

**ČESKÁ SPOLEČNOST PRO JAKOST**

**Novotného lávka 5, 116 68 Praha 1**

# **Technická diagnostika a spolehlivost**



**Materiály z 45. setkání  
odborné skupiny pro spolehlivost**

Praha, listopad 2011



## OBSAH:

<b>Systemová diagnostika</b>	3
<i>Prof. Ing. Milan Lánský, DrSc.</i>	
<b>Identifikace poškození konstrukcí pomocí dynamické odezvy</b>	23
<i>Ing. Shota Urushadze, PhD., prof. Ing. Miroš Pirner, DrSc., prof. Ing. Ladislav Frýba, DrSc.</i>	
<b>Vibrodiagnostika převodových ústrojí</b>	38
<i>Ing. Pavel Kukla, Ph.D.</i>	
<b>Aplikace instrumentálních metod v tribotechnické diagnostice</b>	46
<i>Marie Sejkorová, Jaroslava Machalíková</i>	

# SYSTÉMOVÁ DIAGNOSTIKA

Prof. Ing. Milan Lánský, DrSc.  
Dopravní fakulta Jana Pernera  
Univerzita Pardubice

## Úvod

Systémová diagnostika se zabývá systematickým a systémovým přístupem k řešení tzv. diagnostické úlohy, která představuje zobecnění podstaty činnosti diagnostických systémů. Je všeobecným základem a východiskem pro řešení konkrétních diagnostických úloh. Je všeobecnou teorií a metodologií diagnostiky obecných objektů.

Běžný přístup k řešení diagnostických úloh je oborový nebo předmětový. Např. známe diagnostiku spalovacích motorů, trobodiagnostiku, diagnostiku elektronických systémů, diagnostiku dopravní infrastruktury atd. Jednotlivé oblasti jsou vesměs dokonale propracovány, od teoretického vstupu až po konkrétní řešení. Systémová diagnostika má za úkol reflektovat podstatné znaky, jednotlivé zákonitosti a postupy; analyzovat je a následně syntetizovat s cílem jejich zevšeobecnění.

Přednáška je rekapitulací tvorby systémové diagnostiky jako odrazu podstatných poznatků a výsledků výzkumné a vývojové činnosti od roku 1966. Tj. od počátků rozvoje technické diagnostiky u nás i v zahraničí, až do současné doby, která se vyznačuje sofistikovanými diagnostickými systémy.

Poznámka: Poznátky uvedené v přednášce byly už vícekrát publikovány.

## Tři základní oblasti technické diagnostiky:

- I. Klasické diagnostické systémy (klasická technická diagnostika, vycházející z lékařské diagnostiky);
  - I.a. Diagnostická komplexně- podobnostní čísla;
- II. Diagnostické informační systémy;
- III. Diagnostická analýza.

Diagnostické informační systémy a diagnostická analýza jsou nadstavbou diagnostiky technických objektů.

Obsahem systémové diagnostiky je zobecněné a systémové podání fenomenologie diagnostiky, která zahrnuje teorii, technologii a modelové aplikace diagnostických systémů, klasifikaci, zobecněné struktury a činnosti diagnostických systémů i jejich subsystémů, včetně interakcí s diagnostickým pozadím a lidským činitelem. Zahrnuje metodologii navrhování diagnostických systémů, metodologii volby diagnostických veličin a teorii bezrozměrných diagnostických komplexních čísel. Výklad problematiky diagnostických systémů je vždy potřebné provést v uceleném pojetí a v logickém sledu: "teoretická (zobecněná) podstata ▪ zákonitosti činností modelově reálných diagnostických systémů ▪ metodologie navrhování diagnostických systémů, včetně tzv. inženýrských výstupů". Systémový výklad vytváří obousměrný přechod mezi teorií a realitou.

Znalost systémové diagnostiky má být součástí znalostí odborníků z oblastí, ve kterých využití diagnostických informací je, nebo by mělo být, prioritou, např. při řízení jakosti a provozní spolehlivosti, při řízení obnovy (udržování, opravování,

servis, inovace) i v oblasti projektování a konstruování dopravních prostředků, strojů a zařízení, kde probíhá tvorba inherentní (vložené) spolehlivosti prvního a druhého druhu. Vědomosti o možnostech využití diagnostických informací jsou užitečné i pro vrcholový management podniku (řízení, organizace, plánování, ekonomika), protože vedle standardních informací jsou k dispozici aktuální informace o reálném technickém stavu technického vybavení podniku (dopravní prostředky, výrobní stroje, manipulační zařízení, mobilní pracovní stroje).

V projekční i provozní praxi představuje znalost systémové diagnostiky jakousi „příručku o možnostech principiálního řešení“ složitějších problémů z oblasti diagnostiky a spolehlivosti. Znalost systémové diagnostiky umožňuje řešit tzv. diagnostickou úlohu v aplikaci na jakýkoliv technický objekt nebo produkt.

Pro úplnost si úvodem uveďme základní definice ze kterých budeme vycházet:

Technická diagnostika je vědní a současně praktický obor, zabývající se metodami a prostředky zjišťování skutečného technického stavu objektů v reálném čase, bez jejich demontáže nebo destrukce. Hlavním cílem je co nejvíce nahradit intuitivní a individuální přístup k určování technického stavu, přístupem exaktním a systematickým s maximálním využitím všech relevantních informací o diagnostikovaném objektu nebo produktu.

### Diagnostická úloha

Určení technického stavu a jeho diagnostické zhodnocení představuje tzv. diagnostickou úlohu. Teoretické přístupy k řešení této diagnostické úlohy lze souhrnně rozdělit na deterministické a stochastické. Oba přístupy jsou ve své podstatě a cílech shodné. Deterministické metody daný proces popisují stručněji. Lépe odpovídají logice myšlení člověka. Vycházejí z předpokladů, které se považují za jednoznačné, i když také obsahují značný faktor náhodnosti. V praxi obvykle dochází ke kombinaci uvedených metod.

Exaktní teoretické vyjádření mnohotvárnosti jevů a komplexních interakcí všech relevantních komponent, které vzájemně jednotě vytvářejí a ovlivňují výsledný stav diagnostikovaného objektu, je značně obtížné. Změny jednotlivých složek technického stavu, např. dopravního prostředku, jsou určovány provozním režimem, provozními podmínkami, klimatickými jevy a dalšími vlivy. Vznik a rozvoj poruch působí souběžně i proti sobě. Podobně se superponují i účinky degradačního působení. Je nesnadné určit váhy jednotlivých účinků a jejich vzájemných vztahů vzhledem k výslednému účinku. V určitých okamžicích vznikají vesměs lokální oblasti dočasné neurčitosti technického stavu, rozuměj neurčitosti jejich rozpoznání. Proto se v praxi aplikují kombinace diagnostických metod, často s využitím empirických (statistických) poznatků. Výsledky vždy verifikuje lidský činitel.

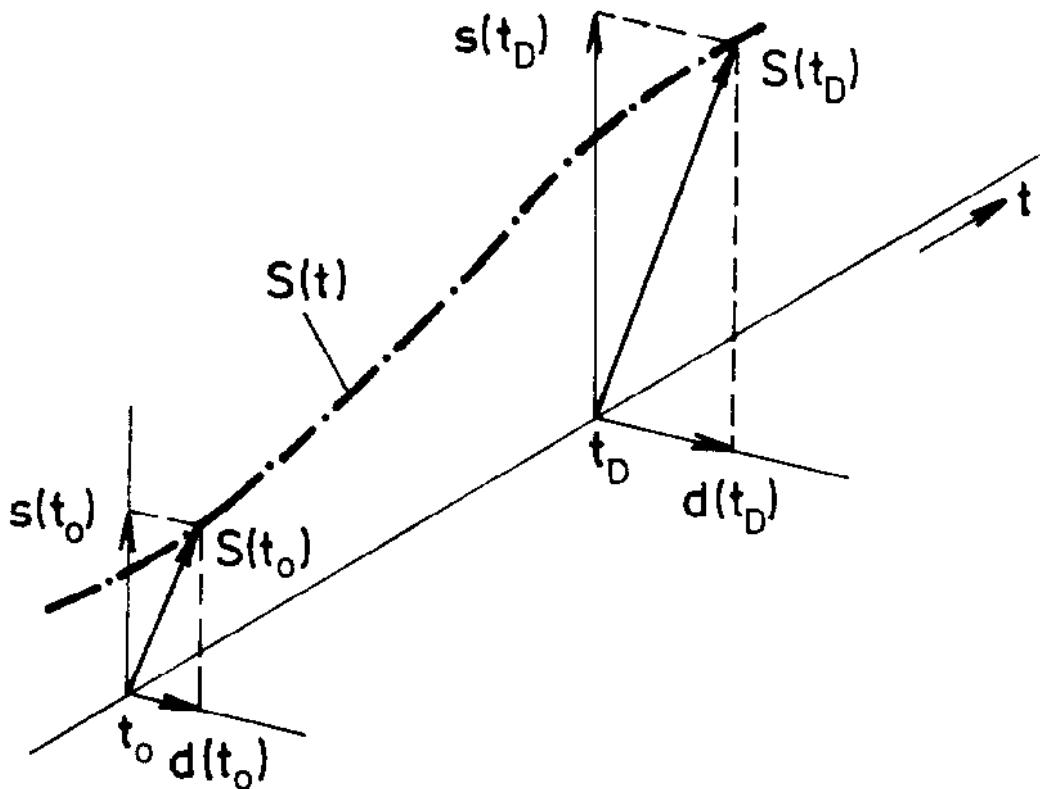
Veličiny popisující stav diagnostikovaného objektu řadíme do tří skupin:

Diagnostická veličina: nositel informace o technickém stavu diagnostikovaného objektu nebo jeho části, její hodnota byla získána (naměřena) vesměs v reálném čase. Technický stav objektu diagnostiky je pak vyjádřen uspořádanou množinou diagnostických veličin:



$$\mathbf{s}(t) = [s_1(t), s_2(t), \dots, s_i(t), \dots, s_n(t)]; \quad (1)$$

t ... čas.



Obr. 1.

Doplňková diagnostická veličina: nositel informace o stavu diagnostického pozadí (okolí), které působí na diagnostikovaný objekt. Byla získána (naměřena) vesměs v reálném čase. Vliv diagnostického pozadí (okolí diagnostikovaného objektu) je vyjádřen množinou doplňkových diagnostických veličin:

$$\mathbf{d}(t) = [d_1(t), d_2(t), \dots, d_i(t), \dots, d_m(t)]; \quad (2)$$

Empirická diagnostická veličina: nositel informace o technickém stavu diagnostikovaného objektu nebo jeho pozadí, která v případě potřeby doplňuje informace nesené diagnostickými nebo doplňkovými diagnostickými veličinami. Byla získána (naměřena) v minulosti nebo je odrazem analogie s jiným objektem. Tyto hodnoty tvoří množinu empirických diagnostických veličin:

$$\mathbf{e}(t) = [e_1(t), e_2(t), \dots, e_i(t), \dots, e_r(t)] \quad (3)$$

Teorie možnosti řešení diagnostické úlohy je založena na platnosti dvou axiomů:

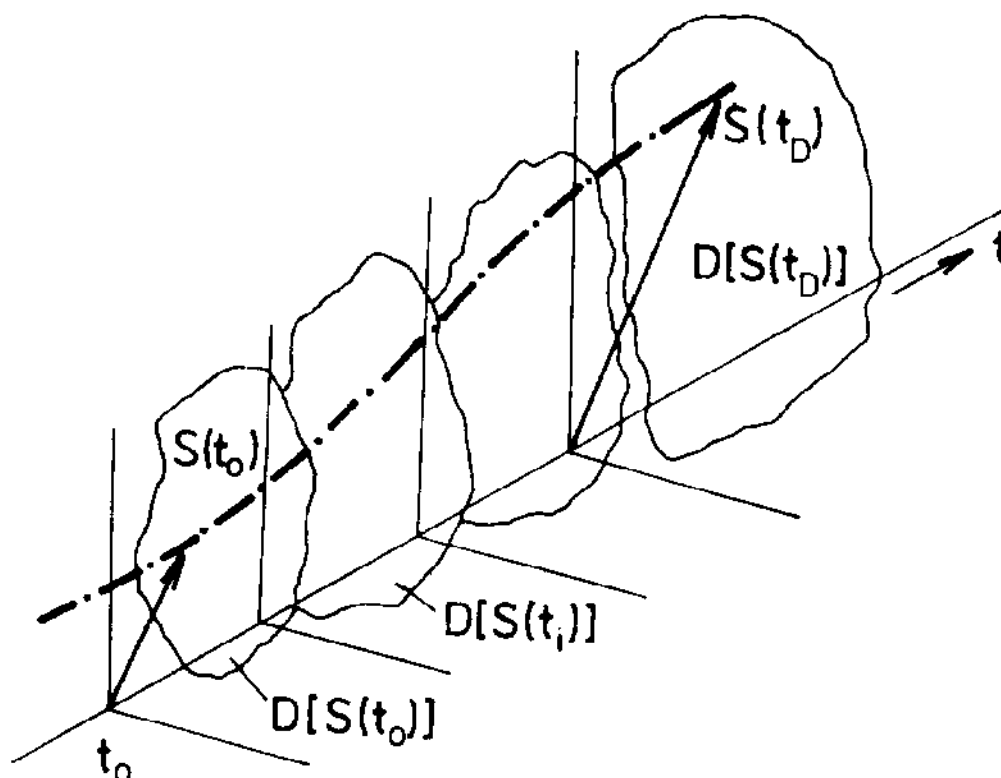
AXIOM č.1: Existuje trajektorie možných technických stavů pro každý technický objekt. Trajektorie vytváří prostor technických stavů.

Technický stav objektu  $\mathbf{S}(t)$  lze znázornit jako bod pohybující se v  $(n+m+1)$  rozměrném prostoru v závislosti na čase, po trajektorii možných technických stavů. Takto definovaný prostor nazveme prostorem technických stavů. Protože množiny veličin  $\mathbf{s}(t)$  a  $\mathbf{d}(t)$  jsou uspořádané množiny, je v trojrozměrném prostoru (obr.1.) technický stav objektu  $\mathbf{S}(t)$  určen jako koncový bod daný součtem vektorů diagnostických veličin a doplňkových diagnostických veličin, a to v závislosti na čase:

Na obr.1. je dále znázorněno:

$t_0$  ... počátek technického života objektu, resp. počátek sledování jeho technického stavu,

$t_D$  ... čas diagnostikování, (přítomnost),  $t < t_D$  minulost,  $t > t_D$  budoucnost.



Obr.2

AXIOM č.2: Existuje prostor relevantních diagnóz pro každý technický objekt.

Lze tedy uvažovat, že prostor technických stavů současně představuje prostor relevantních diagnóz, které odrážejí příznaky jednotlivých technických stavů objektů. Tento prostor označíme jako prostor diagnóz  $\mathbf{D}[\mathbf{S}(t)]$ . Máme tedy pod pojmem diagnóza namysli rozpoznávání stavů na základě příznaků, tj. hodnot diagnostických veličin a doplňkových diagnostických veličin.

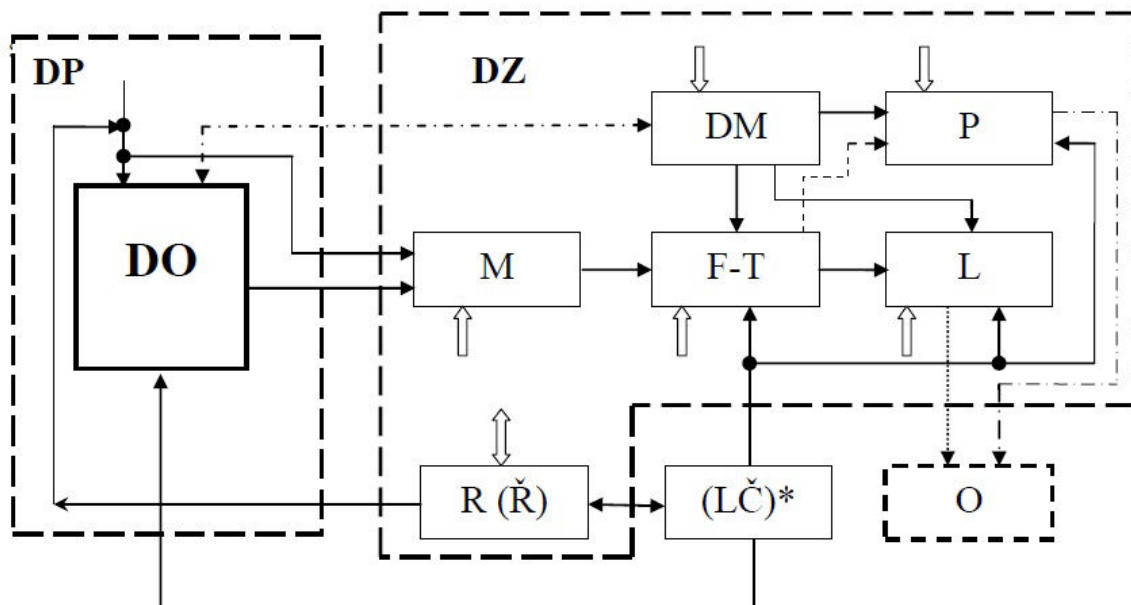
Na obr.2. jsou znázorněny "řezy prostorem", které představují jednotlivé diagnózy  $\mathbf{D}[\mathbf{S}(t_0)]$ ,  $\mathbf{D}[\mathbf{S}(t_i)]$ ,  $\mathbf{D}[\mathbf{S}(t_D)]$ .

# I. KLASICKÉ DIAGNOSTICKÉ SYSTÉMY (KLASICKÁ TECHNIČKÁ DIAGNOSTIKA)

## Základní schéma a formulace diagnostického systému DS

Diagnostický systém je tvořen diagnostikovaným prostředkem, diagnostickým pozadím, automatizovaným diagnostickým zařízením a lidským činitelem. Diagnostické zařízení lze též charakterizovat jako automatizovanou měřicí ústřednu bilančního typu s rozšířenou a specializovanou činností. Lidský činitel zahrnuje působení obsluhy, uživatele a projektanta DS. Avšak dominantní částí DS je diagnostikovaný objekt a jeho diagnostické pozadí!

Pro úplnost je vhodné připomenout, že všeobecnými a základními ukazateli jakéhokoliv systému jsou ukazatele vyjadřující stavy a změny hmoty (hmotnosti), energie, prostoru a informací. Až na prostor, jsou tyto ukazatele zahrnuty do obecného fenomenologického, strukturálního a informačního schématu diagnostického systému, na obr.3.



Obr. 3.

Schéma na obr. 3 je schématem blokovým, které zachycuje tok diagnostických informací, jejich transformace v jednotlivých subsystémech, konfiguraci subsystémů, jejich vnitřní členění a celkovou činnost DS. Význam jednotlivých subsystémů (bloků) je následující:

DO ... diagnostikovaný objekt, např. dopravní prostředek nebo jeho části; DP diagnostické pozadí; DZ diagnostické zařízení; DM diagnostický model; M subsystém měření; F-T subsystém určení technického stavu; L subsystém lokalizace poruchy; P subsystém prognózování doby další nebo zbytkové provozuschopnosti; (LČ)\* lidský činitel v různých konkrétních formách; R subsystém řízení diagnostického systému; O vyšší nebo jiný systém s nímž DS kooperuje nebo je jeho součástí, např. systém obnovy vozidla nebo řízení jakosti v systému údržby vozidla, není součástí DS.

## Klasifikace diagnostických systémů

řadí DS do skupin podle zvolených vnějších hledisek nebo podle charakteristických hodnot a znaků systémů. Klasifikaci je možné provést z více pohledů. Jako účelné se jeví klasifikovat DS podle konfigurace jejich technického zabezpečení (DZ), které vychází z podmínek a účelu jejich činnosti; pak dostaneme pět základních tříd DS:

- 1/ Staniční diagnostické systémy;
- 2/ Palubní diagnostické systémy;
- 3/ Komplexní diagnostické systémy;
- 4/ Distribuované diagnostické systémy;
- 5/ Speciální diagnostické systémy.

## Proč se klasifikací DS zabýváme?

Klasifikace diagnostických systémů je podkladem pro rozhodování při výběru diagnostického systému, představuje přehled možných řešení pro různé konkrétní účely. To nám usnadňuje systémově respektovat individualitu konkrétního diagnostikovaného objektu i účel využití diagnostických informací a na tomto základě požadovat vhodné diagnostické zařízení a vhodné programové vybavení, které budeme realizovat svými silami nebo je zakoupíme. Tak jsme „nuceni“ výběr diagnostického systému provést na základě kvalifikované rozvahy, která obsahuje: určení jasného cíle diagnostikování, vyhodnocení vlastnosti diagnostikovaného objektu, potřeby a možnosti provozu a údržby diagnostikovaného objektu, ekonomické investiční i provozní náklady.

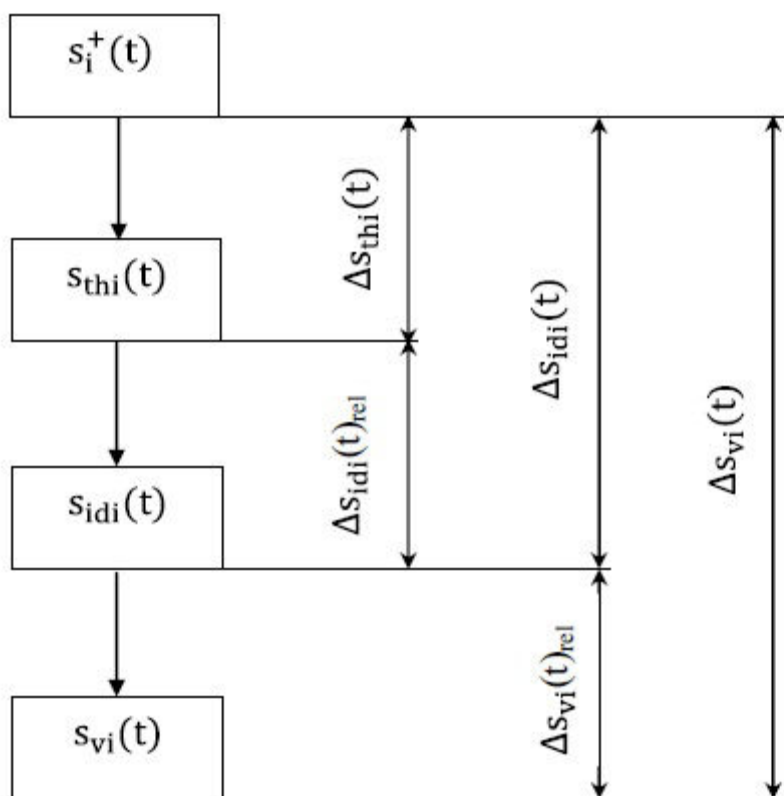
Poznámka: Klasifikace je jedním ze základních vědeckých postupů ve všech oborech; ve vědách přírodních, lékařských, technických, atd.

## Vztah skutečné a naměřené hodnoty diagnostické veličiny

Součástí systémové diagnostiky, zejména řešení diagnostické úlohy, je respektování některých symptomů teorie měření jako teorie poznání, [1]. Než se začneme zabývat diagnostickými informacemi obsaženými v množinách  $\mathbf{s}(t)$ ,  $\mathbf{d}(t)$ ,  $\mathbf{e}(t)$ , musíme věnovat pozornost problému, co naměřené hodnoty vlastně obsahují, jaké hodnoty měřením získáváme, zejména jaká je jejich přesnost a věrohodnost. Problematiku našeho poznání si ukážeme na hodnotě libovolné  $i$ -té diagnostické veličiny  $s_i(t)$ .

Předem je potřebné konstatovat, že aplikaci tohoto přístupu má smysl uplatňovat jen v nejnáročnějších oblastech, např. v kosmonautice, v lékařské chirurgii, u sofistikovaných zbraňových systémů.

Skutečná hodnota libovolné měřené diagnostické veličiny  $s_i^+(t)$ , viz obr.4., je objektivní hodnotou technického stavu DO, která existuje nezávisle na našem subjektivním vědomí (tj. na naší vůli, což je mj. součástí postupného poznávání podstaty našeho hmotného světa). Člověk není schopen přímo svými smysly exaktně kvantifikovat hodnoty měřených veličin. Poznání člověka je zprostředkované, a to pomocí teoreticko-empirického a experimentálního mechanismu, který vytvořil sám člověk. Teplotu neměří dotykem, jak by bylo přirozené, ale pohledem na stupnici teploměru, který pomocí svého logického myšlení sestrojil.



Obr. 4. (Symboly delta prezentují příslušné odchylky)

Proto skutečnou hodnotu veličiny  $s_i^+(t)$  nahrazujeme pomocí jejího "odrazu" (zobrazení), což je teoretická hodnota měřené diagnostické veličiny  $s_{thi}(t)$ , jako výsledek stávajícího stavu vědeckého poznání daného objektu nebo fenoménu. Je to výsledek vědecké analýzy, syntézy a logické představy o daném jevu, někdy se jedná jen výsledek vědecké hypotézy. Příslušná matematická formulace je odrazem značné abstrakce a zevšeobecnění, se zahrnutím všech možností řešení za daných počátečních a okrajových podmínkách. Obvykle má složitý tvar.

Protože matematické vyjádření  $s_{thi}(t)$  je často, vzhledem ke své obecnosti (vše respektujícímu vyjádření) velmi obtížné, rozsáhlé a zdlouhavé, je jeho konkrétní řešení často možné jen ve speciálních případech a jejich počet je obvykle omezen. Proto se podmínky řešení idealizují (linearizace, zjednodušení fyzikální podstaty počátečních a okrajových podmínek), ovšem tím se vyjádření skutečnosti zužuje. Tak dostaneme idealizovanou teoretickou hodnotu diagnostické veličiny  $s_{idi}(t)$ .

Ani idealizovaná teoretická hodnota  $s_{idi}(t)$  zpravidla není pro svoji zejména časovou náročnost stanovení vhodná pro využití v technické praxi. Proto se matematická formulace dále zjednodušuje a vytváří se tzv. výpočtový tvar, většinou v podobě lineárního nebo kvadratického nebo jiného algebraického vztahu. Tak dostaneme výpočtovou hodnotu  $s_{vi}(t)$ . Cesta od  $s_{thi}(t)$  ku  $s_{vi}(t)$  je cestou zjednodušování, jehož výsledkem je výpočtové vyjádření skutečné hodnoty  $s_i^+(t)$ .

