



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV MECHANIKY TĚLES, MECHATRONIKY A BIOMECHANIKY

INSTITUTE OF SOLID MECHANICS, MECHATRONICS AND BIOMECHANICS

VALIVÁ LOŽISKA PRO ELEKTROMOBILITU

ROLLING BEARINGS FOR ELECTROMOBILITY

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Patrik Mbontar

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Petr Šperka, Ph.D.

BRNO 2019

Zadání bakalářské práce

Ústav:	Ústav mechaniky těles, mechatroniky a biomechaniky
Student:	Patrik Mbontar
Studijní program:	Aplikované vědy v inženýrství
Studijní obor:	Mechatronika
Vedoucí práce:	Ing. Petr Šperka, Ph.D.
Akademický rok:	2018/19

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 bakalářské práce:

Valivá ložiska pro elektromobilitu

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Současný trend vývoje automobilů směřuje k vyššímu využití elektrických pohonů. Tento pohon odstraňuje řadu klasických strojních součástí. Naopak elektropohon klade nové požadavky na vývoj a konstrukci valivých ložisek. Optimalizace výkonových parametrů elektromobilů směřuje k pohonům s vyššími provozními otáčkami, pro které je nutný vývoj ložisek s vyššími maximálními otáčkami.

Typ práce: rešeršně syntetická

Cíle bakalářské práce:

Cílem práce je zpracovat přehled v oblasti valivých ložisek používaných v elektromobilech. Úkolem je analyzovat trendy, zformulovat požadavky a popsat výzvy, které klade elektromobilita na vývoj nových valivých ložisek.

Díličí cíle bakalářské práce:

- zpracovat přehled valivých ložisek používaných v elektromobilech,
- analyzovat kritické požadavky na valivá ložiska,
- popsat podstatu výzev pro další vývoj valivých ložisek.

Požadované výstupy: průvodní zpráva.

Rozsah práce: cca 27 000 znaků (15 – 20 stran textu bez obrázků).

Struktura práce a šablona průvodní zprávy jsou závazné:

http://dokumenty.uk.fme.vutbr.cz/BP_DP/Zasady_VSKP_2019.pdf

Seznam doporučené literatury:

HARRIS, Tedric A. Rolling bearing analysis. 4th ed. New York: Wiley, 2001, 1086. s. ISBN 0-47-35457-0.

LUGT, Piet M. Grease lubrication in rolling bearings. Chichester: John Wiley, 2013, 444 s. Tribology series. ISBN 978-1-118-35391-2.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2018/19

V Brně, dne

L. S.

prof. Ing. Jindřich Petruška, CSc.
ředitel ústavu

doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.
děkan fakulty

ABSTRAKT

Snahou tejto bakalárskej práce je priblížiť problematiku týkajúcu sa použitia valivých ložísk v elektromobiloch. V úvode bude obsahovať históriu, rozdelenie a krátky opis ložísk. V ďalšej časti bude nasledovať popis využitia, kladených požiadaviek a parametrov na valivé ložiská automobiloch so spaľovacím motorom. V hlavnej časti práce bude rozobratie parametrov a požiadavok ložísk využívaných v elektromobiloch a hybridných vozidlách. Nasledovať bude zoznámenie s dynamickými účinkami vplývajúcimi na ložiská a aj na ich kritické požiadavky. Na záver bude porovnanie medzi dvoma spomínanými druhmi áut a možný vývoj tohto druhu ložísk.

Kľúčové slová: Valivé ložiská, guľôčkové ložiská, elektromobil, motor, teplota, rýchlosť, mazanie, poškodenie

ABSTRACT

The aim of this bachelor thesis is to describe the problems related to the use of rolling bearings in electric vehicles. Introduction includes history, distribution, and a brief description of the bearings. In the next section, there will be a description of the use, requirements and parameters for rolling bearings of combustion engine cars. In the main part of the thesis, the parameters and requirements of bearings used in electric vehicles and hybrid vehicles will be analyzed. I will continue with familiarization with dynamic actions affecting bearings and their critical requirements. In conclusion, the two types of cars and the possible development of this type of bearings will be compared.

Key words: Rolling bearings, ball bearings, electric vehicle, engine, temperature, speed, lubrication, damage

BIBLIOGRAFICÁ CITÁCIA VŠKP PODĽA ČSN ISO 190

MBONTAR, Patrik. Valivá ložiska pro elektromobilitu [online]. Brno, 2019 [cit. 2019-05-22]. Dostupné z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/117547>. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav mechaniky těles, mechatroniky a biomechaniky. Vedoucí práce Petr Šperka.

PREHLÁSENIE

Prehlasujem, že svoju bakalársku prácu na tému Valivá ložiska pro elektromobilitu som vypracoval samostatne pod vedením vedúceho bakalárskej práce a s použitím odbornej literatúry a ďalších informačných zdrojov, ktoré sú v práci všetky citované a uvedené v zozname literatúry na konci práce.

V Brně dne

.....

(podpis autora)

POĎAKOVANIE

Chcel by som sa poďakovať vedúcemu mojej bakalárskej práce Ing. Petrovi Šperkovovi Ph.D. za pomoc a užitočné rady písaní práce. Moje poďakovanie patrí taktiež rodičom, ktorí ma po celú dobu štúdia podporovali a aj najbližším priateľom.

OBSAH

OBSAH.....	7
ÚVOD.....	8
1. ANALÝZA PROBLÉMU A CIEĽ PRÁCE.....	9
2. PREHĽAD SÚČASNEHO POZNANIA.....	10
3.1 Ložiska vo vozidlách so spaľovacím motorom	10
3.1.1 Využitie v automobiloch.....	10
3.1.2 Využitie v motore	11
3.1.3 Prevodovka	12
3.1.4 Iné ložiská	15
3.2 Ložiská v elektromobiloch.....	17
3.2.1 Ložiská kolies	17
3.2.2 Využitie v motore	19
3.2.3 Využitie v prevodovke.....	23
3.3 Kritické parametre ložísk.....	24
3.3.1 Dynamické účinky pôsobiace na ložisko	24
3.3.1.1 Odstredivá sila	24
3.3.1.2 Gyroskopický moment.....	25
3.3.1.3 Trecí moment.....	26
3.3.1.4 Trecí moment od zaťaženia	27
3.3.1.5 Moment viskózneho trenia.....	27
3.3.2 Ložiská so širokou tepelnou stabilitou.....	28
3.3.3 Ultra-rýchle ložiská.....	29
3.3.3.1 Mazanie.....	30
3.3.3.2 Materiály kliebok.....	32
3.3.3.3 Keramické valivé elementy	33
3.3.4 Elektrické prúdy v ložiskách.....	35
3. DISKUSIA.....	39
4. ZÁVER	43
5. ZOZNAM POUŽITÝCH ZDROJOV	44
6. ZOZNAM POUŽITÝCH SKRATIEK, SYMBOLOV A VELIČÍN.....	49
7. ZOZNAM OBRÁZKOV A GRAFOV	50
8. ZOZNAM TABULIEK	51

ÚVOD

Strojné súčiastky sú odjakživa súčasťou techniky vo svete. Majú viacero funkcií ale medzi hlavné patria možnosti zamedziť, vymedziť a umožniť pohyb. Medzi tieto súčasti nepochybne patria ložiská. Ložiská delíme na 3 hlavné kategórie: klzné, valivé a magnetické. Valivé ložiská, ktoré budú hlavným predmetom tejto práce môžeme ešte rozdeliť na guľôčkové, ihličkové, valčekové, Súdočkové a kúzelníkové. Všetky valivé ložiská sa skladajú z prevažne 4 časti. Vonkajší a vnútorný krúžok medzi ktorými sa valia valivé elementy. Presnú polohu a rovnomerne rozmiestnenie zabezpečuje klietka. Pri novších môžu pridať rôzne snímače rýchlosti a z ložísk sa stane komplexná ložisková jednotka.

V prvej hlavnej kapitole sa budeme venovať trendom pri používaní valivých ložísk v bežných automobiloch so spaľovacím motorom. Popíšeme si konkrétne využitie v automobile, parametre ložísk a kladené kritické požiadavky na tieto ložiská.

Hlavný dôraz bude kladený na valivé ložiská používané v elektromobiloch. Snaha bude opísať taktiež miesta a význam ich použitia. Nasledovať budú jednotlivé typy ložísk, ako aj konkrétne ložiská využívané pri terajších elektromobiloch a hybridných vozidlách. Predposledné kapitoly práce budú venované teoretickejším poznatkom z odbornej literatúry ohľadom rýchlosti ložísk, mazania či materiáloch klietky. Na záver práce bude spracované hodnotenie rozdielov elektromobil/hybrid vs. spaľovací automobil s ohľadom na už spomínané parametre, požiadavky a ďalšie rozdiely. Koniec bude obsahovať predikciu a možný vývoj valivých ložísk pri elektromobiloch.

1. ANALÝZA PROBLÉMU A CIEĽ PRÁCE

Súčasný vývoj automobilov smeruje k vyššiemu využitiu elektrických pohonov. Elektropohon kladie novšie a často krát značne zmenené požiadavky na vývoj valivých ložísk ako tomu bolo doteraz pri vozidlách so spaľovacím vozidlom. Diametrálne iná konštrukcia motora vyžaduje ložiská s vyššou maximálnou rýchlosťou a taktiež použitie výkonnejších mazív. Zmeny zasiahli ložiská od povrchovej úpravy, cez valive elementy, klieťky až po celkový dizajn ložiska.

