

Univerzita Pardubice
Dopravní fakulta Jana Pernera

Aplikace statistických metod v tribotechnické diagnostice
Petr Badžgoň

Bakalářská práce
2008

Univerzita Pardubice
Dopravní fakulta Jana Pernera
Katedra dopravních prostředků a diagnostiky
Akademický rok: 2007/2008

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: Petr BADŽGOŇ
Studijní program: B3709 Dopravní technologie a spoje
Studijní obor: Provozní spo-
lehlivost dopravních prostředků a infrastruktury-Ochrana
životního prostředí v dopravě
Název tématu: Aplikace statistických metod v tribotechnické diagnostice

Z á s a d y p r o v y p r a c o v á n í :

1. Student se seznámí se základy vícerozměrných statistických dat
2. Seznámí se s metodami tribotechnické diagnostiky, které se běžně v laboratořích provádějí
3. Zhodnotí současný stav řešeného problému
4. Vybere vhodnou statistickou metodu a bude ji aplikovat na matici vícerozměrných tribotechnických dat
5. Provede interpretaci výsledků

Rozsah grafických prací:

Rozsah pracovní zprávy:

Forma zpracování bakalářské práce: **tištěná**

Seznam odborné literatury:

- [1] BEČKA, J. Tribologie. 1. vyd. Praha : ČVUT, 1997. 212 s. ISBN 80-01-01621-8.
- [2] HRDLIČKA, Z. Automobilové kapaliny. 1. vyd. Praha : Grada, 1996. 119 s. ISBN 80-7169-332-4.
- [3] ŠTĚPINA, V, VESELÝ, V. Maziva v tribologii. Bratislava : VEDA, 1985. 407 s. SÚKK 1823/I-84.
- [4] JETMAR, J. Tribotechnická diagnostika automobilů. Brno. Vojenská akademie v Brně, 1993. S-572.
- [5] HEBÁK, P, HUSTOPECKÝ, J. Vícerozměrné statistické metody s aplikacemi. 1. vyd. Praha : SNTL, 1987. 452 s. ISBN 80-03-00534-5.
- [6] MELOUN, M, MILITKÝ, J, HILL, M. Počítačová analýza vícerozměrných dat v příkladech. 1. vyd. Praha : Academia, 2005. 456 s., + 1 CD. ISBN 80-200-1335-0.
- [7] STODOLA, J. Možnosti modelování a vyhodnocování degradačních procesů spalovacích motorů. Sborník přednášek 7. ročníku semináře RE-OTRIB 2001 – zjišťování kvality paliv a maziv. Velké Losiny, 22. – 25. května 2001. Ostrava: ReoTrade; Praha: VŠCHT, Ústav technologie ropy a petrochemie, 2001, str. 101. ISBN 80-7080-426-2.

Vedoucí bakalářské práce:

Ing. Marie Sejkorová

Katedra jakosti, provozní spolehlivosti a diagnostiky v dopravě

Datum zadání bakalářské práce:

18. února 2008

Termín odevzdání bakalářské práce:

26. května 2008

prof. Ing. Bohumil Culek, CSc.

děkan

L.S.

doc. Ing. Miroslav Tesař, CSc.

vedoucí katedry

Poděkování

Zejména bych chtěl poděkovat svým rodičům a blízkým za podporu při studiu na VŠ.

Dále bych chtěl poděkovat paní Ing. Marii Sejkorové za odbornou pomoc, cenné rady a podklady poskytované při zpracování bakalářské práce a prof. RNDr. Milanu Melounovi, DrSc., za seznámení s metodami vícerozměrné statistiky.

SOUHRN

Úvodní část práce se zabývá tribotechnickou diagnostikou a vybranými parametry motorových olejů, které byly sledovány. Dále jsou zde uvedeny metody exploratorní analýzy a analýzy hlavních komponent odhalující vazby a struktury v datech. V následující kapitole je provedena aplikace vícerozměrných statistických metod na zdrojovou matici tribotechnických dat.

KLÍČOVÁ SLOVA

tribotechnická diagnostika, motorové oleje, exploratorní analýza, analýza hlavních komponent

TITLE

Application of statistical methods in tribotechnical diagnostics

ABSTRACT

The first part of the thesis deals with the tribotechnical diagnostics and selected parameters of motor oils. The next part follows with the methods of exploratory data analysis and principal components analysis that disclosure relations and structures in data. The last part contains the application of multidimensional statistical methods on source tribotechnicals data matrix .

KEYWORDS

tribotechnical diagnostics, motor oils, exploratory data analysis, principal component analysis

OBSAH

ÚVOD	7
1. TEORETICKÁ ČÁST	8
1.1 Tribotechnická diagnostika.....	8
1.2 Motorové oleje.....	9
1.2.1 Viskozita oleje	9
1.2.2 Bod vzplanutí motorového oleje	11
1.2.3 Aditivace olejů.....	12
1.2.4 Kyselost a alkalita oleje.....	13
1.2.5 Nečistoty v motorovém oleji	14
1.3 Vícerozměrné statistické metody.....	16
1.3.1 Standardizace vícerozměrných dat	17
1.3.2 Exploratorní analýza dat (EDA).....	18
1.3.3 Analýza hlavních komponent (PCA).....	21
2. EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST	26
2.1 Zdrojová matice.....	26
2.2 Exploratorní analýza dat.....	26
2.2.1 Extrémy a odlehlé objekty.....	27
2.2.3 Grafické zobrazení vícerozměrných dat	29
2.3 Analýza hlavních komponent	30
2.3.1 Redukce znaků.....	30
2.3.2 Hledání vazeb a struktury ve znacích a objektech.....	34
2.4 Dílčí závěr.....	40
ZÁVĚR	42
POUŽITÁ LITERATURA	44
SEZNAM OBRÁZKŮ	46
SEZNAM TABULEK	47
SEZNAM ZKRATEK A SYMBOLŮ	48
SEZNAM PŘÍLOH	49

ÚVOD

Vývoj automobilové techniky se v posledních letech zaměřoval na zvyšování výkonu a současně na snižování rozměrů a hmotnosti motoru. Důsledkem toho je nárůst mechanického a tepelného namáhání motoru. S tímto trendem se musel přizpůsobit i vývoj motorových olejů.

Motorový olej musí v dnešní době vykazovat vysokou kvalitu, aby co nejlépe chránil a udržoval životnost motoru. Proto se během provozování oleje v motoru sledují jeho různé kvalitativní ukazatele a na základě jejich změn lze rozhodnout, zda olejová náplň je ještě schopna plnit v motoru svoji funkci, a případně posoudit technický stav motoru.

Jelikož je obtížné efektivně sledovat a vyhodnocovat stav provozovaného oleje na základě stanovení jeho mnoha parametrů, jeví se jako možné řešení aplikovat na získaná data některé ze statistických metod. Bakalářská práce se proto zabývá možností aplikace vícerozměrných statistických metod, konkrétně exploratorní analýzy a analýzy hlavních komponent na zdrojovou matici tribodiagnostických dat, kde řádky matice představují jednotlivé odběry vzorků oleje OA-M6 ADS II z velkoobjemových nákladních automobilů Tatra T3-930 provozovaných v ČSA v letech 1988 – 1990 a sloupce matice jsou sledované tribodiagnostické parametry oleje.

Metody vícerozměrné statistické analýzy nacházejí uplatnění v mnoha odvětvích, převážně v medicíně, ekonomii a sociologii. Používají se také v chemii při analyzování spekter, kde naměřená spektra obsahují vedle absorpčního pásu určité látky také pásy jiných látek, která jsou nežádoucí. Těmito statistickými metodami lze odhalit strukturu (absorpční pás látky) a šum (nežádoucí látky). V analýze hlavních komponent je značně využívána první hlavní komponenta, která slouží jako ukazatel jakosti. V oblasti tribotechniky dosud exploratorní analýza a analýza hlavních komponent nenašly významnější uplatnění.

Cílem bakalářské práce je ověřit, zda lze na zdrojovou matici vícerozměrných tribodiagnostických dat aplikovat některé ze statistických metod, kterými by byla odhalena struktura a vzájemné vazby, které jsou v datech ukryty.

1. TEORETICKÁ ČÁST

1.1 Tribotechnická diagnostika

Tribotechnická diagnostika (TTD) umožňuje pomocí různých metod sledovat průběh opotřebení olejové náplně dopravních prostředků a strojních zařízení. Jedná se o bezdemontážní metodu technické diagnostiky, která umožňuje sledovat stav motorového oleje i motoru a vyhodnocovat příčinu a lokalizaci poruchy.

Tribotechnika je jedním z oborů tribologie využívající poznatky z výzkumu tření, opotřebení a mazání za účelem dosažení optimálního průběhu třecího režimu.

Tribologie je vědní obor, který se zabývá vzájemným působením povrchů tuhých těles při jejich pohybu.

Uplatňováním TTD lze dosáhnout např. snížení spotřeby energie k pohonu automobilu, zvýšení jeho životnosti nebo také snížení nákladů na jeho údržbu v případě, je-li diagnostika vhodně naplánována a průběžně aplikována. Nejběžněji sledovanými parametry oleje jsou: kinematická viskozita, dynamická a HTHS viskozita, bod vzplanutí, číslo kyselosti, pění, koroze, obsah vody atd.

Motorový olej po určité provozní době obsahuje příměsi, kterými jsou především otěrové částice. Vhodnou metodou lze stanovit množství i tvar těchto nečistot, a tak sledovat mechanické změny v motoru. Z výsledného množství, tvaru, intenzity nárůstu, velikosti a materiálového složení lze vyvodit příčinu a lokalizovat poruchu bez potřeby demontování motoru.

Sledování provozní degradace motorového oleje tribotechnickou diagnostikou se provádí pomocí různých metod, které lze rozdělit do třech základních skupin:

- **Jednoduché provozní metody** - jedná se o rychlometody, které jsou vyhodnocovány pomocí soupravy *TRIBO - I*. Souprava stanovuje viskozitu, obsah vody, celkové znečištění a detergentně - disperzní vlastnosti oleje v provozních podmínkách.
- **Klasické chemické metody** - jedná se o analytické metody, které jsou normovány státní normou. Těmito normovanými metodami lze stanovit např. viskozitu, bod vzplanutí, celkové číslo alkality TBN, celkové číslo kyselosti TAN aj..
- **Speciální tribodiagnostické metody** - jedná se o metody filtrační, využívající odstředování vzorku oleje a metody optické (infračervená spektrometrie, ferrografie, atomová emisní a absorpční spektrální analýza a polarografická analýza).

1.2 Motorové oleje

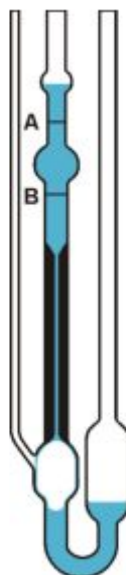
Motorový olej musí v současnosti splňovat mnoho funkcí, aby byla zachována správná činnost a životnost motoru. Z tohoto důvodu se do oleje přidávají různé přísady, které musí plnit svůj účel co nejdéle. Proto je třeba sledovat nejzákladnější fyzikálně-chemické parametry olejových náplní.

1.2.1 Viskozita oleje

Viskozita je měřítkem tekutosti kapalin. Oleje, které mají nižší viskozitu jsou tekutější a mají menší odpor proti proudění. Naproti tomu oleje s vyšší viskozitou jsou hustější, mají větší odpor proti proudění. Hustější oleje proto pomaleji proudí a mají vyšší odpor proti vzájemnému pohybu interagujících částí motoru.

Měření viskozity

Měření viskozity olejů probíhá pomocí *viskozimetru* při teplotách 40 °C a 100 °C (viz Obr. 1). Princip spočívá v měření času, kdy se zjišťuje doba, za kterou projde hladina oleje mezi dvěma ryskami skleněné kapiláry. Viskozimetr je při měření ponořen do vyhřívané lázně se stálou teplotou. **Kinematická viskozita (KV)** se získá vynásobením změřeného času konstantou, kterou má každý výrobcem kalibrovaný viskozimetr.



Obr. 1 Schéma kapilárního viskozimetru měřícího kinematickou viskozitu ve svislé poloze [17]

V minulosti byla kinematická viskozita udávaná v jednotkách *centistokesy* (cSt), v současné době se používá jednotka $\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$, která je odvozená ze vztahu

$$v = \frac{\eta}{\rho}, \quad (1)$$

kde v označuje kinematickou viskozitu, η je dynamická viskozita [Pa.s] a ρ značí hustotu kapaliny [$\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$].

Vedle kinematické viskozity rozlišujeme ještě *dynamickou viskozitu*, která charakterizuje míru vnitřního tření v kapalině. Používá se pro charakterizaci nízkoteplotních vlastností olejů a *HTHS viskozity*, což je naopak charakterizace vysokoteplotních vlastností olejů. Převrácenou hodnotou dynamické viskozity obdržíme veličinu, která se nazývá *tekutost*.

Viskozitní index

Je bezrozměrová veličina udávající vliv teploty na viskozitu oleje v porovnání s dvěma řadami standardních olejů:

- oleje z mexické ropy a
- oleje z pensylvánské ropy,

kteří mají při teplotě 98,89 °C (210 °F) stejnou viskozitu jako zkušební olej. Oleje s vyšším viskozitním indexem mají příznivější průběh viskozitně-teplotní závislosti než oleje s nižším viskozitním indexem [8]. Čím méně se mění viskozita s teplotou, tím je viskozitní index zkušební oleje vyšší.

Viskozitní třídy

Na základě viskozity se motorové oleje zařazují do jednotlivých viskozitních tříd podle klasifikace SAE, které určují vhodnost použití oleje vzhledem k teplotním podmínkám. Klasifikace je uvedena v *Tab. 1*.

Tab. 1 Viskozitní klasifikace SAE [7]

Viskozitní třída SAE	Viskozita ve studeném stavu (zimní číslo)		Viskozita při 100°C (letní číslo)		HTHS 150°C
	max. viskozita [mPa.s] (CCS viskozita)	*hraniční čerpací teplota [°C] (mezní čerpatelnost)	minimální viskozita [mm ² /s]	maximální viskozita [mm ² /s]	minimální viskozita [mPa.s]
0W	6200 při -35°C	-40	3,8	-	-
5W	6600 při -30°C	-35	3,8	-	-
10W	7000 při -25°C	-30	4,1	-	-
15W	7000 při -20°C	-25	5,6	-	-

20W	9500 při -15°C	-20	5,6	-	-
25W	13000 při -10°C	-15	9,3	-	-
20	-	-	5,6	< 9,3	2,6
30	-	-	9,3	< 12,5	2,9
40	-	-	12,5	< 16,3	2,9**
40	-	-	12,5	< 16,3	3,7***
50	-	-	16,3	< 21,9	3,7
60	-	-	21,9	< 26,1	3,7

Poznámka:

* - teplota, při níž je viskozita 60000 [mPa.s]

** - platí pro 0W40, 5W40, 10W40

*** - platí pro 15W40, 20W40, 25W40, 40

Změny kinematické viskozity při provozu motorového oleje

Během provozu olejové náplně může docházet ke

- a) **zvyšování viskozity** - je zapříčiněno termickou a oxidační degradací oleje a navíc u vznětových motorů nadměrným množstvím sazí,
- b) **snížování viskozity** - jehož důsledkem je nadměrný obsah paliva v motorovém oleji. Snížování viskozity je způsobeno také stříhovou nestabilitou modifikátorů viskozity (jedná se o polymerní látky zvyšující viskozitní index).

Snížení či zvýšení viskozity je v praxi povoleno o $\pm 20\%$.

Vlivem nízké viskozity se ztenčuje mazací film a dochází k vyššímu opotřebením nebo i zadírání třecích částí.

Vyšší viskozita má za následek větší opotřebením třecích povrchů, které je způsobeno příliš silným mazacím filmem.

