



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV KONSTRUOVÁNÍ

INSTITUTE OF MACHINE AND INDUSTRIAL DESIGN

PLASTICKÁ MAZIVA PRO LOŽISKA VĚTRNÝCH ELEKTRÁREN

GREASES FOR WIND TURBINE BEARINGS

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Michal Procházka

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Michal Okál

BRNO 2025

Zadání diplomové práce

Ústav: Ústav konstruování
Student: **Bc. Michal Procházka**
Studijní program: Konstrukční inženýrství
Studijní obor: bez specializace
Vedoucí práce: **Ing. Michal Okál**
Akademický rok: 2024/25

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma diplomové práce:

Plastická maziva pro ložiska větrných elektráren

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Větrná energetika patří mezi nejrychleji rozvíjející se oblasti energetiky v obnovitelných zdrojích. Díky tomu jsou větrné elektrárny v současné době čím dál více zastoupeny v energetickém průmyslu. Nejcitlivější komponenty mechanismu uvnitř větrné turbíny jsou ložiska, která zajišťují rotaci mechanismu. Nevhodná volba plastických maziv, které se využívají pro mazání těchto ložisek, může znamenat jejich poškození či rychlý konec. Kvůli rozměrům turbín a nepřístupnosti lokalit, kde jsou turbíny instalované, znamená výměna mechanismu výrazné finanční ztráty.

Typ práce: vývojová

Výstup práce: publikační výsledek (J, D)

Projekt: MPO

Cíle diplomové práce:

Hlavním cílem je vytvořit metodiku pro hodnocení plastických maziv určených pro využití do větrných elektráren. Budou kombinovány standardní výkonnostní testy pro plastická maziva tak, aby bylo možné identifikovat stěžejní parametry maziv pro zvolená ložiska a podmínky aplikace.

Dílčí cíle diplomové práce:

- provést kritickou rešerši aktuálních vědeckých prací zabývajících se mazáním plastických maziv ve valivých ložiscích,
- identifikovat stěžejní parametry plastických maziv pro danou aplikaci,
- provést testy zaměřené na hodnocení stěžejních parametrů,
- kriticky posoudit vhodnost daných parametrů maziv a stanovení jejich důležitosti pro výběr aplikace,
- diskutovat získané poznatky v kontextu současných vědeckých studií.

Požadované výstupy: průvodní zpráva.

Rozsah práce: cca 72 000 znaků (40 – 50 stran textu bez obrázků).

Časový plán, struktura práce a šablona průvodní zprávy jsou závazné:

<https://www.ustavkonstruovani.cz/texty/magisterske-studium-ukonceni/>

Seznam doporučené literatury:

Lugt, P.M. (2009). A Review on Grease Lubrication in Rolling Bearings. Tribology Transactions, 52, 470 - 480.

Lugt, P.M. (2013). Grease Lubrication in Rolling Bearings.

Hart, E., de Mello, E.B., & Dwyer-Joyce, R.R. (2022). Wind turbine main-bearing lubrication – Part 1: An introductory review of elastohydrodynamic lubrication theory. Wind Energy Science.

Hart, E., de Mello, E.B., & Dwyer-Joyce, R.R. (2021). Wind turbine main-bearing lubrication – Part 2: Simulation based results for a double-row spherical roller main-bearing in a 1.5 MW wind turbine. Wind Energy Science.

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2024/25

V Brně, dne

L. S.

prof. Ing. Martin Hartl, Ph.D.
ředitel ústavu

doc. Ing. Jiří Hlinka, Ph.D.
děkan fakulty

ABSTRAKT

Tato diplomová práce se zabývá vývojem metodiky pro hodnocení výkonnosti plastických maziv, která jsou určena pro mazání ložisek hlavního hřídele větrné turbíny. Ta jsou vystavena specifickým a náročným provozním podmínkám, což způsobuje časté poruchy a velké náklady na opravy. Cílem byl návrh systému testování, který umožní komplexní hodnocení maziv na základě jejich klíčových schopností. Metodika byla založena na čtyřech testech zaměřených na: tvorbu mazacího filmu, bleeding (uvolňování oleje), schopnost ochrany před opotřebením a třecí vlastnosti. Každý test byl navržen s ohledem na provozní podmínky hlavních ložisek a experimentálně ověřen. Výsledky prokázaly rozdíly mezi jednotlivými vzorky a ověřili také vliv změny testovacích podmínek. Naměřená data byla vyhodnocena pomocí multikriteriální analýzy TOPSIS, která umožnila sloučení výstupů odlišných schopností do jednoho srovnávacího parametru. Tato metoda prokázala schopnost porovnání maziv a zachování stability výstupů při změně vah kritérií i vstupních dat. Výsledná metodika přinesla detailní návrh experimentů a komplexní vyhodnocení schopností maziv a může sloužit jako nástroj pro porovnání výkonnosti maziv.

KLÍČOVÁ SLOVA

plastické mazivo, ložiska, větrné turbíny, metodika, multikriteriální hodnocení, TOPSIS

ABSTRACT

This thesis focuses on the development of a methodology for evaluating the performance of greases intended for the main shaft bearings of wind turbines. These bearings operate under specific and demanding conditions, often resulting in failures and high maintenance costs. The aim was to design a testing system that enables a comprehensive evaluation of greases based on their key performance capabilities. The methodology was built upon four tests assessing: lubricant film formation, oil separation (bleeding), wear protection, and frictional behavior. Each test was designed with respect to the operating conditions of main bearings and was experimentally validated. The results revealed significant differences between the tested grease samples and confirmed the influence of varying test conditions. The collected data were analyzed using the TOPSIS multi-criteria decision-making method, which allowed integration of the outputs of different performance capabilities into a single comparative indicator. The method demonstrated the ability to compare greases while maintaining output stability under changing weights and input data. The final methodology provides a detailed framework for experimental testing and comprehensive evaluation of grease performance, offering a robust method for comparing greases.

KEYWORDS

grease, bearings, wind turbines, methodology, multicriteria evaluation, TOPSIS

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

PROCHÁZKA, Michal. *Plastická maziva pro ložiska větrných elektráren*. Online, diplomová práce. Michal OKÁL (vedoucí práce). Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2025. Dostupné z: <https://www.vut.cz/studenti/zav-prace/detail/162395>. [cit. 2025-03-01].

PODĚKOVÁNÍ

Na tomto místě bych rád poděkoval mému vedoucímu Ing. Michalu Okálovi za jeho ochotu a strávený čas. Dále pak za odborné a usměrňující rady, díky kterým jsem se mohl v dané problematice lépe orientovat. Velké poděkování také patří celé mé rodině a přítelkyni za neutuchající podporu během celého studia.

PROHLÁŠENÍ AUTORA O PŮVODNOSTI PRÁCE

Prohlašuji, že diplomovou práci jsem vypracoval samostatně, pod odborným vedením Ing. Michala Okála. Současně prohlašuji, že všechny zdroje obrazových a textových informací, ze kterých jsem čerpal, jsou řádně citovány v seznamu použitých zdrojů.

V brně, dne 23. května 2025

.....

Podpis autora

OBSAH

1	ÚVOD	13
2	PŘEHLED SOUČASNÉHO STAVU POZNÁNÍ	14
2.1	Rešeršní metody	14
2.2	Kritická rešerše	16
2.2.1	Specifikace ložisek větrných turbín	16
2.2.2	Funkce plastického maziva v ložisku	19
2.2.3	Faktory ovlivňující mazání ložisek	22
2.2.4	Multikriteriální rozhodovací metody	30
2.3	Shrnutí hlavních zjištění	34
3	CÍLE PRÁCE	36
3.1	Vymezení problému	36
3.2	Cíle vývoje	37
4	KONCEPČNÍ NÁVRH	38
4.1	Analýza cílů	38
4.2	Specifikace zákazníka a omezení	38
4.3	Návrh řešení	40
4.3.1	Specifikace klíčových schopností maziv	40
4.3.2	Vzorky plastických maziv	42
4.3.3	Možnosti experimentálního hodnocení maziv	43
4.3.4	Přístupy multikriteriální analýzy	45
5	PŘEDBĚŽNÝ NÁVRH	46
5.1	Metodika	46
5.1.1	Předběžný návrh metodiky pro hodnocení plastických maziv	47
5.2	Experimentální část	48
5.2.1	Tloušťka mazacího filmu	48
5.2.2	Bleeding a jeho udržitelnost	49
5.2.3	Schopnost maziva chránit povrchy před opotřebením	50
5.2.4	Nízké třecí vlastnosti	52
5.3	Vyhodnocení multikriteriální analýzou	53
6	DETAILNÍ NÁVRH	57

6.1	Detailní návrh metodiky pro hodnocení výkonnosti maziv	57
6.2	Experimentální část	58
6.2.1	Tloušťka mazacího filmu	58
6.2.2	Bleeding a jeho udržitelnosti	62
6.2.3	Schopnost maziva chránit povrchy před opotřebením	65
6.2.4	Nízké třecí vlastnosti	68
6.3	Vyhodnocení multikriteriální analýzou	73
6.4	Analýza vlivů na vyhodnocení multikriteriální analýzou	78
6.4.1	Vliv změny vah kritérií	78
6.4.2	Vliv změny vstupních dat	81
7	DISKUSE	84
7.1	Experimentální část metodiky	84
7.2	Vyhodnocení multikriteriální metodou	90
8	ZÁVĚR	92
9	VÝSLEDEK VÝZKUMU PODLE RIV	94
10	SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ	95
11	SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK, SYMBOLŮ A VELIČIN	102
12	SEZNAM OBRÁZKŮ A GRAFŮ	105
13	SEZNAM TABULEK	107

1 ÚVOD

Větrné turbíny představují jeden z klíčových prvků rozvoje obnovitelných zdrojů energie. S rostoucím instalovaným výkonem a narůstajícím počtem zařízení se zároveň zvyšují nároky na spolehlivost jednotlivých komponent a na efektivní snižování provozních nákladů. Zcela zásadní úlohu v konstrukci turbíny hraje ložisko hlavního hřídele, které přenáší zatížení i otáčky rotoru a musí po celou dobu životnosti zařízení pracovat bez poruch, a to i při náročných a proměnlivých provozních podmínkách. Přestože jsou tato ložiska běžně navrhována na dobu provozu až 20 let, tak velká část z nich nedokáže této doby bez poruchy dosáhnout a předčasně selže. Poruchy ložisek vedou k neplánovaným odstávkám turbín a způsobují vysoké náklady na jejich opravy.

Jedním z hlavních faktorů ovlivňujících životnost ložiska je správná volba plastického maziva. Jeho úkolem je udržovat mezi povrchy dostatečnou vrstvu mazacího filmu, který omezuje tření a zabráňuje přímému kontaktu materiálů. Správně zvolené mazivo tak snižuje opotřebení, brání poškození a přispívá ke stabilnímu a spolehlivému chodu celé turbíny. Přestože je výběr vhodného maziva pro konkrétní aplikaci velmi důležitý, v současné praxi často chybí jednotná metodika, podle které by bylo možné porovnat jednotlivé typy plastických maziv z hlediska jejich výkonnosti. Funkce maziva v ložisku je přitom komplexní a závisí na více schopnostech a nelze ji tedy spolehlivě posoudit pomocí jediného dílčího testu.

Vzhledem k těmto omezením vznikla potřeba navrhnout ucelený, prakticky použitelný a na reálných podmínkách založený způsob hodnocení výkonnosti plastických maziv. Tato diplomová práce se proto zaměřuje na vývoj metodiky, která je schopna experimentálně ověřit klíčové schopnosti maziv v podmínkách obdobných těm, ve kterých pracují ložiska hlavního hřídele větrné turbíny. Dílčí testy byly navrženy pro čtyři rozhodující schopnosti: tvorbu mazacího filmu, bleeding (uvolňování oleje), ochranu proti opotřebení a třecí vlastnosti. Součástí metodiky je multikriteriální hodnocení pomocí metody TOPSIS, která umožňuje sloučit výsledky jednotlivých testů do jednoho přehledného výstupu. Výsledkem je systém hodnocení, který umožňuje porovnávat výkonnost maziv na základě experimentálního hodnocení a následné multikriteriální analýzy.

2 PŘEHLED SOUČASNÉHO STAVU POZNÁNÍ

2.1 Rešeršní metody

Pro dosažení cílů rešerše bylo nezbytné formulovat adekvátní rešeršní dotazy, které komplexně reflektovaly zkoumanou problematiku. Celkem byly vypracovány tři dotazy, jejichž prostřednictvím došlo k systematickému prohledání databází Web of Science a Scopus. Z hlediska dotazů se jednalo o oblast specifikace ložisek větrných turbín, dále dva dotazy z oblasti mazání ložisek pomocí plastických maziv. Jako poslední bylo zadán dotaz na multikriteriální rozhodovací metody, které se zabývají hodnocením více parametrů. Každý z těchto dotazů byl dále rozšířen o relevantní klíčová slova a jejich synonyma, což umožnilo důkladný průzkum databází a získání uceleného souboru publikací. Všechny rešeršní dotazy byly formulovány následovně:

1) *Jaké aspekty ovlivňují ložiska větrných turbín a které parametry jsou důležité pro jejich mazání plastickými mazivy?*

(wind turbine OR wind farms OR wind power plant) AND (bearing OR housing) AND (lubrication OR oiling) AND (operating conditions OR working conditions OR operating parameters)

2) *Jaká je funkce plastického maziva v ložisku?*

(rolling bearing) AND (lubrication processes OR lubrication mechanism OR lubrication function) AND (grease OR plastic lubricant OR syntetic lubricant)

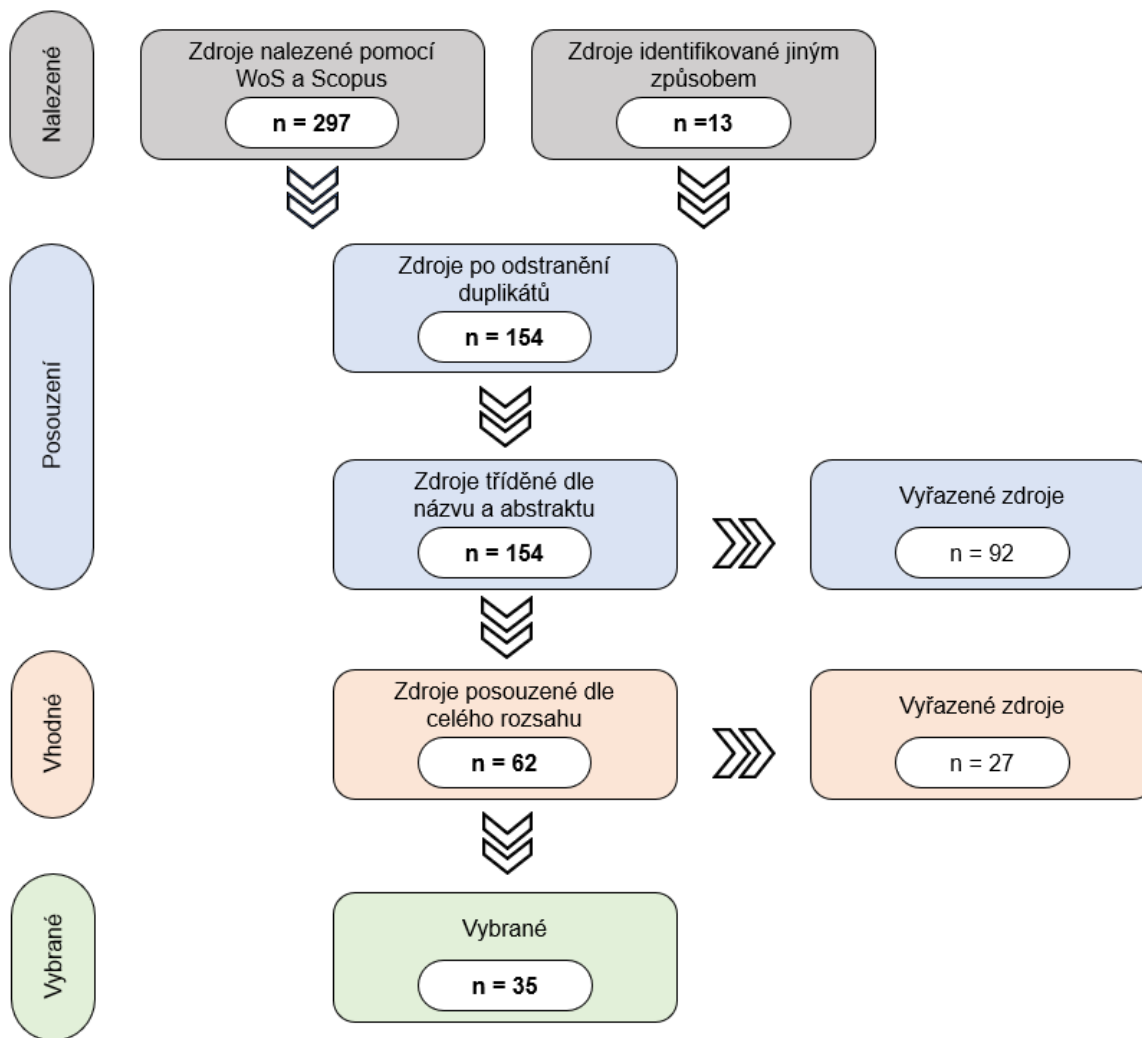
3) *Jaké faktory ovlivňují procesy mazání ve valivých ložiscích?*

(rolling bearing) AND (grease lubrication OR grease performance) AND (grease OR plastic lubricant OR syntetic lubricant) AND (operating conditions OR working conditions OR operating parameters)

4) *Jaké metody multikriteriálního rozhodování (MCDM) se používají pro hodnocení alternativ?*

(multi-criteria decision making OR MCDM OR multi-criteria analysis) AND (methods OR techniques OR evaluation)

Získané články byly podrobeny důkladnému procesu selekce, který zahrnoval předběžné vyřazení publikací na základě duplicity obou databází. Následně byla provedena analýza názvů a abstraktů a dále eliminace dle scientometrických kritérií, jako jsou kvartil a Impact Factor časopisů, h-index autorů, citovanost a aktuálnost článků. Celý postup selekce poté přinesl celkem 29 článků, které byly dále podrobeny detailní kritické rešerši ve všech částech článku. Výsledný postup následné selekce a filtrace zdrojů je pak přehledně znázorněn v PRISMA diagramu (Obr. 2-1).



Obr. 2-1 PRISMA diagram diplomové práce

2.2 Kritická rešerše

2.2.1 Specifikace ložisek větrných turbín

Hlavní ložisko větrné turbíny představuje kritický prvek, který umožňuje přenos točivého momentu do převodovky a generátoru. Oproti běžným průmyslovým aplikacím jsou tato ložiska vystavena proměnlivému zatížení způsobenému turbulentním prouděním větru, aerodynamickými silami a vibracemi. Tato specifická kombinace sil a dynamického namáhání klade mimořádné požadavky na jejich konstrukci a mazání.[1]

Nejčastěji jsou používána valivá ložiska, jejichž konstrukce zahrnuje soudečkové, kuželíkové nebo válečkové elementy. Historicky se široce využívala kuželíková ložiska, avšak v posledních letech jsou stále častěji nahrazována soudečkovými ložisky, která díky svému tvaru lépe kompenzují nesouosost a snášejí proměnlivá zatížení. Konkrétní volba ložiska závisí na konstrukčním uspořádání turbíny:

- Soudečková ložiska: Nabízejí vysokou únosnost a schopnost vyrovnávat určité vychýlení osy hřídele. Jsou vhodná pro turbíny s vysokým axiálním a radiálním zatížením.
- Kuželíková ložiska: Poskytují lepší rozložení zatížení, ale mají vyšší tření a vyšší nároky na mazání.
- Válečková ložiska: Používají se méně často, zejména u systémů s přímým přenosem momentu bez převodovky.

Další důležitou proměnnou je konfigurace ložisek v rámci soustavy. U větrných turbín se nejčastěji využívají jednořadá nebo dvouřadá ložiska, přičemž některé konstrukce spoléhají na konfiguraci dvou hlavních ložisek, která zajišťuje rovnoměrnější rozložení zatížení a přispívá k delší životnosti celé soustavy. Přesto i ta nejrobustnější ložiska selhávají[1]. Ve všech uvedených případech se jedná o liniový kontakt mezi valivými tělesy a oběžnými drahami, který je charakteristický pro tento typ ložisek a umožňuje přenášet velmi vysoká zatížení, typická pro hlavní hřídele větrných turbín.[1][2]

Poruchy ložisek větrné elektrárny

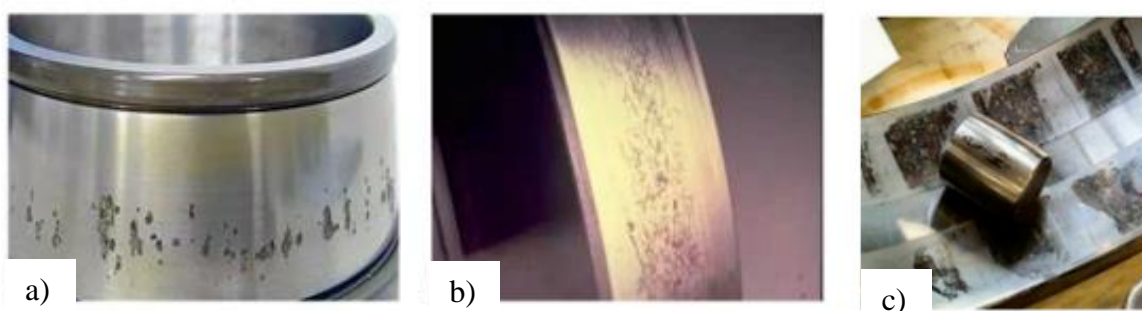
V důsledku náročných provozních podmínek často dochází k předčasnému selhání ložisek, přestože jsou dimenzována na životnost 20 až 25 let [3]. Z provozních dat vyplývá, že většina odstávek větrných turbín je způsobena právě poruchou ložisek, přičemž více než 50 % těchto poruch má původ v nevhodném mazání nebo degradaci maziva. Oproti běžným kuličkovým ložiskům se poruchy projevují i bez extrémních kontaktních tlaků, zato v důsledku proměnlivého zatížení a nízkých otáček, což se projevuje omezením režimu mazání. [4].

Typickým mechanismem poškození je mikropitting, tedy únava materiálu v povrchové vrstvě, která je způsobena opakovaným zatížením za podmínek smíšeného mazání. Vlivem nedostatečné tloušťky filmu dochází k opakovanému kontaktu povrchů, vzniku mikrotrhlin a následnému uvolňování materiálu. [3]

Adhezivní a abrazivní opotřebení je spojeno s kontaminací maziva pevnými částicemi, nevhodnou viskozitou nebo ztrátou mazacího filmu, což vede ke zvýšenému tření a lokálnímu poškození povrchu [5]. U pomaloběžných ložisek navíc často dochází ke tření za podmínek nedostatečného promazání, což zvyšuje riziko plastické deformace a vrypů.

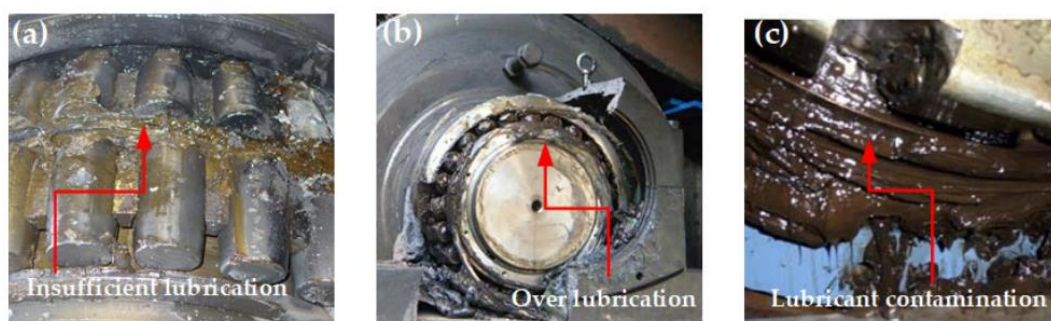
Důležitým typem poruchy je také koroze, která se objevuje zejména v důsledku vniknutí vlhkosti do ložiska. Ve specifických případech dochází k tzv. white-etching cracks (WEC), což jsou vnitřní trhliny vznikající v důsledku kombinace mechanického a chemického namáhání, jejichž přesná příčina není doposud plně objasněna. [3][4]

Obzvláště rizikové jsou provozní stavy s vysokými vibracemi nebo častým zastavováním a rozběhem. Tyto situace mohou vést k mikropohybu kontaktních ploch, což způsobuje tzv. fretting, tedy mikroskopické opotřebení doprovázené oxidací. Tento jev je problematický především u turbín s nízkou otáčkovou frekvencí a dlouhými klidovými intervaly, kdy běžné EP a AW aditiva nejsou dostatečně aktivní [4].



Obr. 2-2 a) Abrazivní opotřebení, b) Únavové opotřebení, c) Oxidační opotřebení [5]

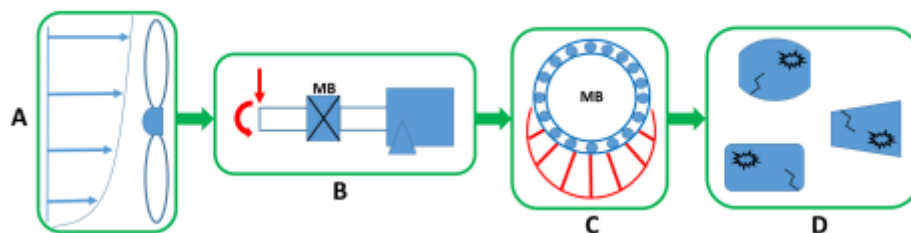
Kvalita maziva je zásadní pro prevenci těchto poruch. Správná rovnováha mezi bleedingem a mechanickou stabilitou určuje, jak efektivně mazivo dodává olej do kontaktních oblastí ložiska. Nadměrné mazání může zvýšit odpor v ložisku a způsobit přehřívání, zatímco nedostatečné mazání vede k přímému kontaktu kovových povrchů a urychlenému opotřebení [5]. Zmíněné mezní stavy z hlediska mazání jsou znázorněny na Obr. 2-3.



Obr. 2-3 a) nedostatečné mazání, b) nadměrné mazání, c) kontaminace maziva [5]

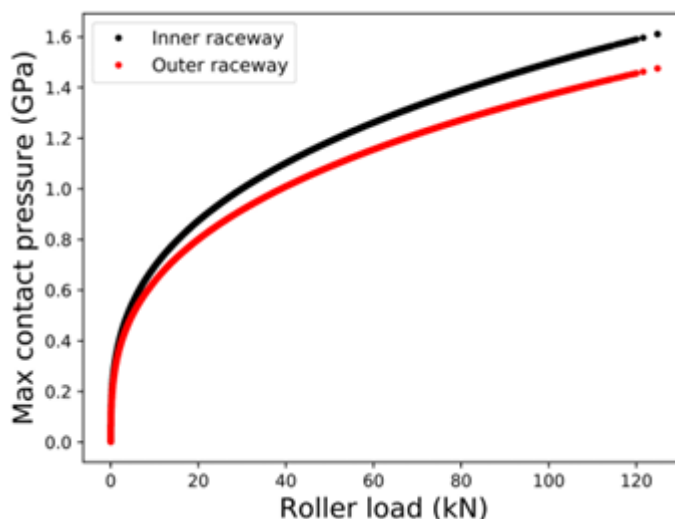
Provozní podmínky

Rychlost otáčení hřídele větrné turbíny je primárně řízena rychlostí větru a konstrukcí turbíny (schéma na Obr. 2-4). Pro dosažení jmenovitého výkonu je optimální rychlost větru obvykle kolem 12 m/s, přičemž regulační systém přizpůsobuje otáčky tak, aby maximalizoval účinnost a zabránil nadměrnému zatížení komponent. U výkonných větrných turbín se rychlost otáčení hlavního hřídele pohybuje v rozmezí 10-15 ot/min, avšak závisí na rozměrech rotoru, aerodynamických vlastnostech lopatek a aktuálních meteorologických podmínkách.[1][6]



Obr. 2-4 A) Působící vítr, B) Zatížení hlavního hřídele, C) Silové účinky v ložisku, D) Poruchy[1]

Dynamické zatížení ložisek je způsobeno proměnlivým charakterem větru, což vede k rázovým silám a vibracím. Při prudkých změnách větru nebo při poryvech může dojít k náhlému nárůstu zatížení, které se přenáší na ložiska a jejich mazací film. U výkonných turbín přesahuje celkové zatížení ložisek několik MN, přičemž běžné hodnoty se pohybují ve stovkách kN. Na ložiska působí jak axiální síly od větru, tak radiální zatížení způsobené hmotností rotoru a hřídele. To vše způsobuje proměnný kontaktní tlak na vnitřním a vnějším kroužku. Hodnoty se poté pohybují a do tlaku 1,6 GPa[2]. Vývoj kontaktního tlaku je poté znázorněn na Obr. 2-5.



Obr. 2-5 Závislost kontaktního tlaku na zatížení elementu [2]

Provozní teplota je jedním z klíčových faktorů ovlivňujících životnost a funkci ložisek hlavního hřídele větrné turbíny. U turbín na souši se běžný rozsah provozních teplot pohybuje mezi -30 až $+50$ °C, zatímco u offshore turbín může být rozsah ještě extrémnější, typicky mezi -40 až $+80$ °C. Tyto teplotní výkyvy mají zásadní vliv na vlastnosti plastického maziva, zejména na jeho viskozitu, stabilitu mazacího filmu a celkovou účinnost a režim mazání [3]. Při nízkých teplotách může mazivo ztuhnout, čímž se snižuje jeho schopnost tvořit mazací film. Naopak při vysokých teplotách dochází ke zrychlenému odpařování základového oleje, oxidaci a možné separaci jednotlivých složek maziva. Dlouhodobý provoz nad doporučenou teplotou urychluje jeho degradaci – zvýšení provozní teploty o 10 – 15 °C může vést až ke zkrácení životnosti maziva o polovinu. Kromě samotného zatížení ložiska ovlivňuje provozní teplotu také okolní prostředí, a proto je nezbytné volit mazivo s dostatečnou tepelnou stabilitou a širokým provozním rozsahem, které zajistí spolehlivý chod ložiska i za proměnlivých klimatických podmínek. [7]

2.2.2 Funkce plastického maziva v ložisku

Plastické mazivo, které slouží jako trvalá náplň ložiska, musí v průběhu provozu plnit více různých schopností. Tomu odpovídá také samotné složení maziva, které se skládá ze tří hlavních složek. Jedná se o základový olej, zahušťovadlo a aditiva. Základový olej zpravidla tvoří největší podíl (70 – 90 %) a je nositelem mazacích vlastností. Zahušťovadlo (5 – 15 %) poté zadržuje olej ve své struktuře a až působením teploty a síly je olej uvolňován do kontaktu. Aditiva (0 – 5 %) pak upravují výkonnostní parametry, jako je například odolnost vůči vysokým tlakům nebo ochranu povrchu před opotřebením v neadekvátních provozních podmínkách. [3][8]

V závislosti na rozdílných provozních podmínkách jsou také užívány různé typy plastického maziva o potřebném složení. Na trhu se však vlivem velkých možností a kombinací složení vyskytuje mnoho maziv. Při výběru plastického maziva je důležité zohlednit parametry jako typ základového oleje a zahušťovadla, pumpovatelnost, oxidační vlastnosti nebo odpařovací vlastnosti a další [9]. Pro mazání ložisek větrných turbín s nízkým zatížením je vhodné zvolit plastické mazivo se střední viskozitou. Pro ložiska s středním a vysokým zatížením je doporučeno použít plastické mazivo pro extrémní podmínky, kdy je doporučováno použít plastické mazivo s vysokou viskozitou základového oleje a dostatečným množstvím zahušťovadla. [10]

Ložiska jsou předběžně mazána plastickým mazivem kvůli ochraně při přepravě. Při instalaci jsou poté opatřena dalším množstvím maziva. Typické u těchto ložisek je využití automatického domazávání v průběhu provozu. Domazávací systémy spolehlivě dodávají nejmenší účinné množství maziva do všech potřebných kontaktních ploch za chodu stroje a napomáhají tak mazání. Mohou pak zajistit prodloužení intervalů údržby a předejít poruchám součástí v krátkém čase. [3]

Záběhová fáze

Poté co je plastické mazivo aplikováno do ložiska následuje první fáze označovaná jako záběhová. Většina maziva je po prvních otáčkách vytlačena z kontaktní oblasti a dochází k tvorbě tzv. rezervoárů. Ty se vyskytují v okolí kontaktu a také na ostatních komponentech ložiska, jako je například klec nebo těsnění. Mazivo je popsáno jako Binghamská kapalina, což znamená, že samovolně nenateče zpět a je zapotřebí jiného působení (tlak, teplota). Tento proces migrace maziva během záběhu je důvodem zvýšeného valivého odporu ložiska a také zvýšené provozní teploty, kdy tyto vlastnosti jsou také ovlivněny reologií užitého maziva. [11]

Délka této fáze se pohybuje řádově v desítkách minut až několika hodin, v závislosti na procentuálním množství náplně maziva. Lugt [12] dokumentoval záběh pozorováním maziva na okraji válečkového ložiska. Fotografie po 55 minutách a 500 hodinách se téměř nelišily, což naznačuje, že záběh lze po několika desítkách minut považovat za dokončený.



