



Stanovení degradace hydraulického oleje
Diplomová práce

Vedoucí práce:
Ing. Vojtěch Kumbár, Ph.D.

Vypracoval:
Bc. Tomáš Cupal

ČESTNÉ PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci: *Stanovení degradace hydraulického oleje* vypracoval samostatně a veškeré použité prameny a informace uvádím v seznamu použité literatury. Souhlasím, aby moje práce byla zveřejněna v souladu s § 47b zákona č. 111/1998 Sb. o vysokých školách ve znění pozdějších předpisů a v souladu s platnou *Směrnicí o zveřejňování vysokoškolských závěrečných prací*.

Jsem si vědom, že se na moji práci vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., autorský zákon, a že Mendelova univerzita v Brně má právo na uzavření licenční smlouvy a užití této práce jako školního díla podle § 60 odst. 1 autorského zákona.

Dále se zavazuji, že před sepsáním licenční smlouvy o využití díla jinou osobou (subjektem) si vyžádám písemné stanovisko univerzity, že předmětná licenční smlouva není v rozporu s oprávněnými zájmy univerzity, a zavazuji se uhradit případný příspěvek na úhradu nákladů spojených se vznikem díla, a to až do jejich skutečné výše.

V Brně dne:.....

.....
podpis

PODĚKOVÁNÍ

Na tomto místě bych rád poděkoval panu Ing. Vojtěchu Kumbárovi, Ph.D. za odborné vedení mé diplomové práce a cenné připomínky a rady při jejím zpracovávání.

Děkuji také firmě Forest – Agro s.r.o. a zejména panu Ing. Miroslavu Blažejovi za umožnění odebrání vzorků oleje z firemního traktoru.

ABSTRAKT

Tato diplomová práce se zabývá degradací hydraulického oleje provozovaného v hydraulické soustavě traktoru. V první části je vytvořen literární přehled týkající se hydraulických olejů, jejich rozdělení, vlastností a výroby. Experimentální část se přímo zabývá degradací hydraulického oleje. Je zde popsán způsob odběru vzorků, u kterých jsou poté měřeny důležité vlastnosti prokazující postupnou degradaci oleje. Těmito vlastnostmi jsou hustota, viskozita a množství chemických prvků obsažených v oleji. V poslední části práce jsou naměřené výsledky zpracovány v přehledných tabulkách a grafech. Výsledky jsou dále vyhodnoceny a je k nim provedena diskuze.

Klíčová slova: univerzální olej, tribotechnická diagnostika, hustota, viskozita

ABSTRACT

This thesis deals with the degradation of hydraulic oil used in the hydraulic circuit of tractor. In the first part of thesis is created a literary overview about hydraulic oils, their distribution, properties and production. The experimental part deals with degradation of hydraulic oil. There is described a process of taking samples which are then measured to demonstrate the important features of the gradual degradation of the oil. These properties are density, viscosity and amount of chemical elements contained in the oil samples. In the last part of thesis the measured results are processed in tables and graphs. The results are further evaluated and accompanied by the discussion.

Key words: universal oil, tribotechnical diagnostics, density, viscosity

OBSAH

1	ÚVOD.....	8
2	CÍL PRÁCE.....	9
3	ZÁKLADY TRIBOLOGIE A TRIBOTECHNIKY.....	10
3.1	Tření.....	11
3.2	Opotřebení.....	12
3.3	Viskozita.....	14
3.3.1	Tečné napětí.....	14
3.3.2	Dynamická viskozita.....	15
3.3.3	Kinematická viskozita.....	15
3.3.4	Viskózní index.....	15
4	VÝROBA A TYPY HYDRAULICKÉHO OLEJE.....	17
4.1	Klasifikace hydraulických olejů.....	17
4.2	Základové oleje.....	19
4.2.1	Minerální oleje.....	19
4.2.2	Syntetické oleje.....	21
4.2.3	Částečně syntetické oleje.....	21
4.3	Těžkozápalné kapaliny.....	22
4.4	Ekologicky příznivé kapaliny.....	24
4.4.1	Kapaliny HETG.....	25
4.4.2	Kapaliny HEPG.....	25
4.4.3	Kapaliny HEES.....	25
4.4.4	Vlivy ekologických kapalin na systém těsnění.....	26
4.5	Aditivace.....	27
4.5.1	Aditiva s povrchovým působením.....	27
4.5.2	Aditiva zlepšující vlastnosti oleje.....	28
4.5.3	Aditiva chránící olej.....	28
5	DŮLEŽITÉ UKAZATELE PŘI ANALÝZE HYDRAULICKÉHO OLEJE.....	30
5.1	Barva a vzhled oleje.....	30
5.2	Kinematická viskozita při 40 °C.....	30
5.3	Číslo kyselosti.....	31
5.4	Koncentrace otěrových kovů.....	31
5.5	Obsah vody.....	32
5.6	Pěnovost.....	32

5.7	Degradace oleje.....	33
5.8	Hodnocení mechanických nečistot a počtu částic.....	33
5.9	Analýza a klasifikace částic opotřebení.....	35
6	MATERIÁL A METODIKA.....	37
6.1	Zkoumaný olej.....	37
6.2	Sledovaný traktor.....	37
6.2.1	Odběr vzorků.....	38
6.3	Použité měřicí přístroje.....	39
6.3.1	Hustoměr Densito 30PX.....	39
6.3.2	Rotační viskozimetr Anton Paar DV-3P.....	41
6.3.3	Atomový emisní spektrometr Spectroil Q100.....	43
7	VÝSLEDKY A DISKUZE.....	45
7.1	Hustota.....	45
7.2	Viskozita.....	46
7.3	Atomová emisní spektrometrie.....	49
8	ZÁVĚR.....	53
9	POUŽITÁ LITERATURA.....	55
10	SEZNAM OBRÁZKŮ.....	59
11	SEZNAM TABULEK.....	60

1 ÚVOD

Od jakéhokoliv systému se vyžaduje, aby plnil svou funkci s co možná nejvyšší životností, nenáročnou údržbou, provozní bezpečností a bez nepříznivých vlivů na životní prostředí. To samozřejmě platí i pro hydraulické systémy strojů.

Mezi nejdůležitější funkce hydraulického oleje dle (Dobeš, 2012) patří:

- minimalizace tření mazáním třecích ploch
- přenos tlaku a pohybové energie
- odvod a rozptýlení tepla
- dobrá viskozitně-teplotní závislost
- ochrana součástí ze železných i neželezných kovů před korozí
- kompatibilita s kovy a elastomery
- vysoká tepelná stabilita a odolnost proti stárnutí
- dobré odlučování vody a vzduchu
- nízká pěnovost a dobrá smyková stabilita

Zjišťování stavu používaného oleje v provozních podmínkách nám dává důležitou informaci o možnosti dalšího použití daného oleje. Dříve byl olej vyměňován po uplynutí závazně platných výměnných lhůt bez ohledu na jeho skutečný stav. V případě hydraulických olejů byl výrobcem tento výměnný interval stanoven často na dobu jednoho roku nebo 2 000 motohodin.

Pravidelným odebíráním a analýzou vzorků hydraulického oleje je možné zjistit, v jakém stavu se olej aktuálně nachází. Účelné využití tribotechnické diagnostiky tedy přináší možnost efektivního hospodaření s olejovými náplněmi. Nedochází pak k případům, kdy je předčasně vyměňován olej, který ještě mohl plnit svou funkci, nebo naopak při striktním dodržování výměnných lhůt je vyměňován nadměrně opotřebený olej, který již svými vlastnostmi nesplňuje požadavky na něj kladené, což může vést až k poškození stroje. Tento systém se vyplácí zejména ve větších podnicích s početnějším vozovým parkem.

Prostřednictvím analýzy stavu oleje lze rovněž diagnostikovat hydraulický systém a odhalit případné poruchy. V případě, kdy hydraulický olej již neobsahuje žádná aditiva a nachází se v něm velké množství nečistot a otěrových částic, stává se nebezpečným pro celý hydraulický okruh a je potřeba ho vyměnit.

2 CÍL PRÁCE

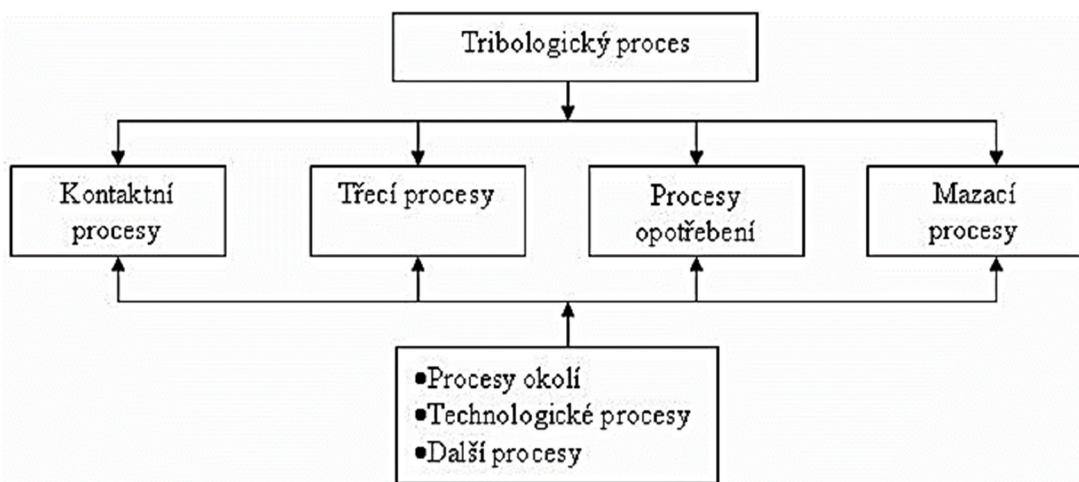
Tato diplomová práce se zabývá popisem a stanovením provozní degradace hydraulického oleje v hydraulickém okruhu traktoru.

Cílem teoretické části práce je vytvořit literární přehled týkající se hydraulických olejů, jejich vlastností, použití, výroby a klasifikace. Dále zde bude věnována pozornost aditivům obsaženým v olejích, těžkozápalným hydraulickým kapalinám a biologicky odbouratelným hydraulickým olejům.

Praktická část se bude zabývat analýzou hydraulického oleje Total Multagri Super 10W-30 používaného v traktoru Same Diamond 265. U vzorku nového, částečně degradovaného a degradovaného oleje bude provedeno měření hustoty digitálním hustoměrem Densito 30PX, měření viskozity rotačním viskozimetrem Anton Paar DV 3P a pomocí atomového emisního spektrometru Spectroil Q100 bude stanoven obsah prvků rozpuštěných či nanesených v oleji. Závěrem bude provedeno vyhodnocení naměřených hodnot, diskuze a případné porovnání výsledků.

3 ZÁKLADY TRIBOLOGIE A TRIBOTECHNIKY

Tribologie je věda, která se zabývá chováním vzájemně se dotýkajících povrchů tuhých těles při jejich relativním pohybu nebo při pokusu o vzájemný pohyb. Vzájemnou interakci povrchů doprovází tření, jehož důsledkem je opotřebení. Důsledky tření lze snížit mazáním, jehož úkolem je zabránit bezprostřednímu styku povrchů. (Oleje.cz, 2017d)



Obr. 1: Vzájemná vazba tribologických procesů (Helebrant, 2008)

Jedním z oborů tribologie je tribotechnika. Ta se zabývá praktickým řešením otázek týkajících se tření, opotřebení a mazání. Tribotechnika tedy zahrnuje:

- maziva a jejich zkoušení
- vědecké základy pro tření a opotřebení
- materiály pro třecí dvojice
- výpočet, konstrukci a optimalizaci třecích dvojic
- způsoby mazání a mazací zařízení
- měřicí a kontrolní metody pro tribotechnické pochody
- spolehlivost a diagnostiku (tribodiagnostiku) konstrukčních součástí a skupin
- speciální technologické postupy vedoucí ke zvýšení odolnosti proti opotřebení
- organizaci techniky mazání v provozu (Tribotechnika.cz, 2014)

Tribotechnika v současné době nabývá na důležitosti také z ekonomického hlediska. Její správnou aplikací lze dosáhnout významných úspor v řadě oblastí, jako je např.:

- snížení spotřeby energie k pohonu strojů

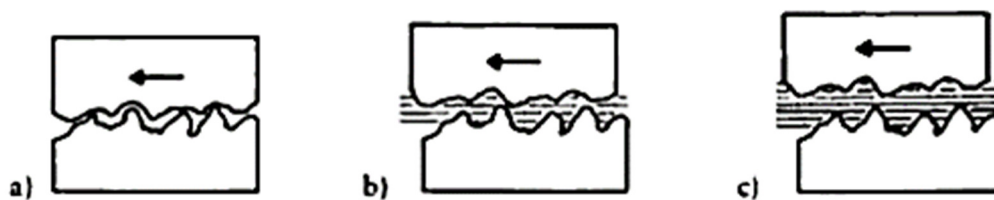
- prodloužení životnosti strojů a zařízení
 - snížení prostojů vzniklých v důsledku poruch a následných oprav
 - snížení nákladů na údržbu a opravy strojů
 - snížení investičních nákladů
 - zvýšení výrobní přesnosti strojů
 - snížení nákladů potřebných k zajištění vhodných maziv (jejich efektivní volbou)
- (Oleje.cz, 2017d)

3.1 Tření

Tření je proces vázaný na vzájemný relativní pohyb dvou dotýkajících se prvků tribologického systému. Znamá definice uvádí, že tření je odpor proti pohybu vznikající mezi dvěma k sobě přitlačovanými tělesy v oblasti dotyku jejich povrchů v tangenciálním směru. Tato definice charakterizuje tzv. vnější tření, ale nezahrnuje podstatu tření vnitřního, které probíhá v materiálových vrstvách téhož třecího tělesa. Lze se tedy setkat i s definicí, která popisuje tření jako ztrátu mechanické energie na začátku, v průběhu nebo na konci relativního pohybu navzájem se dotýkajících materiálových oblastí. (Helebrant a kol., 2001)

Při mazání třecích ploch se můžeme setkat se třemi druhy tření:

- **Suché tření** – tělesa se dotýkají absolutně suchými povrchy, přičemž dochází k silnému opotřebení a zvýšení teploty
- **Smíšené tření (polosuché)** – mezi třecími plochami se nachází mazivo, přičemž se navzájem mohou dotýkat pouze jednotlivé mikroskopické výčnělky na povrchu těles. Dochází zde k malému otěru.
- **Kapalinové tření (mokré)** – třecí plochy obou těles jsou navzájem úplně oddělena kapalinou. K otěru už zde prakticky nedochází a zvyšování teploty je minimální. (Hromádko, 2011)



Obr. 2: Druhy tření (Hromádko, 2011)

a) suché tření, b) smíšené tření, c) kapalinové tření

Podle stavu (skupenství) je možné rozdělit tření následovně:

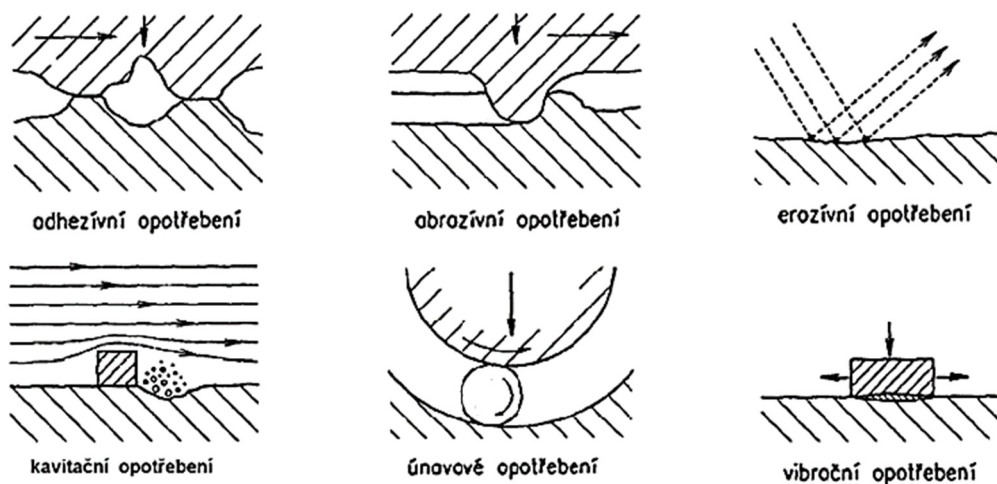
- **Tření pevných těles** – dotykové materiály se nachází v pevném skupenství a příčina jejich tření vyplývá z interakce povrchů, které se vzájemně dotýkají a mají charakteristické vlastnosti adhezních vrstev vytvářených na základním materiálu při mechanickém a molekulárním působení.
- **Kapalinové tření** – vrstva materiálu v níž tření probíhá má vlastnosti kapaliny. Smykové napětí vznikající při relativním pohybu se odvíjí od viskozity mezilátky a představuje odpor proti pohybu. Mluvíme zde o existenci hydrodynamické nebo hydrostatické vrstvy, v níž probíhá třecí proces.
- **Plynové tření** – jedná se o obdobu kapalinového tření s tím, že vrstva mezilátky má vlastnosti plynu. Mluvíme zde tedy o aerodynamické nebo aerostatické tlakové oblasti.
- **Plazmatické tření** – vrstva, v níž probíhá třecí proces, má vlastnosti plazmy (druh vysoko ionizovaného plynu). (Helebrant a kol., 2001)

3.2 Opotřebení

Opotřebení je nežádoucí změna povrchu součástí důsledkem působení mechanických vlivů, případně doprovázená chemickým, elektrochemickým, elektrickým nebo jiným působením. Jedná-li se pouze o mechanické opotřebení, užívá se pojem otěr.

Existuje mnoho příčin, které vyvolávají opotřebení strojních součástí. Zjištěním druhu opotřebení můžeme soudit jeho příčinu, což je nezbytné pro odstranění následků nežádoucího opotřebení. Pro tento účel je nutné znát základní druhy a charakteristiky opotřebení. (Vlk, 2006)

- **Adhezivní opotřebení** – při relativním pohybu funkčních povrchů dochází k jejich dotyku, k porušení povrchových vrstev, což vede k přenosu materiálu z jednoho povrchu na druhý, k uvolňování a vytrhávání částic materiálu. Tento proces lze ovlivnit přítomností maziva mezi funkčními povrchy. Intenzivní forma adhezivních účinků se nazývá zadírání, přičemž typickým projevem poškození je jemný adhezivní oděr.
- **Abrazivní opotřebení** – měkčí povrch jednoho tělesa je rozrýván a řezán tvrdším povrchem druhého tělesa. Tentýž účinek může nastat působením volných částic z oddělených povrchů či vniknutých nečistot z okolí. Typickým poškozením jsou rýhy.
- **Erozivní opotřebení** – povrch těles je poškozován pevnými částicemi unášenými proudem kapaliny nebo plynu. Porušení materiálu bývá nerovnoměrné a výrazně ovlivněné charakterem částic a rychlostí jejich pohybu.
- **Korozivní opotřebení** – vyskytuje se při práci třecí dvojice v aktivním prostředí při vniknutí kyslíku z okolí, kyseliny, vody apod.
- **Únavové opotřebení** – při opakujícím se časově proměnlivém namáhání povrchové vrstvy se vytváří povrchové a podpovrchové mikrotrhliny, které se šíří a spojují, až začnou uvolňovat částice materiálu z povrchu, což vede ke vzniku důlků (lze se setkat s označením dolíčkovité opotřebení).
- **Kavitační opotřebení** – poškození povrchu v oblasti zanikání kavitačních bublin v kapalině, což způsobuje hydrodynamické rázy a s tím spojené vytrhávání částic z povrchu.
- **Vibrační opotřebení** – oddělování částic materiálu v místech kmitavých tangenciálních posuvů funkčních ploch při jejich současném zatížení normálními silami. (Helebrant 2008)



Obr. 3: Základní druhy opotřebení (Helebrant, 2008)

3.3 Viskozita

Viskozita je míra vnitřního tření tekutiny, které vzniká mezi dvěma vrstvami pohybujícími se různou rychlostí. Jiná definice říká, že viskozita je odpor, kterým tekutina působí proti silám, které se snaží posunout její nejmenší částice. Projevuje se tečným napětím na stykové ploše dvou vrstev, kdy se rychlejší vrstva snaží urychlovat tu pomalejší a naopak. Zásadně tedy ovlivňuje tokové vlastnosti látek. Rozeznáváme viskozitu dynamickou η kinematickou ν . U většiny tekutin závisí dynamická i kinematická viskozita na teplotě a tlaku. Při konstantním tlaku se s rostoucí teplotou viskozita snižuje z důvodu snižování přitažlivých sil mezi molekulami tekutiny. Pro hydraulický mechanismus může být důsledkem snížení viskozity menší odpor kapaliny proti proudění (pokles tlakových ztrát), snadnější protlačení kapaliny netěsnostmi (růst průtokových ztrát) či zhoršení mazání (klesá únosnost mazacího filmu). (Groda a Vítěz, 2009), (Dvořák, 2009)

3.3.1 Tečné napětí

Tečné napětí vzniká mezi jednotlivými vrstvami tekutiny, které se pohybují různou rychlostí (značíme τ). Dle Newtonova zákona viskozity je tečné napětí úměrné gradientu rychlosti se směrem kolmým na pohyb kapaliny (platí v případě proudění newtonovské kapaliny s laminárním tokem) a lze ho vypočítat podle vztahu:

$$\tau = \eta \cdot \frac{dv}{dy} \quad [Pa], \quad (3.1)$$

kde dv/dy je gradient rychlosti [s^{-1}] a η je dynamická viskozita [$Pa \cdot s$] často označovaná jako koeficient vnitřního tření. (Vlk, 2006)

3.3.2 Dynamická viskozita

Dle rovnice 3.1 je dynamická viskozita poměrem působícího tečného napětí a gradientu rychlosti. Lze ji tedy vyjádřit vztahem:

$$\eta = \tau / \frac{dv}{dy} \quad [N \cdot m^{-2} \cdot s] = [Pa \cdot s] \quad (3.2)$$

V soustavě jednotek SI vyjadřuje sílu, která je za potřebí k tomu, aby se vrstva o ploše $1 m^2$ posunula oproti stejné vrstvě ve vzdálenosti $1 m$ o $1 m$ ve vodorovné rovině. (Groda a Vítěz, 2009), (Vlk, 2006)

3.3.3 Kinematická viskozita

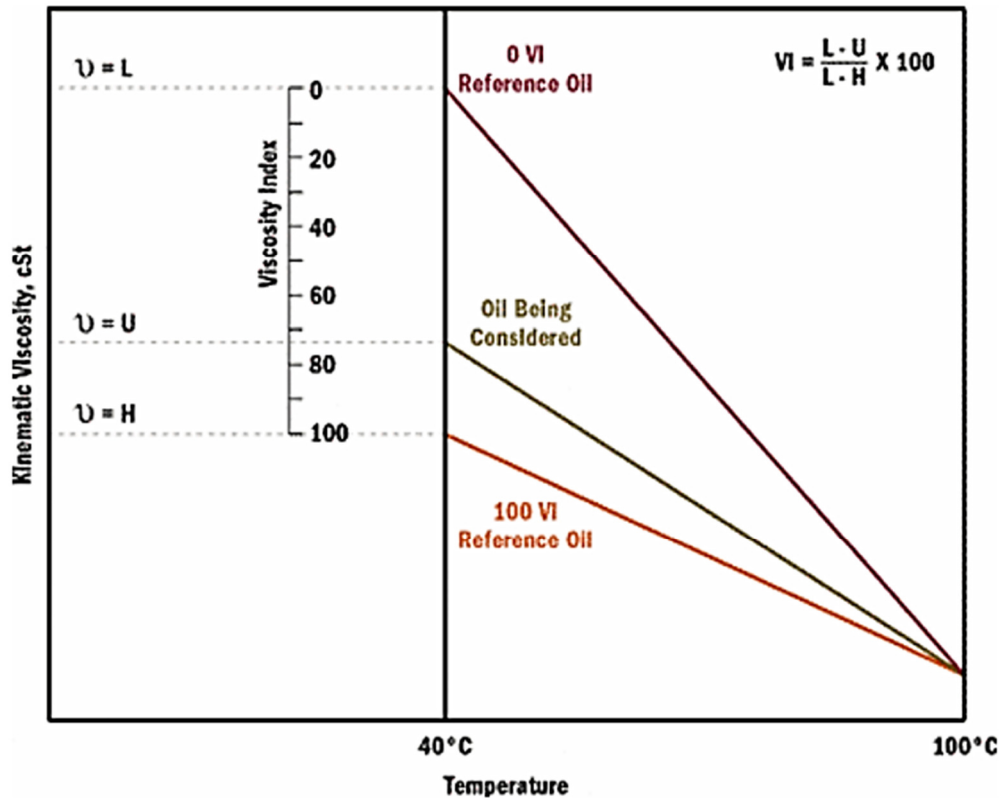
Podíl dynamické viskozity η a hustoty ρ při téže teplotě se označuje jako kinematická viskozita ν . Je definována jako míra odporu kapaliny k tečení způsobenému gravitační silou.

$$\nu = \frac{\eta}{\rho} \quad [m^2 \cdot s^{-1}], \quad (3.3)$$

kde ρ je hustota [kg/m^3]. V soustavě SI má kinematická viskozita rozměr [$m^2 \cdot s^{-1}$], ale v praxi se obvykle používá odvozená jednotka [$mm^2 \cdot s^{-1}$]. (Vlk, 2006)

3.3.4 Viskózní index

Jedním ze způsobů vyjádření závislosti viskozity na teplotě je viskózní index (VI). Kapalína se porovnává s porovnávacími oleji s viskózním indexem 0 a 100. Čím je viskózní index vyšší, tím je viskozita kapaliny méně závislá na teplotě, tudíž je i viskózní křivka plošší a kapalinu lze použít pro větší rozmezí teplot. Pro stanovení viskózního indexu je třeba znát hodnotu kinematické viskozity zkoušené kapaliny při $40 \text{ }^\circ\text{C}$ a při $100 \text{ }^\circ\text{C}$. Další hodnoty (L a H) se odečtou z tabulky. Viskózní index se vždy zaokrouhluje na celá čísla. (Pavlok, 1999), (Dvořák, 2009)



Obr. 4: Viskózní index oleje (Dvořák, 2009)

$$VI = \frac{L-U}{L-H} \cdot 100 \quad [-] \quad (3.4)$$

L je ve vzorci viskozita porovnávacího oleje s indexem 0 při 40 °C, jehož viskozita při 100 °C je stejná jako viskozita zkoumaného oleje při stejné teplotě. U je viskozita zkoumaného oleje při 40 °C a H je viskozita porovnávacího oleje s indexem 100 při 40 °C, jehož viskozita při 100 °C je stejná jako viskozita zkoušeného oleje při téže teplotě. Veškeré hodnoty dosazujeme v $mm^2 \cdot s^{-1}$. Vyjde-li hodnota viskózního indexu zkoumaného oleje vyšší než 100, je třeba jej přepočítat podle vztahu:

$$VI = \frac{10^N - 1}{0,00715} + 100 \quad [-] \quad (3.5)$$

N je zde definováno jako $N = \frac{\log H \log U}{\log Y}$, kde Y je hodnota kinematičké viskozity zkoumaného oleje při 100 °C. (Dvořák, 2009)

4 VÝROBA A TYPY HYDRAULICKÉHO OLEJE

Historicky první kapalinou, která našla využití v hydraulických systémech byla voda. Až počátkem 20. století se zde objevuje minerální olej. Jak ukazuje tabulka 1, minerální olej a voda mají řadu protichůdných vlastností. (Pavlok, 1999)

Tab. 1: Protichůdné vlastnosti minerálního oleje a vody (Pavlok, 1999)

Vlastnost	Olej	Voda
Vhodná viskozita	1	0
Mazací schopnost	1	0
Antikorozní působení	1	0
Hořlavost	0	1
Ekologická nezávadnost	0	1
Cena	0	1

V tabulce 1 je zobrazeno pouze několik důležitých vlastností zjednodušeně hodnocených známkou 1 nebo 0 (splňuje / nesplňuje). Z tohoto testu tedy vyplývá, že olej se použije tam, kde je vyžadována vhodná viskozita (s tím související vznik kapalinového tření u kluzných dvojic, nízké opotřebení a vysoká životnost), dobrá mazací schopnost (vysoké rychlosti pohybu, velké zatížení mazacího filmu) a antikorozní působení. Oproti tomu voda by se použila tam, kde je vyžadována nehořlavost, ekologická nezávadnost a nízká cena. Musela by se však eliminovat její malá mazací schopnost, malá viskozita a snížit bod tuhnutí. Eliminovat tyto nevýhody různými přísadami je možné, ale zhoršují se tím ekologické vlastnosti a roste cena, tudíž je použití čisté vody dnes velice ojedinělé. (Pavlok, 1999)

4.1 Klasifikace hydraulických olejů

Hydraulické oleje lze rozdělit podle výkonnostní či viskózní klasifikace. Viskózní klasifikace dělí oleje podle viskozity (charakteristickou hodnotou je zde kinematická viskozita při 40 °C) dle normy ISO 3448, do které spadají průmyslové oleje. Výkonnostní (výkonová) klasifikace dělí hydraulické oleje podle přísad (aditiv) obsažených v oleji.