1.2.2 Bod vzplanutí motorového oleje

Bod vzplanutí (BV) motorového oleje se nejčastěji stanovuje za účelem zjištění obsahu paliva, případně vody v oleji. Je to nejnižší teplota, při které vlivem zahřívání přichází nad hladinu oleje takové množství par, které se vznítí. Jedná se pouze o záblesk, neboť plamen okamžitě samovolně zhasne. Palivo a voda obsažené v motorovém oleji mají za následek snížení bodu vzplanutí.

Pronikání paliva do motorového oleje

Palivo se do olejové náplně může dostat dvěma způsoby:

- **spalinami z prostoru válců** - v tomto případě spaliny pronikají přirozenou cestou kolem pístních kroužků do klikové skříně a promíchávají se s motorovým olejem.
- **závadou na motoru** - jedná se o závadu na vstřikování paliva, kdy dochází k nedokonalému rozprašení paliva vlivem ucpaných nebo zakarbonovaných trysek. Následně dochází k poškození těsnících pístních kroužků.

Změny bodu vzplanutí při provozu motorového oleje

Motorový olej má provozní teplotu okolo 100 °C. Z tohoto důvodu je třeba změnu jeho bodu vzplanutí rozlišit podle druhu motoru:

- **zážehové motory** - nejtěžší složky benzínu začínají vařit již při 40 °C, střední složky při 110 °C a nejtěžší složky benzínu mají bod varu okolo 210 °C. Z toho vyplývá, že objemově se při provozní teplotě oleje vypaří asi polovina celého množství benzínu a druhá polovina s vyšším bodem varu v oleji zůstane. Odhaduje se, že klesne-li bod vzplanutí oleje pod 140 °C, jedná se již o nevyhovující olej se zhoršenými vlastnostmi.
- **vznětové motory** - nafta začíná vařit při 180 °C, střední hodnota bodu varu je 270 °C a destilační rozmezí končí při 360 °C. Při provozní teplotě oleje se s naftou téměř nic neděje a dochází pouze k jejímu hromadění v motorovém oleji. Bod vzplanutí oleje menší než 180 °C signalizuje již nadměrné množství nafty obsažené v oleji.

Palivo, které je obsaženo v motorovém oleji, má za následek také snížení viskozity. Olej poté vytváří tenký mazací film, který může způsobit zvýšené opotřebení motoru.

1.2.3 Aditivace olejů

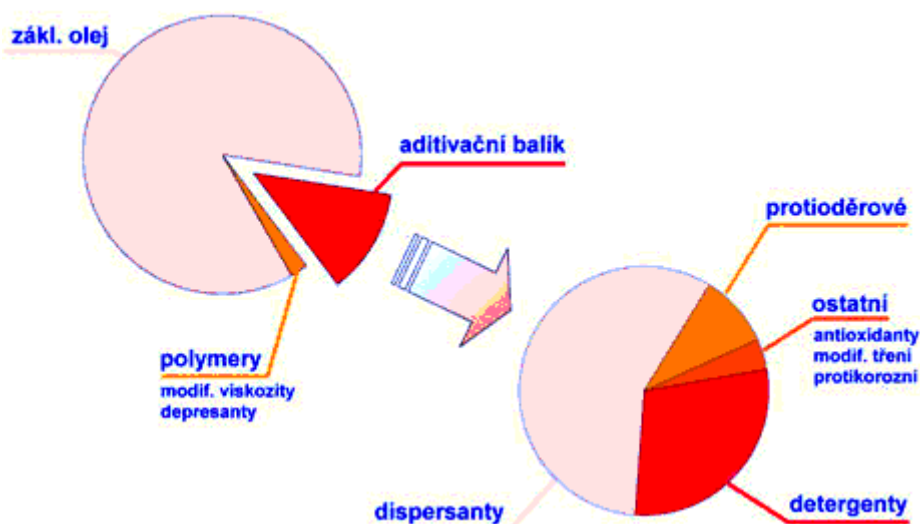
Motorový olej je tvořen z velké části *základovým olejem*, ve kterém jsou rozpuštěny *polymerní a pevné modifikátory viskozity*, jež tvoří asi 1 - 7 % hmotnosti oleje.

Zbytek motorového oleje, který činí přibližně 20 % hmotnosti, tvoří výkonový *aditivační balík* (viz Obr. 2).

Aditivační balík obsahuje:

- *Detergenty* - neustále čistí kovové povrchy motoru. Uvolňují různé usazeniny, kaly a karbonové povlaky z povrchu mazaných částí. Jsou nositeli *alkalické rezervy*, která má za úkol neutralizovat kyselé zplodiny spalování paliva, které se dostanou do oleje, nebo kyselé produkty oxidační degradace oleje.

- *Disperzanty* - zabraňují shlukování a zvětšování rozměru nečistot a jejich opětovnému usazování. Tyto přísady obalí každou nečistotu a udrží ji ve vznosu.
- *Protioděrové přísady* - zlepšují vlastnosti oleje při mezním tření. Významně jsou ovlivněny přítomností vody v oleji.
- *Antioxidanty* - zpomalují oxidační a nitrační reakce v motorovém oleji. Nitrace je následek působení oxidů dusíku na olej.
- *Protikoroziční přísady (inhibitory koroze)* - oddělují kovové povrchy od vody, která je nepříznivě ovlivňuje.
- *Modifikátory tření* - vytvářejí na kovovém povrchu vrstvu, která zabraňuje přímému kontaktu třecích ploch.



Obr. 2 Složení motorových olejů [4]

1.2.4 Kyselost a alkalita oleje

Alkalická rezerva a kyselost oleje hrají důležitou roli v kvalitě motorových olejů. Kyselé látky, které pocházejí z různých *aditiv*, obsahuje již nový olej. Aditiva mají důležité vlastnosti zlepšující kvalitu oleje, proto jejich mírná kyselost nevádí. Ostatní kyselé látky pochází z paliva nebo z oxidu dusíků, který ve styku s vodou vytváří velmi silné kyseliny, a z bioetanolu, jehož oxidačním produktem při spalování je kyselina octová. Bioetanol se bude muset v EU povinně přimíchávat do benzínu.

Celkové číslo alkality (TBN)

Alkalická rezerva oleje se vyjadřuje pomocí *celkového čísla alkality* (Total Base Number, TBN). Čím je hodnota TBN větší, tím déle dokáže olej neutralizovat kyselé látky, které jsou v něm obsažené.

Alkalická rezerva motorového oleje vyjádřená číslem TBN chrání motor před korozi. Proto se doporučuje, aby hodnota TBN neklesla pod polovinu původní hodnoty.

Celkové číslo kyselosti (TAN)

Podobně jako alkalitu oleje lze vyjádřit i kyselost oleje hodnotou TAN (Total Acid Number), nebo-li *celkové číslo kyselosti*. TAN vyjadřuje množství kyselých látek v oleji.

Kyselé látky v motorovém oleji mohou způsobit jeho korozi, proto je olej tvořen alkalickou rezervou neutralizující tyto látky.

Během provozu olejové náplně dochází k nárůstu TAN a současně k poklesu TBN. Je tedy důležité, aby hodnota TAN byla po celou dobu provozu oleje nižší než hodnota TBN. Některé mírnější požadavky dovolují nárůst TAN až na 80 % hodnoty TBN čerstvého oleje.

Měření TAN a TBN

Měření celkového čísla kyselosti a celkového čísla alkality může probíhat dvojím způsobem:

- *titračně* - pro stanovení např. TAN je ke vzorku oleje rozpuštěného v neutrálním rozpouštědle po kapkách přidáván roztok hydroxidu draselného (KOH) a sleduje se okamžik, kdy olej přestane vykazovat kyselé vlastnosti a převáží naopak alkalické vlastnosti díky přidanému hydroxidu [3].
- *potenciometrickou titrací* - moderní metoda založená na detekci elektrochemických vlastností oleje.

1.2.5 Nečistoty v motorovém oleji

Nečistotami v motorovém oleji jsou např. saze, prach, otěr, a produkty chemické degradace samotného oleje. Nečistoty zhoršují vlastnosti oleje, ale i životnost mazaných částí.

Do oleje se dostávají ze vzduchu, z paliva a zdrojem jsou i otěrové částice běžné velikosti od desetin až po několik mikrometrů. Olejové filtry zachycují částice okolo 10 μm [5].

Vybrané parametry sledovaných nečistot v oleji:

- **koncentrace železa, mědi a olova (Fe, Pb, Cu)** - železo tvoří hlavní součást všech důležitých skupin třecích dvojic v mazací soustavě. Měď a olovo tvoří hlavní součást třecích prvků ojnicí skupiny. Měď je dále využívána jako podpovrchová vrstva chromovaných železných materiálů, zejména u klecí ložisek. Obsah železa vypovídá o zvýšeném opotřebení pístové skupiny. Cu a Pb charakterizují zvýšené opotřebení ojnicí skupiny.

- **Conradsonův karbonizační zbytek (CCT)** - popisuje náchylnost oleje k tvorbě uhlíkatých zbytků při vysokých teplotách. Vysoká hodnota CCT během provozu oleje se projevuje zvýšenou tvorbou uhlíkatých úsad, které zanášejí drážky pístních kroužků a mohou způsobit zapečení pístu ve válci motoru [16]. Parametr CCT se používá také k vystižení nárůstu produktů termooxidačních reakcí oleje.
- **celkové znečištění (CZ)** - charakterizuje celkovou čistotu oleje s ohledem na jeho degradaci a znečištění kovovým oděrem. Celkové znečištění oleje představuje vlastně jeho permeabilitu.

Stanovení množství nečistot

Stanovení množství nečistot je důležité k vyhodnocení stavu opotřebení motoru. Existuje řada metod, které diagnostikují nečistoty obsažené v motorovém oleji:

- **kapkový test** - vyhodnocuje vzhled kapky oleje na filtračním papíře (viz. Obr. 3). Kapka se nanese na chromatografický papír a sleduje se její tmavost, okraje skvrny a rozsah vsáknutí. Hodnocení se provádí porovnáním se vzorovou stupnicí. Jelikož jsou v oleji obsaženy detergenty a disperzanty, je tento test v dnešní době nespolehlivý.



Obr. 3 Kapkový test [5]

- **infračervená spektrometrie** - stanoví celkové nečistoty v motorovém oleji včetně sazí. Saze a další mechanické nečistoty jsou tmavé a nepropouštějí světlo, proto způsobují při měření infračerveného spektra zvýšení tzv. základní linie, která se měří při 2000 cm^{-1} . Toto zvýšení základní linie je tím větší, čím vyšší je obsah sazí a dalších nečistot [5].
- **ferrografická analýza** - spočívá v magnetické separaci cizorodých částic obsažených ve vzorku oleje. Pomocí této analýzy lze posoudit třecí a mazací podmínky a stav opotřebení motoru na základě určení tvaru, velikosti a barvy otěrových částic.
- **atomová emisní spektrometrie AES** - spektrální metoda, která vybudí, detekuje a vyhodnotí emisní spektrum vzorku oleje. Určuje koncentraci otěrových kovů (Fe, Cu, Pb), které přispívají k vyššímu opotřebení mazaných částí a mohou vést až k ucpaní olejového filtru. Pomocí AES lze stanovit také aditiva a nečistoty.

- **atomová absorpční spektrometrie AAS** - spektrometrická analytická metoda založená na principu absorpce záření volnými atomy v plynném stavu, které vznikají v atomizátorech.
- **Conradsonův karbonizační zbytek (CCT)** - stanovuje se zahřátím vzorku oleje na teplotu 500 °C v inertní atmosféře dusíku. U olejů vznětových motorů je nárůst množství karbonizačního zbytku způsoben především sazemi, příp. i jinými nečistotami. U olejů ze zážehových motorů způsobují nárůst karbonizačního zbytku hlavně produkty oxidační a termické degradace oleje [5].

Vliv nečistot na motorový olej

Nečistoty v motorovém oleji přispívají ke zvýšení viskozity a způsobují vyčerpání disperzantních přísad. Vlivem nečistot různých tvarů a velikostí dochází ke zvýšenému opotřebením motoru. Mohou způsobit také ucpání olejového filtru a porušení dodávek oleje do systému.

1.3 Vícerozměrné statistické metody

Vícerozměrné statistické metody lze rozdělit do dvou základních skupin podle účelu analýzy. První skupina obsahuje techniky k určení vzájemných vazeb ve znacích (proměnných) a objektech. Druhá skupina metod potom slouží ke klasifikaci objektů.

Určení vzájemných vazeb

Techniky popisující vzájemné vazby se dělí podle toho, zda se vyšetřují znaky nebo objekty. Výběr metody závisí také na vstupních datech, které mohou být metrické nebo nemetrické škály.

Určení struktury a vazby ve znacích (metrická škála):

- analýza hlavních komponent (PCA)
- faktorová analýza (FA)
- shluková analýza (CLU)

Určení struktury a vazby v objektech (metrická škála):

- shluková analýza (CLU)

Určení struktury a vazby v objektech (metrická i nemetrická škála):

- vícerozměrné škálování (MDS)

Určení struktury a vazby v objektech (nemetrická škála)

- korespondenční analýza (CA)

1.3.1 Standardizace vícerozměrných dat

Standardizace dat se provádí za účelem odstranění závislosti na jednotkách, na parametru polohy a v případě, pokud vykazuje některý ze znaků značně velký rozptyl oproti ostatním. Znaky nebo objekty mají po standardizaci nulovou střední hodnotu a rozptyl roven 1.

U škálovacích technik, které budou následovně uvedeny, značí y_{ij} i -tý objekt upravený standardizací čili j -tý škálovaný znak, který odpovídá původnímu prvku x_{ij} .

Přehled nejběžnějších škálovacích technik:

- *Sloupcové centrování*

$$y_{ij} = x_{ij} - \bar{x}_j, \quad (2)$$

kde $\bar{x}_j = \sum_{i=1}^n \frac{x_{ij}}{n}$ je průměr prvků j -tého sloupce.

- *Sloupcová standardizace*

$$y_{ij} = \frac{x_{ij}}{s_j}, \quad (3)$$

kde $s_j = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_{ij} - \bar{x}_j)^2}{n-1}}$ je směrodatná odchylka vypočítaná z prvků j -tého sloupce.

- *Autoškálování*

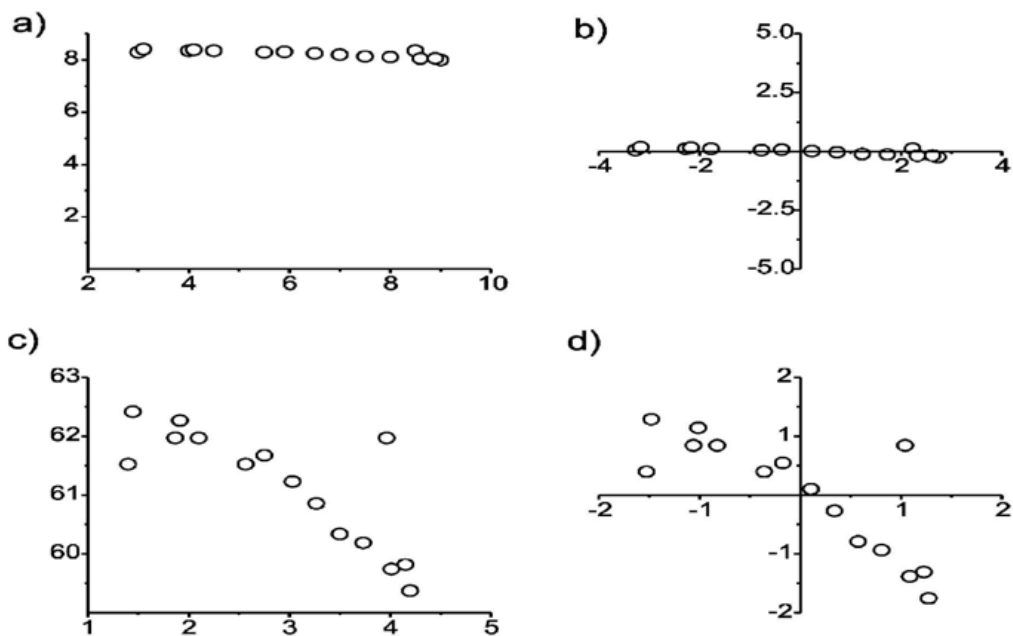
$$y_{ij} = \frac{x_{ij} - \bar{x}_j}{s_j}. \quad (4)$$

Autoškálování je kombinací sloupcového centrování a sloupcové standardizace. Pro velké výběry má tvar

$$y_{ij} = \frac{x_{ij} - \mu_j}{\sigma_j}. \quad (5)$$

- *Škálování sloupcovým rozsahem*

$$y_{ij} = \frac{x_{ij} - \min_j x_{ij}}{\max_j x_{ij} - \min_j x_{ij}}. \quad (6)$$



Obr. 4 Znáornění efektu škálování: a) původní data, b) sloupcové centrování, c) sloupcová standardizace, d) autoškálování [11]

1.3.2 Exploratorní analýza dat (EDA)

Exploratorní analýza dat (exploratory data analysis, EDA) slouží k prvnímu seznámení se strukturou objektů. Jedná se o průzkumovou analýzu vícerozměrných dat, jejímž účelem je odhalení vybočujících bodů, indikování struktury v datech, popř. testování normality. Na základě získaných informací může být před vlastní statistickou analýzou provedena korekce výběru.