Cieľom tejto bakalárskej práce je vytvoriť prehľad v oblasti valivých ložísk používaných v elektromobiloch. Úlohou je analyzovať terajšie ložiská používané v elektromobilitě, sformulovať kritické požiadavky a popísať výzvy, ktoré pripadajú na vývoj nových valivých ložísk v tejto oblasti.

2. PREHĽAD SÚČASNEHO POZNANIA

3.1 Ložiska vo vozidlách so spaľovacím motorom

3.1.1 Využitie v automobiloch

Počet ložísk v automobile so spaľovacím motorom (ďalej ICE-internal combustion engine) obr. 1, je podobný u väčšiny výrobcov v automobilovom priemysle. Autori článku *How many bearings are there in a car?* počítali minimálny počet ložísk, ktorý by sa mal nachádzať v každom aute. Výsledný počet sa zastavil na čísle 36 [1].



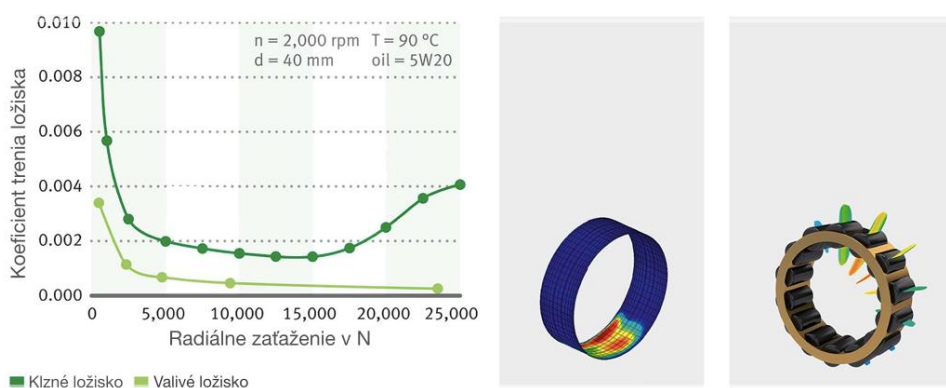
Obr. 1 Model motoru a náprav automobilu

Tu sa ponúka stručný popis výsledného počtu ložísk v automobile [1] :

- 10 ihličkových ložísk sa nachádza v riadiacej rade.
- 6 ložísk v prevodovke- 2 na primárnom hriadeľi, 2 na sekundárnom a 2 na diferenciáli.
- 6 ložísk motorového príslušenstva - 2 na štartére, 2 na alternátore a 2 na motorčeku posilňovača riadenia.
- 4 kolesové ložiská
- 3 ložiská na rozdelenie motora -1 ložisko pre každý z dvoch volantových valčekov a 1 pre vodné čerpadlo
- 2 závesné ložiská
- 2 ložiská pre nastavenie sedadla - nastavenie výšky
- 1 ložisko spojky
- 1 pilotné ložisko zotrvačníka motora
- 1 ložisko prenosového hriadeľa (prechodné ložisko)

3.1.2 Využitie v motore

Pri klzných ložiskách vzniká vyššie trenie pri rozbehu aj za prevádzky ako pri valivých ložiskách, čo môžeme vidieť na obr. 2. Na základe týchto poznatkov o trení je tu výhodnejšia zmena klzných ložísk práve ložiskami valivými, ktorá poskytuje jasné zníženie spotreby paliva až o 5,4 %.



Obr. 2 Porovnanie klzného a valivého ložiska

V súčasnosti nájdeme valivé ložiská na vyvažovacích a vačkových hriadeľoch, na zariadeniach s remeňovým prevodom, turbodúchadlách a vodných čerpadlách (obr. 3) [17].

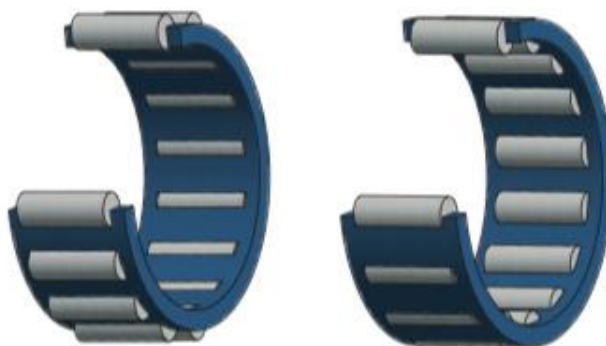


Obr. 3 Použitie valivých ložísk

Veľa modernejších áut má dnes štart-stop systém s častým vypínaním motora a opätovným uvedením do chodu [17]. Požadovaný výkon ložísk pre túto aplikáciu zahŕňa veľkú trvanlivosť a odolnosť voči vibráciám a pittingu, ktorá sa vyžaduje najmä pri ložiskách pre alternátory, ako aj odolnosť voči vode, nízky trecí moment kvôli častému uvádzaniu do prevádzky s funkciou štart-stop a dlhou životnosťou. K lepšiemu výkonu ISG (Integrovaný štartovací generátor) sa prispieva prostredníctvom vývoja

originálneho vysokovýkonného maziva, tesnenia s nízkym trením s dobrou tesniteľnosťou a klietkou s nízkym trením [16].

Súpravy ihličkových ložísk sa používajú v kľukových mechanizmoch 2- a 4-taktných motorov na nesenie kľukových čapov a piestových čapov, ako aj v kompresoroch [19]. Existujú dva rôzne typy ihličkových a klietkových zostáv pre ojnice; jeden sa montuje na kľukový hriadeľ a nazýva sa KZK, druhý sa montuje na hlavu ojnice a nazýva sa KBK. Hlavný rozdiel je v mieste vedení valivých elementov. KZK ložiská majú ihličky vedené na vonkajšom priemere. Klietky majú veľmi vysokú pevnosť a dobre navádzajú ihličkové valčeky. Realizácia vodiaceho povrchu na vonkajšom priemere zaručuje optimálne mazanie. KBK majú zase ihličky vedené na vnútornom priemere. Rozdielna šírka klietky umožňuje prispôbenie šírky oka ojnice, ako aj piestu. Rozdiel vo vedení môžeme vidieť na obr. 4 [18].



Obr. 4 Ihličkové ložisko KZK naľavo, KBK napravo

Klietky s ihličkami dobre odolávajú odstredivým silám a sú vhodné pre vyššie rýchlosti. Vyžadujú veľmi malý radiálny priestor, pretože výška radiálneho rezu zodpovedá len priemeru ihličkových valčekov [19].

Poskytujú ložiskové usporiadania s vysokou presnosťou hádzania, ktorá je však ovplyvnená geometrickou presnosťou obežných dráh. Obežné dráhy musia byť kalené, brúsené a honované. Drsnosť povrchu ložísk a jeho valivých elementov musí byť minimálne $Ra\ 0,2\ \mu\text{m}$. Obežné dráhy ložísk a oporné plochy musia byť kalené na hĺbku minimálne 0,5 mm; povrchová tvrdosť najmenej 700 HV.

Bočné prítlačné plochy sú presne opracované -zväčša $Ra\ 2\ \mu\text{m}$ a odolné voči opotrebeniu. Radiálna vnútorná vôľa závisí od rýchlosti, tuhosti a presnosti častí kľukového hriadeľa. Radiálna vnútorná vôľa musí byť najmenej 0,002 mm a nesmie presiahnuť 0,012 mm [19].

3.1.3 Prevodovka

V automatickej prevodovke sa nachádza niekoľko rôznych typov ložísk. Gulôčkové ložiská sa používajú s hriadeľmi, ktoré sa otáčajú pri vysokých rýchlostiach. Valčekové ložiská majú väčší povrch než gulčkové ložiská. Táto vlastnosť ich robí vhodnými pre ťažké aplikácie [9].

Kuželíkové ložiská sa používajú pre prevodové mechanizmy preto, že majú úctyhodnú únosnosť voči radiálnym a axiálnym zaťaženiám, ktoré sa vyskytujú v diferenciáloch, na zábere ozubených kolies, a umožňujú kombináciu vysokej tuhosti a úspory priestoru. Na druhej strane, majú relatívne značnú stratu krútiaceho momentu [16]. Kuželíkové ložiská vyžadujú mierne predpätie [9].

Ihličkové ložiská, sú tiež známe ako ložiská s klieťkovými ihličkami, znižujú napätie trenia a riadenia hriadeľa [9]. Izolované axiálne ihličkové ložisko (obr. 5) so zameraním na prenos vibrácií s cieľom zlepšiť vlastnosti NVH (noise, vibration, harshness- hlučnosť, vibrácie, drsnosť) využíva vysoko-polymérny materiál s vynikajúcimi tlmiacimi vlastnosťami medzi ložiskom a puzdrom a je schopný prispieť k pohodliu cestujúcich v automobiloch tým, že umožňuje zlepšenie vlastností NVH prostredníctvom inštalácie izolátora s hrúbkou a tvarom drážky, ktorý má veľký tlmiaci účinok na prenos vibrácií [16].



Obr. 5 Ihličkové ložisko v automatickej prevodovke

Prevodové ložiská sú stále častejšie vystavené náročným podmienkam mazania, napríklad keď sa používa olej s nízkou viskozitou, a očakáva sa, že budú odolávať pittingu, ktorý vedie ku kontaktnej únave [11]. Oleje s nízkou viskozitou spôsobujú tenšie olejové filmy, čo znamená, že povrchy guľôčok a obežných dráh sú veľmi náchylné na opotrebovanie a tak aj vyššie požiadavky na guľôčkové ložiská [8].