Tab. 2: Viskózní klasifikace průmyslových olejů dle ISO 3448 (Oleje.cz, 2017b)

Viskózní třída	Průměrná viskozita při 40 °C [mm ² ·s ⁻¹]	Limitní hodnoty při 40 °C [mm ² ·s ⁻¹]	
		Min.	Max.
ISO VG 2	2,2	1,98	2,42
ISO VG 3	3,2	2,88	3,52
ISO VG 5	4,6	4,14	5,06
ISO VG 7	6,8	6,12	7,48
ISO VG 10	10	9	11
ISO VG 15	15	13,5	16,5
ISO VG 22	22	19,8	24,2
ISO VG 32	32	22,8	35,2
ISO VG 46	46	41,4	50,6
ISO VG 68	68	61,2	74,8
ISO VG 100	100	90	110
ISO VG 150	150	135	165
ISO VG 220	220	198	242
ISO VG 320	320	288	352
ISO VG 460	460	414	506
ISO VG 680	680	612	748
ISO VG 1000	1000	900	1100
ISO VG 1500	1500	1350	1650

Tab. 3: Výkonová klasifikace hydraulických olejů (Pavlok, 1999)

ISO 6743/4	DIN 51 524	Obsah přísad
HH	-	Bez přísad
HL	HL	Přísady proti oxidaci a korozi
HR	-	Jako HL + modifikátor viskozity
HM	HLP	Jako HL + protioděrové přísady
HV	HLPV	Jako HM + modifikátor viskozity
HG	-	Jako HM + přísady proti „stick-slipu“

4.2 Základové oleje

Základový olej tvoří základní složku ať už motorového, převodového či hydraulického oleje. Podle způsobu výroby můžeme základové oleje rozdělit na minerální nebo syntetické. Oleje vyrobené z ropy jsou všeobecně označovány jako minerální, oproti olejům vyrobeným synteticky. Základový olej se vyrábí z ropných destilačních frakcí anebo z některých meziproductů při zpracování ropy. Kvalitní základový olej lze například vyrobit z destilačních zbytků po výrobě motorové nafty hydrokrakovou technologií. Rafinací či jinou úpravou takovýchto surovin je pak získán základový olej. Chceme-li vyrobit určitý druh oleje (např. hydraulický), musíme z několika jednotlivých základových olejů připravit směs, která bude svými vlastnostmi (viskozita, těkavost, nízkoteplotní vlastnosti, složení oleje apod.) vyhovovat požadavkům na olej, který chceme vyrobit. K této směsi se poté přimíchávají aditiva a výsledkem je pak motorový, převodový, hydraulický či jiný olej. Měřítkem kvality základového oleje je zejména viskózní index, obsah síry a obsah nasycených uhlovodíků. Čím je tedy olej kvalitnější, tím má vyšší viskózní index, nižší obsah síry a vyšší obsah nasycených uhlovodíků. (Černý, 2017)

4.2.1 Minerální oleje

Minerální oleje jsou vyráběny z ropy destilací, rafinací a dalšími technologickými postupy až do získání požadovaných vlastností. (Rousek, 1981)

4.2.1.1 Rafinace

Rafinace je nejdéle známou metodou pro získávání základových olejů z ropy. Nejobvyklejším způsobem rafinace je **extrakce** ropné suroviny vhodným **rozpouštědlem**. Extrakční rozpouštědlo je schopné z ropy odstranit většinu pro olej nepotřebných a nežádoucích látek (zejména pryskyřičné látky s obsahem síry a dusíku), které by v oleji vytvářely nežádoucí usazeniny a kaly. Olejům vyrobeným extrakční rafinací říkáme rozpouštědlové rafináty. Tyto základové oleje se stále vyrábí v největším objemu a tvoří přibližně 65 % všech vyrobených olejů.

Modernějším způsobem rafinace ropy je pak **hydrokrakování**, což je proces, který probíhá při teplotě 400 °C nebo i vyšší a při vysokém tlaku vodíku. Dochází zde

k přeorganizování ropných molekul a přítomnost vodíku zároveň zabezpečuje, že dojde k odstranění všech či alespoň většiny nežádoucích sirných a dusíkatých látek. Produktem hydrokrakování jsou pak velmi kvalitní základové oleje s velmi nízkým obsahem aromatických uhlovodíků a rovněž velmi nízkým (téměř nulovým) obsahem síry a dusíku. Pro výrobu hydrokrakovaných olejů jsou často použity zbytky z hydrokrakování vakuových ropných destilátů s cílem vyrobit motorovou naftu. (Černý, 2017)

4.2.1.2 Odparafínování

Minerální olej, který prošel rafinací, obsahuje poměrně velké množství parafínů, které způsobují, že je olej za normální teploty téměř tuhý a tím pádem v praxi nepoužitelný.

Tradiční způsob odstranění parafínů z oleje se nazývá **rozpouštědlové odparafínování**. Tento proces spočívá ve smíchání rafinovaného oleje s rozpouštědlem, podchlazení na nízkou teplotu a odfiltrování vyloučeného parafínu od oleje. Poté je z oleje odstraněno i rozpouštědlo. Produktem tohoto procesu je tedy kromě odparafínovaného oleje i tuhý parafín, který je možné dále zpracovávat.

Modernějším způsobem odstranění parafínu je tzv. **hydroizomerace parafínů**. Tento proces se velmi podobá hydrokrakování a vyrábějí se tak zejména moderní a velmi kvalitní základové oleje. Často bývají naprosto bezbarvé. (Černý, 2017)

4.2.1.3 Dorafinace

Dorafinace je závěrečný stupeň v procesu výroby základových olejů, při kterém dochází k odstranění zbytkových nečistot a zlepšuje se i barva oleje. Dorafinace může být opět prováděna hydrogeneračně nebo též extrakcí rozpouštědlem. Nejjednodušším způsobem je adsorpce nečistot na aktivní hlince, čemuž se také říká „horký kontakt“, protože proces spočívá v rozmíchání hlinky v zahřátém oleji a následném odfiltrování hlinky s adsorbovanými nečistotami. Během celého procesu výroby základových olejů musí být do technologie zařazena také destilace. (Černý 2017)

4.2.2 Syntetické oleje

Cena syntetických olejů je často vyšší než v případě olejů minerálních. Na rozdíl od minerálních olejů, které jsou tvořeny komplexní směsí uhlovodíků, je možné vlastnosti syntetických olejů předem definovat a zajistit standardní kvalitu.

Syntetické oleje se vyrábí ze syntetických uhlovodíků, které jsou vyráběny syntézou (chemickým slučováním) základních stavebních uhlovodíkových molekul. První částí syntézy uhlovodíků je **krakování**. Je to proces, při kterém jsou rozštěpeny molekuly benzínu (C5 – C12) na krátké řetězce molekul plynů, jako je eten nebo buten. Tyto molekuly plynů jsou pak základní stavební uhlovodíky pro syntézu.

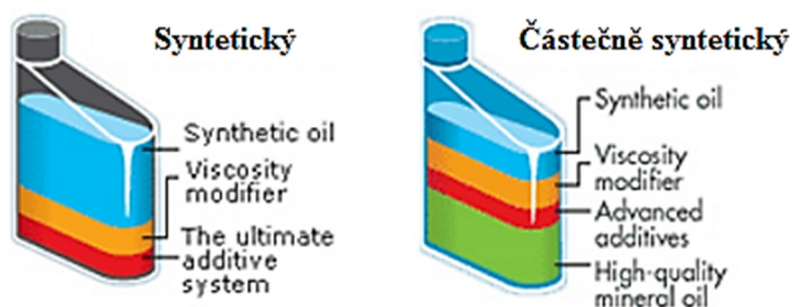
Následuje samotná **syntéza**, kdy jsou tyto molekuly chemicky sloučeny do molekul PAO (Poly-alfa-Olefinu) nebo PIB (Poly-iso-Butenu).

Další fází je **vakuová destilace**, jejímž principem je oddělení jednotlivých frakcí produktu syntézy v závislosti na jejich rozdílném vypařování při různých teplotách. Za běžného atmosférického tlaku se jednotlivé frakce vypařují omezeně, tak musí destilace probíhat za sníženého tlaku (proto vakuová destilace). Produkt syntézy se při nižším tlaku zahřeje, jednotlivé frakce se odpařují a kondenzují při různých teplotách. Produkt syntézy je tímto rozdělen na oleje o různých viskozitách.

Řetězce molekul uhlovodíků (platí pro PAO) jsou poté upraveny **hydrogenerací**, což znamená, že na určitá místa molekul se navážou atomy vodíku. Tím se změní jejich struktura a dojde ke zlepšení vlastností. (Oleje.cz, 2017c)

4.2.3 Částečně syntetické oleje

Všeobecně mnohem používanější, avšak nesprávné pojmenování částečně syntetického oleje je olej polosyntetický. Někteří výrobci či obchodníci jej rovněž nesprávně označují za syntetický olej. Částečně syntetický olej je míchán z minerálního oleje a některého oleje syntetického. (Dbo.cz, 2017)



Obr. 5: Příklady složení syntetického a částečně syntetického oleje (Dbo.cz, 2017)

4.3 Těžkozápalné kapaliny

Jde o hydraulické kapaliny, jejichž podstatou odolnosti proti hoření je obsah vody nebo chemický základ kapaliny. Lze se setkat i s označením „nehořlavé kapaliny“, což ale není přesné. Používají se ve strojích a zařízeních, které pracují v prostředí s nebezpečím požáru, výbuchu, v blízkosti žhavého kovu či otevřeného ohně jako např. v hutích, hlubinných dolech, ale i v letectví apod. (Dvořák, 2009)

Dle normy ISO 6743-4 nebo DIN 51502 se tyto kapaliny dělí následovně:

HFA - emulze oleje ve vodě

HFB - emulze vody v oleji

HFC - vodní roztoky polymerů

HFD - syntetické bezvodé kapaliny

Tab. 4: Vybrané vlastnosti těžkozápalných kapalin (Pavlok, 1999)

	HFA	HFB	HFC	HFD
Odolnost proti hoření	velmi dobré	dobré	velmi dobré	dobré
Hustota [$\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$]	1000	950	1040 - 1090	1150 - 1450
Provozní rozsah teplot [$^{\circ}\text{C}$]	30 – 50	30 – 50	30 – 50	70 – 90
Max. rozsah teplot [$^{\circ}\text{C}$]	3 – 55	3 – 55	-30 – 65	-25 – 150
Kinematická viskozita při 40 $^{\circ}\text{C}$ [$\text{mm}^2\cdot\text{s}^{-1}$]	1 – 2	nestanoveno	20 – 70	15 – 70
Obsah vody [%]	80 – 98	40 – 60	35 – 60	0
Životnost ložisek v % normální životnosti	5 – 10	6 – 15	6 – 18	50 – 100
Cenový index vzhledem k HLP oleji	0,1 – 0,25	< 2	1,5 – 2	2 – 5

Je třeba mít na paměti, že použití hydraulických kapalin s obsahem vody má určitá svá specifika. Co se rozmezí teplot týká, u kapalin HFA a HFB nesmí teplota klesnout pod bod mrazu a u všech kapalin obsahujících vodu nesmí teplota přesáhnout hranici přibližně 50 °C. Při vyšších teplotách se voda rychleji odpařuje a výrazně roste riziko kavitace. Vzhledem ke korozivnímu působení vody je třeba pravidelně sledovat a doplňovat obsah antikoročních aditiv. Používají se jednak kapalné antikoroďadny, ale přidávají se i tĕkavé, které chrání např. stĕny a víko nádrže. Části mechanismů pracující s emulzemi jsou v poslední době často vyrábĕny z antikoročních materiálů, jako jsou legované oceli, barevné kovy, plasty, pryže, keramika apod.

Výraznou nevýhodou vody je její prakticky nulová mazací schopnost, proto je životnost tĕchto zařizení výrazně nižší v porovnání s provozem zařizení v oleji. Z tohoto důvodu je omezen rozsah provozních tlaků a otáček hydrogenerátorů a hydromotorů.

Podrobnĕjší rozdělení tĕžkozápálných hydraulických kapalin dle stejné normy zobrazuje následující tabulka.

Tab. 5: Podrobnĕjší rozdělení tĕžkozápálných kapalin (Oleje.cz, 2017b)

ISO / DIN	Charakteristika	Použití
HFAE	Emulze oleje ve vodĕ s podílem vody > 80 %	Pohony s tlaky cca 300 bar používané v dolech
HFAS	Syntetické vodné roztoky bez ropného oleje s podílem vody > 80 %	Hydrostatické pohony s tlaky cca 160 bar (+5 až +55 °C)
HFB	Emulze vody v oleji s podílem oleje okolo 60 %	Např. britský důlní průmysl (+5 až +60 °C)
HFC	Vodné roztoky polymerů s podílem vody > 35 %	Hydrostatické pohony v průmyslu a v dolech (-20 až +60 °C)
HFDR	Bezvodé syntetické kapaliny na bázi fosforečných esterů	Mazání a regulace turbín apod. (-20 až +150 °C)
HFDS	Syntetické bezvodé kapaliny na bázi chlorovaných uhlovodíků	Hydrauliky s požadavkem vysoké odolnosti kapaliny proti hoření
HFDT	Smĕs syntetických kapalin HFDR a HFDS	Hydrauliky s požadavkem vysoké odolnosti kapaliny proti hoření
HFDU	Bezvodé syntetické kapaliny na jiné bázi (např. diestery)	Hydrostatické pohony, průmyslové hydrauliky (-35 až +90 °C)

4.4 Ekologicky příznivé kapaliny

V souvislosti s ekologicky příznivými hydraulickými kapalinami se podle (Rousek, 1995) lze setkat s různým označením, jako např. biologicky odbouratelné oleje nebo oleje biodegradabilní. Jde o kapaliny, které nepředstavují riziko pro životní prostředí.

Ročně se u nás spotřebuje až 15 tisíc tun pracovních kapalin. Z toho podíl olejů na ropné bázi dosahuje téměř 99 %. Je tedy pochopitelné, že je v posledních letech z ekologických důvodů stále větší tlak na náhradu těchto olejů za kapaliny šetrné k životnímu prostředí. Ochrana životního prostředí vyžaduje použití ekologických maziv, a to zejména pokud jde o jejich použití v zemědělství, lesnictví či vodohospodářství.

Biodegradabilní kapaliny musí splňovat určitá kritéria daná příslušnými zákony a vyhláškami. Taková pracovní kapalina je poté označena známkou „Ekologický výrobek“. Při jejich testování se zkoumá, kolik procent látky se za stanovenou dobu rozloží. K rozkladu dochází díky mikroorganismům, které např. olej rozloží na vodu a oxid uhličitý jako finální produkty rozkladu. Pro udělení výše zmíněného označení je důležité, aby nebyla toxická jak původní látka, tak ani látky vznikající v průběhu rozkladu. Dle tzv. biodegradačního testu OECD 301 B je požadováno, aby bylo zcela odbouráno minimálně 70 % látky za 28 dní. Na druhou stranu při znečištění 1 kg půdy třemi až čtyřmi gramy oleje přežijí jen ty nejodolnější organismy a regenerace trvá několik let.

Kromě rozložitelnosti je hodnocena také ekotoxicita, což je vlastnost látky, která, je-li uvolněna, představuje okamžité nebo pozdní nebezpečí v důsledku zatížení životního prostředí biologickou akumulací nebo toxickými účinky na biotické systémy

Dle zákona o chemických látkách, který je v souladu s nařízením Evropského parlamentu č. 1907/2006 o registraci, hodnocení, povolování a omezování chemických látek, musí mít každá látka tzv. bezpečnostní list, který kromě fyzikálních vlastností, chemického složení apod. obsahuje i informace o toxicitě (působení na člověka a jiné organismy). (Dvořák, 2009), (Máchal a kol., 2013)

V současnosti se vyrábí a používají tři hlavní skupiny biodegradabilních kapalin, které se liší svým chemickým základem.

