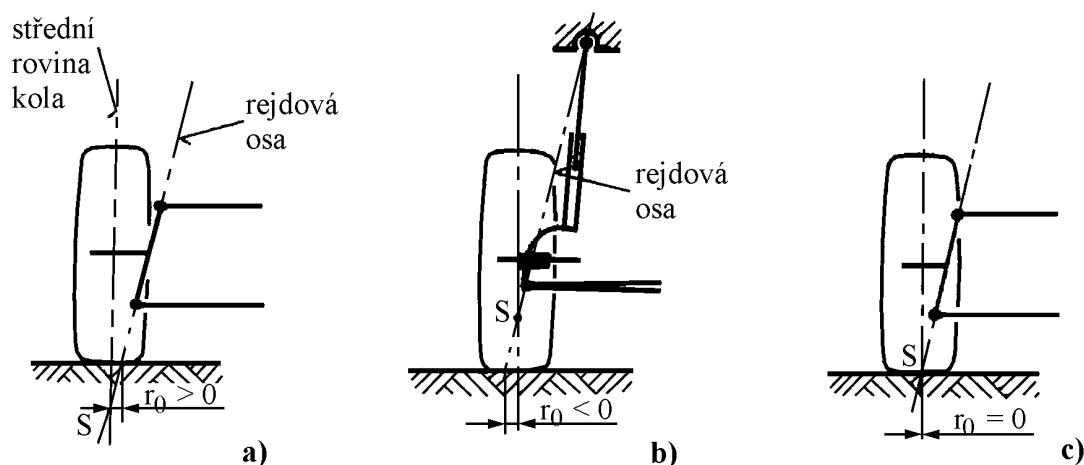
Obr. 11. 12 Záklon rejdové osy a) tuhá náprava s rejdovým čepem, b) lichoběžníková náprava s kulovými čepy, c) náprava McPherson

Stabilizační účinek záklonu spočívá v tom, že dochází ke zvedání předku vozidla a vlivem svislého zatížení vzniká tahová síla ve spojení tyčí, čímž se vymezuje vůle ve spojení tyčí. Ještě důležitější je však vznik momentů od vodorovných sil, které vznikají vlivem záklonu a způsobují moment, který vrací kolo do přímého směru za předpokladu, že vodorovná síla působí proti směru jízdy (valivý odpor, brzdná síla aj.). Hnací síla působí ve směru jízdy a vlivem záklonu vzniká moment, který zvětšuje úhel rejdu. Pro vozidla s pohonem předních kol je záklon obvykle nulový. Vozidla se zadním pohonem mívají záklon $1^\circ - 3^\circ$; max. 10° . Seřizování záklonu se provádí přestavením excentrů nebo změnou délky surné tyče na spodním příčném rameni.

Záklon rejdové osy se měří nepřímo, obvykle na základě úhlů odklonu kola, změřených při vychýlení kola z přímého směru o 20° doleva a doprava. Při tomto měření musí stát přední kola na tzv. točnicích. Měření se provádí obvykle optickými přístroji.

Poloměr rejdu r_o

Poloměr rejdu r_o je vzdálenost mezi průsečíkem rejdové osy s rovinou vozovky a středem styku pneumatiky, promítnutá do roviny rovnoběžné s příčnou rovinou vozidla, obr. 11. 13.



Obr. 11. 13 Poloměr rejdu a) kladný, b) záporný, c) nulový

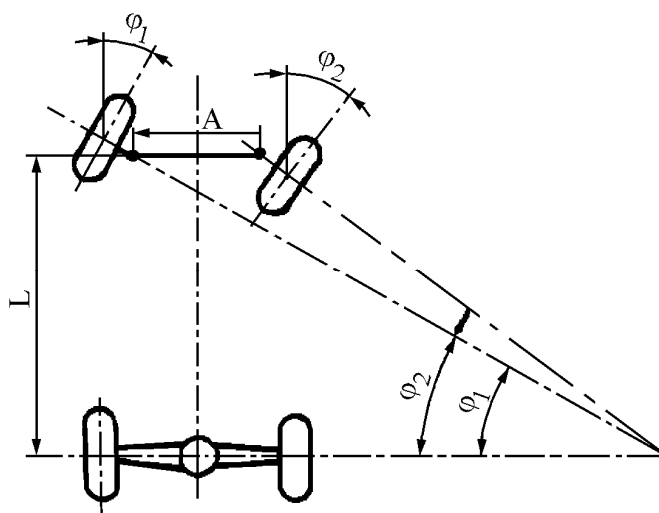
Na velikosti poloměru rejdu závisí velikost vratného momentu. Větší kladné hodnoty r_o zvětšují tento moment. Čím je však poloměr rejdu větší, tím více je přední náprava citlivější na podélné síly. Při brzdění brzdná síla, popř. valivé odpory natáčí kolo kolem rejdové osy, kola jsou stlačována k sobě, čímž je zmenšována vůle v řízení a potlačeno kmitání. Kladný poloměr rejdu má být max. 40 mm u osobních vozidel a 60 mm u nákladních vozidel, neboť při rozdílných jízdních odporech nebo rozdílných brzdných silách na levém a pravém kole jsou kola vychylována a řidič musí vyrovnávat směr jízdy. Proto se někdy používá nulový poloměr rejdu.

Záporný poloměr rejdu se používá u osobních vozidel s předním pohonem a nápravou McPherson. Záporný poloměr rejdu má stabilizační účinek na řízení - řidič nemusí měnit natočení kol i když brzdění je nesouměrné.

Rozdíl rejdů

Rozdíl rejdů je důležitým parametrem pro správnou funkci řízení v zatáčkách. Každé z obou protilehlých kol téže nápravy projíždí v zatáčce různě dlouhou dráhu s rozdílným

poloměrem zakřivení, proto řízené kolo na vnitřní straně zatáčky musí být více vychýleno než protilehlé kolo. Při jízdě v zatáčkách se původní sbíhavost mění v rozbíhavost, která je tím větší, čím menší je poloměr zakřivení zatáčky (proto se někdy rozdíl rejdů označuje jako "diferenční úhel sbíhavosti kol"). Teoreticky bývá řízení vyřešeno tak, že prodloužené osy čepů vychýlených řídicích kol se při jakkoli velkém rejdu protínají na prodloužené ose zadních kol, obr. 11. 14.



Obr. 11. 14 Rozdíl rejdů

Nestejný rozdíl rejdů se projevuje "pískáním" pneumatik v zatáčkách i při jejich projíždění přiměřenou rychlostí, protože některá z pneumatik se při odvalování zároveň smýká; přitom se zhoršuje ovladatelnost vozidla, zvyšuje namáhání a opotřebení pneumatik. Nejčastější příčinou bývá seřízení sbíhavosti jen změnou délky jedné řídicí tyče, deformovaná páka řízení, řídicí páky, nerovnoběžnost náprav aj.

Rozdíl rejdů se měří na točnicích a to tak, že se kola vychýlí z přímého směru natolik, aby jedno z nich bylo vychýleno přesně o 20° ; při tomto postavení se změří úhel vychýlení (rejd) protilehlého kola. Rozdíl úhlů 20° a úhlu změřeného je rozdíl rejdů. Stejně měření se opakuje při vychýlení kol opačným směrem.

Poznámka:

Uvádí-li výrobce vozidla hodnoty parametrů geometrie řízení bez tolerancí, připouští se v praxi následující maximální úchytky:

- úhel sbíhavosti	$\pm 20'$
- sbíhavost	
kola o průměru do 16'	$\pm 2 \text{ mm}$
kola s průměrem nad 16'	$\pm 3 \text{ mm}$
- úhel odklonu kola	$\pm 1^\circ$
- úhel příklonu rejdové osy	$\pm 1^\circ$
- úhel záklonu rejdové osy	$\pm 1^\circ$
- rozdíl rejdů	$\pm 1^\circ$

Úhly odklonů protilehlých kol řídicí nápravy se navzájem nesmí lišit o více než 1° ; stejná podmínka platí i pro úhly příklonu a záklonu rejdové osy.

Přípustné max. vůle v kloubech řídicích tyčí a pák, změřené na základě rozdílů úhlů sbíhavosti:

- osobní a dodávkové automobily $30'$
- nákladní automobily a autobusy $20'$
- vozidla s pohonem předních kol $40'$

V praxi se může stát, že pro kontrolu geometrie řízení staršího nebo unikátního vozidla není k dispozici předpis výrobce; potom je možno uplatnit některé následující zkušenosti:

- úhel sbíhavosti řídicích kol nezatíženého vozidla by měl být v mezích $+ 20'$ až $- 5'$;
- úhel sbíhavosti je vždy třeba posuzovat ve vztahu k úhlu odklonu kol. Při odklonu větším než $+ 1^\circ 30'$ nesmí být nastavena rozbíhavost (-). Při úhlu odklonu kol $+ 2^\circ$ má být úhel sbíhavosti v mezích $+ 5'$ až $+ 10'$; na každých dalších $30'$ úhlu odklonu kol má být úhel sbíhavosti větší o $+ 5'$;
- úhel odklonu kol a úhel záklonu rejdové osy, popř. úhel předklonu rejdové osy nelze stanovit číselnou hodnotou; měření se proto omezí na porovnání velikosti těchto parametrů u protilehlých kol; rozdíl nesmí být větší než 1° ; totéž platí o odklonu zadních (neřízených) kol.

I v dokumentaci k novým vozidlům velmi často chybí předepsaná hodnota rozdílu rejdů. Tento parametr lze však určit z rovnice pro tzv. Akermanovu geometrii řízení, kdy pro řídicí lichoběžník platí

$$\cot g\phi_2 - \cot g\phi_1 = \frac{A}{L} \quad (11.14)$$

kde ϕ_1 ... menší úhel rejdu vnějšího kola,
 ϕ_2 ... větší úhel rejdu vnitřního kola,
 A ... rozteč rejdových čepů (rozchod kol),
 L ... rozvor náprav.

Pro vychýlení (rejd) vnějšího kola $\phi_1 = 20^\circ$, pak platí, že $\cot g\phi_1 = 2,75$ a pak

$$\cot g\phi_2 = \frac{A}{L} + 2,75 \quad (11.15)$$

Podle vypočteného $\cot g\phi_2$ vyhledáme úhel ϕ_2 . Potom rozdíl rejdů $\delta\phi = \phi_2 - \phi_1$. Takto vypočtené rozdíly rejdů pro různé rozchody kol a rozvory náprav bývají v tabulkách nebo v grafech obsažených v návodech k obsluze některých kvalitnějších diagnostických přístrojů pro kontrolu geometrie řízení.

11. 4 Vyvažování kol s pneumatikou

Kontrola vyvážení kol s pneumatikou je velmi důležitou diagnostickou operací, která má vliv na bezpečnost a ekonomii provozu vozidel. Příčinou nevyváženosti je např.:

- nerovnoměrné opotřebení běhounu pneumatiky (následkem nesprávné geometrie řízení, vadné činnosti tlumičů pérování, popř. jízd s nedostatečně vyváženým kolem s pneumatikou aj.),
- oprava pláště nebo duše pneumatiky, kdy oprava znamená nesymetrické přidání hmoty,
- deformace ráfku a dalších částí kola (najetím na obrubník chodníku aj.),
- nesprávná montáž kola na brzdový buben (např. excentricky aj.),
- ztráta některého vyvažovacího závaží aj.

Nevyvážené hmoty vyvolávají kmitání kol, i když je jejich uložení a zavěšení v pořádku. Někdy se toto kmitání projevuje jen při určité rychlosti jízdy. Kmity s velkou frekvencí vyvolávají nepříjemné vibrace řízení, podstatně zhoršují ovladatelnost vozidla, zvětšují namáhání ložisek, závěsů kol a rovněž opotřebení pneumatik. Odstředivá síla, vyvolaná nevyváženou hmotou kola, nestoupá lineárně, nýbrž se čtvercem rychlosti; proto i malé nevyvážky vyvolávají při větších rychlostech značně velké přídavné síly, jejichž směr

působení se mění při každé otáčce kola. Nevyváženost kol se výrazně projevuje se vzrůstající rychlostí vozidla, neboť odstředivá síla nevyvážené hmoty roste se čtvercem rychlosti. Platí

$$F_o = m.R.\omega^2 \quad (11. 16)$$

$$\omega = \frac{\pi n}{30}; \omega = \frac{v}{R} \quad (11. 17)$$

$$F_o = m.R \left(\frac{v}{R}\right)^2 = \frac{m.v^2}{R} \quad (N) \quad (11. 18)$$

Pro rychlost vozidla v km/hod. je

$$\omega = \frac{v_x}{3,6R_d} \quad (11. 19)$$

Legenda:

F_o ... odstředivá síla (N), m ... nevyvážená hmota (kg), R ... poloměr těžiště, ω ... úhlová rychlost (1/s), n ... otáčky kola (1 min), v ... obvodová rychlost (m/s) na poloměru R , v_x ... rychlost vozidla (km/hod), R_d ... dynamický poloměr pneumatiky (m).