Guľôčkové ložiská od NSK s extrémne dlhou životnosťou, ktoré slúžia pre prevodovky, sú navrhnuté tak, aby boli kompaktnéjšie, ľahšie a s menším trením [11]. EQTF guľôčkové ložisko zlepšuje kvalitu tak, že je zachovaný výkon aj napriek tenšiemu olejovému filmu. Povrch valivých elementov sa musí udržiavať v perfektnom stave, aby zabránilo alebo oneskorilo brinelling povrchu obežnej dráhy guľôčkového ložiska [8].

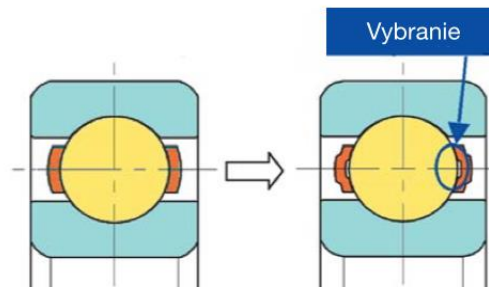
Pojem brinelling vznikol od Brinellovej stupnice tvrdosti, kde sa trvdá guľôčka vtlačá do testovaného materiálu a meria sa hĺbka a priemer otláčku. Definícia brinellingu znamená vytvorenie trvalých priehlbín v tvrdom povrchu ložiskových drážok. Tieto priehlbiny vznikajú vzájomným otláčaním dvoch tvrdých povrchov. Toto poškodenie môže viesť k nesprávnej prevádzke či nadmerným vibráciám, ktoré zase môžu urýchliť iné formy opotrebovania [52]. Častice vyrobené touto jamkou môžu viesť k ďalšiemu poškodeniu obežnej dráhy a valivých elementov [8]. Prítomnosť abrazívnych častíc z kalenej ocele v prevodovom oleji je celkom obvyklá vzhľadom na početné kontakty

medzi ozubenými kolesami prevodovky. Tieto častice môžu byť zdrojom vrubov na povrchu obežnej dráhy, keď sú stlačené medzi guľôčkou a obežnou dráhou [11].

EQTF sú ložiská vyvinuté s guľôčkami vyrobenými zo špeciálnej ocele, ktoré sa vyznačujú lepšou ochranou proti opotrebeniu prostredníctvom tepelného opracovania - povrchového kalenia (karbonitridácia) [8], vďaka čomu má ložisko zosilnený povrch valivého elementu, čo vedie k vyššej odolnosti proti zadieraniu a zlepšeniu klzných vlastností. V dôsledku toho sa životnosť vyvinutého ložiska predĺžila aspoň o 2 až 3-krát, ak je priradená ku konvenčnej technológii vnútorného a vonkajšieho krúžku ložiska [11]. Používané ložisko EQTF, ktoré má len polovičnú hmotnosť, oveľa kompaktnejšie a vďaka zmenšeniu má o 12% menší krútiaci moment [8].

Sila predpätia je znížená o 50% zúžením okraja tesnenia o 10% v porovnaní s bežnými ložiskami [12]. V kombinácii s vnútorným a vonkajším krúžkom s povrchmi zlepšenými tepelným spracovaním je životnosť 10-násobne vyššia ako u konvenčného ložiska [8]. Takéto zlepšenie životnosti umožňuje zmenšenie ložísk, čo vedie k zníženiu hmotnosti až o 50% [11]. Technológia EQTF je ideálna pre prenosy, ktoré sú typicky kompaktnejšie - napríklad v dvojstupňových prevodovkách [8].

Redukcia plochy klzu je priamo účinná na zníženie trenia v ložisku. Z tohto dôvodu sa do kliebok vyrobených z tvarovaného oceľového plechu pridalo vybranie, aby sa zmenšila sklzová plocha, ako je znázornené na obr. 6. V dôsledku toho sa zmenšila veľkosť kontaktnej plochy medzi guľôčkami a kliebkou [15].



Obr. 6 Vybranie v kliebke

Ložiská vybavené tesneniami sa používajú vo vnútri prevodoviek, aby sa zabránilo prenikaniu prachu z prevodoviek a iných nečistôt [12]. Ložiská pre prevodovky musia ponúkať nízke trenie a spĺňať náročné požiadavky na pevnosť, dlhú životnosť a pevnosť pri tečení. Nové ložiská obsahujú plastovú kliebku vystuženú vláknami, ktorá poskytuje 2,5-násobnú životnosť existujúcej konštrukcie ložiska [14].

Na celkový krútiaci moment vplyva viacero faktorov ako napríklad šmykový krútiaci moment alebo miešací moment. Šmykový krútiaci moment v oleji medzi kliebkou a guľôčkami je určený špecifikáciou pre kliebku [15]. Novo vyvinuté guľkové ložiská s ultra nízkym trením znižujú trenie na polovičnú úroveň vďaka vlastnostiam produktu, ktoré sú uvedené nižšie [12]. Ložisko s hlbokou drážkou dosahuje približne 25% redukciu krútiaceho momentu v porovnaní s bežným výrobkom. Použitie plastovej kliebky vystuženej vláknami znižuje odolnosť mazacieho oleja proti premiešaniu až o

30%, bez toho, aby sa významne zmenila menovitá kapacita alebo veľkosť ložiska. Odsadená drážka umožňuje ďalšie zmenšenie veľkosti a hmotnosti ložiska, aby sa stali účinnejšími [14].

Mazanie v ložiskách je vo forme oleja alebo maziva. Mazivo zvyčajne vydrží dlhšie, vďaka zahusťovadlám, ktoré udržuju mazaciu vrstvu medzi obežnými dráhami a valivými elementmi. Olej je bežnejší pre otvorené ložiská alebo pre motory s nízkym krútiacim momentom alebo vysokou rýchlosťou. Nižšia viskozita olejov prináša menší odpor ako mazivo [13]. V podmienkach mazania, ktoré predpokladá mazanie hmlou alebo vstrekaním, je krútiaci moment veľmi malý. Z tohto dôvodu sa tento faktor zväčša ignoruje zo svojej úvahy o redukcii krútiaceho momentu [15].

3.1.4 Iné ložiská

Medzi použitia valivých ložísk v automobile patrí tiež celkom zaujímavé využitie pri turbodúchadlách (obr. 7). Tieto ložiská musia mať nízke trenie, byť schopné pracovať pri extrémnych podmienkach [20]. Rýchlosti môžu dosiahnuť až 200 000 ot/min a teploty až 350 °C. Používané ložiská s keramickými guľôčkami od JTEKT majú optimálnu vnútornú konštrukciu vďaka zlepšenej tepelnej odolnosti ložiskových krúžkov a materiálov kliebok [16]. Typicky tieto ložiská uhlového kontaktu využívajú okrem bežných častí ložiska aj vnútorný krúžok turbíny a rad trysiek na reguláciu prietoku oleja alebo tlmičov stláčania filmu [20].

Následné zvýšenie účinnosti turbíny umožňuje zníženie turbo-oneskorenia. Konštrukcia guľôčkových ložísk tiež znižuje množstvo potrebného maziva pre plynulý chod [16]. Tieto typy ložísk sa otáčajú až šesťkrát rýchlejšie ako akékoľvek iné ložisko vozidla, preto je chladené prúdom mazacieho oleja a ložiskové materiály musia odolávať extrémnym podmienkam počas celej životnosti turbodúchadla [20].



Obr. 7 Gulôčkové ložisko v turbodúchadle

Ložiská vodných čerpadiel sa dodávajú v dvoch typoch. Jeden typ sú guľôčky a druhý typ valčeky [21]. Tieto ložiská sú v podstate štandardné dvojradowé ložiská. Ložiská vodných čerpadiel nemajú vnútorný krúžok, ale namiesto toho majú obežné dráhy priamo obrábané do hriadeľa [22]. Konštrukcia guľôčkového ponúka podstatne vyššiu radiálnu a axiálnu nosnosť, čo je obzvlášť dôležité pri podpore ventilátora alebo

zaťaženia pásu [21]. Dobrá nosnosť a vysoká rýchlosť otáčania umožňujú veľký prietok vodného čerpadla [22].

Najnovšie tesnenia ponúkajú päťkrát vyššiu odolnosť ako bežné. V dôsledku toho sa životnosť za mokra zvýši päťkrát. Mazivo je vynikajúce z hľadiska odolnosti voči vode, teplu a hrdzi. Na životnosť pozitívne vplyva aj nová ocel' s nízkym obsahom kyslíka a vysokou čistotou, ktorá má životnosť trikrát dlhšiu ako u bežných ložísk [21]. Konce ich hriadeľa sa obvykle rozprestierajú za vonkajším krúžkom na oboch stranách [22]. Toto ložisko zaisťuje, že chladiaca kvapalina lepšie cirkuluje v chladiacich obvodoch, je schopné udržať zvýšený tlak a negeneruje žiadne teplo [21].