Průzkumová analýza v první části seznamuje s popisnými charakteristikami vícerozměrných dat a ve druhé části pomocí grafických diagnostik odhaluje podobnost mezi objekty.

Popisné charakteristiky vícerozměrných dat

Vícerozměrné normální rozdělení je určeno vektorem středních hodnot μ a kovarianční maticí C . Náhodný výběr charakterizovaný maticí X s vektorem středních hodnot μ a kovarianční maticí C je značen symbolem $X \sim N(\mu, C)$.

Z vícerozměrného výběru objektů velikosti n , definovaného n -ticí m -rozměrných vektorů $\mathbf{x}_i = (x_{i1}, \dots, x_{im})^T$, $i = 1, \dots, n$, je možné určit [10, 11, 12]:

vektor odhadu středních hodnot $\hat{\mu}$

$$\hat{\mu} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \mathbf{x}_i, \quad (7)$$

rozptyl s^2 pro jeden znak x

$$s^2 = \frac{1}{(n-1)} \sum_{i=1}^n (x_i - \hat{\mu})^2, \quad (8)$$

je základní mírou rozptýlení znaků. Aby ji bylo možné vyjádřit ve stejných jednotkách jako jsou měřené veličiny, používá se *směrodatná odchylka* s , která je druhou odmocninou z rozptylu. Rozptyl také představuje diagonální prvky kovarianční matice.

kovarianční matice \mathbf{C}

$$\mathbf{C}(x_l, x_k) = \frac{1}{(n-1)} \sum_{i=1}^n (x_{il} - \bar{x}_l)(x_{ik} - \bar{x}_k), \quad (9)$$

Pro vektor *výběrových středních hodnot* platí

$$E(\hat{\mu}) = \mu \quad \text{a} \quad D(\hat{\mu}) = \frac{1}{n} \mathbf{C}, \quad (10)$$

výběrová kovarianční matice \mathbf{S}^0

$$\mathbf{S}^0 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \hat{\mu})(x_i - \hat{\mu})^T, \quad (11)$$

a jde o vychýlený odhad kovarianční matice \mathbf{C}

$$E(\mathbf{S}^0) = \frac{(n-1)}{n} \mathbf{C}, \quad (12)$$

výběrová korigovaná kovarianční matice \mathbf{S} (nevychýlený odhad kovarianční matice \mathbf{C})

$$\mathbf{S} = \frac{n}{(n-1)} \mathbf{S}^0, \quad (13)$$

Odhady $\hat{\mu}$ a \mathbf{S}^0 jsou maximálně věrohodné, pokud náhodný výběr, charakterizovaný maticí \mathbf{X} pochází z normálního rozdělení $N(\mu, \mathbf{C})$.

Je-li kovariance mezi x_1 a x_2 pozitivní, značí to jejich přímou vazbu, nebo-li při změně x_1 se ve stejném smyslu změní i x_2 . Negativní kovariance znamená nepřímou vazbu a tedy při změně x_1 se v opačném smyslu změní x_2 . Je-li kovariance mezi x_1 a x_2 nulová, není mezi nimi žádná lineární závislost (nekorelovanost).

Normovanou verzí kovarianční matice je *korelační matice*, kde místo kovariancí jsou *Pearsonové párové korelační koeficienty* a hlavní diagonála obsahuje hodnoty 1.

Pearsonův korelační koeficient je odhadován dle vztahu

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n (x_{1i} - \bar{x}_1)(x_{2i} - \bar{x}_2)}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_{1i} - \bar{x}_1)^2 \sum_{i=1}^n (x_{2i} - \bar{x}_2)^2}}. \quad (14)$$

Koeficient determinace popisuje podíl celkové rozptylu, který je možné popsat tímto lineárním vztahem a vypočítá se podle následujícího vztahu

$$D = r^2, \quad (15)$$

a jeho vynásobením hodnotou 100 se obdrží procentuální vystižení korelace.

Korelace rovnající se 1 značí pozitivní lineární vztah mezi dvěma proměnnými, korelace rovná -1 značí negativní lineární vztah a nulová korelace znamená, že mezi dvěma proměnnými není žádný lineární vztah.

Zobrazení vícerozměrných dat

Pro zobrazení průzkumové analýzy vícerozměrných dat se používá různých grafických diagnostik umožňujících grafické zobrazení ve dvourozměrném, popř. třírozměrném souřadnicovém systému. Diagnostiky se rozdělují do dvou základních skupin, kterými jsou *zobecněné rozptylové diagramy* (maticový graf) a *symbolové grafy* (profily, polygony, tváře, křivky a stromy).

a) zobecněné rozptylové grafy

Představují závislost mezi dvěma složkami vektorů, vyneseny na osu x a y . Z rozptylového grafu lze vyčíst vybočující body, struktury v datech a míru závislosti mezi těmito složkami.

Složky vektorů se uspořádají do pole velikosti $(m - 1)(m - 1)$, kde (j, k) -tý rozptylový graf představuje závislosti složky $x_{i,j+1}$ na $x_{i,k}$.

Jelikož je graf symetrický podle hlavní diagonály, postačuje znázornění pouze $(m - 1) m/2$ grafů. Nejpoužívanějším rozptylovým grafem je *maticový graf*, který je grafickou podobou korelační matice.

b) symbolové grafy

Jednotlivé znaky jsou zobrazeny do geometrických tvarů nebo symbolů v závislosti na jejich hodnotách. Každému objektu potom odpovídá určitý obrazec a vizuálně se posuzují rozdíly a podobnosti mezi objekty.

Polygony - každá složka x_{ij} vektoru \mathbf{x}_i odpovídá délce paprsku vycházejícího z jednoho středu. Délka j -tého paprsku x_{ij} musí být kladná, proto se provádí lineární transformace do intervalu $[a, 1]$, kde a je zvolená spodní mez [10, 11]. Transformace je vyjádřena vztahem

$$x_{ij}^* = \frac{(1 - a)(x_{ij} - \min_i x_{ij})}{\max_i x_{ij} - \min_i x_{ij}} + a, \quad (16)$$

kde $\min x_{ij}$ je minimální a $\max x_{ij}$ maximální hodnota j -té složky vektoru \mathbf{x} přes všechny objekty $\mathbf{x}_i, i = 1, \dots, n$. Úhel $\alpha_j, j = 1, \dots, m$, který určuje směry paprsků, je dán vztahem

$$\alpha_j = \frac{2\pi(j-1)}{m}. \quad (17)$$

Maximální délka paprsku je R , potom polygon pro bod \mathbf{x}_i je spojnicí m bodů p_{ij} o souřadnicích

$$p_{ij} = (x_{ij}R \cos(\alpha_j), x_{ij}R \sin(\alpha_j)). \quad (18)$$

1.3.3 Analýza hlavních komponent (PCA)

Analýza hlavních komponent (principal component analysis, PCA) patří mezi nejvyužívanější vícerozměrné statistické analýzy. Mezi zakladatele této metody patří Pearson, kterým byla zavedena již v roce 1901. O 32 let později ji opět a nezávisle na Pearsonovi zavedl Hotelling. Analýza je určena k hledání struktury a vazby ve znacích, ale také mezi objekty, přičemž ji lze aplikovat na vstupní data metrické škály.

Podstata metody PCA

Metoda hlavních komponent slouží především k jednoduššímu popisu skupiny několika znaků, které jsou vzájemně korelované. Metoda spočívá v lineární transformaci původních znaků $\mathbf{x} = [x_1, x_2, \dots, x_m]$ do menšího počtu *latentních proměnných* $y_j, j = 1, \dots, m$, které již nejsou vzájemně korelované a tvoří nový souřadnicový systém. Tyto vzájemně ortogonální proměnné se v PCA nazývají *hlavní komponenty*.

Vlastnosti hlavních komponent (latentních proměnných):

- jsou lineárními kombinacemi původních znaků,
- korelační koeficienty mezi nimi se rovnají 0,
- každá je charakterizována mírou **variability** nebo-li **rozptylem**.

Hlavní komponenty jsou natočeny do směrů tak, aby popisovaly *maximální variabilitu* (rozptyl) zdrojové matice dat a přitom *minimalizovaly* jejich vzdálenosti od objektů. Předpokládá se, že nalezené směry maximálního rozptylu souvisí se skrytými jevy v matici zdrojových dat. Jsou seřazeny sestupně dle klesajícího rozptylu.

- První hlavní komponenta vystihuje největší část rozptylu dat, a proto popisuje nejvíce informací.

- Druhá hlavní komponenta poté pokrývá největší část rozptylu, který není obsažen v první hlavní komponentě atd.
- Poslední hlavní komponenta obsahuje nejméně informace.

Jednodušší popsání skupiny znaků se docílí užitím několika prvních hlavních komponent, čímž se sníží dimenze úlohy a názorně se zobrazí vícerozměrná data v projekci do roviny nebo prostoru. Ostatní nevyužití hlavní komponenty, obsahující příliš malé množství informace, neboť jejich rozptyl je malý, se vypustí.

Z tohoto důvodu je cílem rozložení zdrojové matice dat na *matici strukturní* a *matici šumovou*.

Princip metody PCA

Je dána matice dat X ($n \times m$) obsahující n objektů a m znaků, která může být zobrazena v m -rozměrném eukleidovském prostoru. Osy znaků jsou vzájemně ortogonální mající stejný počátek, ale s rozdílnými měrnými jednotkami.

Cílem metody PCA je převedení původních znaků $\mathbf{x} = [x_1, x_2, \dots, x_m]$ do menšího počtu latentních proměnných (hlavních komponent) $y_j, j = 1, \dots, m$, které popisují téměř celou proměnlivost dat a jsou vzájemně ortogonální (nekorelované) se společným počátkem. Nové latentní proměnné je třeba pojmenovat a vysvětlit jejich vztahy k původním znakům. Počet využitých hlavních komponent k potom představuje *model hlavních komponent PCA*.

Určení počtu hlavních komponent

Hlavní komponenty jsou seřazeny sestupně s klesajícím rozptylem, vyjádřeným vlastními čísly $\lambda_1 \geq \lambda_2 \geq \lambda_m$. K volbě počtu k využitých hlavních komponent se mohou použít následující pravidla:

- a)** výběr k hlavních komponent objasňující procento P variability zdrojové matice dat (obvykle se zadává $P = 70$ až 90 %). Pro k tedy platí

$$100 \frac{\sum_{i=1}^k \lambda_i}{\sum_{i=1}^m \lambda_i} \geq P. \quad (19)$$

- b)** výběr hlavních komponent podle Kaiserova kritéria zahrnuje do modelu takové latentní proměnné, jejichž vlastní čísla $\lambda_m \geq 1$ a zanedbává ty, které mají vlastní čísla menší než 1.

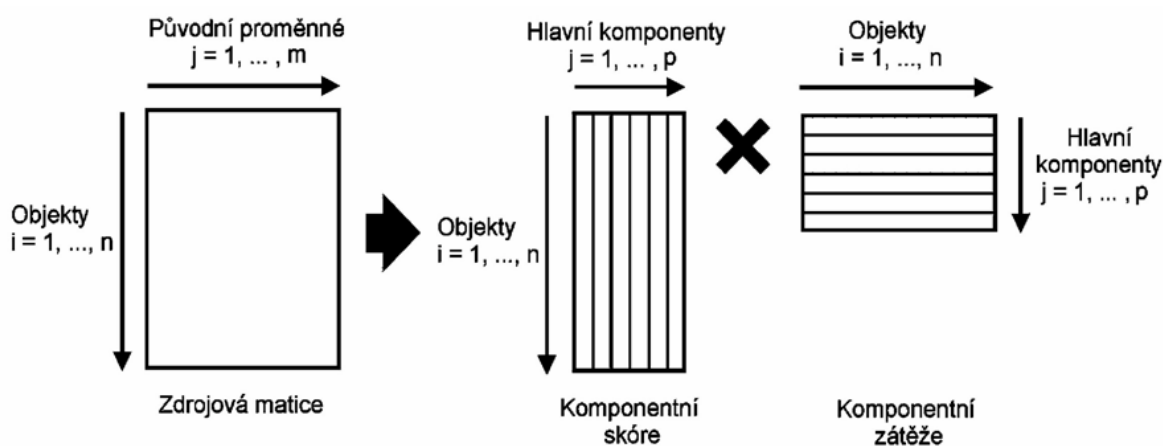
- c) na základě *Cattelova indexového grafu úpatí vlastních čísel* (Scree Plot), který je sloupcovým diagramem vlastních čísel $\lambda_1 \geq \lambda_2 \geq \lambda_m$, se určí zlomové místo mezi svislou stěnou a vodorovným dnem. Nepotřebné hlavní komponenty poté představují vodorovné dno.

Rozklad zdrojové matice X

Zdrojová matice dat X se rozloží na hlavní komponenty a zbývající komponenty

$$X = TP^T + E = t_1 p_1^T + t_2 p_2^T + \dots + t_A p_A^T + E = \text{struktura dat} + \text{šum}. \quad (20)$$

kde A je index hlavní komponenty, T je matice *komponentního skóre*, P^T je transponovaná matice *komponentních vah* a E značí matici *reziduí*. V modelu PCA se místo X dále využívá součinu TP^T a tím se oddělí šum E od struktury dat (viz Obr. 5).



Obr. 5 Schéma maticových výpočtů modelu hlavních komponent [10]

Komponentní váhy

- komponentní váhy (zátěže) vyjadřují vztah mezi původními znaky zdrojové matice X a hlavními komponentami PC.
- každá hlavní komponenta je lineární kombinací všech m vektorů v prostoru znaků, tj. jednotkové vektory podél každé osy původního znaku v m -rozměrném prostoru [11].
- jednotlivé PC obsahují vektor koeficientů p_a , kde a je index hlavní komponenty. Tyto koeficienty se nazývají *komponentní váhy*, které v případě všech hlavních komponent tvoří matici *komponentních vah* P .

Komponentní skóre

- komponentní skóre vyjadřuje souřadnice objektů v prostoru hlavních komponent.

- každý objekt obsahuje vektor koeficientů nazvaných *komponentní skóre* t_a , kde a je index hlavní komponenty. Všechna komponentní skóre objektů tvoří matici komponentního skóre T .
- platí pravidlo pro zobrazování komponentního skóre v rozptylovém diagramu (Scatterplot). Na ose x se zobrazuje stejná hlavní komponenta v závislosti na ostatních (t_1 na t_2 , t_1 na t_3 , t_1 na t_4 atd.).

Rezidua objektů

- rezidua objektů představují ztrátu informace obsažené v původních datech zapříčiněnou projekcí zdrojové matice dat do menšího počtu rozměrů.
- velikost vzdálenosti mezi souřadnicemi objektů v původních znacích a hlavních komponentách e_i se nazývá *reziduum*. Všechna rezidua jsou obsažena v matici reziduí E .
- větší rezidua ukazují na špatné proložení modelu původními daty, naproti tomu malá rezidua signalizují kvalitní model.