Velikosti nevyvážených odstředivých sil jsou zřejmé z následujících příkladů:

- a) Osobní automobil má např. pneumatiky 155 RS – 14. Běžná nevyváženost představuje závažíčka o hmotnosti 100 g. Dynamický poloměr pneumatiky $R_d = 283$ mm. Průměr patky pláště a dna ráfku je $14 \cdot 25,4 = 355,6$ mm, závažíčka se umísťují do ramen disku na průměru 400 mm. Zjistíme nevyvážené síly pro rychlosti vozidla $v_{50} = 50$ km/hod; $v_{100} = 100$ km/hod. a $v_{130} = 130$ km/hod.

$$F_o = m.R \omega^2 \quad (N) \quad \omega = \frac{v_x}{3,6.R_d} \quad (s^{-1})$$

$$F_{o50} = 0,1 \cdot 0,2 \cdot 49,1^2 = 48,2 \text{ N} \quad F_{o100} = 192,7 \text{ N} \quad F_{o130} = 325,6 \text{ N}$$

$$\omega_{50} = \frac{50}{3,6 \cdot 0,283} = 49,1 s^{-1} \quad \omega_{100} = 98,15 s^{-1} \quad \omega_{130} = 127,6 s^{-1}$$

b) Pneumatiky autobusu mají rozměr 10,00 R – 20. Běžné vyvažovací závaží $m_z = 1000$ g se umísťuje na rameno ráfku o průměru cca 20. 25,4 + 5,2 mm = 560 mm. Dynamický poloměr pneumatiky $R_d = 510$ mm. Při rychlosti 100 km/hod. je úhlová rychlost ω_{100} a nevyvážená odstředivá síla např. při ztrátě závaží F_o :

$$\omega_{100} = \frac{100}{3,6 \cdot 0,51} = 54,5 s^{-1} \quad F_o = 1. 0,28 \cdot 54,5^2 = 831 \text{ N}$$

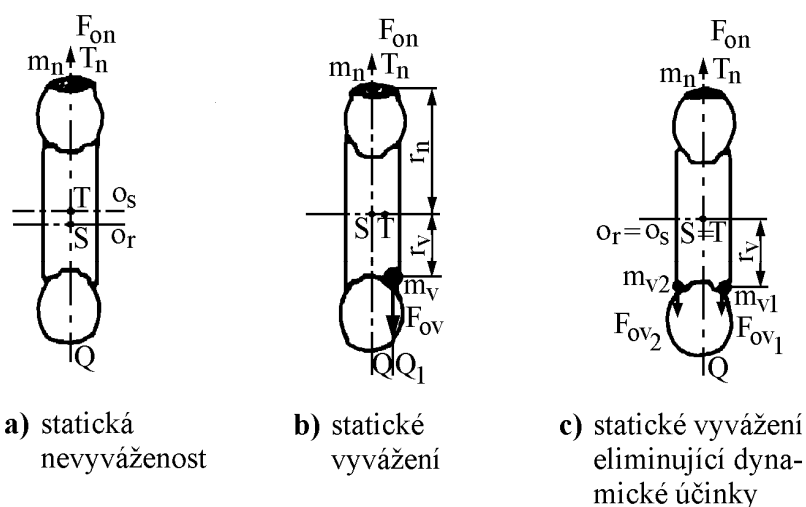
Nevyváženost se projevuje cyklicky se měnícím směrem působení nevyvážené odstředivé síly jako intenzivní dynamické namáhání mechanismu zavěšení kol, řízení, i dalších částí podvozku a vlivem rozkmitávání kol a řízení nebezpečně zhoršuje stabilitu vozidla. Týká se to vozidel osobních, ale také speciálních a užitkových. Vedle vlivu vysoké rychlosti, kdy se uplatňuje zejména statická nevyváženost, má stále stoupající vliv na nevyváženost kol zvětšující se šířka pneumatiky, neboť se při větší šířce uplatňuje výrazněji nevyváženost dynamická. Význam vyvažování kol osobních automobilů je dnes všeobecně znám a doceňován; naproti tomu se dosud nedoceňuje u nákladních vozidel, autobusů aj., třebaže tato vozidla dnes zcela běžně dosahují rychlostí nad 100 km/h. Na jejich kolech bývají přitom podstatně větší nevyvážky a jejich nepříznivé účinky jsou podstatně větší. Např. na diskových kolech 20', používaných u většiny nákladních automobilů se ve výrobě toleruje házivost 2,5 mm, která samotná již vyvolává na poloměru ráfku nevyvážek 639 g; na těchto kolech však není výjimkou ani házivost 5 mm, která vyvolává nevyvážek 1260 g. Je-li toto kolo namontováno na brzdovém bubnu excentricky jen o 0,5 mm, vyvolá to statickou nevyváženost 230 g. Také u používaných (taktických aj.) pneumatik velkých rozměrů nejsou žádnou výjimkou nevyvážky několika set gramů. I když se část nevyvážky kompenzuje přesazením o 180° proti nevyvážku disku, zjišťují se často nevyvážky řádu 1000 g i větší. Např. při rychlosti 100 km/h vyvolá nevyvážek 1000 g odstředivou sílu 1520 N. Působení tak velkých přídatných sil střídavých směrů se ovšem musí na vozidle dříve nebo později projevit.

Podle umístění nevyvážky, přesněji podle polohy, jakou zaujímá hlavní osa momentu setrvačnosti rotujícího tělesa vzhledem k ose rotace, rozlišujeme tři druhy nevyváženosti:

- statickou,
- dynamickou,
- obecnou (kombinovanou).

Statická nevyváženost

Kolo je nevyváženo čistě staticky, je-li hlavní osa momentu setrvačnosti o_s rovnoběžná s osou rotace o_r viz obr. 11. 15 a. Těžiště T rotujícího kola se nenachází v ose rotace, avšak hmota kola je vzhledem k radiální rovině procházející jeho středem S rozložena rovnoměrně. V důsledku toho vzniká nevyvážená odstředivá síla F_{On} . Při statickém vyvážení, obr. 11. 15 b se snažíme vhodným způsobem posunout těžiště rotujícího tělesa zpět do osy rotace.



Obr. 11. 15 Statická nevyváženost vozidlového kola s pneumatikou a její odstranění

K tomu obecně stačí přidání nebo ubrání hmoty v jedné vyvažovací rovině. Pro určení velikosti vyvažovací hmoty platí na základě rovnosti odstředivých sil F_{On} a hmotnosti vyvažovacího závaží F_{Ov} vztah

$$m_v = m_n \frac{r_n}{r_v} , \quad (11. 20)$$

kde m_v ... hmota vyvažovacího závaží (kg),

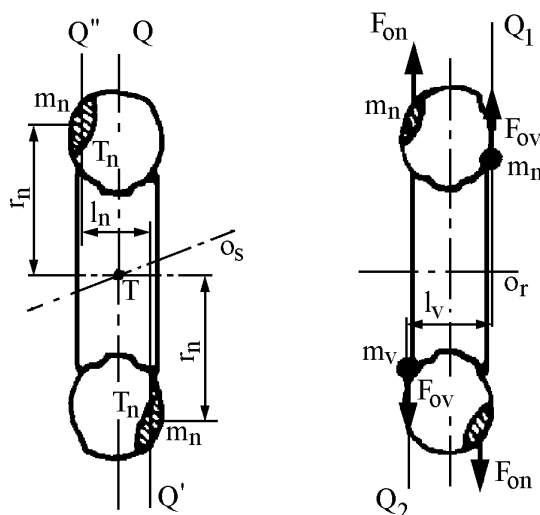
r_v ... poloměr rotace těžiště T vyvažovacího závaží (m).

V praxi s ohledem na umístění vyvažovacího závaží na ráfku vozidlového kola a z důvodu vyloučení nežádoucích dynamických účinků při použití jednoho vyvažovacího závaží, rozdělujeme tato na dvě části a umísťujeme je na obě strany kola vzhledem k radiální rovině, obr. 11. 15 c.

Dynamická nevyváženost

O dynamickou nevyváženost se jedná tehdy, když těžiště rotujícího kola T je na ose rotace o , a hlavní osa momentu setrvačnosti o_s je s osou rotace různoběžná, obr. 11. 16. Dynamická nevyváženost se odstraní připojením nebo odebráním dvou stejně velkých hmot m_v ve dvou vyvažovacích rovinách, které vyvolají stejně velký, ale v opačném smyslu působící moment síly než ten, který je způsoben nevyvážeností. Pro velké vyvažované hmoty platí na základě rovnosti těchto momentů sil ($F_{on} \cdot l_n = F_{ov} \cdot l_v$) relace

$$m_v = \frac{m_n r_n l_n}{r_v l_v} \quad (11. 21)$$



Obr. 11. 16 Dynamická nevyváženost kola s pneumatikou a její odstranění

Obecná (kombinovaná) nevyváženost

V praxi se vyskytuje obecná (kombinovaná) nevyváženost nejčastěji. Je složena z nevyváženosti statické a dynamické. Hlavní osa momentu setrvačnosti rotujícího kola je mimoběžná s osou rotace. Nevyváženost je způsobena hmotou různé velikosti i různé vzájemné polohy. Účinek nevyvážených odstředivých sil obecně nevyváženého kola můžeme vždy nahradit dvěma odstředivými silami ve dvou libovolně zvolených rovinách a kompenzujeme je dvěma hmotami přidanými nebo ubranými v těchto vyvažovacích rovinách. Jejich velikost a úhlovou polohu určujeme různými vyvažovacími postupy, realizovanými na vyvažovacích strojích.

Realizace vyvažování

Vlastní vyvažování může být realizováno buď po demontáži kola z vozidla nebo bezdemontážním způsobem, přímo na nápravě vozidla. Vyvažování s demontáží se realizuje na stabilních vyvažovačkách. Vyvažovačky umožní zjištění nevyvážků kola ve dvou rovinách, obvykle při jediném roztočení kola. Vyvažovačky mají hřídel uložený pevně v ložiscích a snímají síly v uložení hřídele pomocí piezoelektrických snímačů. Signály snímačů zpracovávají a vyhodnocují elektronicky. Výsledkem je přímo hmotnost vyvažovacích závaží. Přesné místo umístění závaží je opticky označeno přímo pootočením kola po zastavení. Obvykle tento postup opakujeme pro jednu a druhou polovinu kolmou na osu otáčení kola. Při bezdemontážním způsobu vyvažování se kolo vyvažuje přímo na nápravě vozidla, což eliminuje nevyváženost způsobenou připojenými rotujícími hmotami, popř. montáží kola na nápravu. Vyvážení se realizuje pomocí mobilních vyvažovaček. Při vyvažování se zvednuté kolo, podepřené stojanem se snímačem svislých kmitů, roztočí pomocí zařízení spojeného s elektromotorem a piezoelektricky snímané síly se převádí na ořídící panel vyvažovačky, kde se objeví přímo hmotnost vyvažovacího závaží. Úhlová poloha těžiště vývažku se zjišťuje stroboskopickou lampou, která je součástí mobilní vyvažovačky.

Při normálním provozování se mají kola s diagonálními pneumatikami vyvažovat po najetí max. 10 000 km, u kol s radiálními pneumatikami už po 5 000 km. Po namontování nových pneumatik se má vyvážení překontrolovat po ujetí 500 km, kdy se pneumatika usazuje na ráfek a zbavuje některých nefunkčních míst dezénu, vzniklých při výrobě. Kolo je také potřebné vyvážit po každé opravě pláště či duše. Vozidlová kola je nutno vyvažovat po jejich důkladném očištění, s pneumatikami nahuštěnými na předepsaný tlak. Před vyvažováním je nutno zkontrolovat radiální a axiální házivost. Radiální i axiální házivost kola s pneumatikou nemá překročit 3 mm u osobních a 5 mm nákladních automobilů.

11. 5 Diagnostika tlumičů pérování

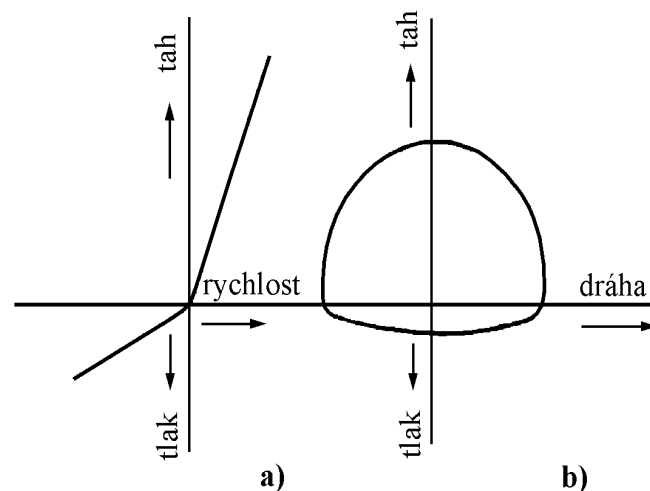
Tlumiče pérování mají velmi důležitou funkci – tlumí rázy (brání dosednutí nápravy na dorazy) a kmity (zabezpečují trvalý kontakt pneumatiky s vozovkou). Podle konstrukce jsou kapalinové a plynokapalinové (jednoplášťové, dvouplášťové), resp. dříve rovněž mechanické. Nesprávná funkce tlumičů má mnoho nepříznivých důsledků, které spočívají zejména v:

- zhoršení jízdních vlastností vozidla, říditelnosti, bezpečnosti, směrové stability aj.,
- nadměrném vlnovitém opotřebení dezénu pneumatiky, narušení vyvážení kola aj.,
- zhoršené pohodě jízdy aj.