Skutečnou hodnotu veličiny  $s_i^+(t)$  ověřujeme nebo v praxi někdy určujeme měřením pomocí předem zvolené metody. Aby byl výsledek věrohodný a reprodukovatelný měříme vícekrát (dostatečným počtem měření) a ze souboru naměřených hodnot určujeme nejpravděpodobnější hodnotu měřené veličiny jejímž základem je obvykle aritmetický průměr ze všech platných měření, se zahrnutím chyb měření. Tak dostaneme naměřenou hodnotu veličiny  $s_{mi}(t)$ . V naší úvaze používáme tradiční pojem „chyba“, protože v tomto případě, jasnější vyjadřuje podstatu než nově zaváděný pojem „nejistota měření“.

### Hraniční hodnoty technického stavu

Hraniční hodnoty technického stavu diagnostikovaného objektu jsou předem určené hodnoty, které vymezují oblasti provozuschopnosti (dobré stavy) a oblasti neprovozuschopnosti (špatné stavy). Mezní stav je určován objektivními metodami měření nebo kvalifikovaného odhadu. Vyplyvají ze samé podstaty objektu, principu jeho činnosti, konstrukce a způsobu exploatace, z jeho interakcí s okolím (pozadím), včetně interakce s lidským činitelem. Nelze a ani nemá smysl stanovit je administrativní cestou formou příkazu, protože jejich hodnoty jsou dány objektivními zákony hmotného světa. V hraničních hodnotách lze též zohlednit ekonomické nebo bezpečnostní faktory činnosti diagnostikovaného objektu. Jejich zohlednění nemůže být v rozporu se zákonitostmi procesů opotřebování a degradace.

Hraniční hodnoty považujeme za nezávislé na čase (konstanty). Rozeznáváme:

- mezní stav  $s^{**}$ : je kritická hodnota diagnostické veličiny, která je příslušná ztrátě provozuschopnosti objektu, tj. přechodu ze stavu dobrý na stav špatný, ze stavu provozuschopný na stav neprovozuschopný;
- předkritický stav  $s^*$ : je hodnota diagnostické veličiny, stanovená z hodnoty mezního stavu, která vzniká zahrnutím časové rezervy nebo faktoru ekonomické výhodnosti. Určuje, kdy je z provozního nebo ekonomického hlediska potřebné vyjmout objekt z provozu a podrobit jej údržbě. Hodnota předkritického stavu vždy „předbíhá“ hodnotu mezního stavu;
- havarijní stav  $s_n$ : je stav v blízkosti mezního stavu; není určen pro diagnostické účely, ale jako výstraha pro obsluhu objektu; signalizuje blížící se nebo už vzniklé havarijní poruchy.

Hraniční hodnoty je nutné určit pro každou diagnostickou veličinu. Hraniční hodnoty tak vytvářejí množiny o  $n$  členech, kde  $n$  je počet diagnostických veličin  $s_i(t)$ .

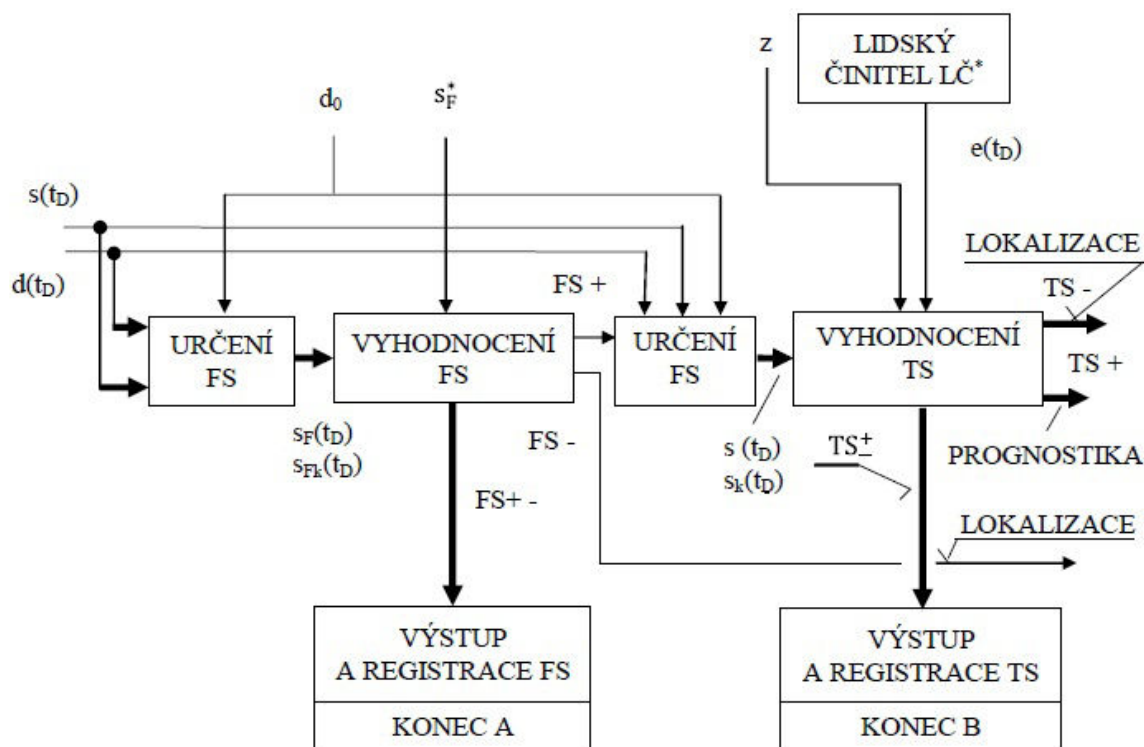
Platí: diagnostikovaný objekt je neprovozuschopný když hodnota jedné jediné diagnostické veličiny dosáhla hodnotu mezního stavu.

### SUBSYSTÉMY DIAGNOSTICKÉHO SYSTÉMU DS

DS tvoří diagnostické zařízení, diagnostikovaný objekt, diagnostické pozadí a lidský činitel. Systémová diagnostika se snaží popsat obecné znaky všech součástí DS (obr.1). Jen stručně k některým subsystémům:

Diagnostikovaný objekt DO je obklopen tzv. diagnostickým pozadím, což je souhrn všech vlivů a interakcí působících na technický stav DO. Vliv diagnostického prostředí na DO vyjadřuje množina hodnot doplňkových diagnostických veličin

Podsystem URČENÍ TECHNICKÉHO STAVU (určení F-T) zahrnuje (obr.5):



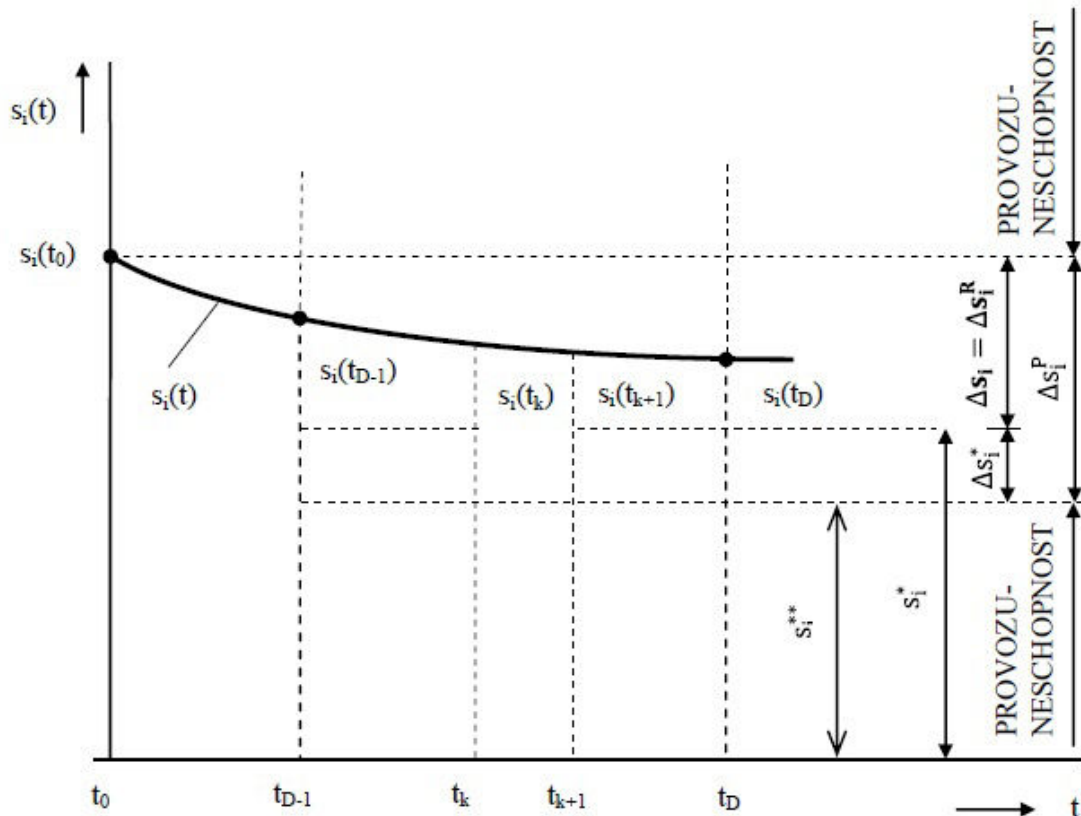
Obr. 5: Určení a vyhodnocení funkční situace FS a vlastního technického stavu TS (do ... standardní hodnoty doplňkových diagnostických veličin (soubor hodnot normálního stavu diagnostického pozadí; s<sub>F</sub> ... kontrolní hodnoty FS; s<sub>k</sub>(t<sub>D</sub>)... korigované diagnostické veličiny; Z... hraniční hodnoty diagnostických veličin.)

Funkční situace FS vyjadřuje funkční schopnost k provozu DO. Jedná se o určení okamžité schopnosti plnit stanovený účel DO, i když v omezeném nebo podmíněném rozsahu. V podstatě jde o detekční test okamžité stávající provozuschopnosti objektu. Je výhodné využít výstupu z modulu funkční situace v grafické podobě pro rychlou a jasnou informaci pro obsluhu diagnostikovaného objektu (dopravního prostředku) jako součásti palubního diagnostického systému.

Typové příklady vyhodnocování technického stavu pro základní typy průběhů hodnot diagnostických veličin:

- diagnostická veličina  $s_i(t)$  je neklesající funkce,
- diagnostická veličina  $s_i(t)$  je nerostoucí funkce, viz obr.6,
- diagnostická veličina  $s_i(t)$  je kmitavého charakteru a její maximální amplituda se s časem zvětšuje,
- diagnostická veličina  $s_i(t)$  je kmitavého charakteru, maximální amplituda

- se s časem zmenšuje,
- diagnostická veličina  $s_i(t)$  je kmitavého charakteru, nositelem diagnostické veličiny je frekvence.



Obr. 6: Hodnocení technického stavu (TS) z diagnostické veličiny nerostoucího typu, kde:

$s^*$  .... předkritický stav diagnostické veličiny;

$s^{**}$ .... mezní stav diagnostické veličiny;

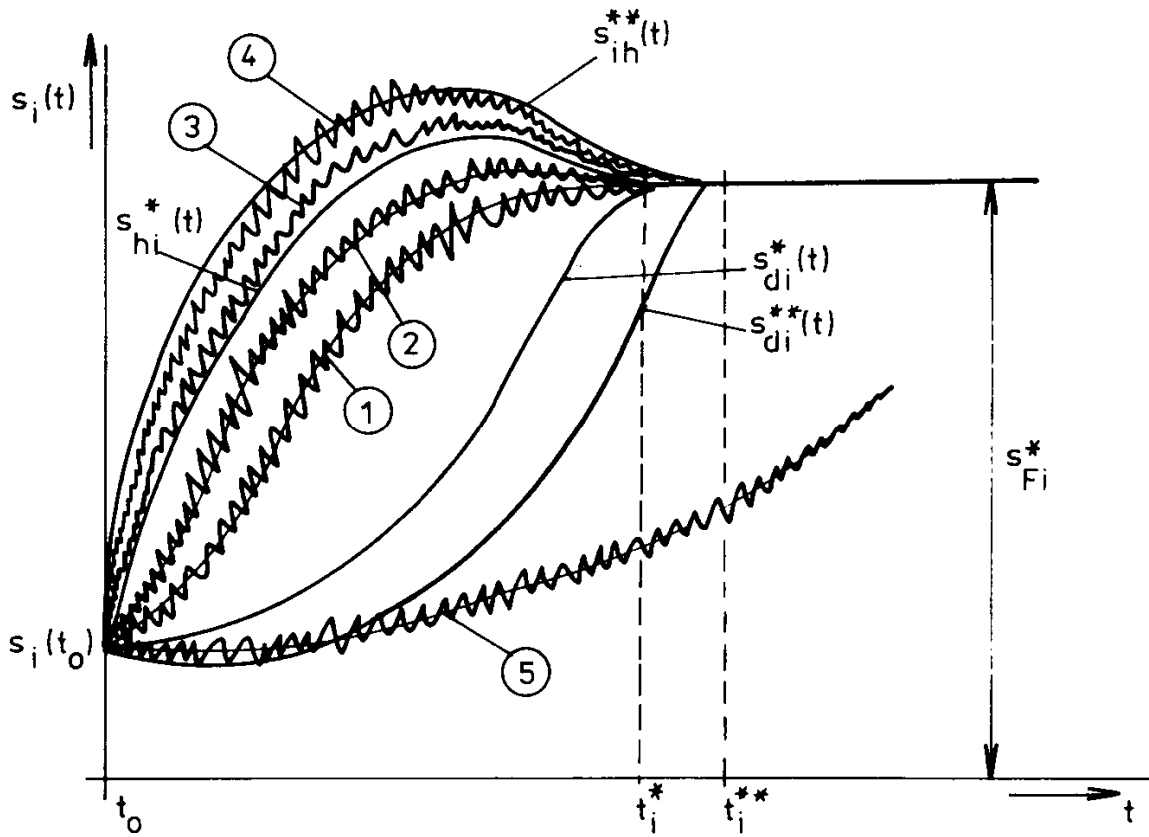
$\Delta$  ... intervaly provozuschopnosti, reálné provozuschopnosti a minimální zálohy provozuschopnosti.

### Analýza a vyhodnocení technického stavu z časového průběhu diagnostické veličiny:

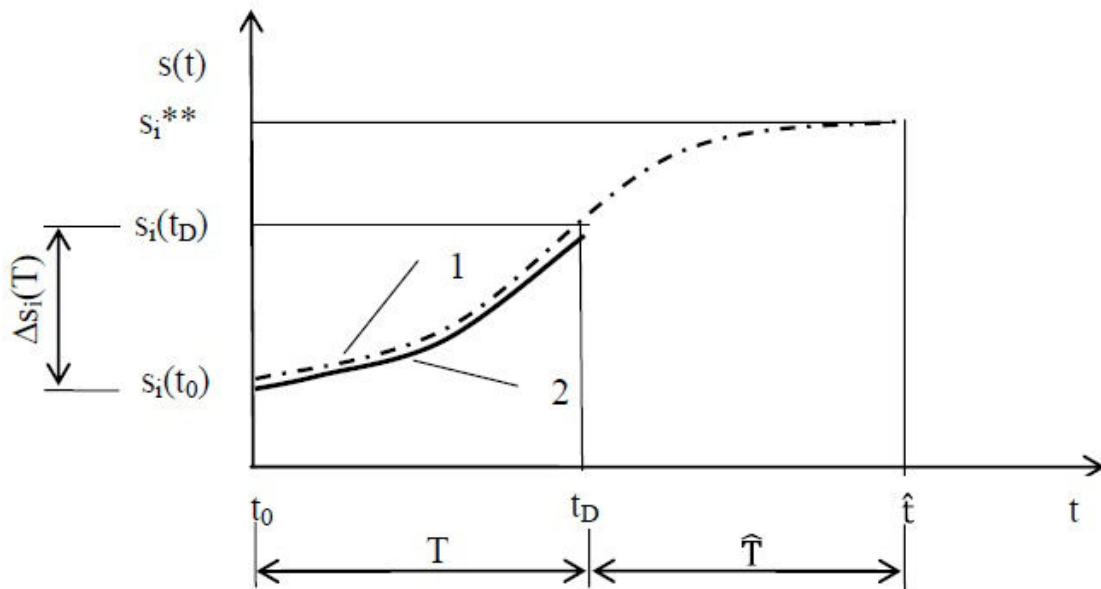
Nositelem diagnostické informace je charakter časového průběhu diagnostické veličiny jako "celku". Hodnotíme tvar a kvantitativní hodnoty (řezy). Vhodné pro hodnocení přechodových a jiných časových jevů, obr. 7:

Účelem činnosti subsystému PROGNÓZOVÁNÍ je "orientovat se na časové řadě hodnot diagnostické veličiny  $s_i(t)$ " (obr.8), tj. určit na kterém členu řady se v čase diagnostikování  $t_D$  nacházíme, a následně na základě známých hodnot časové řady  $s_i(t)$ , které odpovídají časovému intervalu  $T$ , určit průběh hodnot časové řady  $s_i(t)$  v nastávajícím intervalu . Pro každou diagnostickou veličinu  $s_i(t)$  je stanoven její příslušný etalonový časový průběh, obr.8, křivka 1. Etalonový průběh reprezentuje historii i budoucnost a představuje průměr možných průběhů.





Obr. 7: Hodnocení časového průběhu diagnostické veličiny  $s_i(t)$



Obr. 8: Prognózování – „orientace“ na časové řadě hodnot diagnostické veličiny  $s_i(t)$

Je-li doplněn tolerančním polem, dostaneme etalonový koridor, ohraničený horním a dolním průběhem.

## NAVRHOVÁNÍ DIAGNOSTICKÝCH SYSTÉMŮ

Diagnostické projekty (velké systémy) mají často povahu a charakter práce se složitými systémy velkého rozsahu. Obsahují velké množství prvků a komplikované vazby mezi nimi, závislosti a vazby mezi použitými metodikami a komplikované vztahy mezi pracovníky různých profesí a různých stupňů řízení. Proto je vhodné, jako postupové metodické vodítko, využít poznatky některé teorie navrhování a řízení složitého systému (samotný proces navrhování diagnostického systému je složitým organizačním a strukturálním jevem). Jednou z možností je využití zásad teorie systémů, např. [9].

## VÝBĚR DIAGNOSTICKÝCH VELIČIN

Výběr diagnostických veličin je v podstatě první diagnostická procedura, kterou provádíme ještě před realizací navrhovaného DS. Na základě výběru konkrétních diagnostických veličin se pak odvíjejí všechny činnosti, které souvisejí s navrhováním a provozováním DS. Soubor (množina) diagnostických veličin je určujícím aspektem úspěšnosti dosažení cílové funkce diagnostického systému. Výběr diagnostických veličin je základní součástí navrhování a projektování diagnostického systému. Výběr diagnostických veličin je komplexní úloha, která podmiňuje realizaci požadované diagnostické činnosti. Její optimální řešení je fundamentem životnosti, spolehlivosti a racionality diagnostického systému. Optimální řešení výběru diagnostických veličin je v podstatě vyřešením optimálního diagnostického systému vůbec. Vyjádřit metodiku výběru diagnostických veličin exaktním výrazem nebo determinovaným algoritmem je v obecné formě problematické, protože je úzce vázáno na konkrétní diagnostikovaný objekt.

Procedura výběru diagnostických veličin vychází z předem formulovaných postulátů (kritérií, pravidel), pomocí kterých posuzujeme uvažované veličiny. Nejběžněji vycházíme z postulátů, které hodnotí jednotlivé aspekty projektovaného diagnostického systému, např.: konstrukční podstata diagnostikovaného objektu DO; charakter provozu DO; uvažovaná úroveň cíle diagnostikování, atd.

Účelem výběru je určit dostatečný počet veličin, ale současně počet co nejmenší, aby samotný diagnostický systém svým rozsahem, technickým vybavením, časovou a organizační náročností neztratil na účelnosti a nestal se z operativního a ekonomického hlediska neúnosným. V podstatě jde o EXPERTIZNÍ METODIKU, pokud možno experimentálně resp. poloprovozně ověřenou. Jiný přístup reprezentuje tzv., metoda hodnotících znaků.

Znalost mezních hodnot je limitujícím hlediskem. Bez znalosti mezních stavů nelze diagnostické procedury realizovat.

## I.a. TEORIE DIAGNOSTICKÝCH KOMPLEXNĚ- PODOBNOSTNÍCH ČÍSEL

V předchozím textu byla ukázána vysoká sofistikovanost, složitost a vzájemná propojenost funkční i informační struktury diagnostického systému. Přičemž samotný objekt diagnostiky, např. dopravní prostředek, představuje složitý a často rozlehlý technický objekt, čemuž odpovídá složitý, vzájemnými vazbami integrovaný diagnostický model. Avšak velký počet veličin a měřených hodnot, technická a organizační složitost, snižuje spolehlivost provozu jakéhokoli systému a současně zvětšuje ekonomické náklady. U diagnostického systému může negovat jeho smysl.

Původně se při tvorbě diagnostických systémů vycházelo z pojetí kontrolních systémů. Navrhovala se a realizovala zařízení o velkém počtu diagnostických veličin, měřených ve velkém počtu míst diagnostikovaného objektu. Byl to přístup vcelku vhodný např. pro opravárenské diagnostiky údržby lokomotiv.

Souhrnně: diagnostické systémy jsou zdrojem objektivních informací o technickém stavu objektů v reálném čase (současnost), s přihlédnutím ke stavům v uplynulém období (minulost) a odhadů vývoje technického stavu v nastávajícím období (prognóza, predikce).

Informace jsou využitelné ve všech oblastech provozování, udržování a obnovy technických objektů (DO), ale také při jejich plánování, projektování a výrobě, a to na všech řídicích a realizačních úrovních.

Vytvoření účelného diagnostického systému, který by byl z hlediska množství zpracovávaných dat i z hlediska rozsahu programového vybavení a technického zabezpečení co nejjednodušší, vyžaduje jiný přístup. Proto je snahou zjednodušovat tok informací uvnitř diagnostického systému i jeho funkční strukturu a optimalizovat formulaci výsledků vystupujících z diagnostického systému.

Ideální, teoretické řešení maximalistické jednoduchosti můžeme vyjádřit následujícími symbolickými vztahy, které mají hypotetický a spekulativní charakter:

$$\text{„(DO + DP) } \Leftrightarrow \square s_i(t)\text{“ ; } \quad \text{pro } i = 1, \text{ tj. } \{1\} = 1 \quad ; \quad \text{(a)}$$

nebo

$$\text{„(DO + DP) } \Leftrightarrow \square s_i(t) + d_i(t)\text{“ ; } \quad \text{pro } i = 1, \text{ tj. } \{1\} = (1+1) \quad \text{(b)}$$

Logické schéma (a) vyjadřuje idealizovanou ideu, diagnostikovat DO pomocí jedné diagnostické veličiny, logické schéma (b) vyjadřuje diagnostikování pomocí jedné diagnostické a jedné doplňkové diagnostické veličiny, které by obsahovaly komplexní informace o technickém stavu DO a jeho diagnostického pozadí.

Takový ideál v principu není v tak ostrém rozporu s reálnou skutečností jak se na první pohled jeví. Např. v lékařství je diagnostika dle vztahů (a,b) běžná. Provedeme-li jen hrubou analýzu činnosti např. dopravního prostředku (obecně DO), zjistíme, že poměrně málo diagnostických a diagnostických doplňkových veličin je navzájem opravdu nezávislých a tedy potřebných respektovat plnou váhou významnosti.

Připustíme, že dosažení ideálního řešení dle rov. (a,b) je prakticky nemožné, potom budiž cílem dosáhnout řešení s co nejmenším počtem veličin  $s_i(t)$  a  $d_i(t)$ .

Jiným řešením je zavedení DIAGNOSTICKÝCH KOMPLEXNĚ– PODOBNOSTNÍCH ČÍSEL,  která představují komplexní vyjádření diagnostických informací  obsažených v nejzávažnějších veličinách  $s_i(t)$  a  $d_i(t)$  pro daný DO. Takový přístup dovoluje využití principu podobnosti technických objektů nebo fyzikálních jevů pro zobecnění diagnostických poznatků, dovoluje využít velké podobnosti základních charakteristik DO a současně překlenout značné rozdíly jejich konkrétnosti a detailnosti.

Princip teorie diagnostických komplexně-podobnostních čísel je založen na jednoduché úvaze:

Technický stav dopravního prostředku  $\mathbf{S}(t)$  je v čase  $t$  vyjádřen jako funkce souborů (množin) diagnostických veličin  $\mathbf{s}(t)$  a doplňkových diagnostických veličin  $\mathbf{d}(t)$ :

$$\mathbf{S}(t) = f[\mathbf{s}(t), \mathbf{d}(t)]$$

$$\mathbf{S}(t) = f[s_1(t), s_2(t), \dots, s_i(t), \dots, s_n(t), d_1(t), \dots, d_i(t), \dots, d_m(t)]$$

Považujeme-li  $\mathbf{S}(t)$  za komplexní vyjádření technického stavu dopravního prostředku, které je číslem o dimenzi (rozměru) 1, potom pravá strana rovnice má také rozměr 1. V souladu s teorií dimenzí (teorií rozměrnosti), lze pravou stranu rozepsat v podobě součinů:

$$\mathbf{S}(t) = [s_1(t)]^* \cdot [s_2(t)]^* \cdot \dots \cdot [s_i(t)]^* \cdot \dots \cdot [s_n(t)]^* \cdot [d_1(t)]^* \cdot \dots \cdot [d_i(t)]^* \cdot \dots \cdot [d_m(t)]^*$$

Symbols „\*“ reprezentují příslušný exponent.

Pravou stranu vyjádříme v podobě součinů dílčích koeficientů  $D_j$ :

$$\mathbf{S}(t) = D_1 \cdot D_2 \cdot \dots \cdot D_j \cdot \dots \cdot D_h = \prod D_j = \mathbf{D}$$

Koeficient  $\mathbf{D}$  má charakter podobnostních čísel (kritérií) užívaných např. v mechanice, termodynamice, v proudění tekutin aj. Potom v souladu s naukou o podobnosti (např. Kožešník), koeficient  $\mathbf{D}$  vyjadřují všeobecnou úměrnost homologických znaků odpovídajících si diagnostických veličin a doplňkových diagnostických veličin DO a lze je využít k vyjádření diagnostických vztahů.

Koeficient  $\mathbf{D}$  označíme jako „celkové diagnostické komplexně - podobnostní číslo“, zkráceně, CELKOVÉ DIAGNOSTICKÉ ČÍSLO.