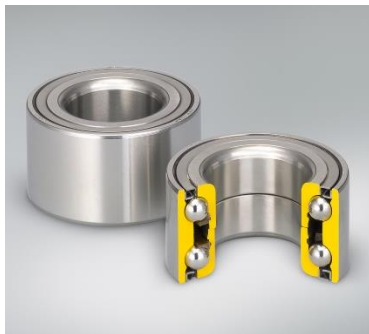
3.2 Ložiská v elektromobiloch

So vzostupom hybridných a plne elektrických automobilov sa mení aj počet ložísk použitých vo vozidle [23]. V prípade čistých elektromobiloch (ďalej EV), kde je elektrický motor jediným zdrojom pohonu vozidla, bude celkový počet ložísk v pohonnej jednotke pravdepodobne znížený v porovnaní s bežným pohonom. Typické architektúry pohonu používajú okolo 8 ložísk medzi elektromotorom a prevodovkou [25]. V prípade hybridných automobilov (ďalej HEV) zostáva počet ložísk približne rovnaký. Počet ložísk kolies vo vozidle na druhú stranu zostane rovnaký aj s rovnakými alebo podobnými vlastnosťami a parametrami, preto sa im budeme venovať až a iba v tejto časti [23].

3.2.1 Ložiská kolies

Ložiská kolies musia podporovať váhu vozidla pri jazde po rôznych typoch ciest a iných nerovnosti, zatiaľ čo sa kolesá môžu stále otáčať s minimálnym trením pri tisícoch otáčok za minútu. Ložisko musí byť v bezchybnom stave aby pracovalo spoľahlivo [5]. Musí byť taktiež sebestačné a tesne uzavreté, aby sa zabránilo kontaminácii prachom a vodou. Moderné ložiská kolies sú dostatočne trvanlivé, aby to všetko dosiahli [7]. Ložiská kolies môžeme rozdeliť do 3 generácií [3].

1. Generácia (obr. 8) sa skladá zo samostatného vnútorného a vonkajšieho krúžku [3]. Sú to uzavreté tandemové ložiská v tvare X alebo O s valivými elementmi [5].



Obr. 8 Ložisko prvej generácie



Obr. 9 Ložisko druhej generácie

2. generácia (obr. 9) je význačná tým, že vonkajší krúžok ložiska je integrovaný na koleso alebo brzdový kotúč. Valivé elementy a vnútorný krúžok sú zabudované do vonkajšieho krúžku [3]. Tato generácia už môže byť vybavená podľa potreby aj snímačom ABS [5].

3. generácia (obr. 10) sa skladá už z dvoch integrovaných krúžkov. Jeden krúžok nesie vnútornú drážku a slúži na zavesenie. Ďalší krúžok sa pripája na kĺby/koleso a nesie vonkajšiu drážku ložiska. [3]



Obr. 10 Ložisko tretej generácie

Ložisko náboja podporuje hmotnosť vozidla [4], a súčasne zabezpečuje bezpečnú jazdu a pohodlie plynulým pohybom ložiska [3].

Kuželíkové ložiská sú najlepšou alternatívou, pretože efektívnejšie podporujú axiálne aj bočné zaťaženie a môžu byť vystavené extrémnym otrasom, napríklad nárazom z výtlkov. Kuželíkové ložiská sa zvyčajne montujú v pároch a majú opačne orientované valivé elementy, takže môžu odolávať namáhaniu v oboch smeroch [7]. Väčší povrch kuželov im umožňuje podporovať väčšie zaťaženie ako guľkové ložiská, čo je dôvod, prečo sa kuželíkové ložiská často používajú vo väčších, ťažších vozidlách [8].

Ložiská kolies sú vyrobené z ušľachtilej ocele a vnútorné a vonkajšie krúžky, ako aj valce alebo guľôčky sú tepelne spracované, aby sa im vytvrdili svoje vonkajšie povrchy. To zlepšuje odolnosť voči opotrebeniu a schopnosť ložiska zvládnuť zaťaženie [8].

Ložiská, ktoré sa používajú na nábojoch poháňajúcich predné kolesa sú prevažne dvojica dvojradových guľôčkových alebo kuželíkových ložisk (obr. 11), pretože hmotnosť vozidla je viac sústredená v prednej časti automobilu kvôli pozícii motoru [2].



Obr. 11 Dvojradové guľôčkové ložisko kolesa

Staršie automobily sú vybavené ložiskami predného náboja, ktoré sa dajú vybrať, demontovať, vyčistiť a znovu naplniť mazivom. Keďže otáčanie kolesa spôsobuje vysoké trenie, ložiská musia byť neustále mazané kvôli zníženiu trecieho momentu [2], preto bývajú tieto ložiská plné maziva. Ak začne mazivo unikať, ložisko sa predčasne opotrebuje. Zle tesnenie tiež spôsobuje vniknutie nečistôt, čo tiež vedie k skorému opotrebeniu [5]. Ako mazivo sa používajú mazacie tuky alebo mazacie oleje [2].

Dnes predávané novšie vozidlá sú vybavené ložiskami kolies, ktoré sú vložené vo vnútri nábojovej zostavy a nevyžadujú žiadnu údržbu [7], preto sú už naplnené mazivom, ktoré zabezpečí mazanie po dobu celej jeho trvanlivosti. Na udržanie maziva vo vnútri sú používané presne vyrobené tesnenia, ktoré taktiež slúžia ako ochrana pred vniknutím vody alebo iných nečistôt [2]. Strata maziva môže viesť k odlupovaniu, praskaniu alebo dokonca k zadreniu [8]. Najväčším faktorom poškodenia s ohľadom na nečistoty býva práve voda. Ta spôsobuje hrdzavenie ložiska a tiež znehodnotenie maziva. Ložiská pri bežných automobiloch nie sú niekedy dostatočne odolné voči preniknutiu vody na rozdiel od terénnych off-road vozidiel, kde sa berie do úvahy cesty kontakt s bahnom, pieskom atď. [4]. Utesnené ložiská kolies sú skonštruované pre životnosť viac ako 161 000 km a mnohé z nich sú schopné dosiahnuť dvojnásobnú vzdialenosť [7].

Najnovšie ložiskové jednotky a ich tesnenia sú taktiež vybavené integrovanými generátormi magnetických impulzov, ktoré vytvárajú signál rýchlosti pre systém ABS v snímači rýchlosti otáčania kolies [2]. Chybné ložiská kolies môžu ovplyvniť protiblokovací brzdový systém vozidla (ABS). Snímače rýchlosti kolies sú veľmi citlivé na zmeny vo vzduchovej medzere medzi špičkou snímača a krúžkom snímača [7]. Porucha ložiská môže viesť až k neželanému predĺženiu brzdenia dráhy [2].

3.2.2 Využitie v motore

Špecifické prvky EV/HEV, najmä vyššia hustota výkonu a vyššia rýchlosť, zväzujú účinky trenia. Hnacie ústrojenstvo HEV je zložitejšie ako u konvenčného automobilu - kvôli potrebe prepínať medzi elektrickým a spaľovacím motorom alebo používať oba naraz.

Kritickým komponentom v hnacom ústrojenstve HEV je štartovací generátor poháňaný pásom (ďalej BSG), ktorý obnovuje energiu a napája ho späť do motora, čím zvyšuje krútiaci moment a výkon motora [26].

Pre najnovšiu verziu BSG vyvinulo SKF novú konštrukciu polohovacieho ložiska rotora, ktorú možno použiť buď so synchronnými alebo indukčnými trakčnými motormi, ktoré sa používajú v elektrických a hybridných vozidlách. Polohové ložisko rotora je navrhnuté tak, aby malo zvýšenú odolnosť voči extrémnym podmienkam [26]. Ložisková jednotka SKF Rotor Positioning Sensor - (polohovacie ložisko rotora) je určená na zlepšenie riadenia motorov s permanentnými magnetmi. Jednotka integruje ložisko s nízkym trením a inteligentným snímačom v jedinom kompaktnom a nízkom zaťažení. [27].

K dispozícii je aj jednotka ložiska snímača motora SKF. To poskytuje impulzy snímaču, pre presné meranie otáčok motora, smeru a inkrementálnej polohy v reálnom čase, spolu s nízkym trením, zníženým hlukom a funkčnosťou vysokorýchlostného ložiska [27]. Odoláva nepretržitým teplotám do 150 ° C, nie je ovplyvnené vážnymi poruchami magnetického poľa alebo vysokými úrovňami vibrácií a môže znížiť zvlnenie krútiaceho momentu a elektrický šum [26].

Ak sú motory zabudované do prevodovky alebo nápravy, kde sú ponorené do oleja, bude dôležitá elektrická a tepelná vodivosť mazacieho média. Otáčky motora môžu prekročiť 25 000 ot./min., čo si vyžaduje, aby príslušné ložiská, tesnenia a ostatné komponenty boli správne namazané [25]. Celkovo vyššia presnosť dodaná prístrojom umožňuje

elektromotoru bežať tichšie, čo poskytuje plynulejšiu jazdu a vyššiu účinnosť. Ďalšou výhodou je jednoduché začlenenie do zostavy BSG [26].

Dvojradowé guľôčkové ložiská sú špeciálne v tom, že majú uhlový kontakt a rozdelený vnútorný krúžok, ktorý je schopný zvládnuť náročné kritéria zníženej hmotnosti a prierezu. Je jedinečné aj vďaka použitiu bezkontaktného tesnenia, čo predĺži životnosť maziva až o dvojnásobok a tým predĺži aj samotnú výkonnosť ložiska. Potreba vyššej trvanlivosti viedla k rapidnej zmene, prechodu od klasických oceľových ku keramickým valivým elementom na baze nitridu kremíka, čo prinieslo radu výhod. Môžeme sa stretnúť s čisto keramickým prevedením-všetky časti ložiska sú z keramiky alebo s hybridom, kde sa keramické valivé elementy odvaľujú v oceľových krúžkoch. Medzi výhody keramických ložísk patrí nižšia hmotnosť guľčiek až o 40% ako pri oceľových v závislosti od použitých materiálov a ich veľkosti a môžeme znížiť odstredivé zaťaženie.