Matematický postup k vyčíslení hlavních komponent

Z vlastností latentních proměnných vyplývá, že *první hlavní komponenta* y_1 (PC1) je lineární kombinací původních znaků vystihující jejich největší proměnlivost. Její tvar je definován vztahem

$$y_1 = v_{11}x_1 + v_{12}x_2 + \dots + v_{1m}x_m = \sum_{j=1}^m v_{1j}x_j = \mathbf{v}_1^T \mathbf{x}, \quad (21)$$

kde $\mathbf{x} = [x_1, x_2, \dots, x_m]$ značí objekt popsany znaky a pro vektor $\mathbf{v}_1^T = [v_{11}, \dots, v_{1m}]^T$ platí podmínka

$$D(y_1) = \mathbf{v}_1^T \mathbf{S} \mathbf{v}_1 = \lambda_1 \mathbf{v}_1^T \mathbf{v}_1, \quad (22)$$

kde $D(y_1)$ je maximální proměnlivost vyjádřená rozptylem, \mathbf{S} je kovarianční matice zdrojových dat a λ_1 je největší *vlastní číslo*, které zároveň vyjadřuje rozptyl první hlavní komponenty.

Obdobně lze psát vztah pro *druhou hlavní komponentu* y_2 (PC2)

$$y_2 = v_{21}x_1 + v_{22}x_2 + \dots + v_{2m}x_m = \sum_{j=1}^m v_{2j}x_j = \mathbf{v}_2^T \mathbf{x}, \quad (23)$$

za podmínky, že $\text{cov}(y_1, y_2) = 0$ a vlastní vektor \mathbf{v}_2 odpovídá druhému největšímu vlastnímu číslu λ_2 .

Rozložením kovarianční matice S původních dat na vlastní čísla $\lambda_1 \geq \lambda_2 \geq \lambda_m$ a odpovídající vlastní vektory $\mathbf{v}_1, \mathbf{v}_2, \dots, \mathbf{v}_m$, jsou poté tyto vektory koeficienty hlavních komponent y_1, \dots, y_m .

Problémy v analýze hlavních komponent

Při analýze hlavních komponent se lze setkat s častými problémy:

- 1) data neobsahují předpokládanou informaci a proto nemá smysl vysvětlovat grafy a diagramy metody PCA,
- 2) užitím malého počtu hlavních komponent došlo ke ztrátě informace,
- 3) využitím příliš velkého množství hlavních komponent došlo k zahrnutí šumu,
- 4) nebyly odstraněny odlehlé objekty, které zkreslují výsledky analýzy,
- 5) byly odstraněny odlehlé objekty, které obsahovaly důležitou informaci,
- 6) špatné předzpracování dat vede ke zkresleným výsledkům
- 7) neporozumění úlohy a špatné vyložení grafů a diagramů.

2. EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST

Experimentální část se zabývá aplikací statistických metod v tribotechnické diagnostice. V první části je aplikována exploratorní analýza vícerozměrných dat k prvnímu seznámení se zdrojovou maticí dat a její strukturou. Druhá část se zabývá analýzou hlavních komponent užitou na výběr dat, která odhaluje vazby a struktury ve sledovaných parametrech motorového oleje a odběrech jednotlivých vzorků.

2.1 Zdrojová matice

Zdrojová matice dat X ($n \times m$) uvedená v Příloze č. 1 obsahuje $n = 80$ odběrů (vzorků) motorových olejů OA-M6 ADS II z velkoobjemových nákladních automobilů Tatra 815 s motory řady T3-930 provozovaných v ČSA v letech 1988 - 1990, u kterých bylo sledováno $m = 11$ vybraných tribodiagnostických parametrů. Pro účely aplikování statistických metod jsou vzorky olejů nazývány *objekty* a tribodiagnostické parametry *znaky*.

U provozovaných olejů byly sledovány tyto znaky: *PMK* značí celkový proběh vozidla [km], *POK* značí proběh olejové náplně [km], *Fe* značí obsah železa [$\text{mg}\cdot\text{dm}^{-3}$], *Cu* značí obsah mědi [$\text{mg}\cdot\text{dm}^{-3}$], *Pb* značí obsah olova [$\text{mg}\cdot\text{dm}^{-3}$], *CCT* značí obsah Conradsonova karbonizačního zbytku [hmotnostní %], *CZ* značí celkové znečištění [d], *TBN* značí celkové číslo alkality [mg KOH/g oleje], *TAN* značí celkové číslo kyselosti [mg KOH/g oleje], *KV* značí kinematickou viskozitu [$\text{m}^2\cdot\text{s}^{-1}$], *BV* značí bod vzplanutí [$^{\circ}\text{C}$].

Dále je zdrojová matice dat popsána doplňkovými znaky: *ID* značí identifikační číslo vzorku motorového oleje, *Tatra* značí číslo Tatry, *Stav* značí provozuschopný nebo mezní stav motorového oleje podle [16] na základě Přílohy č. 2, *Kód stavu* označuje první číslicí stav oleje [0 - provozuschopný, 1 - mezní] a druhou číslicí číslo Tatry.

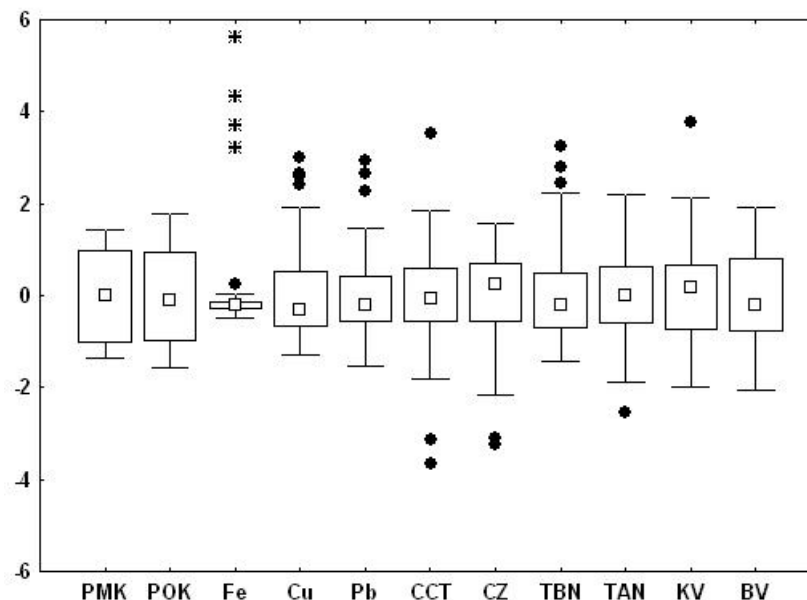
Výběr neobsahuje žádná chybějící data, proto není třeba žádný objekt v řádku vypustit. K výpočtu byly užity statistické programy STATISTICA, NCSS 2000 a SCAN.

2.2 Exploratorní analýza dat

Exploratorní analýza, nebo-li průzkumová analýza vícerozměrných dat, slouží k prvnímu seznámení se strukturou zdrojové matice. Její techniky jsou zaměřeny na popisné charakteristiky a grafické zobrazení vícerozměrných dat.

2.2.1 Extrémy a odlehlé objekty

Z výběru je nutné odstranit extrémy, které zkreslují výsledky analýzy a podle uvážení také odlehlé body. Výhodné zobrazení odlehlých hodnot je formou krabicového grafu.



Obr. 6 Krabicový graf standardizovaných dat

Krabicové grafy zobrazují proměnlivost každého znaku a popřípadě odlehlé objekty. Graf na Obr. 6 ukazuje nejmenší proměnlivost znaku Fe. Dále z krabicového grafu vyplývá, že výběr obsahuje extrémní a odlehlé hodnoty, které je nutné vyšetřit.

- **Obsah železa** - extrémní objekty 46, 47, 48 (Tatra č. 9) a 62 (Tatra č. 11) obsahují výrazně zvýšené množství železa. Odlehlý objekt 35 (Tatra č. 5) překročil svým obsahem železa v oleji hranici mezního stavu. Všechny uvedené objekty byly vyhodnoceny jako mezní a jsou odstraněny z výběru.
- **Obsah mědi** - odlehlé objekty 46, 47 (Tatra č. 9) a 62 (Tatra č. 11) vykazují zvýšený podíl mědi v motorovém oleji a byly označeny jako mezní stavy. Tyto objekty byly již odstraněny z výběru v souvislosti s obsahem železa.
- **Obsah olova** - odlehlé objekty 46, 48 (Tatra č. 9) a 62 (Tatra č. 11) obsahují velké množství olova v oleji a byly vyhodnoceny jako mezní stavy. Tyto objekty byly z výběru odstraněny v souvislosti s obsahem železa a mědi v oleji.
- **Conradsonův karbonizační zbytek** - odlehlý objekt 35 (Tatra č. 5) překročil svou hodnotou CCT hranici mezního stavu a byl z výběru odstraněn v souvislosti s obsahem železa. Odlehlé objekty 40, 41 (Tatra č. 6) vykazují nízké hodnoty CCT a zůstávají ve výběru ponechány.

- **Celkové znečištění** - odlehlé objekty 40 (Tatra č. 6) a 45 (Tatra č. 9) jsou charakteristické malou hodnotou celkové znečištění a jsou ve výběru ponechány.
- **Celkové číslo alkality** - odlehlé objekty 27, 28 a 30 (Tatra č. 5) mají vysokou hodnotou TBN. Objekty jsou ponechány ve výběru.
- **Celkové číslo kyselosti** - odlehlý objekt 27 (Tatra č. 5) vykazuje nízkou hodnotu TAN a dále zůstává ponechán ve výběru.
- **Kinematická viskozita** - odlehlý objekt 33 (Tatra č. 5) má vysokou hodnotu kinematické viskozity překračující hranici mezního stavu a je z výběru odstraněn.

Z uvedených údajů vyplývá, že většina vzorků olejů hodnocených jako mezní, byla zapříčiněna zvýšeným obsahem částic opotřebení a v jednom případě vysokou hodnotou kinematické viskozity, jejíž vlivem vznikl silný mazací film mezi dvojicí motorových součástí a to vedlo k zvýšenému třecímu režimu. Podrobnější popis jednotlivých mezních stavů motorové oleje se nachází v [16].

Z výběru byly odstraněny všechny stavy vyhodnocené jako mezní podle [16] na základě přílohy č. 2. Stavy provozuschopné zůstaly ponechány, neboť obsahují důležité informace popisující běžný stav motorového oleje provozovaného v ČSA v letech 1988 - 1990.

2.2.2 Základní popisné statistiky

Tab. 2 popisuje množství platných objektů příslušného znaku, které jsou zahrnuty do modelu. Objekty s neúplnými daty by byly z analýzy vypuštěny.

Tab. 2 Popisné statistiky

Znak	N platných	Průměr	Minimum	Maximum	Rozptyl	Směrodatná odchylka
PMK	74	27556.45	1470.000	54122.00	346107057	18603.95
POK	74	2910.89	58.000	6100.00	3367656	1835.12
Fe	74	38.15	7.800	68.00	162	12.74
Cu	74	6.01	0.600	15.50	14	3.81
Pb	74	6.18	0.600	15.80	10	3.23
CCT	74	1.55	0.800	1.90	0	0.18
CZ	74	63.95	40.000	76.00	59	7.70
TBN	74	3.65	1.740	8.05	2	1.39
TAN	74	3.51	1.630	5.13	1	0.76
KV	74	11.71	10.900	12.61	0	0.39
BV	74	225.49	211.000	239.00	48	6.92

Tabulka dále uvádí pro každý znak jeho průměrnou hodnotu, minimální hodnotu, maximální hodnotu, rozptyl a směrodatnou odchylku. Data musí být před další analýzou

standardizována, neboť některé znaky mají příliš velký rozptyl oproti ostatním. Standardizací se zároveň odstraní závislost na fyzikálních jednotkách.

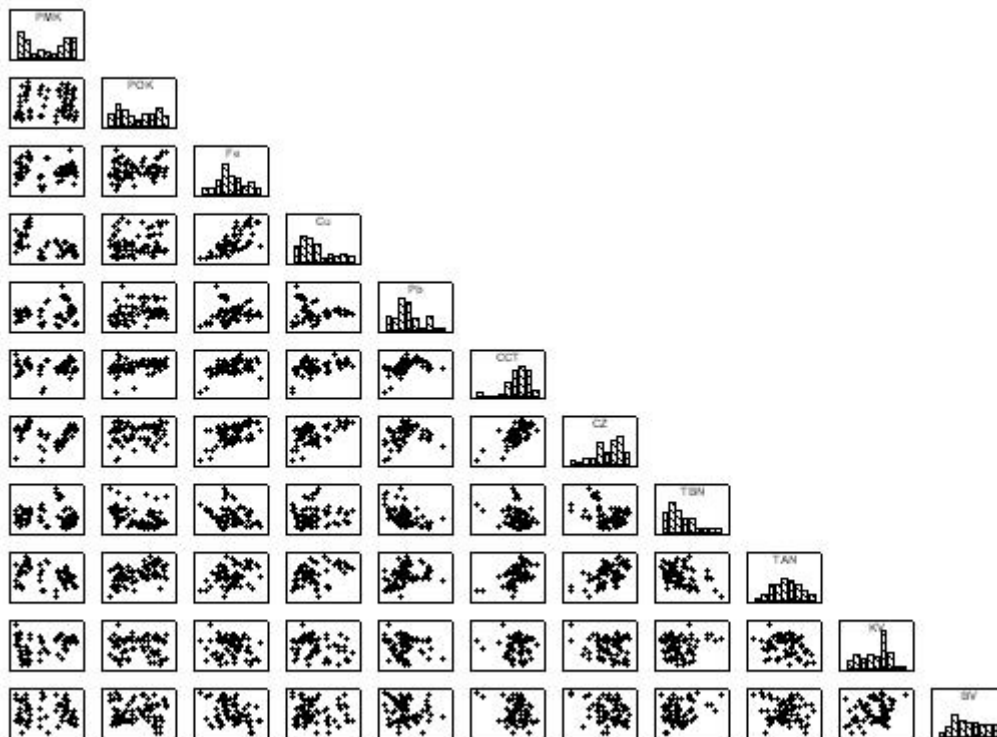
Tab. 3 Korelační matice znaků

	PMK	POK	Fe	Cu	Pb	CCT	CZ	TBN	TAN	KV	BV
PMK	1.00	0.10	-0.12	-0.57	0.29	0.08	-0.10	-0.01	-0.35	0.34	-0.08
POK	0.10	1.00	0.23	0.08	0.30	0.35	0.13	-0.33	0.48	-0.11	0.01
Fe	-0.12	0.23	1.00	0.69	0.11	0.45	0.51	-0.19	0.34	-0.21	-0.39
Cu	-0.57	0.08	0.69	1.00	-0.12	0.31	0.49	0.02	0.43	-0.28	-0.05
Pb	0.29	0.30	0.11	-0.12	1.00	0.43	0.20	-0.56	0.34	-0.03	-0.07
CCT	0.08	0.35	0.45	0.31	0.43	1.00	0.68	-0.28	0.50	0.08	-0.26
CZ	-0.10	0.13	0.51	0.49	0.20	0.68	1.00	-0.36	0.51	-0.10	-0.29
TBN	-0.01	-0.33	-0.19	0.02	-0.56	-0.28	-0.36	1.00	-0.40	0.11	0.22
TAN	-0.35	0.48	0.34	0.43	0.34	0.50	0.51	-0.40	1.00	-0.31	-0.07
KV	0.34	-0.11	-0.21	-0.28	-0.03	0.08	-0.10	0.11	-0.31	1.00	0.33
BV	-0.08	0.01	-0.39	-0.05	-0.07	-0.26	-0.29	0.22	-0.07	0.33	1.00

Korelační matice všech znaků je uvedena v Tab. 3. Tučně jsou zde zvýrazněny statisticky významné korelace na hladině významnosti $\alpha = 0,05$. Celkové číslo kyselosti (TAN) a Conradsonův karbonizační zbytek (CCT) významně korelují s většinou znaků.