Diagnostiku tlumičů lze členit na tři základní metody:

1. Diagnostiku vymontovaných tlumičů a přímé měření tlumící síly;
2. Diagnostiku metodou rezonanční, kdy měříme útlum neodpérováných hmot;
3. Diagnostiku propružením, kdy měříme útlum odpérované hmoty vozidla na základě vybuzení a útlumu;

V současnosti se nejvíce používají dvojčinné kapalinové teleskopické tlumiče konstruované tak, že k stlačení tlumiče je potřebná podstatně menší síla než k jeho roztažení. Tyto síly nemohou být libovolně velké; jejich velikost je v mezích stanovených výrobcem pro daný typ vozidla. Kromě toho však pro posouzení činnosti tlumiče hraje důležitou roli tzv. základní výkonová charakteristika, která představuje průběh stoupání a klesání tlumících sil během pracovního zdvihu pístu tlumiče za stanovených podmínek. Základní charakteristika tlumiče, kdy tlumící síla závisí lineárně na rychlosti pístu tlumiče, je znázorněna na obr. 11. 17. Součinitel lineárního tlumení je pro tlakový a tahový stupeň rozdílný, tj. závislost tlumící síly na rychlosti má lomený přímkový průběh.

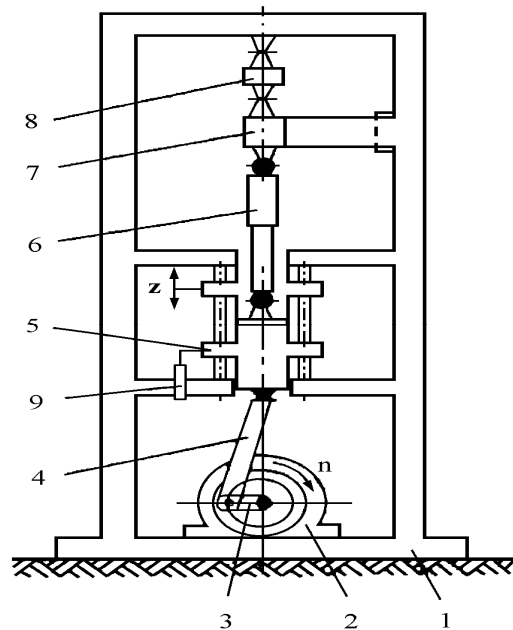


Obr. 11. 17 Základní charakteristiky tlumiče: a) rychlostní;
b) zdvihová;

Tlumicí charakteristika nemusí mít přímkový průběh; skutečný průběh se zjistí zkouškou. Při měření se zároveň zjišťuje závislost tlumicí síly na dráze; tato charakteristika slouží k posouzení funkce tlumiče během zdvihu.

1) Diagnostika vymontovaných tlumičů na zkušebním stavu;

Tlumič je v tomto případě rozkmitán kinematickým buzením (sinusový pohyb) a měří se reakční síla vyvozená tlumičem. Změnou rychlosti pístu se získají jednotlivé body charakteristiky. Schéma zkušebního stavu je na obr. 11. 18. Praktické provedení na obr. 11. 19.



Legenda:

- 1 - stojan,
- 2 - hnací motor,
- 3 - klika,
- 4 - ojnice,
- 5 - vodící saně,
- 6 - tlumič,
- 7 - pružný člen,
- 8 - snímač síly,
- 9 - snímač dráhy.

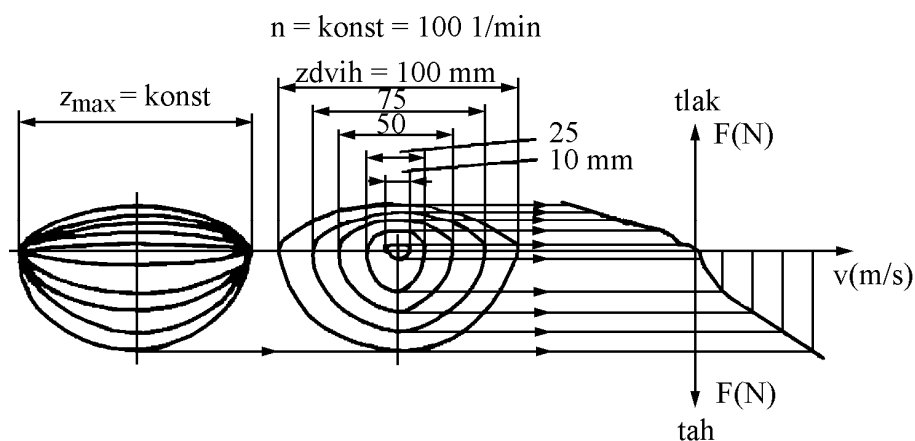


Obr. 11. 19 Provedení zkušebního stavu pro diagnostiku vymontovaných tlumičů

Tlumič je uchycen v zařízení pro měření síly a spojen s klikovým mechanismem. Konstrukce zkušebního stavu je taková, že poměr poloměru kliky k délce ojnice je tak malý, že vzniká sinusový pohyb s rychlostí $v(t)$. Otáčí-li se klika otáčkami n (min^{-1}), tj. úhlovou rychlostí $\omega = \pi n/30$, a je-li z amplituda zdvihu pístu tlumiče, pak rychlost pístu je dána vztahem

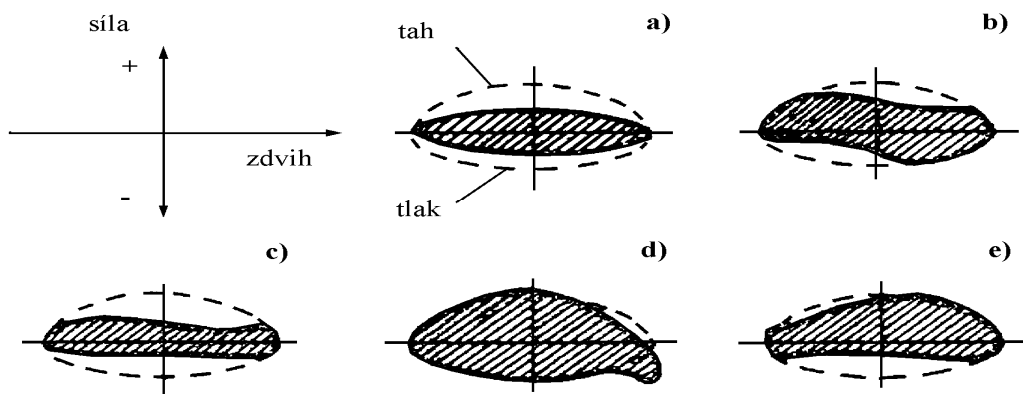
$$v(t) = \frac{z}{2} \sin(\omega t). \quad (11.22)$$

Z této rovnice je zřejmé, že rychlost pístu lze měnit zdvihem a otáčkami. Aby byl získán přehled o tlumících vlastnostech v celém pracovním rozsahu tlumiče, je měněna rychlost pístu při konstantních otáčkách změnou amplitudy zdvihu pístu. Zdvih pístu je tedy při $n = \text{konst}$ a jedinou proměnnou a lze změřit charakteristiky síla – dráha, popř. sestrojít charakteristiky síla – rychlost viz obr. 11. 20.



Obr. 11. 20 Změřené (síla – dráha) a sestrojené (síla – rychlost) charakteristiky tlumiče

K tomuto účelu se měří amplitudy síly v tahovém a tlakovém stupni při maximální rychlosti v poloze kdy $z = 0$. Pro tento zdvih pístu je při sinusovém pohybu zrychlení nulové, takže do výsledku měření nejsou zahrnuty setrvačné síly zkušebního stavu. Změna velikosti zdvihu se dosahuje změnou poloměru kliky. Plocha pod křivkou diagramu síla - dráha vyjadřuje tlumící práci během jednoho dvojitého zdvihu. Velikost této plochy a tvar křivek je měřítkem pro účinek tlumiče. Příklady charakteristických poruch tlumičů jsou na obr. 11. 21.



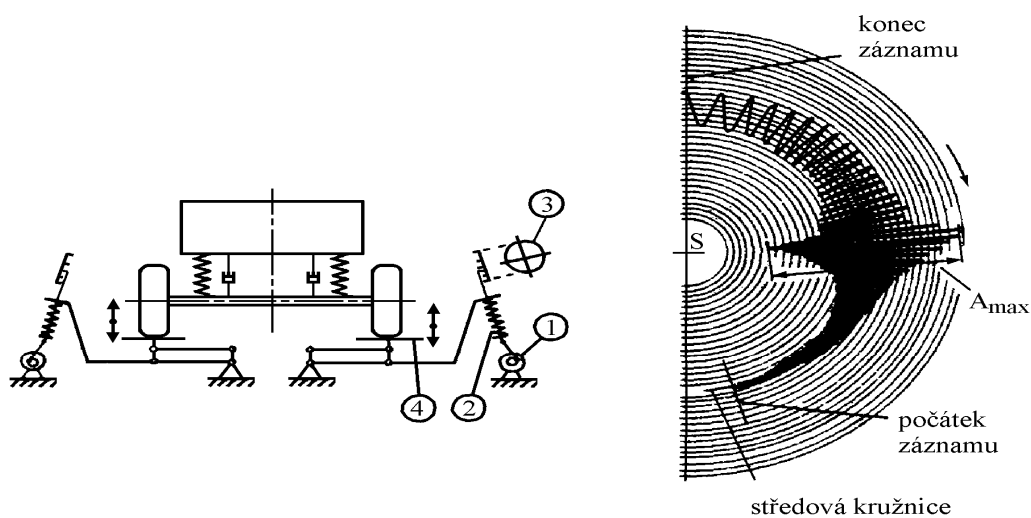
Obr. 11. 21 Charakteristické poruchy tlumičů

Legenda:

a - tlumič bez odporu při zatížení v tahu, b - tlumič bez počátečního odporu v tahu i tlaku, c - netěsný tlumič, d - tlumič s velkým odporem na konci zatížení v tlaku, e - tlumič s velkým odporem na konci zatížení v tahu

2) Zkoušení tlumičů na vozidle – metoda rezonanční

Při této metodě není potřebné provádět časově náročnou demontáž a montáž tlumičů, výsledek je však poněkud ovlivněn pružností pneumatik, resp. hmotností odpružených a neodpružených hmot vozidla, huštěním pneumatik, vůlemi v uložení a zavěšení kol, teplotou oleje v tlumičích aj. Schéma zařízení pro bezdemontážní kontrolu tlumičů a záznam o kmitání nápravy jsou znázorněny na obr. 11. 22.



Obr. 11. 22 Zařízení pro bezdemontážní kontrolu tlumičů a záznam kmitání nápravy

Legenda:

1 - klikový mechanismus, 2 - tlačná pružina, 3 - záznamové zařízení, 4 - opěra kola

Plošina, na které spočívá kolo, se rozkmitá klikovým mechanismem do kmitů vyšších než jsou vlastní kmity nápravy. Budící kmitání leží tedy v nadkritické oblasti kmitání nápravy. Po odpojení hnacího mechanismu klesá frekvence opěrné plošiny vlivem její setrvačnosti postupně přes rezonanční oblast kmitání nápravy až na nulovou hodnotu. Během této fáze se provádí záznam a velikost amplitud A_{max} kmitání nápravy v rezonanční oblasti je měřítkem účinnosti tlumiče. Platí, že je-li $A_{max} < A_{přip}$ je tlumič vyhovující, je-li $A_{max} > A_{přip}$ je tlumič nevyhovující. $A_{přip}$ je určováno výrobcem diagnostického zařízení pro každý typ vozidla. Diagnostika založená snímání přitlaku kola k měřicí plošině je znázorněna na obr. 11. 23.

Před zkoušením tlumičů pérování bezdemontážním způsobem je potřebné:

- zkontrolovat tlak vzduchu v pneumatikách a upravit jej na předepsané hodnoty,
- zkontrolovat mechanický stav uložení a závěsů kol, tlumičů aj. a odstranit nadměrné vůle,
- v zimním období nezkoušet vozidla, která bezprostředně před zkouškou stála delší dobu na volném prostranství při nízkých teplotách aj.

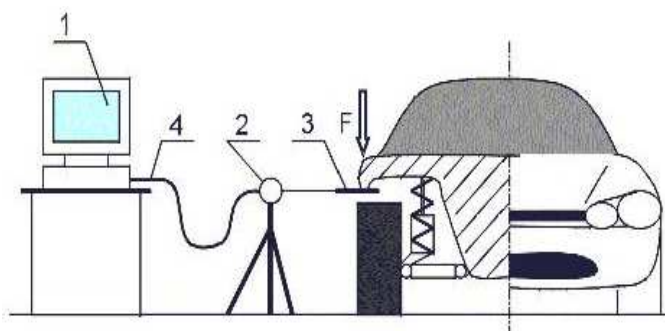


Obr. 11. 23 Tester pracující na principu snímání přitlaku kola k měřicí plošině

3) Dokmitová diagnostika – pro pružení, kdy měříme útlum odpérované hmoty vozidla

Metoda je založena na principu rázového vybuzení svislého kmitání odpérovaných hmot vozidla (karosérie) a vyhodnocení útlumu tohoto kmitání. Jako budícího rázu se využívá pádu nápravy (kola) z malé výšky (100 mm) nebo nověji nájezdu na plošinu v malé rychlosti a prudké zabrzdění a následné vyhodnocení útlumu svislého kmitání karoserie až do uklidnění kmitání. Tlumený rozkmit karosérie se přenáší na snímače a vyhodnotí, včetně charakteristického tvaru křivky. Největší amplituda (rozkmit) vyjadřuje tlumící schopnost a technický stav diagnostikovaných tlumičů.