Obr. 2-6 Průběh záběhové fáze [12]

Bleeding fáze

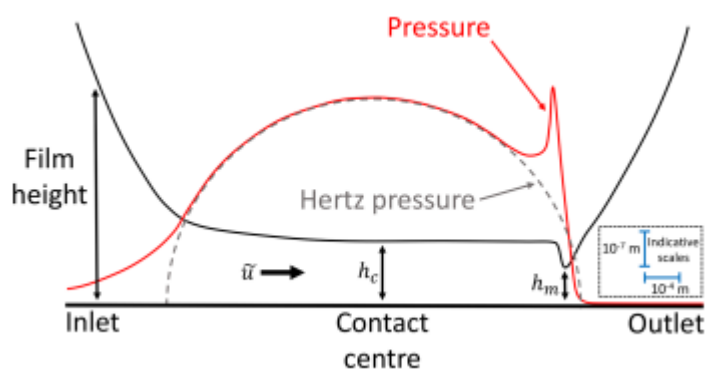
Po ukončení záběhové fáze přechází ložisko do tzv. bleeding fáze, kdy mazivo již necirkuluje, ale zůstává usazeno v rezervoárech. Hlavním mechanismem zásobování kontaktu se stává uvolňování základového oleje z těchto rezervoárů, tedy bleeding. Jelikož se jedná o binghamskou kapalinu, kdy olej je zadržován ve struktuře zahušťovadla, k jeho uvolnění je třeba okolní teploty a působících sil. S rostoucí teplotou se olej uvolňuje snáze, zatímco při nízkých teplotách je jeho výdej omezený a závisí na správné volbě maziva a jeho reologii. Postupem času se navíc projevuje degradace struktury zahušťovadla, což vede k vyššímu bleedingu. Z tohoto důvodu je žádoucí, aby mazivo vykazovalo stabilní a rovnoměrné uvolňování oleje po co nejdelší dobu provozu ložiska. [12]

Tato fáze je klíčová pro dlouhodobé fungování ložiska, neboť kontakt je nadále mazán výhradně olejem uvolňovaným z rezervoárů. Pokud není zajištěno dostatečné uvolňování, může dojít ke stavu hladovění, kdy se mazací film dočasně ztenčí či úplně zmizí. Tento stav zvyšuje riziko přímého kontaktu třecích povrchů, což může vést k urychlenému opotřebení a v krajním případě k selhání ložiska. Bleeding fáze tak přímo ovlivňuje délku životnosti celého systému. [11]

Režim mazání

Rozhodujícím faktorem funkce maziva je způsob, jakým odděluje plochy v místě kontaktu. V hlavních ložiscích převládá spíše vznik elastohydrodynamického mazání. Tento režim nastává v důsledku vysokých tlaků v kontaktu za podmínek relativního pohybu povrchů, kdy vzniká tenká mazací vrstva schopná udržet separaci. Vlivem tlaku dochází k elastické deformaci povrchů a současně k nárůstu viskozity maziva, což umožňuje vznik stabilního mazacího filmu i při relativně nízkých rychlostech pohybu. [13]

Mazací film, obvykle v řádu stovek nanometrů, je primárním mazacím mechanismem v nekonformních kontaktech. Ten se liší od Hertzova kontaktu v několika klíčových aspektech. Jedním z nich je výrazný tlakový vrchol, který je patrný v tlakovém profilu EHD kontaktu (viz Obr. 2-7). Tento vrchol je typický pro maziva, kdy dochází ke změně viskozity vlivem tlaku. Dalším rozdílem oproti Hertzovu kontaktu je odchylka tlaku na vstupu do kontaktu, kde dochází k plynulé změně tlaku, což umožňuje vtahování maziva do kontaktu.[6]



Obr. 2-7 Elastohydrodynamický kontakt [6]

Tloušťka mazacího filmu v EHL režimu závisí na viskozitě maziva, relativní rychlosti a zatížení. Pro její odhad byly navrženy analytické vztahy, jako například rovnice Hamrocka a Dowsona [14], které umožňují predikční výpočet centrální a minimální tloušťky filmu v závislosti na provozních parametrech. Jejich použití však vyžaduje pečlivé zvážení rozsahu platnosti a limitací [6]. Zmíněné rovnice jsou popsány následovně:

$$H_m = 3,63G^{0,49} \cdot U^{0,68} \cdot W^{-0,073} (1 - e^{-0,68k}) \quad (2-1)$$

$$H_c = 2,69G^{0,53} \cdot U^{0,67} \cdot W^{-0,067} (1 - 0,61e^{-0,73k}) \quad (2-2)$$

Kde G je materiálová parametr, U je rychlostní parametr a W je parametr zatížení

Měření tloušťky filmu se nejčastěji provádí pomocí konfigurace kulička–disk, kde se využívá interferometrie a optické metody pro sledování rozložení filmu v kontaktu. Tvar filmu odpovídá eliptickému nebo liniiovému kontaktu a centrální oblast, kde se koncentruje největší zatížení, bývá s největší tloušťkou. Naopak postranní části kontaktu, kde dochází k rozptýlení tlaku, vykazují minimální tloušťku. V některých případech se ve směru výtoku maziva tvoří zúžený pás s typickým rozložením proudění. Tyto jevy jsou často doprovázeny laterálním prouděním popsáním Poiseuilleovým tokem. V liniiových kontaktech se tyto charakteristiky rozvíjejí podél celé délky valivých těles s lokálními deformacemi na jejich koncích. [15]

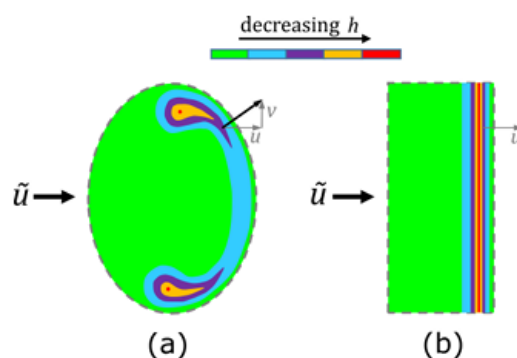
2.2.3 Faktory ovlivňující mazání ložisek

Mazání je klíčový proces, který minimalizuje tření a opotřebení mezi pohyblivými částmi ložiska. To se děje tvorbou mazacího filmu mezi kontaktními povrchy a snížením přímého kontaktu mezi nimi. Mazací procesy a jejich ovlivňující faktory jsou pak důležité pro správnou funkci a dlouhou životnost ložisek větrných turbín. [13]

Liniový kontakt

V hlavních ložiscích větrných turbín se běžně vyskytuje liniiový kontakt, který vzniká mezi valivým tělesem a oběžnou dráhou. Ve srovnání s bodovým kontaktem, se liniiový kontakt vyznačuje větší kontaktní plochou a vyšší konformitou. To znamená, že zatížení se v liniiovém kontaktu rozkládá na delší styčnou oblast, čímž dochází k rovnoměrnějšímu rozložení tlaku. Pro dosažení stejné hodnoty maximálního kontaktního tlaku je tak nutné působit v liniiovém kontaktu větší silou než u kontaktu bodového. [6]

Z hlediska mazacího mechanismu však zůstává princip tvorby mazacího filmu v obou případech stejný. Vysoké zatížení způsobuje elasticou deformaci styčných ploch a zároveň zvyšuje viskozitu maziva, čímž dochází ke vzniku mazacího filmu. Na Obr. 2-8 je patrné, že v bodovém kontaktu dochází k typickému rozložení tloušťky, kdy minimální hodnoty filmu se nacházejí v koncových oblastech typické vznikající podkovy. Oproti tomu u liniiového kontaktu dochází k tvorbě minimální tloušťky podélně v celé kontaktní oblasti. Centrální tloušťka filmu je poté principiálně stejná pro oba typy kontaktu.[6]



Obr. 2-8 rozložení tloušťky filmu a) v bodovém kontaktu b) v liniiovém kontaktu[6]

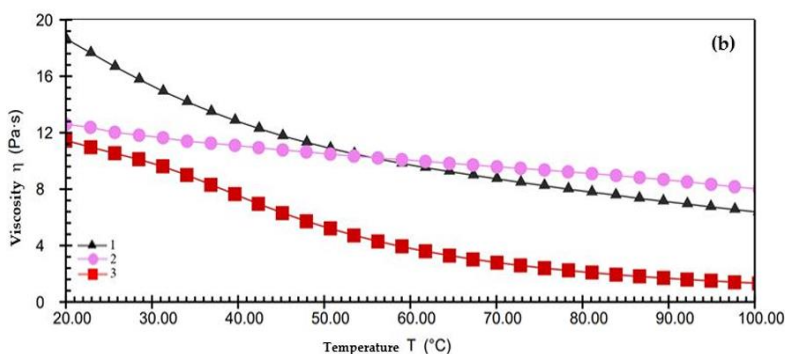
Experimentální studie Wanga [16] potvrdila, že v liniovém kontaktu vzniká mazací film stejným principem jako v bodovém kontaktu, a to i při nízkých kluzných rychlostech a relativně malém zatížení. Výsledky rovněž ukázaly, že složení maziva mělo vliv na výslednou tloušťku filmu. Maziva s lithiovým zahušťovadlem byla náchylná k narušení mazacího filmu v krajních částech liniového kontaktu, ale centrální tloušťky byla poměrně stabilní. Vyšší koncentrace zahušťovadla pak vedla ke zvýšení tloušťky filmu, ale zároveň způsobovala jeho lokální narušení.

Přestože se geometrie bodového a liniového kontaktu liší, základní princip tvorby mazacího filmu je velmi podobný. To umožňuje do jisté míry využít poznatky získané v konfiguraci s bodovým kontaktem i pro aplikace s liniovým kontaktem.

Reologické vlastnosti maziva

Reologické vlastnosti maziva hrají klíčovou roli v jeho chování a výrazně ovlivňují způsob, jakým je mazivo schopno plnit svou funkci. Tyto vlastnosti určují nejen odolnost vůči změnám zatížení nebo teploty, ale také způsob, jakým je z maziva uvolňován olej do kontaktu. V tomto ohledu se zásadně liší chování plastického maziva oproti oleji. Zatímco olej spoléhá na cirkulaci a aktivní přívod, plastické mazivo zásobuje kontakt prostřednictvím uvolňování základového oleje ze své struktury. Tato schopnost závisí právě na reologickém chování, konkrétně na stabilitě struktury maziva za provozních podmínek [8]. Podle Lugta [15] je výhodou plastických maziv jejich schopnost vytvářet a udržovat zásobu základového oleje mimo kontaktní oblast, odkud je olej postupně uvolňován podle potřeby. Tato vlastnost je klíčová pro zajištění dlouhodobého mazání i bez aktivního přívodu, což je zásadní v aplikacích s nízkými otáčkami a omezenou údržbou, jako jsou hlavní ložiska větrných turbín.

Vliv teploty na chování maziva je důležitým faktorem během provozu. Studie Penga [17] ukázala, že s rostoucí teplotou dochází u testovaných maziv k výraznému poklesu viskozity. Graf na Obr. 2-9 ukazuje tento pokles pro různé typy maziv, přičemž mazivo 2 se zahušťovadlem lithium complex si zachovává nejvyšší viskozitu i při zvýšených teplotách. To může přispět k udržení silnějšího mazacího filmu. Tento rozdíl ve viskozitně-teplotním chování ukazuje, že složení maziva hraje klíčovou roli při zachování jeho výkonnosti v proměnlivých klimatických podmínkách typických pro aplikace větrných turbín.

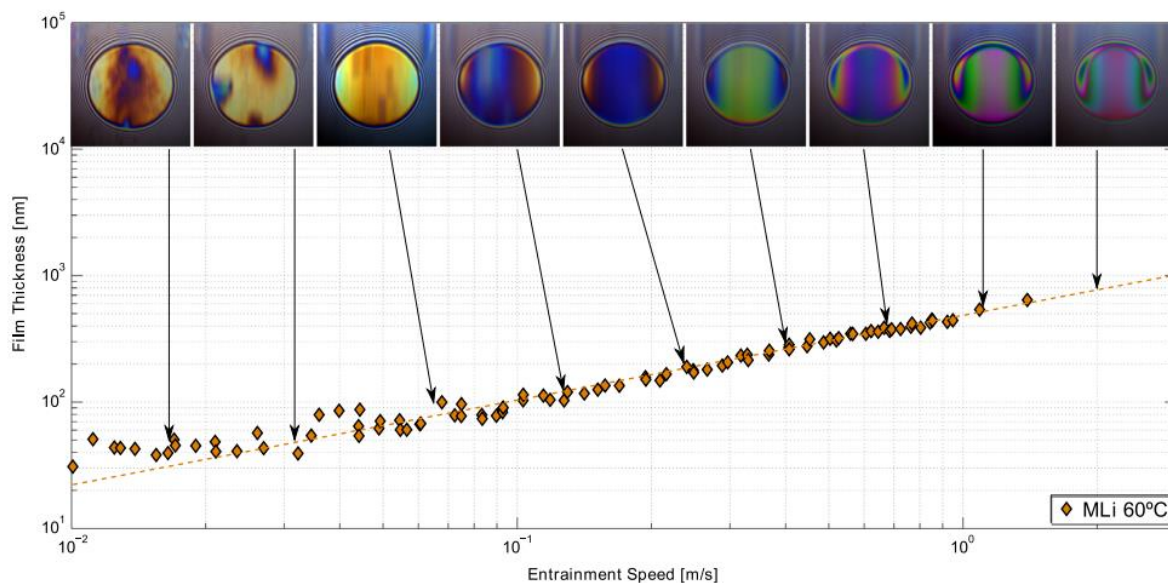


Obr. 2-9 Závislost viskozity jednotlivých maziv na teplotě [17]

Nízké rychlosti otáčení

Větrné turbíny se vyznačují výrazně pomalejším chodem než většina konvenčních strojů. Typické otáčky hlavního hřídele se pohybují přibližně kolem 10–20 ot/min, což odpovídá rychlostem v řádu desítek až stovek mm/s v oblasti kontaktu ložiska. Schopnost maziva spolehlivě fungovat při nízkých rychlostech je pro aplikaci ve větrných elektrárnách důležitá obzvláště během rozběhu, zpomalování nebo ustáleného provozu při slabém větru. V těchto stavech je vyžadována schopnost zachovat stabilní mazací film.[7]

Právě v tomto kontextu plastická maziva vykazují chování, které nelze přisuzovat pouze vlastnostem základového oleje. Studie [18] a [19] potvrzují, že při nízkých rychlostech se do kontaktu dostávají hrudky zahušťovadla, které výrazně ovlivňují tvorbu mazací vrstvy. Ty mohou lokálně zvýšit tloušťku filmu a dočasně oddělit třecí povrchy. Mazací film však není rovnoměrný a jeho tloušťka kolísá v závislosti na přítomnosti zahušťovadla v kontaktu. Tento jev nastává především proto, že při nízkých rychlostech není mazivo vystaveno dostatečnému smykovému zatížení, které by zahušťovadlo vytlačilo mimo oblast kontaktu. Hrudky zahušťovadla se tak mohou lépe udržet a přímo vstupovat do kontaktu, kde lokálně ovlivňují mazací film. To bylo experimentálně pozorováno zejména u maziv typu lithium complex a je důležitý pro hodnocení maziv ve větrných turbínách. Jak ukazuje Obr. 2-10, při nízkých rychlostech lze nejen sledovat změnu trendu tloušťky filmu, ale i výskyt hrudek zahušťovadla v kontaktní oblasti, které lokálně zvyšují film



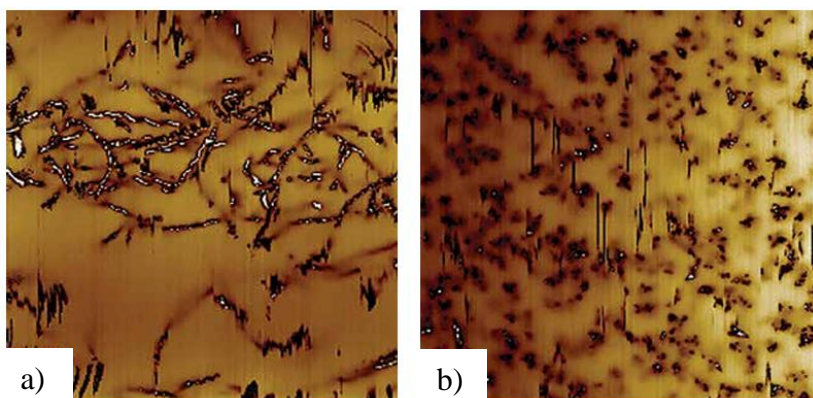
Obr. 2-10 Tloušťka filmu pro mazivo se zahušťovadlem Lithium complex [18]

Dosažené poznatky potvrzují, že chování maziva při nízkých otáčkách nelze spolehlivě posuzovat na základě běžně uváděných parametrů. V podmínkách větrných turbín je zásadní hodnotit mazivo i s ohledem na jeho složení a způsobu, jakým v kontaktu reálně funguje. Tento přístup lépe odráží skutečné provozní nároky a tvoří základ pro hodnocení výkonnosti.

Degradace maziva

Plastická maziva během provozu postupně degradují v důsledku kombinovaného působení mechanického namáhání, zvýšené teploty, oxidace a stárnutí. Tento proces způsobuje změny ve vlastnostech maziva, zejména pak ve struktuře zahušťovadla a ve schopnosti udržet základový olej. Narušená struktura maziva vede k vyšší míře bleedingu, přičemž oddělený olej se hromadí v okolí kontaktu, čímž ovlivňuje celkovou konzistenci maziva. V důsledku narušení sítě však olej ztrácí schopnost být rovnoměrně uvolňován do kontaktu, což snižuje dlouhodobou stabilitu mazání. Degradace se obvykle rozděluje na dvě hlavní oblasti, a to na mechanickou a tepelnou. Oba typy degradace ovlivňují mazivo jiným způsobem v závislosti na provozních podmínkách. [15]

Mechanická degradace plastického maziva je způsobena dlouhodobým smykovým namáháním. Tyto vlivy narušují strukturu zahušťovadla, která zadržuje základový olej a způsobuje soudržnost maziva. Rozpad struktury vede k poklesu konzistence a k nárůstu bleedingu, protože olejová fáze již není dostatečně vázaná a snáze se uvolňuje. Tím se snižuje stabilita mazacího filmu, což je kritické zejména při nízkých rychlostech, kde má struktura zahušťovadla a stabilní zásobování kontaktu olejem vliv na tvorbu filmu[20]. Obr. 2-11 ukazuje rozdíl mezi strukturou čerstvého a degradovaného maziva. Vlevo je patrná propojená síť zahušťovadla, která zadržuje olej. Vpravo je struktura narušena na menší části[3]. Mechanická degradace maziva může vést k výraznému úbytku olejové složky.

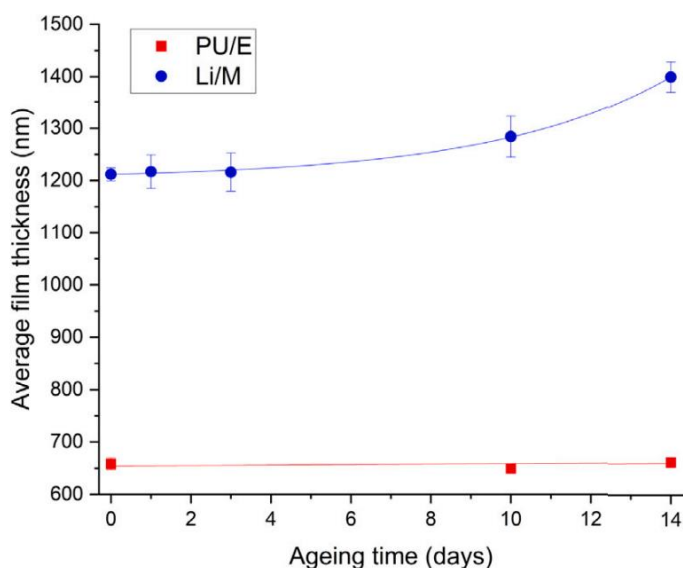


Obr. 2-11 a) struktura čerstvého maziva b) struktura degradovaného maziva[3]

Při hodnocení vlivu degradace na chování filmu bylo u čerstvého maziva pozorováno, že při nízkých rychlostech dochází k vyšší koncentraci zahušťovadla v kontaktu, což vede ke zvýšené tloušťce filmu. Tento stav přetrvává do určité tzv. přechodové rychlosti, nad kterou se mazivo redistribuuje zpět do rovnoměrného složení, např. 80 % oleje a 20 % zahušťovadla. U degradovaného maziva tento efekt mizí, jelikož narušená struktura již není schopna lokálně vytvářet přídavné vrstvy, což se projevuje nižší tloušťkou filmu při nízkých rychlostech a celkově klidnějším průběhem filmu s menší variabilitou [21]. Mechanická degradace je tak dominantním degradačním mechanismem v ložiscích provozovaných při středních teplotách (40–70 °C), což odpovídá podmínkám hlavních ložisek větrných elektráren.

Tepelná degradace plastických maziv probíhá při dlouhodobém vystavení zvýšené teplotě (typicky nad 70 °C) a vede především k oxidaci základového oleje a změnám v morfologii zahušťovadla. Dochází k tvorbě sloučenin, které zvyšují viskozitu olejové fáze, ale současně oslabují soudržnost maziva. Dlouhé řetězce zahušťovadla se postupně rozpadají, ztrácí schopnost vázat olej a mazivo přestává plnit svou mazací funkci. Tento proces je nevratný, probíhá pomalu, ale výrazně ovlivňuje stabilitu a životnost maziva [22].

Jak ukazují studie Gonçalvese [23] a Cena [24], v počátečních fázích tepelného stárnutí může dojít k dočasnému nárůstu tloušťky filmu v důsledku zvýšení viskozity oleje. Tento jev je však přechodný – s pokračující degradací klesá schopnost maziva udržet konzistentní film a zásobovat kontakt dostatečným množstvím oleje. Na Obr. 2-12 je tento vývoj znázorněn pro lithium-komplexní mazivo, kde je patrný mírný nárůst filmu během 14 dnů stárnutí. Přestože degradované mazivo vykazuje vyšší tloušťku, tato vrstva je méně funkční a souvisí spíše se změnou reologických vlastností než s lepší mazací schopností.

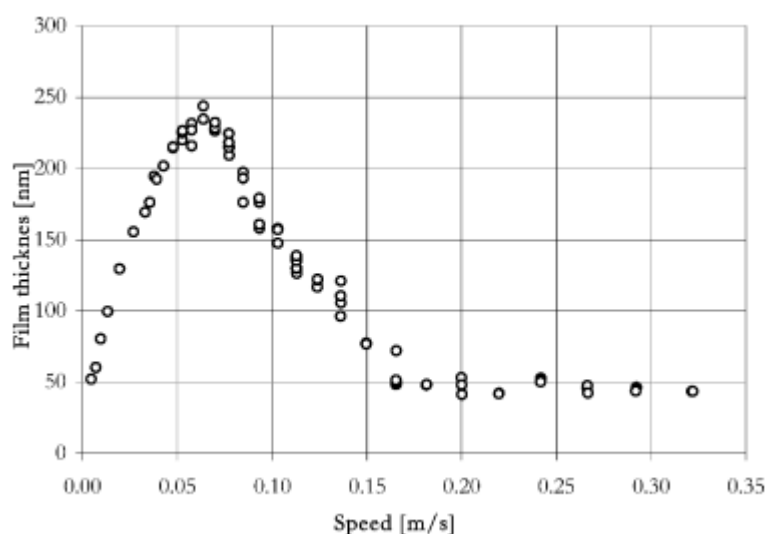


Obr. 2-12 Tloušťka filmu tepelně degradovaných maziv [23]

Oba způsoby degradace, tedy mechanická a tepelná, vedou ke změnám struktury zahušťovadla a k omezení schopnosti maziva plnit svou funkci. Z hlediska reálných provozních podmínek hlavních ložisek větrných elektráren však hraje zásadní roli především mechanická degradace, která se projevuje i při běžných provozních teplotách a má přímý vliv na bleeding, tloušťku mazacího filmu a dlouhodobou stabilitu maziva.

Hladovění

Ložiska hlavního hřídele větrných turbín jsou navrhována na dobu provozu přesahující 20 let a v takto dlouhém období je prakticky nemožné zcela se vyhnout hladovějícím podmínkám, a to ani v případě přítomnosti domazávacích systémů. Hladovění nastává tehdy, když se do kontaktu nedostává dostatek oleje z plastického maziva. V takovém případě se kontakt nechová jako plně zaplavený. Film se vytváří nerovnoměrně a mazací schopnost se výrazně mění. Na rozdíl od plně zaplaveného stavu, kde se s rostoucí rychlostí tloušťka filmu zvyšuje, se u hladovějícího kontaktu tento trend mění a film s rostoucí rychlostí klesá. Typický průběh závislosti tloušťky filmu na rychlosti při hladovějících podmínkách ukazuje Obr. 2-13, kde je patrný výrazný pokles filmu nad určitou kritickou rychlost. [25]



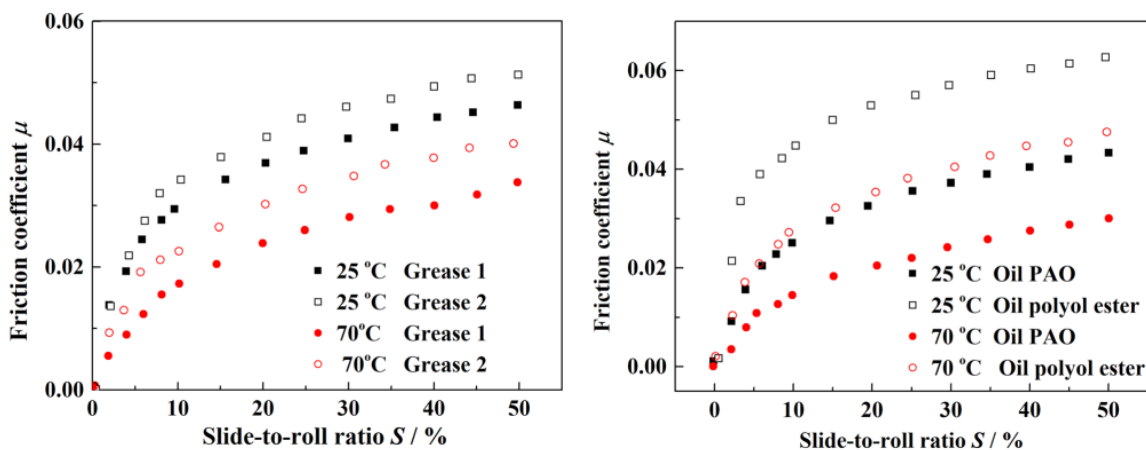
Obr. 2-13 Pokles tloušťky filmu maziva vlivem hladovění kontaktu [25]

Studie Fischera [26] potvrzuje, že při hladovějících podmínkách dochází k destabilizaci mazací vrstvy, jejíž tloušťka se s rostoucí rychlostí snižuje až k limitním hodnotám. Tloušťka filmu je v těchto případech výrazně závislá na přísunu maziva, přičemž jeho nedostatek vede k lokálnímu kolapsu filmu. Výsledky zároveň ukazují, že i při konstantních provozních podmínkách může být film nestabilní. Dále poznamenal, že i při výrazném hladovění zůstává v kontaktu zbytková vrstva zahušťovadla, která částečně napomáhá k mazání kontaktu.

Tření

Ložisko větrné turbíny přenáší velká zatížení a je potřebné udržovat minimální třecí moment. Důležitá je také minimalizace tření, a tím i opotřebení. Existují dva hlavní zdroje tření: kontakt valivých prvků s drahou ložiska a proudění maziva mezi komponentami. Právě tření v elastohydrodynamickém (EHD) režimu je výrazně ovlivněno složením plastického maziva, tedy zejména vlastnostmi základového oleje a strukturou zahušťovadla. [9]

To bylo také pozorováno ve studii Wanga [27], která ukázala, že výsledné tření plastického maziva není určeno pouze vlastnostmi základového oleje, ale je ovlivněno i interakcí oleje se zahušťovadlem. Jak ukazuje Obr. 2-14, většina plastických maziv vykazovala vyšší součinitel tření než odpovídající samotné základové oleje. Výjimku tvořil pouze případ polyolester maziva 2 při 25 °C, kde bylo tření nižší než u samotného oleje. Tyto výsledky potvrzují, že tření plastického maziva nelze jednoduše odvodit z vlastností jeho složek, ale je výsledkem komplexní struktury a chování při skluzu.



Obr. 2-14 Porovnání součinitele tření plastického maziva (vlevo) a oleje (vpravo) [27]

Podobně studie McGuira [7] poukázala, že plastická maziva se syntetickými základovými oleji vykazují nižší trakční koeficient než maziva s minerálními nebo polosyntetickými oleji. To potvrzuje, že správný výběr základového oleje ovlivňuje třecí vlastnosti maziva, ale je také nutné zohlednit i vliv plastického maziva a nehodnotit tření pouze na základě viskozity.

Opotřebení

Opotřebení je jedním z klíčových degradačních mechanismů, které ovlivňují životnost ložisek hlavního hřídele větrných turbín. Dochází k němu v důsledku přímého nebo částečného kontaktu kovových povrchů, typicky při nízkých kluzných rychlostech, přechodových stavech mazání nebo hladovění, kdy není kontakt spolehlivě zásoben mazivem. Tyto podmínky nastávají převážně během rozběhu a zastavení turbíny, kdy se tloušťka mazacího filmu nedokáže dostatečně vytvořit a ložisko vstupuje do mezního nebo smíšeného režimu mazání. V takovém stavu dochází ke zvýšenému zatížení kontaktních povrchů a postupnému opotřebení. Míra opotřebení je poté výrazně ovlivněna vlastnostmi použitého plastického maziva, tedy především schopností aditiv chránit povrchy. [4]

Chování plastických maziv při oscilujícím zatížení bylo zkoumáno ve více studiích, ale se zaměřením na ložiska listů rotorů větrných elektráren, kde se často vyskytuje tzv. false brinelling nebo třecí koroze [28], [29]. Tyto jevy vznikají při malých amplitudách opakovaného pohybu, kdy v důsledku nedostatečného přísunu maziva dochází ke kontaktu kovových povrchů. Ačkoliv se zmíněné studie nezabývaly ložisky hlavního hřídele, lze jejich výsledky považovat za relevantní pro popis chování maziva v mezních režimech.

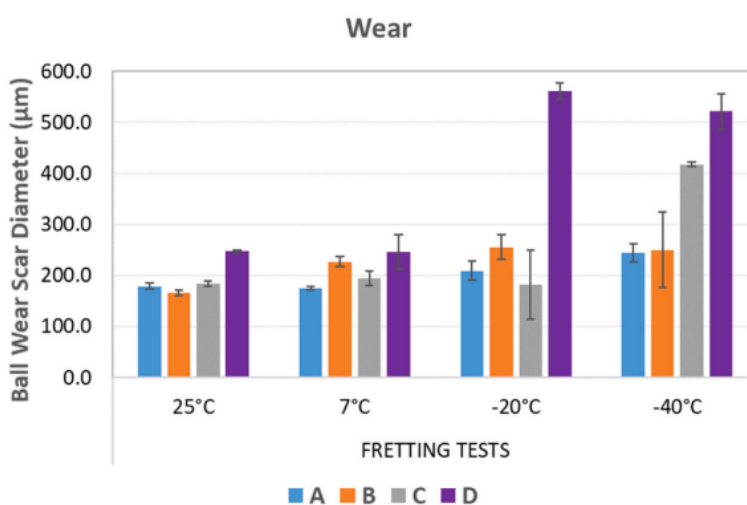
Zejména pak během rozběhu a zastavení turbíny, kdy se film naruší a může dojít k lokálním kontaktům. Ze závěrů vyplývá, že žádné z testovaných maziv neprokázalo univerzální schopnost omezit opotřebení za všech podmínek, nicméně maziva s nízkou viskozitou a vyšším bleedingem dosahovala lepší odolnosti vůči falešnému brinellingu. Tyto poznatky potvrzují význam přizpůsobení maziva konkrétním provozním režimům ložisek a poukazují na důležitost výběru maziva s ohledem na jeho stabilitu v blízkosti mezního mazání.



Obr. 2-15 vzniklé poškození (vlevo false brinelling, vpravo třecí koroze) [29]

Aditiva proti opotřebení působí tvorbou ochranné vrstvy na povrchu, jejíž vznik je závislý na teplotě, tlaku a smyku. Za běžných podmínek se aktivují chemickou reakcí, čímž omezují kontakt kov–kov. Při velmi nízkých teplotách však může být jejich účinek výrazně omezen, protože nedojde k jejich aktivaci.

Studie Zhanga [30] tuto skutečnost potvrdila. V testech maziv při teplotách $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ a $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ se ukázalo, že samotná přítomnost aditiv nestačí k ochraně proti opotřebení – rozhodující je jejich funkčnost za konkrétních podmínek. Například mazivo, které při $25\text{ }^{\circ}\text{C}$ vykazovalo nízký součinitel tření a nízké opotřebení, selhalo při $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$, kde se v kontaktní oblasti již nevyskytovala žádná aktivní mazací vrstva. Naopak maziva s jednoduššími, ale stabilnějšími složkami vykazovala lepší výsledky díky konzistentnímu zásobování kontaktu mazivem bez závislosti na tepelné reakci. Tyto poznatky ukazují, že výběr maziva pro ložiska hlavního hřídele musí zohledňovat i to, zda jeho aditivní systém zůstává funkční i při nízkých teplotách.



Obr. 2-16 Vliv různých maziv na stopu opotřebení [30]

2.2.4 Multikriteriální rozhodovací metody

Výběr vhodného plastického maziva pro ložiska větrných elektráren je komplexní úkol, protože mazivo musí spolehlivě fungovat v několika různých výkonnostních schopnostech. Jednotlivé schopnosti přitom nejsou samy o sobě rozhodující a důležité je, aby mazivo dosahovalo optimálních výsledků napříč více kritérii. Zároveň není možné pomocí jednoho testu spolehlivě kvantifikovat a porovnat více schopností najednou, nebo naopak určit jednu univerzální schopnost, která by sama o sobě postačovala k celkovému hodnocení. Různá kritéria se navíc často výrazně liší, jelikož mají odlišné jednotky, různý rozsah hodnot a také opačný směr požadovaného trendu. Pro takové porovnání je proto vhodné využít metody multikriteriálního rozhodování (MCDM), které umožňují vyhodnotit více hledisek současně a získat celkový pohled a porovnání výkonnosti možných alternativ.

Vzhledem k této variabilitě vstupních dat a požadavků je vhodné využít metody multikriteriálního rozhodování (MCDM), které umožňují systematické porovnání více alternativ na základě několika současně uvažovaných kvantitativních kritérií [31]. Mezi nejčastěji využívané MCDM metody patří AHP (Analytic Hierarchy Process), WSM (Weighted Sum Method), TOPSIS (Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution), VIKOR, PROMETHEE a ELECTRE. Tyto přístupy se liší zejména způsobem normalizace vstupních dat, přiřazováním vah jednotlivým kritériím a metodikou výpočtu výsledného pořadí variant. Obecně lze MCDM techniky rozdělit na dvě základní skupiny: kompenzační metody (např. WSM, AHP, TOPSIS, VIKOR), které umožňují vyvážit slabší výsledek v jednom kritériu lepším výsledkem v jiném, a outrankingové metody (např. PROMETHEE, ELECTRE), jež pracují s párovým porovnáváním a zavádějí práh přijatelnosti mezi jednotlivými variantami. [32]

AHP

Analytický hierarchický proces (AHP) je široce využívaná metoda multikriteriálního rozhodování, založená na hierarchickém rozkladu problému do úrovní cílů, kritérií a alternativ. Klíčovou roli hraje párové porovnávání, kde je hodnocena relativní důležitost prvků na škále. Výsledkem jsou váhové koeficienty získané výpočtem vlastního vektoru z příslušných matic. Tím je možné zkombinovat subjektivní úsudky s kvantitativními výpočty do jednoho výstupu. [31]

AHP vykazuje omezenou použitelnost u složitějších úloh s mnoha kritérii, protože počet párových porovnání rychle narůstá. Subjektivita vstupních dat může vést ke zkreslení, obzvláště při nedostatečné znalosti. Navíc metoda vyžaduje konzistentnost vstupů, jinak jsou výsledky metodologicky neplatné. Další slabinou je možnost nadhodnocení méně významných kritérií kvůli zkreslení škály. [32]

Díky transparentnosti a možnosti validace vstupů nachází AHP využití v energetice, environmentálním rozhodování i strojírenství. Singh [33] aplikoval AHP při hodnocení brzdových kompozitů s cementovým prachem, kde pomohl určit váhy kritérií. Metoda je vhodná především tam, kde jsou k dispozici expertní názory a rozhodování má strategický význam, například také při výběru investic či surovin.

WSM

WSM je jedna z nejjednodušších metod vícekriteriálního rozhodování, kdy každé kritérium je ohodnoceno číslem, které se vynásobí jeho důležitostí (váhou), a všechny tyto výsledky se sečtou. Výsledkem je jedno skóre, které slouží k seřazení alternativ. Jak uvádí Wang [31], metoda je výpočetně jednoduchá, transparentní a široce využitelná, zvláště tam, kde jsou vstupní data kvantitativní. Zdůrazňuje také, že při správném nastavení vah a skórování může být WSM efektivní náhradou složitějších metod.

Jedním z hlavních omezení WSM je její neschopnost pracovat s kvalitativními daty a předpoklad úplné kompenzace mezi kritérii. Například pokud má alternativa extrémně špatné hodnocení v kriticky důležitém kritériu, stále může dosáhnout vysokého celkového skóre díky ostatním. Lee a Chang [32] upozorňují na citlivost metody vůči volbě škály a normalizaci, která může výsledky zásadně ovlivnit.

WSM je hojně používána v oblastech, kde je kladen důraz na rychlost a srozumitelnost rozhodování. Příkladem praktické aplikace je rozhodování při výběru vhodné technologie pro výrobu fotovoltaických článků. Shekhar a Garg [34] využili metodu WSM pro posouzení osmi výrobních variant na základě pěti technických a ekonomických kritérií, včetně materiálových nákladů, energetické náročnosti, využití surovin a technologické vyspělosti. Metoda umožnila efektivní kvantitativní porovnání alternativ a identifikaci nejvýhodnější varianty. Podobně Chourabi [35] demonstruje využití WSM při rozhodování o volbě pracovníků na základě produktivity a kvality práce. Metoda je vhodná zejména tam, kde nejsou požadovány sofistikované analýzy závislostí a rozhodovací prostředí je stabilní.

PROMETHEE

Metoda PROMETHEE patří mezi outrankingové metody a je určena pro rozhodovací úlohy s multikriteriálními a rozdílnými požadavky. Každá dvojice alternativ je porovnávána podle definovaných preferenčních funkcí pro jednotlivá kritéria. Tím vznikají tzv. preferenční řešení – pozitivní (výhody), negativní (nevýhody) a celkový. Tato metoda umožňuje modelovat různé typy preferencí a zohledňuje i míru nepřesnosti, což zvyšuje realističnost rozhodování [32]. Jak uvádí Wang [31], PROMETHEE umožňuje rozhodovat nejen na základě kvantitativních dat, ale i v případech s neurčitými kritérii.

Přestože PROMETHEE nabízí značnou flexibilitu, její použití je spojeno s několika nevýhodami. Opricovic a Tzeng [36] upozorňují, že metoda vyžaduje volbu typu preferenční funkce pro každé kritérium, což může být obtížné bez dostatečné znalosti problému a může výrazně ovlivnit výstup. Dále PROMETHEE nevede vždy k jednoznačnému pořadí – výsledkem může být částečné nebo neúplné seřazení alternativ, což ztěžuje interpretaci. Rovněž chybí možnost jasné identifikace kompromisního řešení, jako je tomu u metod typu VIKOR nebo TOPSIS.

Metoda PROMETHEE našla uplatnění v celé řadě oblastí – od výběru výrobních systémů až po hodnocení environmentálních a energetických strategií. Anand a Kodali [37] použili PROMETHEE při výběru mezi systémem řízení výroby LMS a CIMS v indickém podniku. Díky možnosti zohlednit kvantitativní i kvalitativní faktory dokázali efektivně integrovat vstupy a rozhodnout o nejvhodnější strategii. Lee a Chang [32] dále ukázali, že metoda je vhodná pro hodnocení obnovitelných energetických zdrojů, kde různá kritéria – jako jsou náklady, pracovní místa či emise – mají protichůdné směry optimalizace.

ELECTRE

Metoda ELECTRE patří opět mezi outrankingové přístupy multikriteriálního rozhodování. Je založena na vytváření tzv. relací mezi dvojicemi alternativ. Tyto relace vyjadřují, zda lze na základě většiny kritérií považovat jednu alternativu za alespoň tak dobrou jako druhou, a přitom žádné kritérium proti tomuto závěru zásadně neodporuje. Základními stavebními prvky jsou indexy konkordance a diskordance, které měří sílu převahy a míru odporu vůči tvrzení, že alternativa A je preferována vůči alternativě B. [38]

Ačkoliv metoda ELECTRE umožňuje sofistikované zpracování více hledisek, vykazuje několik zásadních omezení. Především vyžaduje správné stanovení prahů pro souhlas a nesouhlas, jejichž nastavení je často subjektivní a problematické. Jak upozorňuje Yu [38], metoda není ideální v případech, kdy mezi kritérii existují silné závislosti nebo hierarchické priority. Navíc může vést k nejednoznačnému pořadí alternativ, což komplikuje interpretaci výsledků. Lee a Chang [32] dále upozorňují, že metoda je méně intuitivní než TOPSIS či VIKOR, zejména pro technické aplikace, kde jsou kritéria kvantifikována. Výsledkem ELECTRE totiž nemusí být jednoznačné řešení, ale spíše množina preferovaných alternativ.