Dílčí koeficient  $D_j$  označíme jako „diagnostické komplexně - podobnostní číslo“, zkráceně, DÍLČÍ DIAGNOSTICKÉ ČÍSLO,

Celkové diagnostické komplexně-podobnostní číslo  $\mathbf{D}$  představuje samo o sobě analytický model diagnostikovaného DO, (nebo jeho komponentu), který jsme získali pomocí teorie dimenzí. Vyjadřuje vliv a význam diagnostických veličin  $s_i(t)$  a doplňkových diagnostických veličin  $d_i(t)$ , ze zvoleného, resp. určeného hlediska. Celkové diagnostické číslo  $\mathbf{D}$  zahrnuje všechny měřené veličiny. Z důvodu účelnosti i

přehlednosti (zamezení informačního zahlcení) jako diagnostický model diagnostikovaného prostředku volíme jedno ( $j = 1$ ) nebo několik ( $j = 2$  až  $6$ ) diagnostických čísel  $D_j$ . Současně vztáhneme  $D_j$  k času  $t$ , protože jeho naplnění je dáno časovou řadou měřených veličin  $s_i(t)$  a  $d_i(t)$ . Předpokládáme, že k reprezentaci DO stačí jedno diagnostické číslo:

## II. DIAGNOSTICKÉ INFORMAČNÍ SYSTÉMY

Diagnostické systémy objektivně sbírají, třídí a vyhodnocují informace technického charakteru v reálném čase, které mohou být využity při rozhodování v oblasti managementu, marketingu, provozu, výroby a obnovy. Proto je označujeme jako "diagnostické informační systémy DIS" („informační diagnostické systémy IDS“) nebo "diagnostické informační a řídicí systémy DIRS". DIS mohou sehrát významnou úlohu v oblasti řízení kvality (jakosti), řízení provozní spolehlivosti, bezpečnosti a ochrany životního prostředí. Informace poskytované diagnostickými systémy jsou výhodně využitelné už při tvorbě inherentní spolehlivosti prvního a druhého druhu.

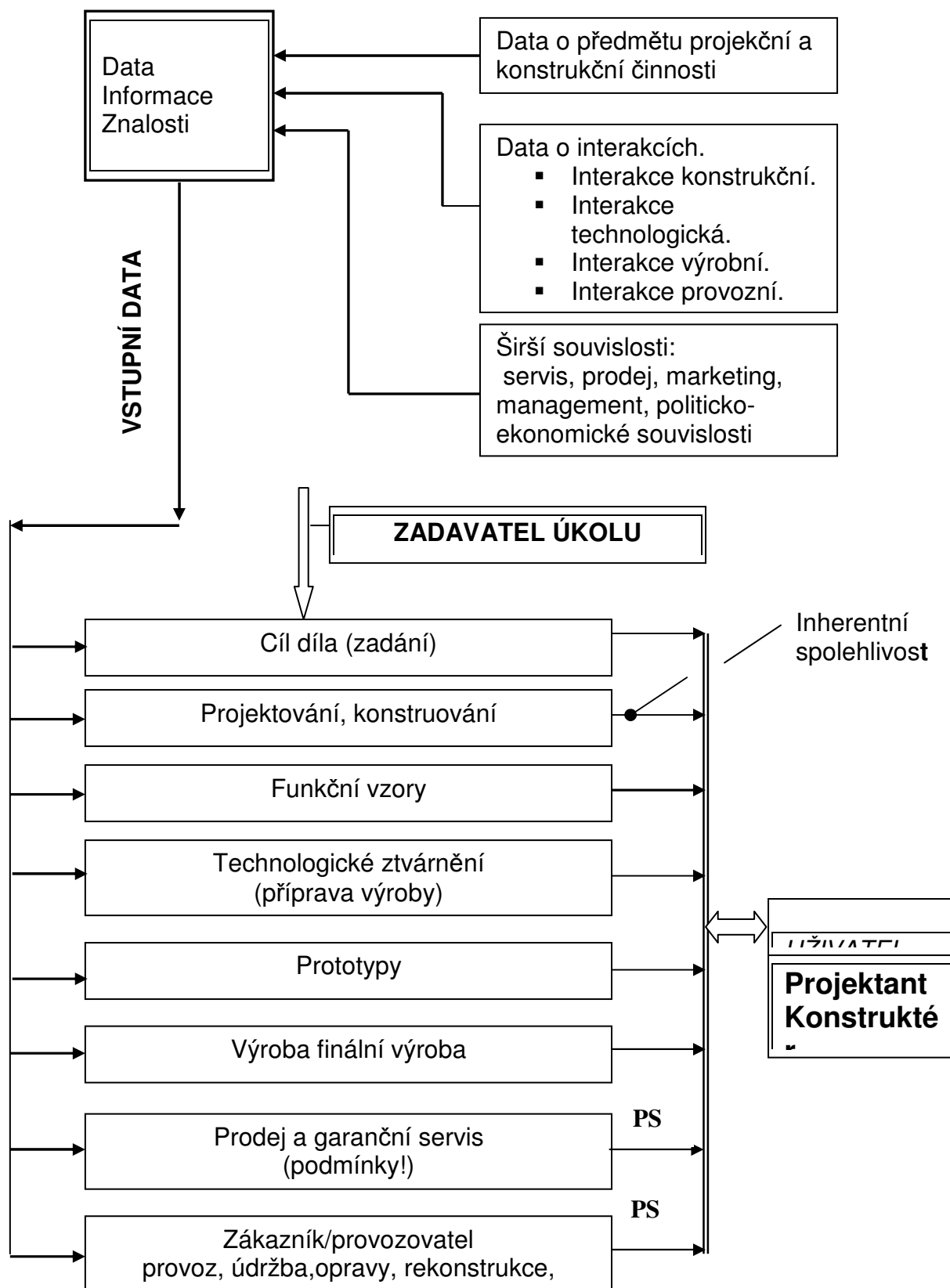
Diagnostické informační systémy DIS jsou vyšším vývojovým stupněm klasických diagnostických systémů. Vrcholové využití DIS nalzáme v metodice řízení, kterou nazveme: "systémová diagnostická analýza spolehlivosti, provozní spolehlivosti a kvality (jakosti)". Diagnostické informační systémy (DIS) mají využití také v oblasti řízení a podpory činnosti managementu v provozu, obnově a výrobě. Dále v oblasti navrhování a konstruování technických objektů a soustav, jako podpora činnosti tvůrčích pracovníků. I v širokých souvislostech: ve sféře obchodní, organizační, logistické, personální, ekonomické a finanční, z hlediska aktuálního i strategického rozhodování.

Poznámky:

- 1/ V oblasti řízení jakosti (kvality) a aplikace informačních diagnostických systémů mluvíme o diagnostikovaném objektu DO. Termín „objekt“ bychom správně měli vyjadřovat termínem „produkt“, který zahrnuje všechny „typy“ diagnostikovaných objektů. Produktem je každý výsledek obecného procesu (výrobek, informace, software, služba).
- 2/ Při praktické činnosti je užitečné si uvědomit následující skutečnosti: Termíny jakost (kvalita), spolehlivost a provozní spolehlivost označují vlastnosti (fenomény, jevy), jsou to tzv. „neuchopitelné pojmy“. Termíny systémy jakosti, systémy spolehlivosti, řízení jakosti, řízení spolehlivosti, diagnostika, diagnostické systémy, informační diagnostické systémy označují činnosti a nástroje, jsou to „uchopitelné“ reality.

Příklad realizace DISu z oblasti projektování a konstruování:

## DIS - KONSTRUKTÉR / PROJEKTANT



Obr. 9: DIS – PROJEKTANT / KONSTRUKTÉR

### III. DIAGNOSTICKÁ ANALÝZA

Diagnostická analýza je v našem pojetí, aplikací diagnostiky zejména na jevy související se spolehlivostí, provozní spolehlivostí a kvalitou. Realizaci diagnostické analýzy zabezpečuje diagnostický informační systém.

Cílem diagnostické analýzy je zejména vyhodnotit provozní spolehlivost, inherentní (vloženou) spolehlivost a faktory které je ovlivňují a tak umožnit širší využití informací o technickém stavu objektu pro řízení systémů a subsystémů, vzájemný průnik aktuálních technických informací do ekonomických a provozních informací, další upřesnění interakce lidského činitele.

Podle situace, je-li diagnostikovaný objekt (produkt) ve stádiu tvorby nebo je již vyroben, rozeznáváme diagnostickou analýzu :

- a) predeterminační, (užitečné, ale náročné, snaha předejít syndromu „Titanic“, který je symbolem synergie negativního typu.),
- b) postdeterminační, (vyroben, provozován).

Rozeznáváme dvě cesty:

- Produktové pojetí hodnocení jakosti provozu a výroby (horizontální cesta), produktově orientované řízení jakosti a spolehlivosti, obr. 10, poz. (3);
- Podnikové pojetí hodnocení jakosti (vertikální pojetí – cesta ISO) , podnikově orientované řízení jakosti a spolehlivosti, obr.10, poz. (QM1).

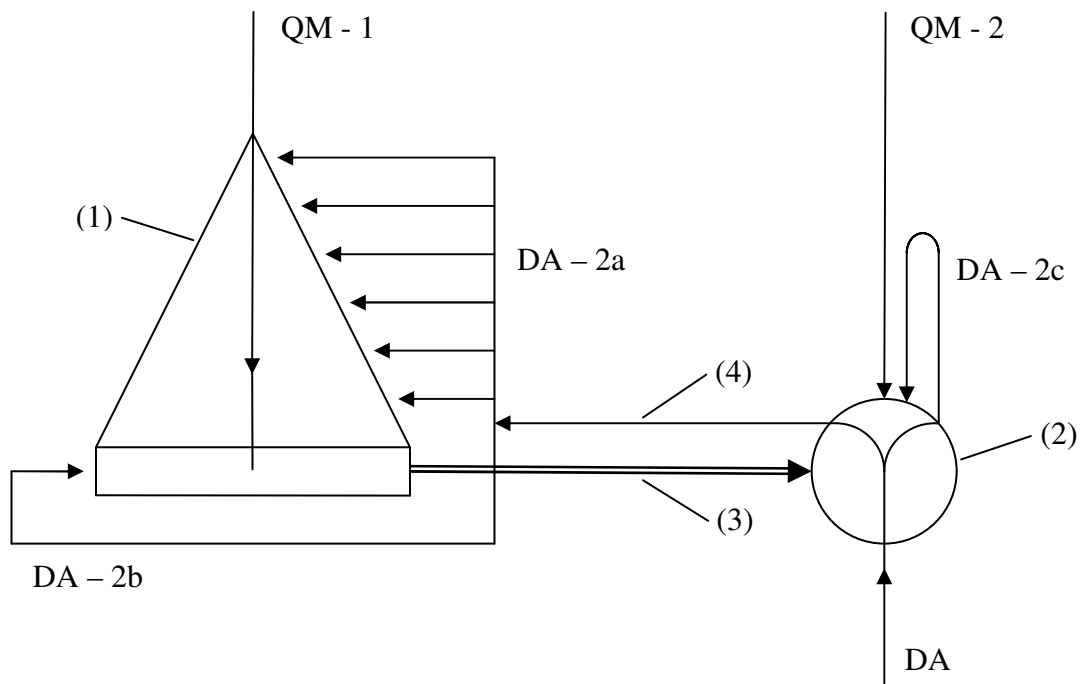
Princip synergie obecně dovoluje v rámci interakce více samostatných jevů (entit) získat větší pozitivní efekt než je prostý součet jejich jednotlivých pozitiv. V systémové diagnostice je zkoumán synergický jev vznikající, propojením podnikového řízení jakosti „klasickou“ cestou (tzv. vertikální řízení) a diagnostické analýzy provozních vlastností produktu v reálném provozu na základě hodnocení uživatele a provozovatele (tzv. horizontální řízení).

Vzniklý integrovaný systém řízení jakosti představuje možnost dosažení vyšší úrovně jakosti resp. provozní spolehlivosti produktu, jak u výrobce, tak u provozovatele (provoz, udržování, obnova). Integrovaný systém řízení jakosti zvyšuje výslednou jakost projevující se u uživatele.

Jedná se o interakci tří fenoménů, kterými jsou řízení jakosti, diagnostická analýza a synergie.

Obecné schéma integrovaného systému řízení jakosti je na obr.10:

Integrovaný systém řízení jakosti je tvořen výrobcem / dodavatelem (1), provozovatelem a uživatelem (2), produktem (3), diagnostickými informacemi z provozu (4), řízením jakosti vývoje a výroby produktu (QM – 1), řízením jakosti provozu a udržování produktu (QM – 2), diagnostickou analýzou (DA), diagnostickými informacemi pro řízení jakosti výroby (DA – 2a), diagnostickými informacemi pro řízení jakosti objednávek, specifikace požadavků a vývoje produktu (DA -2b) a diagnostickými informacemi pro řízení jakosti provozu a obnovy produktu (DA-2c) . Diagnostické informace, zejména o provozní spolehlivosti produktu se získávají zejména v záručním (vstupní) době. V dalším období záleží na úrovni spolupráce provozovatele s dodavatelem podle podmínek vyjádřených smluvními vztahy.



Obr.10: Propojení systému řízení jakosti a systému diagnostická analýza

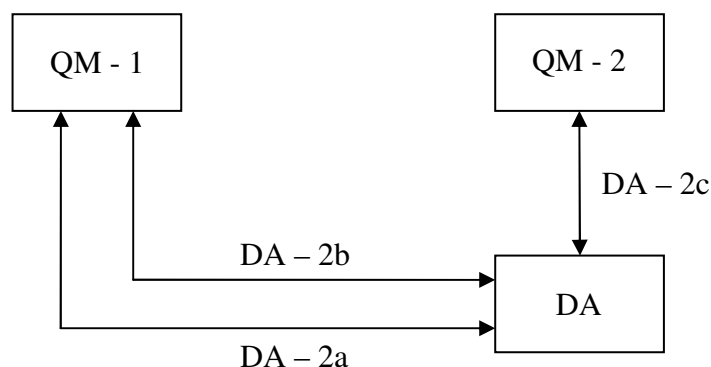
Řízení jakosti na základě diagnostické analýzy reálné provozní spolehlivosti DA-2a a DA-2b, charakterizujeme jako horizontálně – produktově orientované řízení, vycházející z principů systémové diagnostiky.

Na základě výsledků diagnostické analýzy DA-2a lze „proniknout“ do všech řídicích, ekonomických, technologických a výrobních i logistických oblastí podniku. Podobně informace DA-2b odhalují slabá místa produktu a přispívají tak k jeho inovaci nebo přípravě nového dokonalejšího produktu.

Pozitivní synergické efekty vznikají vzájemnou interakcí metodiky „klasického“ řízení jakosti a reálných údajů o jakosti produktu (zejména provozní spolehlivost, pohotovost) získaných od provozovatele nebo uživatele produktu. Konfrontace stavu podniku výrobce a objektivních dat z provozu přispívají k optimalizaci udržování a zvyšování reálné jakosti produktu. Současně s řízením jakosti vyráběného produktu probíhá diagnostická analýza celého podniku – analýza řízení podniku, organizační úrovně, ekonomiky, řízení lidských zdrojů i strategických záměrů. Což je významný synergický efekt. Podobně se synergie projeví v oblasti řízení jakosti provozu a udržování (obnovy) produktu.

Schéma integrovaného systému řízení jakosti, např. pro oblast dopravy je na obr. 11:





Obr.11. Integrovaný systém řízení jakosti pro dopravu

Popsaný integrovaný systém řízení jakosti zahrnuje celou oblast existence produktu, od jeho zadání, vývoje a výroby, přes provozování a udržování až do konce jeho životnosti. Integrovaný systém pochopitelně zahrnuje lidský činitel jako součásti všech fází existence (životu) produktu – svojí existenci pozitivně stimuluje lidský činitel. Některé jednodušší varianty nebo prvky integrovaného systému řízení jakosti byly vyzkoušeny nebo zavedeny nebo se zavádějí. Např. v oblasti výroby osobních automobilů jsou v podstatě v provozu (výrobce + smluvní pověřené servisy).

#### Diagnostickou analýzu lze také využít v oblastech:

- racionalizace plánování údržby obnovy objektů;
- zavádění progresivních opravárenských technologií a moderního opravárenského vybavení;
- monitorování ochrany pracovního a životního prostředí;
- zvýšení kvality krizového řízení, včetně prognostických faktorů pro řešení mimořádných situací (doprava);
- projektové a konstrukční činnosti.

#### Poznámky na závěr

1/ Základy systémové diagnostiky jsou odrazem reality dlouholetého provozování technické diagnostiky a diagnostických systémů. Nyní je žádoucí aby reflektovala všeobecné vlastnosti současných, vesměs vysoce sofistikovaných, diagnostických systémů založených na možnostech elektronického zázemí a informačních technologií (SW +HW), a to z hlediska určování technického stavu objektu.

2/ Teorie podobnostních diagnostických čísel nově vznikla kolem roku 1985 a byla v menší míře testována v praxi. Její využití je vhodné pro některé druhy diagnostikovaných objektů, ale vyžaduje další ověřování.

3/ Metodika diagnostické analýzy byla např. uplatněna ve dvou strojírenských závodech, jak pro školení personálu, tak při přípravě systému řízení jakosti. Záměry nebyly dokončeny, protože došlo k personálním a organizačním změnám v řízení podniků. (Při aplikaci zásad diagnostické analýzy je zapotřebí jednoznačná součinnost vrcholového řízení podniku).

4/ Dalšímu rozvoji systémové diagnostiky by prospělo vypracování univerzálního virtuálního modelu komplexní diagnostické analýzy provozní spolehlivosti (jakosti), který by systémově zpracoval danou komplexní problematiku a následně dovolil

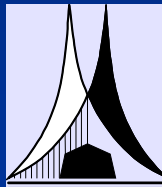
vytvořit dutinný nástroj pro operační i strategické řízení provozní spolehlivosti (jakosti) v praxi.

#### LITERATURA

- [1] Berka K.: Měření, pojmy/teorie/problémy. Academia Praha, 1977
- [2] Hamelin B.: Údržba a její nové pojetí. SNTL Praha, 1983 (z franc.).
- [3] Johnson C.,L.: More Than My Share of It All (Více než můj podíl na tom všem). Smithsonian Institution Press. Washington D.C., 1985.
- [4] Lánský M.: Diagnostické systémy dopravních prostředků. Doktorská disertace. VŠDS, 1986.
- [5] Lánský M.: Komplexní diagnostická analýza. In.: Logistika, 2, 1995, s.10-11.
- [6] Lánský M., Di viš Z., Daněk A.: Zvyšování provozní spolehlivosti výrobků. Soubor studií a výzkumných práv pro Unex a.s., Uničov ,1995 - 1997
- [7] Lánský M.: Obecné principy diag analýzy provozní spolehl. Doprav. objektů a systémů. In.: Sborník 2th Scientific Conference DFJP Univerzita Pardubice 1999, s125-129.
- [8] Lánský M.: Nové aspekty řešení diagnostické úlohy pro dopravní prostředí. In.: Sborník mezinár. věd. konf. „Věda o dopravě 2004“, FD ČVUT Praha, 2004, s.47-50.
- [9] Wymore A.W.: Systems Engineering Methodology for Interdisciplinary teams. J.Wiley, N.Y. 1976 a vydání University of A Arizona, Tuscon,

# Identifikace poškození konstrukcí pomocí dynamické odezvy

Ing. Shota Urushadze, PhD.  
prof. Ing. Miroš Pirner, DrSc.  
prof. Ing. Ladislav Frýba, DrSc.



Ústav teoretické a aplikované mechaniky  
**Akademie věd České republiky**  
Prosecká 76  
190 00 Praha 9  
Česká Republika

## Obsah

- Úvod
- Identifikace
- Identifikace imperfekcí a jejich lokalizace
- Lokalizace imperfekcí pomocí změn křivostí ploch vlastních tvarů kmitání
- Lokalizace imperfekcí pomocí korelační metody
- Stanovení celkového poškození pomocí modálního korelačního koeficientu
- Matice chyb tuhostí
- Aplikace některých uvedených metod identifikace

## Úvod

Myšlenka použití změn dynamických charakteristik (vlastní frekvence, vlastní tvary kmitání, útlum) k stanovení velikosti a místa poškození, případně jiných imperfekcí konstrukce, byla publikována již v 70. letech 20. století mnoha autory. Vývoj velmi přesných snímačů odezvy a počítačů tuto myšlenku podpořil. Teoretické nástroje při řešení těchto problémů byly zpracovány pro diskrétní i kontinuální systémy.

Někteří autoři se zabývali laboratorními zkouškami fyzikálních modelů konstrukcí s uměle imitovanými trhlinami. Některí zkoumali závislost útlumu na charakteristických vlastnostech lomů. Menší počet experimentů byl uskutečněn na reálných konstrukcích. Některé metody diagnostiky a identifikace byly ověřeny a některé odvozeny i v ÚTAM AV ČR na velkých fyzikálních modelech, některé na skutečných konstrukcích.

Diagnostika a identifikace, tyto dva pojmy, se v současné terminologii vyskytují ve vědních oborech aplikované mechaniky a aplikované dynamiky.

## Identifikace

Identifikace je stanovení hodnot veličin matematického modelu dynamické (mechanické) soustavy pomocí výsledků měření její odezvy. Matematický model obsahující dokonale identifikované veličiny poskytuje všechny potřebné informace o dynamických vlastnostech konstrukce.

Identifikace je proces, který určí charakteristiky nosné konstrukce pomocí dynamické odezvy; charakteristikami rozumíme veličiny, které jsou obsaženy v pohybových rovnicích konstrukce, popř. v elementech konečných prvků.

K identifikaci používáme modální analýzu, ze předpokladů obecně přijatých: konstrukce je málo tlumena, chová se alespoň přibližně lineárně a vynucené tvary kmitání lze považovat za tvary vlastního kmitání.

Stavební inženýr, experimentátor a jiní se mohou setkat i s kombinací diagnostiky a identifikace, např.: při dlouhodobé zkoušce konstrukce, kdy se zaznamenávají počty vybuzených kmitů (např. větrem) a velikosti amplitud, jde o identifikaci, protože její odezva velikostí a frekvencí musí odpovídat matematickému modelu, případně zkouška tento model mění; současně jde o diagnostiku, protože pomocí vybuzených amplitud lze vyjádřit zbytkovou životnost konstrukce.

## Identifikace imperfekcí a jejich lokalizace

K identifikaci poškození, obecně imperfekcí, je třeba znát dynamické charakteristiky konstrukce odpovídající

- počátečnímu stavu (virgin state) a
- stavu, který je určen ke zkoumání.

Pokud není znám počáteční stav musí postačit k identifikaci dva stavy, dostatečně od sebe vzdálené časovým úsekem, v němž lze předpokládat, že došlo k růstu únavového, nebo jiného poškození.

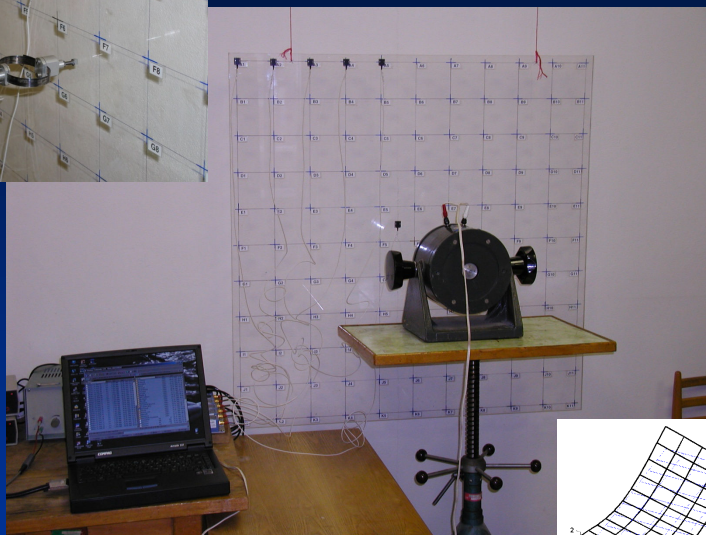
### Lokalizace imperfekcí pomocí změn křivostí ploch vlastních tvarů kmitání (Change of mode surface curvature CAMOSUC)

$$CAMOSUC_i = \left| v_{i0}'' - v_{id}'' \right| = \left| \Delta v_i'' \right| = \left| (v_{i+1} - 2v_i + v_{i-1})_0 \right| h^{-2} - (v_{i+1} - 2v_i + v_{i-1})_d \cdot h^{-2}$$

kde index 0 značí virgin state  
 $d$  značí damage state  
 $h$  rozměr sítě ve směru přímky sledovaných bodů ( $i+1, i, i-1$ )

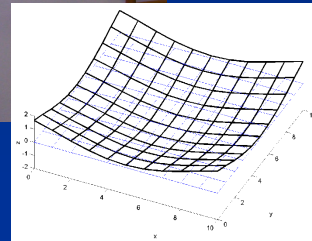
Poměr zakřivení

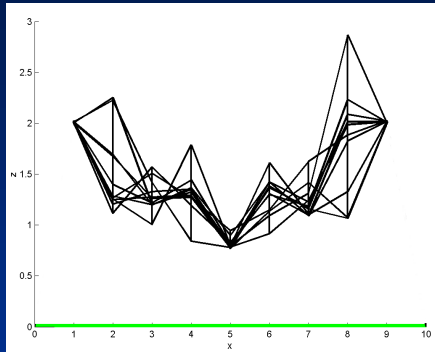
$$v_{i0}'' / v_{id}'' = (v_{i+1} - 2v_i + v_{i-1})_0 / (v_{i+1} - 2v_i + v_{i-1})_d$$



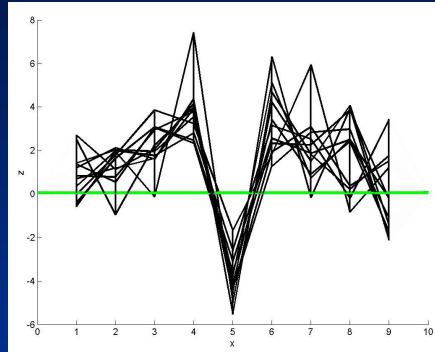
Deska s akcelerometry a budiče

První tvar kmitání desky

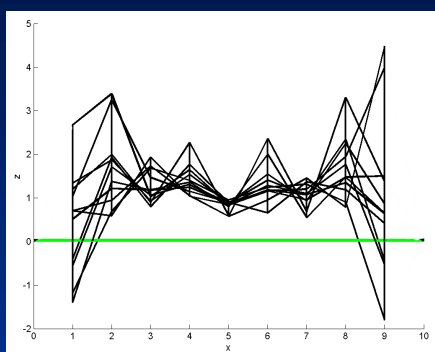




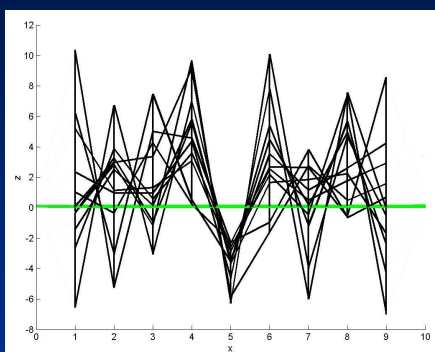
**Poměr zakřivení  
(zářez 5 mm).  
Pohled ve směru osy Y.**



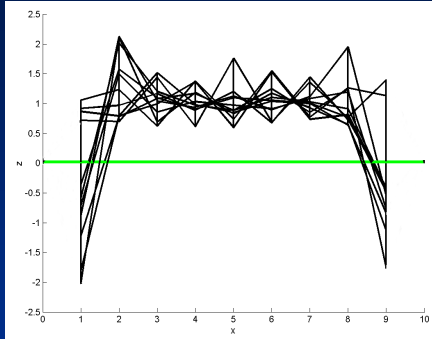
**Rozdíl zakřivení  
(zářez 5 mm).  
Pohled ve směru osy Y.**



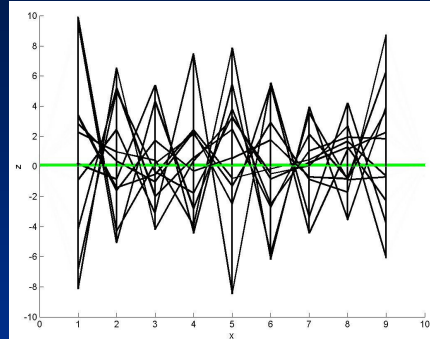
**Poměr zakřivení  
(zářez 2.5 mm).  
Pohled ve směru osy Y.**



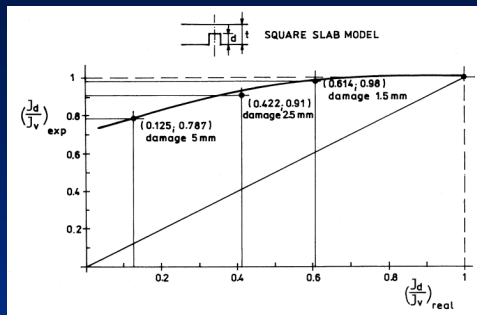
**Rozdíl zakřivení  
(zářez 2.5 mm).  
Pohled ve směru osy Y.**



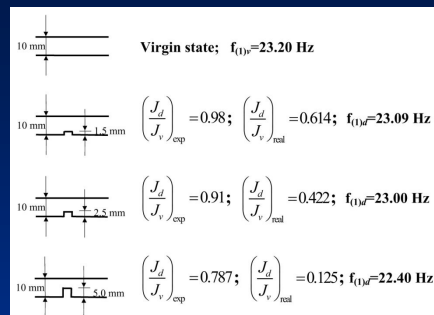
Poměr zakřivení  
(zářez 1.5 mm).  
Pohled ve směru osy Y.