Mezi dokmitové metody patří diagnostika zahrnující měření pohybu karoserie osobních vozidel obr. 11. 24. odporovým snímačem polohy, jehož raménko se opírá o podběh měřeného kola. Svislé kmitání vozidla se vyvolá ručně. Signál ze snímače se přepočte na relativní přítlak kola v souladu se směrnicí EUSAMA (European Shock Absorbers Manufactures Association). Výsledkem zkoušky je nejmenší hodnota přítlaku v průběhu testu v %. Systém zaznamenává vlastní frekvenci v Hz, velikost zkušební rychlosti výkmitu v m/s a měrný útlum závěsu kola vlevo/vpravo (rozdíl součinitelů útlumu obou stran nápravy v %).



Obr. 11. 24 Dokmitový tester

Legenda: 1 – počítač; 2 – odporový snímač; 3 – raménko; 4 – kabel

Výsledkem měření podle EUSAMA je nejmenší hodnota přítlaku kola k plošině podle vztahu

$$EUS = \frac{F_{\min}}{F_{st}} \cdot 100[\%]$$

Tab. 11. 3 Hodnocení stavu tlumičů podle metodiky EUSMA

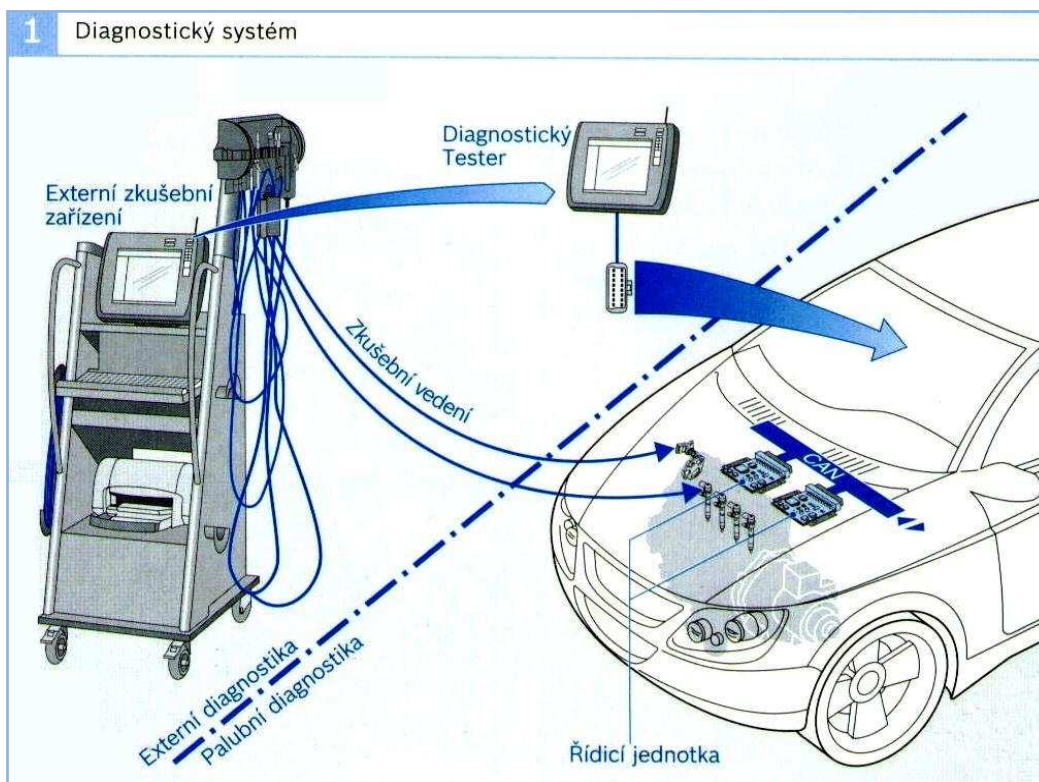
Naměřená hodnota adheze v %	Hodnocení stavu tlumičů
61 a více	Výborný
41 – 60	Dobrý
21 – 40	Vyhovující
1 – 20	Nevyhovující
0	Naprosto neúčinný

12. ÚVOD DO DIAGNOSTIKY (OBD) ELEKTRONICKÝCH SYSTÉMŮ VOZIDEL

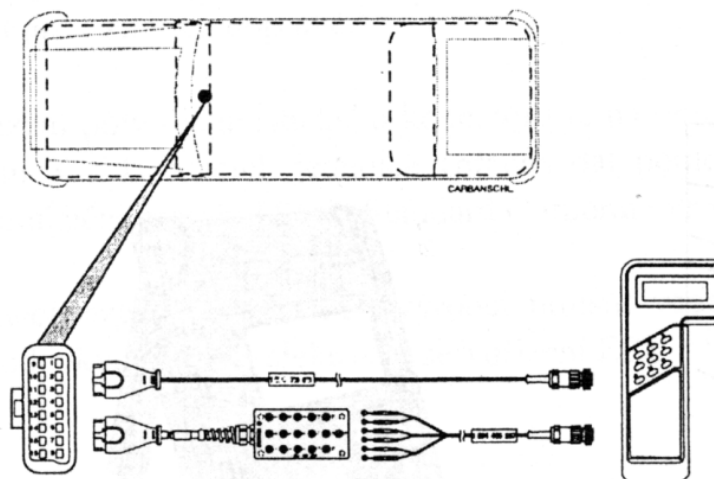
Masivní růst elektroniky u motorových vozidel, využití softwaru k řízení procesu spalování motoru a vysoká složitost moderních vstřikovacích systémů aj., kladou náročné požadavky na koncepci diagnostiky motoru a celého vozidla, sledování systému při jízdě (palubní diagnostika) a servisní diagnostiky. Možný diagnostický systém vozidla je na obr. 12. 1. Základem servisní diagnostiky je asistované vyhledávání závad, které spojuje různé možnosti zkušebních metod externí a palubní diagnostiky a zkušebních přístrojů. V souladu se zpřísněním emisní legislativy a požadavky na průběžné sledování rozpoznal i zákonodárce možnost využití palubní diagnostiky jako pomocného prostředku ke sledování emisí a vytvořil standardizaci nezávislou na výrobci. Integrovaná diagnostika v řídicí jednotce vozidla patří k základním funkcím elektronických systémů řízení motoru. Kromě vlastní kontroly řídicí jednotky jsou sledovány vstupní a výstupní signály a rovněž vzájemná komunikace řídicích jednotek. Pod pojmem palubní diagnostika se rozumí schopnost řídicí jednotky provádět průběžné vlastní sledování s využitím tzv. „softwarové inteligence“, tj. rozpoznávat závady, ukládat je a diagnosticky vyhodnocovat. Palubní diagnostika pracuje bez přídavných přístrojů. Algoritmy pro sledování činnosti kontrolují v průběhu provozu vstupní a výstupní signály a celý systém s funkcemi z hlediska chybného chování a poruch. Rozpoznané závady jsou ukládány v paměti závad řídicí jednotky. Uložené informace o závadách lze načítat prostřednictvím sériového rozhraní.

Trendem v zavádění elektronických systémů do vozidel je řešení diagnostiky vozidla a jeho systémů přímo ve vozidle pomocí integrované – interní (palubní) diagnostiky OBD (On Board Diagnostics). V palubní diagnostice se využívá senzorů, snímačů a čidel, které jsou součástí elektronických řídicích systémů, například elektronického zapalování, nebo systémů ABS/ASR aj. Mnoho výrobců připravuje budoucí řešení diagnostických přístrojů, která předpokládají vnitřní propojení jednotlivých oddělení servisu a mají umožnit online spojení s databankou výrobce. Palubní diagnostika je obvykle zahrnuje systém pro sledování emisí. V poslední době se rozšířily pojmy **sériová diagnostika** pro „softwarovou“ diagnostiku pomocí testeru připojeného na diagnostickou zásuvku vozidla a **paralelní diagnostika**, pro klasické proměřování jednotlivých prvků a obvodů vozidla přístrojovou technikou.

Vnitřní - sériová diagnostika Sériová diagnostika, obr. 12. 2., zahrnuje test řídicích jednotek, čtení chybových kódů a test akčních členů (OBD, EOBD ...) připojením na diagnostické rozhraní vozidla pomocí testeru (čtečky chybových kódů);



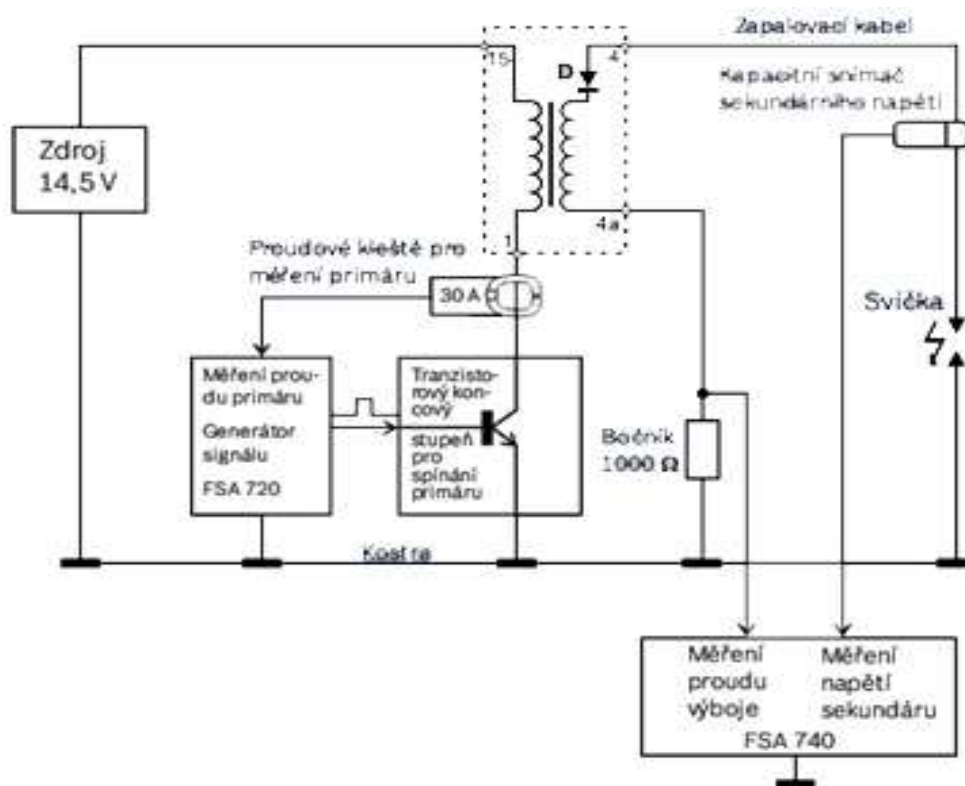
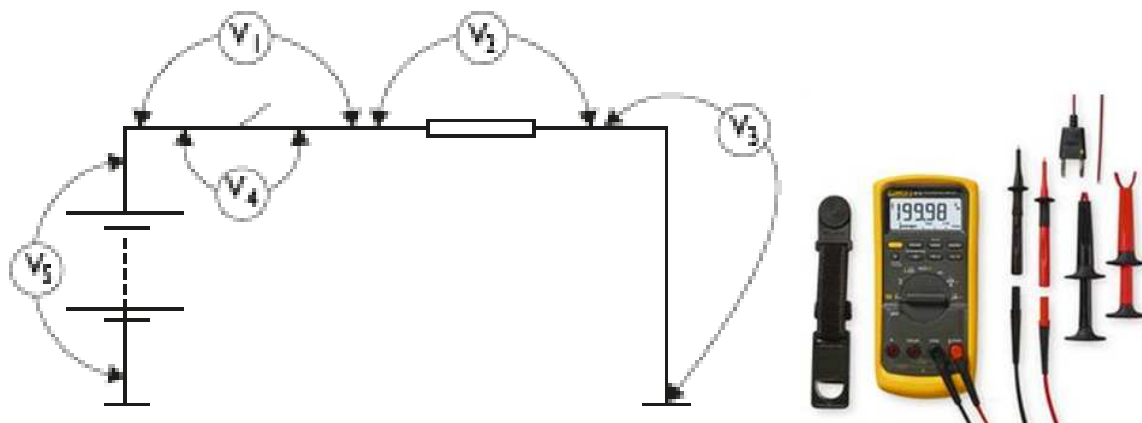
Obr. 12. 1 Možný diagnostický systém vozidla



Obr. 12. 2 Sériová diagnostika

Vnější - paralelní diagnostika

Paralelní diagnostika, obr. 12. 2., zahrnuje měření parametrů, vlastností a charakteristik elektrických a elektronických zařízení multimetrem, osciloskopem aj.