Navzdory svým omezením je metoda ELECTRE velmi populární v rozhodovacích procesech, kde je třeba zohlednit mezní hodnoty a nepřijatelnost kompromisů. Ve studii Lee a Chang [32] byla ELECTRE aplikována na výběr vhodného energetického zdroje pro Tchaj-wan a byla porovnána s TOPSIS, VIKOR a WSM. Výsledky ukázaly vyšší robustnost vůči změnám vah u ELECTRE díky prahům nesouhlasu. Novější výzkum Yu [38] pak rozšiřuje ELECTRE o priority kritérií, čímž umožňuje aplikaci i v situacích, kdy nelze připustit kompenzaci (např. bezpečnost vs. cena).

VIKOR

Metoda VIKOR je určena pro rozhodování mezi variantami, které mají rozdílné a často protichůdné hodnocení více kritérií. Jejím cílem není najít nejlepší variantu, ale navrhnout co nejvyváženější řešení. Každá varianta je porovnána s ideální a nejhorší možnou hodnotou v rámci všech kritérií. Výpočty zohledňují jak celkovou průměrnou odchylku od ideálu, tak i nejhorší dílčí odchylku. Metoda tak upřednostňuje alternativy, které dosahují dobrých výsledků napříč všemi kritérii a zároveň se v žádném z nich výrazně nepropadají. [39]

Mezi hlavní omezení patří vysoká citlivost na vstupní váhy a počet alternativ. Dále metoda vyžaduje volbu kompromisního parametru, kdy při nevhodném nastavení tohoto parametru může dojít k neintuitivnímu pořadí [36]. Jak uvádí Caliskan [40], u některých srovnatelných variant může VIKOR poskytnout výsledky velmi závislé na způsobu stanovení vah, i při použití hybridních přístupů. Kromě toho metoda nemusí vždy určit jednoznačné řešení – pokud nejsou splněny podmínky stabilního kompromisu, může být výstupem více alternativ.

VIKOR se využívá především tam, kde je potřeba hledat vyvážené řešení mezi odlišnými parametry. Ve studii [32] byla metoda použita pro hodnocení obnovitelných zdrojů energie a umožnila začlenit technická, environmentální i ekonomická kritéria do jednoho rozhodovacího rámce. Caliskan [40] aplikoval VIKOR pro hodnocení tribologických povlaků na bázi bóru, přičemž zohlednil parametry jako tvrdost, koeficient tření a adhezi.

TOPSIS

Metoda TOPSIS z principu, že optimální alternativa by měla mít co nejkratší vzdálenost od ideálního řešení a zároveň největší vzdálenost od řešení nejhoršího. Výpočty zahrnují normalizaci vstupních dat, váženou transformaci na základě důležitosti jednotlivých kritérií a následné stanovení eukleidovské vzdálenosti od ideálních hodnot. Výsledkem je tzv. koeficient relativní vzdálenosti, podle nějž jsou alternativy seřazeny [39].

Navzdory jednoduchosti a přehlednosti má metoda TOPSIS několik známých omezení. Millek [41] upozorňuje, že výsledné pořadí alternativ může být citlivé na výběr vah a metody normalizace, kdy změna jediného parametru může vést k jinému rozhodnutí. Caliskan [40] poukazuje na to, že při použití hybridních vah může TOPSIS nadhodnotit alternativy, pokud není provedena důkladná předběžná analýza rozsahu vstupních dat.

Metoda TOPSIS je široce využívána v různých aplikacích, protože umožňuje zpracovat různorodá kvantitativní kritéria v jednoduchém numerickém rámci. Trung [42] úspěšně aplikovali tento postup při multikriteriální optimalizaci parametrů broušení, kde kritéria zahrnovala drsnost povrchu, vibrace a úběr materiálu, přičemž výstupy TOPSIS poskytly jednoznačné a prakticky využitelné výsledky. Dehghani [43] dále využil metodu pro výběr maziv do dvoutaktních motorů a potvrdil, že TOPSIS dokáže zohlednit různé typy vah, aniž by byla narušena interpretace výsledků. Díky nízké výpočetní náročnosti a snadné implementaci je TOPSIS také oblíbená pro softwarové nástroje.

2.3 Shrnutí současného stavu poznání

Hlavní ložiska větrných elektráren pracují při velmi nízkých otáčkách (cca 10–15 ot/min) a vysokém kombinovaném zatížení, přičemž kontaktní tlak může dosahovat až 1,6 GPa. [2] V důsledku těchto podmínek se v ložisku často vyskytuje smíšený až mezní režim mazání, kde i drobné narušení filmu vede k přímému kontaktu a opotřebení. Ložiska jsou navržena pro dlouhodobý provoz, což zvyšuje nároky na jeho tepelnou a mechanickou stabilitu. Klíčovými provozními faktory jsou také kolísající teploty (–30 až +50 °C), které ovlivňují viskozitu oleje, bleeding a účinnost aditiv. Pro objektivní hodnocení výkonnosti maziva je proto nezbytné zohlednit reálné provozní podmínky hlavního ložiska. [3]

Plastické mazivo představuje trvalou náplň hlavního ložiska, která musí spolehlivě fungovat po celou dobu životnosti turbíny. V průběhu provozu lze odlišit dvě fáze. První je záběhová, kdy dochází k redistribuci maziva. Následuje fáze bleedingu, ve které je uvolňován základový olej do kontaktu. Olej je uvolňován ze struktury zahušťovadla vlivem působení teploty a namáhání. Pro mazivo je zásadní, aby tento proces probíhal stabilně, tedy s dlouhodobou udržitelností a vhodnou odolností proti narušení struktury zahušťovadla. [11] Uvolňovaný olej následně tvoří mazací film v kontaktu. Ten má zásadní roli při oddělení třecích povrchů, snižování tření a ochraně proti opotřebení. Tloušťka filmu je pak přímým důsledkem bleedingu, což rozhoduje o účinnosti maziva v daném režimu mazání. [6]

V hlavních ložiscích větrných turbín se typicky vyskytuje liniový kontakt. Přestože se geometrie liniového a bodového kontaktu liší, základní princip tvorby mazacího filmu je velmi podobný. To umožňuje do jisté míry využít poznatky získané měřením tloušťky v bodovém kontaktu i pro konfiguraci s liniovým kontaktem. [6][16]

Reologické chování plastického maziva závisí na typu zahušťovadla a viskozitě základového oleje. Například zahušťovadla lithium complex vykazují vyšší tepelnou stabilitu než lithná, ale zároveň bývají tužší při nízkých teplotách, což omezuje bleeding. Syntetické oleje mají nižší viskozitu při nízkých teplotách než minerální, a umožňují tak lepší separaci oleje do kontaktu. Míra uvolňování oleje se s teplotou výrazně mění, a právě schopnost maziva udržet stabilní bleeding v širokém teplotním rozsahu je klíčová pro zachování mazacího filmu. [17]

Při nízkých rychlostech ovlivňují vznik mazací vrstvy nejen vlastnosti oleje, ale také chování zahušťovadla. Studie ukazují, že zejména při zvýšené teplotě s nízkých rychlostech může zahušťovadlo vstupovat přímo do kontaktu a lokálně zvyšovat tloušťku filmu. Tato tloušťka pak není určena pouze viskozitou, ale výsledkem interakce se zahušťovadlem. Mazací film má přitom zásadní význam pro oddělení třecích povrchů. [18] Mazací film má přitom zásadní význam pro oddělení třecích povrchů. V podmínkách smíšeného mazání bývá za funkční považována tloušťka alespoň 100 nm, přičemž s rostoucí hodnotou se výrazně zvyšuje spolehlivost separace. Pro správné zachycení vlivu složení maziva na tvorbu filmu je proto nezbytné jeho experimentální ověření. [15] [19]

Z pohledu degradace maziva rozlišujeme dva základní mechanismy – mechanický a tepelný. Jelikož se však v ložiscích obvykle nevyskytují extrémně vysoké teploty, hraje dominantní roli mechanická degradace. Ta vede k narušení sítě zahušťovadla, čímž dochází ke zvýšení bleedingu a růstu tloušťky filmu, která je však méně stabilní z pohledu dlouhodobé funkce. [21]

Hladovění nastává tehdy, když se do kontaktu nedostává dostatečné množství maziva. To vede k výraznému poklesu tloušťky mazacího filmu a jeho nerovnoměrnému rozložení. Při experimentálním hodnocení je proto vhodné zvolit plně zaplavené podmínky, které umožňují přesněji porovnat vliv maziva na tvorbu filmu bez vlivu nedostatku přísunu.[25]

Součinitel tření plastického maziva je ovlivněn jak viskozitou základového oleje, tak druhem zahušťovadla. Maziva na bázi syntetických olejů vykazují při nízkých rychlostech stabilně nižší tření než minerální báze. Typ a struktura zahušťovadla pak ovlivňuje interakci maziva s třecím povrchem, která může tření dále snižovat, nebo naopak zvyšovat v závislosti na podmínkách zatížení a teploty. [7][27]

Schopnost maziva chránit vůči opotřebením je výrazně ovlivněna použitím aditiv a provozní teplotou. Aditiva proti opotřebením se aktivují za specifických podmínek tlaku a teploty, kdy výraznější aktivace byla pozorována při vyšší teplotě. Při velmi nízkých teplotách jejich účinnost silně klesá. Klíčová je také schopnost maziva udržet ochrannou vrstvu v režimu oscilací a přerušovaném pohybu (zastavování a opětovné rozběhy). Právě stabilita mazacího filmu a funkčnost aditivního systému mají zásadní vliv na vývoj opotřebením. [30]

Výběr vhodného plastického maziva pro hlavní ložiska větrných turbín je komplexní problém. Vlastnosti maziva je nutné posuzovat z více hledisek současně, protože jedno kritérium nedokáže vystihnout jeho celkovou výkonnost. Jednotlivé schopnosti mají poté odlišné jednotky, hodnoty a trendy a jejich význam se liší dle provozních podmínek. Právě z tohoto důvodu je vhodné uplatnit přístup multikriteriálního hodnocení, který umožňuje systematické porovnání různých variant. Z pohledu tohoto přístupu je pak možné zvážit několik přístupů jako například metody AHP, VIKOR nebo TOPSIS a na základě vhodné metody vytvořit metodiku vyhodnocení.[31][32]

2.4 Mezera v poznání

Přestože literatura pokrývá řadu dílčích aspektů, v současnosti chybí jednotná metodika, která by umožnila systematicky porovnat výkonnost plastických maziv pro hlavní ložiska větrných turbín. Jednotlivé schopnosti jsou hodnoceny odděleně a bez vzájemného porovnání a souvislostí. Schází proto ucelený přístup, který by umožnil experimentální ověření klíčových schopností ovlivňujících funkci a následné vyhodnocení výsledků získaných v podmínkách blízkých reálnému provozu.

3 CÍLE PRÁCE

3.1 Vymezení problému

Ložiska hlavního hřídele patří mezi nejdůležitější komponenty větrné elektrárny a bývají často označovány jako kritická. Neadekvátní výběr maziva může mít závažné důsledky pro efektivitu i provozní náklady, protože selhání ložisek vede nejen k jejich poruše, ale i k odstávce celé větrné elektrárny. To s sebou nese složité a nákladné zásahy, jako je například pronájem speciálního zařízení pro výměnu ložiska a demontáž gondoly turbíny. Kromě toho je nutné zohlednit ztrátu výroby elektrické energie způsobenou delšími odstávkami, což může výrazně ovlivnit ekonomiku provozu elektrárny. Ložiska větrných turbín jsou obvykle navrhována na životnost přesahující 20 let, což klade vysoké nároky na kvalitu a stabilitu mazání.

Problém nastává při volbě plastického maziva, které se využívá pro mazání valivých elementů. Na trhu působí velké množství výrobců maziv a současně existuje široká škála jejich vlastností. Mazivo musí zajistit spolehlivý provoz i v náročných podmínkách a současně omezovat vlivy, které vedou k degradaci nebo opotřebení, aby byla maximalizována životnost ložiska. Musí odolávat neustále se měnícím podmínkám, mezi které patří proměnlivá zatížení způsobená změnami rychlosti a směru větru. Důležitou roli hrají rovněž vlivy okolního prostředí, například kolísavé teploty nebo vlhkost. Ta se však u onshore turbín, na které je tato práce zaměřena, nevyskytuje ve velké míře oproti turbínám offshore.

Plastická maziva je možné testovat pomocí celé řady standardizovaných experimentálních metod, které umožňují hodnotit jejich chování z hlediska klíčových schopností. V případě hlavních ložisek větrných elektráren je nutné identifikovat takové schopnosti maziva, které mají zásadní vliv na dlouhodobou funkci a spolehlivost mazání. Následně je nutné experimentálně ověřit chování těchto schopností u širšího spektra plastických maziv, která se liší svými vlastnostmi. Na základě získaných výsledků je poté možné navrhnout metodiku, která bude pomocí multikriteriálního hodnocení porovnávat výkonnost jednotlivých maziv a umožní preferenční výběr maziv odpovídajících specifickým provozním podmínkám dané aplikace.

Výsledným výstupem této práce je návrh metodiky pro hodnocení plastických maziv. Jejím zákazníkem je společnost ZKL, která se dlouhodobě věnuje výrobě ložisek pro větrné turbíny v širokém rozsahu velikostí. Součástí jejího inženýrského přístupu je také správné určení a návrh vhodného maziva pro konkrétní provozní podmínky podle požadavků koncového zákazníka. Problematika mazání ložisek větrných elektráren je zároveň řešena v rámci podsekcce konstruování rozsáhlého projektu NCK MESTEC II, který je realizován pod záštitou Technologické agentury České republiky.

3.2 Cíle vývoje

Hlavním cílem této práce je vytvoření metodiky pro hodnocení plastických maziv používaných k mazání ložisek hlavního hřídele větrných turbín. Metodika má umožnit objektivní srovnání různých maziv na základě jejich výkonnostních parametrů a napomoci tak při výběru nejvhodnějšího maziva pro konkrétní provozní podmínky. Pomocí cíleného experimentálního testování bude možné sledovat chování klíčových schopností maziv a analyzovat jejich vývoj v závislosti na vybraných vlastnostech. Výstupem bude ucelený systém hodnocení založený na multikriteriálním přístupu, který umožní efektivní rozhodování při volbě vhodného maziva.

Dílčí cíle

- Identifikace klíčových schopností plastických maziv relevantních pro mazání hlavních ložisek větrných turbín
- Návrh a realizace experimentů zaměřených na hodnocení těchto schopností u maziv s rozdílnými vlastnostmi
- Zpracování a analýza výsledků získaných experimentálním testováním
- Vyhodnocení vlivu testovacích podmínek a případná úprava navržené metodiky
- Sestavení multikriteriálního hodnocení výkonnosti plastických maziv
- Ověření robustnosti multikriteriálního hodnocení a zhodnocení ovlivňujících faktorů
- Příprava odborné publikace prezentující přístup a výsledky práce

Požadavky kladené na navrženou metodiku

- Uvažování relevantních provozních podmínek (nízké rychlosti, teplota, zatížení)
- Kompatibilita materiálů ložisek a maziv užívaných v ložiscích větrných elektráren
- Experimentální ověření v širším pásmu vlastností plastických maziv (rozdílné složení maziv)
- Využití standardizovaných a reprodukovatelných testů v laboratorních podmínkách
- Validace chování klíčových schopností plastických maziv
- Zohlednění faktorů ovlivňujících výsledky experimentálního testování
- Aplikace multikriteriálního přístupu a posouzení jeho citlivosti vůči nastavení parametrů

4 KONCEPČNÍ NÁVRH

4.1 Analýza cílů

Diplomová práce se zaměřuje na vytvoření systematické metodiky pro hodnocení plastických maziv používaných v hlavních ložiscích větrných turbín. Problematika je aktuální vzhledem k vysokým nárokům na spolehlivost a životnost větrných elektráren, jejichž provozní podmínky jsou značně specifické. Ložiska hlavního hřídele jsou vystavena velkému a proměnlivému zatížení, nízkým otáčkám a výrazným teplotním výkyvům, což klade mimořádné nároky na vlastnosti použitých maziv. Efektivní výběr vhodného maziva je proto klíčovým faktorem pro prodloužení životnosti ložisek a snížení provozních nákladů turbín.

V návaznosti na rešerši bude provedena identifikace klíčových schopností maziv, jejichž laboratorní hodnocení umožní predikovat chování maziva v reálném provozu. Cílem je navrhnout metodiku experimentálního hodnocení, která bude dostatečně robustní, spolehlivá a schopná zachytit vlivy provozních podmínek. Experimentální část bude zaměřena nejen na samotné hodnocení schopností maziv, ale také na ověření spolehlivosti a reprodukovatelnosti navržených testovacích postupů.

Získaná experimentální data budou následně využita pro aplikaci multikriteriální rozhodovací metody, která umožní systematické porovnání testovaných maziv z hlediska kombinace klíčových schopností.

Výsledkem práce bude prakticky využitelná metodika hodnocení plastických maziv, která bude reflektovat specifické požadavky na mazání ložisek hlavního hřídele. Metodika by měla přispět k efektivnějšímu výběru vhodného maziva, k prodloužení životnosti ložisek a ke snížení nákladů na provoz a údržbu větrných elektráren. Zároveň může sloužit jako základ pro další výzkum v oblasti maziv pro extrémní provozní podmínky.

4.2 Specifikace zákazníka a omezení

Zákazník

Zákazníkem pro navrhovanou metodiku hodnocení plastických maziv je společnost ZKL, přední český výrobce valivých ložisek. Firma se specializuje mimo jiné na ložiska hlavního hřídele větrných turbín, kde jsou kladeny vysoké nároky na spolehlivost, životnost a správnou funkci maziva. Navrhovaná metodika bude sloužit jako nástroj pro systematické posouzení a výběr vhodných maziv v souladu s požadavky této specifické aplikace.

Omezení

Návrh metodiky hodnocení výkonnosti plastických maziv pro ložiska hlavního hřídele větrných turbín je nutné zasadit do možností laboratorního testování. Vzhledem ke komplexnosti provozních podmínek a rozsahu problematiky je nezbytné stanovit limity, které vymezují rozsah experimentální části práce i interpretaci jejích výsledků. Tato omezení neznamenají oslabení významu navrhované metodiky, ale tvoří její přirozený rámec.

Z hlediska provozních podmínek je metodika zaměřena především na ložiska používaná v onshore větrných turbínách (turbíny na pevnině), které jsou v evropském a středoevropském prostoru nejrozšířenější. Oproti náročnějším podmínkám offshore turbín se onshore turbíny vyznačují nižšími vlivy vlhkosti, kolísání teplot a korozních faktorů, což umožňuje zaměřit se na parametry dominantně ovlivňující spolehlivost maziva v těchto podmínkách.

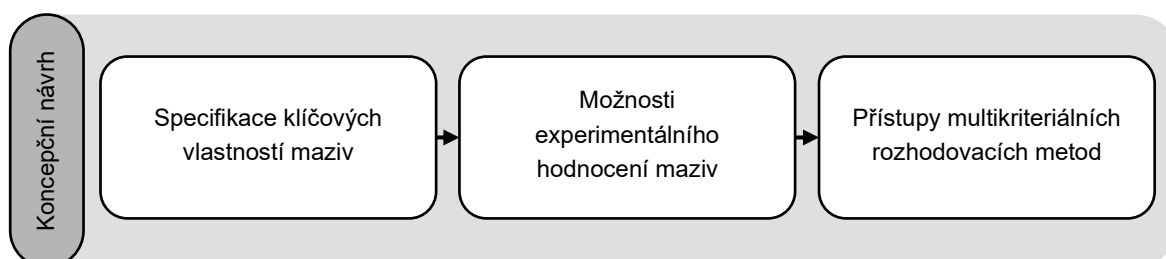
Vzhledem k tomu, že ložiska dosahují průměrů až několika metrů, testování maziva přímo v měřítku odpovídajícím reálným součástem je velmi nákladné složité. Z tohoto důvodu bude testování probíhat ve zmenšeném měřítku na modelových vzorcích. Součástí metodiky je také oddělené hodnocení jednotlivých schopností maziva. Přestože v reálném provozu tyto vlastnosti působí současně a ve vzájemné interakci, v laboratorních podmínkách je nezbytné je měřit a analyzovat separátně. Žádná jednotlivá metoda totiž neposkytuje ucelený obraz o všech relevantních schopnostech současně – například při měření je možné sledovat součinitel tření a tvorbu mazacího filmu, ale nelze z něj získat informace o bleedingu nebo stabilitě maziva. Podobně i degradace, která v ložisku probíhá kontinuálně a vlivem převážně smykového namáhání, bude v laboratorních podmínkách simulována zrychleně.

S ohledem na rozsah práce bude výběr sledovaných vlastností omezen na menší množství klíčových schopností, které mají podle rešeršních poznatků zásadní vliv na správnou funkci maziva. Tímto přístupem bude zajištěna jak proveditelnost experimentální části, tak relevance výsledků pro reálné provozní podmínky.

Uvedená omezení budou při návrhu metodiky důsledně zohledněna. Cílem je vytvořit systém hodnocení, který i přes zjednodušení experimentálních podmínek poskytne prakticky využitelné a reprodukovatelné výsledky pro efektivní porovnání a výběr plastických maziv pro správnou funkci hlavních ložisek větrných turbín.

4.3 Návrh řešení

Cílem této kapitoly je vytvořit koncepční rámec metodiky pro hodnocení výkonnosti plastických maziv. Tento rámec je vystavěn na třech základních pilířích dle schématu na Obr. 4-1. Jedná se o identifikaci klíčových schopností maziv, přehledu experimentálních přístupů k jejich hodnocení a využití vícekriteriální analýzy jako nástroje pro objektivní porovnání jejich výkonnosti. Předkládané přístupy představují základ pro následný předběžný návrh experimentální metodiky.



Obr. 4-1 Schéma postupu koncepčního návrhu

4.3.1 Specifikace klíčových schopností maziv

Pro návrh objektivní a prakticky využitelné metodiky hodnocení plastických maziv je nezbytné jasně definovat, které schopnosti budou považovány za stěžejní. Plastická maziva vykazují řadu měřitelných tribologických vlastností, avšak ne všechny mají přímý vliv na výkonnost maziva v provozních podmínkách hlavních ložisek větrných elektráren.

V rámci této práce byly jako čtyři klíčové schopnosti zvoleny následující schopnosti:

- tloušťka mazacího filmu
- bleeding základového oleje a jeho udržitelnost po mechanickém namáhání
- schopnost aditiv chránit povrchy před opotřebením
- nízké třecí vlastnosti neboli funkce maziva při skluzu

Tato volba reflektuje specifické nároky na mazání ložisek – tedy nízké otáčky, proměnlivé zatížení, omezené možnosti údržby a dlouhodobý provoz v kolísavých teplotách

Tloušťka mazacího filmu

Tloušťka mazacího filmu je zásadním faktorem ovlivňujícím separaci povrchů v kontaktu a tím i ochranu proti přímému kontaktu kov-kov. V hlavních ložiskách větrných turbín, kde se kontaktní podmínky často pohybují na hranici elastohydrodynamického (EHD) a smíšeného mazání, hraje schopnost maziva vytvářet stabilní mazací film zásadní roli při ochraně proti mikropittingu.

Testování této schopnosti probíhá za plně zaplavených podmínkách kontaktu, které zajišťují dostatečný přísun maziva a tím eliminují vliv případného hladovění. Právě za těchto reprodukovatelných podmínek lze lépe rozlišit mezi jednotlivými mazivy na základě jejich tloušťky filmu, a dosáhnout tak spolehlivého a srovnatelného hodnocení. Při tomto způsobu je navíc možná přesnější kvantifikaci rozdílů a omezení faktorů, které by při hladovění mohly výsledky zkreslit. Zajištění dostatečné tloušťky mazacího filmu přitom přímo ovlivňuje nejen životnost ložisek, ale i spolehlivost a efektivitu celého mazání.

Bleeding

Bleeding, tedy řízené uvolňování základového oleje ze struktury maziva, je klíčovým mechanismem pro doplňování mazacího filmu v čase. Optimální bleeding zajišťuje kontinuální zásobení kontaktu olejem, což je zvláště důležité při dlouhodobém provozu bez možnosti externí domazávky. Příliš nízký bleeding vede k hladovění kontaktu a degradaci mazacího filmu, zatímco nadměrný bleeding způsobuje rychlou ztrátu maziva a narušení jeho konzistence. Proto je schopnost plastického maziva řízeně uvolňovat olej považována za jednu z nejdůležitějších vlastností v aplikacích větrných turbín.

Ochrana povrchů před opotřebením

Opotřebením v hlavních ložiskách větrných elektráren je důsledkem přímého kontaktu kov-kov, ke kterému dochází zejména při náhlém poklesu tloušťky mazacího filmu. V těchto situacích, typických například častými opakovanými rozběhy a zastavováním ložisek, dochází ke ztrátě oddělení povrchů a k mechanickému poškození. Schopnost maziva chránit povrchy před opotřebením je proto klíčová pro udržení integrity ložisek v dlouhodobém provozu, kdy nelze vyloučit přechodné nebo trvalé snížení kvality mazacího režimu.

Součinitel tření

Třecí vlastnosti maziva mají zásadní vliv na efektivitu provozu větrné turbíny, zejména při pohybu a otáčkách hlavního hřídele. V tomto režimu je žádoucí minimalizovat součinitel trakčního tření, aby se snížily energetické ztráty a omezilo zahřívání ložisek. Plastická maziva s nízkým součinitelem tření umožňují turbíně otáčet se s vyšší účinností, prodlužují životnost ložisek a přispívají ke stabilnějšímu mazacímu filmu i při dynamicky se měnícím zatížení a skluzu mezi valivými elementy a oběžnými drahami.

Je nutné poznamenat, že plastická maziva vykazují i další významné vlastnosti, jako je oxidační stabilita, reologické chování, kompatibilita s těsnicími materiály či odolnost vůči kontaminaci vodou a nečistotami. Přestože tyto charakteristiky hrají roli v celkové životnosti maziva, jejich bezprostřední vliv na tribologickou funkci hlavních ložisek větrných elektráren je spíše sekundární a projeví se až v delším časovém horizontu.

S ohledem na zaměření této práce na přímé tribologické chování v typických provozních podmínkách byl výběr omezen na čtyři klíčové schopnosti: tvorbu a stabilitu mazacího filmu, řízené uvolňování základového oleje, ochranu povrchů proti opotřebení a minimalizaci tření. Tento výběr představuje vyvážený a zároveň prakticky aplikovatelný základ pro objektivní a cílené hodnocení výkonnosti plastických maziv v kritických aplikacích větrných turbín.

4.3.2 Vzorky plastických maziv

Pro ověření relevance navržených schopností bylo do experimentální části práce zařazeno šest vzorků plastických maziv. Pět z nich představuje komerční produkty určené pro mazání hlavních ložisek větrných turbín, zatímco šestý vzorek tvoří univerzální lithné mazivo běžně používané ve strojírenství. Tento soubor umožňuje srovnání maziv s odlišnými vlastnostmi a zároveň ověření, zda zvolená metodika dokáže rozlišit jejich chování v podmínkách typických pro hlavní ložiska větrných elektráren. Cílem je získat na základě měřitelných vlastností objektivní porovnání pro posouzení vhodnosti jednotlivých maziv.

Testovaná maziva se liší především ve třech hlavních charakteristikách: kinematičké viskozitě základového oleje při 40 °C, typu základového oleje (minerální nebo syntetický) a druhu zahušťovadla (lithné mýdlo nebo lithium complex). Většina vzorků obsahuje zahušťovadlo lithium complex, které je běžnou volbou pro náročné aplikace vzhledem ke své vyšší mechanické a teplotní stabilitě. Dva vzorky využívají klasické lithné zahušťovadlo. Přehled základních vlastností jednotlivých testovaných maziv je uveden v Tab. 4-1.

Tab. 4-1 Vlastnosti vzorků plastických maziv

	Klasifikace NLGI	Kinematičká viskozita při 40 °C [mm/s ²]	Základový olej	Zahušťovadlo
Mobil 460	1-2	460	Syntetický	Lithium complex
Lithium	1-2	130	Minerální	Lithium
Mobil 681WT	1-2	681	Syntetický	Lithium complex
STABYL LX 460 SYN	1-2	460	Syntetický	Lithium complex
STABYL EOS E 2	1-2	320	Syntetický	Lithium
Kluberplex BEM 41-141	1	130	Minerální	Lithium complex

4.3.3 Možnosti experimentálního hodnocení maziv

Na základě předchozí analýzy byly specifikovány čtyři klíčové schopnosti plastických maziv, které mají zásadní význam pro jejich použití v hlavních ložiskách větrných turbín. Pro každou z těchto schopností byly následně posouzeny dostupné experimentální přístupy umožňující jejich laboratorní ověření. Při výběru byla zohledněna dostupnost standardizovaných metod, jejich relevance k reálným provozním podmínkám a možnost jejich aplikace v rámci dostupného laboratorního vybavení.

Tloušťka mazacího filmu

Tloušťka mazacího filmu představuje klíčovou schopnost ovlivňující separaci povrchů a celkovou spolehlivost mazání. Lze ji hodnotit dvěma hlavními přístupy – buď experimentálně, pomocí specializovaných měřících metod, nebo výpočtově, prostřednictvím teoretických modelů založených na principech elastohydrodynamického mazání. Mezi běžně používané výpočetní přístupy patří například rovnice Hamrock–Dowson, která umožňuje odhad tloušťky filmu na základě známých parametrů. Experimentální metody však poskytují reálný obraz chování maziva v kontaktu, a proto jsou pro účely validace a detailní porovnání jednotlivých maziv vhodnější.

V rámci experimentálního přístupu existuje několik možností – od elektrických metod, přes optické měření pomocí fluorescence až po optické měření založené na interferenci. Z těchto možností představuje kolorimetrická interferometrie jeden z nejpřesnějších přístupů. Na rozdíl od elektrických metod, které poskytují pouze nepřímou informaci o přítomnosti filmu a jsou citlivé na vlastnosti maziva, a fluorescenční metody, která slouží spíše k vizualizaci než k přesnému kvantitativnímu měření, umožňuje interferometrie přímé hodnocení tloušťky mazacího filmu v kontaktu. Navíc umožňuje nastavení konkrétních provozních podmínek a poskytuje vhodné kvantitativní srovnání. Díky těmto vlastnostem se jedná o preferovanou metodu pro laboratorní vyhodnocení tloušťky mazacího filmu.

Bleeding

Schopnost plastického maziva uvolňovat základový olej je klíčovým parametrem ovlivňujícím zásobování kontaktu. Hodnocení bleedingu lze obecně rozdělit na statické a dynamické přístupy. Statické metody sledují separaci oleje za definovaných podmínek bez působení pohybu, zatímco dynamické metody se snaží simulovat reálné provozní zatížení za pohybu nebo oscilace. Vzhledem k tomu, že hlavní ložiska větrných turbín pracují typicky při nízkých otáčkách, je pro tuto aplikaci relevantnější využití statických metod. Ty lépe vystihují podmínky dlouhodobého zatížení a umožňují hodnocení schopnosti maziva udržovat stabilní separaci oleje do kontaktu.

V oblasti statického hodnocení bleedingu se běžně uplatňují standardizované postupy dle norem ASTM D6184 nebo DIN 51817, které definují podmínky testu včetně použití specifických komerčních sestav pro separaci oleje. Tyto oficiální sestavy však nebyly v rámci této práce k dispozici, a proto byla využita vlastní modifikovaná sestava, odpovídající principům uvedených metod a přizpůsobená podmínkám experimentálního testování. Dále je pak možné hodnocení bleedingu pomocí testu SKF, kde je pozorována stopa separovaného oleje na speciálním papír. Tento postup však nebyl využit z důvodu nutnosti zakoupení testovací sady.

Ochrana povrchů před opotřebením

Schopnost plastického maziva chránit povrchy před opotřebením je možné posuzovat pomocí zavedených tribologických metod, které simulují zatížení kontaktních ploch v podmínkách blízkých reálnému provozu. Nejčastěji se využívá čtyřkuličkový test opotřebením dle normy ASTM D2266. Ten je založen na rotačním kontaktu mezi ocelovými kuličkami, kdy horní kulička rotuje proti třem spodním pevně uloženým. Mazivo se aplikuje do kontaktu a zatížením se simuluje relativní pohyb vedoucí k opotřebení. Výsledkem testu je rozměr opotřebené stopy na kuličce, což slouží pro kvantitativní porovnání maziv.

Další možností je SRV test podle normy ASTM D5707, který využívá lineárního oscilujícího pohybu mezi dvěma vzorky materiálu (typicky destička a kulička nebo váleček). Při této metodě se kromě opotřebení zároveň sleduje i součinitel tření, což umožňuje komplexní hodnocení tribologického chování maziva při oscilujícím zatížení. Díky své konstrukci je tento test vhodný pro simulaci podmínek odpovídajících provozu valivých ložisek vystavených vibracím a proměnlivému zatížení.

Jako alternativní řešení se však nabízí také testování pomocí zařízení MTM, které využívá kulička a disku z ložiskové oceli. Pomocí recipročního pohybu disku a rotace kulička je možné vytvořit drážku opotřebením v určitém cyklu a tu je možné dále hodnotit. Zmíněné možnosti hodnocení umožňují kvantifikaci míry opotřebením po definovaném zatěžovacím cyklu a poskytují srovnatelné výsledky.

Třecí vlastnosti

Součinitel tření je možné měřit několika způsoby v závislosti na požadovaném typu kontaktu a provozní konfiguraci. Nejčastěji se využívá zařízení MTM, které umožňuje sledování tření při relativních hodnotách skluzu mezi kuličkou a diskem z ložiskové oceli.

Alternativně lze využít samostatné měření na tribometru SRV v konfiguraci pin-on-disc dle normy ISO 7148-2, kde se sleduje tření při oscilujícím zatížení mezi pevnými vzorky. Měření poskytuje buď průběh součinitele tření v čase, nebo jeho průměrnou hodnotu za definovaných podmínek (zatížení, rychlost, teplota, režim mazání). Výsledky z těchto zkoušek umožňují porovnávat maziva z hlediska jejich schopnosti snižovat tření a zamezovat vzniku kontaktu kov-kov.

4.3.4 Přístupy multikriteriální analýzy

Na základě rešeršní části této práce byly identifikovány různé metody vícekriteriálního rozhodování (MCDM), z nichž některé byly následně vyloučeny z dalšího uvažování na základě nesouladu s požadavky technického hodnocení plastických maziv.

Metoda AHP byla zamítnuta zejména kvůli vysoké subjektivitě vstupů a omezené škálovatelnosti. Počet párových porovnání roste s každým novým kritériem, což zvyšuje kognitivní zátěž a metodickou náročnost. V kontextu technického hodnocení, kde jsou k dispozici měřená data, je tato míra subjektivity považována za nežádoucí.

WSM představuje jednoduchý přístup, nicméně její využitelnost je omezená předpokladem plné kompenzace mezi kritérii. V praxi to znamená, že výrazně horší hodnota v jednom parametru může být nahrazena vyšší hodnotou v jiném, což může vést k nesprávnému závěru. Tato logika je v hodnocení tribologických vlastností nevhodná, protože například vysoké opotřebení nelze kompenzovat nízkou separací oleje.

Metody PROMETHEE a ELECTRE byly vyřazeny kvůli složitosti parametrizace (volba preferenčních funkcí, prahy souhlasu a nesouhlasu) a nízké transparentnosti výsledků. Přestože umožňují pokročilé modelování preferencí, jejich použití je méně vhodné v případech, kdy je prioritou rychlá interpretace, replikovatelnost a práce s objektivními, měřenými daty.

Metoda VIKOR sice umožňuje kompromisní rozhodování, avšak výsledky jsou citlivé na volbu váhového parametru a často nevedou k jednoznačnému závěru. V případech, kdy nelze stabilně identifikovat jednu preferovanou alternativu, je její praktické využití diskutabilní.

S ohledem na výše uvedené požadavky byla však jako nejvhodnější metoda identifikována TOPSIS (Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution). Tento přístup umožňuje porovnat jednotlivé alternativy na základě jejich vzdálenosti od ideálního a neideálního řešení. Vstupní data jsou převedena na bezrozměrný tvar prostřednictvím normalizace, čímž je zajištěna srovnatelnost různých jednotek a měřítek. Pomocí váhového systému lze zohlednit relativní důležitost jednotlivých kritérií, což umožňuje strukturované a transparentní hodnocení. Výsledkem je výpočet relativní blízkosti ke vzoru, který slouží jako základ pro seřazení hodnocených variant. Výhodou metody TOPSIS je jednoduchost, přehlednost a stabilita výsledků při rozšíření o další kritéria nebo vzorky. Z těchto důvodů je TOPSIS považována za optimální nástroj pro vícekriteriální hodnocení výkonnosti plastických maziv v technických aplikacích založených na měřených datech.