Tepelne charakteristiky sú tiež veľmi prívetivé už len kvôli minimálnej tepelnej rozťažnosti aj pri veľmi veľkých teplotách. Pre príklad môžeme použiť hybridné guľôčkové ložisko, ktoré dokáže pracovať až pri 220 000 ot./min. a teplote 300 °C [30].

Ložiská v elektromotoroch taktiež podopierajú rotor a udržiavajú konzistentnú vzduchovú medzeru medzi rotorom a statorom, ako aj prenášajú zaťaženie z hriadeľa na rám motora. Čo sa týka samotnej konštrukcie ložísk, došlo k výraznej inovácii v oblasti technológie ložiskových materiálov, ako aj presných strojárnských a výrobných procesov. NSK vyvinula Z Steel, ktorá predĺžila životnosť svojich ložísk v porovnaní s konvenčnou ložiskovou oceľou. Toto bolo skombinované so zlepšenými návrhmi mazania a tesnenia kliebok, ako aj keramickými a živicovými povlakmi. Zlepšením povrchovej úpravy valivých telies a obežných dráh v ložisku sa znížia úroveň trenia, čo znižuje spotrebu energie a hluk [29].

Na nízky krútiaci moment vplýva taktiež zníženie počtu valivých elementov, optimálna veľkosť guľčiek a špeciálne tvarovane kliebky [29]. Štartér 48V-pásového alternátora (BAS) pracuje pri zvýšenej rýchlosti, zaťažení a teplote, vďaka guľôčkovým ložiskám eDrive - v tomto prípade guľôčkovým ložiskám s hlbokými drážkami. Vyznačujú sa veľmi nízkym trením a sú špeciálne určené pre elektrické a hybridné hnacie ústrojenstvo [26]. Ložiská e-Drive dosahujú nižšej úrovne trenia a rozptylu tepla, čo podporuje vyššiu účinnosť elektromotora a prevádzkové rýchlosti. Tieto ložiská zlepšujú účinnosť, hustotu výkonu a spoľahlivosť batérií. Následne umožňujú automobilom zvýšený dojazd, zatiaľ čo životnosť batérie sa predĺži znížením počtu nabíjacieho cyklov [28].

Ložiská e-Drive využívajú patentovanú kliebku z polymérov, ako aj optimalizovanú geometriu ložiskovej dráhy, ktorá pomáha udržať veľmi presnú vzduchovú medzeru, čo má za výsledok odolnosť voči silným poruchám magnetického poľa [28]. Špeciálne upravené vysokoteplotné mazivo vedie k zníženiu trenia až o 30% [26] a umožňuje optimálny výkon vo vysokorýchlostných aplikáciách. Pri použití súpravy optimalizačných ložísk a tesnení SKF na elektrickom trakčnom motore a prevodovke sme schopný dosiahnuť navýšenie dojazdu o 1% v porovnaní s bežnými alternatívami. Tieto funkcie umožňujú vyššie prevádzkové rýchlosti s nízkym vlastným

ohrevom a krútiacim momentom počas životnosti výrobku alebo za podmienok maximálneho axiálneho zaťaženia [28].

Energeticky úsporné guľôčkové ložiská e-Drive môžu byť aj integrované so snímačom polohy rotoru ako vidíme na obr. 12, aby sa zvýšila účinnosť elektromotora. Ložiskové zariadenie snímača polohy rotorov bolo nedávno rozšírené pre trakčné motory a môže zlepšiť obnovu energie počas brzdenia a znížiť elektrický šum. Jeho senzory poskytujú analógové signály pre určenie uhlovej polohy rotoru, Mimo iné je ložisková jednotka odolná aj proti vibráciám a teplotám do 150 °C. Toto riešenie dodáva potrebné informácie pre sínusové alebo vektorové riadenie synchronného motora s permanentnými magnetmi. Kuželové a guľôčkové ložiská e-Drive do elektrického motora a prevodovky dnes pomáhajú znižovať trenie a hluk v elektrickom pohone, čo zväčšuje kvalitu jazdy vozidla a taktiež zvyšuje spoľahlivosť batérie [28].



Obr. 12 Guľôčkové ložisko e-Drive so snímačom polohy od firmy SKF

JTEKT ložisko využíva novo vyvinutú extrémne tuhú kľetku. Bežný jednovrstvový tvar tejto kľetky sa zmenil na dvojité podporný tvar, aby sa zvýšila tuhosť. Táto nová kľetka bola navrhnutá tak, aby zabránila vzniku interferencie medzi kľetkou a guľôčkami v dôsledku deformácie kľetky spôsobenej odstredivou silou pri vysokej rotácii. Táto kľetka zobrazená na obr. 13 je zostavená z dvoch identicky tvarovaných častí s ohľadom na produktivitu [16].



Obr. 13 Dvojdielna kľetka s vysokou tuhosťou

Životnosť ložiska je často určená aj režimom mazania a ako konštrukcia ložísk zaisťuje dostatočný prietok na všetky valivé prvky. Analýzu konečných prvkov a výpočtovú dynamiku tekutín je možné použiť na zlepšenie únosnosti a prietoku mazania, ktoré je potrebné pre každú aplikáciu starostlivo špecifikovať [29].

V ložiskách EV/HEV sa používajú nízko-viskózne mazivá a mazivá, ktoré sú prispôbené špeciálnym požiadavkám na jazdu EV. Tieto mazivá zabezpečujú vysokú odolnosť voči opotrebovaniu a odieraniu a tým aj dlhšiu životnosť pod oveľa tvrdšími prevádzkovými podmienkami a ťažkými režimami mazania, ktoré sú vyvolané používaním mazív so stále nižšou viskozitou.

Tieto oleje s nižšou hmotnosťou musia poskytovať dostatočné mazanie ložísk v rozsahu aplikačných podmienok, aby vyhovovali očakávaniam výkonu ložísk a pomáhali pri odstraňovaní tepla z hnacieho ústrojenstva. Požiadavky na mazanie v EV môžu mať v porovnaní s bežnou nápravou inú sadu výziev v závislosti od interakcie s elektromotorom a okolitými komponentmi [25]. Pretože transmisná kvapalina prichádza do styku s medenými vinutiami, izoláciami, laminátmi a vzácnymi materiálmi v motore a prevodovke, ochrana proti korózii je veľmi dôležitá. Okrem toho je žiaduce zvýšiť prevádzkovú teplotu kvapaliny, aby sa umožnilo prenikanie ešte väčšieho elektrického prúdu cez medené vinutie. Preto je vysoká oxidačná stabilita veľmi žiadaná [36].

Program údržby tiež zohráva úlohu pri predpokladanej životnosti ložiska a mal by zohľadňovať pracovné prostredie a prístupnosť k zariadeniu. Zlepšením tesniacich usporiadaní a optimalizáciou mazacej techniky sa môže doba údržby predĺžiť tak, aby sa zhodovala s ďalšími komponentmi, ako sú ložiská dvojkolesia. To ponúka klientovi lepšie úspory nákladov na údržbu a stratu produktivity [29]. Pretože EV používajú mnohé časti vyrobené z medi, najväčšou výzvou pre výrobcov mazív je zabezpečiť, aby EV mazivo nekorodovalo medené komponenty. Takéto korozívne mazivo by mohlo rozpúšťať meď a uložiť ju na miestach, ktoré musia byť elektricky izolované. Pretože niektoré existujúce mazivá hnacieho motora, ktoré sú žieravé voči medi, budú musieť byť preformulované [25].

EV motory sa otáčajú pri vysokých rýchlostiach a môže sa vyskytnúť veľké zaťaženie nevyvážením, čo vedie ku creepu v ložiskách a to môže viesť k opotrebovaniu samotných ložísk. Akonáhle sa v ložiskách vyskytne creep, puzdro prevodovky na vonkajšej strane ložísk sa začne opotrebovať. Obava spočíva v tom, že keď dôjde k takémuto opotrebovaniu, môže to viesť k zvýšeniu vibrácií pochádzajúcich z prevodovky [34].

Ložiská NSK Creep-Free sú ukotvené v puzdre pomocou O-krúžku na vonkajšom povrchu vonkajšieho remeňa a ako také sú účinné pri prevencii creepu pri rotačnom zaťažení [34]. Tieto ložiská majú dvojnásobnú odolnosť voči tečeniu ako pri normálnych ložiskách. Optimalizáciou O-krúžku a rozmerov drážky sa podarilo zaistiť dostatočnú hodnotu maximálneho dovoleného napätia v ohybe na ploche medzi puzdrom a ložiskom, aby sa dosiahlo dvojnásobnej úrovne odolnosti voči creepu aj pri vysokých prevádzkových teplotách [35]. Zlepšená odolnosť voči creepu pri rotačnom zaťažení je vďaka materiálu O-krúžku, ktorý má vynikajúcu odolnosť pri vysokoteplotnom oleji [34] a dosahuje o 80% menej trvalého skreslenia v O-krúžku pri vysokých teplotách v porovnaní s konvenčným materiálom [35].