Obr. 12. 3 Paralelní diagnostika

Palubní diagnostika OBD

Diagnostický systém OBD II musí spolehlivě rozpoznat závadu vedoucí ke změně normálního složení výfukových plynů. Změnu rychle a přesně lokalizovat, uložit do paměti závad a rovněž o ní informovat řidiče, např. rozsvícením kontrolky na palubní desce. Systém musí být konstruován tak, aby se zamezilo rozsvícení kontrolky při případném krátkodobém a málo podstatném překročení stanovené hranice příslušných parametrů, protože plané

poplarchy by měly řadu nežádoucích efektů. Zpravidla tedy musí být hraniční hodnota překročena o 50 % a toto se musí potvrdit v opakovaném jízdním cyklu.

V devadesátých letech bylo v USA zavedeno první OBD-I, norma ukládala výrobcům automobilů elektronické sledování funkce dílů ovlivňujících emise. Tato diagnostika měla za úkol: rozpoznat závadu, zobrazit ji na přístrojové desce, uložit do paměti vozidla a umět ji na přání sdělit. Závady se zobrazovaly pomocí rozsvícení varovné kontrolky. Z hlediska klasifikace stupně vývoje hodnotíme tento systém jako na přístroji nezávislé načtení závady (On Board Read Out Method), kdy se závada přečetla známým "blikacím kódem" nezávisle na napojení speciálního přístroje. Tento systém je známý jako "náhradní metoda" z vyplňování protokolu o měření emisí, která má dodnes platnost při čtení a mazání závad z řídicích jednotek. U těchto systémů lze jednoduchým spojením dvou diagnostických kontaktů paměť chybovým kódem na přístrojové desce nebo v motorovém prostoru tzv. "vyblikat". Mezitím se toto vyblikávání chyb rozrostlo z původního sledování lambda regulace na další díly, jako např. teplotní snímače, potenciometry apod. Přísnější normy v oblasti emisí škodlivin a požadavky CARB (California Air Resources Board) na OBD II z konce devadesátých specifikovali, požadavek na automatizovaný systém řízení motoru EMS (Engine Management System), aby kontroloval systémy regulace emisí společně s dalšími komponenty souvisejícími s emisemi.

Vnitřní diagnostika

Řídicí jednotka systému kontinuálně kontroluje tzv. plausibilitu jednotlivých signálů tj. zda je jejich hodnota nebo tvar signálu v předepsaném tolerančním poli. Odchytky mimo toleranci nebo výpadky signálu jsou zaznamenávány do paměti závad a mohou být při prohlídce v servisu vyznačeny diagnostickým přístrojem schopným s řídicí jednotkou komunikovat (např. KTS 670 aj.). Tím získáváme rychle informace o chybách systému a hodnotách, které jsou mimo předepsané toleranční pásmo. Odpadá hledání ve svazcích kabelů a vedení, závada se objeví na displeji přístroje nebo je identifikována pomocí blikacího kódu. Diagnostika odhalí příčinu závady, resp. určí oblast k jejímu hledání, ale nevystaví protokol např. o vadných dílech, které je nutné vyměnit. Pouze ve specializovaných opravách je možnost přeprogramování řídicí jednotky nebo její opravy.

Test elektronických systémů

Elektronickým testem rozumíme výměnu dat mezi řídicí jednotkou a testerem. U některých systémů jsou hlášení o závadách předávána ve formě blikacího kódu, většina novějších

systemů vydá číselný kód závady, ke kterému diagnostický přístroj přiřadí textovou informaci. Podle druhu systému může být zaznamenáno asi od 6 do 60 různých chybových kódů. První úrovní testu vnitřní diagnostiky je vyčtení paměti závad a její vymazání. Většina systémů je vybavena i možností druhé úrovně, pomocí které lze získat další důležité informace o stavu systému. V druhé úrovni lze aktivovat akční členy (taktovací ventil, ovladač škrticí klapky, čerpadlo sekundárního vzduchu, aj.), nebo porovnat naměřené hodnoty signálů jednotlivých snímačů a čidel s hodnotami předepsanými. Diagnostické testery umožňují rovněž určité programování řídicí jednotky, základní nastavení po výměně některých komponent nebo po předepsané servisní prohlídce. Při použití univerzálních přístrojů jsou kladeny vysoké požadavky na znalosti obsluhy a množství informací, jimiž je servis vybaven. Určitý problém vzniká při napojení přístroje, tj. nalezení diagnostické zástrčky a určení druhu signálu na jednotlivých konektorech. Nezbytným předpokladem je dokonalá znalost diagnostikovaného systému.

Důležité normy

Od devadesátých let byly v normě DIN ISO 9141 definovány následující požadavky:

- na diagnostický přístroj a zástrčku,
- obsah protokolu,
- objem vyměňovaných dat.

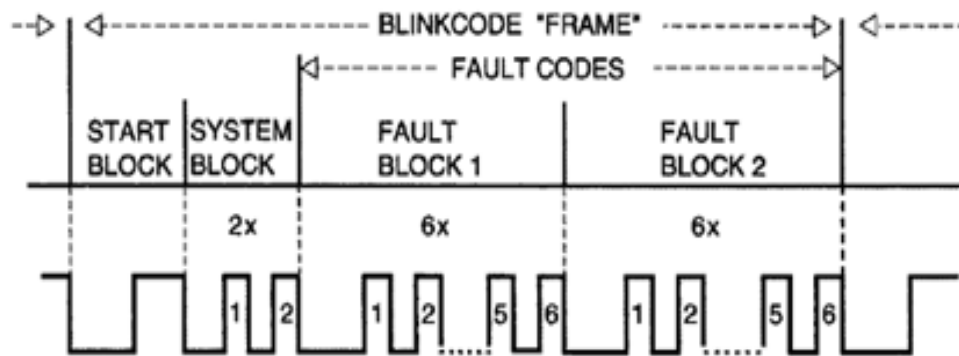
Realizace této normy zůstala u výrobců vozidel však prakticky bez odezvy, o čemž svědčí v velká rozmanitost diagnostických zástrček a chybových protokolů. V devadesátých letech byla přijata norma DIN ISO 9141-2, vycházející z americké normy OBD II. Z ní byly striktně převzaty výše uvedené požadavky a vznikla relativně pevně definovaná forma komunikace.

OBD I byla v USA zavedena v roce 1989 v USA organizací CARB (California Air Resource Board). Důvodem byla ochrana životního prostředí a zlepšení kvality ovzduší. Byla stanovena kontrola systémů relevantních pro tvorbu emisí. Jejich chybná funkce se znázorňovala svítící kontrolkou na palubní desce. Tím byly odhaleny závady, související s tvorbou emisí a pomocí blikacího kódu bylo možné závadu vyčíst. Od modelového roku 1994 byla OBD I nahrazena verzí II.

OBD II definuje:

- komunikaci (SAE J 1850),
- zástrčku (SAE J 1962),

- diagnostický přístroj (SAE J 1978),
- obsah protokolu (SAE J 1979),
- kódy závad (SAE J 2012), (SAE - Society of Automotive Engineers).



Obr. 12. 4 Příklad blikacího kódu

OBD II dále předepisuje stálou kontrolu:

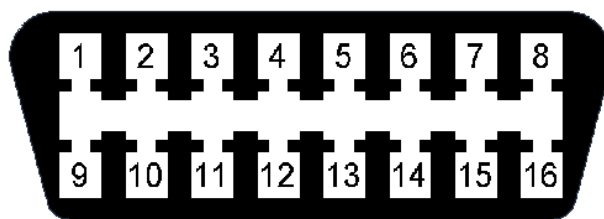
- spalování
- katalyzátoru,
- lambda-sondy,
- systému sekundárního vzduchu,
- systému odvodušnění nádrže,
- systému recirkulace spalin.

Technickou realizaci požadavků OBD II nepředepisuje. Normou ISO 4092 byly popsány následující pojmy:

- diagnostika - určení příčiny poruchy funkce;
- přezkoušení - přezkoušení systému, popř. komponent během provozu;
- kontrola - pozorování nebo měření nějakého elementu a porovnání;
- zkouška - postup porovnání parametrů systému, popř. komponent získaných během simulovaných nebo reálných podmínek s pevně stanovenými hodnotami.

Diagnostická zásuvka

CARB SAE J 1962 popisuje jednotlivé piny diagnostické zásuvky CARB.



Obr. 12. 5 Zapojení konektoru OBD II

Legenda:

Pin 2 - J1850 Bus+; Pin 4 - Chassis Ground Pin; 5 - Signal Ground; Pin 6 - CAN High (J-2284); Pin 7 - ISO 9141-2 K Line; Pin 10 - J1850 Bus; Pin 14 - CAN Low (J-2284); Pin 15 - ISO 9141-2 L Line; Pin 16 - Battery Power;

Konektory 7 a 15 jsou určeny pro přenos dat podle DIN ISO 9141-2, konektory 2 a 10 pro přenos dat podle SAE J 1850. Přes tyto konektory může být propojena pouze řídicí jednotka relevantní pro tvorbu emisí (příprava směsi a zapalování). Datová a inicializační vedení jiných řídicích jednotek mohou být připojena na konektory, které nejsou normou předepsány (např. 1, 6, 8, 9,13). Přezkoušení těchto řídicích jednotek se provádí pomocí adaptérového boxu, na jehož zásuvku se připojuje univerzální vedení diagnostického přístroje. Norma předepisuje kromě konektorů zástrčky také její polohu ve vozidle..

Diagnostický přístroj

Diagnostický přístroj definovaný v SAE J 1978 musí automaticky rozeznat přenos dat zkoušeného systému managementu motoru. V OBD II je komunikace dovolena podle:

- evropské normy ISO 9141-2,
- americké normy SAE 1850.

Diagnostický přístroj musí zobrazit:

- kódy závad relevantní tvoření emisí,
- skutečné hodnoty relevantní tvoření emisí,
- data z okolí motoru.
- výsledky kontroly lambda-sond.

Kromě toho ještě přístroj musí:

- umožňovat vymazání paměti závad,
- obsahovat on-Line nápovědu (on-Line znamená, že jsou texty nápovědy vyvolatelné během provozu,
- umět zpracovat rozšířený diagnostický protokol SAE J 2205.

Norma SAE J 1978 předepisuje 5 druhů diagnostických přístrojů:

\$01 Vyčtení diagnostických dat systémů pohonu vozidla:

- analogové vstupní a výstupní signály (např. signál lambda-sondy),
- digitální vstupní a výstupní signály (např. signál spínače volnoběhu),
- informace o stavu systému (např. ručně řazená/automatická převodovka, klimatizace ano/ne),
- výsledky výpočtů (např. čas vstříku).

\$02 Vyčtení podmínek při vzniku první závady motoru, např. otáčky motoru - 850 1/min., teplota oleje - 83 °C pro:

- analogové vstupní a výstupní signály,
- digitální vstupní a výstupní signály,
- informace o stavu systému,
- výsledky výpočtů.

\$03 Vyčtení kódů závad relevantních pro tvorbu emisí.

\$04 Vymazání / odstranění informací relevantních pro tvorbu emisí.

\$05 Zobrazení výsledků přezkoušení lambda-sondy.

V SAE J 1979 je popsán způsob a datový formát jednotlivých druhů provozu.

DIN ISO 9141

Norma DIN ISO 9141 stanovuje jako základní tři různé systémy přenosu dat:

- Systémy s diagnostickým vedením K.
- Systémy s diagnostickým vedením K a L.
- Systémy ve spojení.

První skupina obsahuje tři druhy systémů:

- volné diagnostické vedení,
- diagnostické vedení vysílající data po aktivaci, tj. po krátkém spojení s kostrou vedení (unidirectional),
- výměna dat v obou směrech (bidirectional), např. mezi diagnostickým přístrojem a řídicí jednotkou.

Přídavně může být systém ve vozidle aktivován přes spojení s kostrou, např. pro vyhodnocení blikacího kódu

Rovněž ve druhé skupině jsou tři druhy systémů:

- aktivace systému spojení s kostrou vedení L (uvnitř vozidla nebo diagnostickým přístrojem),
- aktivace systému spojení s kostrou vedení K (uvnitř vozidla nebo diagnostickým přístrojem),
- aktivace systému přes diagnostické vedení L klíčovým slovem nebo diagnostickým přístrojem.

U systémů ve spojení, např. oddělený systém zapalování a přípravy směsi, jsou vedení K a L vzájemně propojena. Rozdělují se na systémy:

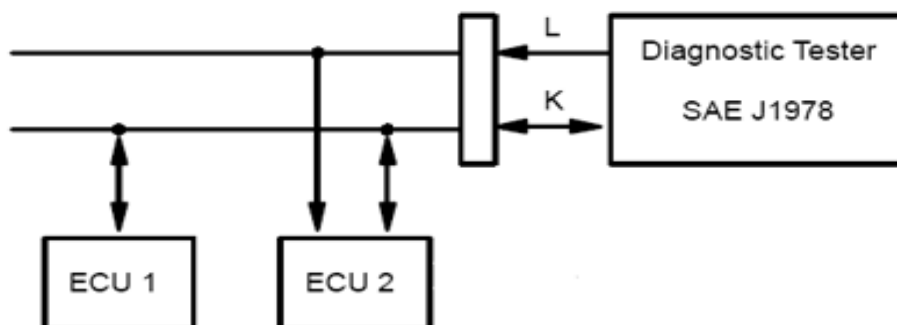
- s přenosem dat pouze v jednom směru (unidirectional) tzv. vedení L,
- přenosem dat v obou směrech (bidirectional) tzv. vedení K.