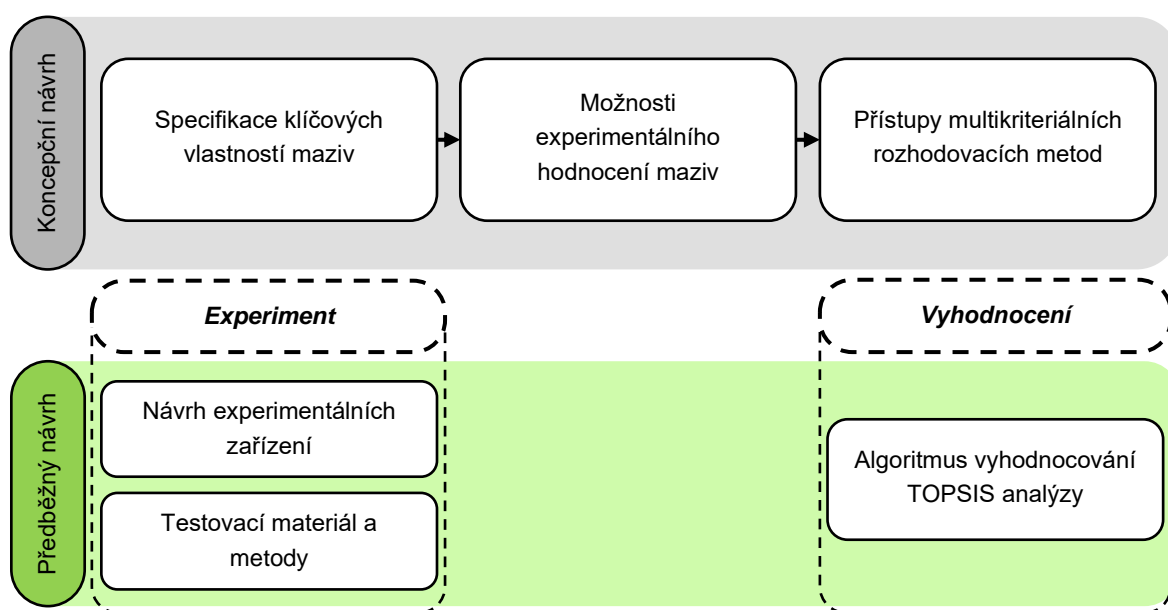
5 PŘEDBĚŽNÝ NÁVRH

5.1 Metodika

Na základě koncepčního návrhu, který se zabýval identifikací klíčových schopností plastických maziv, možnostmi jejich experimentálního hodnocení a volbou vhodné multikriteriální metody, byl sestaven předběžný návrh metodiky. Ten tvoří spojovací článek mezi teoretickým rámcem a praktickou realizací hodnocení výkonnosti maziv.

Předběžný návrh se zaměřuje na specifikaci experimentálních přístupů, zahrnujících výběr vhodných zařízení, metod testování a zkušebních materiálů. Důraz je kladen na praktickou proveditelnost, opakovatelnost měření a relevanci dat vzhledem k definovaným hodnoticím kritériím. Součástí návrhu je také určení testovaných maziv a kontaktních dvojic, jejichž volba je provázána s metodickým postupem testování.

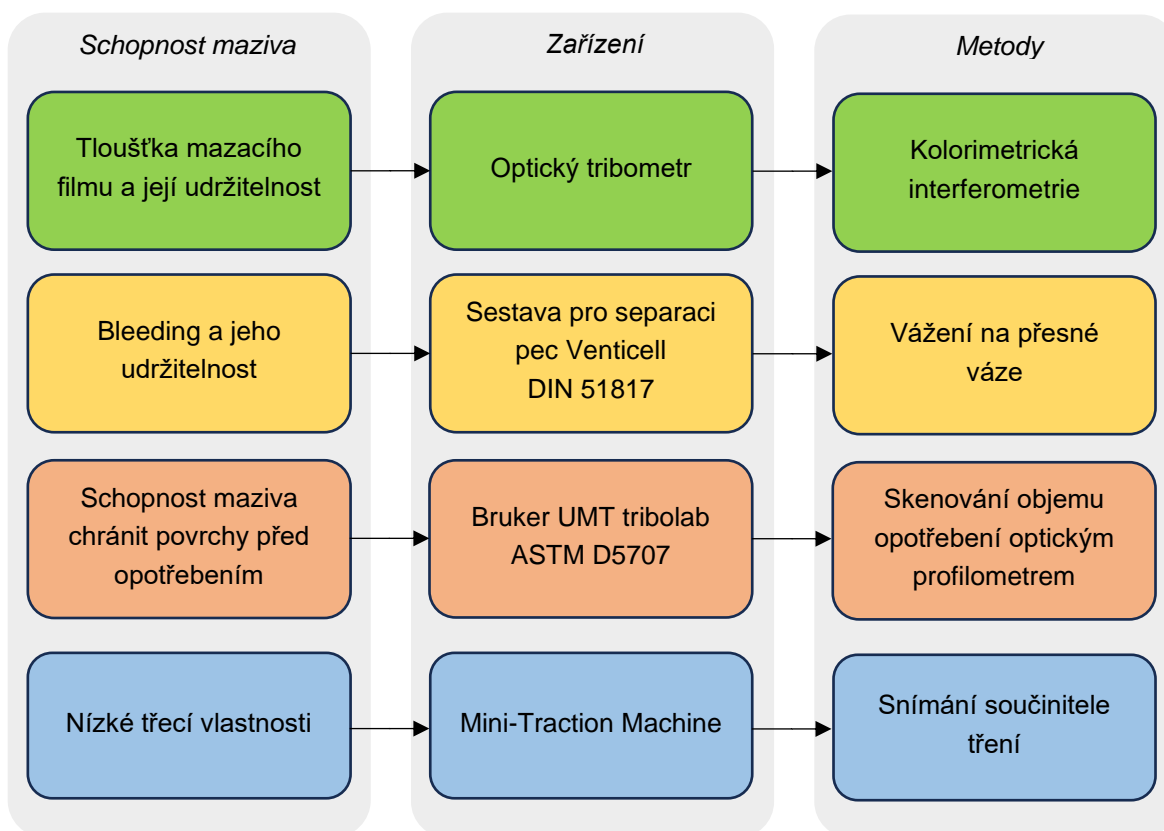
Zároveň byl vytvořen předběžný algoritmus multikriteriálního hodnocení výsledků pomocí metody TOPSIS (Technique for Order of Preference by Similarity to Ideal Solution). Tento algoritmus slouží jako nástroj pro porovnání a vyhodnocení výkonnosti jednotlivých maziv na základě předem stanovených parametrů.



Obr. 5-1 Schéma metodiky předběžného návrhu

5.1.1 Předběžný návrh metodiky pro hodnocení plastických maziv

V předběžném návrhu metodiky hodnocení výkonnosti plastických maziv byly definovány základní experimenty, které zahrnují vhodná zařízení a odpovídající metody pro měření klíčových parametrů maziv. Pro sledování tvorby mazacího filmu byl využit optický tribometr v kombinaci s kolorimetrickou interferometrií, která umožňuje detailní vizualizaci filmu v kontaktu. Pro chování základového oleje, zejména jeho uvolňování (tzv. bleeding), bylo navrženo hodnocení pomocí sestavy s laboratorní pecí podle normy DIN 51817. Testování ochrany povrchu aditivu maziva proti opotřebení bylo navrženo dle normy ASTM D5707. Využito bylo tribometru Bruker UMT tribolab, přičemž výsledné opotřebení bylo kvantifikováno pomocí optického profilometru, který umožňuje snadné určení velikosti objemu opotřebovaných stop. Pro posouzení třecích vlastností maziva bylo navrženo zařízení Mini-Traction Machine (MTM), které umožňuje měření součinitele tření při definovaných kontaktních podmínkách. Navržená kombinace zařízení a metod poskytuje komplexní základ pro experimentální vyhodnocení navržených schopností plastických maziv a detailněji bude popsány v detailním návrhu metodiky. Celé schéma předběžného návrhu je znázorněno na Obr. 5-2.



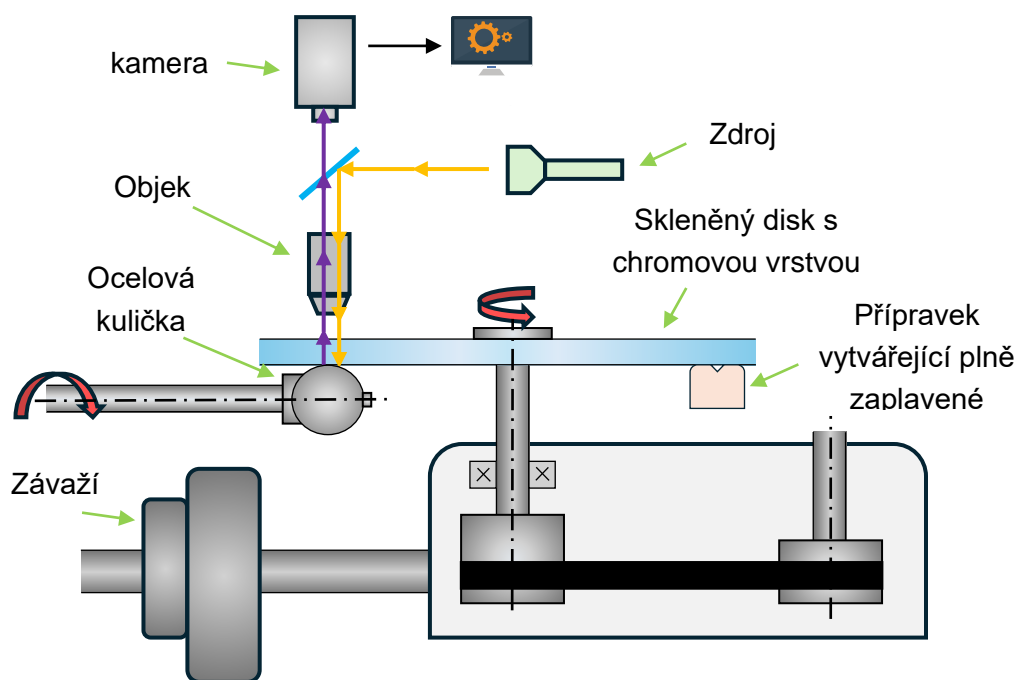
Obr. 5-2 Schéma metodiky pro hodnocení plastických maziv

5.2 Experimentální část

5.2.1 Tloušťka mazacího filmu

Experimentální zařízení

Schopnost plastických maziv tvořit souvislou mazací vrstvu byla ověřována na optickém tribometru v konfiguraci kulička-disk. Tento typ zařízení poskytuje dostatečně kvalitní a přesnou simulaci kontaktních podmínek blízkých k podmínkám vyskytujícím se ve valivém ložisku. Jedná se simulátor tribologického kontaktu, u kterého se odvaluje valivý element po disku, který je opatřen chromovou vrstvou pro potřeby kolorimetrické interferometrie. V případě tohoto zařízení je jak prvek, tak disk poháněna nezávisle. Zatěžování je prováděno pomocí pákového mechanismu, kdy na konec páky je umístěno závaží. Zatížení je poté snímáno pomocí tenzometrů a po vychýlení páky se závažím dojde ke kontaktu disku s kontaktního prvku. Dále je na spodní stranu disku umístěn přípravek, který stírá plastické mazivo z povrchu disku a směřuje ho přímo do kontaktní oblasti. Tím je docíleno plně zaplavených podmínek a zamezeno menším hladovějícím stavům v kontaktu. Schéma zařízení je na následujícím obrázku (Obr. 5-3).

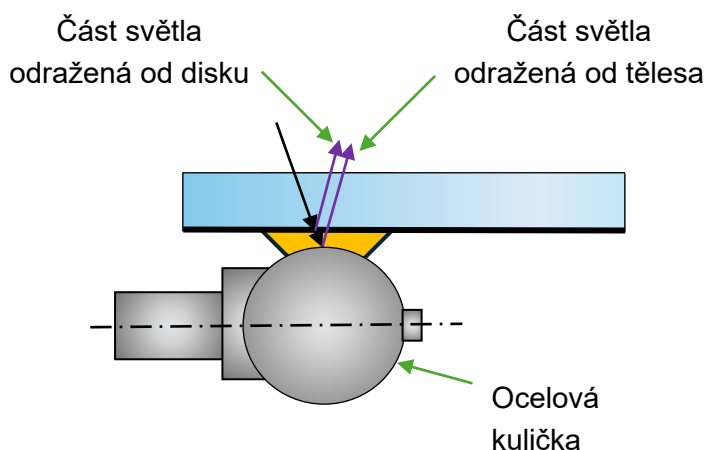


Obr. 5-3 Schéma tribometru v konfiguraci ball-on-disk

Pro experiment byla jako kontaktní těleso zvolena kulička. Přestože ve valivých ložiskách větrných elektráren převažují válečky a soudečky s liniovým kontaktem, princip tvorby mazacího filmu zůstává zachován. V obou případech dochází ke vzniku tlakového pole, elastické deformaci povrchu a viskóznímu proudění maziva, které vedou ke vzniku vrstvy. Dále také umožní snazší vytvoření vyššího kontaktního tlaku a z toho důvodu jsou výsledky získané bodovým kontaktem považovány za relevantní.

Metody

Tloušťky filmu v jednotlivých stavech byly určeny pomocí metody kolorimetrické interferometrie. Jedná se o metodu vyvinutou na Fakultě strojního inženýrství Vysokého učení technického v Brně, která umožňuje vyhodnocovat chování mazacího filmu o tloušťkách od 1 nm do 1000 nm [44]. Při tomto procesu prochází bílé světlo zdroje přes sadu zrcátek až ke skleněnému disku, na jehož spodní ploše je nanesena polopropustná chromová vrstva. Na tomto rozhraní se část světla odrazí zpět a část projde až k povrchu druhého tělesa (ocelové kuličky), odkud se odrazí zpět (schéma na Obr. 5-4). Oba paprsky pak interferují, což vytváří barevné vzory (interferogramy), které zachytí kamera. Ty byly následně zpracovány v programu Achilles, přičemž nejprve byl pořízen chromatický a monochromatický snímek statického kontaktu. Pomocí chromatického snímku byly stanoveny interferenční barvy odpovídající tloušťkám filmu a pomocí monochromatického snímku byla určena geometrie interferenční soustavy. Výsledkem těchto kroků byla kalibrace, díky níž byla získána barevná škála pro určování jednotlivých tloušťek filmu.

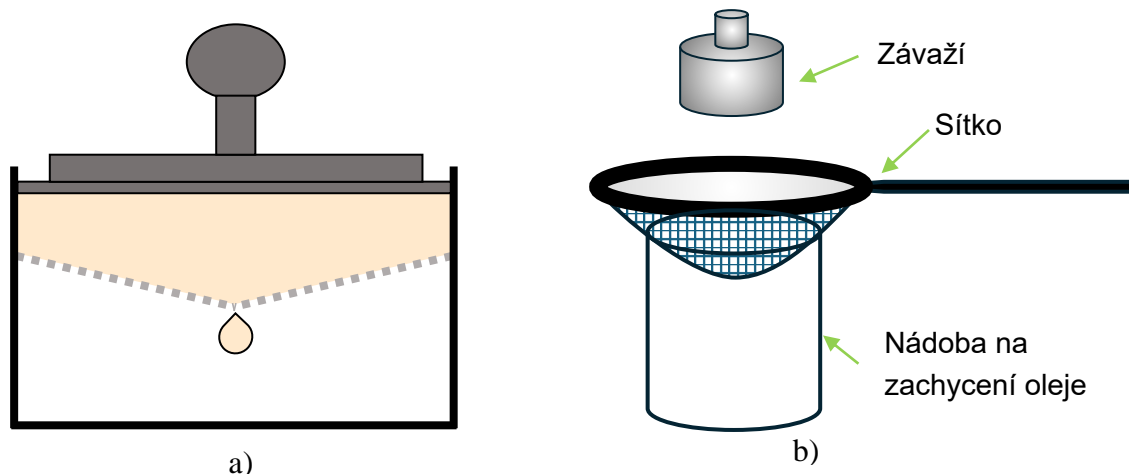


Obr. 5-4 Interference bílého světla

5.2.2 Bleeding a jeho udržitelnost

Experimentální zařízení

Separace základového oleje z plastického maziva byla provedena dle normy DIN 51817. Dle normy je využíváno oficiální sestavy pro separaci oleje (Obr. 5-5 a), kterou ovšem nebylo možné využít a muselo dojít k modifikaci sestavy. Modifikovaná sestava (Obr. 5-5 b) se poté skládala z jemného potravinářského sítko, do kterého bylo aplikováno určité množství plastického maziva. Sítko i s mazivem bylo postavena na nádobu, do které byl zachytáván separovaný olej a mazivo bylo zatíženo závažím dle normy. Celá tato soustava byla poté vložena do pece Venticell.



Obr. 5-5 a) oficiální sestava pro separaci b) modifikovaná sestava

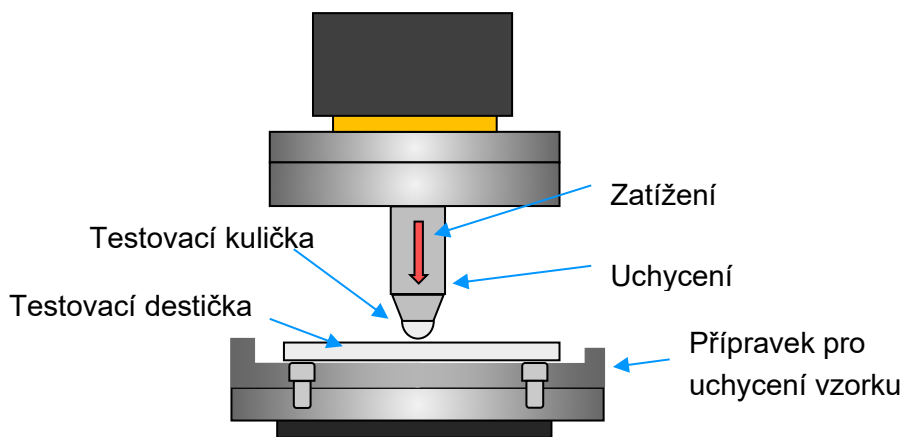
Metody

Hodnocení bleedingu bylo navrženo dle normy, kdy vyhodnocení je založeno na vážení separovaného oleje. Ten je při statickém testu za působení tlaku a teploty uvolňován do nádoby. Po uplynutí stanovené doby bylo množství uvolněného oleje zváženo a porovnáno s původní hmotností maziva. Tento přístup umožnil stanovení míry bleedingu a posouzení jeho změny například po tepelném nebo mechanickém zatížení maziva.

5.2.3 Schopnost maziva chránit povrchy před opotřebením

Experimentální zařízení

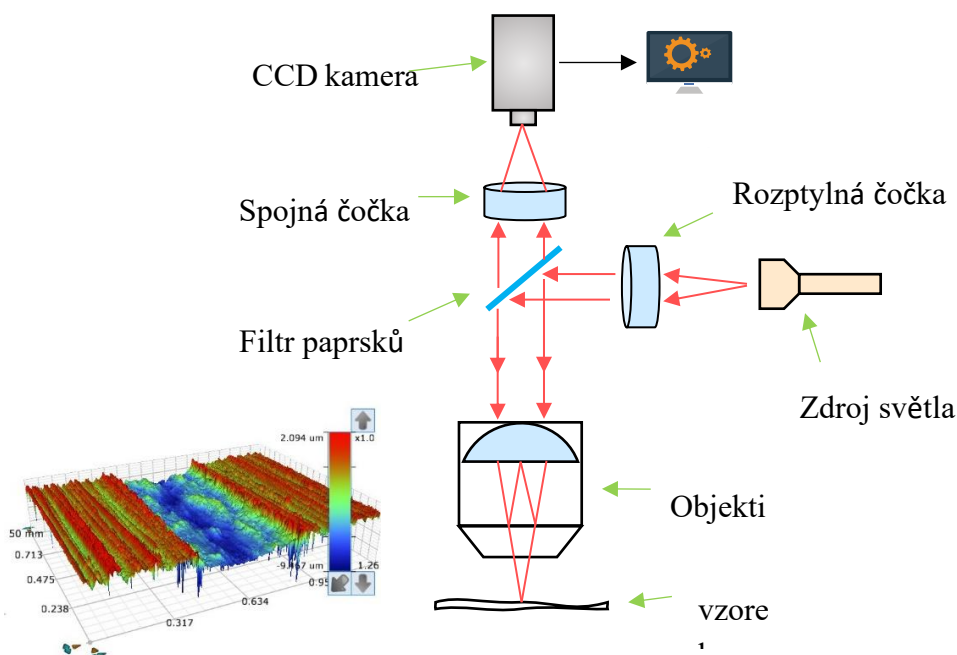
Proces opotřebení byl zkoumán na zařízení Bruker UMT tribolab, což je univerzální měřicí tribometr pro zkoumání tribologických a mechanických vlastností. Jedná se o jeden z nejpoužívanějších konvenčně vyráběných tribometrů a je možné ho využívat v celé řadě odvětví. Experimenty byly navrženy v konfiguraci kulička a destička (schéma je znázorněno na Obr. 5-6). Dále bylo využito recipročního modulu vykonávající lineární oscilační pohyb. K modulu byl uchycen přípravek se zkoumaným materiálem, v tomto případě destičkou z ložiskové oceli AISI 52100. K horní části byl poté přichycen přípravek, který upevňuje kuličku. Ta byla navržena na průměr 7 mm a její materiál byla též ložisková ocel AISI 52100. Kulička byla záměrně zvolena s menším průměrem pro dosažení vyššího kontaktního tlaku a bez nutnosti velké působící normálové síly. V horní části stroje se také nachází velmi přesný snímač působících sil. Jeho rozsah dosahuje sil až do 1kN



Obr. 5-6 Schéma zařízení Bruker v konfiguraci kulička-destička

Metody

Opotřebení bylo hodnoceno pomocí 3D optického profilometru Bruker Contour GT-X, který pracuje na principu bezkontaktní optické interferometrie s bílým světlem. Tato metoda využívá jevu interference, kdy jednotlivé vlnové délky světla vytvářejí interferenční obrazce v různých výškách, zatímco u bílého světla dochází k zesílení signálu pouze v jediném bodě – v místě, kde se všechny složky světelného spektra setkají (schéma na Obr. 5-7). Na získaném modelu topografie povrchu byly jasně patrné stopy opotřebení, jejichž morfologie byla dále analyzována pomocí softwaru Vision. Z topografických dat byl určen chybějící objem materiálu (tzv. net missing volume) v dané oblasti, který sloužil jako hlavní parametr pro hodnocení rozsahu opotřebení. Tento objem byl následně extrapolován na celou délku stopy a použit pro srovnání mezi jednotlivými mazivy testovanými na tribologickém zařízení Bruker UMT TriboLab.

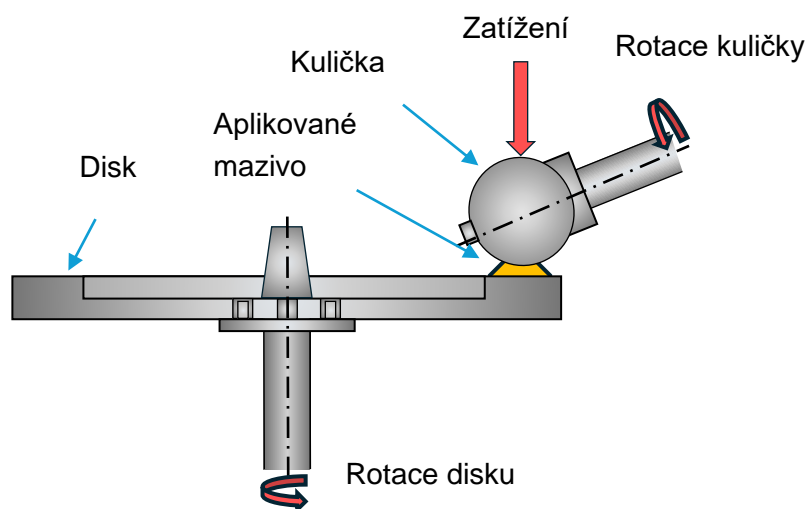


Obr. 5-7 Schéma funkce optického profilometru

5.2.4 Nízké třecí vlastnosti

Experimentální zařízení

Mini Traction Machine (MTM) je tribologické zařízení určené pro simulaci kontaktního zatížení v konfiguraci kulička–disk při valivě-skluzovém pohybu. Využití nachází zejména při hodnocení mazacích vlastností za řízených smykových podmínek. Základními komponenty jsou ocelová kulička a disk, které jsou poháněny dvěma nezávislými motory. Tím je umožněno přesné nastavení rozdílu obvodových rychlostí obou těles, a tedy i řízení skluzového poměru. Zkušební tělesa jsou vyrobena z ložiskové oceli AISI 52100 a konstrukce zařízení umožňuje kontrolu teploty, zatížení i relativní rychlosti v kontaktu.



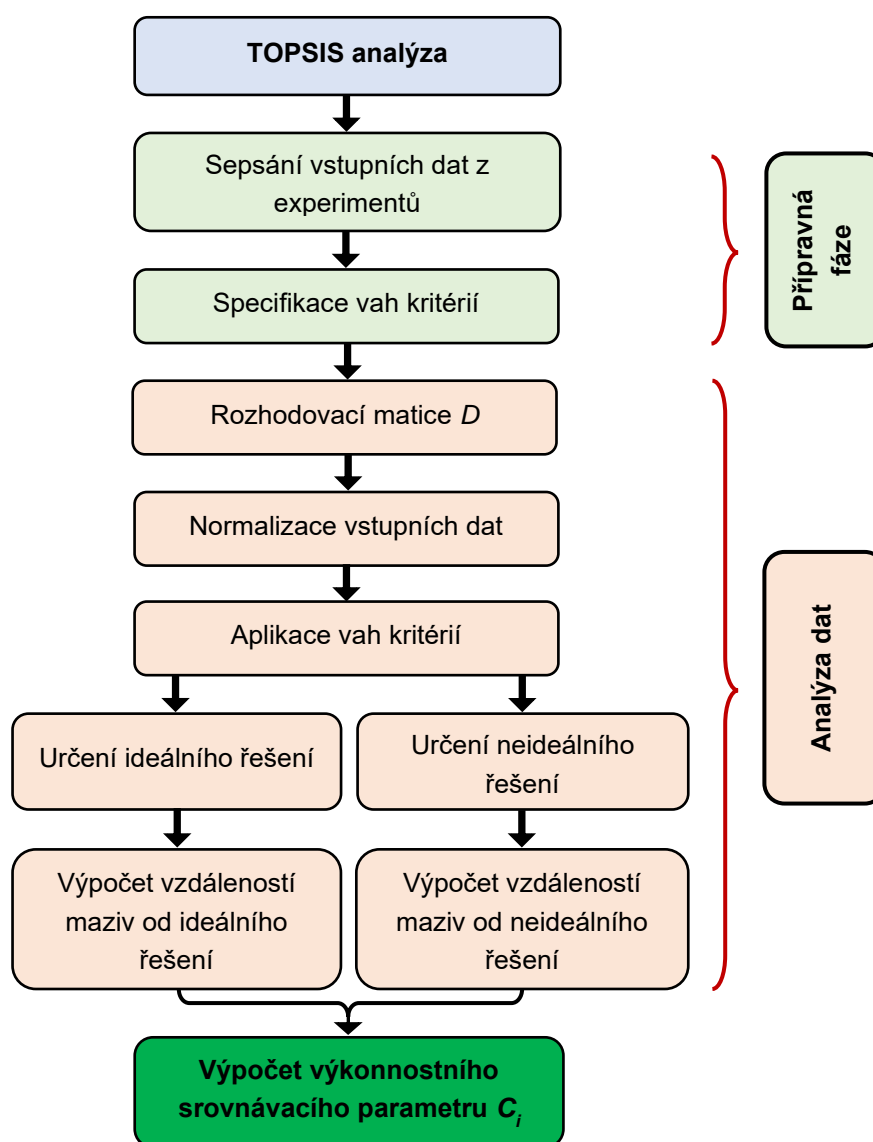
Obr. 5-8 Schéma konfigurace ball-on-disk na zařízení MTM

Metody

Měření probíhalo za definovaných podmínek, při nichž se disk a kulička pohybovaly s různými obvodovými rychlostmi, čímž vznikala řízený skluz. V místě kontaktu vznikala třecí síla, která byla během celého testu průběžně snímána citlivým tenzometrickým systémem. Na základě zaznamenaných hodnot třecí síly a známé normálové síly byl následně v reálném čase počítán součinitel tření. Hodnoty byly zaznamenávány a následně vyhodnocovány jako funkce času, skluzového poměru nebo dalších parametrů, přičemž výsledný průběh součinitele tření sloužil k porovnání účinnosti jednotlivých testovaných maziv.

5.3 Vyhodnocení multikriteriální analýzou

V rámci této diplomové práce bylo za účelem multikriteriálního hodnocení výkonnosti plastických maziv navrženo využití metody TOPSIS. Tato metoda představuje přístup, který umožňuje srovnání více variant na základě jejich vzdálenosti od ideálního (nejlepšího) a anti-ideálního (nejhoršího) řešení. Výsledkem analýzy je stanovení relativní výhodnosti jednotlivých variant s ohledem na všechna posuzovaná kritéria a jejich váhové zastoupení. Předkládaný návrh algoritmu TOPSIS představuje teoretický rámec, který bude v další fázi práce využit pro zpracování experimentálních dat. Jednotlivé kroky algoritmu jsou popsány obecně, přičemž specifikace konkrétních vah bude provedena až v detailním návrhu metodiky. Schématický postup algoritmu metody TOPSIS je znázorněn na následujícím Obr. 5-9.



Obr. 5-9 Schéma postupu metodiky TOPSIS

Vstupní data

Základním výchozím bodem metody TOPSIS je rozhodovací matice D (vztah 5-1), která obsahuje kvantitativní hodnocení jednotlivých variant. Jedná se o jednotlivé schopnosti ověřované pomocí experimentů a o testovaná maziva. Každé mazivo pak dle daných schopností dosahuje výsledků x_{ij} , které tvoří základní datovou strukturu pro vícekritériální hodnocení. S ohledem na odlišnou fyzikální povahu těchto kritérií a jejich rozdílný význam pro provozní spolehlivost bude každému z nich přiřazen směr preferovaného vývoje – tedy zda má být jeho hodnota maximalizována (například tloušťka filmu), či minimalizována (například tření nebo opotřebení). Pro zajištění vyváženého porovnání budou navíc jednotlivým kritériím přiřazeny váhy, které zohledňují jejich důležitost. Takto definovaný vstupní rámec umožňuje aplikaci metody TOPSIS s cílem systematicky a objektivně vyhodnotit celkovou výkonnost jednotlivých plastických maziv.

$$D = [x_{ij}] \quad (5-1)$$

Normalizace

Vzhledem k odlišné fyzikální povaze a různému měřítku jednotlivých hodnotících charakteristik byla před samotnou aplikací metody TOPSIS provedena jejich normalizace. Cílem tohoto kroku bylo převést veškeré vstupní hodnoty do bezrozměrné podoby, která umožňuje jejich vzájemné srovnání v rámci jednotné škály. Pro potřeby této práce byla zvolena normalizace pomocí vektorové normy, která patří mezi standardní přístupy v rámci metody TOPSIS. Každý prvek rozhodovací matice byl převeden na normalizovanou hodnotu dle následujícího vztahu (5-2).

$$r_{ij} = \frac{x_{ij}}{\sqrt{\sum_{i=1}^m x_{ij}^2}} \quad (5-2)$$

kde r_{ij} označuje normalizovanou hodnotu i -té varianty vzhledem k j -té schopnosti

Tímto způsobem byla získána bezrozměrná matice čísel, ve které byly odstraněny rozdíly v jednotkách a rozsazích vstupních údajů a byla dále použita pro výpočet vážených hodnot.

Váhy kritérií

Pro zohlednění rozdílné důležitosti jednotlivých kritérií byly do výpočtu zavedeny váhy, které vyjadřují relativní význam každé schopnosti v celkovém hodnocení. Každé normalizované hodnotě bylo následně přiřazena odpovídající váha, čímž došlo k výpočtu vážené normalizované matice. Tento krok slouží k tomu, aby kritéria s vyšší prioritou měly v rozhodovacím procesu větší vliv než kritéria méně významná. Výpočet vážené hodnoty byl proveden podle vztahu (5-3).

$$v_{ij} = r_{ij} * w_j \quad (5-3)$$

kde v_{ij} je vážená normalizovaná hodnota a w_j je váha dané schopnosti

Identifikace ideálního a neideálního řešení

Na základě vážené normalizované matice byla v následujícím kroku stanovena tzv. ideální a neideální řešení každé schopnosti. Ta představují teoretické referenční výsledky pro hodnocení všech ostatních variant. Ideální řešení zahrnuje nejvýhodnější možné hodnoty v každé schopnosti napříč mazivy, zatímco neideální řešení obsahuje hodnoty nejméně žádoucí. Výběr konkrétních hodnot se odvíjí od charakteru každé schopnosti a pro některé schopnosti je tedy ideální maximální hodnota a pro některé minimální hodnota. Obecně je poté proveden výběr polí, kde V_j^+ představuje pole ideálních řešení a V_j^- pole neideálních řešení napříč schopnostmi.

Výpočet koeficientů ideálního a neideálního řešení

Po stanovení ideálního a neideálního řešení následoval výpočet vzdáleností jednotlivých variant od referenčních hodnot. Tento krok je zásadní pro určení toho, jak blízko se každá hodnocená schopnost maziva nachází k ideálnímu řešení a jak daleko je od varianty nejméně výhodné. Vzdálenosti byly počítány pomocí Eukleidovské metriky, která je v rámci metody TOPSIS standardně používána. Pro každé mazivo byla takto vypočtena vzdálenost od ideálního řešení S_i^+ a od neideálního řešení S_i^- podle následujících vztahů (5-6 a 5-7)

$$S_i^+ = \sqrt{\sum_{j=1}^n (V_{ij} - V_j^+)^2} \quad (5-6)$$

$$S_i^- = \sqrt{\sum_{j=1}^n (V_{ij} - V_j^-)^2} \quad (5-7)$$

Výpočet výkonnostního parametru

Na základě vypočtených vzdáleností byla pro každou variantu určena relativní blízkost k ideálnímu řešení, označovaná jako výkonnostní parametr C_i . Tento vyjadřuje, do jaké míry se daná varianta přibližuje teoreticky nejvýhodnějšímu řešení, a současně zohledňuje její vzdálenost od řešení nejméně výhodného. Hodnota C_i nabývá hodnot v intervalu $\langle 0; 1 \rangle$, přičemž čím vyšší je její hodnota, tím je varianta považována za celkově výhodnější. Výpočet byl proveden podle vztahu (5-8)

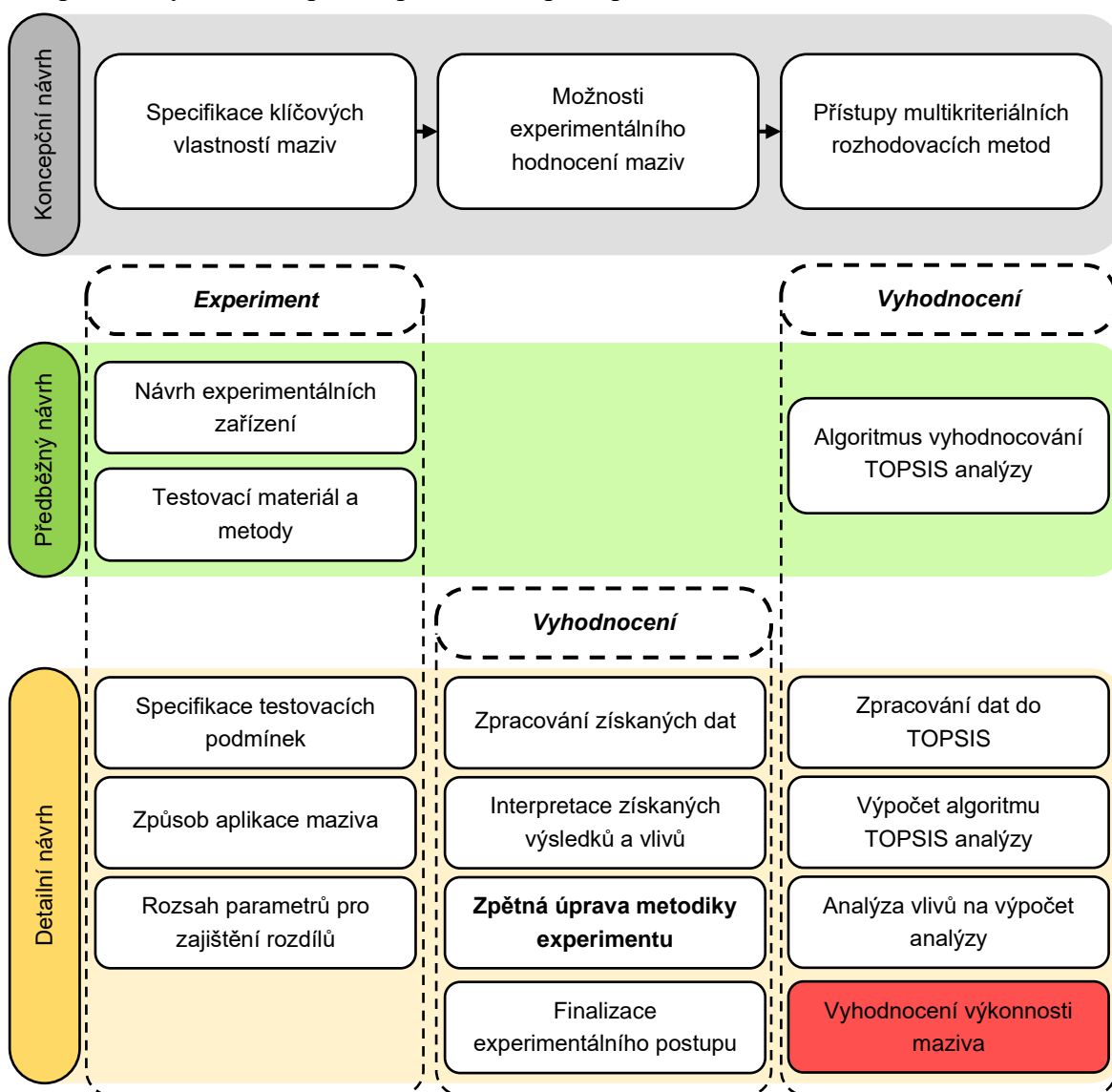
$$C_i = \frac{S_i^-}{S_i^+ + S_i^-} \quad (5-8)$$

kde S_i^+ a S_i^- označují vzdálenosti od ideálního a neideálního řešení. Po výpočtu výkonnostních parametrů pro všechny maziva byly jednotlivé varianty seřazeny sestupně podle hodnoty C_i , čímž vzniklo celkové pořadí variant z hlediska jejich komplexní výhodnosti. Tímto způsobem bylo možné objektivně porovnat výkonnost testovaných plastických maziv na základě více měřitelných kritérií současně, a to s ohledem na jejich relativní důležitost. Výsledky analýzy následně slouží jako podklad pro rozhodnutí o výběru nejvhodnějšího maziva pro dané provozní podmínky.