HETG – rostlinné oleje (dříve HTG)

HEPG – polyglykoly (dříve HPG)

HEES – syntetické estery (dříve HE)

Tab. 6: Vybrané vlastnosti ekologických kapalin (Dvořák, 2009)

	Řepkový olej	Polyglykol	Syntetický olej
Kin. viskozita při 40 °C [mm ² ·s ⁻¹]	34	46	46,1
Kin. viskozita při 100 °C [mm ² ·s ⁻¹]	7,8	8,2	8,4
Viskózní index [-]	215	153	191
Bod tuhnutí [°C]	-35	-51	-58
Bod vzplanutí [°C]	250	205	220
Hustota [kg·m ⁻³]	920	1100	920

4.4.1 Kapaliny HETG

Jsou to kapaliny na rostlinné bázi, přičemž nejčastěji se používá řepkový olej. Chemicky jde o triglyceridy vyšších mastných kyselin. Mají velmi dobré mazací schopnosti, vysoký viskózní index, ale jejich odolnost proti oxidaci je výrazně nižší než u minerálních olejů, proto není vhodné je provozovat při teplotě nad 70 °C. HETG kapaliny také podléhají hydrolyze, jsou hořlavé a jejich cena je až dvojnásobná oproti minerálním olejům. Jakožto přírodní produkty jsou ekologicky nezávadné a zcela odbouratelné. Používají se zejména v hydraulických systémech zemědělských a lesnických strojů.

4.4.2 Kapaliny HEPG

Jde o polyglykoly, které se již vyskytly ve skupině těžce zápalných kapalin. Polyglykoly mají příznivý průběh viskozity v závislosti na teplotě, dobrou tekutost za nízkých teplot a termooxidační stálost. Jejich biologická rozložitelnost se pohybuje kolem 90 %. Bod tuhnutí polyglykolů činí okolo -40 °C. Nevyžadujeme-li nehořlavost, můžeme omezit obsah vody na minimum, protože voda zhoršuje prakticky všechny provozní vlastnosti. V tomto případě je potřeba zohlednit vyšší viskozitu a hustotu kapaliny, způsobující vyšší odpory kapaliny zejména při nízkých teplotách.

4.4.3 Kapaliny HEES

Do této skupiny bývají zařazeny i chemicky modifikované rostlinné oleje, ale většinou se jedná o kapaliny na bázi syntetických esterů. Jsou srovnatelné s rostlinnými oleji, ale v mnohém je předčí. Mají zejména podstatně vyšší antioxidační schopnosti,

kteřé lze dále zlepřovat přidáním antioxidantů a dalších aditiv. Dále mají výborné mazací schopnosti, příznivou závislost viskozity na teplotě, dobře odolávají hydrolyze i nízkým teplotám a jsou kompatibilní s těsníciými materiály používanými pro minerální či rostlinné oleje. Jejich životnost je výrazně závislá na teplotě (při teplotě nad 70 °C rychle klesá). Nejsou toxické a jejich biologická odbouratelnost je až 95 °C. Využití nachází zejména u stavebních, zemních, zemědělských a lesnických strojů. Většiu rozšíření těchto kapalin brání zejména jejich vysoká cena. (Pavlok, 1999), (Dvořák, 2009)

4.4.4 Vlivy ekologických kapalin na systému těsnění

Každý těsnící prvek hydraulického systému je z části nebo úplně obklopen tlakovým hydraulickým médiem. Účinky tlakové biologicky rozložitelné kapaliny lze rozdělit na fyzikální, chemické a mechanické účinky.

Z hlediska **fyzikálních** vlivů ovlivňuje hydraulické médium materiál těsnění zpravidla zvětšením či zmenšením objemu (bobtnání či smršťování). Tyto objemové změny vedou ke změně pevnosti v tahu či tvrdosti. Tento poznatek si proto žádá znát účinek ekologicky příznivých hydraulických olejů na objemové změny v současnosti používaných materiálů těsnění.

Chemicky jsou materiály těsnění ovlivňovány zejména teplotou hydraulického tlakového média, obsahem vody v hydraulickém oleji, účinkem kyslíku, aditivy obsaženými v oleji a rozložitelnými produkty hydraulických kapalin. Termooxidačním působením nízkomolekulárních složek alkoholu a glykolu v ekologicky příznivých kapalinách vznikají štěpením agresivní produkty, které poškozují materiály těsnění v hydraulickém systému stroje.

Mechanicky je materiál těsnění namáhán deformací průřezu těsnícího prvku a pulzací tlaku hydraulického média. Fyzikální a chemické účinky mají za důsledek mechanické opotřebení těsnění. Zvětšení objemu těsnícího prvku vede k jeho změknutí, což má za následek zvýšení otěru a následně zvýšení poškození těsnícího prvku účinkem vysokých tlaků v hydraulickém systému. (Kučera a Rousek, 2006)

4.5 Aditivace

Aditiva jsou chemické látky, které zlepšují vlastnosti olejů a plastických maziv. Obsah aditiv ve výsledném oleji se pohybuje mezi 1 až 25 %. Druh aditiva a jeho množství přidané do oleje stanovuje výrobce na základě norem a praktických zkoušek. Druh i obsah aditiva v oleji se liší podle způsobu použití oleje. Aditiva se vyrábí dvěma způsoby. Buďto na bázi ropných destilátů nebo za použití ropných příměsí, jako například molybdensulfidu, grafitu, teflonu, síry, chlóru či různých kovů. (Vlk, 2006)

Podle chemické struktury lze aditiva rozdělit na polární a nepolární.

Polární aditiva – obsahují tzv. povrchově aktivní – polární látky. Polární látky jsou chemické látky, které mají nesymetrické molekuly, a proto vznikají na jejich koncích elektrické náboje, kterými jsou tyto látky přitahovány k povrchům. Polární aditiva vytváří na povrchu tenký film, který v závislosti na chemickém složení aditiva zlepšuje odolnost proti korozi, proti usazování nečistot, poškození vysokým tlakem apod.

Nepolární aditiva – jsou rozptýlena v celém objemu oleje. Nejsou tedy přitahována k povrchům, tzn. že nejsou povrchově aktivní. Nepolární aditiva například zlepšují viskozitu oleje, snižují jeho bod tuhnutí, chrání pryžová těsnění proti poškození apod. (Oleje.cz, 2017a)

4.5.1 Aditiva s povrchovým působením

Detergenty

Příspěvky, které zabraňují usazování nečistot na površích a rozpouštějí případné již vytvořené nečistoty (kovové fenáty, saliciláty, thiofosfonáty, sulfonáty). Mazivo díky nim lépe přilne k mazaným plochám. Významnou roli hrají zejména ve válci motoru, kde vlivem vysokých teplot dochází k uvolňování uhlíku, který se usazuje na pracovních plochách pístu. Tyto usazeniny mohou způsobit vznik netěsností vlivem poškrábání nebo změnu tvaru zapříčiněnou nánosem nečistot.

Disperzanty

Brání tvorbě usazenin, které se tvoří převážně za nižších provozních teplot. Disperzanty (polyisobuteny apod.) obalí mikroskopické nečistoty a tím zamezí jejich koncentraci a usazování. Nečistoty jsou tedy rozptýleny v celém objemu oleje, čímž se zamezí zablokování olejových kanálů a filtrů.

Zlepšující ochranu proti vysokému tlaku a opotřebení

Tyto přísady chrání před opotřebením ocelové části, které se o sebe třou pod vysokým tlakem. Vytvořením ochranné vrstvy na těchto částech zabraňují přímému kontaktu třecích ploch.

Protikorozní přísady

Na povrchu kovů vytvářejí ochranný film, který zabraňuje oxidaci tohoto povrchu a tím i korozi.

Modifikátory tření

Tato aditiva upravují tření mezi třecími plochami na požadovanou hodnotu. (Vlk, 2006), (Černý, 2017)

4.5.2 Aditiva zlepšující vlastnosti oleje

Modifikátory viskozity

Tato aditiva rozšiřují teplotní rozsah, v jakém je možné olej použít tím, že stabilizují viskozitu oleje a ta je tak méně závislá na teplotě. S klesající teplotou viskozita oleje stoupá a naopak.

Zlepšovače bodu tuhnutí

Za nízkých teplot dochází v minerálních olejích k vylučování a shlukování parafínů, což vede ke zvyšování hustoty. Zvýšená hustota vede ke ztrátám energie z důvodu překonávání odporu oleje a rovněž zhoršuje kvalitu mazání.

Přísady chránící elastomery

Elastomery zajišťují pružnost (elasticitu) gumových a plastových součástí. Tato aditiva zpomalují stárnutí umělohmotných a gumových částí, které jsou ve styku s olejem (zejména těsnění a hadice) tím, že zabraňují vyplavení změkčovadel obsažených v gumových a plastových dílech.

4.5.3 Aditiva chránící olej

Přísady proti stárnutí a oxidaci

V první fázi oxidace se tvoří radikály, které se dále účastní řetězových oxidačních reakcí. Poté dochází k více typům vzájemných reakcí radikálů, kyslíku a produktů

oxidace a nastávají tak nevratné oxidační děje, jejichž produkty není možné odstranit filtrací. Rozpustnost těchto látek závisí na teplotě a nasycenosti oleje. Ve třetí fázi oxidace se tvoří látky karbonylového a esterového typu nerozpustné v oleji. Tyto nežádoucí látky jsou polární, tudíž ulpívají na kovových povrchích, shlukují se a přitahují kovové nečistoty, čímž se stav oleje radikálně zhoršuje.

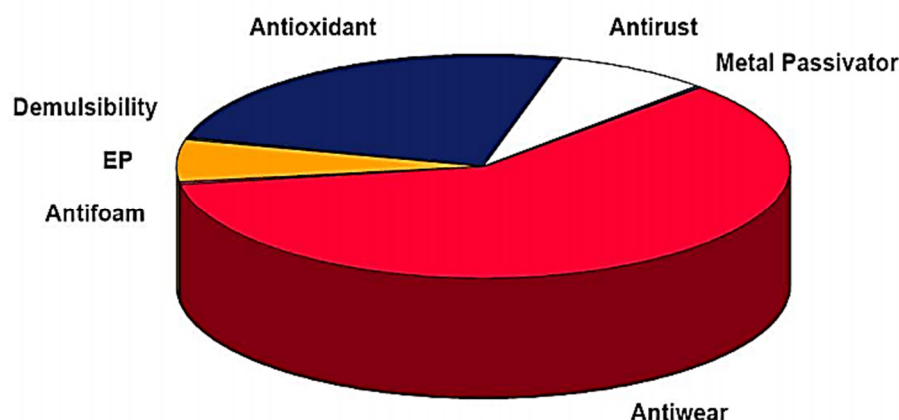
Účinné antioxidanty musí působit již při vzniku radikálů v první fázi oxidace. Dříve používané typy antioxidantů jsou dnes nahrazovány stericky stíněnými fenolickými antioxidanty a aminickými antioxidanty.

Deaktivátory kovů

Tato aditiva zamezují chemickým reakcím probíhajícím na povrchu mikroskopických částecek kovu přítomných v oleji. Tyto kovové částičky působí jako katalyzátor chemických degradačních procesů. Díky aditivu je kolem částecek kovu vytvořen ochranný film a je tak zamezeno katalytickým chemickým reakcím, čímž je zpomaleno stárnutí oleje.

Protipěnovostní přísady

Promícháním oleje se vzduchem dojde k vytvoření pěny, která usnadňuje oxidaci a tím urychluje stárnutí oleje. Dále zvyšuje stlačitelnost oleje, což je velký problém zejména v případě hydraulických soustav. Vznik této olejové pěny potlačují právě protipěnovostní aditiva. (Vlk, 2006), (Oleje.cz, 2017a)



Obr. 6: Typické přísady v hydraulickém oleji (Dobeš, 2012)

antiwear – protiotěrová aditiva, antifoam – protipěnovostní, EP – vysokotlaká aditiva, demulsibility – deemulganty, antirust – protikorozi, metal passivator – deaktivátory kovů

5 DŮLEŽITÉ UKAZATELE PŘI ANALÝZE HYDRAULICKÉHO OLEJE

Účinným nástrojem analýzy hydraulického oleje je tribotechnická diagnostika, tzv. tribodiagnostika, která umožňuje zejména racionální a ekonomické využívání maziv a včasnou identifikaci vznikajících poruch při provozu různých druhů strojů a zařízení. Tribodiagnostika se zabývá zjišťováním technického stavu třecích uzlů na základě odebraného vzorku maziva (oleje), kterým jsou tyto uzly mazány. Pravidelným monitorováním stavu oleje je možné zabránit selhání celého systému. Pravidelné sledování stavu hydraulického oleje znamená zaměřit se na následující ukazatele a fyzikálně-chemické analýzy, které jsou důležité při analýze hydraulické kapaliny.

- barva a vzhled vzorku oleje
- kinematická viskozita při 40 °C
- číslo kyselosti
- koncentrace otěrových kovů
- obsah vody
- pěnivost
- degradace oleje
- mechanické nečistoty a počet částic
- analýza a klasifikace částic opotřebení (Hnilicová a Kučera, 2013)

5.1 Barva a vzhled oleje

Barva je vyjádřením kvality oleje a přítomnosti cizích částic a jiných suspendovaných látek. Je prvním kritériem, kterým je možno orientačně posoudit stav oleje už při odběru vzorku ze stroje. Stanovuje se subjektivně porovnáním zkoumaného vzorku s barevnými etalony. (Hnilicová a Kučera, 2013)

5.2 Kinematická viskozita při 40 °C

K základním parametrům, které se u hydraulických olejů stanovují, patří kinematická viskozita. Její určení při 40 °C hlavně potvrzuje, jestli byl použit správný olej, nebo jestli nedošlo k doplnění jiným druhem oleje. Správná viskozita je důležitá pro vznik pokud

možno hydrodynamického režimu mazání a vytvoření optimální tloušťky mazacího filmu. Konkrétní postup stanovení kinematické viskozity je uveden v normě ČSN EN ISO 3104. Jedná-li se o olej typu HV, stanovuje se i kinematická viskozita při 100 °C a také viskózní index.

Měření viskozity je možno provádět několika druhy viskozimetrů. Nejčastěji se používá skleněný Ubbelohdeho viskozimetr. Nárůst viskozity je spojen s oxidací oleje či jeho poškozením. V tomto případě se doporučuje i sekundární zkouška na číslo kyselosti oleje. Jako další sekundární zkouška se používá infračervená spektrometrie (FTIR), jejíž schopností je odhalit změny určitých vazeb, což se projeví zejména při použití nesprávného oleje nebo smíchání olejů, což zapříčiní změnu původního spektra. (Nováček, 2011), (Peřková a kol., 2012)

5.3 Číslo kyselosti

Opotřebením oleje je mimo jiné způsobeno oxidací uhlovodíků, čímž vznikají látky s vyšší kyselostí. Stárnutím oleje roste množství těchto látek, a proto lze podle jejich obsahu do jisté míry posuzovat stupeň degradace olej. Množství těchto kyselých látek udává číslo kyselosti (TAN), které je důležitým ukazatelem kvality zkoumaného oleje. Pro stanovení čísla kyselosti lze použít titraci s barevnými indikátory, tzn. porovnáním s předem zadanou hodnotou kyselosti (modrá značí vyšší kyselost, zelená stejnou a žlutá nižší kyselost než porovnávací látka) a potenciometrickou titrací. (Peřková a kol., 2012)

5.4 Koncentrace otěrových kovů

Provoz strojů a zařízení je jednoznačně spojen s jejich opotřebením, které se projevuje jako trvalá a nežádoucí změna povrchu či rozměrů funkčních ploch. Tato změna je vytvářena vzájemným působením funkčních třecích ploch a pracovního média.