Moderní vozidla se připojují již přímo na sběrnici CAN (popřípadě přes vnitřní bránu (gateway), která je vyvedena do konektoru OBD (DLC). Testery dokáží podle testovaného modelu přepínat mezi komunikací po CAN sběrnici a nebo po starším typu komunikace, tzv. K-line, popřípadě K-L.

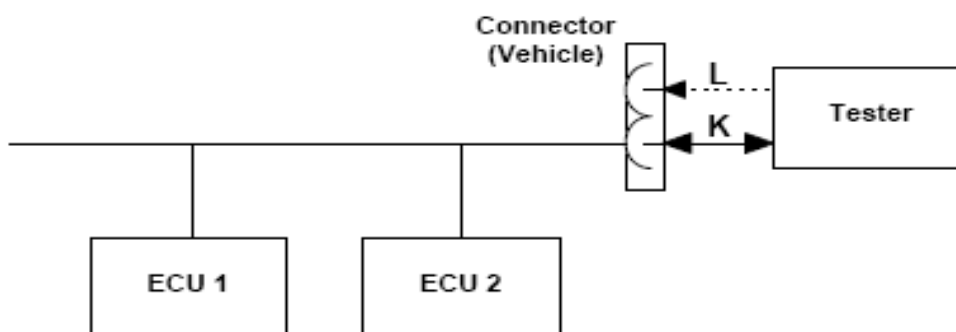
Různé aktivace systému

Způsoby aktivace dvou systémů:

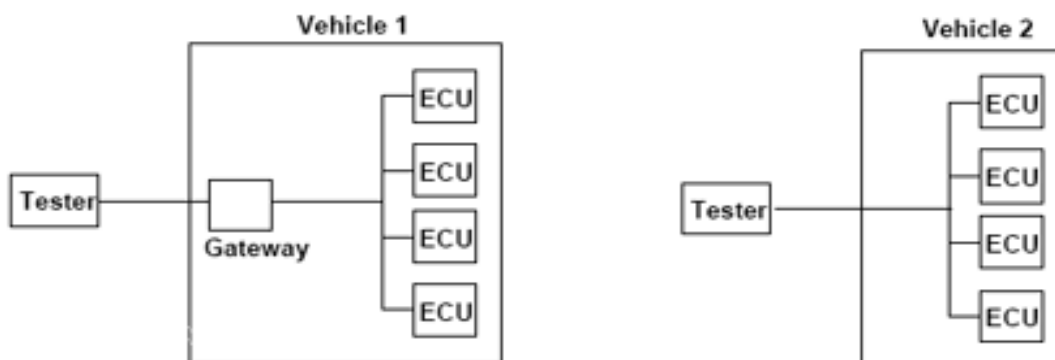
- generátor adres - 5 Baud,
- generátor logické "0" po dobu 1,8 sekundy.



Obr. 12. 6 Připojení testeru k diagnostické sběrnici vedením K + L (starší provedení)



Obr. 12. 7 Připojení testeru k diagnostické sběrnici vedením K

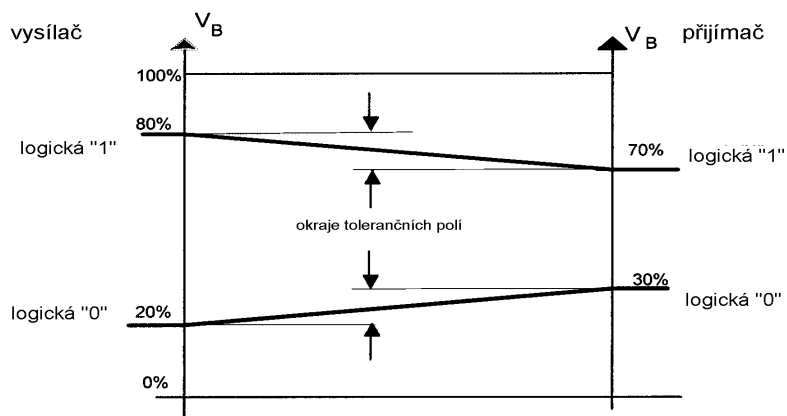


Obr. 12. 8 Propojení diagnostického testeru přes vozidlovou gateway (vozidlo 1) a propojení přímo na diagnostickou sběrnici ŘJ (vozidlo 2)

Na aktivační (inicializační) signál musí systém odpovídat, a to předepsaným způsobem. V případě propojení více systémů datovým vedením je nutné přídavné opatření, aby nedošlo k nechtěné inicializaci dalších řídicích jednotek. Tím jsou ostatní systémy aktivovány např. vlastním aktivačním zařízením.

Definice úrovně napětí signálu

Komunikace probíhá na základě výměny pevně stanovených signálů logické "0" a "1" mezi řídicí jednotkou a diagnostickým přístrojem a to v obou směrech.



Obr. 12. 9 OBD - definice signálu

Diagnostický přístroj vysílá, řídicí jednotka přijímá (údaje v "%" se vztahují na napětí baterie):

Logická "1": - diagnostický přístroj - volnoběžné napětí/min. 95%, pod zatížením min. 87%, - řídicí jednotka - min. 80% ;

Logická "0": - diagnostický přístroj -10% při zatížení proudem max. 2 A - řídicí jednotka - max. 20% ;

Řídicí jednotka vysílá, diagnostický přístroj přijímá:

Logická "1": - řídicí jednotka - min. 91% - diagnostický přístroj - min. 80% ;

Logická "0": - řídicí jednotka - max. 20 "% - diagnostický přístroj - max. 20% ;

Pokles (u logické " 1 ") a vzestup (u logické "0") napětí je podmíněn odporem vedení.

Podle DIN I50 9141 jsou k dispozici tři varianty aktivace:

- Aktivace diagnostickým přístrojem,
- Spojení s kostrou vedení K nebo vedení K a L,
- Externě (např. spínačem).

DIN ISO 9141-2

Norma DIN ISO 9141-2 byla přizpůsobena OBD II. Obě normy se odlišují pouze způsobem komunikace. Evropská norma převzala ostatní specifikace, americká oproti tomu přibrala komunikaci podle ISO DIN 9141-2 jako alternativu k SAE J 1850. Pro Evropu upravený systém OBD II zvaný EOBD byl ve státech EU unie zaveden v roce 2000, a to nejprve pro zážehové motory, vznětové motory budou následovat. EOBD se od OBD II příliš neliší, jiný může být rozsah diagnostikou sledovaných komponentů ve vozidle. EOBD je výsledkem přizpůsobení OBD II předpisům Evropské unie. Základní myšlenka EOBD je, že nesprávně fungující nebo vadné součásti mohou způsobit zvýšení podílu škodlivin ve výfukových plynech motorových vozidel. Ovšem přímé měření obsahu škodlivých látek CO, HC a No_x během jízdy není stávajícími technickými prostředky možné. Vychází se proto z předpokladu, že obsah škodlivin bude nízký, jestliže součásti, které se na jejich redukci podílejí, budou pracovat bezchybně.

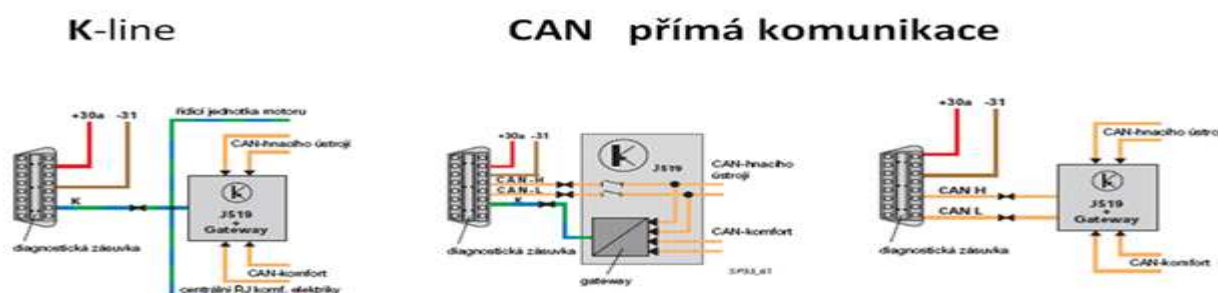


Obr. 12. 10 Obecné schéma propojení řídicích jednotek vozidla ke sběrnici K-line

EOBD vyhovuje následujícím požadavkům:

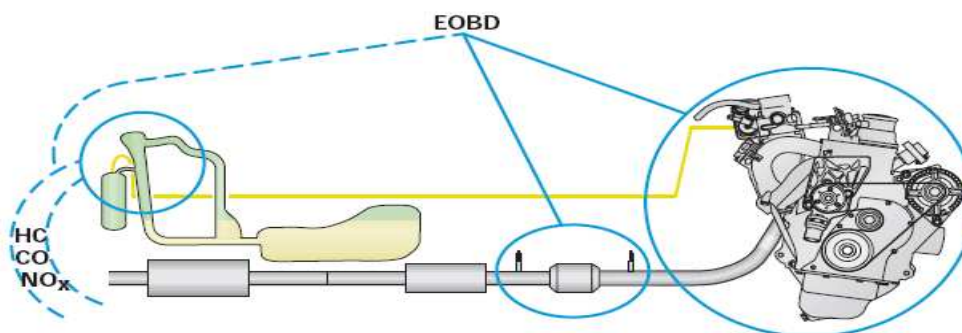
- sledovat všechny díly, které se podílejí na složení výfukových plynů,
- umožňovat kontrolu těchto dílů vlastní diagnostikou,
- používat normalizovanou diagnostickou zásuvku, která je snadno přístupná ze sedačky řidiče,
- umožňovat optické varování řidiče v případě, že se na některém z uvažovaných dílů vyskytne závada,
- chránit katalyzátor,
- ukládat závady do paměti,
- používat standardní kódy závad pro všechna vozidla,
- zobrazovat závady na běžných diagnostických přístrojích,

- zobrazovat provozní podmínky, při kterých k závadě došlo,
- stanovit, kdy a jak má být závada, která má vliv na obsah emisí ve výfukových plynech, zobrazena,
- používat standardizované označování součástí, systému a závad.



Obr. 12. 11 Připojení testeru k diagnostické sběrnici K-line a CAN

EOBD je diagnostický systém řízení motoru, který průběžně kontroluje činnost snímačů a akčních členů, které mají vliv na obsah emisí ve výfukových plynech a v čas upozorňuje na případnou závadu.



Obr. 12. 12 Schéma EOBD

Kontrolka emisí upozorňuje na to, že některý z dílů, který ovlivňuje hodnotu emisí není v pořádku.

Kontrolka bliká: *jestliže se vyskytla závada, která by mohla způsobit škody na katalyzátoru.*

Kontrolka svítí trvale: *jestliže se vyskytla závada, která způsobí zvýšení obsahu emisí ve výfukových plynech.*

Pro řidiče to je upozornění, aby navštívil autorizovaný servis, který závadu odstraní.

Existují 4 třídy kódů závad (chybových kódů):

P (Powertrain) pohon,

C (Chassis) nástavba,

B (Body) podvozek,

U (Undefined) původně nepoužito, dnes obsazeno pro vozidlové sítě (network).

Každá tato třída je rozdělena do 4 podskupin, jejichž číslo se připojuje za písmeno označení skupiny:

- 0 Kód závady podle kontroly SAE.
- 1 Kód závady podle kontroly ISO DIN 9141-2.
- 2 Kód závady podle kontroly výrobce.
- 3 rezervované kódy závady.

Příklad:

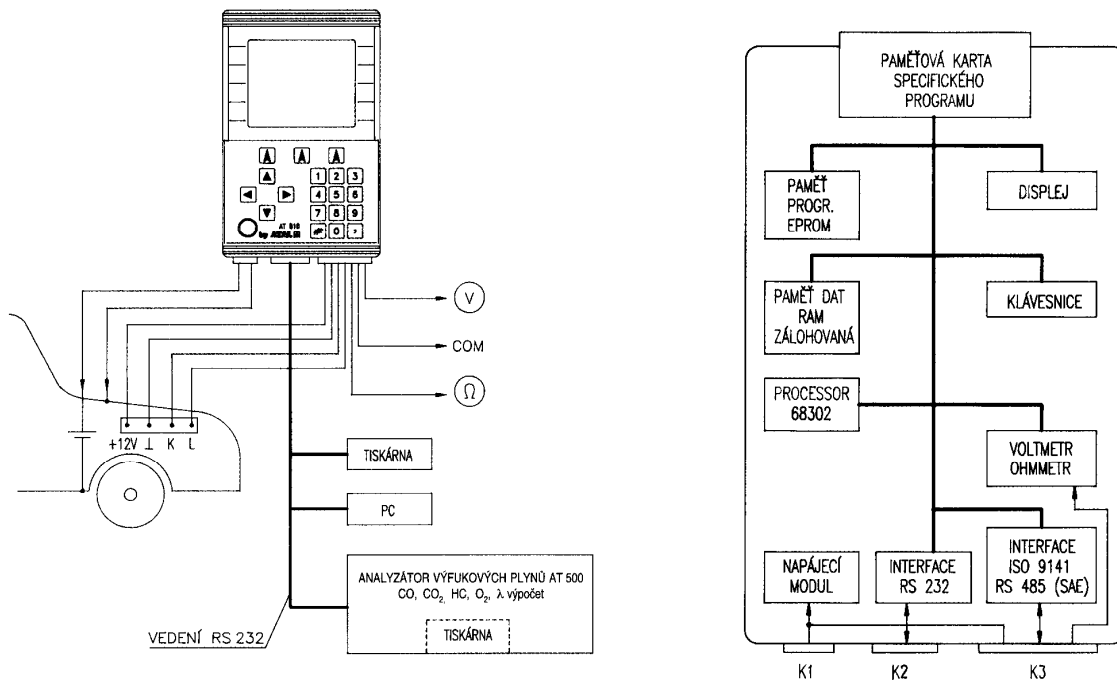
- P 0122 příliš nízký signál snímače škrticí klapky.
- P 0123 příliš vysoký signál snímače škrticí klapky.
- P 0130 lambda sonda 1 nefunguje.
- P 0100 měřič množství/hmoty vzduchu nefunguje.