3.2.3 Využitie v prevodovke

Pri EV postačuje jeden alebo dva rýchlostné stupne, založené na väčšej účinnosti elektrického motora v porovnaní s ICE. Pri znížení počtu prevodových stupňov dochádza k zníženiu dopytu po ložiskách [25].

Kuželikové ložisko s plastovou kľetkou je určené pre automobilový trh s prevodmi a umožňuje 20% zníženie trenia v porovnaní s bežnými výrobkami s použitím oceľovej kľetky [31]. Ložisko je určené pohonné jednotky ako produkt s nízkou spotrebou paliva. Prevodové ložiská musia byť schopné pracovať pri veľmi ťažkých podmienkach mazania [32], ako napríklad pri použití kvapalín s nízkou viskozitou alebo pri vypnutom olejovom čerpadle v režime s elektromotorom v hybridných vozidlách [31]. Vlastnosti plastu umožňujú vytvárať zložitejšie tvary, ktoré ponúkajú pokročilé vlastnosti ako schopnosť minimalizovať požiadavky vnútorného priestoru ložiska pomáha zabrániť prietoku akýchkoľvek nadbytočných objemov maziva a to zase pomáha znížiť odpor miešania. Pridanie olejového bazéna zaisťuje stabilný prísun maziva na klzné plochy kuželíkov, čím sa zlepšuje mazací výkon.

Pre úplné splnenie rôznych prevádzkových podmienok je kľetka k dispozícii v troch plastových materiáloch: PA46, PA66 a L-PPS (lineárny polyfenylénsulfid) so špeciálnymi prísadami a vysokoteplotným prevedením [32].

Vyvinutý s technológiou analýzy NSK, ktorá zaisťuje optimálnu pevnosť kľetky pre najvyššiu spoľahlivosť [31], a tak môžeme medzi výhody zaradiť znížené trenie o 20% v porovnaní s existujúcimi výrobkami a schopnosť pracovať s mazaním s nízkou viskozitou a s mazaním vo veľmi malom objeme [32].

Ihličkové axiálne ložisko, ktoré je ľahšie, kompaktnějšíe a má dlhšiu životnosť sa taktiež používa v prevodovkách. Prevodový olej s nízkou viskozitou býva použitý na zlepšenie účinnosti prenosu, čo však spôsobuje problémy v mazaní. Ak beží hybrid na spaľovací motor, všetko funguje hladko, pokiaľ sa neprepne na elektropohon. Olejové čerpadlo sa niekedy zastaví a ložisko je menej mazané ako je potrebné. Tento produkt je navrhnutý pre vynikajúci výkon pri ťažkých podmienkach mazania a pozitívne vplyva na spotrebu paliva a redukciu emisii CO₂. Ložisko je vyrobené z ocele PCR5, ktorá ma lepšiu húževnatosť dosiahnutím znížením podielom uhlíka a silikónu a na druhej strane zvýšením chrómu. To dovoľuje mať hrúbku len 2,5 mm a viac. Životnosť tohto ložiska je 3x dlhšia ako u bežného ložiská a o 20% je lepšia kompaktnosť [33].

Spoločnosť NSK tiež vyvinula tiché ihlové ložisko pre prevodovky EV, ktoré znižuje hluk o tretinu v porovnaní s tromi konvenčnými výrobkami. Tato inovácia je ideálna pre elektrické komponenty namontovane vo vozidlách s mimoriadne tichými interiérmi pri elektromobiloch a hybridných vozidlách. Konce ihličkových valivých elementov sú so zakriveným oblúkom aby boli ložiská schopne odolávať vyššiemu zaťaženiu, čo si vyžaduje presné obrábanie v porovnaní s bežným výrobkom. Toto vylepšenie valčeka v porovnaní s konvenčným výrobkom znamená zníženie úrovne hluku o 1/3, čo pomáha vyrábať luxusne elektromobily aj hybridné vozidlá s tichými interiérmi [36].

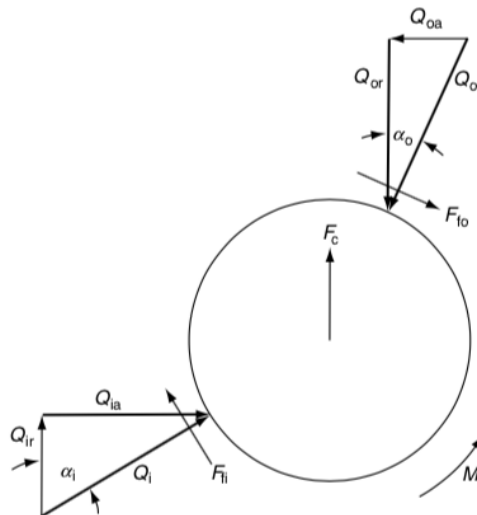
3.3 Kritické parametre ložísk

V predchádzajúcich kapitolách boli vymenované niektoré ložiská používané v automobiloch aj s ich parametrami a požiadavkami. Kritické parametre už spomínaných ložísk sa určujú na základe presne daných noriem. Nasledujúca kapitola je dôležitá pre pochopenie súčasného vývoja maximálnych hodnôt prevádzkových rýchlostí a teplôt či životnosti ložísk. V tejto časti budú rozobraté dynamické účinky pôsobiace na ložisko a valivé elementy, spôsoby mazania v EV/HEV, či najnovšie materiály klieťok a valivých elementov spoločne s ich výhodami a nevýhodami. Na záver tejto kapitoly bude bližšie zoznamenie s rizikom poškodenia ložísk následkom elektrických prúdov, ktoré sa vyskytujú v EH/HEV.

3.3.1 Dynamické účinky pôsobiace na ložisko

3.3.1.1 Odstredivá sila

Na obr. 14 sú znázornené pôsobenie zaťaženia Q_i , Q_o na guľôčku, gyroskopický moment M_g , trecia sila F_t a odstredivá sila F_c pôsobiaca radiálne smerom von pre podmienky rovnováhy za predpokladu, že ložiskové krúžky sú nepružné.



Obr. 14. Zaťaženia pôsobiace na guľôčku pri vysokorýchlostnom ložisku

Rovnica 1 vyjadrujúca odstredivú silu F_c pôsobiacu na guľôčku [49]:

$$F_c = \frac{\pi^3 \cdot \rho}{10800g} \cdot D^3 \cdot n_m^2 \cdot d_m \quad (1)$$

kde ρ je hustota guľôčky, D je priemer guľôčky, n_m obežná rýchlosť guľôčky/klieťky, d_m roztečný priemer ložiska, g je gravitačné zrýchlenie. Pre oceľové guľôčky [49]:

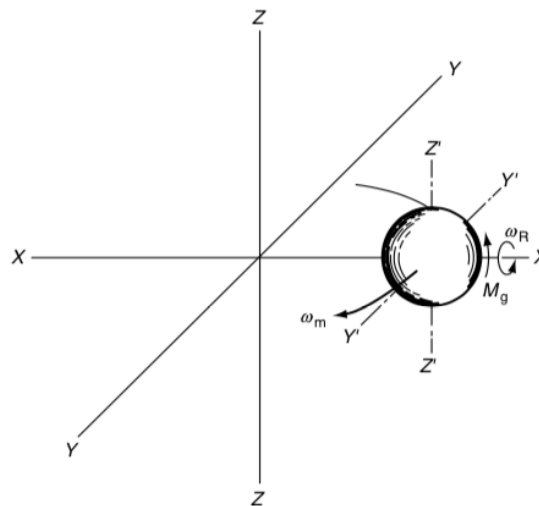
$$F_c = 2,26 \cdot 10^{-11} \cdot D^3 \cdot n_m^2 \cdot d_m \quad (2)$$

Pre ocelové ložisko s roztečným priemerom ložiska $d_m = 50$ mm, priemerom guľôčky $D = 7$ mm a rýchlosťou otáčania $n_m = 20\,000$ ot./min. je to :

$$F_c = 2,26 \cdot 10^{-11} \cdot 7^3 \cdot 20\,000^2 \cdot 50 = 155 \text{ N}$$

3.3.1.2 Gyroskopický moment

Zvyčajne sa dá predpokladať s minimálnou stratou výpočtovej presnosti, že otočný pohyb v dôsledku gyroskopického momentu, ktorý je znázornený na obr. 15, je zanedbateľný [49]. Gyroskopický moment vzniká pri súčasných rotáciach. Unášavý pohyb koná guľôčka voči osi otáčania (ω_m okolo osi Z), relatívny pohyb koná guľôčka vďaka valeniu okolo vlastnej osi (ω_R okolo osi X guľôčky, kt. mení s jej polohou ale stále leží v rovine XY). Vektorovým súčinom $\omega_m \times \omega_R$ sa získa gyroskopický moment.



Obr. 15 Gyroskopický moment v dôsledku súčasnej rotácie okolo neparalelných osí.