Analýza otěrových prvků je technika, která umožňuje stanovit obsah kovů obsažených ve vzorku oleje a na základě změn obsahu otěrových prvků určuje vážnost opotřebením. Nejúčinnější analýzy olejů jsou schopny současně zjistit a vyčíslit celkem 15 až 20 otěrových kovů a kontaminantů ve vzorku použitého oleje. Ke stanovení kovů, resp. prvků v mazacích olejích jsou využívány různé metody elementární spektroskopie, jako

např. atomová absorpční spektrometrie, optická emisní spektrometrie s indukčně vázanou plazmou, optická emisní spektrometrie s rotující diskovou elektrodou nebo rentgenová fluorescenční spektrometrie. (Nováček, 2011)

5.5 Obsah vody

Vlhkost v hydraulickém oleji je kromě pevných kovových částic z opotřebení další destruktivní nečistotou. Voda v oleji je nežádoucí činitel, který vzniká během provozu stroje a způsobuje nepříznivé degradační procesy ve sledovaném oleji. Stanovení obsahu vody v oleji je proto důležitou informací pro zjištění kvality oleje.

Jako jednoduchá zkouška na zjištění přítomnosti vody v oleji se používá tzv. prskací nebo žehličkový test. Tato zkouška spočívá v kápnutí vzorku oleje na rozpálenou plochu (např. žehličky), kdy v případě přítomnosti vody je slyšet prasknutí (její rychlé vypaření). Nejčastěji používanou metodou je tzv. coulometrická titrace známá i jako zkouška podle Karla Fischera, kdy se vzorek oleje titruje speciálním činidlem pomocí coulometrického titrátoru, který sleduje vodivost vzorku. Tímto způsobem lze zjistit i tisíce procenta vody v oleji. Jako další primární zkoušku je možné použít infračervenou spektrometrii (FTIR), která je efektivní pro zjištění vlhkosti nad cca 1 000 ppm. Jako sekundární zkoušku lze použít i měření viskozity oleje, protože její nárůst dává často informaci o tom, že v oleji je přítomna voda (vodní emulze). (Peřková a kol., 2012)

5.6 Pěnivost

Vzduch v hydraulickém oleji je také považován za nečistotu, protože kyslík obsažený v bublinkách vzduchu způsobuje oxidaci kapaliny. V hydraulických systémech vzduch způsobuje stlačitelnost kapalin, a snižuje tím účinnost přenosu energie. Typickým příznakem přítomnosti vzduchu v oleji je jeho pěnivost.

Pro stanovení množství vzduchu v oleji je nutné měřit čas potřebný k uvolnění vzduchu a tzv. pěnovou charakteristiku. Uvolnění vzduchu je mírou času, který je potřebný k uvolnění bublinek vzduchu z oleje na hladinu. (Majdan a kol., 2012)

5.7 Degradace oleje

Hydraulický olej je často vystaven nepředvídaným provozním podmínkám, které mají podstatný vliv na jeho životnost. Důvodem pro výměnu hydraulického oleje je degradace základového oleje, úbytek přísad a nečistoty v oleji.

Oxidace je primární proces chemické degradace oleje. V mnoha případech se týká pouze základového oleje. Výsledkem procesu oxidace jsou v případě uhlovodíkových olejů organické kyseliny nebo polymerní složky s vysokou molekulovou hmotností. Antioxidační přísady se během provozu oleje postupně vyčerpávají, důsledkem čehož roste oxidace základového oleje.

Jako základní zkouška se používá zejména kontrola čísla kyselosti oleje, ale její spolehlivost může být ovlivněna přítomností přísad proti opotřebení. Během oxidace se uhlovodíky (základní molekuly oleje) mění na ketony, aldehydy, karboxyláty a jiné tranzitní molekuly, které mohou být měřené infračervenou spektroskopií.

Kontrola úbytku přísad patří mezi nejhůře identifikovatelné kvalitativní ukazatele, co se týče jejich zjišťování a hodnocení při analýze olejů. Pro stanovení úbytku přísad se jako primární zkouška používá elementární spektroskopie, protože mnohé přísady jsou organicko-kovové sloučeniny, které obsahují zinek, fosfor, hořčík, křemík a jiné prvky. (Nováček, 2011), (Majdan a kol., 2012)

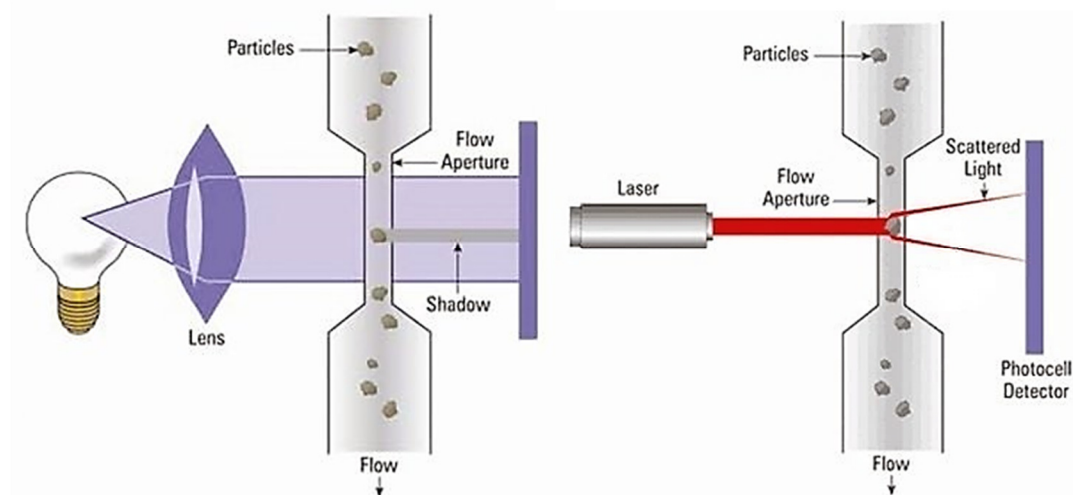
5.8 Hodnocení mechanických nečistot a počtu částic

Nečistoty ve formě pevných látek jsou často klasifikovány jako tvrdé nebo měkké. Tvrdé částice (prach, křemík, železo, měď) mohou být příčinou mechanického opotřebení, např. abrazivního. Zatímco měkké částice mohou tvořit kaly nebo povrchové nečistoty známé jako laky (lepkavé pryskyřice). Dalšími destruktivními nečistotami, které mají negativní vliv na životnost oleje a celkovou funkčnost hydraulického systému jsou vlhkost a vzduch (oxidace).

V současnosti se mechanické nečistoty v hydraulických olejích hodnotí buď gravimetricky, nebo pomocí kódu čistoty oleje, který poskytuje především informaci o počtu částic v oleji a jejich velikosti. Gravimetrická metoda používá membránový filtr s velikostí pórů 0,8 až 0,45 μm , což znamená, že zachytí i degradační produkty oleje větších

rozměrů. Nečistoty, a to i částice mnohem menší, než je hranice viditelnosti pouhým okem, mohou způsobit vážné poruchy hydraulického systému. V současnosti se používají tři hlavní systémy vyhodnocování kódu čistoty, a to ISO 4406, NAS 1638 a SAE AS 4059.

Ke stanovení počtu částic ve vzorku oleje se v současnosti používají tři hlavní metody. První z nich je optická mikroskopie (ISO 4407). Částice jsou počítány "manuálně" v zorném poli mikroskopu na membráně, která je rozdělena rastrem na stejná políčka čtvercového tvaru. Druhá a dnes asi nejrozšířenější metoda je použití automatických počítačů částic (ISO 115007). Používají se v zásadě dva základní principy. Optické přístroje s bílým světlem, které je v senzoru zastiňováno procházejícími částicemi a optické přístroje s laserem, kde procházející částice způsobují rozptyl laserového paprsku. Laserové přístroje jsou považovány za přesnější a citlivější. Třetí používanou metodou je blokace otvorů (BS 3406). Vzorek prochází otvory (membránami) s přesně definovanou velikostí otvoru. Základní nevýhodou světelných metod je však tendence zaměřit i částice jako jsou bublinky vody a v některých případech i aditivní složky, proto je nutné vzorek před měřením vhodně připravit. (Bureš a Němec, 2012), (Hnilicová a Kučera, 2013)



Obr. 7: Optické přístroje s bílým světlem a optické laserové přístroje (Bureš a Němec, 2012)

Particles – částice, flow aperture – průtokový otvor, flow – směr toku, lens – čočka, shadow – stín, scattered light – rozptýlené světlo, photocell detector – detekční snímač

5.9 Analýza a klasifikace částic opotřebení

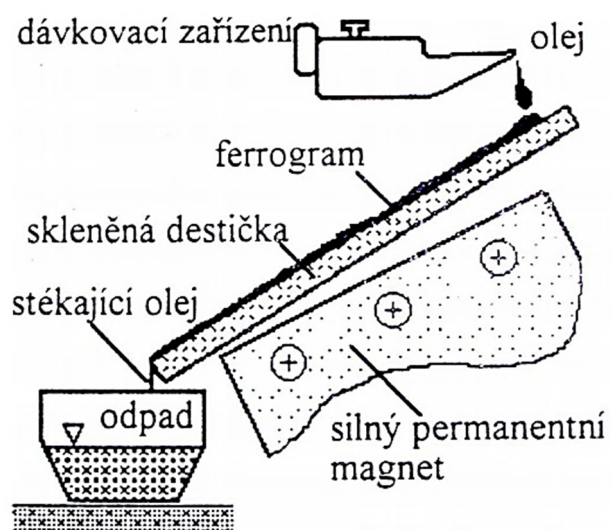
Analýza částic opotřebení a její klasifikace do tříd odpovídajících typů opotřebení umožňuje sledovat jak aktuální stav, tak dlouhodobý trend opotřebení strojních součástí. V případě včasného zjištění blížící se poruchy poskytuje možnost preventivních opatření, které mohou zabránit poruše zařízení. Se vzrůstajícím opotřebením se zvyšuje koncentrace příměsí v oleji. Z tohoto důvodu je další důležitou úlohou zjistit nejen množství, ale i velikost těchto částic a způsob, případně i původ, jejich vzniku. Pro zjištění velikosti, tvaru a morfologie částic v mazacím oleji, které vypovídají o režimu opotřebení stroje, se používá ferografická analýza, která je metodou částicové analýzy olejů.

Ferografie je technika, která slouží k analyzování úlomků a produktů otěru, vznikajících v důsledku opotřebení. Je založena na separaci částic, oddělených v průběhu opotřebení třecích ploch do oleje. Principem ferografické analýzy je mikroskopické posouzení produktů opotřebení feromagneticky izolovaných z analyzovaného vzorku. Pro definici režimu opotřebení se posuzují následující charakteristiky izolovaných produktů:

- pozice částice na vytvořeném ferogramu
- orientace hlavního rozměru částice
- tvar a velikost částice
- charakteristiky povrchu částice (barva rýhování, pitting apod.)

Morfologie částice například napoví, zda je částice čerstvá (má ostré hrany a vznikla vytržením materiálu v nedávné době) nebo proudí s olejem v systému již delší dobu (má zaoblený tvar, obroušené hrany). Lze tedy zjistit i její původ, jestli je to částice adhezivní, abrazivní atd. a podle toho se stanoví režim opotřebení (běžné, mezní, kritické, záběhové). Spolu s jinými metodami se dá přibližně zjistit, kdy a v které části systému částice vznikla a jaké síly to způsobily.

Analytická ferografie je založena na oddělení cizorodých částic v olejové náplni od vlastního oleje. Vzorek oleje je nejdříve zředěn technickým benzínem kvůli zlepšení adheze a oddělení částic z oleje. Zředěný vzorek stéká po speciálně zkonstruovaném skleněném skluzu, který je vystaven působení silného magnetického pole. Magnetickým zachycením částic z oleje je vytvořen ferogram. Částice zachycené na ferogramu jsou zkoumány polarizačním bichromatickým mikroskopem vybaveným digitální kamerou.



Obr. 8: Ferrografická analýza (Hnilicová a Kučera, 2013)

Princip ferrografie s přímým odečítáním zůstává stejný jako při analytické ferrografii, jen místo sklíčka je použita tenkostěnná skleněná kapilára zafixována v divergentním magnetickém poli speciálního magnetu. Kapilárou protéká zkoušený olej. Ve dvou místech, kde se usazují velké a malé částice, jsou napevno zabudované zdroje záření a snímače, které snímají úbytek intenzity záření. Ten je přímo úměrný stupni pokrytí stěny kapiláry částicemi. (Majdan a kol., 2012), (Hnilicová a Kučera, 2013)

6 MATERIÁL A METODIKA

Tato kapitola obsahuje podrobný popis praktické části diplomové práce. Je zde popsán sledovaný traktor, zkoumaný olej a postup a podmínky, za jakých byl ze stroje odebírán. Dále jsou v této kapitole popsány měřicí přístroje, které byly použity k analýze zkoumaného oleje.

6.1 Zkoumaný olej

Ve sledovaném traktoru byl použit olej Total Multagri Super 10W-30. Jedná se o univerzální olej, tzv. STOU (Super Traktor Oil Universal), který je možné použít pro mazání vznětových motorů, převodového ústrojí, jako médium pro ponožené brzdy a spojky a samozřejmě v hydraulickém systému. V traktoru je tedy použit jako náplň pro motor, převodovku i hydraulický systém.

Jde o olej na syntetickém základě upraven antioxidanty, detergentně-disperzními, protikorozními, protioděrovými a vysokotlakými aditivami. Může též obsahovat polymerní modifikátor viskozity a depresant (aditivum snižující bod tuhnutí). Olej tedy odpovídá výkonové klasifikaci HV podle normy ISO 6743/4 či HLPV podle DIN 51 524.

Tab. 7: Základní informace o použitém oleji

Typ oleje	Kinematická viskozita při 40 °C [mm ² ·s ⁻¹]	Viskózní index	Bod tuhnutí [°C]	Skladovatelnost
Total Multagri Super 10W-30	69	131	-39	5 let při teplotě 5 až 25 °C

6.2 Sledovaný traktor

Hydraulický olej byl odebírán z traktoru Same Diamond 265. Same Group patří k jednomu z předních výrobců traktorů v Evropě. Členy této skupiny jsou firmy Same (vedoucí značka skupiny se sídlem v italském Trevigliu), Deutz Fahr, Lamborghini, Hürliman a Adim Diesel. Same Diamond 265 byl vyráběn v letech 2004 až 2007 pod nejvyšší výkonovou řadou výrobce. Vzhledem ke svému výkonu je ve firmě traktor využíván zejména k těžším polním pracím.