6 DETAILNÍ NÁVRH

6.1 Detailní návrh metodiky pro hodnocení výkonnosti maziv

Tato kapitola navazuje na předběžný návrh metodiky a rozvíjí jej do konkrétní, aplikovatelné podoby. Na základě konceptu byla navržena metodika, která propojuje experimentální měření klíčových schopností maziv s vícekriteriálním hodnocením pomocí metody TOPSIS. Návrh, znázorněný na Obr. 6-1, zahrnuje specifikaci testovacích podmínek, způsob aplikace maziva, zpracování a analýzu naměřených dat včetně identifikace vlivů testovacích parametrů. Výsledky experimentů následně slouží jako vstupní data pro TOPSIS analýzu, jejímž cílem je objektivní porovnání výkonnosti testovaných maziv. Součástí metodiky je i interpretace výsledků a zpětná optimalizace postupu.

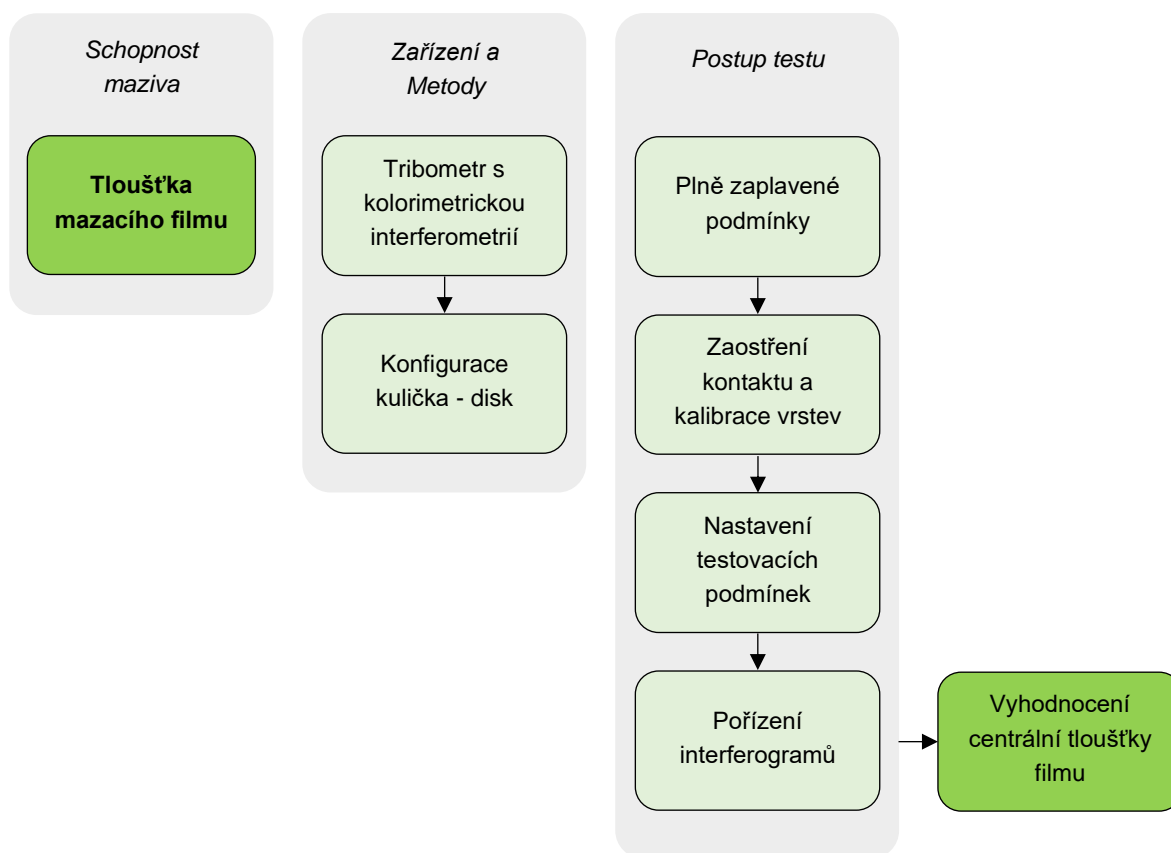


Obr. 6-1 Schéma detailního návrhu metodiky pro hodnocení výkonnosti plastických maziv

6.2 Experimentální část

6.2.1 Tloušťka mazacího filmu

Tloušťka mazacího filmu byla detailně navržena dle následujícího schématu znázorněném na Obr. 6-2. V předběžném návrhu bylo navrženo testovací zařízení, kontaktní tělesa a vyhodnocovací metoda. Jedná se tedy o testování pomocí optického tribometru s kolorimetrickou interferometrií, kdy kontaktními tělesy je kulička z ložiskové oceli a dva možné druhy disků. Detailněji je poté popsán postup testu, nastavení testovacích podmínek a vyhodnocení získaných výsledků.



Obr. 6-2 Schéma měření tloušťky mazacího filmu

Testovací podmínky

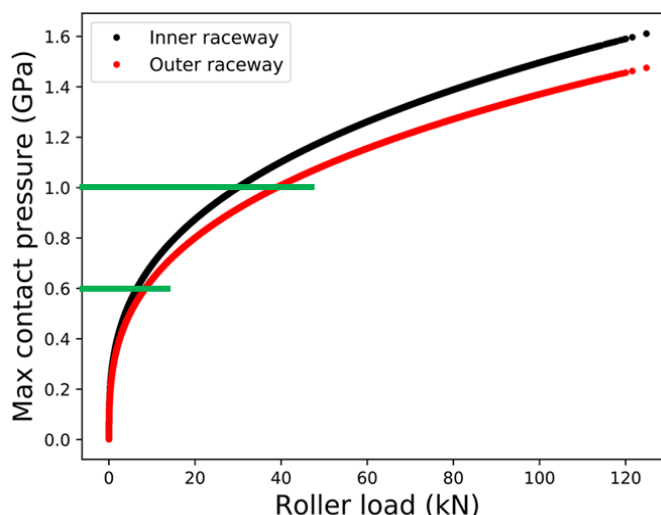
Testovací podmínky byly navrženy s cílem co nejvíce napodobit provozní podmínky hlavních ložisek větrných elektráren, a současně zajistit dostatečné rozlišení mezi jednotlivými testovanými mazivy. Kombinovány byly tři klíčové faktory – rychlost, kontaktní tlak a teplota, které zásadně ovlivňují tvorbu mazacího filmu.

Obvodová rychlost v kontaktu byla volena v pěti hodnotách: 100, 200, 300, 400 a 500 mm/s. Hodnoty rychlosti byly odvozeny na základě typických provozních otáček (5–15 ot/min) hlavních ložisek větrných turbín. K výpočtu bylo využito také poloměru oběžné dráhy elementů, kdy u ložiska ZKL 241/500 se jedné přibližně o poloměr 250 mm a u větších ložisek ZKL 240/800 přibližně o 400 mm. Výpočtem tedy vychází, že obvodová rychlost při 10 ot/min a průměru 400 mm činí přibližně 420 mm/s. Zvolený rozsah rychlostí tedy pokrývá provozní rychlosti otáčení, kdy kompletní vypočtené hodnoty dle rozsahu otáček jsou uvedeny v Tab. 6-1.

Tab. 6-1 Vypočtené hodnoty typických rychlostí

Otáčky	Poloměr oběžné dráhy elementu ložiska	
	250 mm	400 mm
5	130 mm/s	210 mm/s
10	270 mm/s	420 mm/s
12	330 mm/s	500 mm/s
15	400 mm/s	630 mm/s

Volba kontaktního tlaku v experimentu vycházela z grafu hertzových tlaků (Obr. 6-3 Volba kontaktního tlaku) v ložisku větrné elektrárny, které se běžně pohybují až do hodnot 1,6 GPa v závislosti na rychlosti větru. Pro experiment byly zvoleny hodnoty 0,6 a 1 GPa. Tyto dvě hodnoty poté sloužily jako referenční pro nastavení experimentu.



Obr. 6-3 Volba kontaktního tlaku

Pro vytvoření kontaktní dvojice byla využita ocelová kulička o průměru 25,4 mm a dva různé disky – skleněný a safírový – oba opatřené chromovou vrstvou pro potřeby kolorimetrické interferometrie. Kulička je z ložiskové oceli o modulu pružnosti 210 GPa a poissonově poměru 0,3. Vzhledem k odlišným vlastnostem obou materiálů disků bylo nutné docílit velikost působící normálové síly tak, aby při každé konfiguraci odpovídal výsledný hertzův tlak zvoleným hodnotám 0,6 GPa a 1,0 GPa. Pro nižší tlak byl využit skleněný disk a pro vyšší tlak disk safírový. Materiálové charakteristiky a potřebné normálové síly jsou uvedeny v Tab. 6-2.

Tab. 6-2 Materiálové charakteristiky, normálové síly a kontaktní tlaky

disk	Modul pružnosti E [GPa]	Poissonův poměr [-]	Normálová síla [N]	Kontaktní tlak [GPa]
Skleněný	80	0,21	50	0,6
safírový	400	0,29	37	1

Pro experimentální měření tloušťky mazacího filmu byly zvoleny dvě teplotní úrovně, a to 25 °C a 50 °C. Tato volba reflektuje reálné provozní podmínky, kdy se teplota v závislosti na okolním prostředí běžně pohybuje v rozmezí přibližně 5–50 °C. Nižší testovací teplota 25 °C odpovídá provozu v chladnějším počasí nebo při nižších otáčkách, kdy se ložisko ohřívá jen minimálně. Naopak teplota 50 °C reprezentuje zahřátý provoz během letního období, kdy teplota ložiska může přesahovat 40 °C.

Postup testu

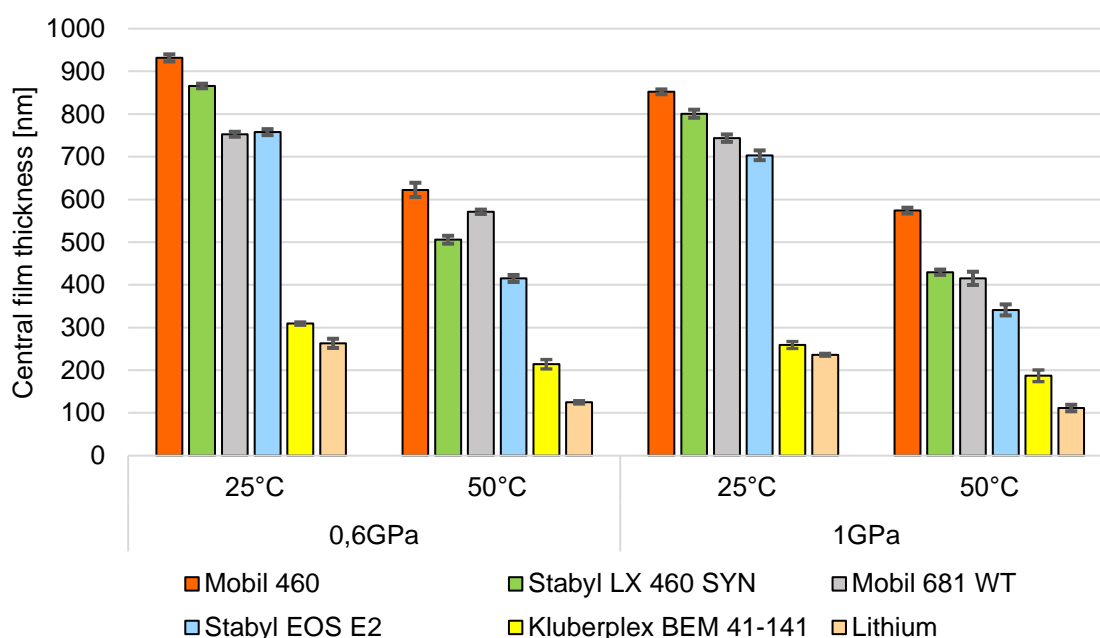
Plastické mazivo bylo nanášeno na disk, přičemž nebylo nutné určovat konkrétní množství maziva. Následně bylo totiž využito plastové stěrky, která stírala mazivo z disku a usměrňovala mazivo do kontaktu. Tím docházelo k simulaci plně zaplavených podmínek kontaktu.

Měření mazacího filmu bylo provedeno za definovaných testovacích podmínek, které byly navrženy s cílem simulovat reálné provozní situace valivých ložisek hlavního hřídele větrné elektrárny. Zvolená metodika umožnila sledovat vliv klíčových provozních faktorů – zejména rychlosti, kontaktního tlaku a teploty. Sledován byl poté vliv na chování plastických maziv v elastohydrodynamickém kontaktu. Celý experiment byl navržen tak, aby výsledky umožňovaly přímé porovnání jednotlivých maziv z hlediska jejich schopnosti vytvářet stabilní mazací film v různých testovacích podmínkách.

Pro každou kombinaci zatížení a teploty byla provedena tři samostatná měření, přičemž v každé rychlosti byly pořízeny tři interferogramy v časovém odstupu pěti sekund. Z každého interferogramu byla určena centrální tloušťka mazacího filmu a následně byla ze všech devíti hodnot vypočtena průměrná hodnota. Součástí zpracování byla také směrodatná odchylka, která vyjadřuje variabilitu měření v dané kombinaci podmínek.

Výsledky

Naměřené hodnoty jsou zobrazeny ve sloupcovém sumarizačním grafu (Obr. 6-4), kde je znázorněna centrální tloušťka filmu v jednotkách nanometrů pro jednotlivá maziva při rychlosti 300 mm/s, zatíženích 0,6 GPa a 1,0 GPa a teplotách 25 °C a 50 °C. Jedna reprezentativní rychlost byla zvolena z důvodu přehlednosti, a také tato rychlost odpovídá přepočtu z nejčastějších hodnot otáček, ve kterých ložiska hlavního hřídele pracují. Graf ukazuje jednoznačný trend poklesu tloušťky filmu při vyšším zatížení a teplotě, což je v souladu s teorií elasto-hydrodynamického mazání. Vlivem vyššího kontaktního tlaku dochází k výrazně menšímu snížení tloušťky filmu v porovnání s vlivem teploty. Při vyšší teplotě se sníží viskozita a tím i prudce poklesla tloušťka filmu. Z výsledků je patrné, že nejvyšší hodnoty dosahují maziva Mobil 460 a Stabyl LX 460 SYN. Naproti tomu maziva Lithium a Kluberplex vykazují výrazně nižší schopnost vytvářet souvislý mazací film, a to ve všech testovaných podmínkách. V postupu testu bylo ovšem navrženo více hodnot rychlostí, které byly také změřeny, ale trend tloušťky filmu v jednotlivých variantách zůstal stejný.



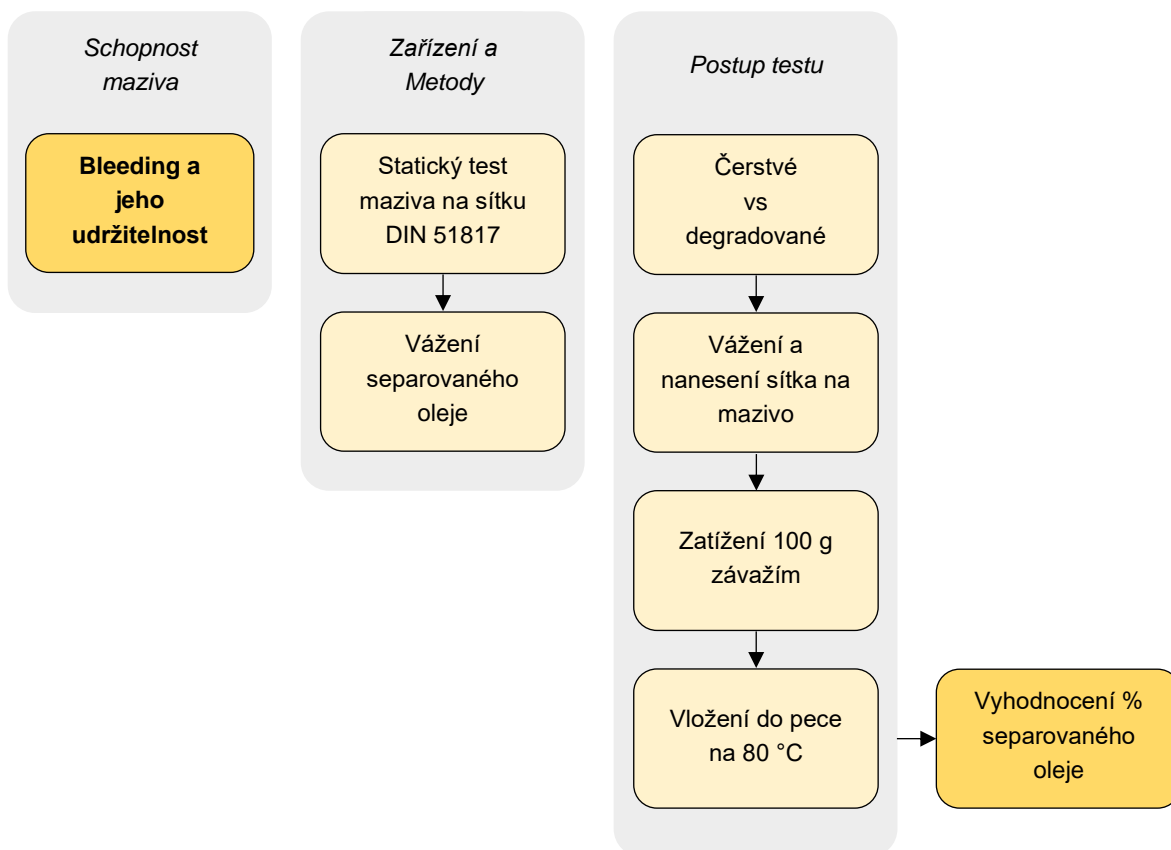
Obr. 6-4 Graf vlivu teploty a zatížení na centrální tloušťky filmu

Pro účely multikriteriálního hodnocení metodou TOPSIS byla jako reprezentativní vstupní hodnota zvolena průměrná centrální tloušťka mazacího filmu při rychlosti 300 mm/s, kontaktním tlaku 1GPa a teplotě 50°C. Tyto hodnoty byly zvoleny s ohledem na nejčastější provozní podmínky ložisek, ale je možné je jakkoliv měnit dle požadavků. Tloušťka filmu byla poté uvažována jako benefiční kritérium, tedy parametr, jehož vyšší hodnota je preferována.

6.2.2 Bleeding a jeho udržitelnosti

V rámci této práce byl navržen experimentální přístup vycházející z normy DIN 51817, která umožňuje vyhodnotit nejen procento bleedingu, ale také jeho změnu v důsledku mechanické degradace maziva. Cílem bylo ověřit schopnost jednotlivých maziv udržet vazbu mezi zahušťovadlem a základovým olejem i po zatížení simulujícím provozní podmínky. Detailní postup testování je znázorněn ve schématu na Obr. 6-5.

Obr. 6-5 Schéma testování bleedingu



Testovací podmínky

Testovací podmínky zahrnovali nerezové sítko, na které bylo aplikováno celkem 30 g maziva, kdy toto množství bylo maximální dosažitelné množství z grease worker (dle diplomové práce Prokopa [45]). Dále bylo na mazivo aplikováno závaží o hmotnosti 100 g dle normy. Celá sestava byla poté vložena do pece na teplotu 80 °C, což je dle normy v jejím doporučeném intervalu (40 °C až 120 °C). Sledován byl separovaný olej v peci po dobu 120 hodin.

Postup testu

Postup měření bleedingu vycházel z metody, která popisuje hodnocení separace oleje z plastického maziva za statických podmínek při zvýšené teplotě. Každý testovaný vzorek byl připraven ve dvou variantách – jako čerstvé mazivo a jako mechanicky degradované mazivo. Tím bylo možné sledovat vliv na stabilitu struktury maziva.

Degradace vzorku byla provedena pomocí zařízení typu grease worker, které simuluje smykové namáhání maziva. Vzorek o hmotnosti 35 gramů byl v zařízení namáhán po dobu 24 hodin. Po skončení cyklu bylo odebráno maximální možné množství (30 g) degradovaného maziva určené k testu.

Samotný modifikovaný test probíhal na nerezovém sítu, kdy do jeho středové části bylo rovnoměrně nanášeno mazivo. Takto připravený vzorek byl zatížen přesně definovaným závažím, které dosedalo po celé ploše, aby bylo zajištěno konzistentní mechanické působení. Síto se vzorkem bylo poté vloženo do laboratorní pece, kde byla udržována stálá teplota. Během testu docházelo k samovolnému uvolňování oleje z maziva, který protékal sítím a hromadil se v nádobce umístěné pod zkušební sestavou. Po časovém intervalu byla nádobka vyjmuta a zvážena. Tento postup byl poté identický pro všechny vzorky a umožnil srovnání výsledků mezi různými mazivy a jejich čerstvým a degradovaným vzorkem.

Výsledky

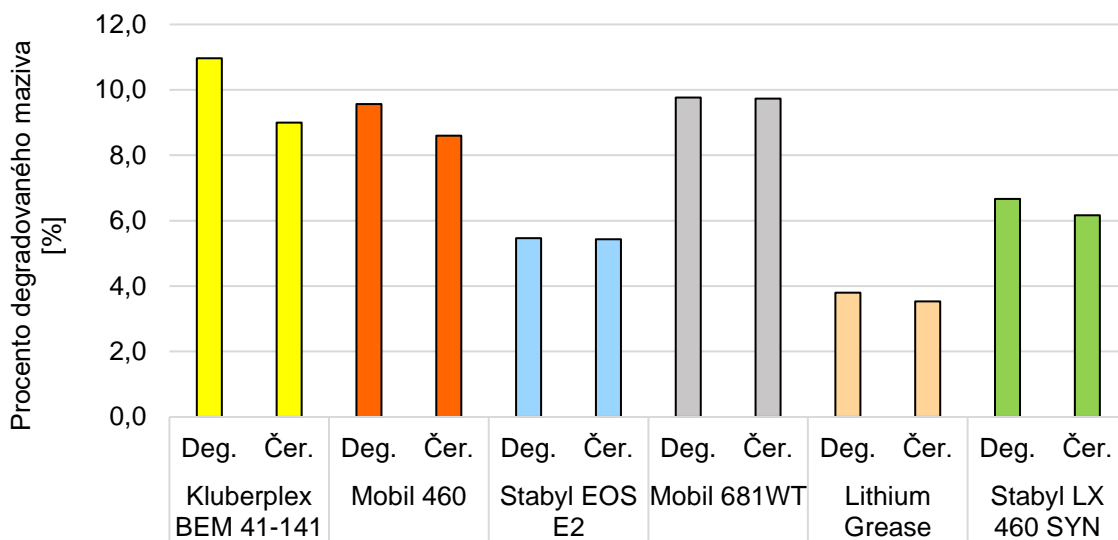
Naměřené hodnoty byly zpracovány zvlášť pro čerstvé a degradované vzorky každého testovaného maziva. Hmotnost separovaného oleje v nádobě byla zvážena na přesné váze po době 120 hodin a s touto hmotností se na vyhodnocení pracovalo dále. Pro každý jednotlivý vzorek byla vypočtena relativní míra bleedingu (v %), která vyjadřuje podíl separovaného oleje vůči původnímu množství nanášeného maziva. Výpočet byl proveden dle vztahu 6-1.

$$\% = \left(\frac{m_{\text{separovany olej}}}{m_{\text{puvodniho maziva}}} \right) * 100 \quad (6-1)$$

Dále byla vypočtena změna bleedingu způsobená mechanickou degradací. Tento parametr charakterizuje stabilitu maziva z hlediska zachování struktury zahušťovačla a byl určen jako relativní rozdíl mezi hodnotami bleedingu degradovaného a čerstvého vzorku po 120 hodinách separace.

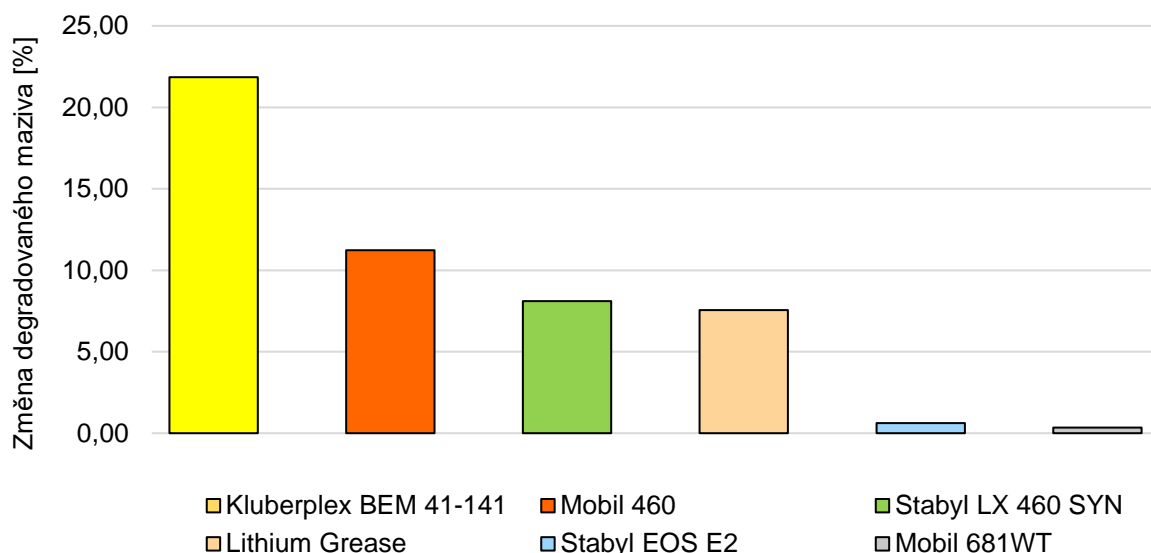
$$\Delta\% = \left(\frac{m_{\text{deg}} - m_{\text{cer}}}{m_{\text{cer}}} \right) * 100 \quad (6-2)$$

Grafické vyhodnocení výsledků bylo provedeno ve formě sloupcových grafů, kde byly zobrazeny hodnoty procenta bleedingu pro čerstvé a degradované vzorky. Tyto hodnoty jsou poté znázorněny na Obr. 6-6. Je zde patrné, že některá maziva (například Kluberplex, Mobil 460 či Mobil 681WT) dosahují poměrně velkého množství uvolňovaného oleje z původního množství maziva a to okolo 8-10 %.



Obr. 6-6 Graf procenta separovaného oleje z obou vzorků

Stabilita mezi čerstvým a degradovaným plastickým mazivem je poté znázorněna na Obr. 6-7. Objevuje se zde například velká nestabilita u maziva Kluberplex. Naopak velmi stabilní se ukazují maziva jako Stabyl EOS E2 a Mobil 681WT.

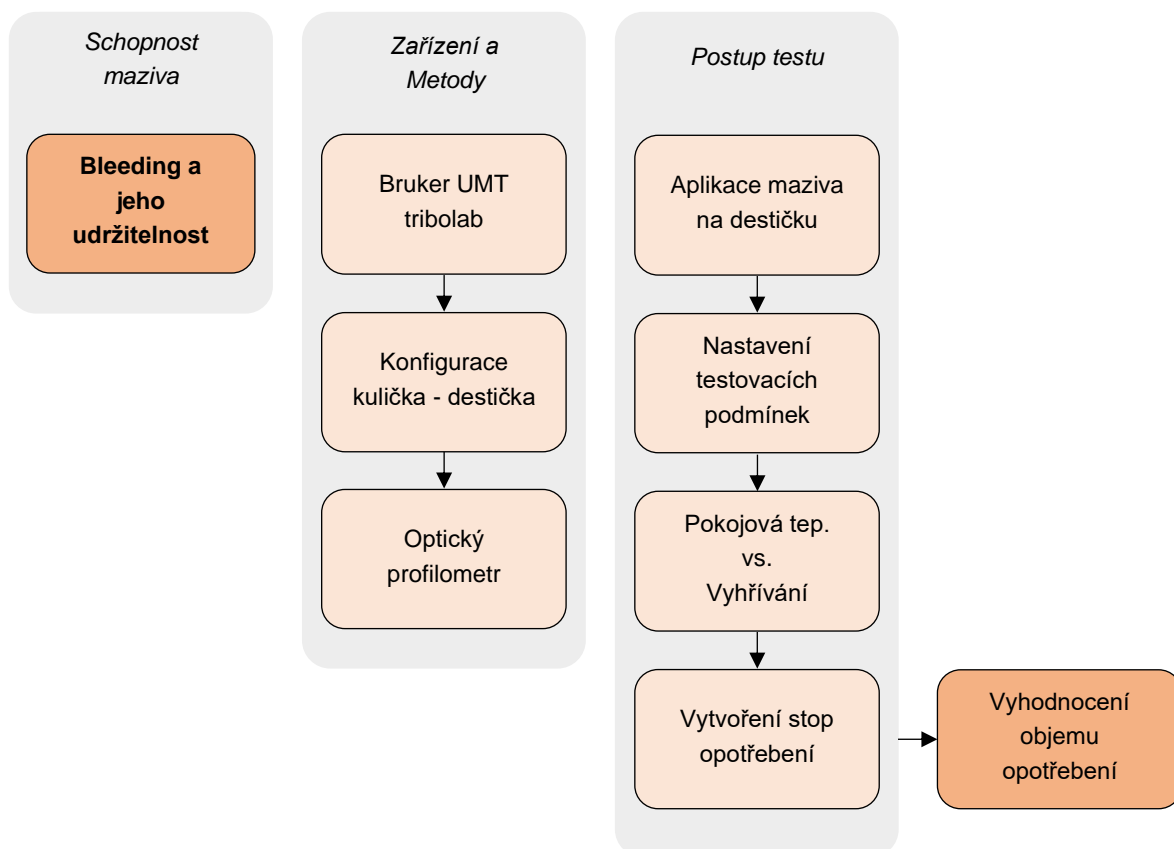


Obr. 6-7 Graf stability maziva

Do následného multikriteriálního hodnocení metodou TOPSIS byla zahrnuta pouze změna stability bleedingu, která je důležitá z hlediska dlouhodobého provozu ložisek. Absolutní hodnoty bleedingu nebyly hodnoceny vůči ideálnímu rozmezí, protože doporučené hodnoty vycházejí z jiných testovacích podmínek – typicky při 40 °C a delším čase separace (např. 160 hodin). V rámci této práce však byla použita vyšší teplota pro dosažení vyšších rozdílů maziv, a proto byla jako relevantní hodnocena pouze stabilita mezi čerstvým a degradovaným vzorkem. Stabilita byla také dále hodnocena jako nákladové kritérium, kdy nižší procento změny vyjadřuje stabilnější mazivo při degradaci.

6.2.3 Schopnost maziva chránit povrchy před opotřebením

V rámci této schopnosti bylo navrženo experimentální měření opotřebení pomocí modifikovaného postupu dle normy ASTM D5707. Experimenty byly realizovány na tribologickém zařízení Bruker UMT TriboLab v konfiguraci kulička–destička. Pro vyhodnocení bylo využito objemu opotřebení vzniklých stop, kdy měření bylo provedeno pomocí optického profilometru. Kompletní struktura měřicího postupu je znázorněna na Obr. 6-8.



Obr. 6-8 Schéma testování ochrany aditivity před opotřebením

Testovací podmínky

Testovací podmínky byly navrženy na základě metodiky normy ASTM D5707 upravené pro účely hodnocení funkce aditiv v plastických mazivech ložisek větrných elektráren. Testování probíhalo s ocelovou kuličkou o průměru 7 mm a rovinnou destičkou, obě z ložiskové oceli AISI 52100. Mazivo bylo do kontaktní dráhy nanášeno jednorázově ve formě jedné kapky o objemu 5 μl pomocí elektronické pipety. Pro vytvoření opotřebení byl navržen lineární oscilační pohyb o délce dráhy 4 mm a frekvenci 10 Hz. Kontaktní tlak byl nastaven na vyšší hodnoty, a to 2,8 GPa. Pro kuličku o průměru 7 mm se tedy jednalo o normálovou sílu 105 N, pomocí které byl dopočítán požadovaný kontaktní tlak. Zvolené testovací podmínky byly navrženy tak, aby byl simulován stav, kdy dochází k poklesu mazacího filmu a ke kontaktu kov-kov.

V rámci experimentu byly sledovány dvě varianty teplot: první varianta využívala samovolné zahřívání kontaktu vznikající v důsledku tření. Z pohledu času poté tato testovací varianta trvala 3 minuty, kdy bylo dosaženo dostatečného opotřebení. Druhá varianta pracovala s aktivním vyhříváním na konstantní teplotu 80 °C pomocí patron, přičemž celková délka testu byla v tomto případě prodloužena na 60 minut. Obě varianty byly navrženy tak, aby umožnily vyhodnotit účinnost aditiv maziva v různých teplotních režimech.

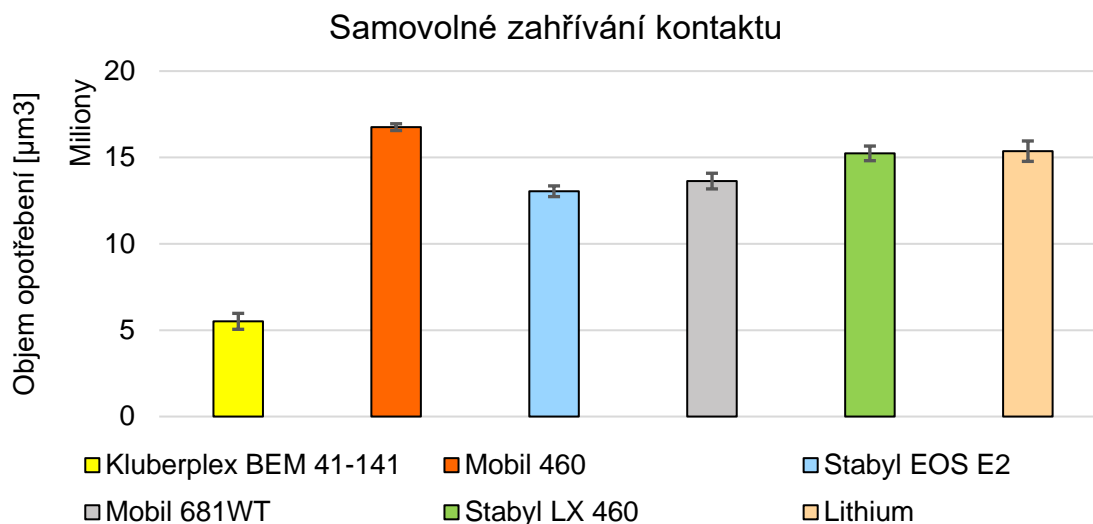
Postup testu

Před zahájením každého měření byla kontaktní tělesa důkladně očištěna a odmaštěna acetonem tak, aby nedošlo k ovlivnění výsledků nečistotami nebo zbytkovým mazivem. Následně bylo nanášeno zmíněné množství maziva a proveden vlastní test podle výše popsaných testovacích podmínek, přičemž každé mazivo bylo testováno samostatně. To vedlo k vytvoření jedné stopy opotřebení na destičce. Po dokončení každého testu následovalo opětovné čištění destičky a výměna kuličky za novou neopotřebenou, aby byly zajištěny identické vstupní podmínky pro další vzorek. Celý postup byl opakován pro všechna testovaná maziva, a to vždy při zachování podmínek testu. Po dokončení měření byla destička se stopami opotřebení analyzována pomocí 3D optického profilometru, jehož výstupem byl objem chybějícího materiálu ve vymezené oblasti kontaktu. Tento objem představoval hlavní kvantitativní ukazatel pro následné porovnání účinnosti jednotlivých maziv z hlediska jejich schopnosti chránit povrch proti opotřebení.