Rozdíl zakřivení  
(zářez 1.5 mm).  
Pohled ve směru osy Y.



Závislost  $\left(\frac{J_d}{J_v}\right)_{\text{exp}}$  na  $\left(\frac{J_d}{J_v}\right)_{\text{real}}$



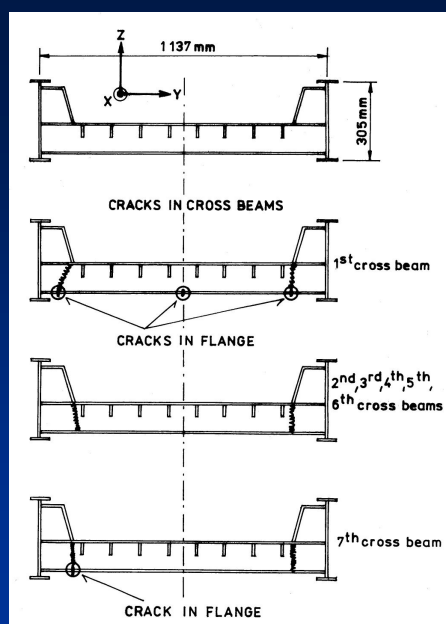
Výsledky experimentů  
na modelu desky

$$\left(\frac{J_d}{J_v}\right)_{\text{real}} \approx 1 - \sqrt[2.9]{\frac{1 - \left(\frac{J_d}{J_v}\right)_{\text{exp}}}{0.357}}$$



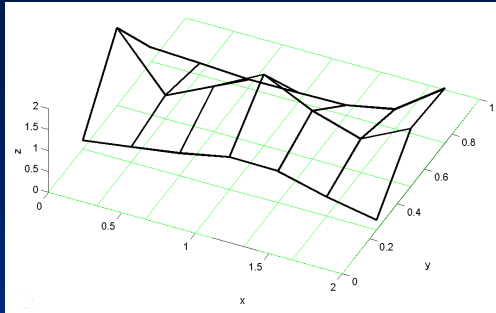
Model železničního mostu v měřítku 1:5  
(původní délka 15 m) s ortotropní  
mostovkou.

Spodní pohled na model a umístění  
budiče.

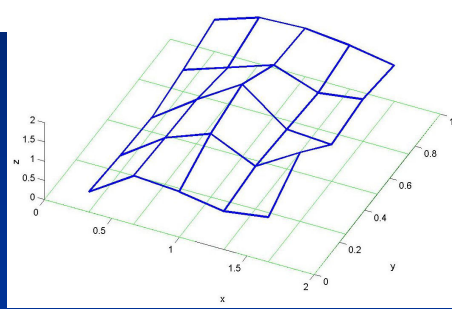


Průřez modelu mostovky a trhliny na příčnicích

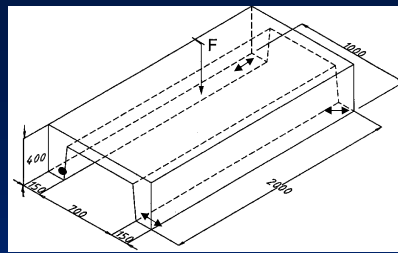




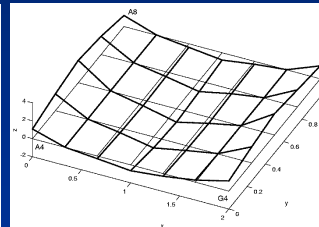
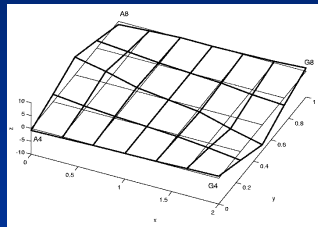
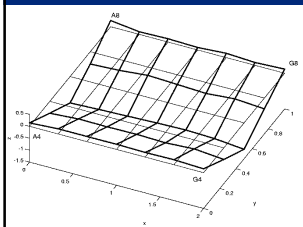
Poměr  $v_v'' / v_d''$  ve směru Y



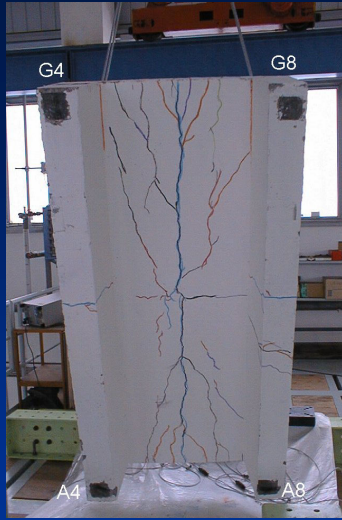
Poměr  $v_v'' / v_d''$  ve směru X



Deska ztužená dvěma nosníky. Podepření a zatížení břemenem.



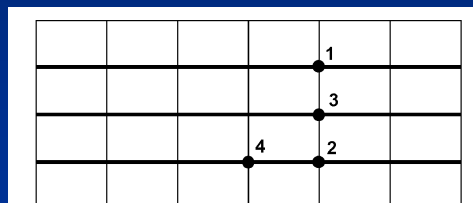
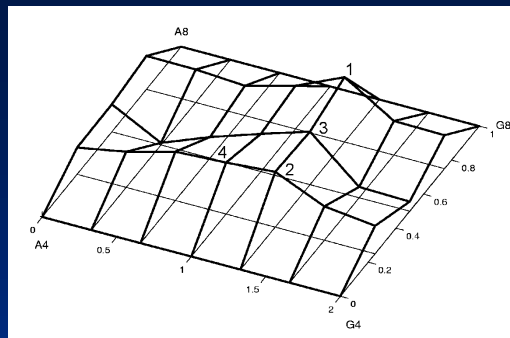
Vlastní tvary kmitání po zatížení břemenem: první, druhý a třetí tvar.



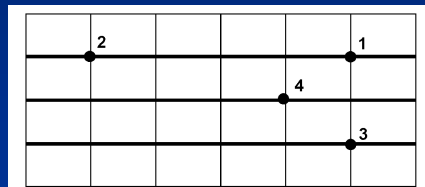
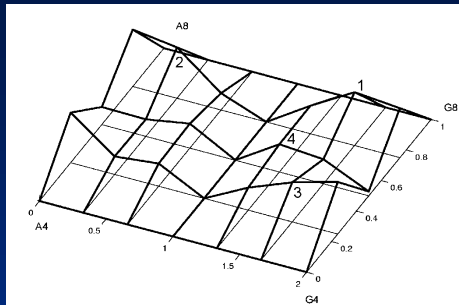
Spodní plocha desky s trhlinami  
po  $2.0 \cdot 10^6$  cyklech zatížení



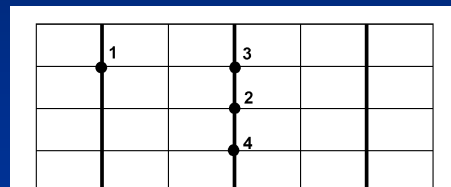
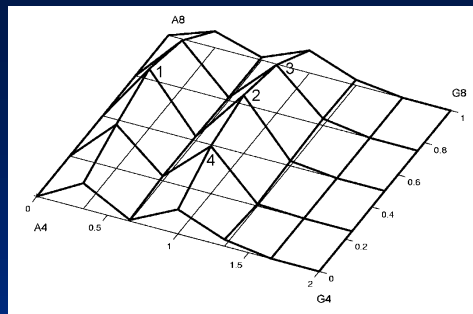
Dynamický test na desce



CAMOSUC pro první tvar kmitání po zatížení břemenem;  
 $|\Delta v^1|$  ve směru osy Y



CAMOSUC pro druhý tvar kmitání po zatížení břemenem;  
 $|\Delta v^*|$  ve směru osy Y



CAMOSUC pro třetí tvar kmitání po zatížení břemenem;  
 $|\Delta v^*|$  ve směru osy Y

## Lokalizace imperfkcí pomocí korelační metody (Coordinate modal assurance criterion COMAC)

$$COMAC_{(j)} = \frac{\left[ \sum_{i=1}^N v_{iv}(j) \cdot v_{id}(j) \right]^2}{\sum_{i=1}^N [v_{iv}(j)]^2 \cdot \sum_{i=1}^N [v_{id}(j)]^2}$$

kde:

$v_{id}(j)$  je přemístění v bodě  $j$  při kmitání v  $i$ -tém tvaru (virgin state),

$v_{iv}(j)$  je přemístění v bodě  $j$  při kmitání v  $i$ -tém tvaru (damage state),

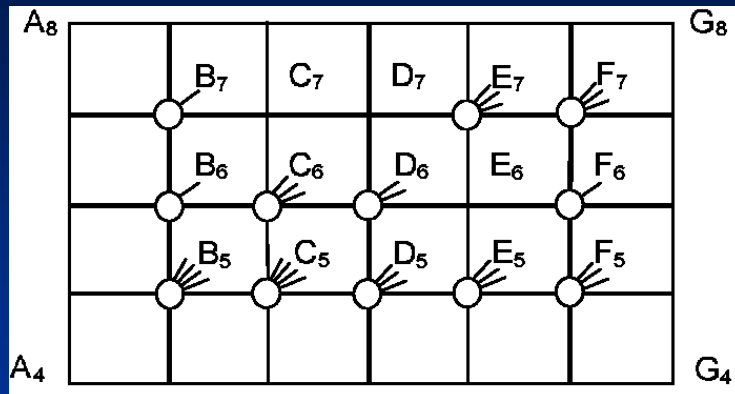
$N$  je počet vybuzených tvarů.

Z významu je zřejmé, že pro  $N$  musí být

$$N \geq 2$$

**Hodnoty COMAC  
zjištěné na desce**

Před cyklováním a po 1 024 714 cyklech (poškozený)						
BOD Y						
A8	B8	C8	D8	E8	F8	G8
A7	B7	C7	D7	E7	F7	G7
A6	B6	C6	D6	E6	F6	G6
A5	B5	C5	D5	E5	F5	G5
A4	B4	C4	D4	E4	F4	G4
COMAC						
1-2 tvar						
Před cyklováním a po 1 024 714 cyklech (poškozený)						
167.97Hz, 292.9688Hz a 56.6406Hz, 214.8438Hz						
	0.8681	0.9885	0.0327	0.9611	0.9831	
0.9976	0.9952	0.9986	0.9958	0.9998	0.9984	1.0000
0.9967	0.9944	0.9877	0.9984	0.9981	1.0000	0.9999
0.9967	0.7031	0.9861	0.9568	0.9989	0.9959	0.9998
	0.2010	0.8073	0.0013	0.0866	0.2818	
1-3 tvar						
Před cyklováním a po 1 024 714 cyklech (poškozený)						
167.97Hz, 335.93Hz a 56.6406Hz, 296.875Hz						
	0.9907	0.9988	0.9967	0.9986	0.9999	
0.7894	0.9705	0.9967	0.9969	0.9837	0.9800	0.7423
0.8086	0.9722	0.9714	0.9667	0.9918	0.9894	0.7689
0.7308	0.8748	0.9249	0.9615	0.9310	0.9034	0.6579
	0.9971	0.9987	0.9987	0.9996	0.9968	
2-3 tvar						
Před cyklováním a po 1 024 714 cyklech (poškozený)						
292.9688Hz, 335.93Hz a 214.8438Hz, 296.875Hz						
	0.9964	0.9986	0.9999	0.9848	0.9201	
0.9255	0.9976	0.9971	0.9998	0.9615	0.9086	0.9142
0.9804	0.9999	0.9940	0.9999	0.9964	0.9981	0.9545
0.8573	0.9851	0.8483	0.9998	0.8337	0.5738	0.7354
	0.9978	0.9998	0.9995	0.9920	0.9958	
1-2,3 tvar						
Před cyklováním a po 1 024 714 cyklech (poškozený)						
167.97Hz, 292.9688Hz, 335.93Hz a 56.6406Hz, 214.8438Hz, 296.875Hz						
	0.9876	0.9975	0.9966	0.9835	0.9203	
0.9237	0.9930	0.9953	0.9967	0.9553	0.9112	0.9158
0.9772	0.9945	0.9815	0.9666	0.9938	0.9981	0.9551
0.8550	0.8821	0.8060	0.9613	0.7963	0.5790	0.7398
	0.9949	0.9986	0.9982	0.9916	0.9926	



Půdorys desky s vyznačenými výskyty  $COMAC < 0,999$

**Stanovení celkového poškození pomocí modálního korelačního koeficientu (Modal assurance criterion MAC)**

$$MAC_{(i,i)} = \frac{(V_{iv}^T \cdot V_{id})^2}{(V_{iv}^T \cdot V_{iv})(V_{id}^T \cdot V_{id})}$$

Kde

$V_{iv}$  vektor  $i$ -tého vlastního tvaru v počátečním stavu (virgin state)

$V_{id}$  vektor  $i$ -tého vlastního tvaru v poškozeném stavu (damage state)

$T$  transponovaný vektor

## Matice chyb tuhostí (System error matrices SEM)

Matricí tuhosti diskretní soustavy platí vztah vyjadřující podmínku ortogonality

$$[V^0]^T [K] [V^0] = [\omega^2]$$

kde

$$[V^0] = [\{V_{(1)}^0\}, \{V_{(2)}^0\} \dots \{V_{(n)}^0\}]$$

$$[K] = [V^0]^{-T} \cdot [\omega^2] \cdot [V^0]^{-1}$$

pro dva stavy, tedy např. pro počáteční stav a poškozený stav, dostaneme

$$[K]_{vir} = [V^0]_{vir}^{-T} \cdot [\omega^2]_{vir} \cdot [V^0]_{vir}^{-1}$$

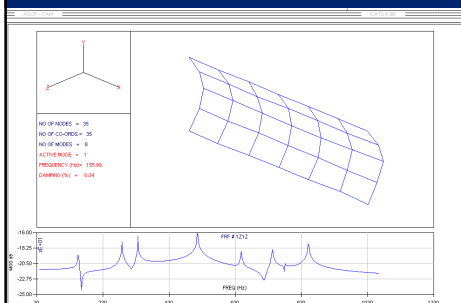
$$[K]_d = [V^0]_d^{-T} \cdot [\omega^2]_d \cdot [V^0]_d^{-1}$$

Matricí chyb tuhostí  $[E_K]$  definujeme takto

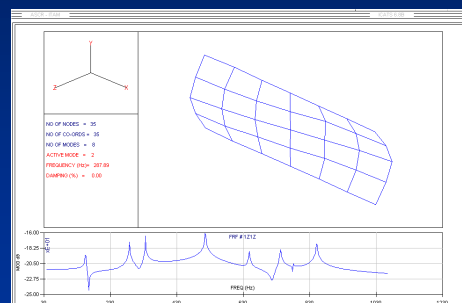
$$[E_K] = [K]_{vir} - [K]_d$$

A8	B8	C8	D8	E8	F8	G8
5	10	15	20	25	30	35
A7	B7	C7	D7	E7	F7	G7
4	9	14	19	24	29	34
A6	B6	C6	D6	E6	F6	G6
3	8	13	18	23	28	33
A5	B5	C5	D5	E5	F5	G5
2	7	12	17	22	27	32
A4	B4	C4	D4	E4	F4	G4
1	6	11	16	21	26	31

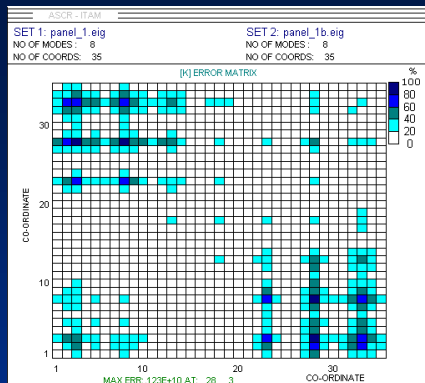
Síť bodů na  
zkoušené desce



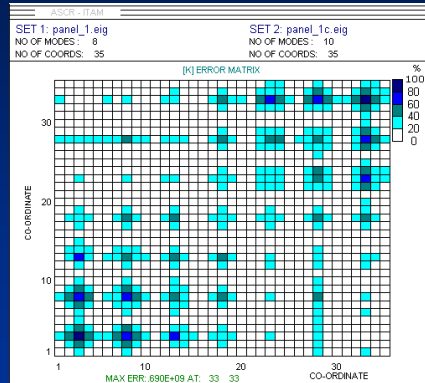
První tvar kmitání desky a frekvenční přenos konstrukce v počátečním stavu (virgin state)



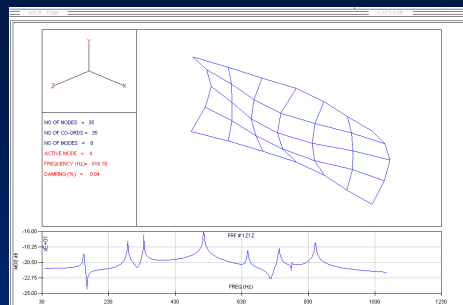
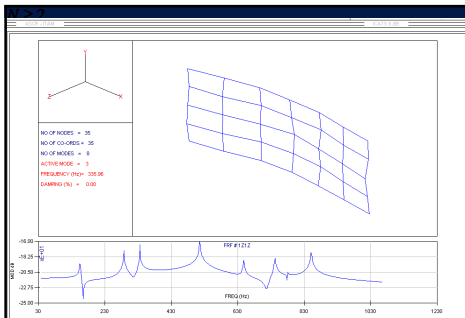
Druhý tvar kmitání desky a frekvenční přenos konstrukce v počátečním stavu (virgin state)



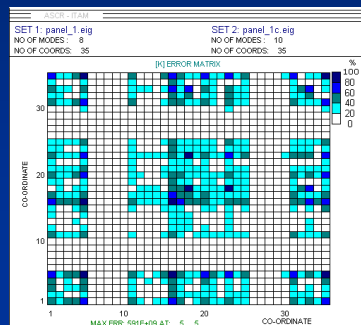
Matice chyb tuhostí : pro počáteční stav a po  $0.5 \cdot 10^6$  cyklech zatížení



Matice chyb tuhostí : pro počáteční stav a po  $10^6$  cyklech zatížení



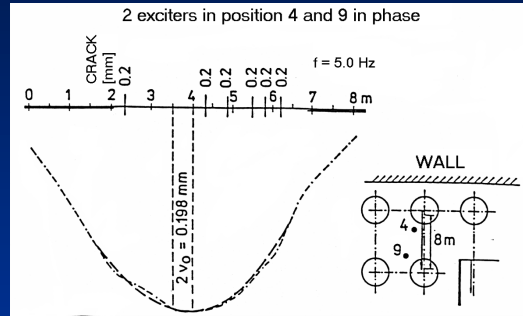
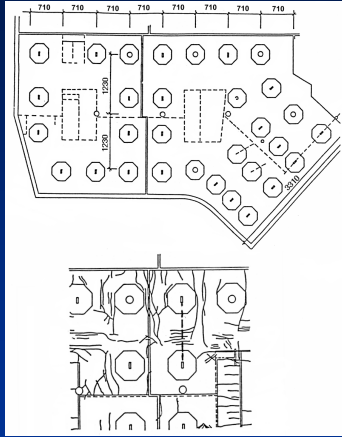
Třetí a čtvrtý tvar kmitání desky a frekvenční přenos konstrukce v počátečním stavu (virgin state)



Matice chyb tuhostí vyjádřená pomocí 3. a 4. tvaru kmitání pro počáteční stav a po  $10^6$  cyklech zatížení

## Aplikace některých uvedených metod identifikace

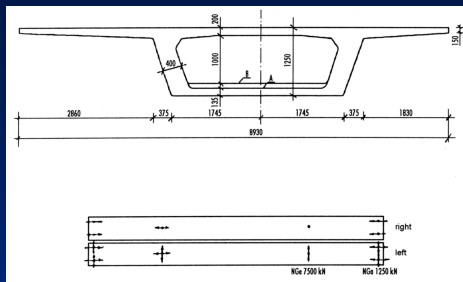
### Aplikace metody CAMOSUC



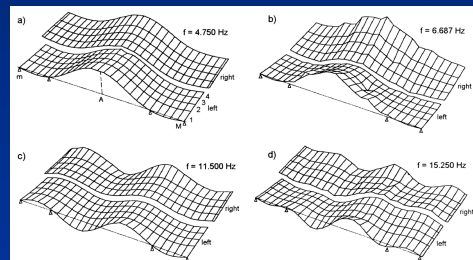
Amplituda vynuceného kmitání mezi dvěma sloupy

Půdorys stropní desky.  
Dole detail s trhlinami

### Aplikace metody COMAC



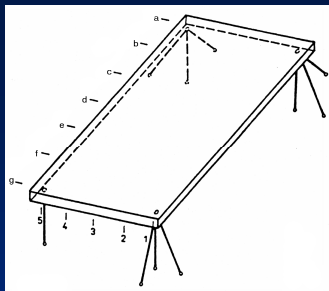
Příčný řez poloviny mostu. Dole způsob podepření.



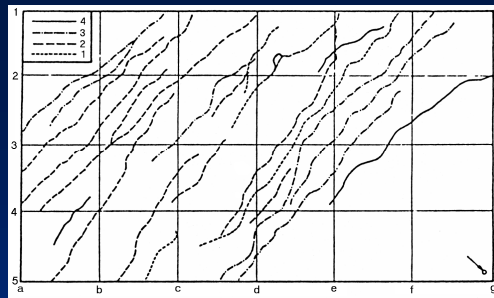
První čtyři tvary kmitání vybudené budičem.

Mesh	1	2	3	4
<i>m</i>	0.9997	1.0000	0.9999	1.0000
<i>l</i>	0.9995	0.9999	0.9999	0.9997
<i>k</i>	0.9993	1.0000	0.9999	0.9999
<i>j</i>	0.9982	1.0000	0.9997	0.9994
<i>i</i>	0.9500	0.9990	0.9998	0.9996
<i>h</i>	0.9721	0.9844	0.9969	0.9474
<i>g</i>	0.9998	0.9998	1.0000	1.0000
<i>f</i>	0.9994	0.9997	0.9998	0.9999
<i>e</i>	0.9992	0.9996	0.9997	0.9999
<i>d</i>	0.9994	0.9997	0.9999	0.9999
<i>c</i>	0.9999	0.9999	1.0000	1.0000
<i>b</i>	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000
<i>A</i>	0.9999	0.9999	1.0000	1.0000
<i>B</i>	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000
<i>C</i>	0.9999	1.0000	1.0000	1.0000
<i>D</i>	0.9998	0.9999	0.9999	1.0000
<i>E</i>	0.9997	0.9999	1.0000	1.0000
<i>F</i>	0.9995	0.9999	0.9999	1.0000
<i>G</i>	0.9998	1.0000	1.0000	0.9998
<i>H</i>	0.9653	0.9946	0.9979	0.6679
<i>I</i>	0.9866	0.9995	0.9999	0.9997
<i>J</i>	0.9980	0.9998	1.0000	0.9997
<i>K</i>	0.9995	1.0000	1.0000	1.0000
<i>L</i>	0.9990	0.9999	1.0000	0.9999
<i>M</i>	0.9994	0.9999	0.9999	1.0000

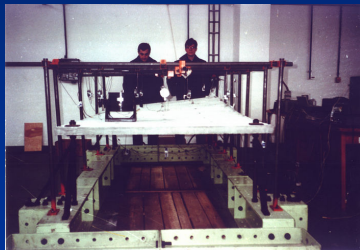




Podepření desky.