Definice úrovně signálů se oproti původní normě zjednodušila. Oblast byla následovně rozšířena:

logická "0" : 0% - 30%,

logická "1" : 70% -100%.

Aby byl signál řídicí jednotkou (přijímač) rozeznán, musí logická "1" diagnostického přístroje (vysílač) činit nejméně 80% napětí baterie, logická "0" nejvýše 20%.



Obr. 12.13 Diagnostický přístroj (ATAL AT 510) pro měření systému OBD

Komunikace

V praxi je důležité vyhledávání závad v systému pomocí autodiagnostického obvodu s vlastní pamětí.

Komunikační rozhraní:

ISO 9141 – diagnostika

RS 485 (SAE) – diagnostika

RS 232 (RS 422) – vnější zařízení

Význam palubní diagnostiky v budoucnosti zřejmě poroste a komplexní diagnostický systém, integrovaný do všech řídicích jednotek je dalším ze stupňů pronikání elektroniky do vozidel.

Diagnostické módy (dotazy):

01 – Výzva k výpisu verze řídicí jednotky

02 – Výzva k výpisu chybové paměti

03 – Diagnóza akčních členů

04 – Uvedení do základního nastavení

05 – Mazání chybové paměti

06 – Ukončení výstupu

07 – Kódování řídicí jednotky

08 – Načtení bloku naměřených hodnot

15 – Readinesscode

Sériová diagnostika

Čtení readinesscodu

- připojit diagnostický přístroj
- zapnout zapalování
- druh provozu "Vlastní diagnostika vozidla".

Příklad realizace diagnostiky pomocí testeru: pokud chceme testovat motor, tester se podle své vnitřní tabulky pro „značku“ zeptá adresně elektroniky motoru, obvykle je adresa 01.

Adresa:

01 *Elektronika motoru*

Volitelné funkce:

01 – Výzva k výpisu verze řídicí jednotky - identifikace

02 – Výzva k výpisu paměti závad

03 – Diagnóza akčních členů

04 – Uvedení do základního nastavení

05 – Mazání paměti závad

06 – Ukončení výstupu

07 – Kódování řídicí jednotky

08 – Načtení bloku naměřených hodnot

15 – Readinesscode

Zobrazení readinesscodu je možno provést pomocí adresy 01 a funkce 15, nebo funkce 08, zobrazovaná skupina 100.

Identifikace

Pomocí této funkce lze zobrazit identifikační údaje řídicí jednotky, např.: číselné označení dílu, verzi programu, VIN, aj.

Tyto informace mohou být důležité v případě nutnosti výměny řídicí jednotky nebo jiného poškozeného dílu.

Čtení paměti závad

Tato funkce umožní zobrazit všechny závady uložené v paměti řídicí jednotky. Pokud není paměť závad prázdná, jsou závady postupně uvedeny spolu s číslem závady (odpovídá servisní dokumentaci), typem závady a popisem.

Většina systémů dělí závady do několika skupin:

- chyby trvalé nebo okamžitě přítomné (takové, které jsou v okamžiku čtení na vozidle přítomny),
- chyby sporadické nebo okamžitě nepřítomné,
- chyby možné (ŘJ detekuje příznaky chyby, ale dosud není schopna tuto potvrdit).

DTC Diagnostic Trouble Code

Příklad:

P 0122 příliš nízký signál snímače škrtkové klapky.
P 0123 příliš vysoký signál snímače škrtkové klapky.
P 0130 lambda sonda 1 nefunguje.
P 0100 měřič množství/hmoty vzduchu nefunguje.

Mazání paměti závad

Vymazání závad z paměti je velmi důležitým krokem, který musí být realizován po odstranění příčin závad uložených v paměti řídicí jednotky. Bez tohoto kroku by zůstala soustava v nouzovém režimu a kontrolka by nadále svítila. Je to rovněž krok potřebný k ověření, zda byla oprava správně provedena, aby se po opětovném vyčtení paměti kód závad neobjevil a kontrolka závad po nastartování motoru nesvítila.

Čtení parametrů

Tato funkce umožňuje sledovat, jaké informace dostává řídicí jednotka od jednotlivých snímačů systému, případně jakým způsobem získané informace interpretuje, v jakém stavu se nachází či jaké pokyny dává akčním členům. Množství a druh dostupných parametrů je závislý na konkrétním vozidle (motoru, provedení, výbavě, atd.). U většiny systémů je zobrazován název parametru a dále hodnota a případně jednotka. Veličiny jsou zobrazeny buď reálnou hodnotou ze snímače, nebo s přepočtem na měřenou veličinu (např. teplota chladicí kapaliny bývá většinou uvedena přímo v °C i jako měřené napětí na teplotním čidle aj.).

Test akčních členů

Pomocí této funkce lze vyvolat test akčních členů a tím ověřit správnou funkci některých důležitých prvků systému, např. škrticích klapek, relátek, ventilů, čerpadel, zapalovacích cívek apod., přímo na vozidle. Výhodou je skutečnost, že testujeme prvek včetně kabeláže a konektorových spojů. Rozsah prvků, které lze takto testovat, je určen schopnostmi řídicí jednotky použitého systému a také výbavou vozidla. Vlastní test probíhá tak, že řídicí jednotka vydává testovanému akčnímu členu pokyny k činnosti a zároveň je sledována správná činnost buď přímo řídicí jednotkou nebo obsluhou. Tuto funkci lze provádět, ve většině případů, pokud není motor nastartovaný.

Nastavení / Konfigurace

Pomocí této funkce je možno číst a případně i měnit některé hodnoty uložené v řídicí jednotce, a tak ji správně přizpůsobit vyměněným dílům (např. jednotka škrticích klapky) či jiným specifickým požadavkům (nastavení základních volnoběžných otáček). Při nastavování nových hodnot musíme respektovat dosah požadované změny a používat tyto funkce jen v odůvodněných případech a při dobré znalosti příslušných servisních postupů. Nastavení nesprávných hodnot může vést ke špatné funkci motoru či některého jiného systému.

Readnesscode – kód připravenosti [čti: redynyskaud]

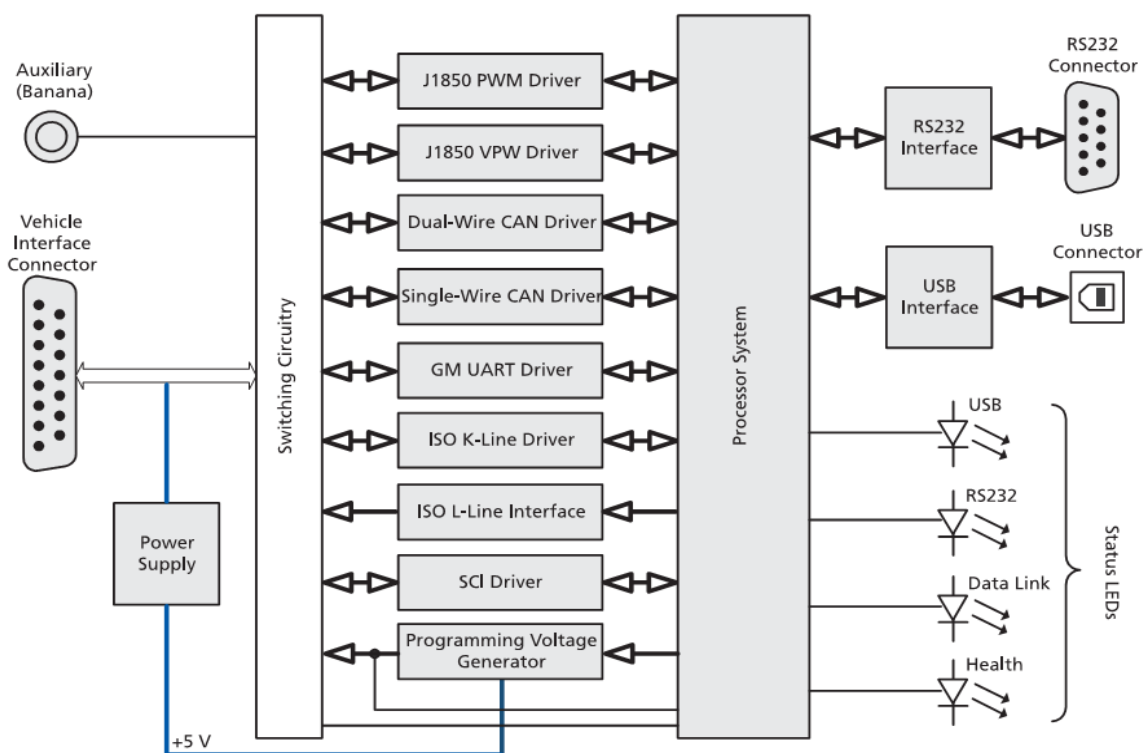
V rámci EOBD je průběžně kontrolována činnost všech elektrických součástí, které se podílejí na složení výfukových plynů. Readnesscode je 8místné číslo, které informuje o stavu diagnostiky součástí, ale neinformuje o závadách v systému. Navíc jsou v pravidelných intervalech kontrolovány systémy, které mají vliv na složení výfukových plynů, aby bylo možno zjistit odchylky (např. zpětné vedení výfukových plynů).

Stav diagnostiky:

- 0** – diagnostika byla úspěšně ukončena
- 1** – diagnostika byla přerušena
 - diagnostika nebyla ještě provedena
 - diagnostika ještě nemohla být provedena

Tab. 12. 1 Význam readinesscodu

Význam 8místného čísla readinesscodu								
Systém je v pořádku, pokud při tvorbě readinesscodu jsou na všech pozicích „0“ (nuly).								
1	2	3	4	5	6	7	8	Diagnostická funkce *
							0	katalyzátor
						0		vyhřívání katalyzátoru
					0			nádobka s aktivním uhlím (systém odvětrání palivové nádrže)
				0				systém sekundárního vzduchu
			0					klimatizace
		0						lambda-sondy
	0							vyhřívání lambda-sondy
0								zpětné vedení výfukových plynů



Obr. 12. 14 Příklad vnitřní architektury univerzálního testeru pro komunikaci různých

KONTROLNÍ OTÁZKY

- 1) *Vysvětlete pojem technická diagnostika, základní pojmy diagnostiky, podmínky, kterým musí vyhovovat objekty diagnostiky a typy diagnostických úloh.*
- 2) *Jaké jsou základní diagnostické principy, na grafu vysvětlete vliv demontáže funkčních částí na průběh jejich opotřebení.*
- 3) *Objasněte pojem diagnostický systém, schéma testové a funkční diagnostiky.*
- 4) *Pojednejte o expertním systému a jeho úloze v technické diagnostice strojů.*
- 5) *Jak dělíme technickou diagnostiku podle různých hledisek, pojednejte o provozní diagnostice.*
- 6) *Objasněte pojmy zásadní a náhradní řešení technické diagnostiky.*
- 7) *Objasněte možné využití technické diagnostiky v praxi.*
- 8) *Jakým způsobem dělíme diagnostické metody a prostředky, klasifikujte přístrojové diagnostické prostředky.*
- 9) *Pojednejte o diagnostických signálech a možnostech jejich zpracování.*
- 10) *Vysvětlete podstatu, význam a možnosti využití akustických metod technické diagnostiky.*
- 11) *Vysvětlete podstatu, význam a možnosti využití vibračních metod diagnostiky.*
- 12) *Vysvětlete podstatu, význam a možnosti využití tepelných metod diagnostiky.*
- 13) *Vysvětlete podstatu, význam a možnosti využití tribotechnických metod technické diagnostiky.*
- 14) *Rozeberte možnosti diagnostiky vozidlových spalovacích motorů.*
- 15) *Objasněte základní metody a prostředky zjišťování výkonu vozidlového spalovacího motoru.*
- 16) *Objasněte možnosti, metody a prostředky zjišťování těsnosti spalovacího prostoru vozidlového spalovacího motoru.*
- 17) *Objasněte metody a prostředky zjišťování spotřeby paliva a motorového oleje vozidlového spalovacího motoru.*
- 18) *Objasněte problematiku analýzy výfukových plynů zážehového spalovacího motoru.*
- 19) *Objasněte problematiku kouřivosti vznětového spalovacího motoru.*
- 20) *Objasněte problematiku měření teplot u vozidlových spalovacích motorů.*
- 21) *Objasněte možnosti, metody a prostředky zjišťování vibrací a hluku vozidlových spalovacích motorů.*
- 22) *Objasněte možnosti, metody a prostředky diagnostiky vozidlového spalovacího motoru s využitím koncentrace produktů opotřebení v motorovém oleji.*
- 23) *Rozeberte možnosti, metody a prostředky diagnostiky palivových soustav vznětových motorů.*
- 24) *Rozeberte možnosti, metody a prostředky diagnostiky palivových soustav zážehových motorů.*
- 25) *Rozeberte možnosti, metody a prostředky diagnostiky mazacích soustav vozidlových spalovacích motorů.*