2.2.3 Grafické zobrazení vícerozměrných dat

Přehlednější podobou korelační matice je maticový graf korelace znaků, který je sestaven z rozptylových grafů pro všechny párové kombinace znaků (viz Obr. 7).



Obr. 7 Histogramy a maticový graf korelace znaků

Vyšší hodnoty korelačního koeficientu jsou v rozptylovém grafu zřetelně poznatelné seskupením objektů do přímky, naopak nižší korelační koeficient vede k rozmístění objektů do mraku bodů. Na základě grafu lze indikovat vybočující body ovlivňující párový korelační koeficient a strukturu objektů. Podobnost objektů lze zkoumat pomocí symbolových grafů.



Obr. 8 Hvězdičky (polygony) znaků pro každý objekt

Na Obr. 8 lze identifikovat podobné objekty podle přibližně stejného tvaru hvězdičky. Takové objekty jsou si podobné hodnotami příslušných znaků a seskupují se do shluku. Např. shodné či podobné objekty jsou vzorky opotřebovaných olejů 70, 71, 72, 73, nebo 5 a 7.

2.3 Analýza hlavních komponent

Metodou PCA se analyzují vztahy a struktury mezi znaky i objekty. Pomocí grafického přehledu diagnostik metody hlavních komponent je cílem nalézt znaky, které nejvíce ovlivňují kvalitu oleje a objekty, které jsou si podobné nebo nepodobné ostatním objektům či vytvářející různé shluky. Znaky se transformují do menšího počtu latentních proměnných.

2.3.1 Redukce znaků

Nejdříve bude analýzou hlavních komponent vyšetřeno, zda-li lze redukovat počet znaků zahrnutých do modelu.

Vyšetření Cattelova indexového grafu úpatí vlastních čísel

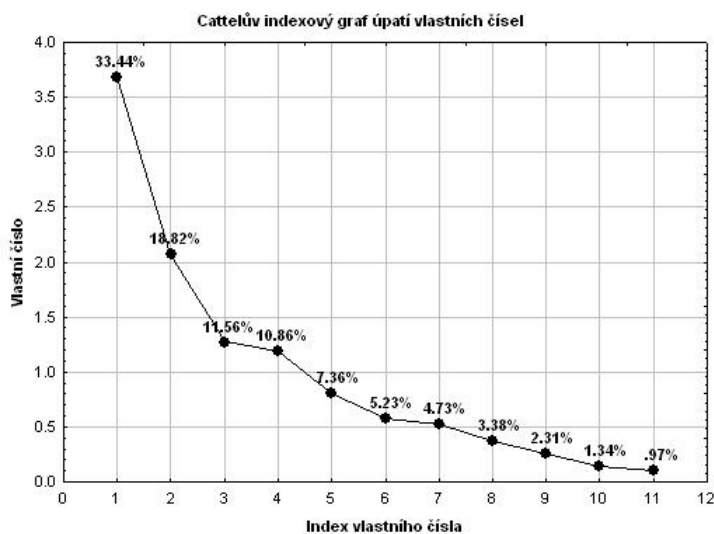
Následující tabulka (Tab. 4) ukazuje tabelární podobu Cattelova indexového grafu úpatí vlastních čísel. Individuální a kumulativní procento popisuje proměnlivost v původních znacích, které vystihuje příslušná hlavní komponenta.

Tab. 4 Vlastní čísla

Index i	Vlastní číslo λ_i	Individuální procento (%)	Kumulativní vlastní číslo	Kumulativní procento (%)
1	3.68	33.44	3.68	33.44
2	2.07	18.82	5.75	52.26
3	1.27	11.56	7.02	63.83
4	1.19	10.86	8.22	74.68
5	0.81	7.36	9.02	82.04
6	0.58	5.23	9.60	87.27
7	0.52	4.73	10.12	92.01
8	0.37	3.38	10.49	95.38
9	0.25	2.31	10.75	97.70
10	0.15	1.34	10.89	99.03
11	0.11	0.97	11.00	100.00

Podle Kaiserova kritéria jsou vybírány pouze hlavní komponenty, které mají vlastní číslo λ_i větší nebo rovné 1. První tři latentní proměnné popisují 63.83 % z celkové proměnlivosti dat, první čtyři pokrývají 74.68 % proměnlivosti.

Velice důležitým kritériem je však Cattelův indexový graf úpatí vlastních čísel. Na ose x jsou vyneseny indexy jednotlivých latentních proměnných a osa y představuje vlastní čísla λ . Každý index hlavní komponenty je označen individuálním procentem, který objasňuje dotyčná hlavní komponenta. Na základě grafu se určuje zlomové místo mezi svislou stěnou a vodorovným dnem.



Obr. 9 Cattelův indexový graf úpatí vlastních čísel

Grafická analýza Obr. 9 indikuje první zlom u indexu 3. Proto budou pro analýzu vybrány první tři hlavní komponenty, které objasňují 63.83 % z celkového rozptylu.

Wyšetření grafu komponentních zátěží

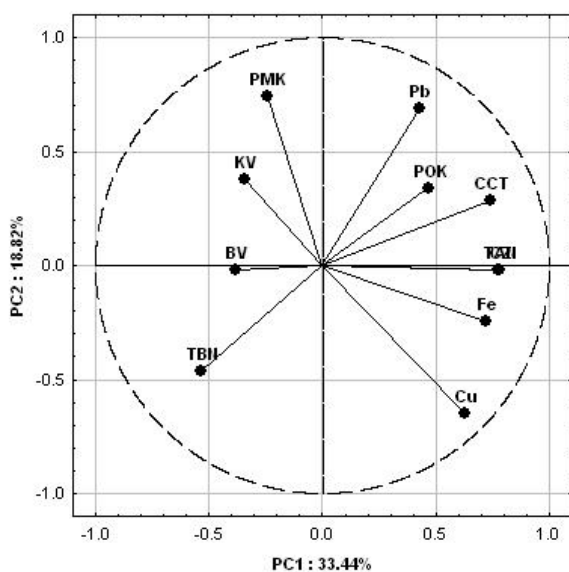
Komponentní zátěže informují o korelaci mezi původními $m = 11$ znaky a hlavními komponentami. Jednotlivé body v grafu představují znaky, u kterých se porovnávají vzájemné vzdálenosti a úhel mezi průvodiči.

- *Krátká vzdálenost nebo malý úhel mezi průvodiči* - mezi dvěma znaky značí vysokou pozitivní korelaci. Je možné nalézt i shluk podobných znaků, které kladně korelují.
- *Velká vzdálenost nebo velký úhel mezi průvodiči* - mezi dvěma znaky indikuje vysokou negativní korelaci. Lze nalézt i shluk podobných znaků, které jsou nepodobné jinému shluku, nebo-li shluky jsou v záporné korelaci.
- *Pravý úhel mezi průvodiči* - je-li úhel mezi průvodiči dvou znaků 90° , není mezi nimi žádná korelace.

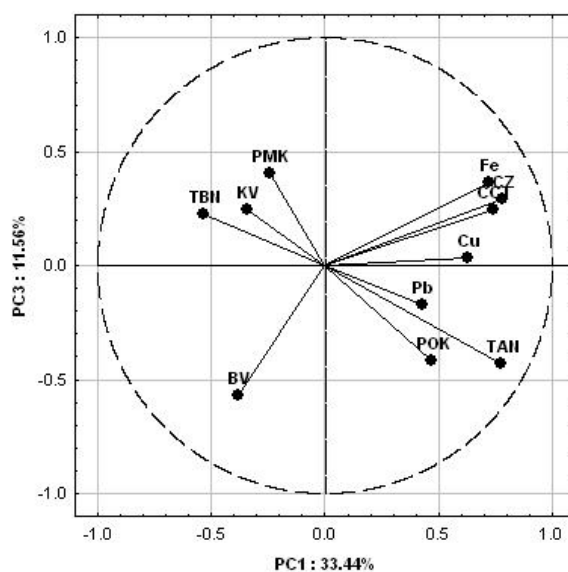
Souřadnice hlavních komponent jednotlivých znaků představují korelační koeficient mezi znakem a příslušnou hlavní komponentou.

Důležitost původních znaků se hodnotí dle umístění v grafu komponentních zátěží.

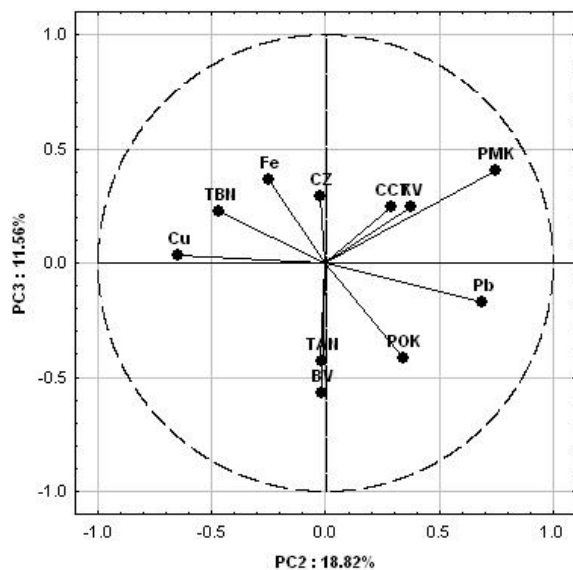
- *dlouhý průvodič nebo velká vzdálenost znaku od počátku* - znaky mají vysokou variabilitu a jsou pro analýzu důležité.
- *krátký průvodič nebo malá vzdálenost znaku od počátku* - znaky mají malou variabilitu a nejsou pro analýzu důležité. Takové znaky je možné z modelu odstranit.



Obr. 10 Graf komponentních zátěží PC1 a PC2



Obr. 11 Graf komponentních zátěží PC1 a PC3



Obr. 12 Graf komponentních zátěží PC2 a PC3

Nyní bude vyšetřeno, zda lze redukovat počet znaků. Nejdůležitějším grafem je graf komponentních zátěží PC1 a PC2 (Obr. 10), který vystihuje největší část proměnlivosti. Celkové znečištění (CZ) významně koreluje a je si velice podobné s TAN i Fe a CCT.

Celkové znečištění je parametrem motorového oleje, které charakterizuje celkovou čistotu oleje. Nečistoty pochází z několika zdrojů a během provozu se hromadí v motorovém oleji. Jedná se jednak o produkty termooxidační degradace oleje, které mají za následek růst hodnot CCT a TAN, tak o znečištění kovovým oděrem (Fe). Termické zatížení oleje, vyjádřené pomocí znaku CCT, způsobuje rozklad alkalické rezervy v oleji, což vede k nárůstu oxidačních reakcí. Oxidační reakce volných radikálů mají za následek vznik kyselých látek (TAN). Zvýšený obsah mechanických nečistot (uhlíkaté úsady) a produktů chemické degradace oleje (kyselé látky, způsobující korozivní opotřebení) vedou ke zvýšenému opotřebení třecích povrchů tj. k tvorbě Fe částic a k nedokonalému mazání interagujících částí motoru.

Celkové znečištění významně souvisí i s bodem vzplanutí, se kterým je v záporné korelaci. Bod vzplanutí se používá nejčastěji ke stanovení obsahu paliva v motorovém oleji. Vysoké celkové znečištění vede k nedokonalému mazání v oblasti pístních kroužků a válce, což má za následek zvýšené pronikání paliva (nafty) do olejové náplně. Zvýšený obsah nafty v oleji tedy vede k nárůstu celkového znečištění a zároveň k poklesu bodu vzplanutí.

Na základě výše uvedeného je znak CZ vypuštěn z modelu hlavních komponent. Ostatní znaky zůstávají v modelu ponechány, neboť mezi nimi nebyla nalezena významná podobnost a zároveň mají všechny znaky dostatečně dlouhý průvodič, který signalizuje jejich důležitost pro sestavení modelu.

2.3.2 Hledání vazeb a struktury ve znacích a objektech

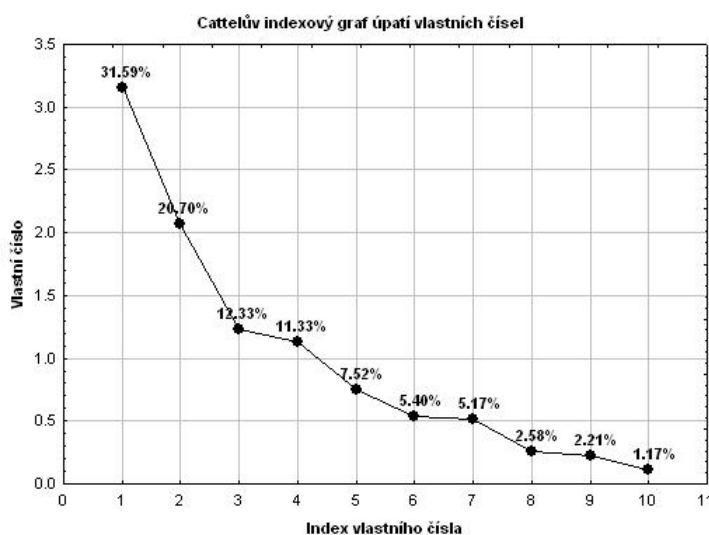
Odstraněním znaku celkové znečištění (CZ) došlo k redukci proměnných zahrnutých do modelu hlavních komponent z 11 na 10. Proto je nutné provést výpočet modelu znovu, neboť nyní je třeba analyzovat výběr bez rozptylu znaku CZ. Metoda hlavních komponent je závislá na rozptylu všech znaků použitých k výpočtu modelu. Odstraněním některého ze znaků dojde k vyčíslení odlišných vlastních čísel, komponentních vah a komponentního skóre.

Vyšetření Cattelova indexového grafu úpatí vlastních čísel

K určení počtu využitých hlavních komponent slouží vlastní čísla, která jsou graficky vyjádřena v Cattelově indexovém grafu úpatí vlastních čísel. Jeho tabelární podobou je *Tab. 5*.

Tab. 5 Vlastní čísla

Index <i>i</i>	Vlastní číslo λ_i	Individuální procento (%)	Kumulativní vlastní číslo	Kumulativní procento (%)
1	3.16	31.59	3.16	31.59
2	2.07	20.70	5.23	52.29
3	1.23	12.33	6.46	64.62
4	1.13	11.33	7.60	75.95
5	0.75	7.52	8.35	83.48
6	0.54	5.40	8.89	88.87
7	0.52	5.17	9.40	94.04
8	0.26	2.58	9.66	96.62
9	0.22	2.21	9.88	98.83
10	0.12	1.17	10.00	100.00



Obr. 13 Cattelův indexový graf úpatí vlastních čísel

Na základě grafu na *Obr. 13* lze pozorovat první zlom u indexu 3. K analyzování budou tedy vybrány první tři hlavní komponenty, které vystihují 64,42 % proměnlivosti.

Výpočet vlastních vektorů pro hlavní komponenty

Vektory jsou koeficienty rovnice, které umožňují kombinovat předem normované znaky.

Například pro první hlavní komponentu jsou dány rovnicí $y_1 = v_{11}x_1 + v_{12}x_2 + \dots + v_{1m}x_m$.

Matematické vyčíslení hlavních komponent je podrobně popsáno na straně 24.

Tyto koeficienty se nazývají komponentní váhy (vlastní vektory) a popisují relativní důležitost každého znaku vzhledem k hlavní komponentě (viz Tab. 6).