Trhliny v desce; šipka v pravém rohu dole značí bode, v němž byl zaveden staticky průhyb desky.



Pohled na zatíženou desku.

0-4	a	b	c	d	e	f	g
1		0.8704	0.904	0.7851	0.5429	0.3165	
2	0.795	0.9176	0.9439	0.8093	0.4473	0.6767	0.9236
3	0.9906	0.978	0.8988	0.7805	0.9354	0.956	0.9356
4	0.9586	0.8833	0.4474	0.6703	0.9069	0.9182	0.7815
5		0.6651	0.556	0.73	0.7727	0.6789	

## Literatura

- [1] Bayer, J., Baťa, M. jun., Král, J., Novotný, P., Pirner, M.: Experimental modal analysis of RC plates and FE-modeling, Acta polytechnica, Vol. 35, No 3, 1955.
- [2] Farrar, R., Cone, K.M.: Vibration testing of the 1-40 bridge before and after the introduction of damage, In: Proc. of the 13<sup>th</sup> Int. Modal Analysis Conf. in Nashvil, 1995.
- [3] Frýba, L., Pirner, M.: Loading test and modal analysis of bridges, Engineering Structures, ed. prof. Topping, Edinburg 1997.
- [4] Frýba, L., Pirner, M., Urushadze, S.: ERRI, D216/RPZ Static, dynamic and fatigue tests of reinforced concrete panels, 2000.
- [5] Frýba, L., Pirner, M., Urushadze, S.: Identification of imperfections of building structures by dynamic response. Computational Methods and Experimental Measurements 11<sup>th</sup> (C.A. Brebbia, G.M. Carlomagno, P. Anagnostopoulos eds.), University of Thessaloniki – Wessex Institute of Technology, WIT Press, Halkidiki, Greece, 2003, pp. 333-342.
- [6] Frýba, L., Pirner, M., Urushadze, S.: Localization of damages in concrete structures, Proc. Computational Methods and Experimental Measurements 10<sup>th</sup> (Y. Villacampa Esteve, G.M. Carlomagno, C.A. Brebbia eds.), University of Alicante – Wessex Institute of Technology, WIT Press, Southampton, Boston, 2001, pp. 417–426.
- [7] Kato, M., Shimada, S.: Vibration of PC bridge during failure process, Journal of Structural Eng. Vol. 112, No 7, 1986.
- [8] Koloušek, V.: Dynamika stavebních konstrukcí, díl I. SNTL/SVTL, Praha 1967.
- [9] Krätzig, W.B. at al (editors): Structural dynamics, In: Proc. of the European Conf. on Structural Dynamics, Bochum 1991.
- [10] Morrison, Norman: Introduction of sequential smoothing and prediction, Mc-Graw-Hill Book Comp., New York, 1969.
- [11] Natke, H.G.: Recent trends in system identification, In: Proc. of European Conf. on Structural Dynamics, Vol. I. Bochum 1990.
- [12] Pandey, A.A., Biswas, M., Samman, M.M.: Damage detection from changes in curvature mode shapes, Journal of Sound and Vibration (1991), 145 (2).
- [13] Pirner, M.: Identification of imperfections of reinforced concrete structures by means of dynamic response, In: Proc of the 8<sup>th</sup> Int. Expertentrum Conf. held by RILEM, Bratislava 1999.
- [14] Pirner, M., Pospíšil, S.: Resonance testing of the torsionally loaded RC slabs, Acta Technica CSAV 41, 1996.
- [14] Pirner, M., Veselý, V.: Stanovení statických veličin konstrukce pomocí dynamické zatěžovací zkoušky, Inženýrské stavby, č. 10, 1984.
- [15] Pirner, M., Urushadze, S.: Localization of imperfections and failures of concrete structures, Proc. of the 19<sup>th</sup> IMAC, Kissimmee–Florida, 2001, pp. 1370-1373.
- [16] Pirner, M., Urushadze, S.: Reliability of identification of imperfections of building structures by dynamic response, in M. Moravčík and D. Papán (eds.): Proceedings of the IV. international conference TESE'02, September 2002, Rajčské Teplice, Slovakia, pp. 135–140.
- [17] Pirner, M., Urushadze, S.: Structural damage assessment using dynamic response, Acta technica, CSAV 47, 2002, pp. 445-466.

# VIBRODIAGNOSTIKA PŘEVODOVÝCH ÚSTROJÍ

Ing. Pavel Kukla, Ph.D., Univerzita Pardubice  
(pavel.kukla@upce.cz)

## 1. Úvod

V tomto příspěvku jsou uvedeny příklady diagnostiky dvou převodovek vozidel, jedné u kolejového vozidla – elektrické motorové jednotky řady 560, a druhé u silničního vozidla – autobusu SCANIA určeného pro dopravu mezi Pardubicemi a Hradcem Králové.

Periodické bezdemontážní sledování technického stavu převodovky má za úkol zvýšit její provozní spolehlivost. Je důležité navrhnout optimální metodický postup pro uplatnění bezdemontážní technické diagnostiky, a tím předcházet vážným poruchám převodovky. Zajištění plynulého provozu bez zbytečných prodlev musí odpovídat také úroveň diagnostiky a údržby objektu. Každá neočekávaná větší porucha se musí obtížně a nákladně odstraňovat. To může někdy vyžadovat mimořádné a nečekané odstavení objektu a následné komplikace při jeho neplánované údržbě. Je proto maximální snaha takovými závažným poruchám úplně předcházet, v horším případě alespoň tyto poruchy včas rozpoznat a ihned provést nutnou údržbu.

Náklady na údržbu jakéhokoliv stroje mohou často tvořit největší část z celkových finančních nákladů za celou dobu jeho provozování. Je tedy žádoucí tyto náklady snižovat na minimum. S tím je velmi úzce spojena problematika spolehlivosti a je tedy nutné věnovat pozornost nejen podmínkám provozu, ale i podmínkám a možnostem údržby stroje. Cílem údržby u dopravních prostředků je především zabezpečení bezpečnosti provozu a tedy snahou o předcházení závažných poruch. Je tedy nutné správně posoudit pravděpodobnost vzniku závažné poruchy a posoudit rizika vlivu jednotlivých komponent celého sledovaného objektu. Na spolehlivost a životnost objektu má vliv správný výběr udržovacích zásahů a dodržování termínů pro provozní ošetření, periodické prohlídky a periodické opravy. K zajištění větší provozní spolehlivosti je vhodné využít některou z metod bezdemontážní diagnostiky. Diagnostika nám umožní lepší využití jednotlivých komponent, případně určí nutnost údržbového zásahu a může tak i zabránit náhlé poruše objektu. Žádná z metod diagnostiky nedokáže s naprostou jistotou vyloučit náhlu, náhodnou a proto nepředvídatelnou poruchu, ale může alespoň částečně omezit vliv poruch, jejichž začínající projevy je možné odhalit bezdemontážní diagnostikou.

Uplatněním optimálního postupu diagnostického sledování objektu by tedy měla být možnost realizace takové diagnostiky, která umožní údržbu podle skutečného stavu převodovky. Aby toto bylo možné, je třeba aktuální provozní stav co nejjednodušším způsobem popsat a určit případnou potřebu údržbového zásahu.

Efektivnost využití diagnostiky je dána vhodnou volbou systému údržby, který určuje optimální počet údržbových zásahů. Rozeznáváme tři základní systémy údržby:

1. Údržbový systém po poruše – korektivní údržba (Break-down Maintenance)  
Údržba se neprovádí preventivně, ale vždy až po poruše. Podmínkou pro použití tohoto údržbového systému je, že porucha nemůže ohrozit bezpečnost nebo životní prostředí.
2. Údržbový systém po prohlídce – preventivní údržba (Preventive Maintenance)  
Údržba se provádí v předem stanovených intervalech dle příslušného výkonového parametru (kilometrický proběh, doba užívání, spotřeba pohonných hmot apod.).
3. Údržbový systém po prohlídce – diagnostická údržba (Productive Maintenance)

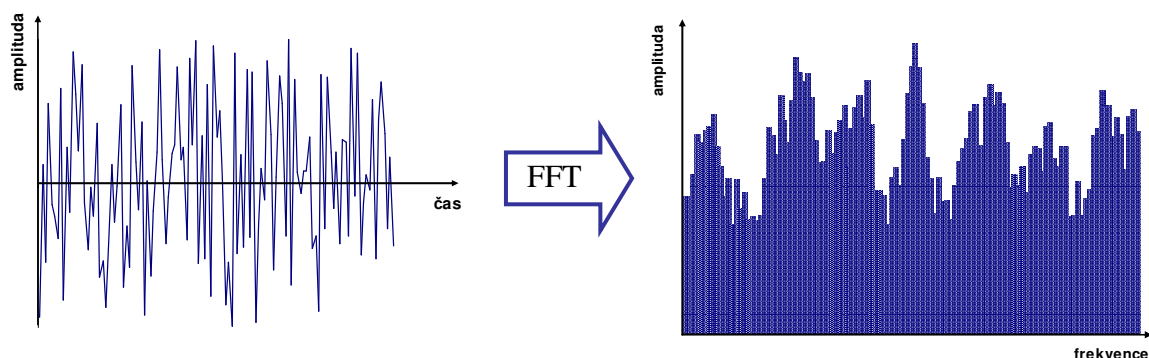
Údržba využívá pravidelných prohlídek, většinou spojených s diagnostickým testem, který umožní zjištění aktuálního technického stavu objektu (off-line diagnostika). Na základě těchto prohlídek se stanoví předpokládaná další doba provozu objektu a naplánuje se případná nutná údržba. Systém dokáže pružně reagovat na případné změny provozních podmínek, ale zároveň je citlivý na chybné stanovení plánu údržby (nastavení intervalů diagnostických prohlídek). Tento problém může odstranit nepřetržité monitorování diagnostických parametrů objektu, jejich automatické vyhodnocování a následné varovné hlášení v případě překročení přednastavených limitů (on-line diagnostika).

## 2. Vibrodiagnostika strojů

Při práci každého stroje dochází k vibracím, které jsou většinou nežádoucím průvodním jevem. Značně zvyšují namáhání součástí, jsou příčinou otřesů, které registrujeme v okolí, a způsobují hluk. Zároveň lze pomocí analýzy vibrací odhalit jejich možné zdroje a diagnostikovat tak stav sledovaného zařízení. Příčinou vibrací jsou tolerance a nepřesnosti, které vzniknou při výrobě a montáži jednotlivých komponentů, deformace vlivem nedostatečné tuhosti, případně nevhodnými provozními podmínkami. Stroj tak tvoří strukturu, která podléhá deformacím od procesů vznikajících při jeho provozu.

Měření a analýza vibrací stroje je diagnostická metoda, která má v oblasti bezdemontážní diagnostiky velký význam. Umožňuje určení okamžitého stavu stroje, lokalizaci poruch i zjištění jejich příčin bez demontáže stroje, případně jen s nutnou částečnou demontáží (např. kryt stroje). Pravidelnému sledování stroje vždy předchází jeho teoretická analýza, která určí sledované parametry a měřené veličiny. Důležité je stanovení intervalu, ve kterém se měření bude opakovat. Periodické sledování parametrů vibrací musí umožnit vytvoření případného trendu změn měřených veličin tak, aby se změny vznikající vlivem opotřebení nebo poruchy včas identifikovaly a poruše bylo možné předejít včasnou údržbou nebo obnovou stroje. Vibrodiagnostika také předchází zbytečným udržovacím zásahům a tím zvyšuje životnost sledovaného zařízení. (Po každém novém sestavení stroje nutně dochází k novému záběhu, a proto i rychlejšímu opotřebení.)

Jedna z metod vibrodiagnostiky je měření časového průběhu diagnostického signálu (jeho výchylku, rychlost nebo zrychlení), který se dále pomocí rychlé Fourierovy transformace (FFT) převede na tzv. frekvenční spektrum (obr 1). Z něj je potom možné identifikovat podíl jednotlivých zdrojů buzení, například rotorů, ložisek, převodů apod., na celkových vibracích stroje.



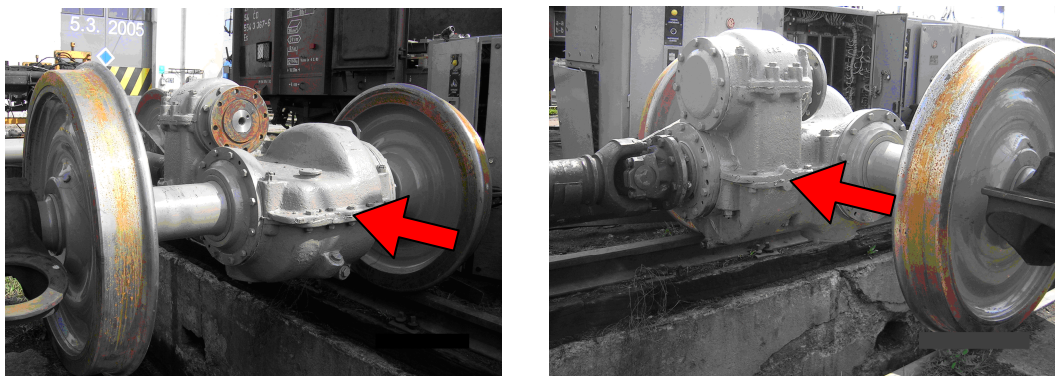
*Obr. 1 Princip vzniku frekvenčního spektra*

### 3. Převodovka hnacího vozu

Pro ověření možnosti využití vibrodiagnostiky byla vybrána nápravová převodovka hnacího vozu příměstské elektrické motorové jednotky řady 560 (obr. 2 a 3).

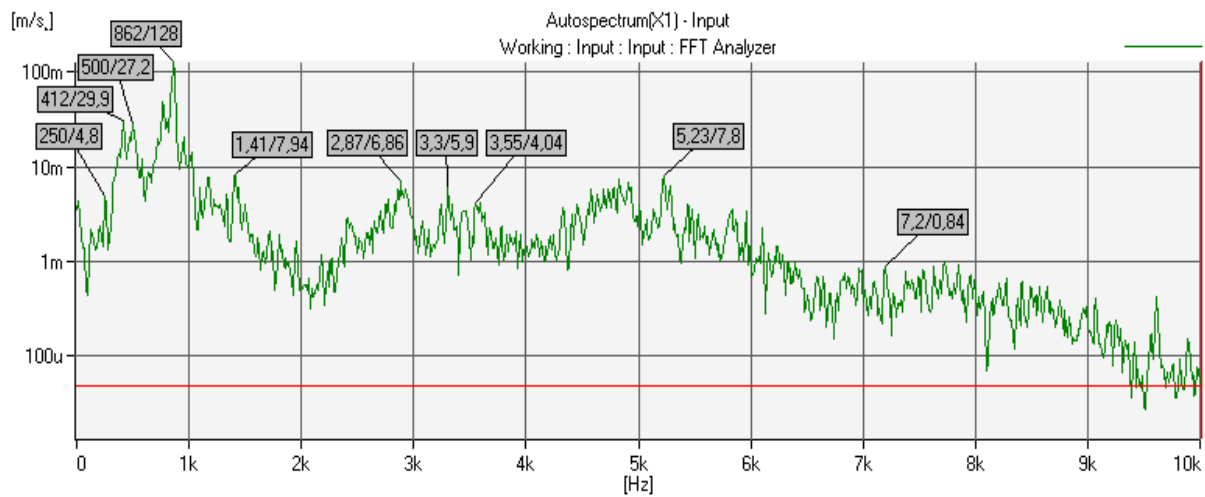


*Obr. 2 Elektrická jednotka řady 560*

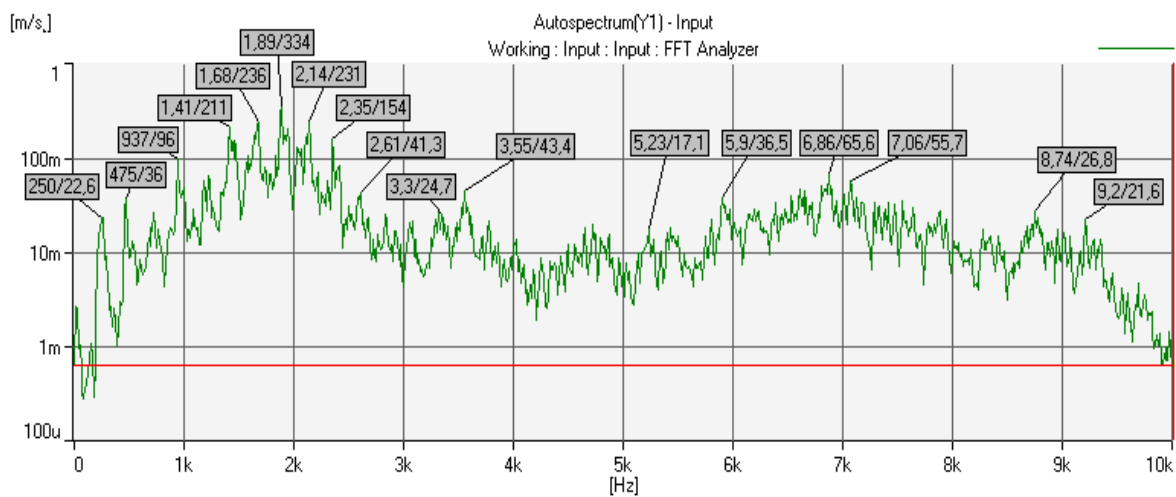


*Obr. 3 Převodovka NP 20 a) čelní pohled, b) boční pohled  
(šipky označují místa pro upevnění snímačů vibrací)*

Pro potřeby vibrodiagnostiky byla určena místa upevnění snímačů vibrací a byly vypočteny budící frekvence všech možných zdrojů vibrací převodovky (rotory, ozubené převody, ložiska) pro předpokládané rychlosti měření. Vypočtené hodnoty byly porovnány s naměřenými spektry vibrací. Měření bylo provedeno na rovném úseku trati Brno – Vranovice, při různých rychlostech (20, 40, 60, 80 a 100 km/h) a při rozjezdu z 0 na 100 km/h a dojezdu ze 100 na 0 km/h. Pro každou rychlost bylo naměřeno frekvenční spektrum a kaskádový diagram diagnostického signálu současně v obou měřicích místech. Příklady spekter a diagramů jsou na obr. 4 a 5. Ve spektrech jsou u významných amplitud popsány odpovídající frekvence a hodnoty amplitud.



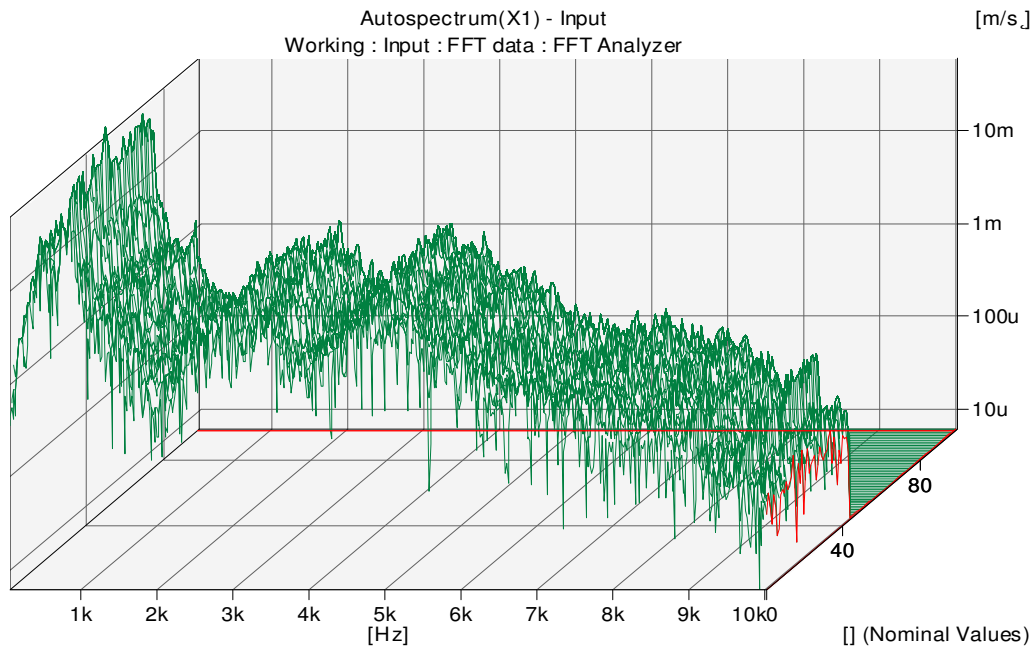
a)



b)

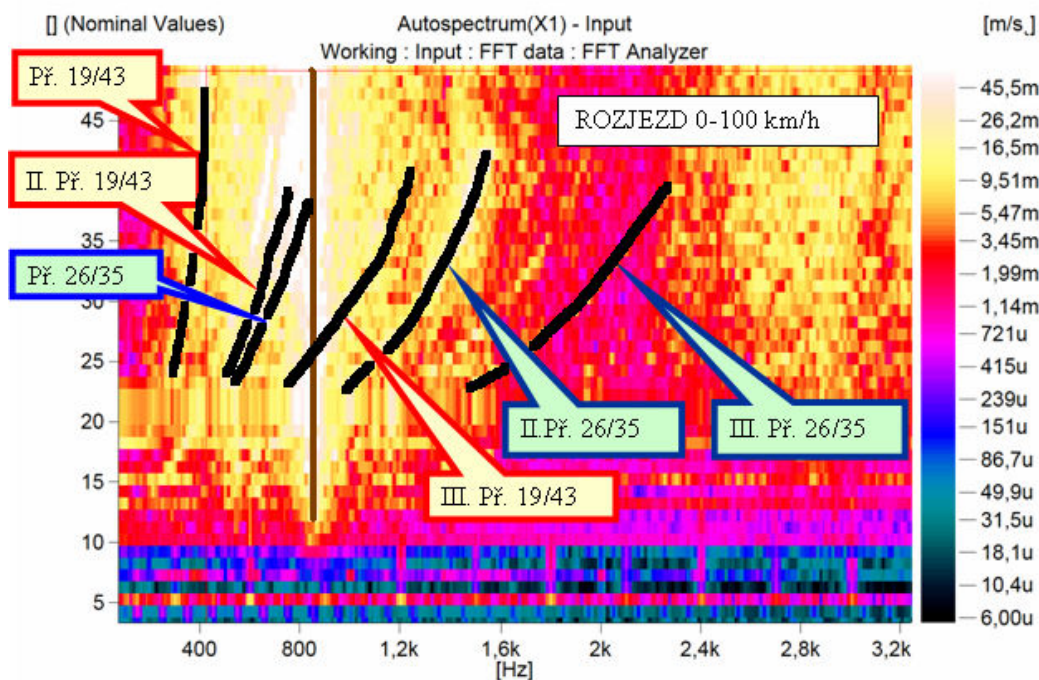
**Obr. 4** Příklad FFT spektra naměřeného při rychlosti 60 km/h  
a) ve směru jízdy, b) kolmo na směru jízdy





**Obr. 5** Příklad kaskádového diagramu FFT spekter naměřených při rychlosti 60 km/h

Pro lepší představu o výskytu základních budících frekvencí byl u rozběhových a doběhových měření jejich kaskádový diagram zobrazen v pohledu shora. Barva spektra v daném místě určuje jeho amplitudu. Na tomto zobrazení jsou dobře viditelné základní budící frekvence a jejich harmonické složky obou ozubených převodů nápravové převodovky (na obr. 6 jsou černě zvýrazněny).



**Obr. 6** Příklad zobrazení kaskádového diagramu FFT při pohledu shora, se zvýrazněnými převodovými frekvencemi, měření při rozjezdu jednotky z 0 na 100 km/h

Na základě provedených měření bylo doporučeno měření vibrací při rychlosti 60 km/h. V jednotlivých spektrech jsou významné vrcholy odpovídající základním a

harmonickým složkám obou ozubených převodů a opakovaným měřením je tedy možné sledovat jejich aktuální stav. Pro sledování stavu ložisek se tento způsob diagnostiky ukázal nevhodný, protože vibrace způsobené ložisky nemají energii dostatečnou pro jejich zviditelnění ve spektrech vibrací.

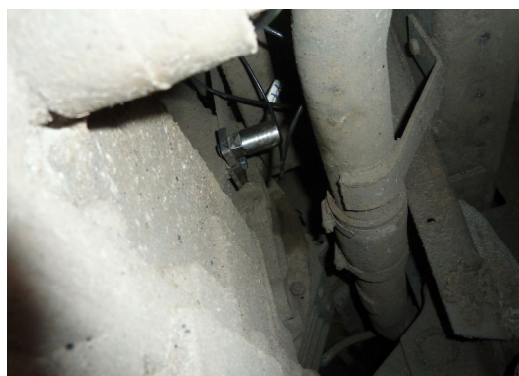
#### 4. Pohon autobusu

Cílem vibrodiagnostiky u autobusu SCANIA OMNILINK CL94 (obr. 7) bylo určení zdroje nadměrných vibrací pohonu, které způsobovaly hluk pronikající do kabiny autobusu.



*Obr. 7 Autobus SCANIA OMNILINK*

Bylo proto provedeno měření vibrací na motoru a rozvodovce (diferenciálu) u pěti stejných autobusů které byly v různém technickém stavu. Pro měření bylo vybráno jedno měřicí místo na motoru a jedno na rozvodovce, obě v horizontální rovině. Protože nebylo možné zasahovat do pohonu autobusu, bylo upevnění snímačů dáno možnostmi použití stávajících šroubů motoru a rozvodovky (obr. 9). Měření bylo realizováno na rovném úseku silnice při ustálené rychlosti (40, 60, 80 km/h).