Výsledky

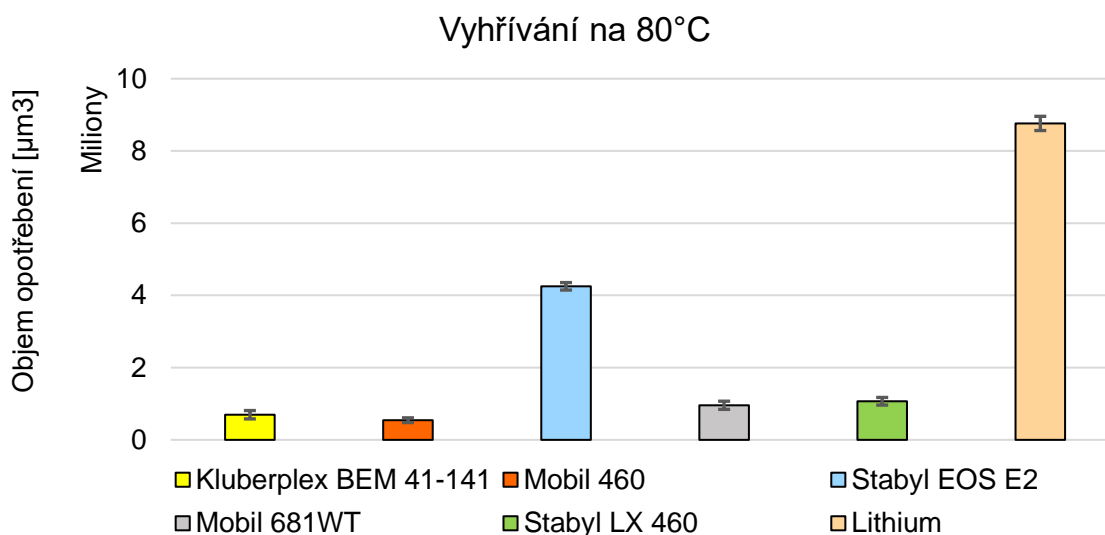
Vyhodnocení výsledků testu opotřebení bylo založeno na 3D analýze topografie vzniklé stopy pomocí optického profilometru. Z každého testu byl získán detailní profil kontaktní oblasti, ze kterého byl pomocí softwaru Bruker Vision64 určen objem chybějícího materiálu (*net missing volume*) v jednotkách μm^3 . Tato hodnota vyjadřuje skutečný úbytek materiálu z povrchu destičky v důsledku opotřebení. Pro srovnání výkonnosti maziv byla tato hodnota následně vynásobena celkovou délkou stopy. Výsledky byly vyjádřeny jako průměr ze tří opakování na každou variantu maziva a teplotního režimu.

Při testování bez vyhřívání se kontaktní plocha zahřívala pouze vlivem tření, přičemž test byl ukončen po 3 minutách. Výsledky objemu opotřebení pro jednotlivá maziva jsou zobrazeny v grafu (Obr. 6-9). Z dat je patrné, že u některých maziv došlo v poměrně krátkém čase k velkému opotřebení povrchu. Nejnižšího objemu opotřebení dosáhlo mazivo Kluberplex. Naopak nejvyšší hodnoty opotřebení byly zaznamenány u maziva Mobil 460.



Obr. 6-9 Graf objemu opotřebení pro samovolné zahřívání kontaktu

Při testování za zvýšené teploty 80 °C byla doba experimentu oproti předchozí variantě výrazně prodloužena. Původní délka 3 minuty se ukázala jako nedostačující pro vytvoření měřitelné opotřebené stopy. Z tohoto důvodu byl test prodloužen. Výsledky z delšího testu, znázorněné na Obr. 6-10, poté ukázaly výrazné snížení objemu opotřebení oproti variantě se samovolným zahříváním. U maziv Kluberplex, Mobil 460, Stabyl LX 460 a Mobil 681 WT došlo k velkému snížení opotřebení vlivem aktivace aditiv, ale rozdíly mezi těmito mazivy jsou poté minimální. U maziva Stabyl EOS E2 se vyskytla výrazně nižší ochrana povrchu. Mazivo Lithium, které aditivní přísady neobsahuje, poté dopadlo dle očekávání nejhůře s nejvyšším objemem opotřebení. Z pohledu aktivace aditiv tedy vyhřívání umožnilo odhalit potenciál některých maziv, a zároveň zvýraznil slabiny těch, která nejsou pro tento režim optimalizována.

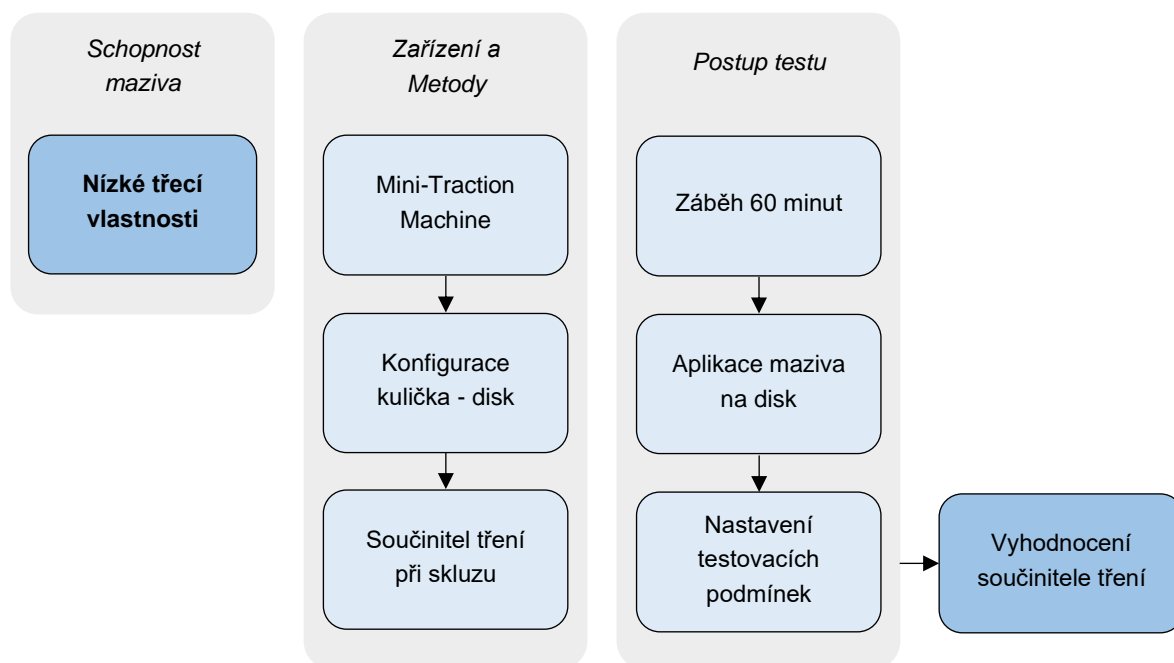


Obr. 6-10 Graf objemu opotřebení pro vyhřívání

Pro vícekritériální hodnocení pomocí metody TOPSIS byl jako vstupní parametr zvolen objem opotřebení získaný při teplotě 80 °C. Tato varianta testu lépe reprezentuje ustálené provozní podmínky, ve kterých mazivo působí po delší dobu a dochází k aktivaci jeho aditiv. Výsledky dosažené při samovolném zahřívání byly využity pouze pro kvalitativní porovnání, nikoliv jako vstupní data. Parametr opotřebení byl v rámci TOPSIS klasifikován jako nákladové kritérium, jelikož nižší objem chybějícího materiálu odpovídá lepší schopnosti maziva chránit třecí povrchy.

6.2.4 Nízké třecí vlastnosti

V rámci třecích vlastností byla navržena experimentální metodika pro hodnocení pomocí tribometru MTM. Cílem bylo analyzovat vliv množství aplikovaného maziva, zatížení, rychlosti a teploty na hodnoty součinitele tření a stanovit, za jakých podmínek maziva poskytují optimální třecí vlastnosti. Celkový průběh měření je znázorněn na schématu na Obr. 6-11.

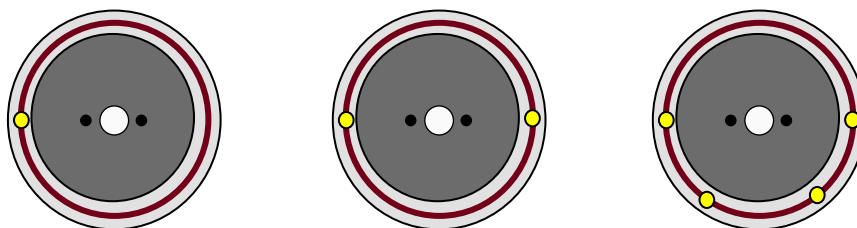


Obr. 6-11 Schéma testování třecích vlastností

Testovací podmínky

Před samotným měřením byl kontakt pečlivě vyčištěn technickým acetonem a podroben 60minutovému záběhu podle metodiky navržené Galasem [46]. Nastaveny byly následující podmínky: 1000 mm/s, 19 N a SRR = 2 %, aby se vytvořila rovnoměrná drážka. Tím bylo zajištěno, že režim mazání zůstane stabilní a nebude ovlivněn změnami geometrie kontaktu. Drážku však bylo nutné pomocí optického profilometru kontrolovat, kdy její doporučená šířka, pro zachování stabilních podmínek, je uváděna v rozmezí 0,65-0,85 mm.

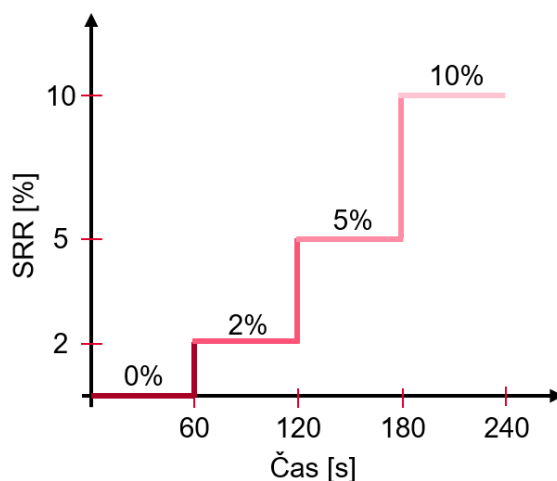
Množství maziva 10 μl a 20 μl bylo zvoleno s ohledem na vývoj režimu mazání v kontaktu při zvýšeném skluzu a otáčkách. Cílem testu bylo ověřit schopnost maziva v oblasti smíšeného až EHD režimu, kde mohou vlastnosti maziva nepříznivě ovlivnit výsledný součinitel tření. Dále bylo testováno množství kapek, kdy byly testovány varianty dle Obr. 6-12. Jednalo se o nanesení jedné, dvou a čtyř kapek. Toto dávkování umožnilo testovat vliv aplikace maziva na součinitel tření. Bylo však zjištěno, že množství kapek nemá na výsledné hodnoty součinitele tření vliv a z tohoto důvodu byla zvolena pro následující porovnání vlivů testovacích podmínek varianta se dvěma kapkami na disku. Při samotném testu tedy byla aplikována polovina z celkového množství v jedné kapce.



Obr. 6-12 Aplikace maziva

Měření součinitele tření bylo provedeno při zatížení 60 N, které odpovídá nominálnímu hertzovu tlaku 1,0 GPa. Obvodová rychlost disku byla nastavena na 300 mm/s, která se pohybuje ve vyšších hodnotách. Tyto hodnoty byly zvoleny podobně, jako u měření tloušťky mazacího filmu. Měření bylo dále navrženo při dvou teplotách, 25 °C a 50 °C, za účelem posouzení vlivu teploty na třecí vlastnosti maziv.

Relativní skluz SRR byl řízen v kaskádovitých krocích 0, 2, 5 a 10 % po intervalech v jedné minutě, což umožnilo sledovat změny tření v závislosti na míře skluzu v kontaktu. V prvním kroku byl zvolen skluz 0%, kdy docházelo k čistému valení a mazivo aplikované na disk bylo v první minutě rozneseno po celém disku. Dále byl již aplikován skluz dle Obr. 6-13.



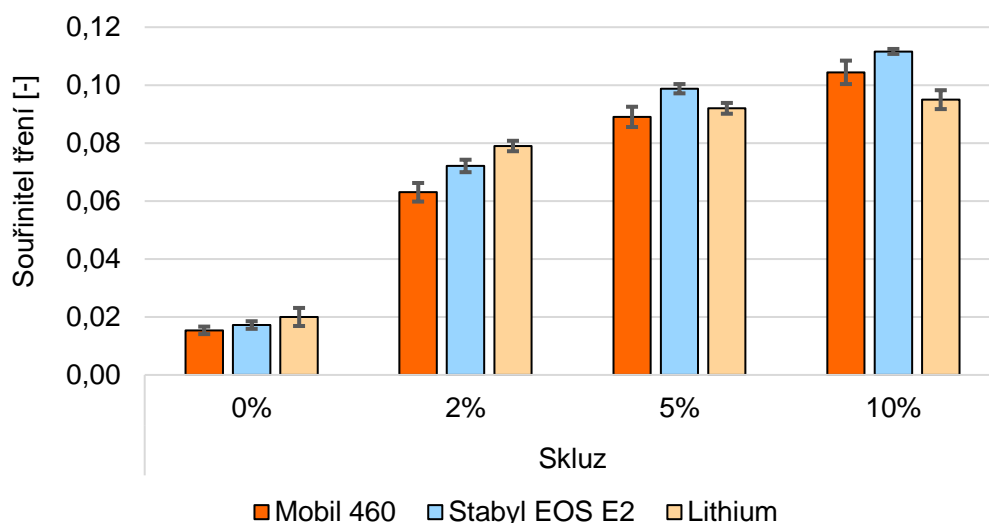
Obr. 6-13 Testování skluzu

Postup Testu

Před zahájením testování byla kontaktní tělesa důkladně očištěna acetonem, načež následoval 60minutový záběh dle výše uvedeného postupu, jehož cílem bylo vytvoření stabilní drážky na disku. Po této fázi byla tělesa opět očištěna a proveden krátký záběh pro odstranění případných residuí. Následně bylo na disk aplikováno plastické mazivo pomocí elektronické pipety, a to dle zvolených variant dávkování uvedených v předchozí části. Po nanesení maziva byl realizován vlastní test, při kterém byl relativní skluz řízen v kaskádovitých krocích a tření bylo měřeno po předem definovaných časových intervalech 60 sekund. Tento postup byl opakován pro všechny kombinace testovacích parametrů a maziv. Výsledné hodnoty tření byly následně statisticky zpracovány, a to průměrem dat v každé hodnotě skluzu. Celkem byly pro každou kombinaci provedeny 3 testy, což umožnilo v každé hodnotě skluzu také zhodnocení opakovatelnosti a výpočet směrodatné odchylky.

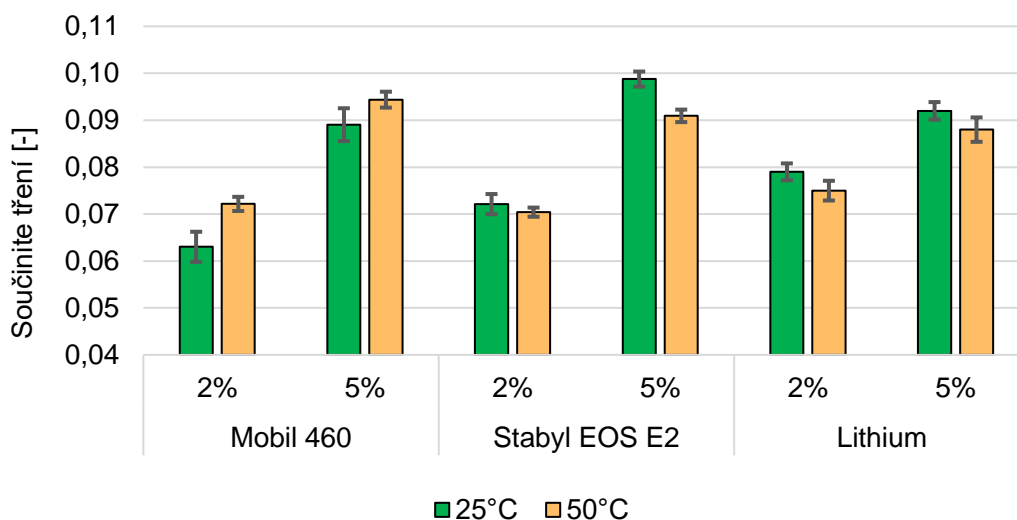
Výsledky

Vyhodnocení výsledků bylo rozděleno dle testovacích podmínek, a to na porovnání vlivu skluzu, vyhodnocení vlivu teploty a vyhodnocení vlivu množství aplikovaného maziva. Jako první byl vyhodnocen skluz, kdy graf na Obr. 6-14 zachycuje jeho vliv na hodnoty součinitele tření u tří vybraných plastických maziv. Z výsledků je patrné, že se s rostoucím skluzem součinitel tření výrazně zvyšuje, což odpovídá přechodu z EHD režimu do smíšeného mazání. Nejnižší tření vykazovalo mazivo Mobil 460, zejména při nižších skluzových hodnotách. Naopak mazivo Stabyl EOS E2 dosahovalo vyšších hodnot, zejména při SRR 10 %, což může naznačovat vyšší trakční vlastnosti. Mazivo Lithium se pohybovalo mezi těmito dvěma extrémami a vykazovalo poměrně stabilní trend.



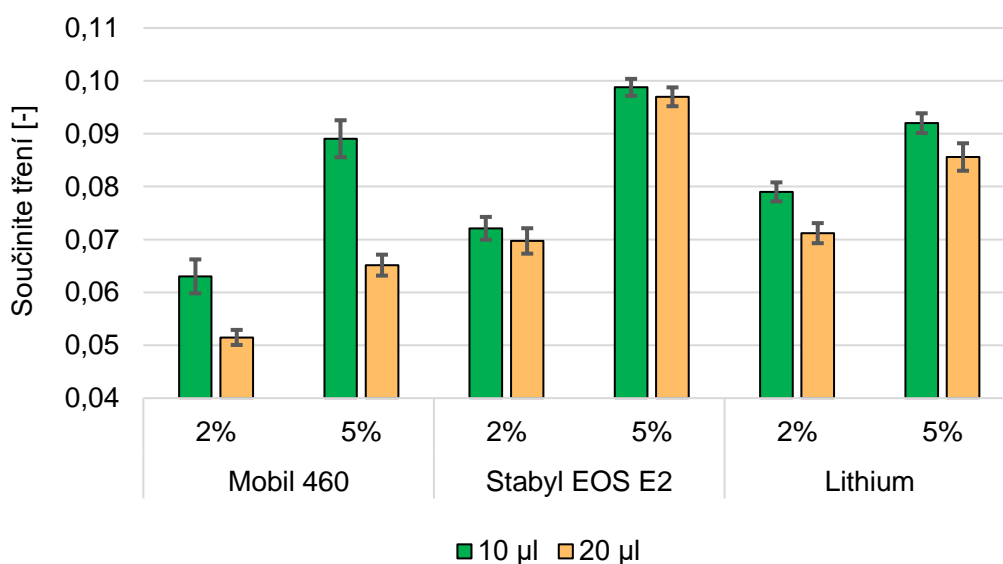
Obr. 6-14 Graf vlivů na součinitel tření

Na Obr. 6-15 je znázorněn graf vlivu provozní teploty na hodnotu součinitele tření u tří vybraných maziv. Porovnány byly pouze dvě varianty skluzu (2 % a 5 %), jelikož dostatečně reprezentují oblast přechodu mezi EHD a smíšeným režimem. Výsledky ukazují, že teplota nemá na tření jednoznačný vliv – zatímco u maziv Mobil 460 a Lithium dochází při zvýšení teploty ke zvýšení součinitele tření, u maziva Stabyl EOS E2 je pozorován mírný pokles.



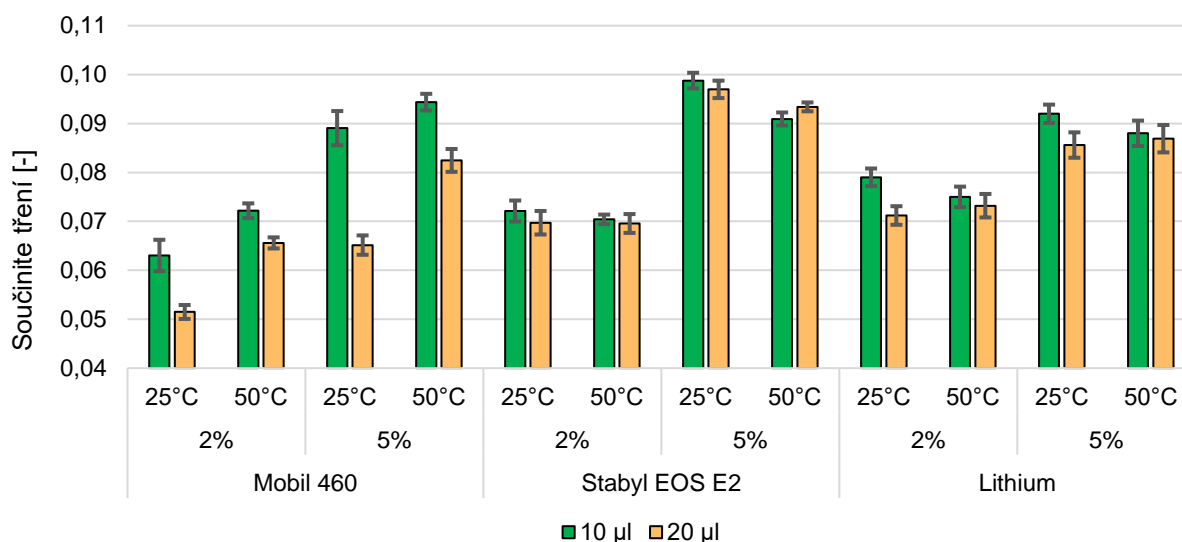
Obr. 6-15 Graf vlivu teploty na tření

Graf na Obr. 6-16 znázorňuje vliv aplikovaného množství maziva (10 μ l a 20 μ l) na hodnotu součinitele tření při teplotě 25 $^{\circ}$ C a relativním skluzu 2 % a 5 %. Z výsledků vyplývá, že ve většině případů dochází při vyšší dávce maziva k mírnému snížení tření, což odpovídá předpokladu, že větší množství maziva lépe podporuje vznik separační vrstvy. Výjimky však naznačují, že vliv množství není jednoznačný a může být závislý na konkrétním typu maziva a jeho reologických vlastnostech.



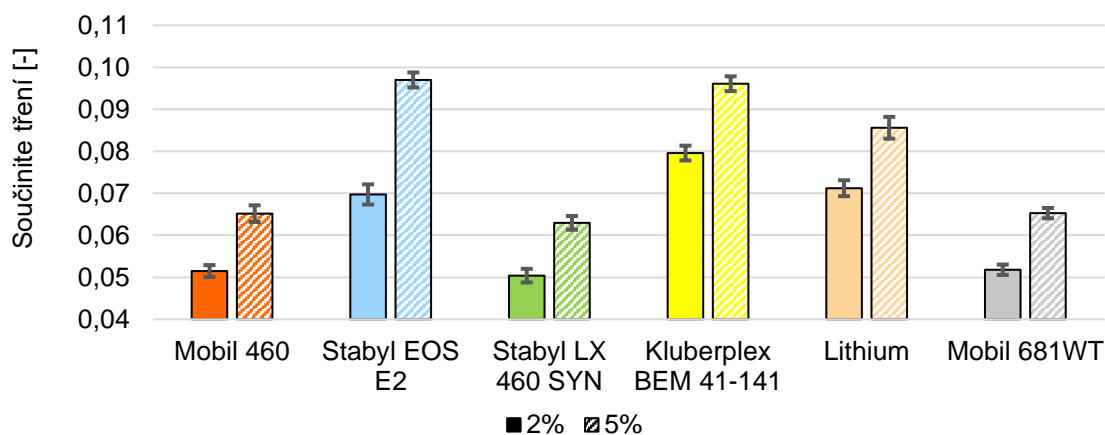
Obr. 6-16 Graf vlivu množství maziva aplikovaného na disk

Výsledky zobrazené na Obr. 6-17 ilustrují kombinovaný vliv zvýšené teploty (50 °C) a větší dávky aplikovaného maziva (20 µl) na třecí vlastnosti vybraných plastických maziv. Ze sloupcového grafu je patrné, že jednotlivá maziva vykazují výrazně odlišné chování. U maziva Mobil 460 nárůst teploty zvýšil součinitel tření, ale navýšená dávka maziva napomáhá k jeho nížení. Kombinace obou podmínek, tedy navýšení teploty i množství maziva, poté vykazovalo výrazně menší snížení tření. Naopak u maziva Stabyl EOS E2 byly udržovány konzistentní hodnoty tření napříč podmínkami. Mazivo Lithium při kombinaci podmínek vykazovalo podobné trendy, jako mazivo Mobil 460, ale s velmi malým snížením součinitele tření.



Obr. 6-17 Vliv kombinace množství maziva a teploty

Pro finální porovnání všech testovaných maziv byly zvoleny podmínky, u kterých byly v porovnání vlivů dosaženy nejvyšší rozdíly mezi vzorky. Jednalo se o teplotu 25 °C a dávku maziva 20 µl. Hodnocení všech maziv proběhlo při zmíněných podmínkách a při skluzu 2 % a 5 %. Dosažené součinitele tření jsou poté znázorněny na Obr. 6-18. Nejnižších hodnot a podobných trendů u 2 % a 5 % skluzu dosáhla 3 maziva a to Mobil 460, Stabyl LX 460 a Mobil 681WT. Nejvyšší tření bylo v obou variantách skluzu zaznamenáno u maziva Kluberplex. Při 5 % skluzu byl zaznamenán velký nárůst tření i u maziva Stabyl EOS E2.



Obr. 6-18 Součinitel tření pro všechna maziva

Do následné multikriteriální analýzy metodou TOPSIS byly ze schopnosti třecích vlastností zahrnuty obě testované úrovně skluzu, tedy 2 % a 5 %, aby bylo možné posoudit, jak volba tohoto parametru ovlivní výsledek algoritmu. Součinitel tření byl v analýze klasifikován jako nákladové kritérium, neboť nižší hodnoty jsou z hlediska energetické účinnosti a provozní spolehlivosti ložisek jednoznačně preferovány.

6.3 Vyhodnocení multikriteriální analýzou

Za účelem multikriteriálního vyhodnocení výkonnosti testovaných plastických maziv byla aplikována metoda TOPSIS, která umožňuje porovnání jednotlivých maziv na základě jejich vzdálenosti od ideálního a neideálního řešení. V této části byl na konkrétní naměřené hodnoty jednotlivých schopností aplikován algoritmus popsáný v předběžném návrhu v kapitole 5.3. To zahrnovalo sepsání vstupních dat, normalizaci, přiřazení vah, výpočtu vzdáleností od ideálního a neideálního řešení a finálního vyhodnocení. Výsledkem bylo objektivní porovnání maziv z hlediska jejich komplexní výkonnosti ve všech sledovaných schopnostech.

Vstupní data

Veškerá vstupní data byla shromážděna v tabulce (viz Tab. 6-3), kde je každé testované mazivo reprezentováno sadou hodnot odpovídajících jednotlivým hodnoceným schopnostem. Pro každý parametr bylo určeno, zda se jedná o benefitní kritérium (vyšší hodnota je výhodnější), nebo nákladové kritérium (nižší hodnota je výhodnější). Tato klasifikace je nezbytná pro správné provedení následné normalizace a určení ideálního a neideálního řešení v rámci algoritmu TOPSIS.

Tab. 6-3 Vstupní data do TOPSIS analýzy

	Mobil 460	Mobil 681WT	Kluberplex BEM 41-141	Stabyl EOS E2	Lithium	Stabyl LX 460
Tloušťka mazacího filmu [nm]	580	419	187	343	113	431
Stabilita bleedingu [%]	11,24	0,34	21,85	0,61	7,55	8,11
Ochrana před opotřebením [μm^3]	544100	957100	696000	4521000	8762000	1069000
Nízké třecí vlastnosti [-]	0,0515	0,0518	0,0796	0,0697	0,0712	0,0504

Normalizace

Následně byla všechna vstupní data podrobena vektorové normalizaci dle vztahu (5-2), která zajistila jejich převedení na bezrozměrnou formu v rozsahu 0 až 1. Tím bylo umožněno přímé porovnání hodnot mezi jednotlivými schopnostmi s rozdílnými jednotkami. Výsledná normalizovaná data jsou uvedena v Tab. 6-4. Každá hodnota zde představuje relativní výkonnost konkrétního maziva ve vztahu k dané schopnosti, přičemž vyšší číslo značí příznivější výsledek u benefitního kritéria a méně příznivý výsledek u kritéria nákladového.

Tab. 6-4 Normalizovaná data

	Mobil 460	Mobil 681WT	Kluberplex BEM 41-141	Stabyl EOS E2	Lithium	Stabyl LX 460
Tloušťka mazacího filmu [nm]	0,625	0,451	0,201	0,369	0,122	0,464
Stabilita bleedingu [%]	0,417	0,013	0,810	0,023	0,280	0,301
Ochrana před opotřebením [μm^3]	0,055	0,097	0,070	0,430	0,887	0,108
Nízké třecí vlastnosti [-]	0,331	0,333	0,512	0,449	0,458	0,324

Váhy kritérií

Stanovení vah jednotlivých kritérií je klíčovým krokem metody TOPSIS, neboť zásadním způsobem ovlivňuje výsledné pořadí hodnocených variant. V této práci byly zvoleny tři různé varianty vah, které reflektují různé přístupy – od doporučení uváděných v literatuře, přes založení vah na poruchovosti až po statisticky založenou korekci rozptylu výsledků.

První varianta A je inspirována literaturou, zejména publikace od Lugta Grease lubrication od rolling bearings [8]. Ta zdůrazňuje význam mazacího filmu společně se stabilním uvolňováním oleje jako klíčového mechanismu pro správnou funkci maziva. Na základě těchto poznatků byly nejvyšší váhy přiřazeny zmíněným schopnostem, tedy tloušťce mazacího filmu a bleedingu. Naproti tomu schopnosti související s ochranou proti opotřebením a snižováním tření byly v této variantě hodnoceny jako méně významné.

Druhá varianta B byla navržena s důrazem na chování maziva v náročnějších podmínkách smíšeného režimu, kde nemusí vznikat stabilní tloušťka filmu. Jako klíčové byly navrženy schopnosti omezovat opotřebením a udržovat nízký součinitel tření. Naopak tvorba mazacího filmu a bleeding jsou v této variantě považovány za podpůrné faktory – důležité pro vznik mazání, ale méně rozhodující při jeho narušení. Váhy tak reflektují především schopnost maziva chránit kontaktní plochy i v podmínkách mimo spolehlivé mazání.

Varianta C je zaměřena na rovnost všech schopností a poslední varianta D vychází z myšlenky, že kritéria s nižší variabilitou poskytují spolehlivější podklady pro hodnocení. Váhy byly určeny na základě směrodatných odchylek σ_j z normalizovaných dat – čím menší rozptyl, tím vyšší váha. Tento přístup zohledňuje stabilitu jednotlivých parametrů a omezuje vliv extrémně rozkolísaných hodnot na výsledek analýzy. Přehled jednotlivých vah je uveden v Tab. 6-5. Tyto varianty byly následně použity pro porovnání výsledků metody TOPSIS a posouzení citlivosti výběru nejlepšího maziva na zvolené váhy schopností.

Tab. 6-5 Váhy schopností

	Varianta A Literatura	Varianta B Poruchovost	Varianta C Rovnost	Varianta D Korekce
Tloušťka mazacího filmu	35 %	25 %	100 %	$\sigma_j = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (r_{ij} - \bar{r}_j)^2}$ $v_k = \frac{1}{\sigma_j}$ $w_k = \frac{v_k}{\sqrt{\sum_{k=1}^m v_k}}$
Stabilita bleedingu	25 %	20 %	100 %	
Ochrana před opotřebením	20 %	30 %	100 %	
Nízké třecí vlastnosti	20 %	25 %	100 %	

Jako první byly pro vyhodnocení funkce algoritmu zvoleny váhy varianty A, tedy dle literatury. Vliv ostatních variant vah bude detailněji zhodnocen v následující kapitole 6.4. Normalizovaná data z výsledků schopností, byla poté vynásobena vahami dle vztahu (5-3) a výsledné hodnoty jsou zapsány v následující Tab. 6-6.

Tab. 6-6 Normalizované vážené hodnoty pro variantu A

	Mobil 460	Mobil 681WT	Kluberplex BEM 41-141	Stabyl EOS E2	Lithium	Stabyl LX 460
Tloušťka mazacího filmu [nm]	0,217	0,158	0,070	0,129	0,043	0,162
Stabilita bleedingu [%]	0,104	0,003	0,203	0,006	0,070	0,075
Ochrana před opotřebením [μm^3]	0,011	0,019	0,014	0,086	0,177	0,022
Nízké třecí vlastnosti [-]	0,066	0,067	0,103	0,089	0,092	0,065

Identifikace ideálního a neideálního řešení

Identifikace ideálního a neideálního řešení vychází z vážené normalizované matice, která slouží jako základ pro srovnání jednotlivých alternativ v rámci metody TOPSIS. V každém kritériu je určena nejlepší a nejhorší možná hodnota – tzv. ideální a neideální řešení. Pro benefitní kritéria, u nichž je žádoucí co nejvyšší hodnota (tloušťka mazacího filmu), je ideálním řešením maximum a neideálním minimum. Naopak u nákladových kritérií, kde je preferována nižší hodnota (bleeding, součinitel tření a opotřebení), je za ideální považována minimální a za neideální maximální hodnota. Tento krok tedy odráží charakter jednotlivých schopností a umožňuje stanovit teoretické referenční body pro následné výpočty vzdáleností a relativní blízkosti každé varianty. Identifikace je poté provedena v každé schopnosti, kdy je sepsáno pole ideálních V_j^+ a neideálních řešení V_j^- (Tab. 6-7).

Tab. 6-7 Výběr ideálního a neideálního řešení

	V_j^+		V_j^-	
Tloušťka mazacího filmu [nm]	$\max(v_{tloustka})$	0,217	$\min(v_{tloustka})$	0,043
Stabilita bleedingu [%]	$\min(v_{bleeding})$	0,003	$\max(v_{bleeding})$	0,203
Ochrana před opotřebením [μm^3]	$\min(v_{opotrebeni})$	0,019	$\max(v_{opotrebeni})$	0,177
Nízké třecí vlastnosti [-]	$\min(v_{treni})$	0,065	$\max(v_{treni})$	0,092

Výpočet koeficientů ideálního a neideálního řešení

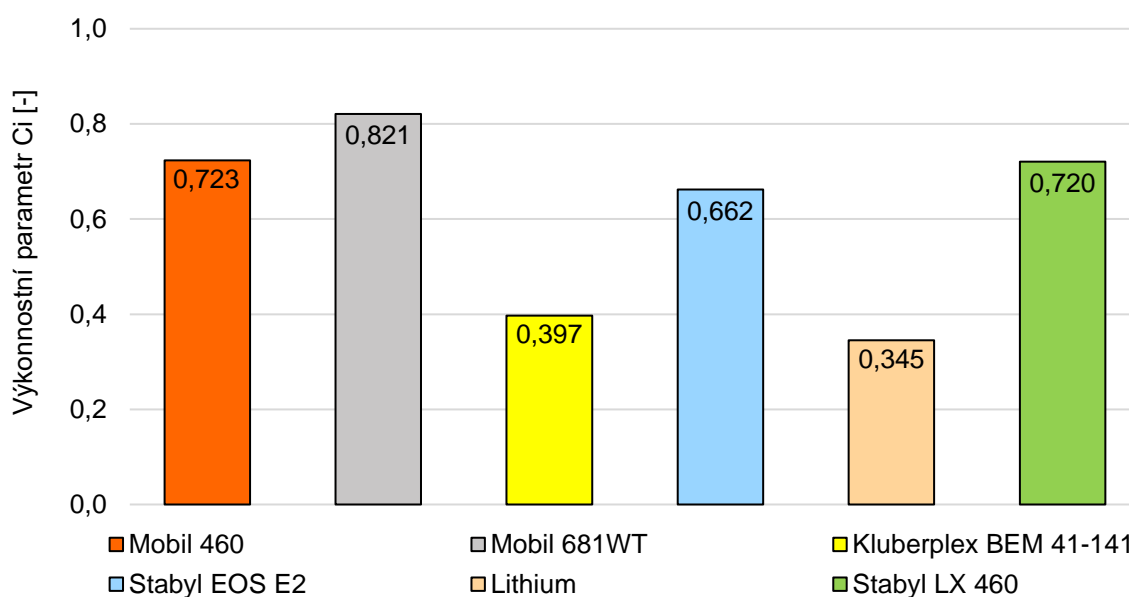
Koeficienty vzdáleností od ideálního a neideálního řešení byly stanoveny na základě dříve definovaných hodnot jednotlivých schopností, kdy k výpočtu byly využity vztahy 5-6 a 5-7. Pro každé testované mazivo byla pomocí Eukleidovské metriky vypočtena vzdálenost k ideálnímu řešení S_i^+ , která vyjadřuje, jak daleko se daný vzorek nachází od teoreticky nejvýhodnější kombinace vlastností. Zároveň byla určena i vzdálenost k neideálnímu řešení S_i^- , které představuje nejméně příznivou variantu z pohledu všech sledovaných schopností. Výsledné hodnoty těchto vzdáleností, které jsou klíčovým vstupem pro výpočet relativní blízkosti k ideálu, jsou uvedeny v Tab. 6-8.

Tab. 6-8 Koeficienty vzdálenosti od ideálního a neideálního řešení

	Mobil 460	Mobil 681WT	Klubplex BEM 41-141	Stabyl EOS E2	Lithium	Stabyl LX 460
S_i^+	0,101	0,061	0,251	0,119	0,253	0,092
S_i^-	0,264	0,282	0,166	0,234	0,133	0,237

Výpočet výkonnostního parametru

Pro každé testované mazivo byl na základě dříve vypočtených vzdáleností od ideálního a neideálního řešení stanoven výkonnostní parametr C_i . Tento parametr představuje míru blízkosti k ideálnímu řešení a slouží jako souhrnné vyjádření celkové výkonnosti jednotlivých maziv z hlediska všech hodnocených schopností. Vyšší hodnota C_i značí lepší výkonnost maziva v rámci multikriteriálního hodnocení. Výpočet hodnot C_i byl proveden podle vztahu uvedeného v kapitole 5.3 dle vztahu (5–8) a výsledky pro všechna maziva jsou shrnuty v grafu na Obr. 6-19.