Obr. 9: Sledovaný traktor – Same Diamond 265

Parametry stroje:

Motor:

Model:	Deutz TCD 2013 L06
Konfigurace:	6 válců, řadový
Zdvihový objem:	7,1 l
Max. výkon:	203 kW
Max. otáčky:	2 350 min ⁻¹
Točivý moment:	1 028 Nm při 1 500 min ⁻¹

Převodovka:	Powershift, 40 rychlostí vpřed i vzad
Max. rychlost:	50 km/h
Hmotnost traktoru:	9 051 kg
Objem nádrže:	550 l
Nosnost tříbodového závěsu:	10 501 kg
Průtok hydrogenerátoru:	120 l/min

6.2.1 Odběr vzorků

Odběr vzorků hydraulických kapalin se řídí normou ČSN 65 6207.

- vzorek musí představovat průměrné složení maziva ve stroji

- zařízení musí být alespoň 20 minut v provozu z důvodu promíchání a ohřátí oleje na provozní teplotu
- odpustíme cca 500 ml oleje do čisté nádoby a nalijeme zpět do zařízení
- po propláchnutí odběrných zařízení provedeme odběr 200 až 250 ml oleje
- vzorky odebíráme do čistých vzorkovnic o objemu 300 ml
- odebraný vzorek je označen a předán k rozboru
- popis musí být přesný, čitelný a musí obsahovat číslo a název stroje, mazané místo, druh maziva, datum odběru, jméno osoby provádějící odběr a označení požadovaných rozborů (Helebrant a kol., 2001)

K porovnávání a měření všech parametrů oleje jsem použil tři vzorky zkoumaného oleje. Vzorek nového oleje nebyl odebrán z hydraulického okruhu traktoru, ale přímo z originálního obalu, ve kterém byl zakoupen.

Vzorek částečně degradovaného oleje byl odebrán dle výše zmíněného postupu. V době odebírání vzorku měl traktor najeto 1 320 motohodin se zkoumaným konkrétním hydraulickým olejem.

Vzorek degradovaného oleje byl odebrán při výměně hydraulického oleje tím způsobem, že původní náplň byla vypuštěna do čisté nádoby a po důkladném promíchání bylo odebráno potřebné množství oleje. Traktor měl v době výměny oleje najeto 2 980 motohodin.

6.3 Použité měřicí přístroje

K posouzení stavu hydraulického oleje byly použity tři měřicí přístroje. Hustota byla měřena digitálním hustoměrem Densito 30PX od firmy Mettler-Toledo. K měření viskozity byl použit rotační viskozimetr Anton Paar DV-3P a zjišťování chemického složení oleje proběhlo na atomovém emisním spektrometru Spectroil Q100.

6.3.1 Hustoměr Densito 30PX

Jde o přenosný ruční hustoměr, který během krátké doby umožňuje určit hustotu vzorku, jeho koncentraci, refrakci apod. Používá metodu oscilující trubice v kombinaci s přesným měřením teploty.

Vzorkovací hadička se ponoří do vzorku a spustí se měření. Výsledek se za několik sekund zobrazí na displeji. Hustoměr je vybaven pumpou s regulovatelnou rychlostí nasávání a speciálním otvorem pro možnost vstříku vzorku externí stříkačkou (pro velmi viskózní vzorky). Přístroj je vybaven teplotní kompenzací automatickou nebo pomocí deseti teplotních kompenzačních koeficientů a kalibrace se provádí na vzduch nebo vodu. Do paměti přístroje lze uložit až 1 100 vzorků, které lze poté přenést do počítače pomocí infračerveného rozhraní. Přístroj je dodáván v kufříku s kompletním vybavením. Jeho cena se pohybuje okolo 70 000 Kč.



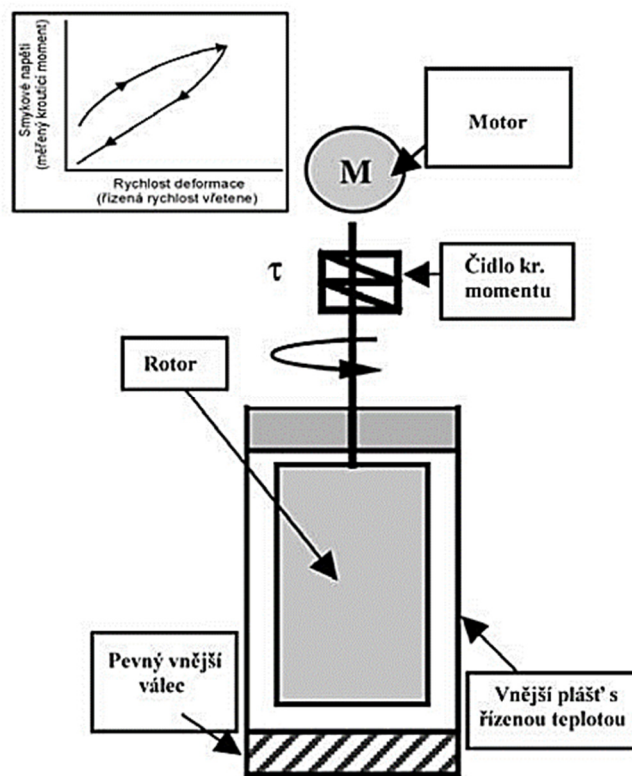
Obr. 10: Digitální hustoměr Mettler-Toledo Densito 30PX (Ilabo.cz, 2011)

Technické parametry přístroje:

Měřicí rozsah hustoty:	0 až 2 g/cm ³
Měřicí rozsah teploty:	0 až +40 °C
Rozlišení:	0,0001 g/cm ³
Přesnost:	0,001 g/cm ³
Jednotky měření:	hustota, specifická hmotnost, Brix %, alkohol, °Baumé, °Plato, API, kyselina sírová, koncentrace
Interní paměť:	1 100 dat
Identifikace vzorku:	datum, čas, identifikace přístroje

6.3.2 Rotační viskozimetr Anton Paar DV-3P

Tento přístroj měří krouticí moment rotujícího vřetena, které je ponořeno do vzorku. Měří se krouticí síla potřebná k překonání odporu u rotujícího válce nebo disku ponořeného v měřeném materiálu. Hřídel motoru se točí definovanou rychlostí a přes pružinu je s ní spojeno vřeteno nebo rotující válec. Úhel pootočení hřídele je měřen elektronicky a poskytuje přesnou informaci o poloze hřídele, resp. vřetene. Z měřených hodnot přístroj přímo vypočte a zobrazí hodnotu dynamické viskozity v $mPa \cdot s$. Pro kapaliny konstantní viskozity roste odpor vůči pohybu s velikostí vřetene. Volbou vhodné kombinace vřetene a rychlosti otáčení může být přizpůsoben rozsah měření pro stanovení reologických vlastností materiálu. Pro získání relevantních výsledků je třeba znát nejdůležitější reologické vlastnosti vzorku. Je tedy nutné vyhodnotit, o jaký typ materiálu jde a správně jej klasifikovat. (Kumbár a Dostál, 2013)



Obr. 11: Schéma měření rotačním viskozimetrem (Severa, 2008)

Parametry přístroje:

Rozsah měření pro standardní vřetena:

- model L: 15 až 2 000 000 $mPa \cdot s$

- model R: 100 až 13 000 000 mPa·s
- model H: 0,16 *) až 106 000 mPa·s

*) pro měření odpovídající 10 % plného rozsahu

Rozlišení:

- adaptér pro nízkou viskozitu: 0,01
- viskozita < 10 000 mPa·s: 0,1
- viskozita > 10 000 mPa·s: 1

Přesnost: ± 1 % z celého rozsahu

Opakovatelnost: 0,2 % z celého rozsahu

Hodnoty momentu (plné zatížení):

- model L: 0,07 mN·m
- model R: 0,7 mN·m
- model H: 5,8 mN·m

Rychlost vřetena: 0,3 až 200 rpm

Teplotní senzor PT 100:

- rozsah: 0 až 100 °C
- přesnost: $\pm 0,1$ °C

Hmotnost přístroje: cca 5 kg

Rozměry (*d* x *š* x *v*): 350 x 300 x 500 mm

Materiál vřeten: AISI 316 nerezová ocel

K měření byl použit adaptér pro měření malých vzorků a standardizované vřeteno TR8. Výhoda použití tohoto vřetene spočívá ve vyšší dosažené přesnosti oproti měření se standardními vřeteny.



Obr. 12: Viskozimetr Anton Paar DV-3P (Rofa.at, 2017)

6.3.3 Atomový emisní spektrometr Spectroil Q100

Spectroil Q100 je kompletně polovodičový spektrometr navržený pro analýzu olejových vzorků. Je schopen měření stopového obsahu prvků rozpuštěných nebo nanesených v minerálních či syntetických výrobcích na bázi ropy za použití techniky s rotační diskovou elektrodou (RDE). Příklad vyhovuje normě ASTM D6595 o stanovení otěrových kovů a kontaminantů obsažených v použitém mazacím oleji nebo použité hydraulické kapalině.



Obr. 13: Atomový emisní spektrometr Spectroil Q100 (Spectro.cz, 2017)

7 VÝSLEDKY A DISKUZE

Tato kapitola obsahuje výsledky provedených měření. Naměřené hodnoty jsou zde uvedeny v tabulkách, které jsou zároveň doplněny přehlednými grafy. Součástí kapitoly je i diskuze k jednotlivým výsledkům.

7.1 Hustota

Hustota oleje je důležitý kvalitativní ukazatel, jehož hodnota signalizuje skutečný stav oleje, především pak jeho znečištění cizími látkami.

Tabulka 8 obsahuje naměřené hodnoty hustoty v závislosti na počtu najetých motohodin (mth) se zkoumaným hydraulickým olejem.

Tab. 8: Naměřená hustota oleje

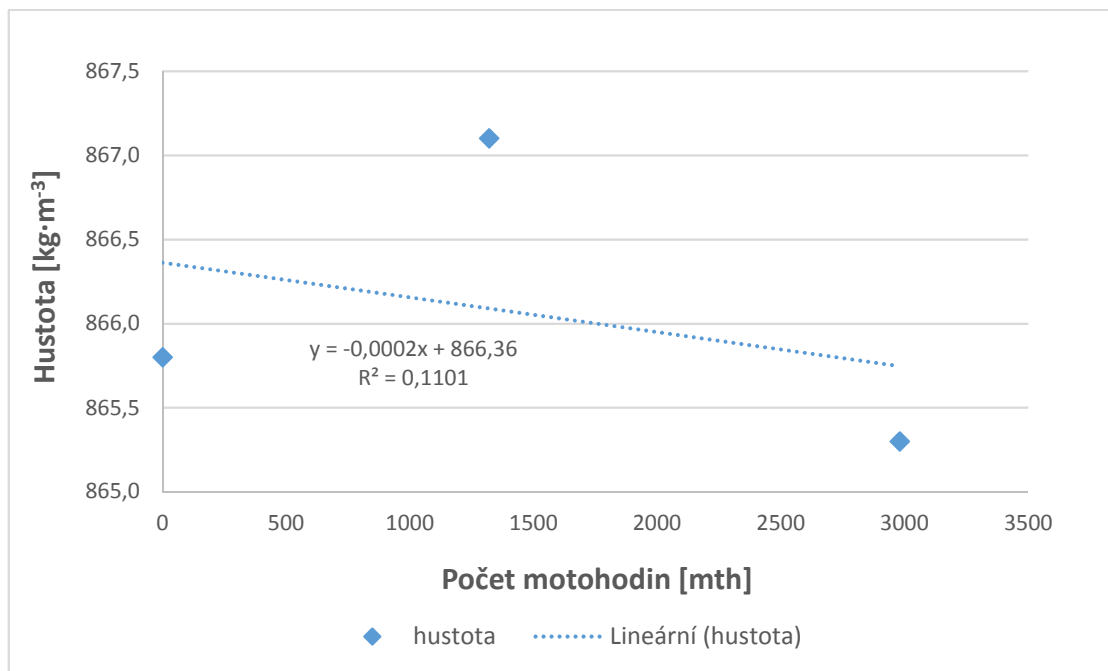
Počet motohodin [mth]	Hustota [$\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$]
0	865,8
1 320	867,1
2 980	865,3

Hustota oleje může být ovlivněna zejména přítomností otěrových kovů či nečistot z okolního prostředí. Hodnota hustoty se používá pro výpočet kinematické viskozity, jak je patrné z rovnice (3.3) v kapitole 3.3.3 Kinematická viskozita.

Z grafu na obrázku 14 je patrný výrazný nárůst hustoty u středního vzorku a poté velké snížení hustoty u vzorku degradovaného oleje. Nárůst hustoty je pravděpodobně způsoben vyšším obsahem nečistot a otěrových kovů v oleji. Následný pokles hustoty může být důsledkem odfiltrování větší části těchto nečistot. Zároveň se však může jednat o chybu při odběru vzorků nebo při samotném měření.

Naměřená hustota nového oleje $865,8 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ se rovněž liší od hodnoty $878 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$, kterou uvádí výrobce (Technoresurs.com, 2017). Tento rozdíl je však způsoben teplotou, při které byla hustota měřena. Výrobce udává hustotu oleje při $15 \text{ }^\circ\text{C}$, ale měření oleje probíhalo při teplotě $22 \text{ }^\circ\text{C}$.

Data jsou proložena lineární funkcí s koeficientem determinace $R^2 = 0,1101$. Na základě této hodnoty by se dalo říci, že funkce není vhodně použita. Vzhledem k malému množství dat by však bylo použití např. polynomu druhého stupně fyzikálně nepřesné. Polynom by procházel všemi body s koeficientem determinace $R^2 = 1$, což se může zdát jako vhodně použitá funkce, ale v tomto případě má funkce lineární větší vypovídající hodnotu.



Obr. 14: Graf průběhu hustoty

7.2 Viskozita

Kinematická viskozita patří mezi základní ukazatele sloužící k posouzení stavu hydraulického oleje. Pro její zjištění byla u jednotlivých vzorků zkoumaného oleje změřena kromě hustoty i dynamická viskozita a poté byl proveden výpočet viskozity kinematické. Viskozita může v průběhu používání oleje ve strojním zařízení růst, nebo klesat. Dle (Helebrant a kol., 2001) je nárůst viskozity způsoben především oxidačními produkty či nečistotami v oleji. Naopak pokles viskozity je způsoben zejména mechanickou a tepelnou degradací přidaných aditiv.

V tabulce 9 jsou zobrazeny naměřené hodnoty dynamické viskozity, vypočtené hodnoty kinematické viskozity a hodnoty tečného napětí (označovaného také jako

smykové napětí). Uvedené hodnoty jsou hodnoty průměrné ze 30 měření. Měření viskozity probíhalo při smykové rychlosti $\gamma = 186 \text{ s}^{-1}$.