*a)*

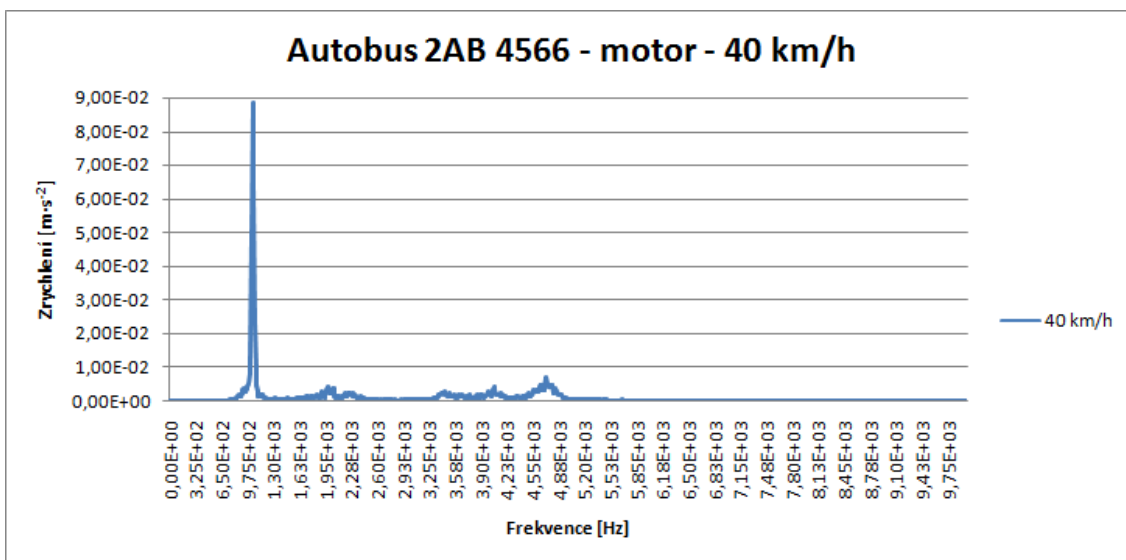


*b)*

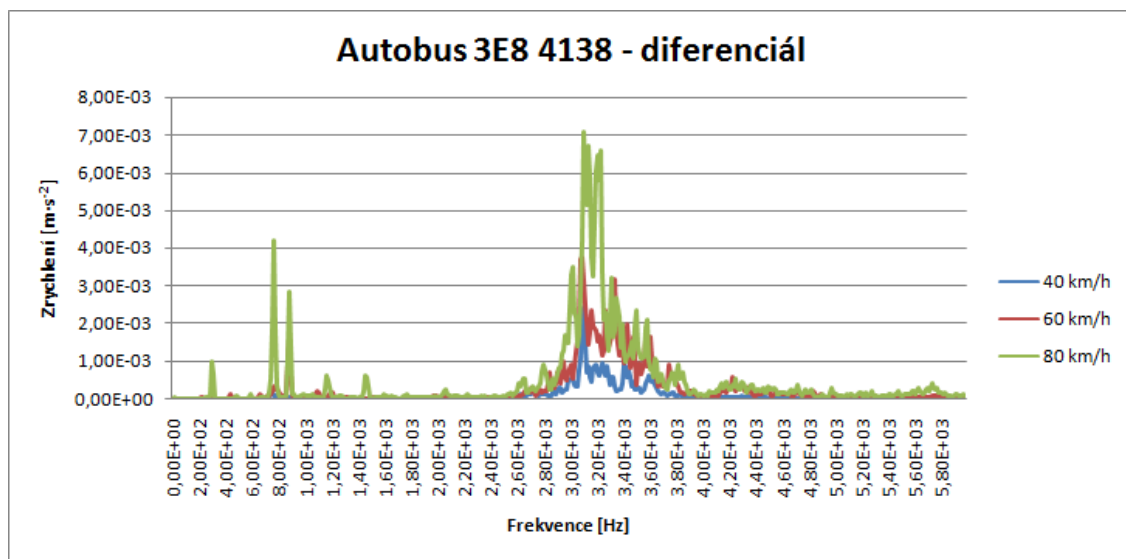
*Obr. 8: Upevnění snímače a) na motoru, b) na rozvodovce*

Opět byla získána frekvenční spektra vibrací pro motor a rozvodovku pro tři různé rychlosti. (Příklad spektra je na obr. 10). Spektra pro různé rychlosti u stejného autobusu byla navzájem porovnána a byla tak prokázána závislost velikosti amplitud významných frekvencí na rychlosti (příklad obr. 11). Vzájemné porovnání spekter naměřených při stejné rychlosti pro různé autobusy prokázalo vliv technického stavu na velikost amplitud u stejných

frekvencí. Porovnání spekter naměřených u pěti převodovek ukázalo podobné frekvence významných amplitud, stejně jako porovnání u všech sledovaných motorů. Je tedy možné sledováním těchto amplitud posuzovat technický stav těchto objektů.



*Obr. 10: Příklad frekvenčního spektra motoru*



*Obr. 11: Příklad porovnání frekvenčních spekter pro tři rychlosti*

Vyhodnocení získaných spekter vibrací prokázalo, že velikost amplitud významných frekvencí závisí na rychlosti jízdy a na technickém stavu rozvodovky a motoru. Technický stav pohonů jednotlivých autobusů, a jeho případné zhoršení, bylo tak možné posoudit na základě měření vibrací. Porovnáním jednotlivých spekter vibrací bylo prokázáno, že příčinou zvýšené hlučnosti pohonu jsou zvýšené vibrace u rozvodovky, opět v závislosti na rychlosti jízdy a na technickém stavu rozvodovky.



## 5. Závěr

Z uvedených příkladů je vidět, že použití vibrodiagnostiky u převodovek je reálné. Pro každý nový případ je ale nutné vypracovat nový postup, tzn. určit měřící místa, možné budící prvky, provést měření a jeho analýzu. Teprve potom lze navrhnout metodiku měření a vyhodnocení vibrací (včetně návrhu četnosti měření) a sledovat technický stav objektu.

### Literatura:

- [1] BENEŠ, Š. – TOMEH, E. : Metody diagnostiky valivých ložisek. Skripta VŠST Liberec, Liberec 1991
- [2] BROCH, J., T.: Mechanical Vibration and Shock Measurements, Brüel & Kjær, 1984
- [3] BRÜEL & KJÆR: Firemní literatura – Měření chvění, Praha, 1984
- [4] BRÜEL & KJÆR: Firemní literatura – Sledování prov. stavu strojních zařízení, Praha, 1991
- [5] BRÜEL & KJÆR: Sensors for Vibration Measurement and Machine Monitoring, 2004
- [6] FAMFULÍK, J.: Údržba hnacích vozidel zaměřená na bezporuchovost, Disertační práce VŠB, Ostrava, 2002
- [7] HELEBRANT, F., ZIEGLER, J.: Technická diagnostika a spolehlivost II - Vibrodiagnostika. Ediční středisko VŠB-TU Ostrava, 2004
- [8] JANOUŠEK, I., KOZÁK, J., TARABA, O.: Technická diagnostika, SNTL, 1988
- [9] KUKLA, P.: Diagnostické sledování a vyhodnocení technického stavu převodovek elektrických jednotek s cílem zvýšení provozní spolehlivosti, Disertační práce Univerzita Pardubice, Pardubice, 2009
- [10] NAVRÁTIL, M., PLUHAŘ, O.: Měření a analýza mechanického kmitání - Metody a přístroje. , SNTL, 1986
- [11] RANDAL, R. : Frequency analysys. Brüel & Kjaer, Dánsko 1987.
- [12] SMETANA, C. : Měření hluku a chvění. SNTL, Praha 1974
- [13] SMETANA, C. a kol.: Hluk a vibrace - Měření a hodnocení, Praha, 1998
- [14] STODOLA, J.: Provozní spolehlivost a diagnostika, VA Brno, 2002
- [15] TŮMA, J.: Zpracování signálů získaných z mech. systémů užitím FFT, Praha, 1997



# **APLIKACE INSTRUMENTÁLNÍCH METOD V TRIBOTECHNICKÉ DIAGNOSTICE**

Marie Sejkorová

Jaroslava Machalíková

## **Obsah přednášky**

- infračervená spektrometrie
- analytická ferrografie
- optická emisní spektrometrie
- elektrochemické metody - voltametrie
- izolace částic z filtrů
  - rastrovací elektronová mikroskopie
  - lokální elektronová mikroanalýza

- Moderní strategie údržby je založena na prediktivních postupech, vycházejících z pravidelné kontroly stavu stroje a mazacích olejů.
- Stav zařízení je hodnocen průběžně; údržba týká jen těch dílů či strojů, které ji reálně potřebují.
- Poruchu lze proto zachytit ve stadiu vzniku, což může zabránit rozsáhlejším poškozením, nečekaným výpadkům a provádění zbytečných prací.

- Příklad v oblasti dopravy:  
kromě materiálových a energetických úspor vede tento způsob péče o vozidla
  - ke zvýšení bezpečnosti provozu,
  - ke snížení negativního vlivu provozu dopravních prostředků na životní prostředí.

## **Tribotechnická diagnostika**

- využívá mazivo jako médium, umožňující získat informace o procesech probíhajících v systémech, v nichž je mazivo aplikováno,
- při hodnocení degradace olejů v provozu i pro sledování průběhu opotřebení mazaných součástí přinášejí cenné informace moderní přístrojové metody.

### **Analýzy**

#### **a) motorových a převodových olejů**

- autobusy
- hnací vozidla Českých drah
- osobní automobily, těžká nákladní vozidla a tahače
- traktory, zemědělské stroje,
- motocykly

#### **b) hydraulických olejů**

#### **c) převodových olejů pro automobilové a průmyslové převodovky**

# 1. FTIR spektrometrie

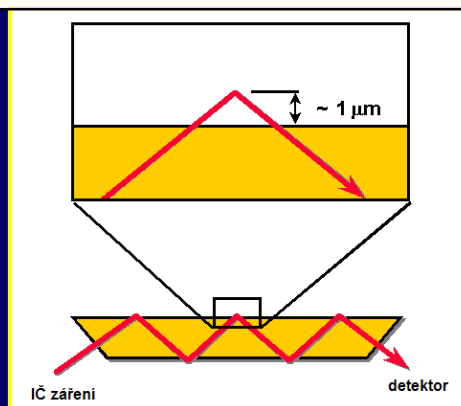
= technika vhodná pro identifikaci a strukturní charakterizaci zejména organických sloučenin.

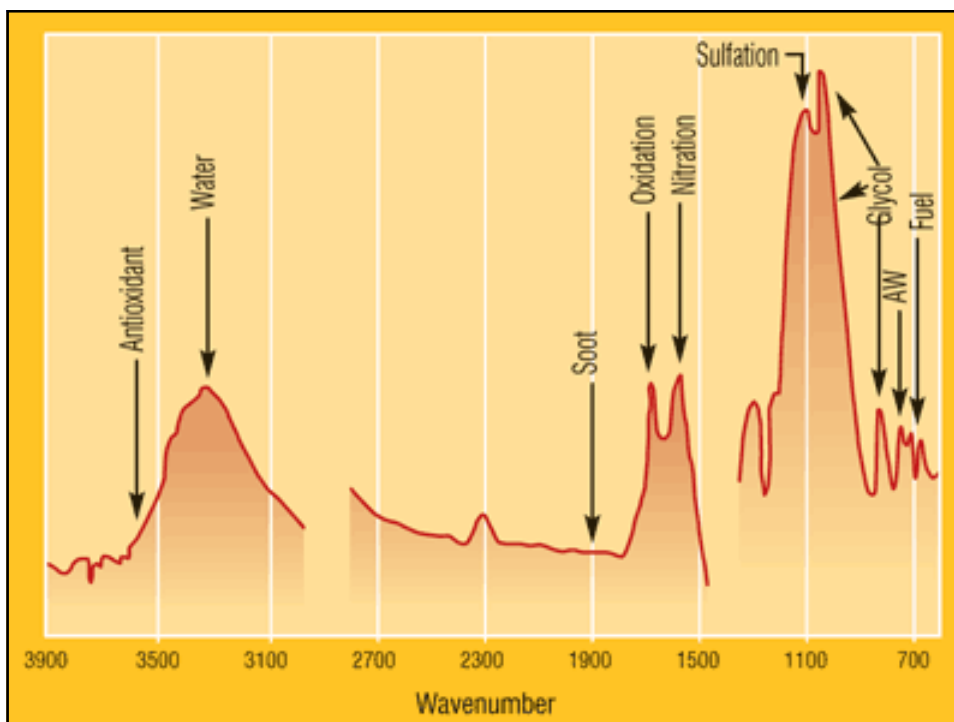
Je založena na měření absorpce infračerveného záření o různé vlnové délce analyzovaným materiálem.

## FTIR / ATR

Metoda zeslabené úplné reflektance (**A**ttenuated **T**otal **R**eflectance)

- princip násobného úplného odrazu záření na fázovém rozhraní vzorku a měřicího krystalu z materiálu o vysokém indexu lomu (ZnSe).





## FTIR-spektrometr Nicolet is 10

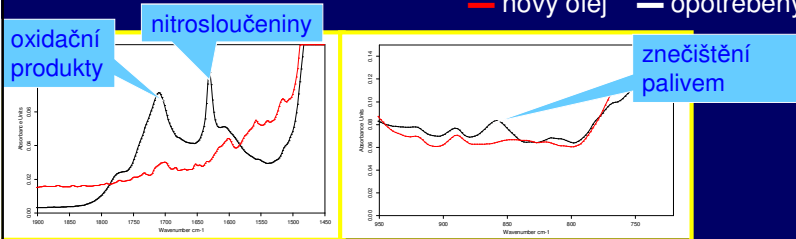
SW OMNIC pro změření spekter vzorků

SW TQ-analyst pro vytvoření kalibračních modelů

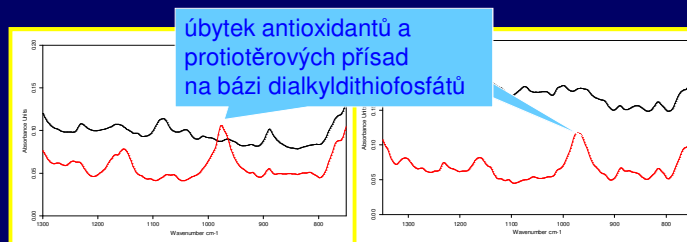


# IČ spektrometrie v analýze olejů

— nový olej — opotřebený olej



Mazda 626 – olej Castrol TXT Softec 5W-40, 20 tis. km

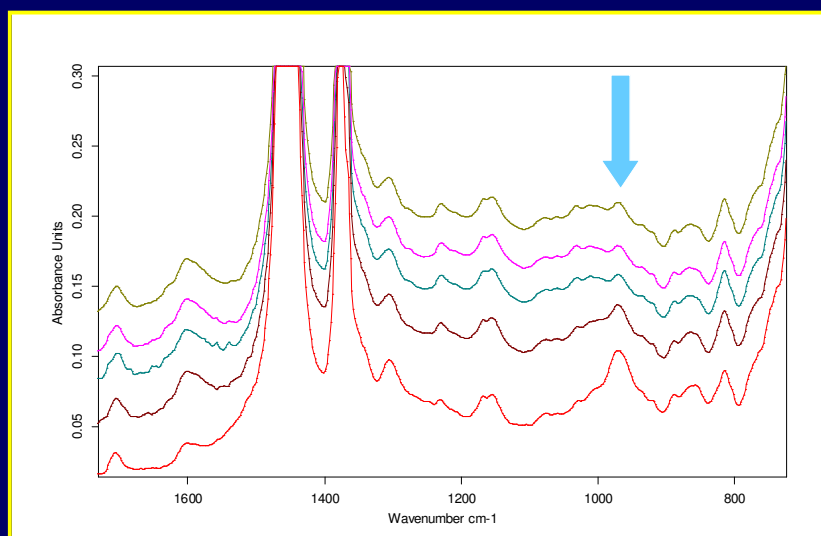


Renault Laguna 2.2 dCI  
- olej Texaco 5W-30, 30 tis. km

DAF FT 95 XF 380  
- olej BP 15W-40, 50 tis. km

## Hnací vozidlo ČD - řada 810

### M7ADS III

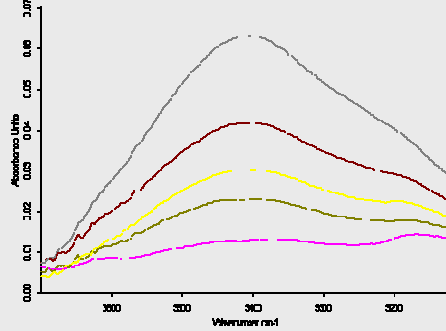
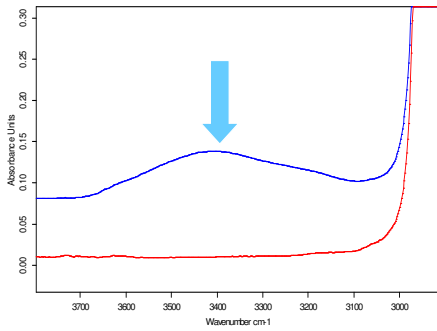


Hnací vozidlo ČD -  
řada 810

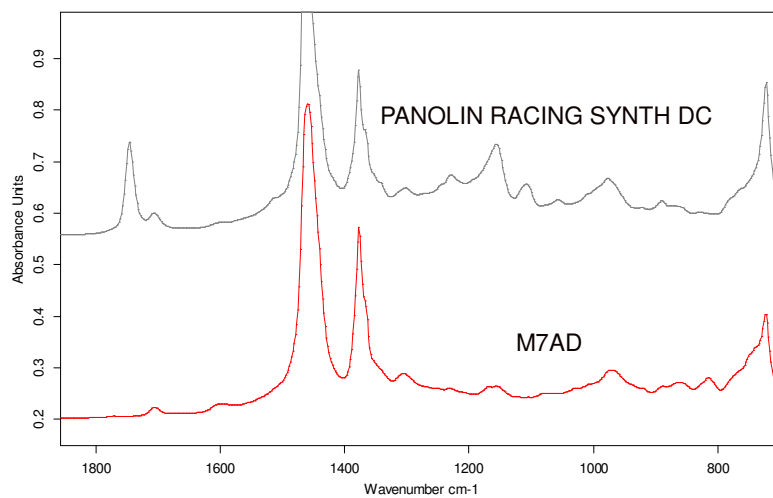
M7ADS III

Texaco Havoline  
Formula 3 15W-40

0,1 až 5,0 % vody



Rozlišení různých druhů olejů





Metodu lze využít

- k identifikaci resp. stanovení glykolu (vnikání chladicí směsi), nitrosloučenin, oxidačních produktů,
- k posuzování úbytku aditivů,
- ke zjišťování tvorby karbonu, vnikání paliva do oleje

### **Kvantitativní FTIR spektrální analýza**

- Předpoklad platnosti Lambertova-Beerova zákona (zákon platí pro monochromatické záření, zředěné roztoky, absorbující prostředí nepodléhá změnám, nedochází k překryvům absorpčních pásů)
- Chemometrické techniky – pracují na principu vícerozměrných matematicko-statistických metod.

## Chemometrické kalibrační modely

- metoda hlavních komponent (PCA)
- metoda částečných nejmenších čtverců (PLS)
- regrese na hlavních komponentách (PCR) atd.

Těmito chemometrickými modely lze stanovit i parametry olejů, které mají fyzikálně-chemický charakter, tj. nelze jim přiřadit charakteristický spektrální pás (např. kinematická viskozita, dynamická viskozita, hustota, TBN, TAN, teplota vzplanutí aj.)

## 2. Analytická ferrografie

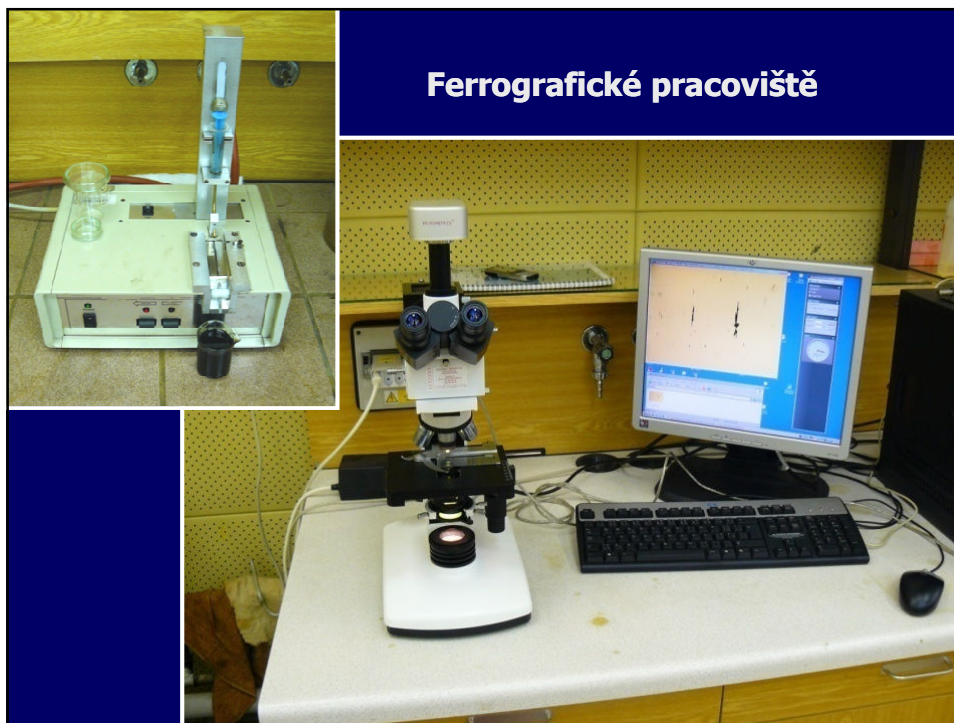
- účinná tribodiagnostická metoda separace cizorodých částic obsažených v olejové náplni mazacích soustav strojů a zařízení od vlastního oleje,
- využívá sedimentace částic při průtoku vzorku oleje silným nehomogenním magnetickým polem,
- zabývá se zkoumáním stopy tvořené částicemi, které jsou usazeny na speciální podložce, v bichromatickém mikroskopu,

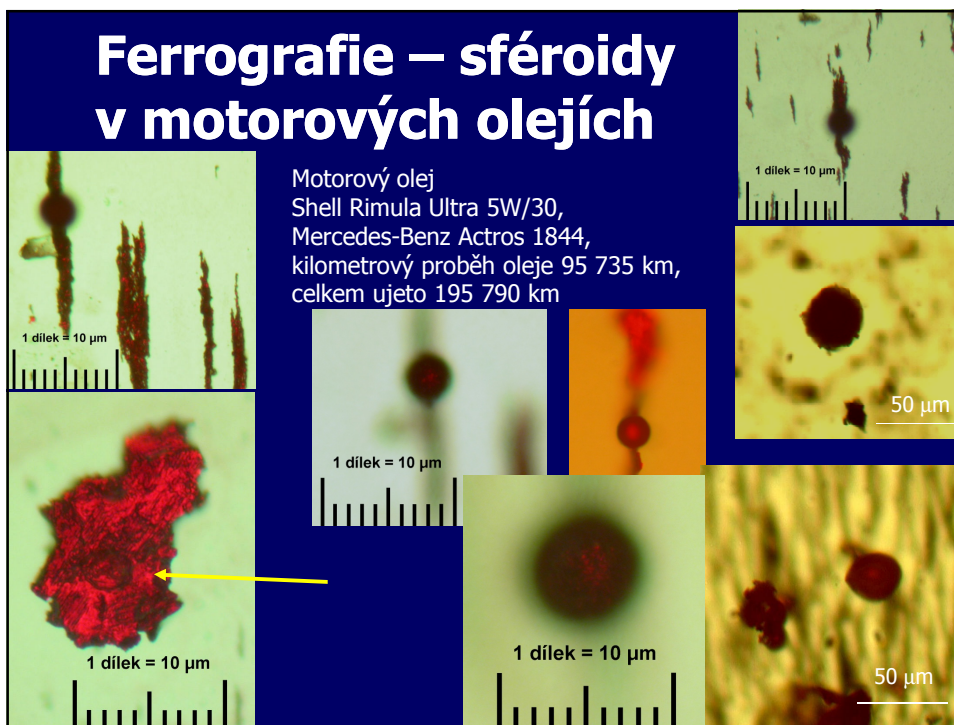
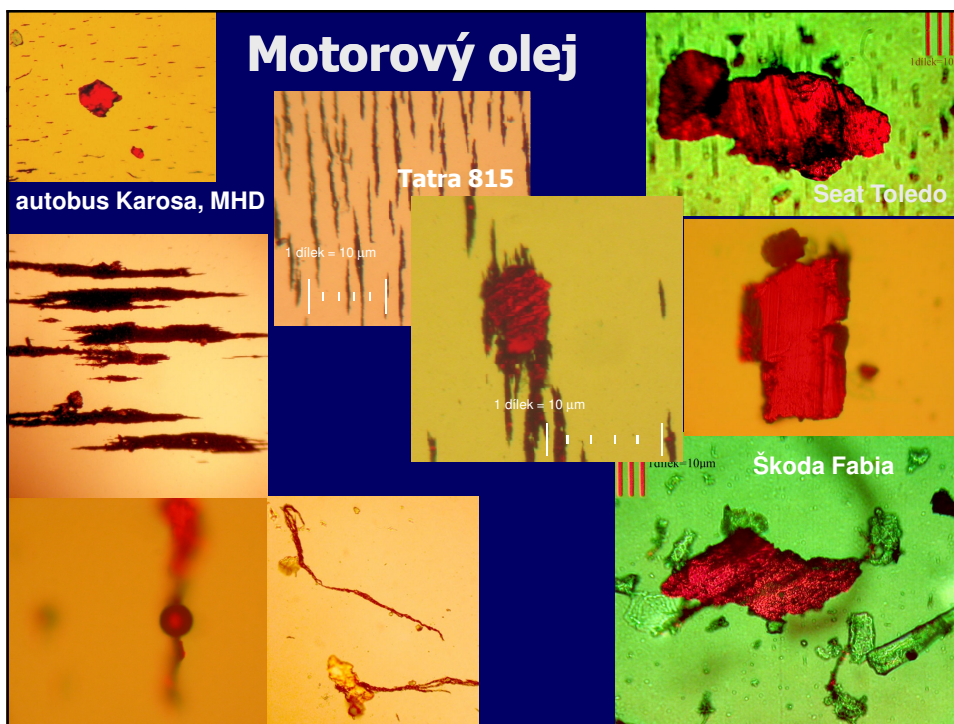
- tvarové znaky, barva, charakter povrchu a další obrazové charakteristiky částic sedimentu nesou významnou informaci o převládajícím druhu tření a opotřebení třecích dvojic omývaných olejem,
- jedná se o bezdemontážní diagnostickou metodu umožňující na základě částicové analýzy exploatovaného maziva objektivně určit režim opotřebení stroje či mechanismu,

- umožňuje na základě hodnocení počtu a morfologie otěrových částic predikovat vznik havarijního opotřebení,
- umožňuje určit původ otěrových částic a rozlišit druh materiálu, ze kterého otěr vznikl.

## Přístrojové vybavení

- Ferrograf REO-1
- bichromatický trinokulární mikroskop H6000  
+ digitální kamera Micrometrics 318 CU,  
software Micrometrics BE





### 3. Optická emisní spektrometrie

= analytická metoda založená na vybuzení (současná ionizace a excitace atomů), detekci a vyhodnocení emisního spektra.