Tab. 6 Vlastní vektory

Znak	λ_1 (PC1)	λ_2 (PC2)	λ_3 (PC3)
PMK	0.1492	0.5220	0.2974
POK	-0.3044	0.2300	-0.2949
Fe	-0.3987	-0.1765	0.3019
Cu	-0.3396	-0.4556	-0.0735
Pb	-0.2613	0.4736	-0.0667
CCT	-0.3892	0.1964	0.0387
TBN	0.3128	-0.3181	0.0274
TAN	-0.4477	-0.0217	-0.3349
KV	0.2223	0.2670	-0.1895
BV	0.2080	-0.0112	-0.7572

Důležitost znaků vzhledem k příslušné hlavní komponentě:

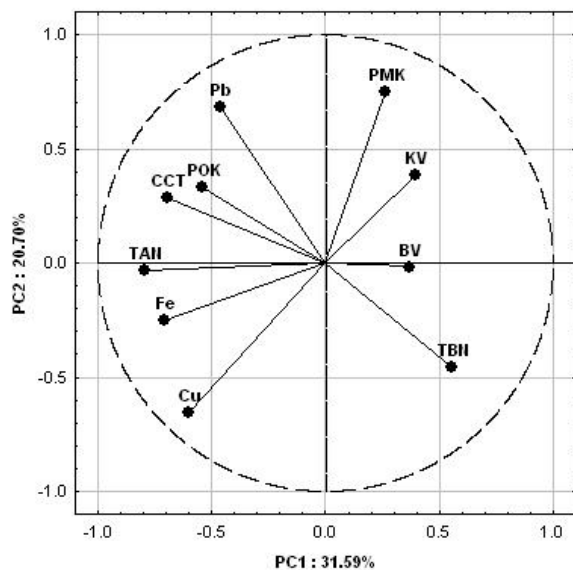
- *první hlavní komponenta* - nejdůležitějším je znak TAN se zápornou váhou,
- *druhá hlavní komponenta* - nejdůležitějším znakem je znak PMK s kladnou, komponentní váhou
- *třetí hlavní komponenta* - nejdůležitějším je znak BV se zápornou komponentní váhou.

Vyšetření grafu komponentních zátěží

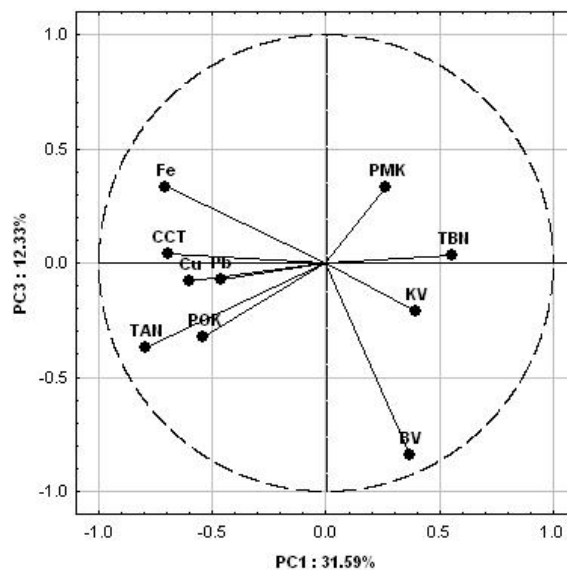
Tabelární podoba grafu komponentních zátěží (viz obr. 14 až 16) popisuje číselně hodnoty korelací mezi původními znaky a hlavními komponentami (viz Tab. 7). Korelace jsou zároveň souřadnicemi znaků.

Tab. 7 Komponentní zátěže

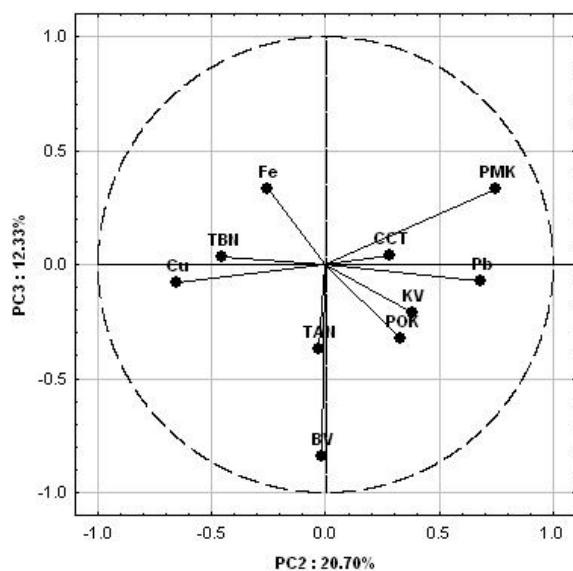
Znak	λ_1 (PC1)	λ_2 (PC2)	λ_3 (PC3)
PMK	0.2652	0.7511	0.3302
POK	-0.5411	0.3309	-0.3275
Fe	-0.7087	-0.2539	0.3352
Cu	-0.6037	-0.6554	-0.0816
Pb	-0.4645	0.6814	-0.0741
CCT	-0.6917	0.2825	0.0430
TBN	0.5560	-0.4577	0.0304
TAN	-0.7958	-0.0312	-0.3718
KV	0.3951	0.3841	-0.2104
BV	0.3697	-0.0160	-0.8407



Obr. 14 Graf komponentních zátěží PC1 a PC2



Obr. 15 Graf komponentních zátěží PC1 a PC3



Obr. 16 Graf komponentních zátěží PC2 a PC3

PC1 a PC2 objasňují největší proměnlivost, proto jsou nejdůležitější k vysvětlení vztahů mezi znaky. Znaky, které jsou v grafu umístěné ve stejném směru vůči počátku, se vzájemně ovlivňují a jsou pozitivně korelované. Znaky umístěné v opačném směru jsou potom s nimi negativně korelované.

Z grafu na Obr. 14 lze vyčíst, že celkové číslo alkality (TBN), kinematická viskozita (KV), celkový proběh vozidla (PMK) a bod vzplanutí (BV) jsou vzájemně kladně korelované a celkové číslo kyselosti (TAN), obsah železa (Fe), Conradsonův karbonizační zbytek (CCT), obsah mědi (Cu), proběh olejové náplně (POK) a obsah olova (Pb) jsou vzájemně pozitivně korelované, ale zároveň jsou negativně korelované s předešlým shlukem znaků.

Na základě *Obr. 14* a *Obr. 15* je možné nazvat první hlavní komponentu *jakosti oleje*. Kinematická viskozita není příliš objektivním parametrem určující jakost oleje, neboť její hodnota je snižována narůstajícím obsahem paliva v oleji a na druhé straně je její hodnota zvyšována narůstajícím obsahem mechanických nečistot. Proto nelze přijmout závěr vyplývající z grafu na *Obr. 10* a *Obr. 11*, že s rostoucí kinematickou viskozitou se zvyšuje i jakost oleje. Znak PMK svou komponentní vahou a komponentní zátěží nepřispívá významně do jakosti motorového oleje. Hlavními parametry ovlivňujícími jakost oleje jsou celkové číslo kyselosti, které svými narůstajícími hodnotami negativně ovlivňuje jakost a na druhé straně celkové číslo alkality, které svými vyššími hodnotami signalizuje dobrou jakost oleje. Z uvedených závěrů tedy vyplývá, že alkalita a kyselost oleje opravdu hrají důležitou roli v kvalitě motorových olejů.

Jelikož graf na obrázku *Obr. 14* nepotvrzuje korelaci znaků Pb a Cu, jedná se podle [16] o sorpci emisí produkovaných benzínovými motory, které jsou tvořeny převážně chloridy olova a oxidy dusíku, při provozu nákladních vozidel v městských lokalitách. Tento závěr potvrzuje záporná korelace znaků Pb a TBN. Potom druhá hlavní komponenta rozlišuje mezi vzorky olejů, které jsou spíše charakteristické termooxidačním namáháním a mezi vzorky, které jsou převážně znečištěny otěrovými částicemi, což signalizuje nepříznivé třecí poměry mezi interagujícími součástmi motoru.

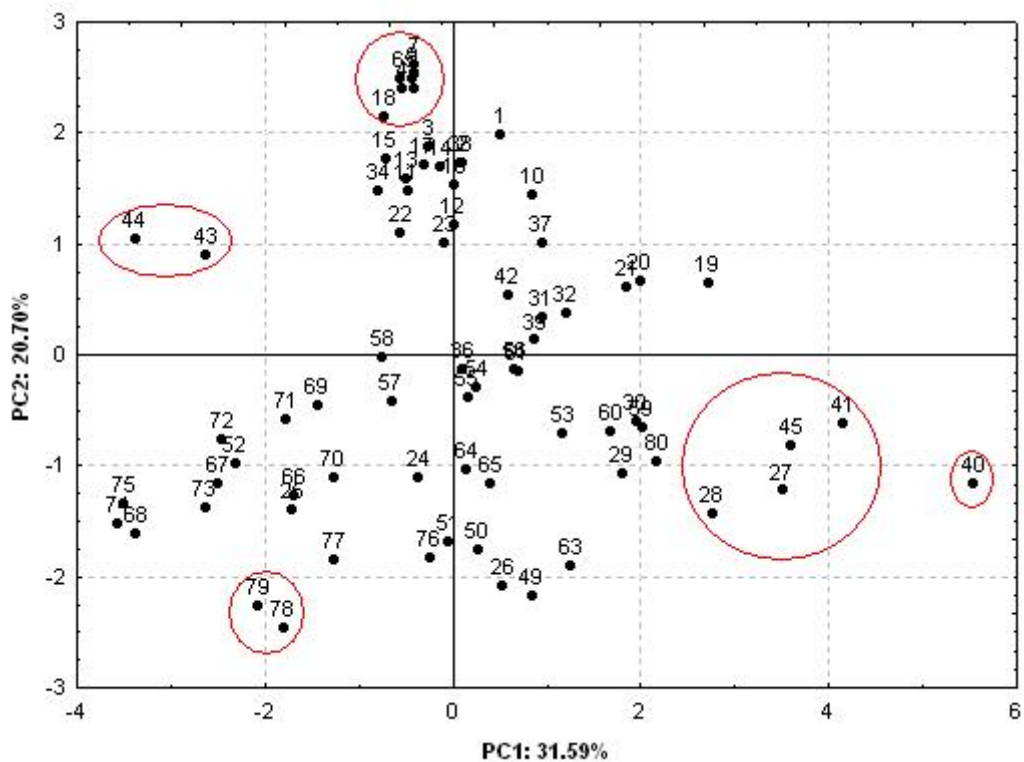
Smysl třetí hlavní komponenty znázorněný na *Obr. 15* a *Obr. 16* se nepodařilo objasnit a proto nedošlo k jejímu pojmenování.

Vyšetření rozptylového diagramu komponentního skóre

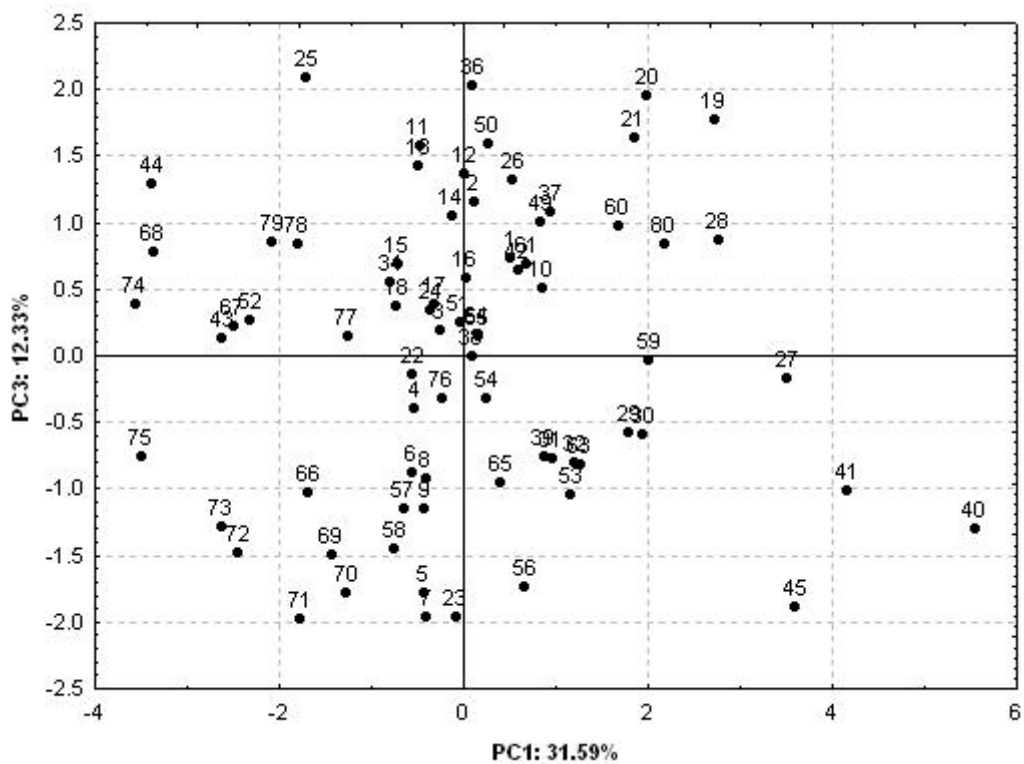
Souřadnice každého objektu na osách hlavních komponent jsou nazvány skóre. Vyšetřením diagramu lze nalézt shluky vzájemně podobných objektů, odlehlé objekty a extrémy.

Diagnostika rozptylového diagramu se týká:

- *umístění objektů* - blízko počátku jsou nejtypičtější, daleko od centra jsou extrémy,
- *podobnosti objektů* - vzájemně malé vzdálenosti svědčí o podobnosti objektů, velké vzdálenosti o jejich nepodobnosti,
- *objektů v shluku* - objekty, které jsou si velice podobné, vytvářejí shluk a jsou nepodobné ostatním shlukům objektů,
- *osamělých objektů* - silně nepodobné ostatním objektům (izolované), které mohou být současně odlehlými objekty. Odlehlé objekty ovlivňují výsledky analýzy PCA.