Obr. 6-19 Graf výsledných hodnot výkonnostních parametrů maziv

Z grafu je patrné, že nejvyšší hodnoty výkonnostního parametru C_i dosáhlo mazivo Mobil 681WT, což svědčí o jeho nejvýhodnější kombinaci sledovaných schopností v rámci hodnocení. Na druhém místě se umístilo mazivo Mobil 460, těsně následované mazivem Stabyl LX 460. Naopak nejnižších hodnot dosáhla maziva Lithium a Klubplex BEM 41-141, což naznačuje jejich méně příznivé vlastnosti z pohledu všech hodnocených kritérií. Celkové pořadí tedy ukazuje na výrazné rozdíly mezi jednotlivými vzorky při komplexním porovnání plastických maziv.

6.4 Analýza vlivů na vyhodnocení multikriteriální analýzou

V této části je analyzován vliv vybraných faktorů na výsledky multikriteriální analýzy metodou TOPSIS. Cílem je ověřit, jak změna vah jednotlivých kritérií a variabilita vstupních dat ovlivňuje stabilitu a spolehlivost celkového hodnocení testovaných plastických maziv. Prováděné analýzy umožní posoudit robustnost navržené metodiky a identifikovat citlivost výsledků. Výsledky této části slouží k validaci použitého přístupu a zvýšení důvěryhodnosti vyhodnocení.

6.4.1 Vliv změny vah kritérií

Pro analýzu vlivu změny vah kritérií byly využity varianty definované v podkapitole Váhy kritérií (viz Tab. 6-5). Každá z těchto variant reflektuje odlišný přístup k hodnocení důležitosti jednotlivých schopností maziv, a tedy i různé priority při multikriteriálním rozhodování. V této části práce je cílem posoudit, jak změna vah ovlivní výsledné pořadí hodnocených maziv a zda lze identifikovat varianty s vyšší robustností vůči změně vah.

Varianty A, B a C

Pro varianty A, B a C bylo hodnocení provedeno podle metodiky popsané v kapitole 6.3. Rozdíl mezi jednotlivými variantami spočíval pouze ve zvolených vahách jednotlivých kritérií, které odrážely odlišné přístupy k hodnocení důležitosti schopností maziv. Všechna vstupní data byla nejprve normalizována, následně pronásobena vahami podle dané varianty a dále zpracovány výpočtem vzdáleností od ideálního a neideálního řešení. Na základě těchto vzdáleností byly určeny výsledné výkonnostní parametry C_i , jejichž hodnota reprezentuje relativní výkonnost jednotlivých maziv v rámci dané varianty. Výsledné hodnoty jsou znázorněny v grafu na Obr. 6-20.

Varianta D

Na rozdíl od předchozích, kde byla aplikována metodika založená na předem stanovených vahách, byla u varianty C zvolena odlišná strategie určování vah kritérií. Tento přístup vycházel z analýzy variability jednotlivých schopností na základě jejich normalizovaných hodnot. Cílem bylo zohlednit v rozdělení vah také rozptyl experimentálních dat, a tím zvýšit robustnost a objektivitu výsledného hodnocení. Dále byl popsán upravený postup výpočtu a zhodnocení jeho vlivu na výsledky analýzy.

Algoritmus této varianty byl velmi podobný jako u předchozích variant. Vstupní data byla opět nejprve normalizována a převedena na bezrozměrné hodnoty. Následně však došlo k aplikaci odlišného způsobu stanovení vah kritérií na základě variability dat. Konkrétně byla pro každou schopnost vypočtena směrodatná odchylka σ_j podle vztahu (6-3), která vyjadřuje rozptyl normalizovaných hodnot dané schopnosti.

$$\sigma_j = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (r_{ij} - \bar{r}_j)^2} \quad (6-3)$$

Kde r_{ij} jsou výsledky i -tého maziva v j -té schopnosti a \bar{r}_j je aritmetický průměr hodnot v dané schopnosti. Následně byla pro každou schopnost určena inverzní hodnota variability v_k podle vztahu (6-4), kdy menší rozptyl (vyšší stabilita výsledků) znamená vyšší váhu.

$$v_k = \frac{1}{\sigma_j} \quad (6-4)$$

Na závěr byly všechny inverzní hodnoty normalizovány tak, aby jejich součet byl roven jedné, což mohlo být dále převedeno na procenta vah. Výpočet byl proveden podle vztahu (6-5).

$$w_k = \frac{v_k}{\sqrt{\sum_{k=1}^m v_k}} \quad (6-5)$$

Pro výpočet vah založených na variabilitě dat byla využita normalizovaná vstupní data uvedená v Tab. 6-4. Na tyto hodnoty byly následně aplikovány vztahy (6-3) až (6-5), pomocí kterých byly pro každou hodnocenou schopnost spočítány směrodatné odchylky, inverzní hodnoty a konečné normalizované váhy. Výsledné hodnoty vah jsou shrnuty v Tab. 6-9.

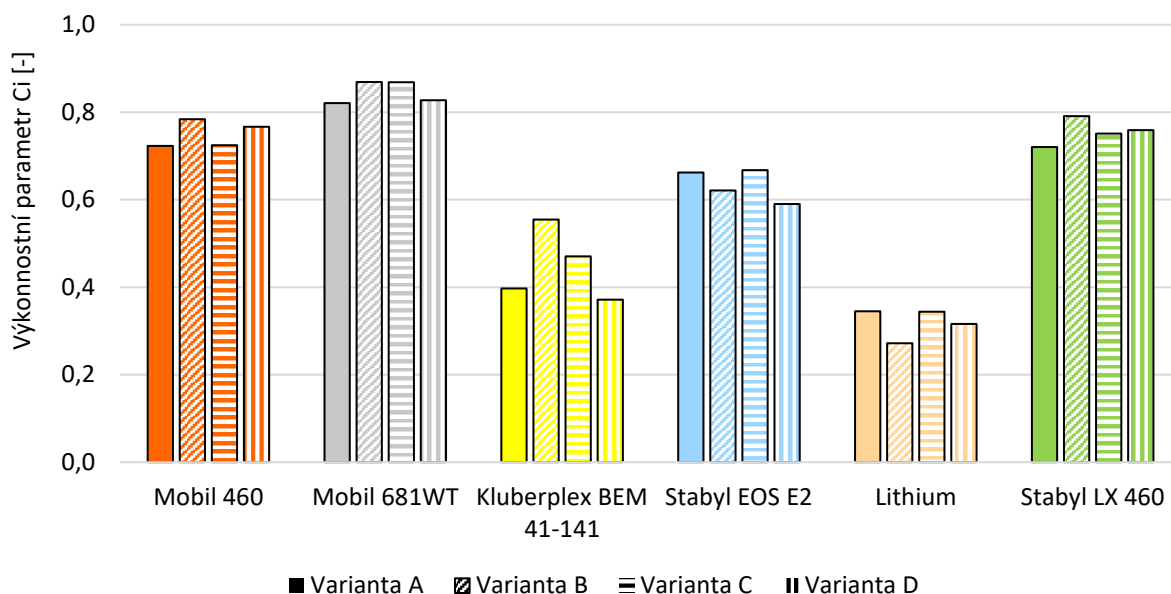
Tab. 6-9 Normalizované váhy varianty D

Varianta D Korekce	
Tloušťka mazacího filmu	22 %
Stabilita bleedingu	14 %
Ochrana před opotřebením	13 %
Nízké třecí vlastnosti	51 %

Z výsledků uvedených v Tab. 6-9 vyplývá, že nejvyšší váha byla přiřazena nízkým třecím vlastnostem (51 %), což odráží jejich nejnižší rozptyl v souboru dat, a tedy vyšší stabilitu tohoto kritéria. Naopak nejnižší váhu získala schopnost ochrany proti opotřebením (13 %), která vykazovala nejvyšší variabilitu mezi jednotlivými mazivy.

Na základě vypočtených vah prezentovaných v Tab. 6-9 byla vstupní normalizovaná data následně pronásobena těmito váhami. Další postup byl již analogický jako u předchozích variant – bylo provedeno stanovení ideálního a neideálního řešení, výpočet vzdáleností jednotlivých maziv od těchto referenčních hodnot a následné určení výkonnostního parametru C_i .

Výsledné hodnoty výkonnostního parametru C_i ze všech hodnocených variant vah (A, B, C i D) byly přehledně znázorněny v grafu na Obr. 6-20, který umožňuje porovnat jejich vliv na finální pořadí jednotlivých maziv.



Obr. 6-20 Porovnání vlivu vah na výkonnostní parametr

Při porovnání výsledků variant bylo zjištěno, že změna vah kritérií měla na výkonnostní parametr C_i určitý vliv, avšak celkové pořadí maziv zůstalo stabilní. Nejvyšší výkonnost opakovaně vykazovalo mazivo Mobil 681WT, zatímco nejnižší hodnoty dosahovalo mazivo Lithium, bez ohledu na použitou variantu vah. Největší změny hodnot C_i byly zaznamenány u maziva Klüberplex BEM 41-141, jehož hodnocení bylo citlivější na úpravu vah, zejména v důsledku nízké stability bleedingu a vyšší variability výsledků ochrany proti opotřebení. To vedlo k většímu propadu jeho hodnocení při variantách, které více zohledňovaly tyto vlastnosti. Ostatní maziva vykazovala pouze minimální změny, což potvrzuje robustnost navržené metodiky i při různých přístupech k nastavení vah. Tato rozdílná citlivost jednotlivých maziv na změnu vah kritérií úzce souvisí s jejich výsledky. Maziva s vyrovnanými výsledky napříč všemi schopnostmi se projevila jako méně závislá na konkrétní váze jednotlivých kritérií, a jejich pozice v pořadí tak zůstávala víceméně stabilní. Naopak maziva s výraznými extrémy – například velmi dobrými výsledky v jedné schopnosti a slabými v jiné – reagovala na změnu vah citlivěji. Právě tato nerovnoměrnost ve výsledcích je hlavním faktorem, který způsobuje větší rozptyl v jednotlivých variantách a ukazuje na význam správného nastavení vah podle konkrétních priorit.

6.4.2 Vliv změny vstupních dat

Za účelem ověření metodiky bylo cílem této části práce posoudit, jak navržený způsob hodnocení reaguje na změnu vstupních dat při zachování vah a výpočetního postupu. Analýza slouží k vyhodnocení, zda metoda TOPSIS vykazuje dostatečnou stabilitu a zda zůstávají výsledky smysluplné a metodicky správné i při úpravě vstupních hodnot v rámci reálně uvažovaných provozních podmínek. Tento přístup reflektuje skutečnost, že provozní podmínky hlavních ložisek větrných turbín se mohou lišit v závislosti na konstrukci, lokalitě nebo způsobu zatěžování. Proměnné jako teplota, skluz či kontaktní tlak tak mohou v reálném provozu nabývat odlišných hodnot. Cílem této části je proto ověřit, zda navržený způsob hodnocení zůstává spolehlivý i při aplikaci vstupních dat odpovídajících jiným, ale stále realistickým provozním režimům.

Vstupní data

Varianta A vychází ze stejné sady vstupních dat, která byla již hodnocena v rámci reprezentativních provozních podmínek uvedených v předchozích kapitole 6.3. Pro účely srovnání byla vytvořena varianta B, v níž byly některé hodnoty nahrazeny výsledky měření za odlišných testovacích podmínek. Hodnoty byly zachovány pouze u bleedingu, jelikož v rámci práce nebyly u této metody testovány vlivy jiných podmínek. Tabulka Tab. 6-10 shrnuje použité testovací podmínky pro jednotlivé schopnosti v obou variantách.

Tab. 6-10 Porovnání podmínek variant A a B

	Varianta A	Varianta B
Tloušťka mazacího filmu	Rychlost 300 mm/s Kontaktní tlak 1GPa Teplota 50 °C	Rychlost 300 mm/s Kontaktní tlak 1GPa Teplota 25 °C
Stabilita bleedingu	30g maziva na sítku 120 hodin separace při 80 °C	
Ochrana před opotřebením	Kontaktní tlak 2,8 GPa Dráha 4 mm Frekvence 10 Hz samovolné zahřívání	Kontaktní tlak 2,8 GPa Dráha 4 mm Frekvence 10 Hz Teplota 80 °C
Nízké třecí vlastnosti	Kontaktní tlak 1GPa Rychlost 300 mm/s Teplota 25 °C 20 µl maziva SRR 2 %	Kontaktní tlak 1GPa Rychlost 300 mm/s Teplota 25 °C 20 µl maziva SRR 5 %

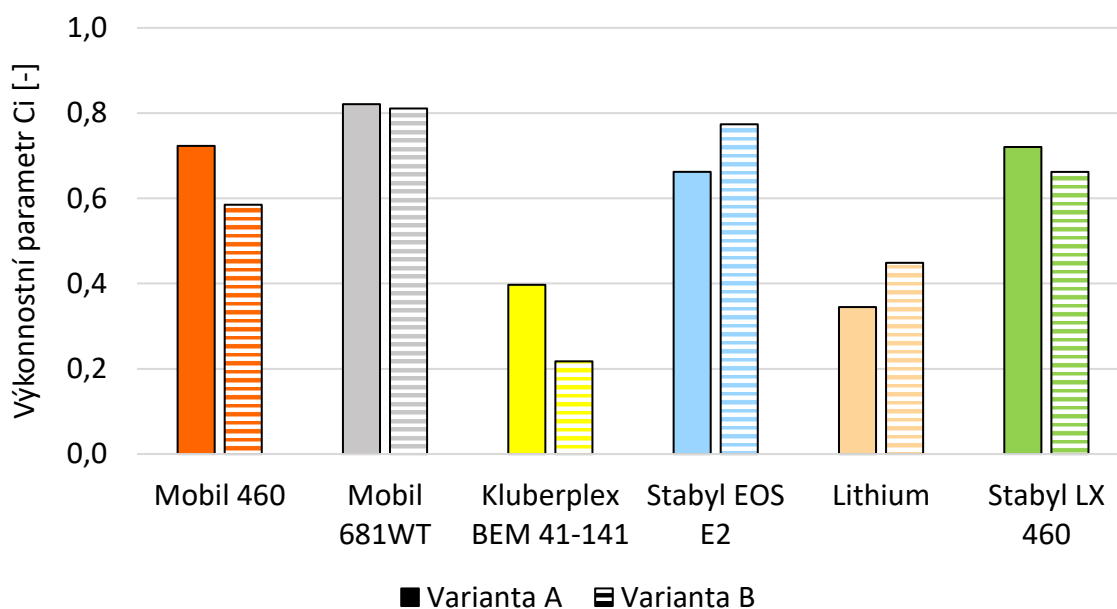
Jako výchozí vstupní data pro multikriteriální hodnocení byla zvolena již využitá sada výsledků. Ty jsou dále označeny jako varianta A a jsou uvedeny v Tab. 6-3. Pro účely porovnání a ověření vlivu změny vstupních dat byla vytvořena alternativní varianta B, která vychází z jiných hodnot schopností maziv. Přehled dat varianty B je uveden v Tab. 6-11.

Tab. 6-11 Vstupní data varianty B

	Mobil 460	Mobil 681WT	Kluberplex BEM 41-141	Stabyl EOS E2	Lithium	Stabyl LX 460
Tloušťka mazacího filmu [nm]	856	745	259	707	235	807
Stabilita bleedingu [%]	11,24	0,34	21,85	0,61	7,55	8,11
Ochrana před opotřebením [μm^3]	16756000	13633000	5513000	13044000	15365000	15239000
Nízké třecí vlastnosti [-]	0,0652	0,0653	0,0961	0,0970	0,0856	0,0630

Vyhodnocení

Pro porovnání vlivu změny vstupních dat byly obě varianty (A a B) zpracovány shodným způsobem pomocí metody TOPSIS. Byla zachována identická struktura výpočtu i váhové koeficienty jednotlivých schopností maziv, které byly určeny již v předchozích částech práce. Stejný výpočetní algoritmus tak umožňuje objektivní porovnání toho, jak se změna vstupních hodnot promítá do výsledného hodnocení jednotlivých vzorků. Graf na následujícím obrázku (Obr. 6-21) znázorňuje výsledné hodnoty parametru C_i pro každé mazivo při použití dat z varianty A a varianty B.



Obr. 6-21 Porovnání výkonnostního parametru při změně vstupních dat

Z výsledků je patrné, že u většiny maziv došlo ke změně výstupní hodnoty C_i , což odpovídá rozdílným vstupním datům v jednotlivých variantách. Největší změnu lze pozorovat u maziv Mobil 460 a Klüberplex BEM 41-141, kde došlo k výraznému poklesu u varianty B. To bylo způsobeno zhoršením některých schopností především tloušťky mazacího filmu a opotřebením. Oproti tomu mazivo Stabyl EOS E2 si ve variantě B vedlo lépe, což odpovídá jeho výhodnějšímu výkonu při méně zatěžujících podmínkách.

Naopak maziva Mobil 681WT a Stabyl LX 460 vykazovala minimální změnu výstupních hodnot, což lze interpretovat jako stabilní výkonnost napříč různými režimy testování. Tato vlastnost je z pohledu technické praxe velmi cenná, neboť ukazuje na univerzálnost daného maziva. Také Lithium zaznamenalo mírné zlepšení výsledku, především díky lepšímu výkonu při nízkém zatížení v kombinaci s nižší provozní teplotou.

Celkově metodika TOPSIS vykazuje očekávanou míru citlivosti na změnu vstupních hodnot – varianta B vedla k odlišným výsledkům tam, kde bylo reálně změněno chování testovaných schopností. Zároveň ale nedošlo k žádným nelogickým přeskokům v pořadí či výkyvům, což potvrzuje, že metodika zachovává stabilitu i při změně vstupních dat.

7 DISKUSE

7.1 Experimentální část metodiky

Experimentální část byla navržena s cílem zachytit klíčové výkonnostní schopnosti plastických maziv v oddělených testech. Výběr čtyř testovaných schopností vycházel z jejich klíčové role při mazání hlavního ložiska větrné turbíny. Tloušťka filmu byla zvolena jako základní ukazatel separace povrchů a schopnosti přenášet zatížení v režimu EHD mazání. Bleeding byl zahrnut kvůli jeho vlivu na dodávku oleje do kontaktu ze struktury zahušťovadla, což je zásadní u dlouhodobého provozu. Součinitel tření odráží vliv třecího momentu v ložisku a ovlivňuje také provozní teplotu. Opotřebení pak charakterizuje schopnost chránit povrchy při smíšeném kontaktu, což je běžné při nízkých rychlostech a neideálních podmínkách.

Lugt [8] uvádí, že spolehlivost plastických maziv závisí právě na těchto dílčích schopnostech, které ale podléhají různým mechanismům, a jejich oddělené hodnocení proto umožňuje podrobnější pochopení dílčích vlastností maziva. Na druhou stranu však nelze přehlédnout, že v reálném provozu tyto schopnosti vzájemně interagují. Zvolený přístup tedy nevystihuje plně komplexní provozní chování, ale poskytuje validní základ pro multikriteriální porovnání, zejména při využití metod, jako je TOPSIS, kde lze s těmito rozdílnými charakteristikami dále pracovat.

Tloušťka mazacího filmu

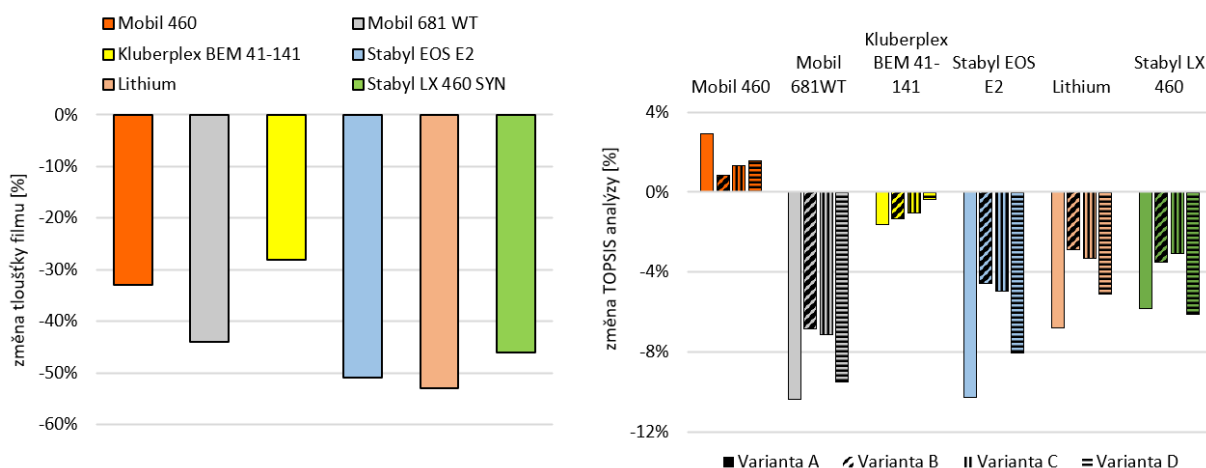
Tloušťka filmu je klíčová schopnost pro oddělení povrchů a ochranu proti mikropittingu, jak uvádí Hart [6]. V ložiskách větrných turbín je schopnost udržet dostatečný mazací film rozhodující pro životnost komponent, neboť nedostatečný film obvykle signalizuje přechod do smíšeného až mezného režimu mazání. To vede ke kolapsu filmu, vyššímu opotřebení třecích ploch a následné poruše. Experimentální ověření této schopnosti je proto podstatné z hlediska predikce výkonnosti maziva.

Testování probíhalo za plně zaplavených podmínek, které byly zvoleny záměrně s cílem vyloučit vliv hladovění a umožnit porovnání schopnosti jednotlivých maziv vytvářet mazací film. Tento přístup poskytl lepší opakovatelnost, protože mazivo bylo usměrnováno do kontaktu pomocí stěrky, což umožnilo sledovat přímý vliv maziva na vznik filmu bez nežádoucích vlivů. Z hlediska provozu vlivem nízkých otáček v hlavních ložiskách větrných turbín vznikají tyto podmínky, případně podmínky blízké plně zaplavenému stavu. Je však třeba dodat, že v dlouhodobém provozu může postupně docházet ke vzniku stavů s omezeným zásobením, tedy hladovění, jak upozorňuje i McGuire [3]. Výsledky testu jsou tedy poskytují porovnání schopnosti maziv vytvářet mazací film v ideálním stavu.

Výsledky jasně ukázaly, že s rostoucím zatížením a teplotou dochází k poklesu tloušťky filmu, což odpovídá obecné teorii elastohydrodynamického mazání. Nejvyšší hodnoty dosahovala maziva Mobil 460 a Mobil 681WT, zatímco Lithium a Klüberplex měly výrazně nižší schopnost tvorby filmu. Tento trend potvrzuje i Morales-Espejel et al. [21], kteří uvádějí, že při vyšších rychlostech a teplotách se dominantní složkou filmu stává základový olej a syntetický olej pak poskytuje vyšší stabilitu. Zajímavým zjištěním je, že samotná viskozita základového oleje není vždy rozhodující. Mazivo Mobil 681WT s nejvyšší viskozitou nedosáhlo nejvyšší tloušťky filmu. To potvrzuje i studie Gonçalves [18], kde byla zdůrazněna role zahušťovadla a jeho interakcí a poměrem se základovým olejem. V rámci detailního návrhu tak bylo zřejmé, že stabilitu filmu ovlivňuje celkové složení a nikoli pouze jeden dominantní faktor.

Ve výsledcích se navíc výrazně potvrdil vliv teploty na schopnost tvorby mazacího filmu. Vyšší teplota (50 °C) vedla u většiny maziv k poklesu tloušťky filmu v porovnání s hodnotami při 25 °C, což odpovídá teoretickému očekávání danému snížením viskozity základového oleje. Tento trend potvrzují i závěry Morales-Espejela et al. [21], podle nichž vyšší provozní teplota vede ke snížení mazacího filmu, a tím ke snížení jeho stability. Z experimentálních dat v grafu na Obr. 6-4 bylo zřejmé, že při zvýšené teplotě byl pokles filmu výrazný zejména u maziv Mobil 460 a Mobil 681WT, zatímco Lithium vykazovalo nižší tloušťku v obou teplotních úrovních, což poukazuje na rozdílné schopnosti maziv reagovat na zvýšenou teplotu.

Doplňující analýza ukázala, že změna pouze tloušťky mazacího filmu, měla na výsledné hodnocení TOPSIS omezený dopad, jak ukazuje Obr. 7-1. Pokles tloušťky filmu o 30–50 % vedl ke změně hodnot výkonnostního parametru nejvíce ve variantách A a D, kde měla tloušťka filmu vyšší váhu. Ani tam však změna nepřesáhla –10 %, protože v kombinaci s ostatními nezměněnými schopnostmi nedošlo k zásadnímu přepočtu vzdáleností k ideálnímu a negativnímu řešení. Zároveň tloušťka filmu nedosahovala extrémní změny a rozdíly, tudíž byl její vliv na celkový parametr. Mobil 460 jako jediné mazivo zaznamenalo nárůst hodnoty C_i , přestože i u něj došlo k poklesu tloušťky filmu. Jeho propad byl ale menší než u ostatních a zároveň si udrželo vhodnou kombinaci ostatních schopností, což vedlo ke zlepšení jeho relativní pozice v hodnocení. Výsledky potvrzují, že metoda TOPSIS je vůči izolované změně parametru tloušťky filmu stabilní.



Obr. 7-1 Graf relativního poklesu tloušťky filmu při nárůstu teploty (vlevo), Graf změny výkonnostního parametru Ci (vpravo)

Bleeding a jeho udržitelnost

Test bleedingu ukázal výrazné rozdíly mezi stabilitou jednotlivých maziv při mechanické degradaci. Nejnižší změnu bleedingu vykazovala maziva STABYL EOS E2 a Mobil 681WT, což naznačuje jejich vysokou strukturální stabilitu. Kombinace jejich složení pravděpodobně umožňuje kontrolované uvolňování oleje i po smykovém zatížení, jak popisuje i Lugt [10], který zdůrazňuje význam rovnováhy mezi strukturální stabilitou a schopností uvolňování oleje. Naopak u maziva Klüberplex byl pozorován prudký nárůst bleedingu po degradaci, což lze přičíst výrazně nestabilní struktuře nebo také potenciální kombinaci s nižší viskozitou minerálního základového oleje.

Zároveň je však třeba dodat, že samotný typ zahušťovadla nevysvětluje pozorované rozdíly, jak ukazuje i případ Mobilu 681WT a Klüberplex, obě maziva se zahušťovadlem lithium complex, ale zásadně rozdílným chováním. To naznačuje, že klíčovou roli hraje nejen zahušťovadlo, ale i vzájemná interakce a poměr s olejem, jak upozorňuje např. Peng [17]. Vzhledem k podobné klasifikaci zahušťovadel je tak pravděpodobné, že stabilita je výsledkem provázaného vlivu struktury, viskozity a vzájemného působení molekulárních sil, nikoli pouze jedné z těchto vlastností.

Oproti běžně doporučeným podmínkám při 40 °C byla v tomto testu použita také i teplota 80 °C, a to záměrně, aby došlo k výraznější separaci oleje a bylo možné lépe rozlišit maziva i při malém množství vzorku (30 g), které omezoval použitý grease worker dle Prokopa [45]. Zvolená teplota však spíše odpovídá limitním provozním hodnotám a nekoresponduje zcela s běžným chodem hlavních ložisek, kde bývá teplota nižší. Z tohoto důvodu nelze výsledky přímo srovnávat s doporučenou ideální hodnotou 1–3 % při 40 °C uváděnou Lugtem studií [8], protože ta vychází z odlišného nastavení testu. Výsledky ukázaly, že většina maziv dosahuje hodnot nad uvedený limit, což lze přičíst vyšší teplotě, která významně ovlivňuje separaci.

Novým přístupem této práce bylo sledování relativní změny bleedingu mezi čerstvým a degradovaným stavem, která odhaluje schopnost maziva udržet vazbu se základovým olejem i po smykovém namáhání. Zvolený statický přístup se ukázal jako jednoduchý, reprodukovatelný a zároveň reprezentativní pro podmínky hlavních ložisek, kde se mazivo často nachází v klidu nebo pohybu s velmi nízkou rychlostí.

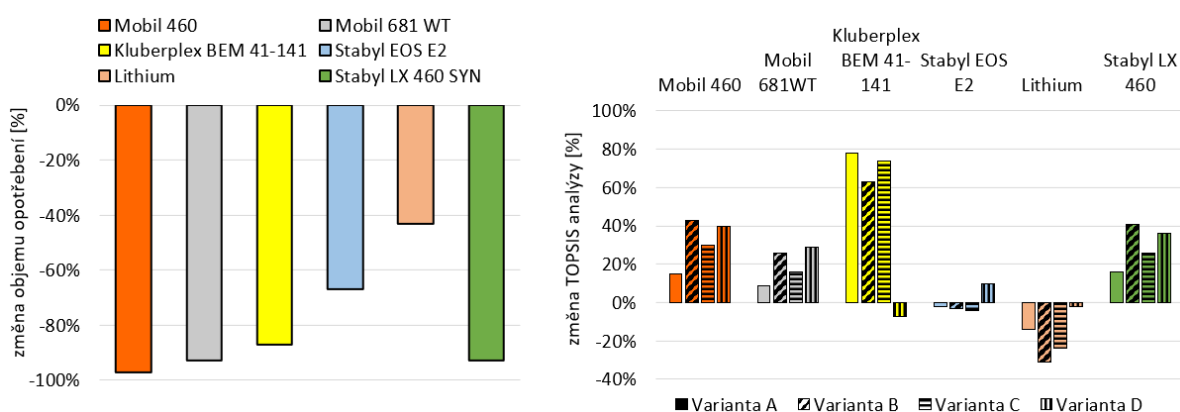
U schopnosti bleedingu nebyla provedena změna vstupních dat, neboť byla uvažována pouze jedna sada výsledků z měření a výsledky nebyly závislé na změně testovacích podmínek. Přesto měl bleeding vliv na hodnocení, a to kvůli tomu, že mezi mazivy byly v tomto parametru největší rozdíly. Ty se projeví ve všech váhových variantách. Ve variantě D byl ale tento vliv výrazně nižší, protože bleeding měl nejmenší váhu, právě kvůli vysoké variabilitě vstupních hodnot. I bez změny dat tedy bleeding ovlivnil výsledky, ale jeho dopad závisel hlavně na nastavení vah a kombinaci s dalšími výsledky maziv.

Schopnost maziva chránit povrchy před opotřebením

Test opotřebením probíhal ve dvou režimech s cílem ověřit účinnost aditiv při různých teplotních podmínkách. První varianta využívala pouze samovolné zahřívání třením a ukázala, že bez dostatečné teploty vykazují všechna maziva vyšší míru opotřebením. Druhá varianta s aktivním vyhříváním na 80 °C měla zajistit a prokázat nutnost aktivace aditiv vlivem vyšší teploty. Výsledky ukázaly, že při této teplotě dochází u většiny maziv k výraznému snížení opotřebením, což potvrzuje závěry Zhanga [30], že ochranný účinek aditiv se naplno projevuje až po dosažení určité tepelné hodnoty. Ukázalo se, že v druhé variantě byl nutný výrazně delší čas, aby bylo možné opotřebením u některých maziv kvantifikovat. Kombinace obou režimů tak poskytla cenný pohled na teplotní citlivost a funkčnost aditiv. Přestože oba režimy představují zjednodušené laboratorní podmínky, přinesly srovnatelná a metodicky dobře interpretovatelná data.

Nejnižší míru opotřebením zaznamenala maziva Mobil 460 a Klüberplex, což ukazuje na dobrou funkci jejich aditiv při zvýšené teplotě i v delším čase. Naopak lithium mazivo, které aditiva neobsahuje, vykazovalo výrazně vyšší opotřebením, což odpovídá poznatkům Penga [4], kdy absence EP/AW aditiv vede ke zvýšenému poškození povrchu. Odlišné chování prokázalo mazivo STABYL EOS E2, které navzdory přítomnosti aditiv vykazovalo vyšší opotřebením než ostatní maziva. Jedním z možných vysvětlení je použití jednoduchého lithného zahušťovadla, jehož struktura může podle Lugta [8] omezovat migraci přísad do třetí zóny. Výsledná distribuce a aktivace aditiv tak zřejmě hraje stejně důležitou roli jako jejich samotná přítomnost ve složení.

V případě změny opotřebení byl dopad na hodnocení TOPSIS výrazně vyšší. Jak ukazuje Obr. 7-2, pokles objemu opotřebení o 40–90 % vlivem aktivace aditiv při vyšší teplotě, vedl k výraznému nárůstu hodnot C_i . Nejvíce pak ve variantě vah B, kde měla tato schopnost větší váhu. Nejvýrazněji se projevilo zlepšení u maziv Klüberplex BEM 41-141, Mobil 460 a Stabyl LX 460 SYN, která vykazovala nejen výrazný pokles opotřebení, ale zároveň si udržela příznivé hodnoty ostatních schopností. Naopak maziva Lithium a Stabyl EOS E2 nedokázala dostatečně snížit opotřebení a v kombinaci s dalšími schopnostmi zaznamenala snížení výkonnostního parametru. Metoda TOPSIS tak prokázala vysokou citlivost na výrazné zlepšení jednoho parametru v situaci, kdy je tento parametr váhově zvýrazněn a odlišen od konkurence. Zároveň však zůstává hodnocení stabilní i při velkém rozsahu změny.



Obr. 7-2 Graf relativního poklesu opotřebení při nárůstu teploty (vlevo), Graf změny výkonnostního parametru C_i (vpravo)

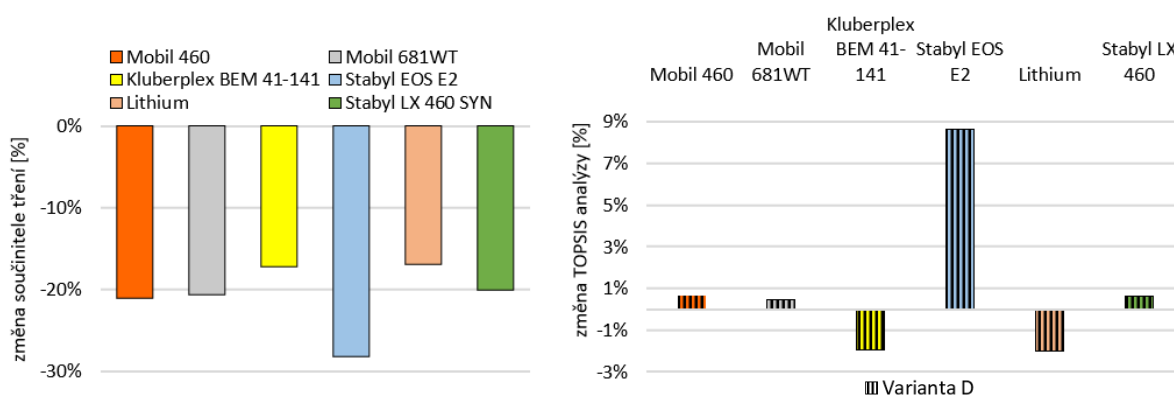
Nízké třecí vlastnosti

Třecí vlastnosti testovaných maziv byly výrazně ovlivněny změnou skluzu, teploty a dávky aplikovaného maziva. Se zvyšujícím se skluzem docházelo ke zvýšení součinitele tření, což odpovídá přechodu z elastohydrodynamického do smíšeného režimu mazání. Tento trend je v souladu se závěry Wanga [27], který pozoroval stejný vývoj u plastických maziv. Vliv teploty se ukázal být závislý na typu maziva, kdy např. u Mobilu 460 tření s rostoucí teplotou narůstalo, zatímco u maziv STABYL EOS E2 a Lithium došlo ke snížení. Tento rozdílný efekt teploty rovněž potvrzuje Wang, podle něhož maziva reagují různě v závislosti na svém složení. U většiny maziv přitom zvýšené množství maziva vedlo ke snížení tření, což odpovídá lepší separaci kontaktu.

Výsledky ukázaly, že nejvyšších hodnot součinitele tření dosahovala při 2 % skluzu maziva Klüberplex BEM 41-141 a Lithium. Tento trend koresponduje s doporučeními McGuira [7], který uvádí, že tření výrazně závisí na typu základového oleje. Dle jeho poznatků bylo potvrzeno, že maziva s minerálním základovým olejem poskytují vyšší hodnoty, a z pohledu tření je tedy výhodnější využívat maziva se syntetickým základovým olejem. Naopak nejnižšího součinitele tření dosahovala maziva Mobil 681WT a STABYL LX 460 SYN, která kombinují syntetický základový olej se zahušťovadlem typu lithium complex. Tento výsledek potvrzuje závěry McGuira [7], že maziva se syntetickým olejem vykazují nižší tření, a navíc naznačuje vhodnou kombinaci s navrženým zahušťovadlem. Obě maziva vykazovala stabilní třecí chování napříč všemi podmínkami, což naznačuje dobrou schopnost tvořit mazací film i při vyšším skluzu a teplotě.

Zvolený přístup testování umožnil systematicky porovnat vliv teploty, skluzu i množství maziva na součinitel tření. Výsledky byly reprodukovatelné a dobře odlišily maziva s rozdílnou výkonností. Limitací však je, že test simuloval spíše krátkodobé nebo zrychlené zatížení bez dlouhodobého provozu. Výsledky tak nejsou plně přenositelné na provozní podmínky hlavních ložisek, ale představují vhodný způsob pro relativní porovnání maziv při zátěži s vysokým skluzem.