Nasledujúci vzťah je získaný pre guľôčkové ložiská vyjadruje veľkosť gyroskopického momentu [49]:

$$M_g = \frac{1}{60} \cdot \rho \cdot \pi \cdot D^5 \cdot \omega_R \cdot \omega_m \cdot \sin\alpha \quad (3)$$

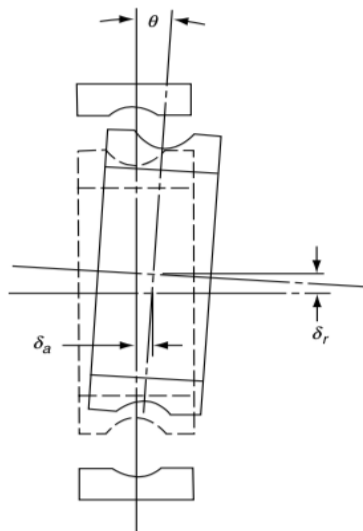
kde ρ je hustota materiálu guľôčky, D je priemer guľôčky, ω_m je uhlová rýchlosť guľôčky okolo osi ložiska, ω_R je uhlová rýchlosť guľôčky voči vlastnej osi a α je uhol polohy guľôčky. Vzťahy pre výpočet ω_R , ω_m [49]:

$$\omega_R = \frac{2 \cdot \pi \cdot n_R}{60} \quad (4)$$

$$\omega_m = \frac{2 \cdot \pi \cdot n_m}{60} \quad (5)$$

Na analyzovanie následkov zaťaženia vo vysokorýchlostnom guľôčkovom ložisku slúži obr. 16, ktorý ukazuje posuny vnútorného krúžku guľôčkového ložiska

vzhľadom na vonkajší krúžok v dôsledku zovšeobecneného systému zaťaženia, vrátane radiálneho, axiálneho a momentového zaťaženia [49]. Kontaktné plochy sú s vysokou presnosťou nadimenzované pre dosiahnutie čo najoptimálnejších výkonov, a tým pádom aj malá nerovnosť vzniknutá deformáciou krúžkov, valivých elementov či obežných dráh vedie k zvýšeniu odporu valivého trenia a zníženiu výkonu. Vyosením častí ložiska taktiež vznikajú vibrácie a hluk.



Obr. 16 Posunutie vnútorného krúžku pri fixovanom vonkajšom krúžku v dôsledku použitia kombinovaného radiálneho, axiálneho a momentového zaťaženia [49]

3.3.1.3 Trecí moment

Primeraný odhad celkového trecieho krútiaceho momentu daného valivého ložiska je súčtom trecieho momentu od zaťaženia M_l a trecieho momentu viskózneho trenia M_v , to znamená [50]:

$$M = M_l + M_v \quad (13)$$

Keďže hodnoty M_l a M_v sú založené na empirických vzorcoch - účinok kĺzania klietky je započítaný [50]. Vzťahy pre výpočet zložiek celkového trecieho momentu M_l a M_v budú ukázané na nasledujúcej strane.

V prípade vysokorýchlostných guľôčkových a valčekových ložísk, v ktorých sa odstredivé sily valivých elementov a gyroskopické momenty stávajú významnými, má trenie v dôsledku klzných pohybov značný nárast.

Strata výkonu spôsobená trením ložiska sa môže vypočítať z nasledujúceho vzťahu [50]:

$$H = 0,001 M \cdot \omega \quad (14)$$

kde H sú výkonové straty, M je celkový trecí moment ložiska v $[\text{N} \times \text{mm}]$ a ω je uhlová rýchlosť ložiska v $[\text{rad/s}]$. Použitím otáčiek ložiska n dostaneme [50]:

$$H = 1,047 \cdot 10^{-4} M \cdot n \quad (15)$$

3.3.1.4 Trecí moment od zaťaženia

V rámci obmedzení prevádzky s pomalými až stredne veľkými otáčkami môžu byť veľmi užitočné empirické rovnice pre trecí moment valivých ložísk. Potom je rovnica na popísanie momentu [50]:

$$M_1 = f_1 \cdot F_\beta \cdot d_m \quad (7)$$

kde d_m je roztečný priemer ložiska, f_1 je faktor závisiaci na dizajne ložiska a a relatívnom zaťažení [50]:

$$f_1 = z \left(\frac{F_s}{C_s} \right)^y \quad (8)$$

kde F_s je statické zaťaženie a C_s je základná statická únosnosť ložiska. Hodnoty z a y závisia na type ložiska ako je v ukázané v tabuľke 1. Hodnoty C_s sú všeobecne uvedené v katalógoch výrobcov spolu s údajmi umožňujúcimi výpočet F_s .

Sila F_β v rovnici 7 a 9 závisí od veľkosti a smeru aplikovaného zaťaženia. Pre radiálne guľôčkové ložiská môže byť vyjadrená vo forme rovnice takto [50]:

$$F_\beta = 0,9 \cdot F_a \cdot \cot g \alpha - 0,1 \cdot Fr \quad \text{alebo} \quad F_\beta = Fr \quad (9)$$

Z rovníc 9 sa použije tá, kde je poskytnutá väčšia hodnota F_β . Pre guľôčkové ložiská s hlbokými drážkami s menovitým kontaktným uhlom 0° , prvá rovnica môže byť aproximovaná na [50]:

$$F_\beta = 3 \cdot F_a - 0,1 \cdot Fr \quad (10)$$

Guľôčkové ložisko	Kontaktný uhol [°]	z	y
Radiálne s hlbokou drážkou	0	0,0004-0,0006 ^a	0,55
S uhlovým kontaktom	30-40	0,001	0,33
Axiálne	90	0,0008	0,33
Dvojradá naklápacie	10	0,0003	0,40

^a Menšia hodnota sa vzťahuje na ľahšie ložiská, vyššia na ťažšie

Tabuľka 1 Hodnoty parametrov z a y .

3.3.1.5 Moment viskózneho trenia

V prípade ložísk, ktoré pracujú pri miernych rýchlostiach, sú stanovené nasledujúce empirické rovnice na odhad krútiaceho momentu ložiska spôsobeného obiehajúcimi valivými elementmi, keď prechádzajú viskóznym mazivom, ktoré zaberá voľný priestor v ložiskách [50]:

$$M_v = 10^{-7} f_o (v_o n)^{2/3} d_m^3 \quad v_o n > 2000 \quad (11)$$

$$M_v = 160 \cdot 10^{-7} f_o d_m^3 \quad v_o n < 2000 \quad (12)$$

kde n v ot./min a v_o je uvedené v mm^2/s . V rovnici 11 a rovnici 10.4 je f_o faktor závisiaci od typu ložiska a spôsobu mazania. Konkrétne hodnoty sú uvedené v tabuľke 2. Rovnice 11 a 12 platia pre oleje so špecifickou hmotnosťou približne 0,9.

Druh guľočkového ložiska	Mazivo	Olejová hmla	Olejový kúpeľ	Olejový prúd
S hlbokou drážkou ^a	0,7-2 ^b	1	2	4
Naklápacie ^c	1,5 - 2 ^b	0,7 - 1 ^b	1,5 - 2 ^b	3 - 4 ^b
Axiálne	5,5	0,8	1,5	3
S uhlovým kontaktom ^a	2	1,7	3,3	6,6

^a Pre párové a dvojradé ložiská sa používa $2 \cdot f_o$

^b Nižšie hodnoty sa vzťahujú pre ľahké ložiská; vyššie hodnoty pre ťažké

^c Iba dvojradové ložiská

Tabuľka 2 Hodnoty faktoru f_o pre určité druhy a mazania ložísk

3.3.2 Ložiská so širokou tepelnou stabilitou

S rastúcim trhom s elektrickými vozidlami sú ložiská vystavené širšiemu rozsahu teplôt, od mrazov až po extrémne teplo. S vývojom elektrických komponentov sa stalo bezpodmienečne nutné, aby ložiská používané na podporu hnacích motorov EV mali nízku hlučnosť pri nízkych teplotách a zlepšenú životnosť pri zvýšených teplotách [38]. Pri bežných oceliach používaných pri ložiskách sa teploty pohybujú okolo 120 °C. Kvôli zamedzeniu zmeny rozmerov a zmäkčovaniu pri vyšších teplotách sa zmenilo zloženie a vykonali špeciálne tepelné a povrchové spracovania [37].

Jedným príkladom je AS-(advanced super performance) séria ložísk od NTN. Tieto ložiská majú zložitú štruktúru, v ktorej je celý valivý povrch pokrytý kovovým materiálom kvôli tvrdosti a zabraňuje skráteniu životnosti. Po použití tejto úpravy špeciálnej nehrdzavejúcej ocele sa vytvorili ložiská, ktoré odolávajú prevádzkovej teplote až 400 °C [37].

Limitné teploty pri univerzálnych plastoch sa pohybujú okolo 100 stupňov Celzia. To je pre prevádzkové teploty EV nedostačujúce pretože plasty sú náchylné na tepelné zmeny. Pridávanie teploty spôsobí tavenie a plast sa stáva neschopným odolávať dokonca aj nepatrne malým vonkajším silám. Na zlepšenie sa môže dosiahnuť na príklad naplnením materiálu uhlíkovými vláknami, sklenenými vláknami alebo inými plnidlami. V poslednej dobe sa používajú aj nanozložené plnivá. Ďalšia metóda je zhustenie siete pri zachovaní hmotnosti. Pomocou tejto metódy sa zlepši tepelná odolnosť a iné mechanické vlastnosti. Posledná je metóda zavádzania uhlík-fluoru, kyslíka a kremíka a kruhových štruktúr. Spoločnosť NTN vhodnou kombináciou vyvinula materiál, ktorého tepelná odolnosť presahuje 400 °C [37].