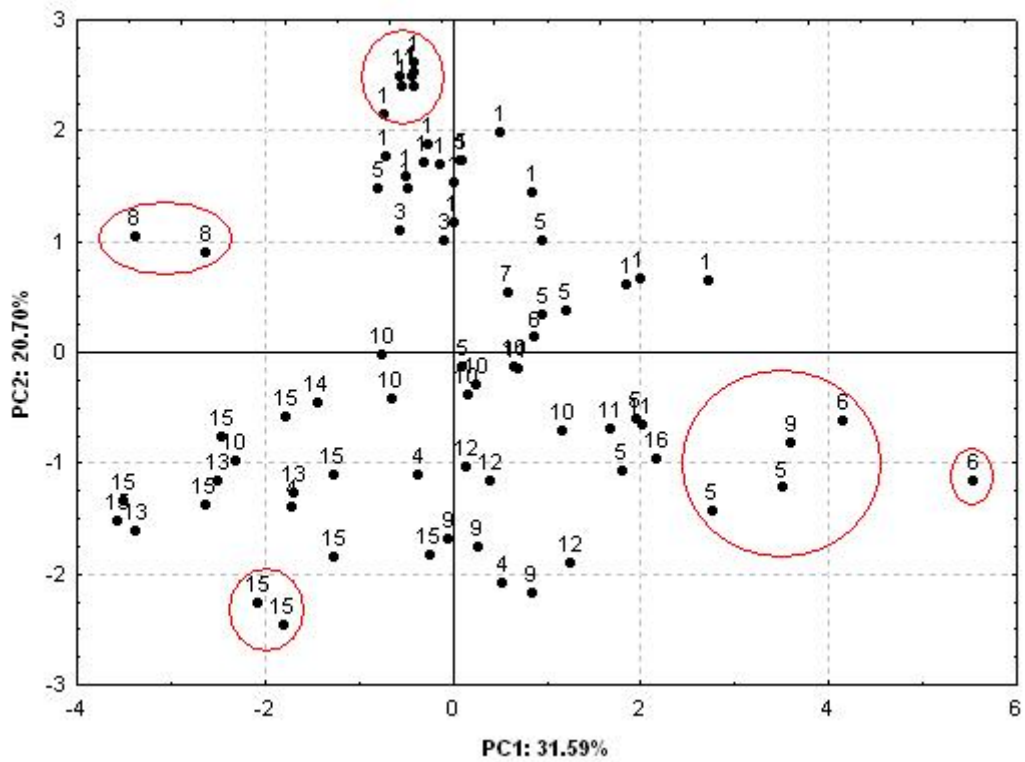


Obr. 17 Rozptylový diagram komponentního skóre PC1 a PC2 při popisu vzorků indexy

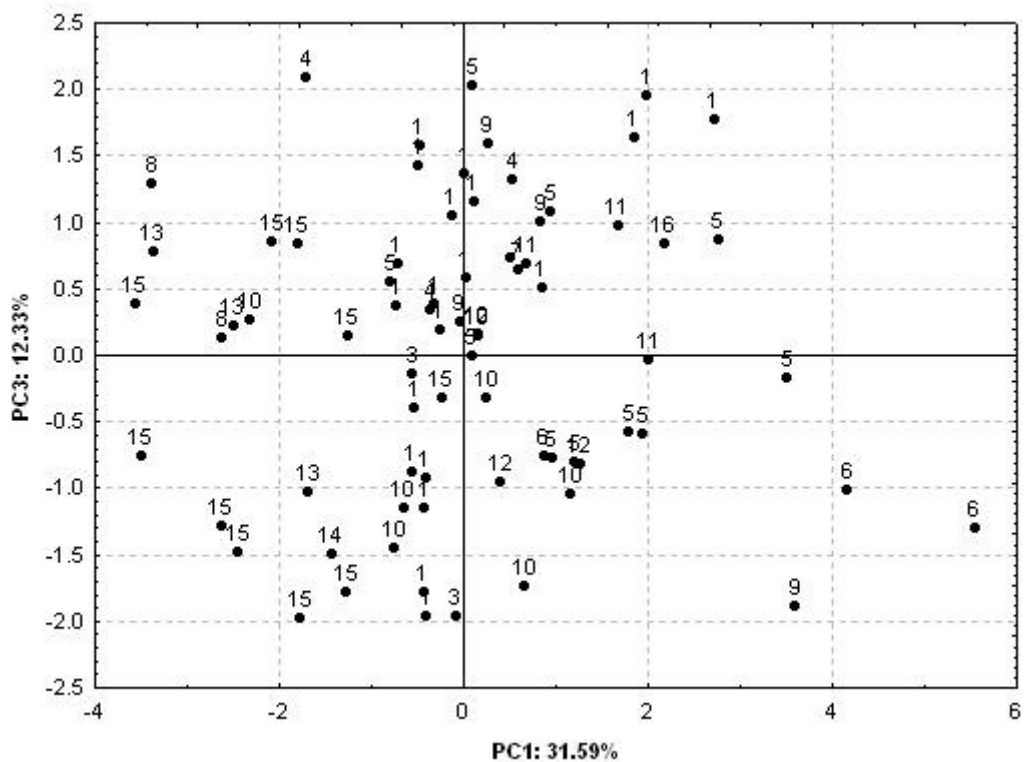


Obr. 18 Rozptylový diagram komponentního skóre PC1 a PC3 při popisu vzorků indexy

Objekty rozptylového diagramu komponentního skóre lze vhodně pojmenovat k hledání hlubších souvislostí mezi objekty.



Obr. 19 Rozptylový diagram komponentního skóre PC1 a PC2 při popisu vzorků číslly Tatry



Obr. 20 Rozptylový diagram komponentního skóre PC1 a PC3 při popisu vzorků číslly Tatry

Z rozptylového diagramu komponentního skóre pro PC1 a PC2 (viz *Obr. 17* a *Obr. 19*), který popisuje největší část informace obsažené v datech, vyplývají následující závěry:

- Objekt 40 (Tatra č. 6) je odlehlým objektem mající vysokou hodnotu bodu vzplanutí a TBN. Zároveň obsahuje minimální podíl Fe, Cu, Pb, CCT a kyselých látek.
- Objekty 27, 28 (Tatra č. 5), 45 (Tatra č. 9) a 41 (Tatra č. 6) jsou odlehlými objekty vytvářející shluk, typické vysokými hodnotami BV a TBN a velmi nízkými hodnotami Conradsonova karbonizačního zbytku.
- Objekty 78 a 79 (Tatra č. 15) jsou odlehlými objekty charakteristické vysokým podílem mědi a železa v oleji a nízkou kinematickou viskozitou.
- Objekty 4, 5, 6, 7, 8, 9 a 18 (Tatra č. 1) jsou objekty vytvářející zřetelný shluk v horní části diagramu. Charakteristické jsou nízkými hodnotami TBN a zvýšeným obsahem olova v motorovém oleji.
- Objekty 43 a 44 (Tatra č. 8) jsou izolované od ostatních objektů, vykazující nízké hodnoty TBN a zvýšené množství Pb a Fe a vysokou hodnotu TAN.

Objekty rozmístěné kolem počátku jsou nejtypičtější a představují průměrný stav degradace motorového oleje. Na základě uvedených závěrů lze přijmout předpoklad, že první hlavní komponenta je pojmenována „jakost oleje“.

Rozptylové diagramy komponentního skóre při popisu vzorků čísla Tatra ukazují, že některé vzorky olejů stejného nákladního automobilu mají tendenci seskupovat se do shluků. Vyplývá to z různého zatížení automobilů a jejich nasazení na určitý druh práce (stavební atd.).

Ve druhém kvadrantu jsou umístěny objekty (vzorky olejů), které jsou převážně termooxidačně namáhány a ve třetím kvadrantu se nachází objekty se zvýšeným množstvím ořetrových částic signalizující zvýšené opotřebení motoru.

2.4 Dílčí závěr

Exploratorní analýzou byly vyčísleny popisné charakteristiky zdrojové matice dat a odhalily se prvotní struktury v objektech. Analýza hlavních komponent poté pomocí grafického přehledu zobrazila vazby a strukturu ve znacích a objektech. Z výsledků, získaných aplikací statistických metod, vyplývají následující závěry a poznatky:

- Byly nalezeny extrémní a odlehlejší hodnoty, které převážně indikovaly mezní stav motorového oleje. Ponecháním vzorků provozuschopného oleje nedošlo ke ztrátě důležité informace.
- Podařilo se odstranit znak celkové znečištění (CZ), který se jeví jako přebytečný pro tribotechnické diagnostikování. Celkové znečištění obsahuje informace především o kyselosti oleje (TAN), termickém zatížení oleje (CCT), koncentraci Fe částic a obsahu paliva v oleji. Počet znaků zahrnutých do modelu se zredukoval z původního počtu 11 na 10.
- Vysvětlením první hlavní komponenty se dospělo k závěru, že PC1 lze pojmenovat jakost oleje. Dominantními parametry ovlivňující jakost oleje jsou jeho kyselost (TAN) a alkalita (TBN).
- Kinematická viskozita (KV) není objektivním tribodiagnostickým parametrem, kterým by se dala charakterizovat jakost oleje. Její hodnoty jsou ovlivněny protichůdnými vlivy, přičemž není žádoucí jak pokles kinematické viskozity, tak její příliš velký nárůst.
- Celkový proběh vozidla (PMK) není významným parametrem, pomocí kterého by se dala určovat jakost motorového oleje.
- Podařilo se objasnit význam druhé hlavní komponenty. PC2 rozlišuje vzorky olejů z pohledu termooxidačního zatížení a z pohledu zvýšené koncentrace otěrových částic, které indikují nadměrné zatížení motoru a nepříznivé třecí poměry mezi styčnými plochami agregátu.
- Obsah olova (Pb) v motorovém oleji souvisí se sorpcí emisí produkovaných benzínovými motory, které jsou tvořeny převážně chloridy olova a oxidy dusíku, při provozu nákladních vozidel v městských lokalitách. Obsah olova tedy souvisí s oxidačním zatížením oleje.

Z uvedených závěrů vyplývá, že jakost oleje je určena hlavně dvěma tribodiagnostickými parametry: celkovým číslem alkality a celkovým číslem kyselosti. K hledání hlubších závěrů souvisejícími s degradací oleje postačuje sledovat ještě následující parametry: bod vzplanutí, obsah železa, Conradsonův karbonizační zbytek, proběh olejové náplně a obsah mědi.

Výsledky analýzy se vztahují na motory řady T3-930 provozované s motorovým olejem OA-M6 ADS II. Účelné tribotechnické diagnostiky lze dosáhnout pouze individuální analýzou v každém motoru.

ZÁVĚR

Teoretická část bakalářské práce se zabývá současnými poznatky z oblasti tribotechnické diagnostiky motorových olejů. Jsou zde popsány nejzákladnější fyzikálně-chemické parametry olejových náplní. Statistické vyhodnocení se zaměřovalo na exploratorní analýzu a analýzu hlavních komponent motorového oleje OA - M6 ADS II provozovaného v těžkých terénních nákladních automobilech Tatra 815.

V experimentální části byly exploratorní analýzou vyčísleny základní popisné statistiky a korelační matice s vyznačenými korelacemi, které byly statisticky významné. Grafické pomůcky pomohly odhalit extrémní a odlehlé hodnoty parametrů. Mezní extrémy a odlehlé hodnoty byly z výběru odstraněny. EDA odhalila první seznámení se strukturou v odběrech vzorků oleje.

Metodou hlavních komponent byl odstraněn znak *celkové znečištění*, který značně koreloval s celkovým číslem kyselosti i s obsahem železa a Conradsonovým karbonizačním zbytkem. Počet znaků zahrnutých do modelu se zredukoval z 11 na 10. První hlavní komponenta byla nazvána jakostí oleje. Nejdůležitější tribodiagnostické parametry, které ovlivňují jakost oleje, jsou celkové číslo kyselosti a celkové číslo alkality.

Teoretické předpoklady o vztazích mezi vybranými parametry motorových olejů byly téměř shodné s výsledky analýzy hlavních komponent. Zvýšený obsah olova v oleji je důsledkem oxidační degradace, ke které docházelo sorpcí emisí chloridu olova a oxidů dusíku produkovaných zážehovými motory v městských lokalitách, neboť proběh olejové náplně byl sledován v letech 1988 - 1990, kdy se olovo přidávalo do benzínu. Z tohoto dílčího závěru vyplynulo, že druhá hlavní komponenta rozlišuje mezi termooxidační degradací motorového oleje a degradací oleje způsobenou zvýšeným obsahem otěrových kovů (železa a mědi), která byla způsobena nepříznivými třecími poměry mezi interagujícími součásti.

O struktuře jednotlivých odběrů vzorků oleje vypovídaly rozptylové diagramy komponentního skóre ukazující na vytvořené shluky a odlehlé body. Vzorky odebrané z jednoho vozidla měly tendenci seskupovat se do shluku, ale významnější rozdíly mezi vzorky nebyly odhaleny.

Cíl bakalářské práce byl splněn. Bylo provedeno popsání současného stavu poznání o tribotechnické diagnostice motorových olejů. Aplikací vícerozměrných statistických se

dosáhlo odhalení vazeb a struktury v tribodiagnostických parametrech a v odběrech vzorků oleje.

Uvedené metody lze využít jako průzkumovou analýzu ke složitějším a náročnějším statistickým metodám, mezi které patří např. diskriminační analýza a regresní analýza. Tyto metody klasifikují objekty na základě predikčního modelu do předem stanovených tříd. Analýzou je možné sestavit model, který dokáže rozlišovat mezi provozuschopným a mezním stavem motorového oleje.

POUŽITÁ LITERATURA

- [1] *Vlastnosti motorových olejů – Viskozita*. [online].[cit.24.února 2008].Dostupné na WWW : <http://www.oleje.cz/index.php?left=main&page=clanky_vlastnosti_oleju2>.
- [2] *Vlastnosti motorových olejů – HTHS Viskozita a lehkoběžné oleje*. [online].[cit.24.února 2008].Dostupné na WWW : <http://www.oleje.cz/index.php?left=main&page=clanky_vlastnosti_oleju3>.
- [3] *Vlastnosti motorových olejů – Kyselost a alkalita*. [online].[cit.24.února 2008].Dostupné na WWW : <http://www.oleje.cz/index.php?left=main&page=clanky_vlastnosti_oleju4>.
- [4] *Vlastnosti motorových olejů –Detergenty a disperzanty*. [online].[cit.24.února 2008].Dostupné na WWW : <http://www.oleje.cz/index.php?left=main&page=clanky_vlastnosti_oleju5>.
- [5] *Vlastnosti motorových olejů – Nečistoty a saze v motorovém oleji*. [online].[cit.24.února 2008].Dostupné na WWW : <http://www.oleje.cz/index.php?left=main&page=clanky_vlastnosti_oleju6>.
- [6] *Vlastnosti motorových olejů – Oxidační stabilita, nitrace oleje*. [online].[cit.24.února 2008].Dostupné na WWW : <http://www.oleje.cz/index.php?left=main&page=clanky_vlastnosti_oleju7>.
- [7] *Viskozita olejů a její značení*. [online].[cit.24.února 2008].Dostupné na WWW : < http://www.csmarketing.cz/znalost_viskozita.asp>.
- [8] ČECH, P. *Analýza procesu provozního opotřebení olejů pro železniční vozidla metodou FTIR spektrometrie*. Diplomová práce, Univerzita Pardubice, 2002.
- [9] TROYER, D., FITCH, J. *Oil analysis basics*. Noria Corporation, 2001.
- [10] MELOUN, Milan, MILITKÝ, Jiří. *Kompendium statistického zpracování dat : Metody a řešené úlohy*. 2. přeprac. a rozš. vyd. Praha : Academia, 2006. 984 s., + 1 CD. ISBN 80-200-1396-2.
- [11] MELOUN, Milan, MILITKÝ, Jiří, HILL, Martin. *Počítačová analýza vícerozměrných dat v příkladech*. 1. vyd. Praha : Academia, 2005. 456 s., + 1 CD. ISBN 80-200-1335-0.
- [12] MELOUN, Milan, MILITKÝ, Jiří. *Statistická analýza experimentálních dat*. 1. vyd. Praha : Academia, 2004. 954 s., + 1 CD. ISBN 80-200-1254-0.
- [13] Bečka, J.: *Tribologie*. Praha: Vydavatelství ČVUT, 1997.
- [14] Hrdlička, Z.: *Automobilové kapaliny*. Praha, Grada Publishing, 1996.
- [15] Štěpina, V., Veselý, V.: *Maziva v tribologii*. Bratislava: Veda, 1985.

- [16] JOSEF, LIPPAY. *Tribologická diagnostika motoru těžkých terénních nákladních automobilů TATRA 815 provozovaných s olejovou náplní OA - M6 - ADS II*. Brno, 1991. 151 s. Vojenská akademie v Brně. Vedoucí dizertační práce Jiří Stodola.
- [17] *Měření viskozity*. [online].[cit.10.února 2008].Dostupné na WWW :
<http://vydavatelstvi.vscht.cz/knihy/uid_es-001/hesla/mereni_viskozity.html>.
- [18] *Vlastnosti motorových olejů – Palivo v oleji*. [online].[cit.20.března 2008].Dostupné na WWW :
<http://www.oleje.cz/index.php?left=main&page=zajimavosti_komentare>.
- [19] JETMAR,J. *Tribotechnická diagnostika automobilů*. Brno. Vojenská akademie v Brně, 1993. S-572.
- [20] HEBÁK, P, HUSTOPECKÝ, J. *Vícerozměrné statistické metody s aplikacemi*. 1. vyd. Praha : SNTL, 1987. 452 s. ISBN 80-03-00534-5.
- [21] STODOLA, J. *Možnosti modelování a vyhodnocování degračních procesů spalovacích motorů*. Sborník přednášek 7. ročníku semináře REOTRIB 2001 – zjišťování kvality paliv a maziv. Velké Losiny, 22. – 25. května 2001. Ostrava: ReoTrade; Praha: VŠCHT, Ústav technologie ropy a petrochemie, 2001, str. 101. ISBN 80-7080-426-2.