V případě změny součinitele tření byl dopad na výstupní hodnocení TOPSIS minimální. Přestože ve vstupních datech došlo ke snížení tření o 15–30 % (viz Obr. 7-3), změna hodnot C_i byla ve většině váhových variant zanedbatelná. To bylo způsobeno relativně vyrovnanými vstupy mezi mazivy a nízkou vahou tohoto parametru. Výraznější dopad nastal pouze ve variantě D, kde měl součinitel tření největší váhu 50 %. Právě v této variantě došlo k nárůstu C_i u maziva Stabyl EOS E2, které sice nemělo nejnižší tření, ale vykazovalo největší relativní změnu (pokles) oproti výchozí hodnotě. V ostatních variantách však rozdíly mezi mazivy i váhové zatížení nebyly natolik výrazné, aby změnu tření významně promítly do výsledku. Tento výsledek potvrzuje, že metoda TOPSIS citlivě reaguje pouze tehdy, když se výrazná změna parametru spojí se změnou váhy a dostatečnými rozdíly vůči ostatním vzorkům. Jinak zůstává výstup stabilní a robustní vůči dílčím změnám.



Obr. 7-3 Graf relativního poklesu tření při snížení skluzu (vlevo), Graf změny výkonnostního parametru C_i (vpravo)

7.2 Vyhodnocení multikriteriální metodou

Aplikace metody na experimentální data ukázala, že výsledné hodnocení velmi dobře odpovídá očekávanému chování maziv. Například mazivo Mobil 681WT si stabilně udržovalo nejvyšší skóre napříč všemi variantami, čímž potvrdilo svou vysokou výkonnost ve všech sledovaných oblastech. Naopak Lithium opakovaně vykazovalo nejnižší celkové hodnocení, což koreluje s jeho slabšími výsledky zejména v oblastech ochrany před opotřebením a separace oleje. Tyto výsledky se shodují s literaturou [40], kdy TOPSIS umožňuje zachytit i méně zřejmé rozdíly mezi alternativami, které by při izolovaném hodnocení jednotlivých schopností nemusely být rozpoznatelné.

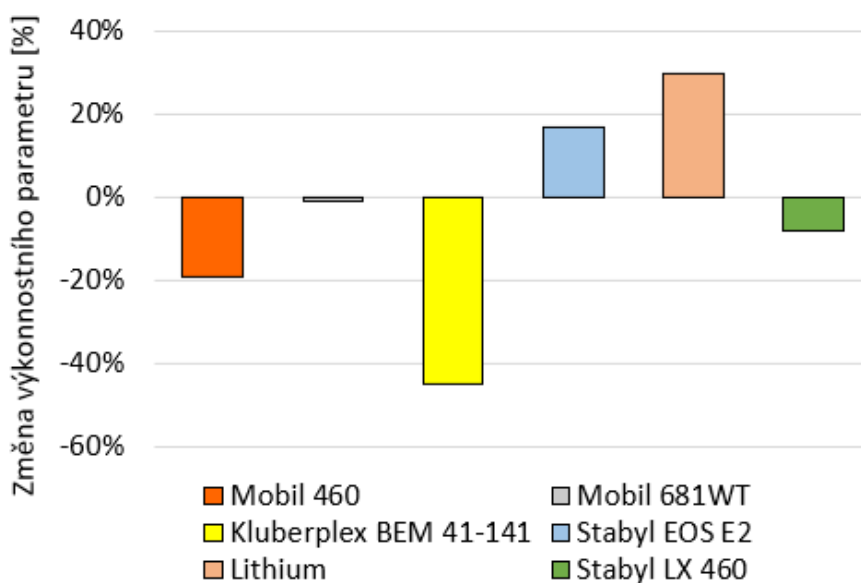
Vliv změny vah

Přestože některé schopnosti vykazovaly mezi normalizovanými hodnotami výrazné rozdíly, tedy například změna bleedingu v rozsahu od 0,013 do 0,810 a opotřebením od 0,055 do 0,887, tak změna vah nevedla k zásadnímu přeskupení pořadí hodnocených maziv. Tento výsledek odpovídá závěrům Leeeho [32], podle nějž zůstává pořadí variant v metodě TOPSIS stabilní i při $\pm 50\%$ změně vah, pokud se extrémní hodnoty nevyskytují současně ve více kritériích. V této práci žádná z alternativ nevynikala napříč všemi schopnostmi. Například mazivo Mobil 681WT mělo sice nejlepší hodnotu změny bleedingu, ale pouze průměrné výsledky v tloušťce filmu i tření. Naopak Klüberplex vykazoval nejnižší tření, ale dosáhl nejhorší hodnoty změny bleedingu. Tato nevyváženost způsobuje, že zvýhodnění jedné schopnosti prostřednictvím váhy není dostatečně silné k zásadní změně celkového výsledku, protože ostatní schopnosti relativní pořadí opět vyrovnávají.

Metoda TOPSIS následně zpracovává všechna kritéria výpočtem vážené eukleidovské vzdálenosti od ideálního a neideálního řešení. Změna váhy tak ovlivní jednotlivé složky vzdálenosti, ale pokud se ostatní kritéria chovají vyrovnaně nebo spolu korelují, celkový výsledek zůstává stabilní. Caliskan [40] uvádí, že efekt změny váhy bývá omezený právě tehdy, pokud žádná alternativa výrazně nevyčnívá a rozdíly mezi variantami se částečně kompenzují. Alinezhad a Amini [47] dále matematicky doložili, že k přeskupení pořadí dochází až při překročení určité mezní hodnoty váhy, tzv. hranice stability. Millek [41] navíc prokázal, že při vyrovnaném výkonu alternativ a korelovaných kritériích zůstává pořadí neměnné i napříč širokou škálou testovaných vah. V této práci byly pozorovány právě tyto podmínky, což vysvětluje vysokou robustnost výsledků. Stabilitu dále podporuje i počet hodnocených alternativ, kdy při šesti mazivech se vliv změny vah rozprostírá mezi více variant, čímž se snižuje citlivost výpočtu na preferenční změny.

Vliv změny vstupních dat

Při porovnání variant A a B bylo potvrzeno, že změna vstupních dat vedla k očekávatelným posunům výstupních hodnot výkonnostního parametru. Graf na Obr. 7-4 znázorňuje změnu výkonnostního parametru. Největší změna se týkala maziva Klüberplex BEM 41-141, kdy pokles výkonosti korespondoval s výrazným zhoršením některých schopností, zejména tření a opotřebení. Naopak maziva Stabyl EOS E2 a Lithium dosáhla kladné hodnoty změny, což lze přičíst jejich lepší výkonosti při porovnání s ostatními mazivy (rozdíl ve výsledcích se snížil) a vhodné kombinaci s ostatními parametry. Jak uvádí Caliskan [40], citlivost metody na změny vstupů a zároveň odolnost vůči výkyvům je jedním z klíčových požadavků na praktickou použitelnost MCDM metod.



Obr. 7-4 Relativní změna výkonnostního parametru při změně vstupních dat

Ani při změnách vstupních dat metoda TOPSIS nevykazovala nelogické výsledky, jako jsou náhlé přeskoky v pořadí, které by odporovaly reálným měřením. Stabilní pořadí maziv, jako například u Mobil 681 WT nebo Stabyl LX 460, svědčí o konzistenci metodiky i robustnosti hodnocených schopností. Jak uvádí Milleka [41] právě stabilita při změně vstupních dat je klíčová pro praktickou použitelnost TOPSIS v technických aplikacích s proměnlivými vstupními daty. Výsledky této práce ukazují, že v rámci testovaného rozsahu vstupních hodnot zůstává metoda stabilní a nedochází tak k narušení výstupů.

8 ZÁVĚR

Cílem této diplomové práce bylo navrhnout metodiku hodnocení výkonnosti plastických maziv určených pro mazání ložisek hlavního hřídele větrné turbíny. Ta pracují při specifických provozních podmínkách, jako jsou nízké otáčky, proměnlivé zatížení a kolísavé teploty. S ohledem na tyto nároky byl navržen experimentální postup pro měření schopností, které zásadně ovlivňují funkci plastického maziva v ložisku. Hodnoceny byly čtyři klíčové schopnosti, konkrétně schopnost vytvářet mazací film v kontaktu, schopnost uvolňování základového oleje a jeho stability po mechanické degradaci, ochranu povrchu před opotřebením při poklesu filmu a nízké třecí vlastnosti. Hlavním přínosem práce je propojení experimentálního testování s následnou multikriteriální analýzou pomocí metody TOPSIS, která umožnila sjednocení výsledků rozdílné fyzikální povahy do jednoho výkonnostního ukazatele.

Hlavní zjištění této práce byly následující:

- Naměřené hodnoty tloušťky mazacího filmu vykazovaly mezi jednotlivými mazivy výrazné rozdíly. Zvýšení teploty z 25 °C na 50 °C vedlo k poklesu tloušťky o 40–50 %, což bylo velmi výraznější než změna zatížení. Rozdíly mezi mazivy nebyly přímo závislé na viskozitě základového oleje, ale také na zahušťovadle a jeho poměru.
- U testovaných maziv byly pozorovány rozdíly ve struktuře, které se projeví odlišnou mírou bleedingu po degradaci. Po 24 hodinách mechanického namáhání zůstala některá maziva téměř beze změny (např. Mobil 681WT) v porovnání s čerstvým vzorkem, jiná dosahovala nárůstu separace oleje o více než 20 % (Kluberplex BEM 41-141)
- Při testech bez vyhřívání docházelo u všech maziv k výraznému opotřebení třecího povrchu již v krátkém čase. Při vyhřívání na 80 °C došlo u maziv s aditivy k výraznému snížení opotřebení povrchu, což potvrdilo aktivaci aditiv za vyšší teploty. U maziva Lithium bez aditiv zůstalo opotřebení vysoké i při vyšší teplotě.
- Součinitel tření ukázal nejnižší variabilitu dat. Maziva se syntetickým základovým olejem dosahovala nižšího tření v porovnání s minerálním.
- Vyhodnocení pomocí metody TOPSIS umožnilo systematicky porovnat výkonnost jednotlivých maziv na základě všech měřených schopností zároveň. Nejvyšší výkonnosti dosahovala maziva (například Mobil 681WT) s vyváženými výsledky napříč všemi testy.
- Změna zvolených vah neměla výrazný vliv na výsledné pořadí, což potvrdilo stabilitu a robustnost metody vůči změně preferencí v daném rozsahu. Při změně vstupních dat se pořadí měnilo logicky a bez náhodných přeskoků, což potvrdilo správnou volbu této metody.

Omezení této práce spočívá především v jejím zaměření na podmínky větrných turbín provozovaných na souši, kdy nebyly zohledněny extrémní vlivy typické pro offshore aplikace, jako je zvýšená vlhkost, riziko oxidace nebo velmi nízké provozní teploty. Do budoucna by bylo vhodné metodiku rozšířit také o další výkonnostní schopnosti, například oxidační stabilitu či odolnost vůči vodě nebo měření třecího momentu přímo zvoleného ložiska. U již hodnocených schopností by bylo možné přizpůsobit testovací podmínky i pro turbíny pracující v offshore prostředí. Tím by se zvýšila praktická využitelnost metodiky a její relevance pro širší spektrum provozních režimů hlavního ložiska větrné turbíny.

Navržená metodika tedy poskytuje systematický nástroj pro porovnání plastických maziv z hlediska jejich komplexní výkonnosti. Zároveň představuje alternativu k přístupu firmy Timken, který se ale soustředí pouze na laboratorní testy. Spojením experimentálních měření s multikriteriálním vyhodnocením je možné identifikovat vhodná maziva s ohledem na specifické provozní požadavky a preference. Výsledný návrh hodnocení může sloužit jako podklad pro technický výběr maziva při návrhu nebo údržbě větrných elektráren. Práce tak přispívá k systematickému přístupu při porovnání maziv v aplikaci, kde není k dispozici jednoznačné kritérium a je nutné zohlednit více hledisek současně.

9 VÝSLEDEK VÝZKUMU PODLE RIV

Za účelem publikování výsledků této práce byl vytvořen odborný článek

Article title

MULTICRITERIA EVALUATION OF GREASES FOR WIND TURBINE BEARINGS USING THE TOPSIS METHOD

Authors

Michal Procházka, Michal Okál

Abstract

This article focuses on the development of a methodology for evaluating the performance of greases intended for the main shaft bearings of wind turbines. These bearings operate under specific and demanding conditions, often resulting in failures and high maintenance costs. The aim was to design a testing system that enables a comprehensive evaluation of greases based on their key performance capabilities. The methodology was built upon four tests assessing: lubricant film formation, oil separation (bleeding), wear protection, and frictional behavior. Each test was designed with respect to the operating conditions of main bearings and was experimentally validated. The results revealed significant differences between the tested grease samples and confirmed the influence of varying test conditions. The collected data were analyzed using the TOPSIS multi-criteria decision-making method, which allowed integration of the outputs of different performance capabilities into a single comparative indicator. The method demonstrated the ability to compare greases while maintaining output stability under changing weights and input data. The final methodology provides a detailed framework for experimental testing and comprehensive evaluation of grease performance, offering a robust tool for comparing lubricating greases.

10 SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

- [1] HART, Edward; CLARKE, Benjamin; NICHOLAS, Gary; KAZEMI AMIRI, Abas; STIRLING, James et al. A review of wind turbine main-bearings: design, operation, modelling, damage mechanisms and fault detection. Online. 2020. Dostupné z: <https://doi.org/10.5194/wes-5-105-2020>. [cit. 2023-03-30].
- [2] HART, Edward; DE MELLO, Elisha a DWYER-JOYCE, Rob. Wind turbine main-bearing lubrication – Part 2: Simulation-based results for a double-row spherical roller main bearing in a 1.5 MW wind turbine. Online. *Wind Energy Science*. 2022, roč. 7, č. 4, s. 1533-1550. ISSN 2366-7443. Dostupné z: <https://doi.org/10.5194/wes-7-1533-2022>. [cit. 2023-11-11].
- [3] MCGUIRE, Nancy. Greases for slow and steady wind turbine bearings. Online. *Tribology & lubrication technology*. 2021, roč. 77, č. 1, s. 42-53. ISSN 1545-858X. [cit. 2025-03-04].
- [4] PENG, Han; ZHANG, Hai; SHANGGUAN, Linjian a FAN, Yisa. Review of Tribological Failure Analysis and Lubrication Technology Research of Wind Power Bearings. Online. *Polymers*. 2022, roč. 14, č. 15, s. 3041. ISSN 2073-4360. Dostupné z: <https://doi.org/10.3390/polym14153041>. [cit. 2023-11-08].
- [5] PENG, Han; ZHAO, Defang; SHANGGUAN, Linjian; LI, Songyin a CHENG, Ruixue. Review of Wind Power Bearing Wear Analysis and Intelligent Lubrication Method Research. Online. *Coatings (Basel)*. 2024, roč. 14, č. 1, s. 30. ISSN 2079-6412. Dostupné z: <https://doi.org/10.3390/coatings14010030>. [cit. 2024-04-02].
- [6] HART, Edward; DE MELLO, Elisha a DWYER-JOYCE, Rob. Wind turbine main-bearing lubrication-Part 1: An introductory review of elastohydrodynamic lubrication theory. Online. *Wind Energy Science*. 2022, roč. 7, č. 3, s. 1021-1042. ISSN 2366-7443. Dostupné z: <https://doi.org/10.5194/wes-7-1021-2022>. [cit. 2024-04-02].
- [7] MCGUIRE, Nancy. Lubrication challenges in the wind turbine industry. Online. *Tribology & lubrication technology*. 2019, vol. 75, no. 9, s. 34-43. ISSN 1545-858X. [cit. 2025-05-12].
- [8] LUGT, Piet M. *Grease lubrication in rolling bearings*. Chichester: Wiley, 2013. ISBN 978-1-118-35391-2.

- [9] CANN, Philip M. E. a LUBRECHT, Arnold A. Bearing performance limits with grease lubrication: the interaction of bearing design, operating conditions and grease properties. Online. *Journal of physics. D, Applied physics*. 2007, roč. 40, č. 18, s. 5446-5451. ISSN 0022-3727. Dostupné z: <https://doi.org/10.1088/0022-3727/40/18/S05>. [cit. 2024-04-02].
- [10] R. LUCAS, Douglas a K. MISTRY, Kuldeep. Comparison of Wind Energy Grease Performance Using Bench and Component Testing. *TIMKEN company*. 2021, č. 11367, s. 15.
- [11] LUGT, Piet M. Modern advancements in lubricating grease technology. Online. *Tribology international*. 2016, roč. 97, s. 467-477. ISSN 0301-679X. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2016.01.045>. [cit. 2023-10-17].
- [12] LUGT, Piet M.; VELICKOV, Slavco a TRIPP, John H. On the Chaotic Behavior of Grease Lubrication in Rolling Bearings. Online. *Tribology transactions*. 2009, roč. 52, č. 5, s. 581-590. ISSN 1040-2004. Dostupné z: <https://doi.org/10.1080/10402000902825713>. [cit. 2024-04-21].
- [13] LUGT, Piet M. a MORALES-ESPEJEL, Guillermo. E. A Review of Elasto-Hydrodynamic Lubrication Theory. Online. *Tribology transactions*. 2011, roč. 54, č. 3, s. 470-496. ISSN 1040-2004. Dostupné z: <https://doi.org/10.1080/10402004.2010.551804>. [cit. 2023-11-06].
- [14] HAMROCK, Bernard J. *Minimum film thickness in elliptical contacts for different regimes of fluid-film lubrication / Bernard J. Hamrock and Duncan Dowson, Lewis Research Center*. District of Columbia: National Aeronautics and Space Administration, Scientific and Technical Information Office ; For sale by the National Technical Information Service, 1978, 1978.
- [15] LUGT, Piet M. A Review on Grease Lubrication in Rolling Bearings. Online. *Tribology transactions*. 2009, roč. 52, č. 4, s. 470-480. ISSN 1040-2004. Dostupné z: <https://doi.org/10.1080/10402000802687940>. [cit. 2023-10-15].
- [16] WANG, Zhijian; SHEN, Xuejin; CHEN, Xiaoyang; TAO, Dehua; SHI, Lei et al. Experimental investigation of EHD grease lubrication in finite line contacts. Online. *Friction*. 2019, roč. 7, č. 3, s. 237-245. ISSN 2223-7690. Dostupné z: <https://doi.org/10.1007/s40544-018-0208-8>. [cit. 2023-11-04].

- [17] PENG, Han; LI, Songyin; SHANGGUAN, Linjian; ZHANG, Hai a ZHAO, Defang. Research on the Rheological Characteristics of Wind Power Grease Based on Rheological Parameters. Online. *Lubricants*. 2023, roč. 11, č. 7, s. 299. ISSN 2075-4442. Dostupné z: <https://doi.org/10.3390/lubricants11070299>. [cit. 2024-04-02].
- [18] GONÇALVES, David; GRAÇA, Beatriz; CAMPOS, Armando V.; SEABRA, J.; LECKNER, Johan et al. On the film thickness behaviour of polymer greases at low and high speeds. Online. *Tribology international*. 2015, roč. 90, s. 435-444. ISSN 0301-679X. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2015.05.007>. [cit. 2024-04-02].
- [19] MORALES-ESPEJEL, Guillermo E.; LUGT, Piet M.; PASARIBU, Halim R. a CEN, Hui. Film thickness in grease lubricated slow rotating rolling bearings. Online. *Tribology international*. 2014, roč. 74, s. 7-19. ISSN 0301-679X. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2014.01.023>. [cit. 2024-04-02].
- [20] REZASOLTANI, Asghar a KHONSARI, M.M. Mechanical degradation of lubricating grease in an EHL line contact. Online. *Tribology international*. 2017, vol. 109, s. 541-551. ISSN 0301-679X. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2016.12.020>. [cit. 2025-05-16].
- [21] CEN, Hui; LUGT, Piet M. a MORALES-ESPEJEL, Guillermo. Film Thickness of Mechanically Worked Lubricating Grease at Very Low Speeds. Online. *Tribology transactions*. 2014, roč. 57, č. 6, s. 1066-1071. ISSN 1040-2004. Dostupné z: <https://doi.org/10.1080/10402004.2014.933936>. [cit. 2024-04-02].
- [22] SATHWIK CHATRA, K.R.; OSARA, Jude A. a LUGT, Piet M. Thermo-mechanical aging during churning in grease lubricated bearings and its impact on grease life. Online. *Tribology international*. 2023, roč. 181, s. 108248. ISSN 0301-679X. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2023.108248>. [cit. 2023-12-04].
- [23] GONÇALVES, David; GRAÇA, Beatriz; CAMPOS, Armando V. a SEABRA, J. Film thickness and friction behaviour of thermally aged lubricating greases. Online. *Tribology international*. 2016, roč. 100, s. 231-241. ISSN 0301-679X. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2016.01.044>. [cit. 2024-04-21].
- [24] CEN, Hui; DE LAURENTIS, Nicola; BADER, Norbert a LUGT, Piet M. Effect of thermal aging on the grease film thickness in ball bearings. Online. *Tribology international*. 2025, vol. 204, s. 110511. ISSN 0301-679X. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2025.110511>. [cit. 2025-05-17].

- [25] CANN, Philip M. E.; DAMIENS, Bruno a LUBRECHT, Arnold A. The transition between fully flooded and starved regimes in EHL. Online. *Tribology international*. 2004, vol. 37, no. 10, s. 859-864. ISSN 0301-679X. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2004.05.005>. [cit. 2025-05-17].
- [26] FISCHER, Dennis; MUES, Helko; JACOBS, Georg a STRATMANN, Andreas. Effect of over rolling frequency on the film formation in grease lubricated EHD contacts under starved conditions. Online. *Lubricants*. 2019, roč. 7, č. 2, s. 19. ISSN 2075-4442. Dostupné z: <https://doi.org/10.3390/lubricants7020019>. [cit. 2023-11-06].
- [27] WANG, Yanshuang a WU, Baojie. Friction Characteristics and Mechanisms of Two Lithium Greases in Elastohydrodynamic Lubrication. Online. *Journal of failure analysis and prevention*. 2020, roč. 20, č. 4, s. 1266-1273. ISSN 1547-7029. Dostupné z: <https://doi.org/10.1007/s11668-020-00932-8>. [cit. 2024-04-02].
- [28] WANDEL, Sebastian; BADER, Norbert; SCHWACK, Fabian; GLODOWSKI, Jakob; LEHNHARDT, Bela et al. Starvation and relubrication mechanisms in grease lubricated oscillating bearings. Online. *Tribology international*. 2022, roč. 165, s. 107276. ISSN 0301-679X. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2021.107276>. [cit. 2024-04-02].
- [29] SCHWACK, Fabian; BADER, Norbert; LECKNER, Johan; DEMAILLE, Claire a POLL, Gerhard. A study of grease lubricants under wind turbine pitch bearing conditions. Online. *Wear*. 2020, roč. 454-455, s. 203335. ISSN 0043-1648. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.wear.2020.203335>. [cit. 2024-04-02].
- [30] ZHANG, Jie; WHEATLEY, Alan; PASARIBU, Rihard; WORTHINGTON, Edward; MATTHEWS, Sarah et al. Wind turbine lubrication: Low temperature fretting wear behaviour of four commercial greases. Online. *Tribology international*. 2023, roč. 187, s. 108706. ISSN 0301-679X. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2023.108706>. [cit. 2024-04-21].
- [31] WANG, Jiang-Jiang; JING, You-Yin; ZHANG, Chun-Fa a ZHAO, Jun-Hong. Review on multi-criteria decision analysis aid in sustainable energy decision-making. Online. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2009, roč. 13, č. 9, s. 2263-2278. ISSN 13640321. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2009.06.021>. [cit. 2025-05-14].

- [32] LEE, Hsing-Chen a CHANG, Ching-Ter. Comparative analysis of MCDM methods for ranking renewable energy sources in Taiwan. Online. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2018, roč. 92, s. 883-896. ISSN 13640321. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.05.007>. [cit. 2025-05-14].
- [33] SINGH, Tej. An integrated multicriteria decision making framework for the selection of waste cement dust filled automotive brake friction composites. Online. *Scientific Reports*. 2024, roč. 14, č. 1. ISSN 2045-2322. Dostupné z: <https://doi.org/10.1038/s41598-023-46385-5>. [cit. 2025-05-13].
- [34] SHEKHAR, Shashi a GARG, Hitendra. Photovoltaic Production Selection Using WSM MCDM Method. Online. In: *2023 1st International Conference on Cognitive Computing and Engineering Education (ICCCEE)*. IEEE, 2023, s. 1-5. ISBN 979-8-3503-3280-3. Dostupné z: <https://doi.org/10.1109/ICCCEE55951.2023.10424662>. [cit. 2025-05-14].
- [35] CHOURABI, Zouhour; KHEDHER, Faouzi; BABAY, Amel a CHEIKHROUHOU, Morched. Multi-criteria decision making in workforce choice using AHP, WSM and WPM. Online. *The Journal of The Textile Institute*. 2018, roč. 110, č. 7, s. 1092-1101. ISSN 0040-5000. Dostupné z: <https://doi.org/10.1080/00405000.2018.1541434>. [cit. 2025-05-14].
- [36] OPRICOVIC, Serafim a TZENG, Gwo-Hshiang. Extended VIKOR method in comparison with outranking methods. Online. *European Journal of Operational Research*. 2007, roč. 178, č. 2, s. 514-529. ISSN 03772217. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2006.01.020>. [cit. 2025-05-14].
- [37] ANAND, Gurumurthy a KODALI, Rambabu. Selection of lean manufacturing systems using the PROMETHEE. Online. *Journal of Modelling in Management*. 2008, roč. 3, č. 1, s. 40-70. ISSN 1746-5664. Dostupné z: <https://doi.org/10.1108/17465660810860372>. [cit. 2025-05-14].
- [38] YU, Xiaohan; ZHANG, Suojuan; LIAO, Xianglin a QI, Xiuli. ELECTRE methods in prioritized MCDM environment. Online. *Information Sciences*. 2018, roč. 424, s. 301-316. ISSN 00200255. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.ins.2017.09.061>. [cit. 2025-05-14].

- [39] OPRICOVIC, Serafim a TZENG, Gwo-Hshiang. Compromise solution by MCDM methods: A comparative analysis of VIKOR and TOPSIS. Online. *European Journal of Operational Research*. 2004, roč. 156, č. 2, s. 445-455. ISSN 03772217. Dostupné z: [https://doi.org/10.1016/S0377-2217\(03\)00020-1](https://doi.org/10.1016/S0377-2217(03)00020-1). [cit. 2025-05-14].
- [40] ÇALIŞKAN, Halil. Selection of boron based tribological hard coatings using multi-criteria decision making methods. Online. *Materials & Design*. 2013, roč. 50, s. 742-749. ISSN 02613069. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2013.03.059>. [cit. 2025-05-13].
- [41] MILLEK, Jiří; LHOTSKA, Lenka; LACKOVIĆ, Igor; SUKUPOVA, Lucie a IBBOTT, Geoffrey S. The Robustness of TOPSIS Results Using Sensitivity Analysis Based on Weight Tuning. In: *World Congress on Medical Physics and Biomedical Engineering 2018*. 68/2. Singapore: Springer, 2018, s. 83-86. ISBN 9789811090370. ISSN 1680-0737. Dostupné z: https://doi.org/10.1007/978-981-10-9038-7_15.
- [42] TRUNG, Do D.; THIEN, Nguyen V. a NGUYEN, Nguyen Nhu-Tung. Application of TOPSIS Method in Multi-Objective Optimization of the Grinding Process Using Segmented Grinding Wheel. Online. *Tribology in Industry*. 2021, roč. 43, č. 1, s. 12-22. ISSN 03548996. Dostupné z: <https://doi.org/10.24874/ti.998.11.20.12>. [cit. 2025-05-14].
- [43] DEHGHANI SOUFI, Masoud; GHOBADIAN, Barat; NAJAFI, Gholamhassan; SABZIMALEKI, Mohammad a YUSAF, Talal. TOPSIS Multi-Criteria Decision Modeling Approach for Biolubricant Selection for Two-Stroke Petrol Engines. Online. *Energies*. 2015, roč. 8, č. 12, s. 13960-13970. ISSN 1996-1073. Dostupné z: <https://doi.org/10.3390/en81212408>. [cit. 2025-05-13].
- [44] HARTL, Martin; KRUPKA, Ivan; POLISCUK, Radek a LISKA, M. Thin Film Colorimetric Interferometry. Online. *Tribology transactions*. 2001, vol. 44, no. 2, s. 270-276. ISSN 1040-2004. Dostupné z: <https://doi.org/10.1080/10402000108982458>. [cit. 2025-05-09].
- [45] PROKOP, Adam. *Vliv opotřebení plastického maziva na jeho mazací vlastnosti*. Vysoké učení technické v Brně. Fakulta strojního inženýrství, 2023.
- [46] GALAS, Radovan; SKURKA, Simon; VALENA, Martin; KVARDA, Daniel; OMASTA, Milan et al. A benchmarking methodology for top-of-rail products. Online. *Tribology international*. 2023, vol. 189, s. 108910. ISSN 0301-679X. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2023.108910>. [cit. 2025-05-05].

- [47] ALINEZHAD, Alireza a AMINI, Abbas. Sensitivity Analysis of TOPSIS Technique: The Results of Change in the Weight of One Attribute on the Final Ranking of Alternatives. Online. *Journal of optimization in industrial engineering*. 2011, vol. 4, no. 7, s. 23-28. ISSN 2251-9904. [cit. 2025-05-19].

11 SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK, SYMBOLŮ A VELIČIN

Seznam zkratk

EHL	Elastohydrodynamické mazání
EHD	Elastohydrodynamické
VE	Větrné elektrárna
MTM	Mini Traction Machine
MCDM	Multi-Criteria Decision Making
AHP	Analytic Hierarchy Process
WSM	Weighted Sum Method
TOPSIS	Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution
VIKOR	VlseKriterijumska Optimizacija I Kompromisno Resenje
ELECTRE	ELimination Et Choix Traduisant la REalité
WT	Wind Turbine
ASTM	American Society for Testing and Materials
DIN	Deutsches Institut für Normung
SRV	Schwingung Reibung Verschleiß
ISO	International Organization for Standardization
AISI	American Iron and Steel Institute
SRR	Slide-Roll Ratio (relativní skluz)
NLGI	National Lubricating Grease Institute

Seznam symbolů a veličin

H_m	(nm)	Minimální tloušťka filmu
H_c	(nm)	Centrální tloušťka filmu
G	(-)	Materiálový parametr
U	(-)	Rychlostní parametr
W	(-)	Parametr zatížení
η	(mm/s ²)	Kinematická viskozita při 40°C
D	(-)	Rozhodovací matice
x_{ij}	(-)	Původní hodnota
r_{ij}	(-)	Normalizovaná hodnota
v_{ij}	(-)	Vážená normalizovaná hodnota
w_j	(%)	Váha dané schopnosti
V_j^+	(-)	Pole ideálních řešení
V_j^-	(-)	Pole neideálních řešení
S_i^+	(-)	Vzdálenost od ideálního řešení
S_i^-	(-)	Vzdálenost od neideálního řešení
C_i	(-)	Výkonnostní parametr
n	(ot/min)	Otáčky turbíny
r_{od}	(mm)	Poloměr oběžné dráhy elementu ložiska
v_o	(mm/s)	Obvodová rychlost
p	(GPa)	Kontaktní tlak
E	(GPa)	Modul pružnosti
μ	(-)	Poissonův poměr

\emptyset	(mm)	Průměr kuličky
F_n	(N)	Normálová síla
T_p	(°C)	Provozní teplota
$m_{záv}$	(g)	Váha závaží
$m_{separovaný olej}$	(g)	Váha separovaného oleje
$m_{původního maziva}$	(g)	Původní váha maziva
m_{cer}	(g)	Váha oleje z čerstvého vzorku
m_{deg}	(g)	Váha oleje z degradovaného vzorku
t_{sep}	(hod)	Doba separace
$\Delta\%$	(%)	Procento separovaného oleje
V_{maz}	(μ l)	Množství maziva
l_{dr}	(mm)	Délka dráhy
f	(Hz)	Frekvence
t_{test}	(min)	Čas testu
V_{op}	(μ m ³)	Objem opotřebení
SRR	(%)	Slide-Roll Ratio (relativní skluz)
v_{disk}	(mm/s)	Rychlost otáčení disku
μ_{maz}	(-)	Součinitel tření
σ_j	(-)	Směrodatné odchylna
\bar{r}_j	(-)	Průměr hodnot v dané schopnosti
v_k	(-)	Převrácená hodnota směrodatné odchylny
w_k	(-)	Váha vypočtené dle variability dat

12 SEZNAM OBRÁZKŮ A GRAFŮ

Obr. 2-1 PRISMA diagram diplomové práce.....	15
Obr. 2-2 a) Abrazivní opotřebení, b) Únavové opotřebení, c) Oxidační opotřebení [5]....	17
Obr. 2-3 a) nedostatečné mazání, b) nadměrné mazání, c) kontaminace maziva [5]	17
Obr. 2-4 A) Působící vítr, B) Zatížení hlavního hřídele, C) Silové účinky v ložisku, D) Poruchy[1]	18
Obr. 2-5 Závislost kontaktního tlaku na zatížení elementu [2]	18
Obr. 2-6 Průběh záběhové fáze [12]	20
Obr. 2-7 Elastohydrodynamický kontakt [6]	21
Obr. 2-8 rozložení tloušťky filmu a) v bodovém kontaktu b) v liniovém kontaktu[6].....	22
Obr. 2-9 Závislost viskozity jednotlivých maziv na teplotě [17]	23
Obr. 2-10 Tloušťka filmu pro mazivo se zahušťovadlem Lithium complex [18].....	24
Obr. 2-11 a) struktura čerstvého maziva b) struktura degradovaného maziva[3].....	25
Obr. 2-12 Tloušťka filmu tepelně degradovaných maziv [23]	26
Obr. 2-13 Pokles tloušťky filmu maziva vlivem hladovění kontaktu [25]	27
Obr. 2-14 Porovnání součinitele tření plastického maziva (vlevo) a oleje (vpravo) [27] ..	28
Obr. 2-15 vzniklé poškození (vlevo false brinelling, vpravo třecí koroze) [29].....	29
Obr. 2-16 Vliv různých maziv na stopu opotřebení [30]	29
Obr. 4-1 Schéma postupu koncepčního návrhu.....	40
Obr. 5-1 Schéma metodiky předběžného návrhu.....	46
Obr. 5-2 Schéma metodiky pro hodnocení plastických maziv	47
Obr. 5-3 Schéma tribometru v konfiguraci ball-on-disk.....	48
Obr. 5-4 Interference bílého světla.....	49
Obr. 5-5 a) oficiální sestava pro separaci b) modifikovaná sestava	50
Obr. 5-6 Schéma zařízení Bruker v konfiguraci kulička-destička.....	51
Obr. 5-7 Schéma funkce optického profilometru	51
Obr. 5-8 Schéma konfigurace ball-on-disk na zařízení MTM.....	52
Obr. 5-9 Schéma postupu metodiky TOPSIS.....	53
Obr. 6-1 Schéma detailního návrhu metodiky pro hodnocení výkonnosti plastických maziv	57

Obr. 6-2 Schéma měření tloušťky mazacího filmu	58
Obr. 6-3 Volba kontaktního tlaku.....	59
Obr. 6-4 Graf vlivu teploty a zatížení na centrální tloušťky filmu	61
Obr. 6-5 Schéma testování bleedingu	62
Obr. 6-6 Graf procenta separovaného oleje z obou vzorků	64
Obr. 6-7 Graf stability maziva	64
Obr. 6-8 Schéma testování ochrany aditivy před opotřebením	65
Obr. 6-9 Graf objemu opotřebení pro samovolné zahřívání kontaktu	67
Obr. 6-10 Graf objemu opotřebení pro vyhřívání	67
Obr. 6-11 Schéma testování třecích vlastností	68
Obr. 6-12 Aplikace maziva.....	69
Obr. 6-13 Testování skluzu	69
Obr. 6-14 Graf vlivů na součinitel tření	70
Obr. 6-15 Graf vlivu teploty na tření	71
Obr. 6-16 Graf vlivu množství maziva aplikovaného na disk	71
Obr. 6-17 Vliv kombinace množství maziva a teploty	72
Obr. 6-18 Součinitel tření pro všechna maziva	72
Obr. 6-19 Graf výsledných hodnot výkonnostních parametrů maziv	77
Obr. 6-20 Porovnání vlivu vah na výkonnostní parametr	80
Obr. 6-21 Porovnání výkonnostního parametru při změně vstupních dat	82
Obr. 7-1 Graf relativního poklesu tloušťky filmu při nárůstu teploty (vlevo), Graf změny výkonnostního parametru C_i (vpravo)	86
Obr. 7-2 Graf relativního poklesu opotřebení při nárůstu teploty (vlevo), Graf změny výkonnostního parametru C_i (vpravo)	88
Obr. 7-3 Graf relativního poklesu tření při snížení skluzu (vlevo), Graf změny výkonnostního parametru C_i (vpravo)	89
Obr. 7-4 Relativní změna výkonnostního parametru při změně vstupních dat.....	91

13 SEZNAM TABULEK

Tab. 4-1 Vlastnosti vzorků plastických maziv	42
Tab. 6-1 Vypočtené hodnoty typických rychlostí.....	59
Tab. 6-2 Materiálové charakteristiky, normálové síly a kontaktní tlaky.....	60
Tab. 6-3 Vstupní data do TOPSIS analýzy	73
Tab. 6-4 Normalizovaná data	74
Tab. 6-5 Váhy schopností	75
Tab. 6-6 Normalizované vážené hodnoty pro variantu A	75
Tab. 6-7 Výběr ideálního a neideálního řešení.....	76
Tab. 6-8 Koeficienty vzdálenosti od ideálního a neideálního řešení	77
Tab. 6-9 Normalizované váhy varianty D	79
Tab. 6-10 Porovnání podmínek variant A a B.....	81
Tab. 6-11 Vstupní data varianty B	82