- 26) *Rozeberte možnosti, metody a prostředky diagnostiky chladících soustav vozidlových spalovacích motorů.*
- 27) *Pojednejte o metodách a prostředcích diagnostiky převodových ústrojí vozidel.*
- 28) *Vysvětlete možnosti a metody diagnostiky hlavních částí převodových ústrojí vozidel.*
- 29) *Pojednejte o možnostech a metodách diagnostiky podvozků vozidel.*
- 30) *Pojednejte o legislativních požadavcích na brzdy vozidel.*
- 31) *Pojednejte o legislativních požadavcích na řízení vozidel.*
- 32) *Rozeberte možnosti, metody a prostředky diagnostiky brzd vozidel.*
- 33) *Rozeberte možnosti, metody a prostředky diagnostiky řízení vozidel.*
- 34) *Pojednejte o možnostech a metodách vyvažování kol s pneumatikou.*
- 35) *Pojednejte o možnostech a metodách diagnostiky tlumičů pérování.*
- 36) *Pojednejte o problematice sériové a paralelní diagnostiky elektrických a elektronických systémů vozidel.*
- 37) *Co rozumíte pod pojmem EOBD, jaké plní funkce a k čemu tento systém můžeme využít.*

POKYNY K ZPRACOVÁNÍ SAMOSTATNÉ PÍSEMNÉ PRÁCE KE ZKOUŠCE Z PŘEDMĚTU DIAGNOSTIKA MOTOROVÝCH VOZIDEL

Úvodem:

- cvičení z předmětu bude kromě klasických laboratorních cvičení uskutečněno cestou vypracování samostatné písemné práce na zvolené nebo zadané téma,
- téma je libovolné vybrané z oblasti diagnostiky (popř. spolehlivosti a údržby) motorových vozidel,
- téma můžete individuálně konzultovat s učitelem (vhodnost, aj.),
- samostatně najděte knižní literární prameny a pouze orientačně doplňkové informační zdroje ve webovém prostředí,
- odevzdání práce je podmínkou pro udělení zápočtu a připuštění ke zkoušce,
- v případě výborného hodnocení bude písemná práce uznána jako předmětová zkouška s hodnocením A.

Pokyny pro zpracování:

- písemnou práci zpracujte písemně v textovém editoru Microsoft Office Word v češtině nebo angličtině – není přípustné zasílání práce v Adobe Leader,
- rozsah textu 5 – 10 stran A4,
- řádkování 1,5 okraje 3, velikost písma 12 ,
- text pište na normalizovaný kancelářský bílý papír (nepoužívejte křídový nebo průklepový papír),
- úvodní strana: výstižný název práce, jméno a příjmení autora, škola, fakulta, ústav (katedra), studijní skupina, a datum zpracování,
- dále: krátký souhrn (resumé, abstrakt) – maximálně 5 řádků a klíčová slova: maximálně 5 – 6 slov,
- úvod práce: stručně a výstižně charakterizujte řešený problém
- text: čleňte na kapitoly a kapitoly uvádějte stručně výstižnými názvy, text podle potřeby doplňte rovnicemi, tabulkami, grafy, obrázky, fotografiemi (preferují se vlastní originální obrázky, grafy a fotografie, pouze výjimečně převzaté s udáním zdroje),

- pod obrázky (fotografie) v textu napište číslo a název – není přípustný cizojazyčný text obrázků, pokud není celá práce v anglickém jazyku, nad tabulku napište číslo a název, rovnice číslujte na pravé straně,
- používejte pouze jednotky soustavy SI,
- závěr: shrňte získané výsledky, řešení, **vlastní přínos – napište červeně**, vlastní názory, hodnocení problematiky apod.,
- na konec práce uveďte použitou literaturu – zde řádkování 1 podle normy Bibliografické citace - ČSN 010197.

Pokyny k obsahu písemné práce:

- písemná práce musí být zpracována zcela samostatně,
- obsahem je vybraná dílčí část probírané a související problematiky, kterou student relativně detailně prostuduje a písemně zpracuje,
- v úvodu student vysvětlí proč si vybral problém, jaký je současný stav problematiky podle literatury (teorie – fyzikální podstata), jaké vidí problémy praktické, jak lze tyto problémy řešit, co je jeho vlastním návrhem, přínosem, názorem, řešením,

Pokyny pro odevzdání práce:

- práci odevzdejte nejpozději 1 týden před zkouškou
- kromě písemného výtisku práce, který sebou přineste na zkoušku, zašlete práci v termínu minimálně 1 týden (7 pracovních dnů) před zkouškou, v elektronické podobě s názvem souboru: **VUT–Příjmení.doc** na adresu: jiri.stodola@unob.cz

SEZNAM POUŽITÉ A DOPORUČENÉ LITERATURY

- [1] BAUMRUK, P. (1994). Příslušenství spalovacích motorů. Skripta ČVUT. Praha
- [2] BEDROŠ, J. (1980). Diagnostika nákladních automobilů. SNTL Praha
- [3] BEDROŠ, J.-BERÁNEK,K. (1986). Diagnostika silničních motorových vozidel. NADAS Praha
- [4] BOSCH, R. (2007). Automotive Handbook. 7th edition Robert Bosch, GmbH. ISBN 978-076801953-7
- [5] BRÜEL&KJAER. (2002). Firemní literatura – Měření chvění, Vibrační zkoušení. Praha 2
- [6] CRAWFORTH,A,R.(1992). The Simplified Handbook of Vibration Analysis. Volume I and II. CSI
- [7] ČELECHOVSKÝ, P. (1981). Základy technické diagnostiky TAT. VA, S - 2000. Brno
- [8] ČELECHOVSKÝ, P.- JANOUŠEK, V. (1979). Teoretické základy technického provozu TAT. Skripta VA Brno. S-2083
- [9] ČSN 01 0105 (1984). Názvosloví technické diagnostiky.
- [10] HAVLÍČEK, J. a kol.: (1983). Provozní spolehlivost strojů. SZN Praha
- [11] HRUŠKA, J.- ČASNÝ, O.- STODOLA, J.- RŮŽIČKA, M. (1990). Technický provoz automobilů. Učebnice VA, U - 1074. Brno
- [12] JANOUŠEK, I.- KOZÁK, J.- TARABA, O. a kol. (1988). Technická diagnostika. SNTL Praha
- [13] JETMAR, J-STODOLA, J. (1991). Tribologie a její aplikace v technické diagnostice automobilů. Skripta VA Brno. S-2067
- [14] KADLEC,K. (2001) Provozní analyzátoři plynů. Dostupné na internetové adrese: http://web.vscht.cz/kadleck/aktual/MT_INaRP/A10_2001.pdf
- [15] KOLEKTIV. (2003). Snímače v motorových vozidlech. Robert Bosch odbytová s.r.o., Praha, 2003, ISBN 80-903132-5-6
- [16] KREIDL, M a kol. (2001). Diagnostické systémy. ČVUT Praha. ISBN 80-01-02349-4
- [17] KREIDL,M. – ŠMÍD,R. (2006). Technická diagnostika: senzory – metody – analýza signálů. BEN – technická literatura. Praha. ISBN 80-7300-158-6
- [18] KREJČA,P. Infračervené analyzátoři plynů Teledyne. Dostupné na internetové adrese: http://www.chemagazin.cz/Texty/CHXVIII_1_cl2.pdf
- [19] KUHN, L. (1988). Technická diagnostika. Skripta ČVUT Praha
- [20] LÁNSKÝ, M. (1990). Teorie automatizovaných diagnostických systémů v dopravě a spojích. NADAS Praha

- [21] MACHALÍKOVÁ, J. (2006). Ferrografie. Dostupné v elektronické podobě na adrese: <
http://mail.upce.cz/~machjar/FG_pro_PH.doc>
- [22] MIŠUN, V.(1998). Vibrace a hluk. VUT Brno. ISBN 80-214-1262-3
- [23] NAVRÁTIL, M. – PLUHARŮ, O. (1985). Měření a analýza mechanického kmitání. SNTL
 Praha
- [24] OBRAZ, J. (1976). Ultrazvuk v měřicí technice. SNTL Praha
- [25] PAPOUŠEK, M. (1976). Diagnostika spalovacích motorů. SNTL Praha
- [26] ROBERT BOSCH GmbH. (2005). Systém vstřikování s tlakovým zásobníkem Common
 Rail pro vznětové motory, Robert Bosch odbytová spol. s.r.o.
- [27] ROBERT BOSCH GmbH. (2002). Elektronická regulace vznětových motorů EDC,
 Robert Bosch odbytová spol. s.r.o.
- [28] ROBERT BOSCH GmbH. (2007). Automotive Electrics/Automotive Electronics. 5th
 Edition. ISBN 978-0-8376-1514-7
- [29] SEDLÁČEK, M. (1993). Zpracování signálů v měřicí technice. ČVUT Praha
- [30] SIKORA, A. (1995). Základy technické diagnostiky. Skripta VA Brno. S-632
- [31] SIKORA, A. (1989). Diagnostika ženíjní techniky. Skripta VA Brno. S-2557
- [32] SIKORA, A.- HEJMAL, Z.(1994). Provozní diagnostika ženíjní techniky. Učebnice VA
 Brno. U-752
- [33] STODOLA, J.(1985). Základy technické diagnostiky. Skripta VA Brno. S-2000/II
- [34] STODOLA, J. (1995). Spolehlivost a diagnostika. Učebnice vysokých škol. VA Brno, U-
 248
- [35] STODOLA, J. (2002). Provozní spolehlivost a diagnostika. Vysokoškolská učebnice. 2.
 přepracované vydání. VA Brno. U-1183. ISBN 80-85960-43-5
- [36] STODOLA, J. (2005). Diagnostika speciálních vozidel. Vysokoškolská učebnice. 1.
 vydání. UO Brno. U-3066. ISBN 80-7231-017-8
- [37] STODOLA, J. – PEŠLOVÁ, F – KRMELA, J. (2008). Opatřebení strojních součástí.
 Monografie. 1. vydání. UO Brno. ISBN 978-80-7231-552-9
- [38] STODOLA, J. – MACHALÍKOVÁ, J. (2006) Provozní hmoty a materiály pro MVT. Skripta
 S-3683. UO Brno. ISBN 80-7231-167-0
- [39] STODOLA, J. – MAREK, J. – FURCH, J. (2007). Logistika. Skripta MZLU. ISBN 978-80-
 7375-071-8
- [40] STRAKA, B. (1986). Motorové oleje a tribotechnická diagnostika naftových motorů.
 NADAS Praha,
- [41] SURÝ, J. (1881). Metody a prostředky bezdemontážní diagnostiky. Naše vojsko Praha

- [42] ŠTĚRBA,P.(2004) Elektrotechnika a elektronika automobilů. Computer Press Praha. ISBN 80-251-0211-4
- [43] TAKÁTS,M. (1997). Měření emisí spalovacích motorů. ČVUT Praha. ISBN 80-01-01632-3
- [44] TŮMA, J.(1997). Zpracování signálů získaných z mechanických systémů užitím FFT. Sdělovací technika s.r.o. Praha ISBN 80-901936-1-7
- [45] VAŇKOVÁ,M a kol. (1995). Hluk, vibrace a ionizující záření v životním a pracovním prostředí. Část I. PC-DIR s.r.o. Brno. ISBN 80-214-0695-X
- [46] VAŇKOVÁ,M a kol. (1995). Hluk, vibrace a ionizující záření v životním a pracovním prostředí. Část II. VUT Brno. ISBN 80-214-0818-9
- [47] VÉMOLA,A. (2006). Diagnostika automobilů I a II. 1. vydání. Litera ISBN 80-85763-31-1 a 80-85763-32-X
- [48] VORLÍČEK, Z.(1991). Spolehlivost a diagnostika výrobních strojů. Skripta ČVUT Praha
- [49] VLK, F. (1984). Zkoušení vozidel. Skripta VUT Brno, 1984
- [50] VLK, F.(2005). Zkoušení a diagnostika motorových vozidel. Brno 2005.
- [51] ZELINGER, J.- HELEBRANT, F. (1992). Technická diagnostika výrobních zařízení. VŠB Ostrava. ISBN 80-7078-111-4
- [52] ZDRAŽIL,V. (1997). Kmity. VUT Brno. ISBN 80-214-0958-4
- [53] ZNAMIROVSKÝ, K. a kol. (1981). Provozní spolehlivost strojů a agregátů. SNTL Praha.