Z rozložení čar v emisním spektru je možno určit druh atomů (kvalitativní složení vzorku), z relativní intenzity čar množství atomů jednotlivých prvků ve vzorku (kvantitativní složení vzorku).

#### Emisní spektrometrie s indukčně vázaným plazmatem (ICP-OES)

- Zdrojem ionizovaných částic je rozklad vzorku a excitace atomů v elektrickém oblouku → vzorek je umístěn v duté uhlíkové elektrodě
- Výhody: lze měřit pevné vzorky, současně je možno stanovit velké množství prvků, k analýze postačuje malé množství vzorku
- Nevýhody: mez stanovitelnosti X0 – X00 ppm, nízká správnost a přesnost

## Emisní spektrometrie s rotující diskovou elektrodou (RDX-OES)

- Zdrojem ionizovaných částic je argonová plazma o teplotě cca 1000 °C
- Výhody: mez stanovitelnosti většinou 0,000X – X00 ppm (závisí na analyzovaném materiálu a typu prvku); rychlá, přesná a spolehlivá metoda
- Nevýhodou: nutnost převést vzorek do roztoku

## Praktické aplikace OES

### a) Stanovení otěrových kovů v opotřebeném oleji

Analýza otěrových částic dává možnost:

- vyhodnotit stav nebo rychlost opotřebení motoru,
- odhadnout významnost tření v motoru, tak lze předpovídat počátky závady – např. počátek zvýšeného opotřebení nebo dokonce zadírání,
- předcházet velkým závadám a haváriím motorů mnohem dříve, než by se na závadu přišlo díky jejím dalším projevům (hluk nebo vibrace motoru, zvýšená teplota oleje apod.).

Otěrový kov	Původ - motorový díl
železo	vyskytuje se téměř vždy jako hlavní konstrukční kov, jeho koncentrace je až na výjimky vždy nejvyšší
měď	ložiska, ventilová skupina - zdvihátka, pouzdro pístního čepu, bronzové díly
chrom	chromované díly - těsnicí kroužky, vložky apod.
nikl	součást konstrukční oceli ložisek, hřídelí, ventilů
hliník	písty, válečková ložiska, určité typy pouzder
olovo	valivá ložiska, u starých zážehových motorů kontaminace z benzínu
cín	ložiska, bronzové díly
stříbro	postříbřená ložiska
křemík	indikátor prachu, špatný stav vzduchového filtru

## Praktické aplikace OES

### b) Stanovení kontaminantů v motorovém oleji

Pokud je v oleji identifikováno větší množství Si a Al v poměru cca 3, 4 : 1 a zároveň větší množství otěrových kovů → průnik prachu do oleje.

Současný nárůst obsahu Na a Ba může být signálem průniku chladicí kapaliny do oleje.

### c) Sledování obsahu aditiv

Ca, Mg, Ba – obsah detergentních přísad



## 4. Voltametrie

- Elektroanalytická metoda, využívající elektrochemické články tvořené pracovní polarizovatelnou elektrodou a referenční nepolarizovatelnou elektrodou.
- Měří se závislost proudu protékajícího pracovní elektrodou na potenciálu, který se na ni vkládá; potenciál se mění s časem. Intenzita proudu je funkcí koncentrace depolarizátoru (analytu).

### Výhody voltametrie:

- vysoká citlivost stanovení,
- dobrá reprodukovatelnost měření,
- poměrně nízká cena elektrochemických analyzátorů ve srovnání se spektrálními přístroji.
- Voltametrické stanovení - rychlá a cenově nenáročná metoda.
- Praktická aplikace: stanovení
  - nitrolátek v olejích,
  - kovů (v olejích, v otěru KV)aj.

## Voltametrické stanovení nitrosloučenin v oleji

### Izolace nitrolátek z olejové matrice:

extrakcí ethylalkoholem za spolupůsobení ultrazvuku.

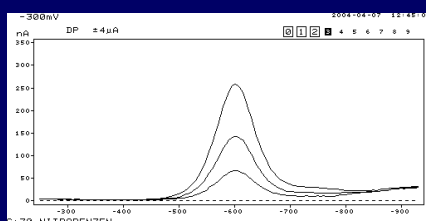
Alkoholická vrstva se oddělí, filtrací přes filtrační papír s modrou páskou se zbaví zbytků oleje.

### Voltametrická analýza:

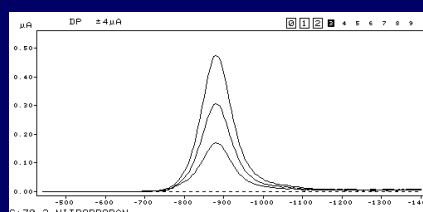
- základní elektrolyt (50 % ethanol, 0,1 M amonný pufr o pH 9),

- napětí na indikační elektrodě: -100 mV až -1400 mV.

## Redukce



nitropropanu



nitrobenzenu

## Nitrolátky v motorovém oleji

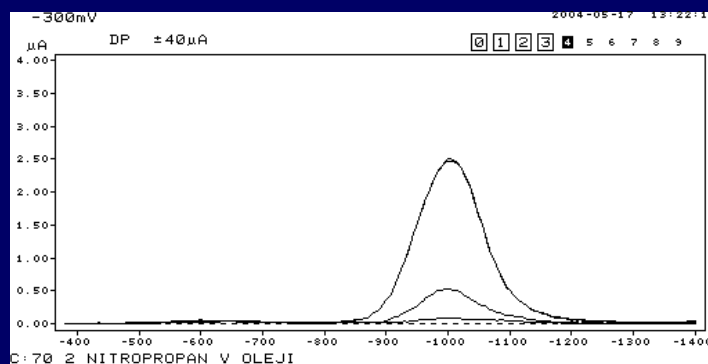
### Testy na modelových vzorcích:

nový M7ADS III + 2-nitropropan (konc. 0,48 %),

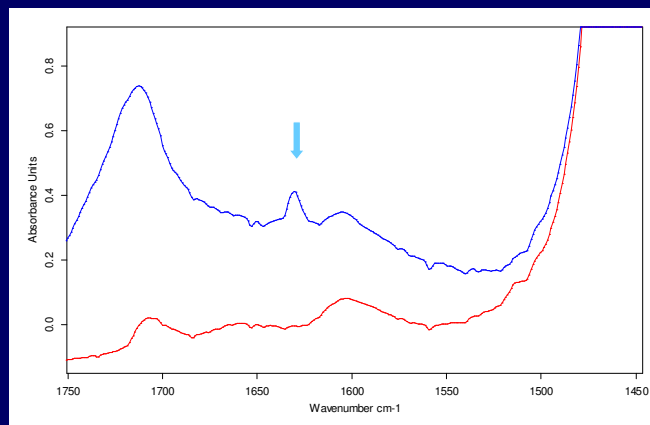
k analýze použit lihový extrakt.

Vyhodnocení: metodou standardního přídávku (konc. 0,50 %).

Chyba stanovení: +4,2 rel %



Týž postup:  
analýza vzorků opotřebených olejů obsahujících nitrolátky -  
stanoveny ve vzorku D5 – plynový motor autobusu  
(7,5 mg N / kg)  
Jedná se o nitrolátky aromatického charakteru.



Kontrolní IČ spektrum

### **Voltametrie reálných olejů**

- obsahují především nitroderiváty fenolů  
(mononitro- a dinitrosloucheniny) v množství  
pohybujícím se v rozmezí jednotek až desítek mg  
–NO<sub>2</sub>/kg oleje.

### **Postup zpracování oleje a analýza –NO<sub>2</sub>**

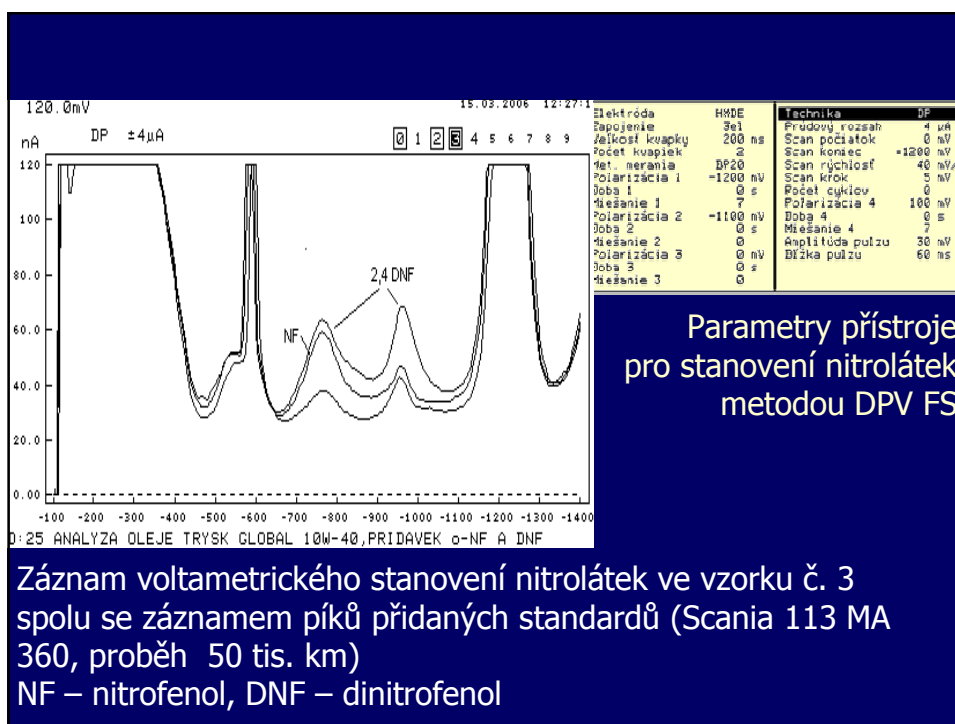
- 1 - 2 g oleje + 20 ml EtOH
- 5 min ultrazvuk
- přídavek
  - 4 ml 1 M amonného pufru o pH 9,76 (minerální olej)
  - 1 ml 1 M acetátového pufru o pH 5,48 (syntetický olej)
- oddělení olejové vrstvy filtrací

<b>Charakteristika vzorků minerálních olejů a výsledky voltametrického stanovení nitroláték v reálných vzorcích minerálních olejů na základě standardního přídávku metodou DPV FS</b> základní elektrolyt: 0,07 mol. l <sup>-1</sup> amonný pufr o pH = 9,75 v přítomnosti 89% -ního ethylalkoholu parametry stanovení: počáteční potenciál -100 mV; konečný potenciál -1400 mV; rychlost nárůstu potenciálu 40 mV/s; proudový rozsah 4μA			
číslo vzorku	proběh [km], [l] <sup>*</sup>	původ vzorku, charakteristika vozidla	nalezené množství [mg -NO <sub>2</sub> / kg oleje]
1	0	čistý motorový olej M7 ADS III	méně než 0,5
2	4055 <sup>*</sup>	tahač, polní práce, vysoké zatížení	20,05
3	50 000	tahač Scania 113 MA 360	40,17
4	zadřený	T – Zetor 6211	11,88
5	20 125	tahač, střední zatížení	5,98
6	15 754	hnačí vozidlo ČD, vysoké zatížení	50,0
7	30 330	hnačí vozidlo ČD, vysoké zatížení	43,81
8	4600 <sup>*</sup>	T - Zetor 16145, polní práce, střední zatížení	41,92
9	0	čistý motorový olej SAE 15W - 40	méně než 0,5
10	19 794	hnačí vozidlo ČD, vysoké zatížení	22,3
11	10 294	hnačí vozidlo ČD, vysoké zatížení	11,59
12	46 771	hnačí vozidlo ČD, pokročilé stádium opotřebení	35,12
13	14 579	hnačí vozidlo ČD, pokročilé stádium opotřebení	24,10
14	12 400	hnačí vozidlo ČD, střední zatížení	1,50
15	2 162,5 <sup>*</sup>	T – Zetor 8111, střední zatížení	4,51
16	17 926	hnačí vozidlo ČD, vysoké zatížení	55,19
17	30 419	hnačí vozidlo ČD, vysoké zatížení	42,55
18	3 090,6 <sup>*</sup>	T – Zetor 16145, polní práce, střední zatížení	36,26
19	1952,2 <sup>*</sup>	T – Zetor 8111, polní práce, vysoké zatížení	4,25
20	20 920	hnačí vozidlo ČD, vysoké zatížení	40,05
21	0	čistý motorový olej Trysk M2T	méně než 0,5

<sup>\*</sup>pozn.: u traktorů Zetor je proběh udáván v litrech spotřebované nafty.

<b>Charakteristika vzorků syntetických olejů a výsledky voltametrického stanovení nitroláték v reálných vzorcích syntetických olejů na základě standardního přídávku metodou DPV FS</b> základní elektrolyt: 0,07 mol. l <sup>-1</sup> acetaťový pufr o pH = 5,48 v přítomnosti 89% -ního ethylalkoholu parametry stanovení: počáteční potenciál -100 mV; konečný potenciál -1400 mV; rychlost nárůstu potenciálu 40 mV/s; proudový rozsah 4μA			
číslo vzorku	proběh [km], [Mh] <sup>*</sup>	původ vzorku, charakteristika vozidla	nalezené množství [mg -NO <sub>2</sub> / kg oleje]
1a	0	čistý motorový olej Shell Helix Ultra 5W-40	méně než 0,5
2a	14 300	osobní automobil Renault	méně než 0,5
3a	41 059	osobní automobil Škoda Fabia 2.0i, 85kW	4,99
4a	15 650	osobní automobil Škoda Octavia	12,86
5a	41 000	osobní automobil Škoda Octavia 1.9 TDI	58,77
6a	30 000	osobní automobil Škoda Felicia 1.3	11,48
7a	300 <sup>*</sup>	rypadlový nakladač	méně než 0,5
8a	15 000	osobní automobil Škoda Felicia -Böhm	51,12
9a	15 235	osobní automobil Škoda Fabia	16,2
10a	17 000	osobní automobil Škoda Felicia 1.3	3,41
11a	15 000	osobní automobil Škoda Fabia 1.4	4,73
12a	6 781	osobní automobil Škoda Felicia	nelze určit <sup>*</sup>
13a	11 520	osobní automobil Škoda Fabia 1.4, 50 kW	13,62
14a	0	čistý motorový olej Texaco SAE 5W- 30	méně než 0,5
15a	21 450	osobní automobil Fiat	4,05

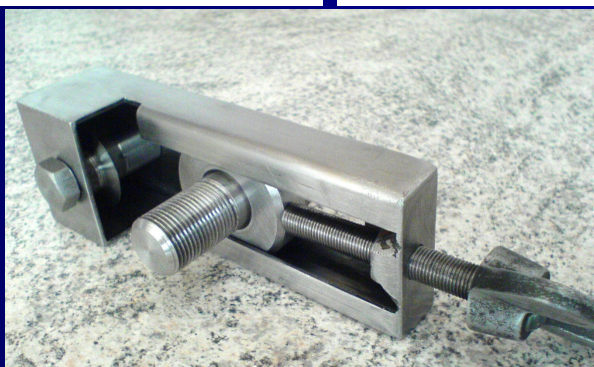
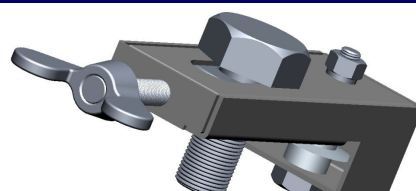
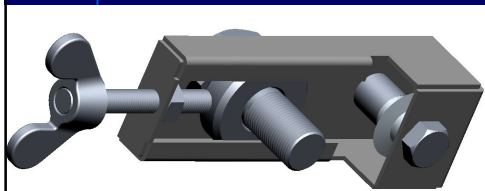
<sup>\*</sup> pozn.: proběh je udán jako počet motohodin.



## 5. Izolace částic z filtrů

- Zachycené částice z filtrační vložky olejového filtru byly uvolňovány po vyjmutí vložky z konstrukce filtru a po rozřezání podél žeber na cca 6 cm dlouhé pruhy.
- Po ponoření do směsi petroleje a technického benzínu (1:1 V/V) na dobu jednoho týdne byly pruhy dále rozděleny na útržky cca 2×2 cm, které byly dalších 7 dnů volně vloženy ve výše uvedené směsi. Během této doby byly několikrát denně ručně promíchány.
- Ke konečnému uvolnění částic z filtrační vložky byla použita ultrazvuková lázeň (doba působení ultrazvuku 30 min).
- Pomocí permanentních magnetů N35 na bázi Fe-Nd-B byly po opakovaném promytí benzinem izolovány ferromagnetické částice, přeneseny na průhlednou fólii a pozorovány na optickém mikroskopu, popř. po umístění na papírové nebo grafitové podložce přímo fotografovány v makrorežimu.
- Před analýzou v REM musela být provedena demagnetizace pomocí střídavého magnetického pole: byly přemístěny do plastového přípravku a vloženy na jednu minutu do zařízení zhotoveného z traťpájky. Demagnetizované částice byly dále pozorovány na REM.
- Nemagnetické částice byly pro pozorování na optickém mikroskopu vyjmuty manuálně pinzetou.

## Přípravek pro otevírání filtrů



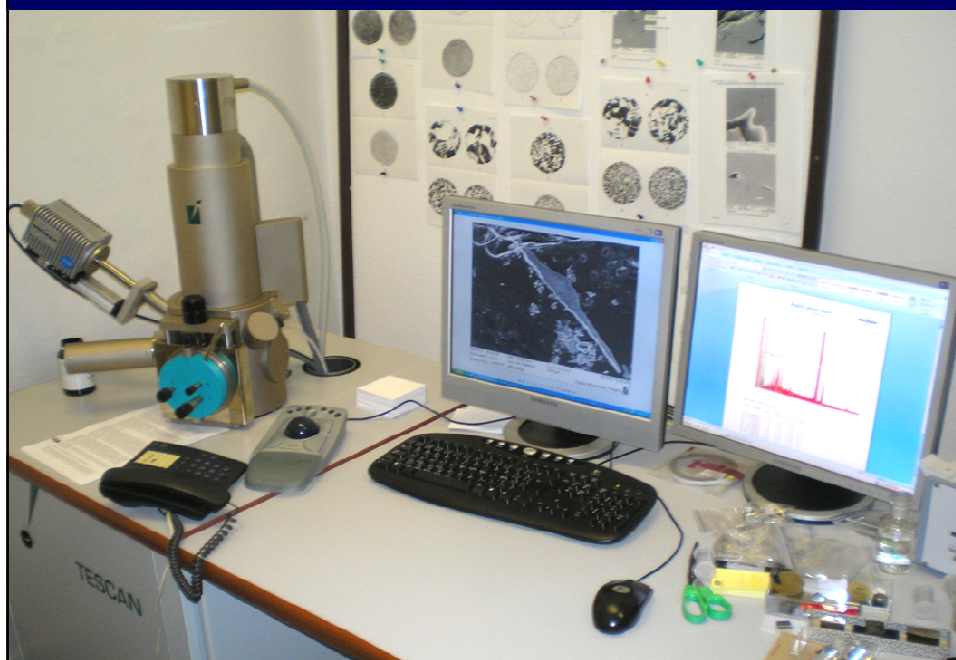
## Manipulace s filtry



## Přístrojové vybavení

- rastrovací elektronový mikroskop VEGA TESCAN 5130 SB
- energiově-disperzní analyzátor Quantax 200 (Bruker)  
+ naprašovačka SC7620 (Quorum)

REM s EDX analyzátozem

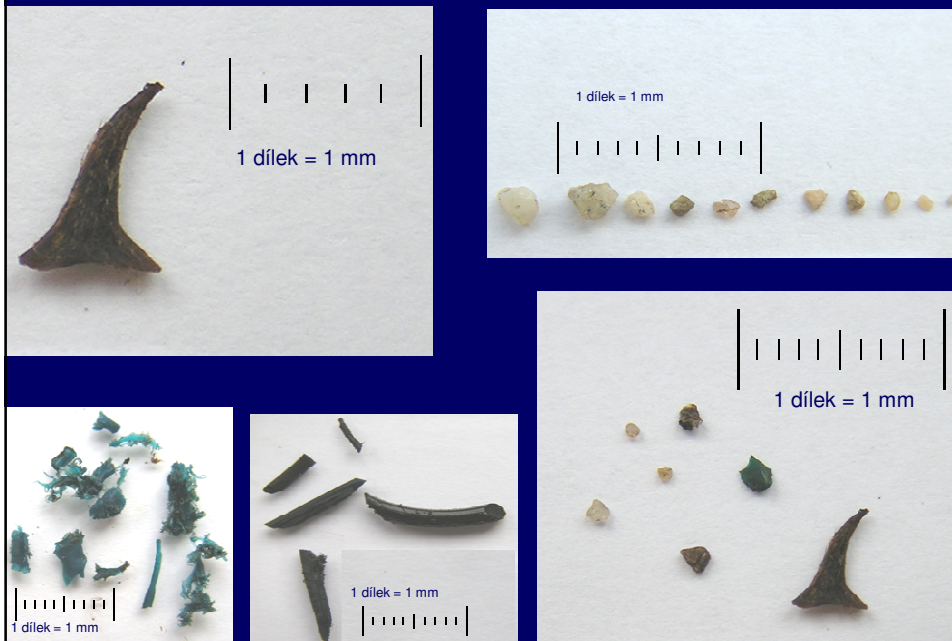




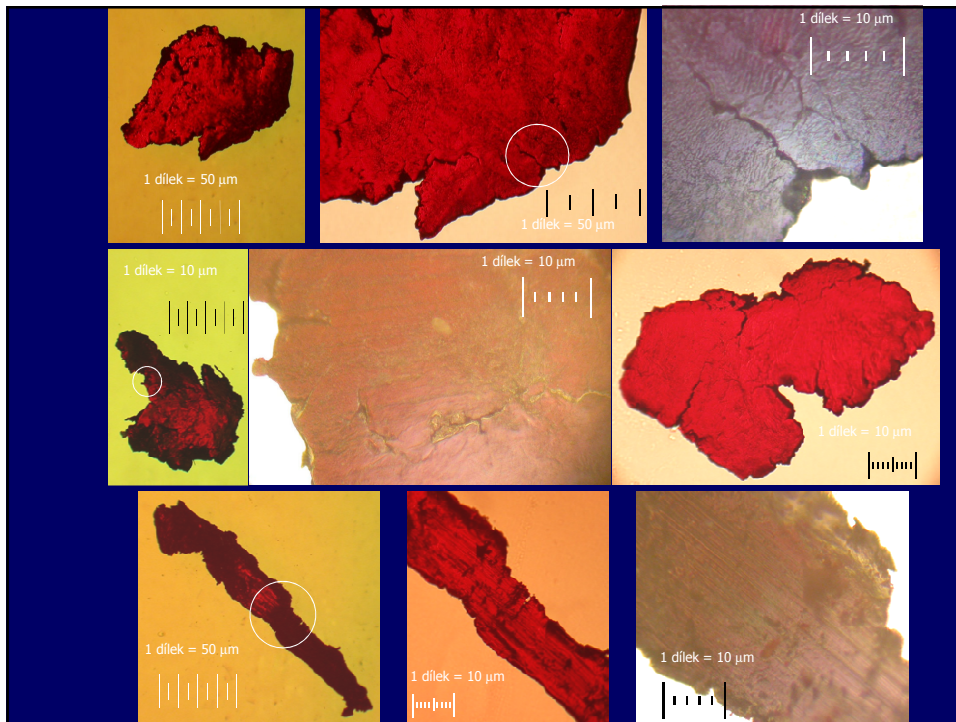
## Částice izolované z olejových filtrů – SM (mono)



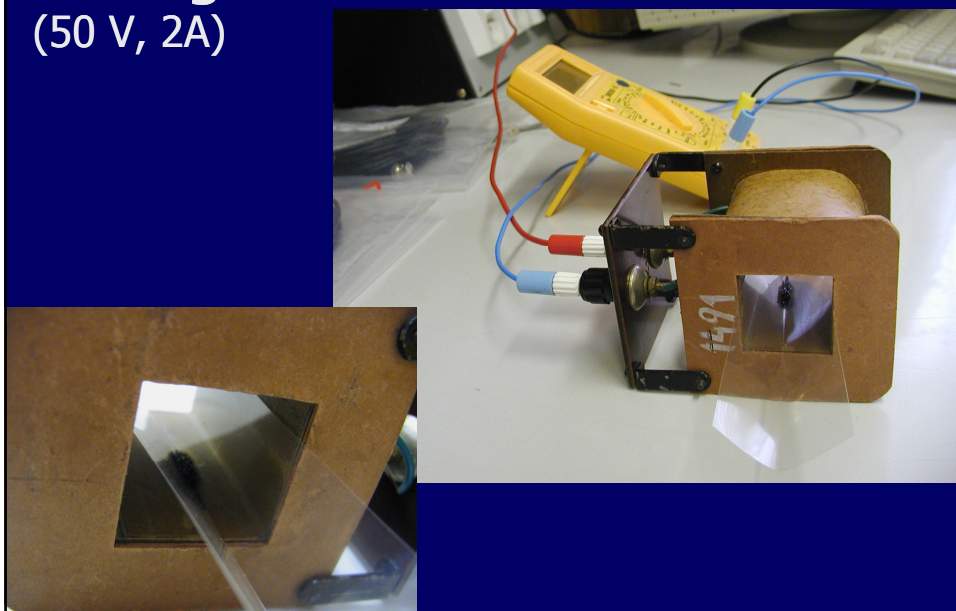
## Částice izolované z olejových filtrů – DF makro







## Demagnetizace (50 V, 2A)



## Lokální elektronová mikroanalýza

- Vybrané typické částice byly analyzovány na REM s energiově-disperzním analyzátozem.