SEZNAM OBRÁZKŮ

<i>Obr. 1 Schéma kapilárního viskozimetru měřícího kinematickou viskozitu ve svislé poloze [17]</i>	9
<i>Obr. 2 Složení motorových olejů [4]</i>	13
<i>Obr. 3 Kapkový test [5]</i>	15
<i>Obr. 4 Znárodnění efektu škálování: a) původní data, b) sloupcové centrování, c) sloupcová standardizace, d) autoškálování [11]</i>	18
<i>Obr. 5 Schéma maticových výpočtů modelu hlavních komponent [10]</i>	23
<i>Obr. 6 Krabicový graf standardizovaných dat</i>	27
<i>Obr. 7 Histogramy a maticový graf korelace znaků</i>	29
<i>Obr. 8 Hvězdičky (polygony) znaků pro každý objekt</i>	30
<i>Obr. 9 Cattelův indexový graf úpatí vlastních čísel</i>	31
<i>Obr. 10 Graf komponentních zátěží PC1 a PC2</i>	32
<i>Obr. 11 Graf komponentních zátěží PC1 a PC3</i>	32
<i>Obr. 12 Graf komponentních zátěží PC2 a PC3</i>	33
<i>Obr. 13 Cattelův indexový graf úpatí vlastních čísel</i>	34
<i>Obr. 14 Graf komponentních zátěží PC1 a PC2</i>	36
<i>Obr. 15 Graf komponentních zátěží PC1 a PC3</i>	36
<i>Obr. 16 Graf komponentních zátěží PC2 a PC3</i>	36
<i>Obr. 17 Rozptylový diagram komponentního skóre PC1 a PC2 při popisu vzorků indexy</i>	38
<i>Obr. 18 Rozptylový diagram komponentního skóre PC1 a PC3 při popisu vzorků indexy</i>	38
<i>Obr. 19 Rozptylový diagram komponentního skóre PC1 a PC2 při popisu vzorků čísla Tatry</i> 39	
<i>Obr. 20 Rozptylový diagram komponentního skóre PC1 a PC3 při popisu vzorků čísla Tatry</i> 39	

SEZNAM TABULEK

<i>Tab. 1</i> Viskozitní klasifikace SAE [7]	10
<i>Tab. 2</i> Popisné statistiky	28
<i>Tab. 3</i> Korelační matice znaků	29
<i>Tab. 4</i> Vlastní čísla	31
<i>Tab. 5</i> Vlastní čísla	34
<i>Tab. 6</i> Vlastní vektory	35
<i>Tab. 7</i> Komponentní zátěže	35

SEZNAM ZKRATEK A SYMBOLŮ

TTD	Tribotechnická diagnostika
VI	Viskozitní index
SAE	Society of Automotive Engineers (viskozitní klasifikace)
CCS	Cold Cranking Simulator (startovatelnost za nízkých teplot)
HTHS	High Temperature High Sudar (vysokoteplotní viskozita)
CO₂	Oxid uhličitý
EU	Evropská Unie
KOH	Hydroxid draselný
NO_x	Oxidy dusíku
AAS	Atomová absorpční spektrometrie
AES	Atomová emisní spektrometrie
ČSA	Československá armáda
TBN	Total Base Number (celkové číslo alkality)
TAN	Total Acid Number (celkové číslo kyselosti)
BV	Bod vzplanutí
CCT	Conradsonův karbonizační zbytek
Cu	Měď
CZ	Celkové znečištění
Fe	Železo
Pb	Olovo
PMK	Celkový proběh vozidla
POK	Proběh olejové náplně
ID	Identifikační číslo
PCA	Principal component analysis (analýza hlavních komponent)
FA	Factor analysis (faktorová analýza)
CLU	Cluster analysis (shluková analýza)
MDS	Multidimensional scalling (vícerozměrné škálování)
CA	Correspondence analysis (korespondenční analýza)
EDA	Exploratory data analysis (exploratorní analýza)
atd.	a tak dále
aj.	a jiné
tj.	to jest
tzv.	tak zvaně

SEZNAM PŘÍLOH

Příloha č. 1 Zdrojová matice dat

Příloha č. 2 Hodnoty kritérií pro oblast mezního stavu

Zdrojová matice dat

Tabulka Zdrojová matice dat

ID	Tatra	Stav	Kód stavu	PMK	POK	Fe	Cu	Pb	CCT	CZ	TBN	TAN	KV	BV
1	1	Provoznuschopný	0.1	41822	1420	22.7	1.7	15.8	1.48	52.0	3.48	2.95	11.20	223
2	1	Provoznuschopný	0.1	42382	1980	27.2	1.8	12.2	1.45	57.0	2.24	3.15	11.20	219
3	1	Provoznuschopný	0.1	42928	2526	33.9	2.4	12.6	1.48	63.0	2.69	3.84	11.60	224
4	1	Provoznuschopný	0.1	43651	3249	30.8	3.0	11.7	1.69	60.0	2.08	3.76	11.90	227
5	1	Provoznuschopný	0.1	44180	3778	30.3	3.0	12.0	1.60	60.0	1.74	4.15	11.90	237
6	1	Provoznuschopný	0.1	44639	4237	31.4	2.9	11.9	1.57	60.0	1.93	3.99	11.90	229
7	1	Provoznuschopný	0.1	45099	4697	31.2	2.8	12.0	1.54	64.0	1.83	4.18	12.00	237
8	1	Provoznuschopný	0.1	45637	5235	34.5	3.6	11.4	1.56	67.0	2.10	3.45	11.90	231
9	1	Provoznuschopný	0.1	46186	5784	33.7	3.5	11.8	1.66	67.0	2.74	3.31	11.90	233
10	1	Provoznuschopný	0.1	47230	726	32.9	3.7	10.8	1.55	66.0	3.65	3.13	11.90	226
11	1	Provoznuschopný	0.1	47788	1284	46.1	3.9	8.9	1.84	72.0	3.45	3.33	12.00	218
12	1	Provoznuschopný	0.1	48331	1827	45.6	4.0	8.8	1.81	70.0	4.98	3.17	12.00	220
13	1	Provoznuschopný	0.1	48929	2425	45.4	3.8	8.8	1.70	71.0	2.82	3.28	11.90	218
14	1	Provoznuschopný	0.1	49432	2928	41.0	3.5	8.1	1.70	66.0	2.72	3.02	11.90	221
15	1	Provoznuschopný	0.1	49960	3456	49.9	4.1	8.8	1.76	70.0	2.83	3.29	12.00	224
16	1	Provoznuschopný	0.1	50765	4261	38.9	3.3	7.2	1.73	69.0	4.06	3.18	11.90	223
17	1	Provoznuschopný	0.1	51378	4874	42.2	4.0	7.0	1.73	70.0	3.56	3.33	12.10	223
18	1	Provoznuschopný	0.1	51925	5421	40.5	3.7	7.9	1.73	70.0	2.56	3.37	12.00	222
19	1	Provoznuschopný	0.1	52855	343	17.3	1.2	1.7	1.52	67.0	4.22	2.51	11.95	217
20	1	Provoznuschopný	0.1	53360	848	30.1	2.0	2.2	1.52	67.0	3.61	2.51	11.95	217
21	1	Provoznuschopný	0.1	54122	1610	35.4	1.9	2.0	1.46	68.0	3.21	2.43	11.80	221
22	3	Provoznuschopný	0.3	22918	4930	27.7	3.4	7.1	1.53	63.0	3.04	4.35	12.09	216
23	3	Provoznuschopný	0.3	23725	5737	28.6	3.1	6.7	1.58	63.0	3.07	3.91	11.80	235
24	4	Provoznuschopný	0.4	4620	4120	41.4	5.2	4.1	1.32	57.0	2.84	3.49	11.26	220
25	4	Provoznuschopný	0.4	6001	5501	60.1	9.3	4.6	1.46	60.0	2.33	2.36	11.06	211
26	4	Provoznuschopný	0.4	6545	544	40.6	8.8	4.4	1.40	60.0	4.06	2.58	11.20	220
27	5	Provoznuschopný	0.5	35558	58	31.8	7.2	4.9	1.48	52.0	8.05	1.63	12.00	238
28	5	Provoznuschopný	0.5	36527	969	34.1	6.5	1.4	1.51	56.0	7.42	2.11	11.90	227
29	5	Provoznuschopný	0.5	37554	1996	31.5	5.8	0.6	1.49	58.0	6.51	3.86	12.00	231
30	5	Provoznuschopný	0.5	39596	4038	33.5	5.4	0.7	1.55	54.0	6.97	3.15	12.20	231
31	5	Provoznuschopný	0.5	40535	4977	40.6	4.8	5.8	1.56	56.0	6.62	3.43	12.20	231
32	5	Provoznuschopný	0.5	41539	5981	39.8	3.7	4.1	1.55	54.0	6.69	3.24	12.20	231
33	5	Mezní	1.5	45546	4007	44.0	3.7	5.5	1.66	66.0	2.51	3.61	13.30	234
34	5	Provoznuschopný	0.5	46537	4998	42.7	4.2	5.9	1.73	65.5	2.91	3.64	12.00	220
35	5	Mezní	1.5	47685	6146	94.9	4.9	6.0	2.32	72.0	1.66	3.56	12.00	220
36	5	Provoznuschopný	0.5	48515	830	68.0	5.0	4.8	1.19	67.0	2.12	3.42	11.80	219
37	5	Provoznuschopný	0.5	50421	2376	39.9	5.0	5.9	1.37	61.0	2.44	2.77	12.10	221
38	5	Provoznuschopný	0.5	51418	3736	32.0	4.8	6.4	1.73	72.0	2.68	3.30	12.10	226
39	6	Provoznuschopný	0.6	22483	4525	24.4	1.9	4.9	1.34	52.0	3.57	3.57	11.40	228
40	6	Provoznuschopný	0.6	24748	888	7.8	0.6	0.6	0.80	40.0	5.51	2.11	11.90	239

Zdrojová matice dat

ID	Tatra	Stav	Kód stavu	PMK	POK	Fe	Cu	Pb	CCT	CZ	TBN	TAN	KV	BV
41	6	Provoznuschopný	0.6	26477	2617	13.4	0.9	2.6	0.91	49.0	4.66	2.20	11.60	236
42	7	Provoznuschopný	0.7	37452	4876	20.2	1.8	4.5	1.36	48.0	3.76	3.74	11.30	216
43	8	Provoznuschopný	0.8	27645	3665	54.7	5.4	10.0	1.72	60.0	2.00	4.80	11.51	222
44	8	Provoznuschopný	0.8	29018	5038	56.9	6.4	10.8	1.76	63.0	2.15	4.60	11.42	211
45	9	Provoznuschopný	0.9	1577	948	16.8	3.1	2.1	1.29	41.0	4.68	2.56	12.61	238
46	9	Mezní	1.9	2050	1421	713.0	20.7	18.5	1.87	65.0	4.16	3.36	11.65	218
47	9	Mezní	1.9	2511	1882	564.0	18.7	17.3	1.90	66.0	4.28	3.08	11.57	238
48	9	Mezní	1.9	3671	3042	435.0	17.8	17.4	1.97	65.0	4.26	3.16	11.62	220
49	9	Provoznuschopný	0.9	4168	497	48.5	9.3	5.2	1.38	58.0	5.33	2.58	11.70	222
50	9	Provoznuschopný	0.9	4677	1006	54.8	6.7	3.1	1.44	58.0	3.64	2.65	11.65	218
51	9	Provoznuschopný	0.9	5220	1549	46.4	7.0	3.0	1.46	62.0	3.44	3.50	11.50	225
52	10	Provoznuschopný	0.10	1470	970	48.6	10.7	6.7	1.90	66.0	2.71	4.42	11.77	220
53	10	Provoznuschopný	0.10	2000	530	33.1	5.6	5.2	1.61	69.0	3.89	3.04	12.16	234
54	10	Provoznuschopný	0.10	2500	1030	26.4	5.6	5.6	1.71	70.0	3.18	3.50	12.04	224
55	10	Provoznuschopný	0.10	3012	1542	26.3	5.3	5.6	1.60	69.0	3.21	3.61	11.91	219
56	10	Provoznuschopný	0.10	4005	2535	25.3	5.6	4.8	1.56	69.0	2.82	3.64	12.25	233
57	10	Provoznuschopný	0.10	4505	3035	34.1	9.0	5.8	1.57	69.0	2.18	3.88	12.04	228
58	10	Provoznuschopný	0.10	5540	4070	32.9	9.0	6.7	1.56	69.0	2.24	3.93	12.21	228
59	11	Provoznuschopný	0.11	43707	990	37.0	6.6	3.2	1.39	58.0	4.75	2.71	11.77	234
60	11	Provoznuschopný	0.11	44770	1890	36.2	6.6	3.2	1.40	58.0	4.89	2.41	11.49	226
61	11	Provoznuschopný	0.11	45314	2434	42.6	6.5	3.4	1.46	60.0	3.12	2.83	11.57	227
62	11	Mezní	1.11	45762	2882	494.0	19.0	17.4	1.94	68.0	2.10	3.72	11.34	216
63	12	Provoznuschopný	0.12	6247	225	29.4	5.3	3.6	1.39	64.5	5.03	3.84	11.30	233
64	12	Provoznuschopný	0.12	6750	758	24.5	4.3	4.9	1.45	64.5	3.28	4.22	11.20	221
65	12	Provoznuschopný	0.12	7274	1282	27.0	4.8	5.9	1.45	66.5	3.49	3.75	10.90	234
66	13	Provoznuschopný	0.13	10318	4295	33.8	8.5	6.2	1.60	69.5	4.71	5.13	10.99	226
67	13	Provoznuschopný	0.13	10800	4777	42.5	9.6	6.4	1.70	72.0	4.27	4.76	11.02	217
68	13	Provoznuschopný	0.13	11386	5363	58.3	12.1	6.8	1.67	75.0	4.15	4.66	10.90	215
69	14	Provoznuschopný	0.14	11295	5260	39.2	4.9	4.5	1.61	68.0	3.39	4.95	11.34	230
70	15	Provoznuschopný	0.15	9590	3570	43.8	13.6	6.8	1.61	68.0	2.92	3.76	11.70	237
71	15	Provoznuschopný	0.15	10120	4100	41.0	11.9	7.5	1.64	69.5	2.57	4.43	11.70	235
72	15	Provoznuschopný	0.15	10615	4595	44.2	12.0	6.2	1.75	70.5	2.51	4.63	11.50	231
73	15	Provoznuschopný	0.15	11120	5100	55.6	13.5	5.5	1.66	71.0	3.11	4.61	11.48	231
74	15	Provoznuschopný	0.15	11620	5600	65.2	14.1	6.3	1.69	73.0	2.87	4.23	11.12	220
75	15	Provoznuschopný	0.15	12120	6100	63.4	13.9	5.2	1.79	73.0	2.61	4.33	11.20	229
76	15	Provoznuschopný	0.15	12620	500	52.3	12.6	5.3	1.51	74.0	4.86	3.97	12.21	228
77	15	Provoznuschopný	0.15	13120	1000	56.3	13.8	5.5	1.60	76.0	4.28	4.16	11.98	224
78	15	Provoznuschopný	0.15	13620	1500	58.7	15.5	5.5	1.56	74.0	4.51	4.07	11.43	220
79	15	Provoznuschopný	0.15	14120	2000	53.7	13.8	5.2	1.60	74.0	4.12	4.30	11.11	219
80	16	Provoznuschopný	0.16	21546	1046	14.2	1.1	1.8	1.44	67.0	5.07	2.99	11.11	221

Hodnoty kritérií pro oblast mezního stavu

Příloha č. 2 obsahuje výstražné hodnoty, určující oblast mezního stavu. Hodnota je horní hranicí pro parametry Fe, Cu, Pb, CCT, TAN a dolní hranicí pro parametry TBN a CZ. Parametr KV má dolní hranici 10,50 a horní hranici 13,10.

Tabulka Hodnoty kritérií pro oblast mezního stavu

Ukazatel	Výstražná hodnota
TTD	
Fe	72,80
Cu	15,90
Pb	13,70
CCT	2,12
TBN	1,10
TAN	5,62
KV	10,50 13,10
BV	202,50
CZ	89,00