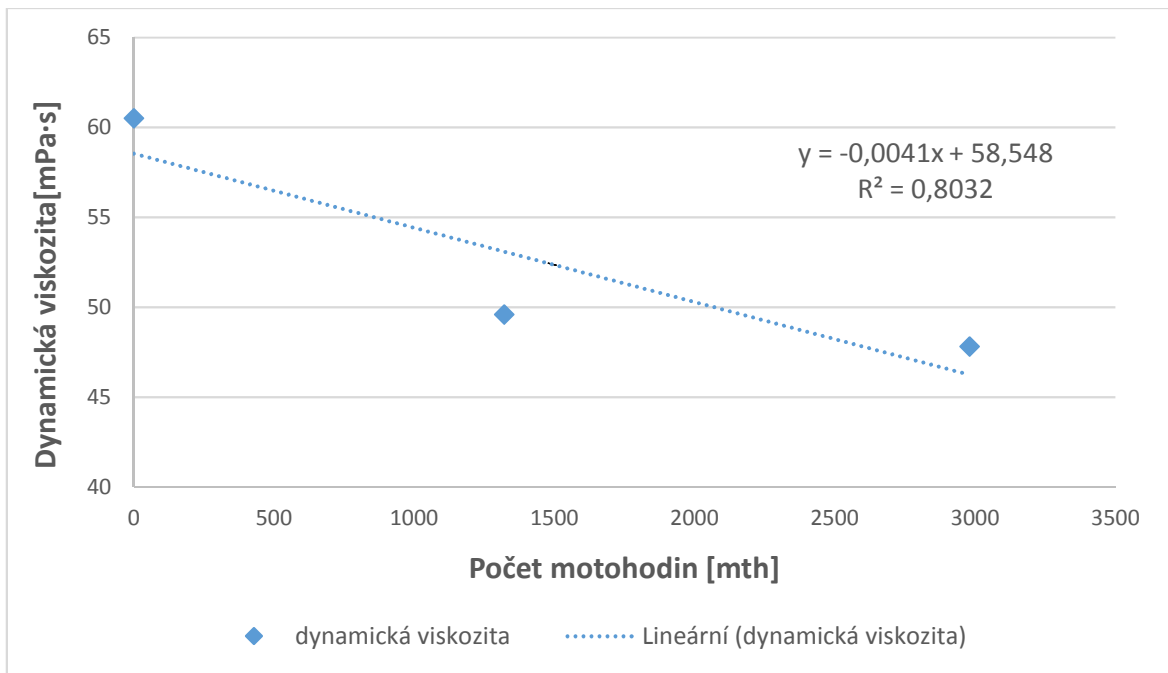
Tab. 9: Hodnoty dynamické a kinematické viskozity

Počet motohodin [mth]	Dynamická viskozita [mPa·s]	Směr. odchylka [mPa·s]	Kinematická viskozita [mm ² ·s ⁻¹]	Směr. odchylka [mm ² ·s ⁻¹]	Tečné napětí [Pa]	Směr. odchylka [Pa]
0	60,505	0,158	69,883	0,183	11,254	0,029
1 320	49,588	0,202	57,188	0,233	9,223	0,038
2 980	47,809	0,263	55,252	0,304	8,893	0,049

Z tabulky 9 a grafů na obrázcích 15 a 16 je patrné, že dynamická i kinematická viskozita v závislosti na ujetých motohodinách klesají, což je právě důsledkem degradace oleje (vyprchávání aditiv). Podobných výsledků dosahují ve své práci i (Jiang a Ellis, 2009), při analýze rostlinného oleje.

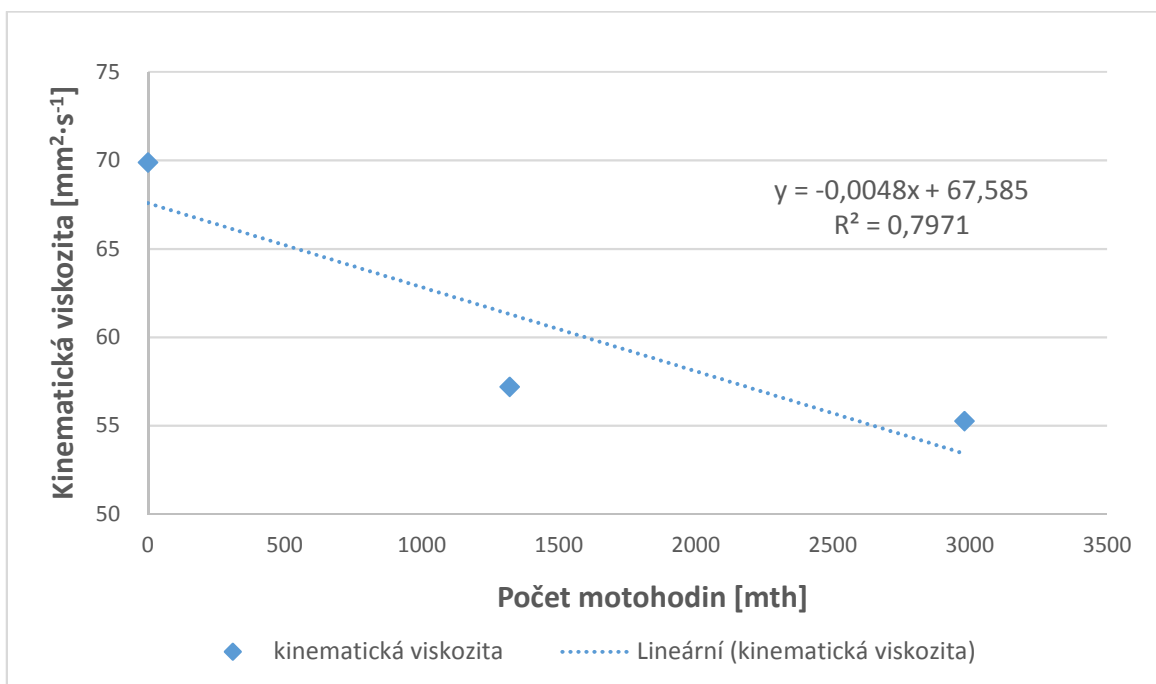
Zajímavé jsou také hodnoty směrodatných odchylek u obou viskozit i tečného napětí. Směrodatná odchylka je statistická funkce, která vyjadřuje kvadratický průměr odchylek hodnot znaku od jejich aritmetického průměru. Vypovídá tedy o tom, jak moc se od sebe vzájemně liší typické případy v souboru zkoumaných čísel.

Z tabulky 9 lze vyčíst, že směrodatná odchylka roste se stářím oleje, což nám dává jistou informaci o čím dál větší nestálosti oleje, tzn. čím je olej starší (více degradovaný), tím podstatněji je větší počet měření daného vzorku.



Obr. 15: Graf naměřené dynamické viskozity

Naměřené hodnoty dynamické viskozity jsou proloženy lineární funkcí. Její tvar je $\eta [mPa \cdot s] = -0,0041 \cdot \text{počet motohodin [mth]} + 58,548$. Koeficient determinace je $R^2 = 0,8032$. Lze tedy konstatovat, že typ funkce byl zvolen vhodně. Prostřednictvím výše uvedené rovnice je možné vypočítat hodnotu dynamické viskozity pro libovolný počet motohodin s přesností na 80,32 %.



Obr. 16: Graf vypočtené kinematické viskozity

Graf kinematické viskozity (obr. 16) vypadá na první pohled stejně jako graf dynamické viskozity na obrázku 15. V případě kinematické viskozity je však rovnice lineární funkce $\nu [mm^2 \cdot s^{-1}] = -0,0048 \cdot \text{počet motohodin [mth]} + 67,585$ a koeficient determinace $R^2 = 0,7971$.

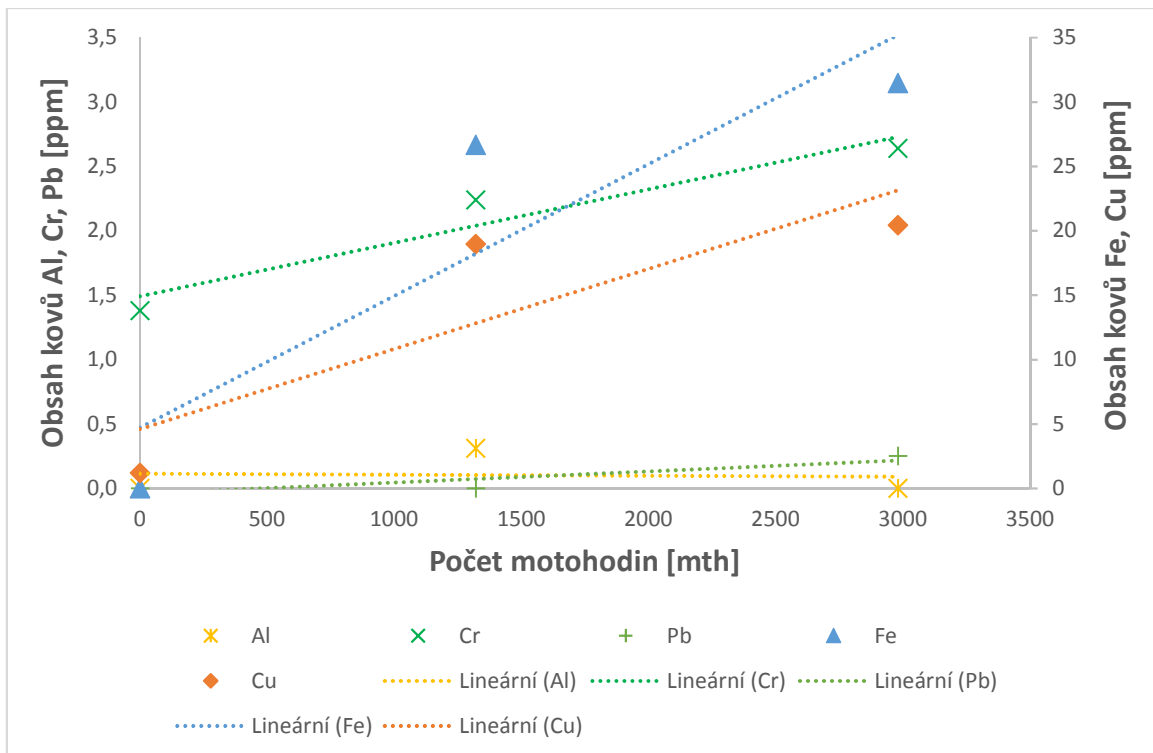
7.3 Atomová emisní spektrometrie

Atomová emisní spektrometrie byla měřena za účelem zjištění koncentrace důležitých chemických prvků (kovů) v oleji. Během provozu dochází i v hydraulickém systému k mechanickému otěru, a tedy vzniku otěrových částic. Vznik těchto částic je tedy přirozeným jevem, kterému se v praxi nelze vyhnout. Určité velmi malé množství těchto kovů se může objevit i v novém oleji jako součást aditiv. Naopak jejich výrazný nárůst může signalizovat problém či nesprávnou funkci některé ze součástí hydraulického systému.

V tabulce 10 je uveden obsah hlavních konstrukčních kovů, jako je železo (Fe), měď (Cu), hliník (Al) a chrom (Cr). Obsah kovů byl měřen v jednotkách částic na milion částic (ppm – parts per million).

Tab. 10: Množství hlavních konstrukčních kovů v oleji

Počet motohodin [mth]	Al [ppm]	Cr [ppm]	Fe [ppm]	Cu [ppm]	Pb [ppm]
0	0,00	1,38	0,00	1,19	0,00
1 350	0,31	2,24	26,67	18,95	0,00
2 980	0,00	2,64	31,46	20,43	0,25



Obr. 17: Graf obsahu hlavních konstrukčních kovů

Z grafu na obr. 17 i z tabulky 10 je patrné, že se v oleji, jakožto hlavní konstrukční kov, nejvíce vyskytuje železo (Fe), které se do oleje dostává formou otěrových částic z třecích ploch zejména hydrogenerátorů a hydromotorů. Výraznějšího nárůstu dosáhl i obsah mědi (Cu), která bývá použita jako jeden z materiálů ložisek. Pro větší přehlednost grafu byla pro tyto dva kovy přidána vedlejší svislá osa. Obdobného nárůstu obsahu železa a mědi v olejové náplni bylo dosaženo i v publikaci (Máchal a kol., 2013). Hodnoty byly proloženy lineární funkcí s koeficientem determinace $R^2 = 0,8127$ u železa a $R^2 = 0,7529$ v případě mědi. Tvar rovnice lineární funkce pro tento případ je $kov [ppm] = a \cdot počet\ motohodin [mth] + b$.

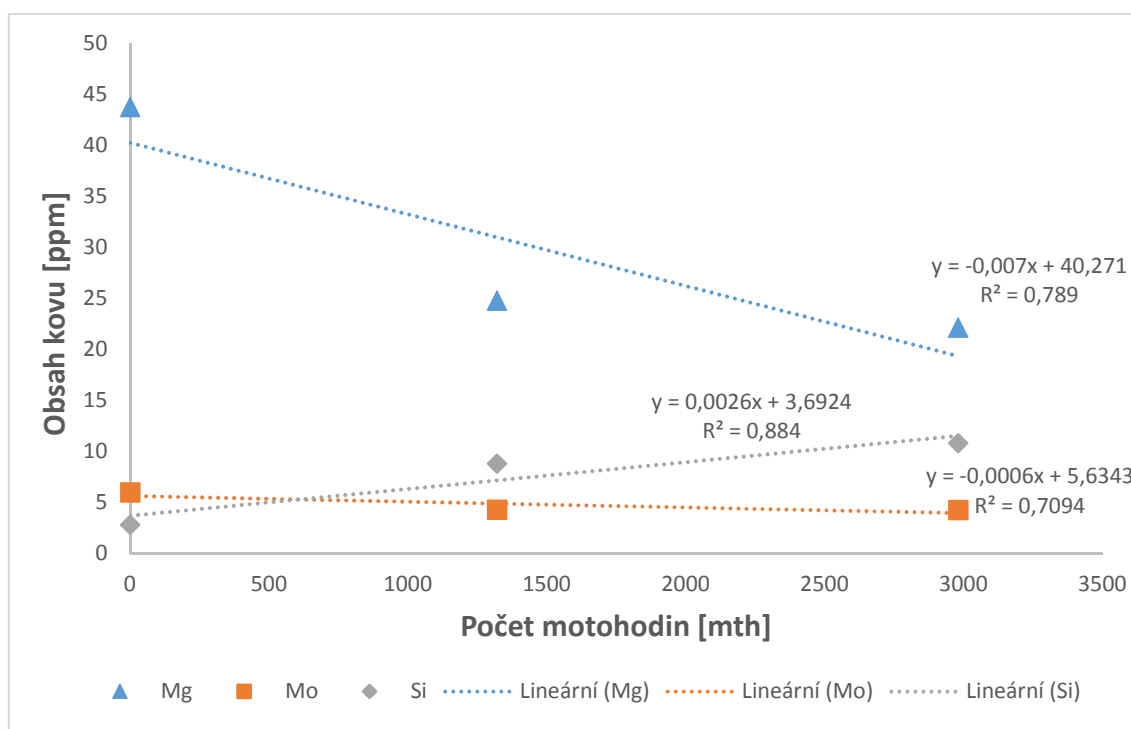
Nárůst obsahu chromu (Cr) je opět důsledkem otěru, jelikož chrom se často používá ke zušlechtní povrchu strojních součástí. I v tomto případě byla vhodně použita lineární funkce, což dokazuje koeficient determinace $R^2 = 0,927$.