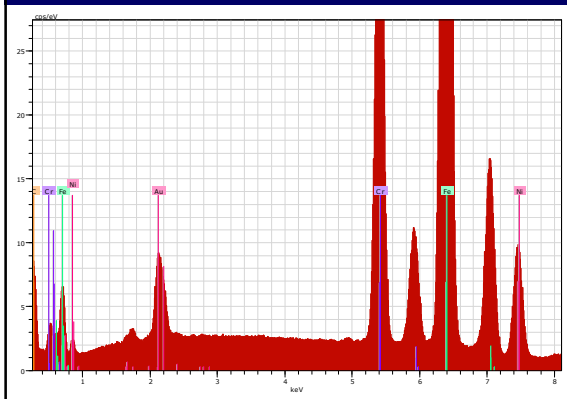
### Olejové filtry různých typů vozidel

Zkoumané částice je možné podle chemického složení rozdělit do šesti skupin:

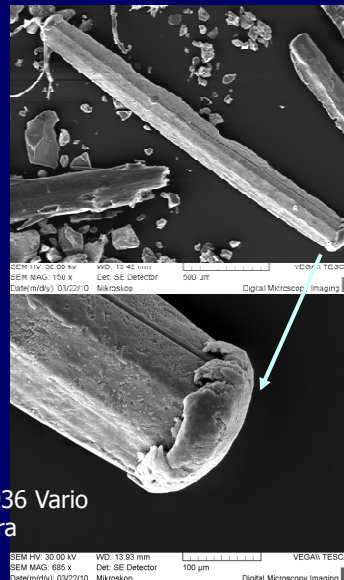


Typ	Dominantně zastoupené prvky	Prvky obsažené v nižších koncentracích
1	Fe	stopy Si, Ca, Cr, Mn, P a další prvky
2	Sn, Cu	Pb, O, P, Fe (stopy), Al
3	Fe, Al	Ca, P, Zn, Na, S
4	Zn, Fe, P	Al, Si, S, Cl, Ca, Cr
5	C	Fe (stopy) Na, Mg, Al, Si, S, K, Ca, Zn
6	Si, O	Fe, Na, Mg, K, Ca aj.

# Energiově disperzní analýza



El	AN	Series	unn. [wt.%]	C norm. [wt.%]	C Atom. [at.%]	C Error [%]
C	6	K-series	7,93	8,43	30,66	1,0
Cr	24	K-series	16,03	17,05	14,31	0,4
Fe	26	K-series	58,61	62,31	48,71	1,5
Ni	28	K-series	6,51	6,92	5,15	0,2
Au	79	L-series	4,97	5,29	1,17	0,2
Total:			94,06	100,00	100,00	

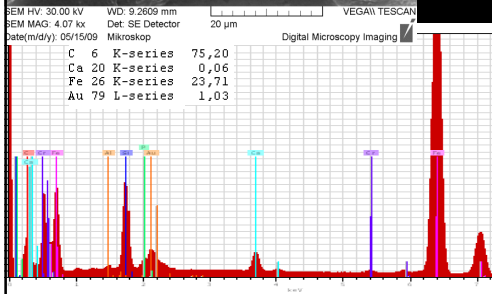
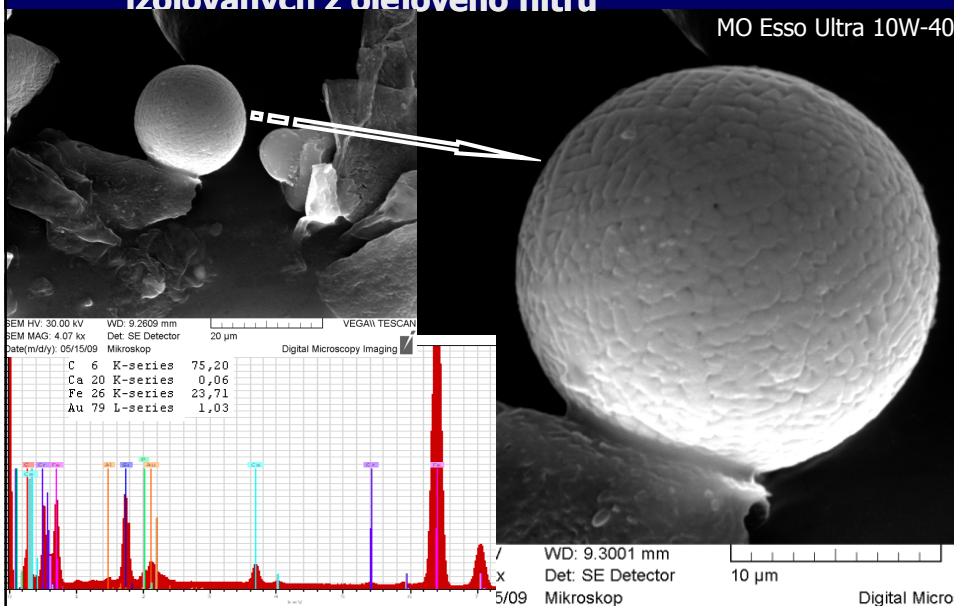


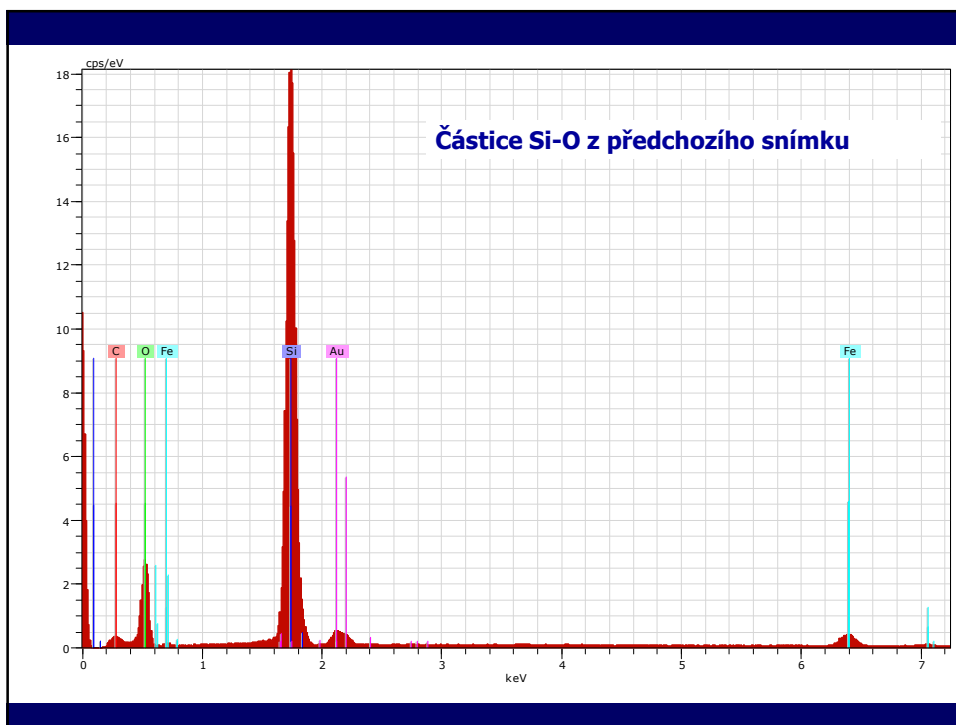
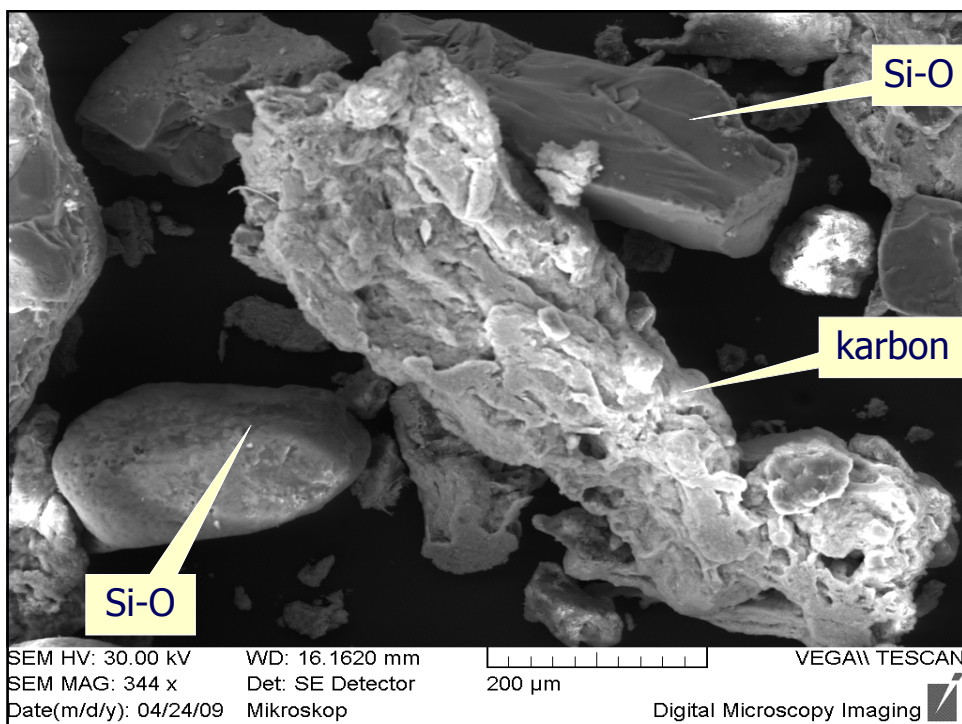
traktor FENDT 936 Vario  
MO Shell R6 Ultra

# REM a EDX analýza otěrových částic izolovaných z olejového filtru

Fiat Scudo

MO Esso Ultra 10W-40

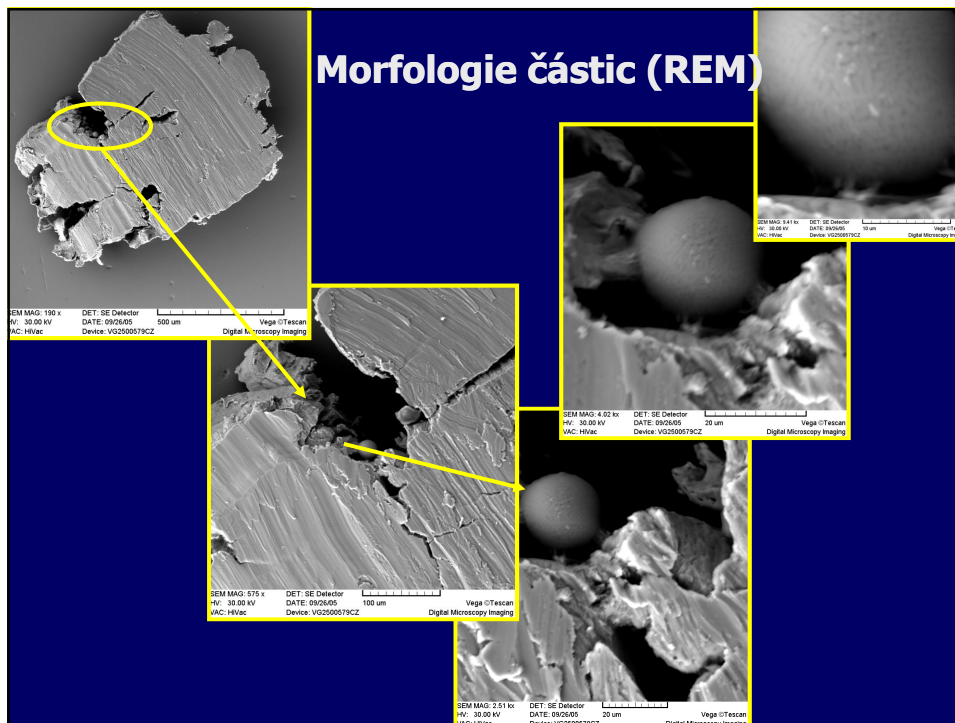
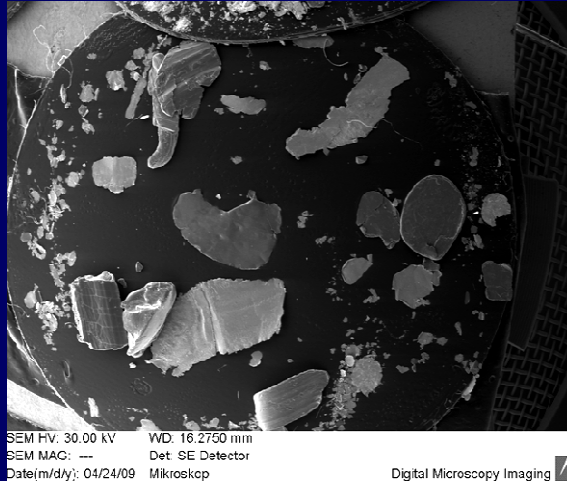




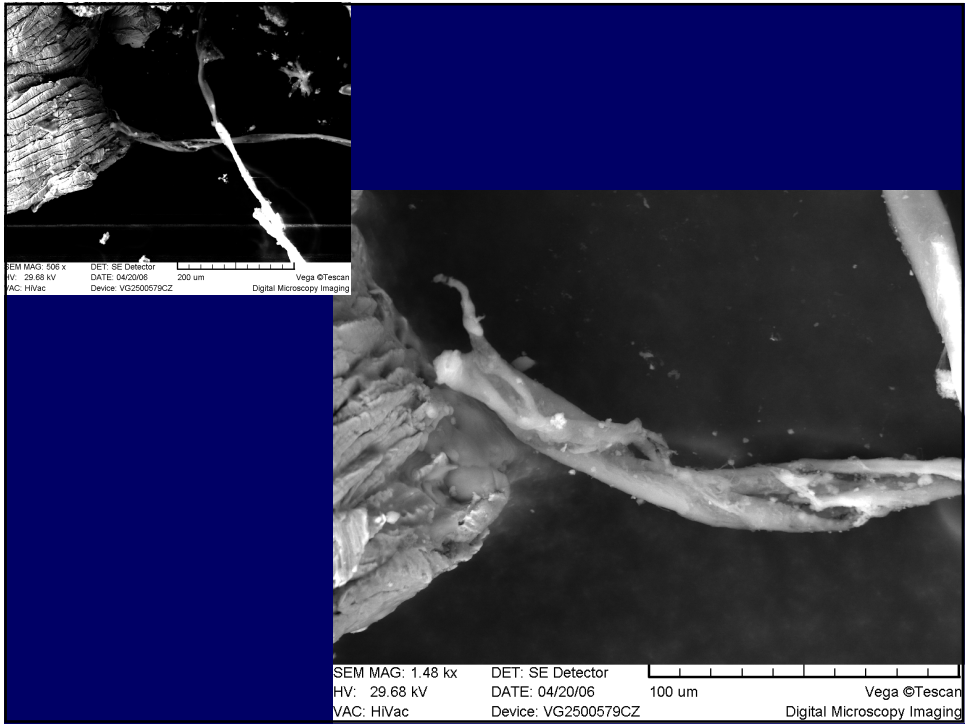
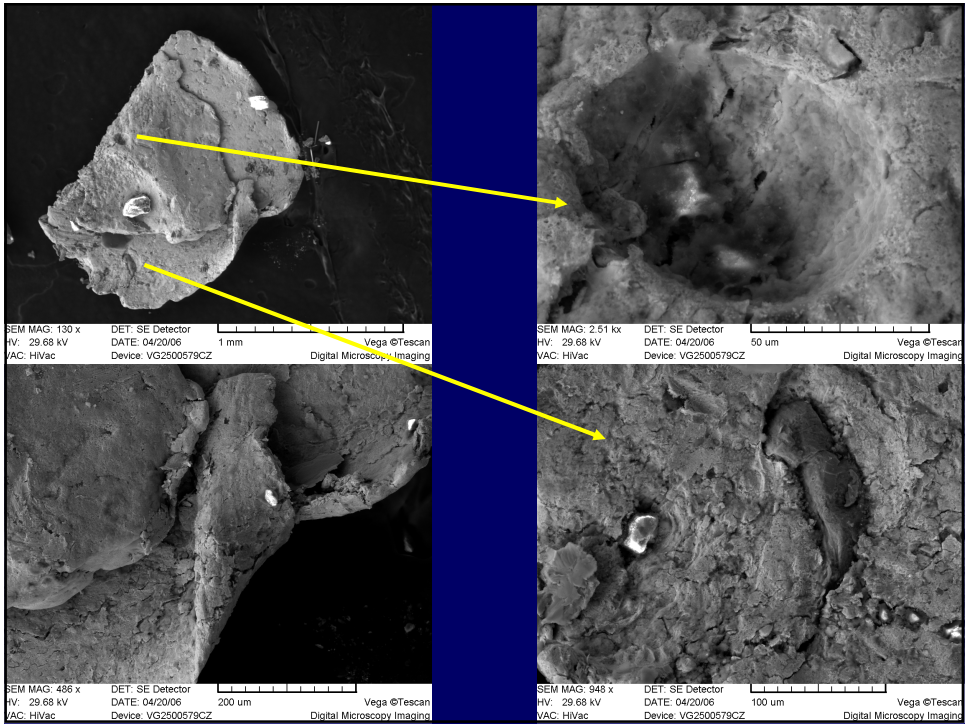
## převodovka H 750 M

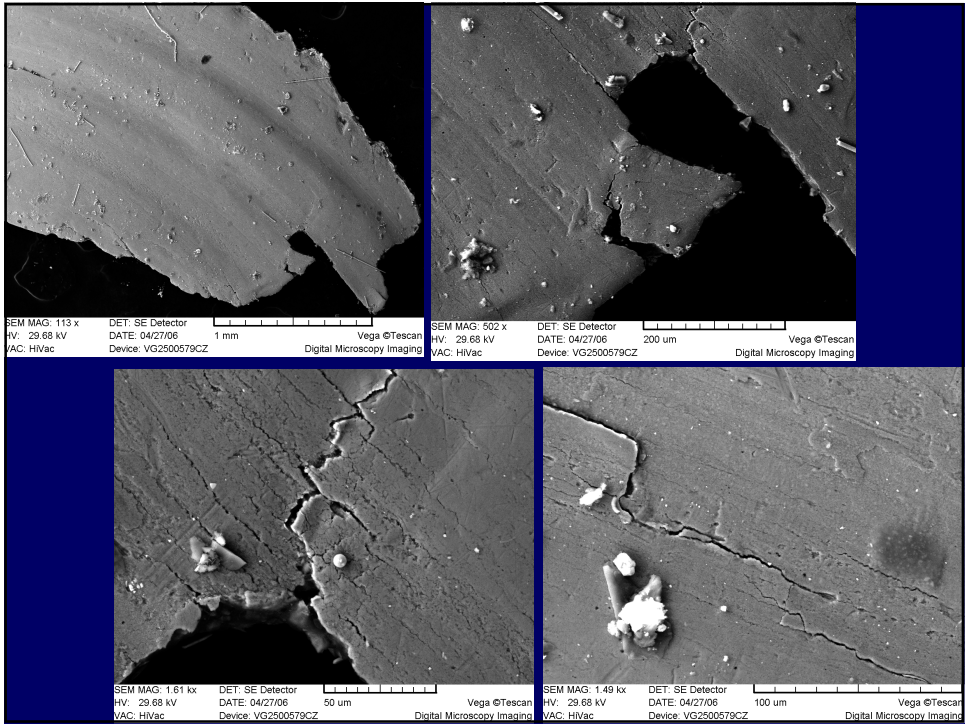
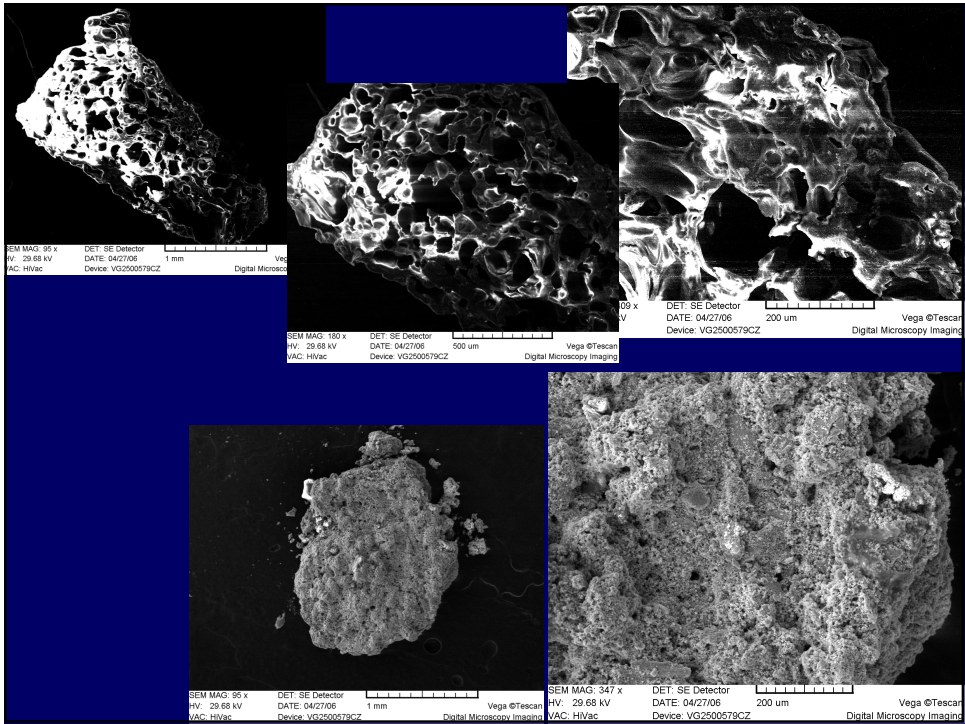
převodové ústrojí motorové jednotky řady 854 -  
trakční převodovka v motorových vozech řady  
854 nebo 850, olej OTHP3

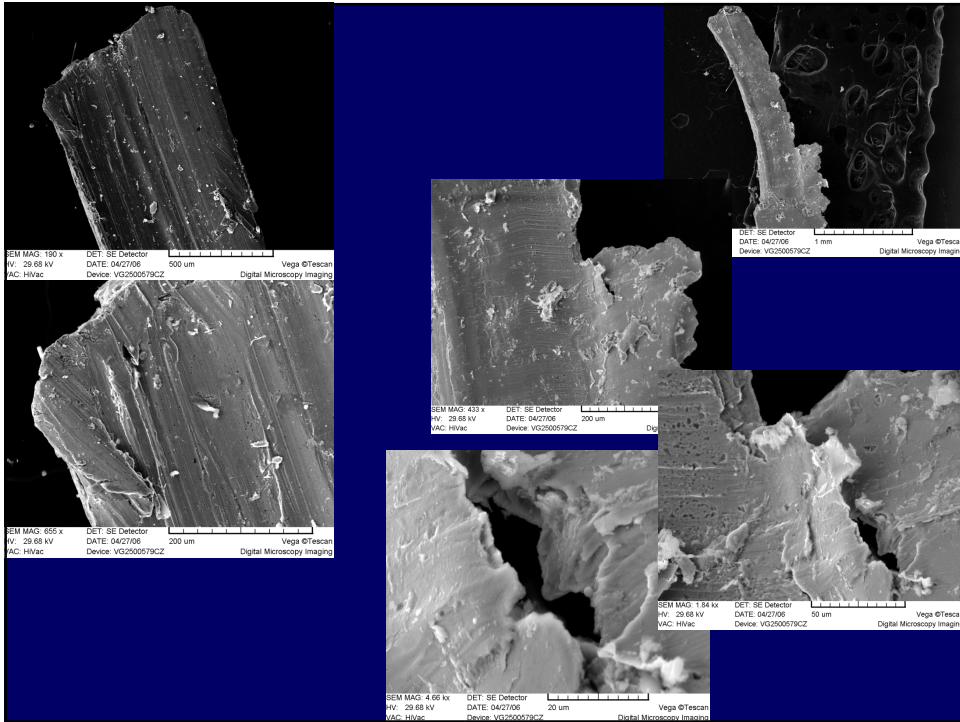
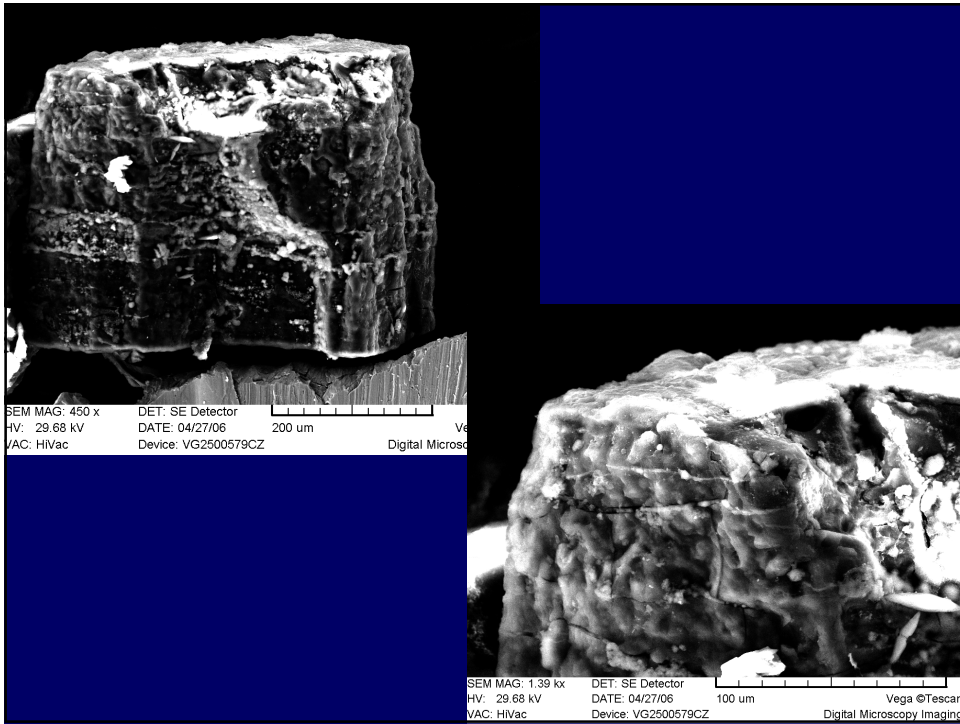
nainstalován  
přídavný filtr













## Závěr

- Instrumentální metody nacházejí v současnosti uplatnění v oblasti **analýzy maziv** pro dopravní prostředky i **analýzy částic** z nich separovaných.
- **Význam pro praxi**: informace získané prostřednictvím těchto metod je jiným způsobem možno obdržet jen obtížně či s podstatně vyššími náklady.
- V oblasti TTD má jejich uplatňování význam zejména z **ekonomického hlediska**; umožňují i současně zvyšovat **spolehlivost provozu** dopravních prostředků a snižovat **škody na životním prostředí**.
- Pro konkrétní podmínky v praxi lze výhodně uplatnit i **jednoduché zkušební metody**, které nevyžadují náročné vybavení.

Děkuji Vám za pozornost.

Kontakt:

tel.: 466 036 696

e-mail: [marie.sejkorova@upce.cz](mailto:marie.sejkorova@upce.cz)



Česká společnost pro jakost, Novotného lávka 5, 116 68 Praha 1  
Technická diagnostika a spolehlivost, Praha 22. 11. 2011

**Technická diagnostika a spolehlivost** (sborník přednášek),  
kolektiv autorů  
počet stran: 78  
1. vydání,  
rok vydání: 2011  
druh vazby: brožovaná

**ISBN 978-80-02-02352-4**