Množství hliníku (Al) a olova (Pb) obsaženého v olejové náplni je velmi malé, proto se jím nemá smysl blíže zabývat. Z publikace (Kumbár a kol., 2014) lze vyčíst, že obsah hliníku v motorovém oleji nabývá sice vyšších hodnot, ale ani tam výrazně nenarůstá.

V tabulce 11 jsou uvedeny další důležité kovy obsažené ve zkoumaném oleji. Množství těchto kovů obsažených v oleji je dále přehledně zpracováno v grafu na obrázku 18.

Tab. 11: Množství ostatních kovů v oleji

Počet motohodin [mth]	Mg [ppm]	Mo [ppm]	Si [ppm]
0	43,75	5,98	2,78
1 350	24,76	4,27	8,80
2 980	22,12	4,23	10,80



Obr. 18: Graf obsahu dalších prvků v oleji

Z grafu je patrné, že největší úbytek zaznamenal hořčík (Mg), který se v oleji nacházel ve formě aditiva. Rozdíl obsahu hořčíku ve druhém a třetím vzorku je již velmi malý. Ačkoliv jeho obsah z oleje nejprve vyprchával, v průběhu dalšího provozu se do oleje dostával ve formě otěrových částic. Další aditivum, které se z oleje postupně vytrácelo je molybden (Mo). Naopak v případě křemíku (Si) se o aditivum nejedná. Křemík se do oleje dostává zejména formou prachových částic. Jelikož je olej provozován v hydraulickém systému zemědělského stroje, je nutné s tímto znečištěním počítat. I přesto nejsou naměřené hodnoty nebezpečně vysoké. V porovnání s motorovým olejem

v publikaci (Kumbár a kol., 2014) dosahuje v tomto ohledu námi měřený hydraulický olej lepších výsledků.

Naměřené hodnoty Mg, Mo a Si byly proloženy lineárními funkcemi s koeficienty determinace $R^2 = 0,7094$ až $0,884$. Rovnice této funkce je jako v minulém případě $kov [ppm] = a \cdot počet\ motohodin [mth] + b$.

8 ZÁVĚR

V první části mé diplomové práce jsem zpracoval literární přehled týkající se hydraulických olejů. Byla zde popsána jejich výroba, rozdělení, složení a možnosti aditivace. Pozornost byla věnována také těžkozápalným a biodegradabilním hydraulickým olejům.

Za účelem zpracování praktické části diplomové práce byly odebrány tři vzorky oleje používaného v hydraulickém okruhu traktoru. Použitý olej Total Multagri Super 10W-30 patří do kategorie tzv. STOU olejů (Super Tractor Oil Universal). Jde tedy o moderní univerzální kapalinu, která může být použita v hydraulickém systému, ale zároveň i jako motorový či převodový olej nebo jako náplň pro mokré brzdy. Zkoumaným traktorem byl Same Diamond 265. Byl odebrán vzorek nového, částečně degradovaného a degradovaného oleje.

Pro zjištění celkové degradace oleje bylo provedeno měření hustoty, dynamické viskozity a prostřednictvím atomové emisní spektrometrie bylo změřeno množství různých kovů obsažených ve vzorcích oleje.

Při měření hustoty vykazoval vzorek částečně degradovaného oleje vyšší hustotu než olej nový, což bylo zřejmě způsobeno větším množstvím otěrových kovů ve vzorku. Hustota degradovaného oleje pak byla nižší než v předchozích dvou případech, což mohlo být důsledkem odfiltrování těchto otěrových kovů. Zároveň ale mohlo jít o chybu při odebírání či měření vzorku.

Další měřenou veličinou byla dynamická viskozita, která se pomocí rovnice (3.3) přepočítala na viskozitu kinematickou. Kinematická viskozita v závislosti na ujetých motohodinách klesala. Důvodem byla celková degradace oleje způsobená vyčerpáváním aditiv.

Poslední analýzou vzorků oleje bylo měření na atomovém emisním spektrometru. Toto měření stanovilo obsah prvků rozpuštěných či nanesených ve vzorcích oleje. Hlavním předmětem zájmu zde byl obsah otěrových kovů a aditivačních prvků.

Všechna měření posloužila jako důkaz postupné degradace hydraulického oleje. Důležitým zjištěním je však fakt, že není nutné se bezmyšlenkovitě řídit výměnnými intervaly oleje, ale mnohem rozumnější a ve výsledku i ekonomičtější je pravidelná analýza (tribodiagnostika) používaného oleje. V tomto případě byl výrobcem stanovený

interval výměny oleje překročen téměř o polovinu. Ačkoliv se v oleji postupně hromadily otěrové kovy a aditiva byla vyčerpávána, hydraulický olej byl i po výrazném překročení výměnného intervalu schopen stále plnit svou funkci.

9 POUŽITÁ LITERATURA

BUREŠ, P. a NĚMEC, P. *Měření čistoty hydraulických kapalin*. [online]. 2012 [cit. 8.4.2017]. Dostupné z:

<<http://www.mmspektrum.com/clanek/mereni-cistoty-hydraulickych-kapalin.html>>

ČERNÝ, J. *Když se řekne: základové oleje* [online]. [cit. 27.3.2017]. Dostupné z:

<<https://www.oleje.cz/clanek/Kdyz-se-rekne--zakladove-oleje>>

DBO.CZ. *Složení olejů* [online]. [cit. 31.3.2017]. Dostupné z:

<<http://www.dbo.cz/slozeni-oleju>>

DOBEŠ, P. *Hydraulické kapaliny* [online]. 2012 [cit. 4.4.2017]. Dostupné z:

<http://www.cahp.cz/wp-content/2012/03/01_Cimcool_Hydraulicke_kapaliny.pdf>

DVOŘÁK, L. *Vlastnosti tekutin* [on-line]. 2009 [cit. 30.3.2017]. 62 s. Dostupné z:

<<http://www.338.vsb.cz/wp-content/uploads/2016/03/Dvorak-vlastnosti-tekutin.pdf>>

GRODA, B. a VÍTĚZ, T. *Mechanika tekutin I*. Brno: Mendelova zemědělská a lesnická univerzita v Brně, 2009. ISBN 978-80-7375-283-5.

HELEBRANT, F. *Technická diagnostika a spolehlivost. IV, Provoz a údržba strojů*. Ostrava: VŠB-Technická univerzita Ostrava, 2008. ISBN 978-80-248-1690-6.

HELEBRANT, F., ZIEGLER, J. a MARASOVÁ, D. *Technická diagnostika a spolehlivost. I, Tribodiagnostika*. Ostrava: VŠB-Technická univerzita, 2001. ISBN 80-7078-883-6.

HNILICOVÁ, M. a KUČERA, M. *Tribotechnická diagnostika hydraulických olejov v laboratorných a prievádzkových podmienkach*. Acta facultatis technicae: vedecký časopis Fakulty environmentálnej a výrobnjej techniky. 2013, 18 (1), s. 65-76. ISSN 1336-4472.

HROMÁDKO, J. *Spalovací motory*. 1. vyd. Praha: Grada, 2011, 296 s. ISBN 978-80-247-3475-0.

ILABO.CZ. *Hustoměr Densito 30PX Mettler-Toledo*. [online]. 2011, [cit. 15.4.2017]. Dostupné z: <<http://www.ilabo.cz/produkty/laboratorni-pristroje-opticke/mereni-hustoty/densito-30px/>>

JIANG X. a ELLIS N., *Upgrading Bio-oil through Emulsification with Biodiesel: Thermal Stability*. [online]. 2009, [cit. 24.4.2017]. Dostupné z: <https://www.researchgate.net/publication/231274718_Upgrading_Bio-oil_through_Emulsification_with_Biodiesel_Thermal_Stability>

KUČERA, M. a ROUSEK, M. *Objemové zmeny materiálov tesniacich prvkov v ekologicky priaznivejších hydraulických olejoch*. *Hydraulika a pneumatika: časopis pre hydrauliku, pneumatiku a automatizačnú techniku*. 2006. sv. roč. VIII., č. 1-2, s. 50--55. ISSN 1335-5171.

KUMBÁR, V., a DOSTÁL, P. *Oils degradation in agricultural machinery*. *Acta Universitatis agriculturae et silviculturae Mendelianae Brunensis = Acta of Mendel University of agriculture and forestry Brno = Acta Mendelovy zemědělské a lesnické univerzity v Brně*. 2013. sv. 61, č. 5, s. 1297--1303. ISSN 1211-8516.

KUMBÁR, V., GLOS, J. a VOTAVA, J. *Monitoring of Chemical Elements During Lifetime of Engine Oil*. *Acta Universitatis Agriculturae et Silviculturae Mendelianae Brunensis*, 2014, 62(1): 155--159.

MÁCHAL, P., TKÁČ, Z., MAJDAN, R., STANČÍK, B., ABRAHÁM, R., ŠTULAJTER, I., ŠEVČÍK, P., a RÁŠO, M. *Design and verification of additional filtration for the application of ecological transmission and hydraulic fluids in tractors*. *Acta Universitatis agriculturae et silviculturae Mendelianae Brunensis = Acta of Mendel University of agriculture and forestry Brno = Acta Mendelovy zemědělské a lesnické univerzity v Brně*. 2013. sv. 61, č. 5, s. 1305--1311. ISSN 1211-8516.

MAJDAN, R., KUREKOVÁ, M., PULENKA, R., RÁŠO, M. *Vlastnosti prevodových a hydraulických olejov traktorov*. [online]. 2012 [cit. 6.4.2017]. Dostupné z: <http://old.agroporadenstvo.sk/stroje/clanky/hydraulicke_oleje.htm>

NOVÁČEK, V. *Několik příkladů z proaktivní údržby hydraulických systémů*. [online]. 2011, [cit. 6.4.2017]. Dostupné z: <<http://www.tribotechnika.sk/tribotechnika-42009/nekolik-prikladu-z-proaktivni-udrzby-hydraulickyh-systemu.html>>

OLEJE.CZ. *Aditiva do maziv* [online]. 2017 a. [cit. 4.4.2017]. Dostupné z: <http://www.oleje.cz/clanek/Aditiva_do_maziv>

OLEJE.CZ. *Výkonová klasifikace průmyslových maziv* [online]. 2017 b [cit. 6.4.2017]. Dostupné z: <<https://www.oleje.cz/clanek/Vykonova-klasifikace-prumyslovych-maziv>>

OLEJE.CZ. *Základové oleje* [online]. 2017 c [cit. 30.3.2017]. Dostupné z: <<http://www.oleje.cz/clanek/Zakladove-oleje>>

OLEJE.CZ. *Základy tribotechniky* [online]. 2017 d [cit. 25.3.2017]. Dostupné z: <<https://www.oleje.cz/clanek/Zaklady-tribotechniky>>

PAVLOK, B. *Hydraulické prvky a systémy. Díl 1, Kapaliny v hydraulických mechanizmech hydrostatické převodníky*. Ostrava: VŠB-Technická univerzita, 1999. ISBN 80-7078-620-5.

PEŤKOVÁ, V. a kol. *Tribotechnika v teorii a praxi*. Košice: Vyd. Vienaľa pre TU v Košiciach Strojnícka fakulta, 2012. s. 366 s. ISBN 978-80-8126-057-5.

ROFA.AT. *Anton Paar DVI-3P*. [online]. [cit. 16.4.2017]. Dostupné z: <http://www.rofa.at/Leaflet/Apaar/dv1_3p.pdf>

ROUSEK, M. *Biologicky odbouratelné hydraulické oleje a problematika jejich zavádění u lesnických strojů a zařízení*. In ILAVSKÝ, J. *Ekologické obhospodarovanie lesov pre ich nepretržitý rozvoj*. 1. vyd. Zvolen: Lesnický výskumný ústav vo Zvolene, 1995, s. 195--202. ISBN 80-88853-03-6.

ROUSEK, M. *Pracovní kapaliny hydraulických obvodů*. Atom. 1981. č. 7, s. 9--10.

SEVERA, L. *Tixotropní chování vybraných druhů potravin* [habilitační práce]. Brno: Mendelova zemědělská a lesnická univerzita v Brně, 2008. 113 s.

TECHNORESURS.COM. *Multagri Super 10W-30*. [online]. [cit. 22.4.2017]. Dostupné z: <<http://www.technoresurs.com/upload/iblock/bb1/Multagri%20Super%2010W-30.pdf>>

TRIBOTECHNIKA.CZ. *Základy oboru* [online]. 2014 [cit. 25.3.2017]. Dostupné z: <<http://www.tribotechnika.cz/zaklady-oboru>>

VÁCLAVÍČKOVÁ, I. *Hydraulické kapaliny* [online]. [cit. 4.4.2017]. Dostupné z: <<https://www.oleje.cz/clanek/Hydraulicke-kapaliny>>

VLK, F. *Paliva a maziva motorových vozidel*. Brno: F. Vlk, 2006. ISBN 80-239-6461-5.

10 SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1: Vzájemná vazba tribologických procesů.....	10
Obr. 2: Druhy tření.....	12
Obr. 3: Základní druhy opotřebení	14
Obr. 4: Viskózní index oleje	16
Obr. 5: Příklady složení syntetického a částečně syntetického oleje.....	22
Obr. 6: Typické přísady v hydraulickém oleji	29
Obr. 7: Optické přístroje s bílým světlem a optické laserové přístroje.....	34
Obr. 8: Ferrografická analýza	36
Obr. 9: Sledovaný traktor – Same Diamond 265.....	38
Obr. 10: Digitální hustoměr Mettler-Toledo Densito 30PX.....	40
Obr. 11: Schéma měření rotačním viskozimetrem	41
Obr. 12: Viskozimetr Anton Paar DV-3P	43
Obr. 13: Atomový emisní spektrometr Spectroil Q100.....	44
Obr. 14: Graf průběhu hustoty	46
Obr. 15: Graf naměřené dynamické viskozity	48
Obr. 16: Graf vypočtené kinematické viskozity	48
Obr. 17: Graf obsahu hlavních konstrukčních kovů.....	50
Obr. 18: Graf obsahu dalších prvků v oleji.....	51

11 SEZNAM TABULEK

Tab. 1: Protichůdné vlastnosti minerálního oleje a vody.....	17
Tab. 2: Viskózní klasifikace průmyslových olejů dle ISO 3448	18
Tab. 3: Výkonová klasifikace hydraulických olejů	18
Tab. 4: Vybrané vlastnosti těžkozápálních kapalin	22
Tab. 5: Podrobnější rozdělení těžkozápálních kapalin	23
Tab. 6: Vybrané vlastnosti ekologických kapalin.....	25
Tab. 7: Základní informace o použitém oleji.....	37
Tab. 8: Naměřená hustota oleje	45
Tab. 9: Hodnoty dynamické a kinematické viskozity.....	47
Tab. 10: Množství hlavních konstrukčních kovů v oleji	49
Tab. 11: Množství ostatních kovů v oleji	51