Zvýšením tekutosti maziva pri nízkych teplotách a optimalizáciou ložiska dosiahla spoločnosť NSK tiché operácie, ktoré výrazne znížili vibrácie, ktoré by sa normálne vyskytovali pri nízkych teplotách. Pri použití maziva, ktoré má základný olej s dobrou odolnosťou voči teplu v kombinácii s optimalizovaným ložiskom, NSK vytvorila

produkt, ktorý potláča degradáciu tukov a únik tuku, čím sa udržiava životnosť pri vysokých teplotách. Optimalizáciou typov a množstva zahusťovadla tukov NSK znížila odolnosť proti miešaniu. Výsledkom je, že tento nový produkt dosahuje o 20 až 40% menej trenia ako konvenčný produkt [38].

3.3.3 Ultra-rýchle ložiská

S rastúcim trendom veľkých rýchlostí rastie aj dopyt po vysokorýchlostných ložiskách. Odstredivá sila spôsobí zvýšenie zaťaženia pôsobiaceho na vonkajší krúžok [39]. Pri vysokej rýchlosti by sa mali riešiť tieto štyri základné problémy [48]:

- Potreba obmedziť vývoj trenia a tepla.
- Hrúbka mazacieho filmu/vrstvy by nemala byť príliš znížená následkom odstredivých síl.
- Mazivo by malo vydržať vysoké zaťaženie spôsobené odstredivými silami
- Mastné hrudky by nemali ľahko spadnúť späť do dráhy .

Maximálna rýchlosť otáčania ložísk mazaných mazivom je zvyčajne udávaná teplom generovaným v ložisku, ktoré sa v určitom okamihu už nemôže rozptýliť mimo ložisko. Referenčná hodnota sa nastaví zo zvyčajnej teploty okolia 20 °C pri zvýšení teploty o 50 °C, čo vedie k teplote 70 °C. Tieto teploty sú uvedené v norme ISO 15312: 2003. Táto maximálna rýchlosť valivých ložísk sa nazýva „referenčná rýchlosť“. Tabuľka 3 udáva referenčné otáčky pre bežné mazivo so zahusťovadlom lítia a minerálnym základovým olejom s viskozitou $100 < \nu < 200 \text{ mm}^2/\text{s}$ pri 40 °C a s 30% náplňou. Ak sa použijú základové oleje s vyššou viskozitou, bude trenie a tým aj generovanie tepla vyššie, čo povedie ku korekcii prípustnej maximálnej rýchlosti. To isté platí aj pre rastúce zaťaženie. Pri nižších zaťaženiach sa musí použiť aj korekčný faktor pre zaťaženie [48].

Typ guľôčkového ložiska	Ložiskový faktor b_f	Odporúčané limity pre rýchlostný faktor A pre pomer zaťaženia		
		$C/P \geq 15$	$C/P \approx 8$	$C/P \approx 4$
Radiálne	1	500 000	400 000	300 000
S hlbokou drážkou	1	500 000	400 000	300 000
S uhlovým kontaktom	1	500 000	400 000	300 000
Naklápacie	1	500 000	400 000	300 000

Tabuľka 3 Ložiskové faktory a limitné rýchlosti pre rýchlostný faktor $A = b_f \times d_m \times n$

Výrobcovia ložísk tiež špecifikujú tzv. „limitnú rýchlosť“. Obmedzenie rýchlosti je určené kritériami, ktoré zahŕňajú ako tvarovú stabilitu, tak aj pevnosť klietky, mazanie vodiacich plôch klietok, odstredivé sily pôsobiace na valivé elementy a iné faktory obmedzujúce rýchlosť. Maximálne otáčky, pri ktorých sa môže ložisko bezpečne pohybovať, sú určené minimálnymi hodnotami rýchlosti a limitnou rýchlosťou [48].

3.3.3.1 Mazanie

Režim vysokorýchlostného mazania pre ložisko s mazivom závisí od zaťaženia a typu ložiska. Napríklad pre bežné guľôčkové ložiská s hlbokými drážkami bežiacie pri nízkom zaťažení je to $dm \times n = 500\ 000\ \text{mm} \times \text{ot./min}$. Pri takých vysokých rýchlostiach by sa mali použiť špeciálne mazivá alebo modifikované prevedenia ložísk, aby sa dosiahol interval životnosti maziva / domazávania ako napríklad hybridné ložiská [48].

Plastické mazivo sa skladá z oleja, ktorý je fyzikálne zadržovaný v zahusťovadle kapilárnym pôsobením. Zahusťovadlom je všeobecne mydlo alebo iný materiál zložený z veľmi dlhých alebo skrútených molekúl, ktoré sú fyzicky prepojené a majú veľkú povrchovú plochu na zadržanie oleja. Mazivo sa chová ako mäkká pevná látka, ktorá je schopná odvádzať olej v kontrolovaných rýchlostiach a množstve, aby spĺňala požiadavky na spotrebu ložiska [50].

Plastické mazivo ponúka mazanie nasledujúcim spôsobom. Keď sa pohyblivé časti ložiska dostanú do styku s mazivom, malé množstvo oleja obsiahnutého v mazive sa prilepí na povrchy ložísk. Olej sa postupne degraduje oxidáciou, stratí odparovaním alebo odstredivou silou a časom sa olej v mazive v blízkosti ložiska úplne vyčerpá. Keď mazané kontakty spotrebujú olej prostredníctvom vyššie spomenutých faktorov, udržiavací tok udržiava rovnováhu, pokiaľ trvá dodávka maziva [50].

V porovnaní s mazaním olejom ponúka plastické mazivo nasledujúce výhody [50]:

- Znížená údržba, pretože nie je potrebné udržiavať hladinu oleja a nové mazivo sa musí pridávať menej často.
- Mazivo v správnom množstve je obmedzené na puzdro. Návrh skriniek je preto možné zjednodušiť.
- Môže sa dosiahnuť zamedzenie úniku maziva.
- Trecí moment ložiska a nárast teploty sú vo všeobecnosti priaznivejšie

Zahusťovadlá sú rozdelené do dvoch širokých tried: „mydlá a nemydlá“. Mydlá sú zlúčeniny mastnej kyseliny a kovu. Medzi bežné kovy používané pre mydlá patria hliník, bárium, vápnik, lítium a sodík. Veľká väčšina komerčných plastických mazív je mydlového typu, pričom lítium je najrozšírenejšie [50].

Lítiové mydlá sú rozdelené do dvoch typov: 12-hydroxystearát a komplex. Posledný uvedený materiál je odvodený od zložiek organickej kyseliny a umožňuje vyššie prevádzkové teploty. Horná hranica prevádzkovej teploty zvyčajného maziva na báze lítia je približne 110 °C. Pre mazivo na báze lítiového komplexu je horný teplotný limit približne na 140 °C. Naopak, spodné limity prevádzkovej teploty sú -30 °C a -20 °C. Kvalitné mazivá s lítiovým mydlom oboch typov sa vo veľkom rozsahu používajú v aplikáciách s tesniacim a mazacim tukom. Produkty na báze lítia našli akceptáciu vo viacúčelových mazivách a nemajú žiadne závažné nedostatky okrem ťažkých teplotných alebo zaťažovacích extrémov [50].

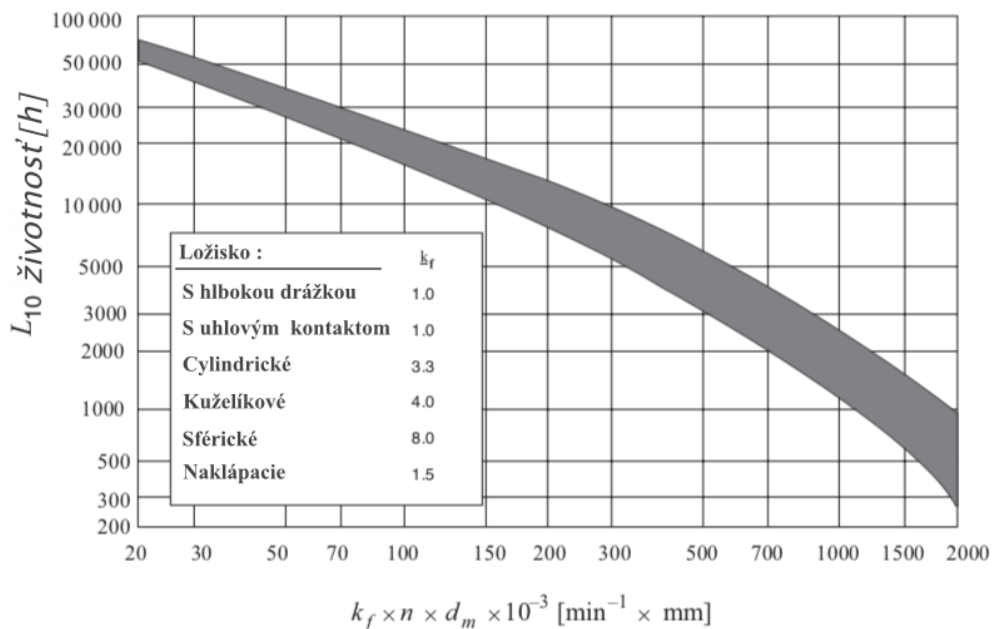
Podstatným problémom zahusťovadla na báze sodíka je slabá odolnosť voči vymývaniu vodou. Malé množstvo vody sa však emulguje do náplne maziva, čo pomáha

chrániť kovový povrch pred hrdzavením. Horný limit prevádzkovej teploty pre takéto tuky je iba 80 °C a dolný limit prevádzkovej teploty je klasických -30 °C. Sodíkové mazivá boli nahradené viac vodovzdornými výrobkami v aplikáciách, ako sú elektromotory a ložiská kolies. Následne boli vyvinuté tuky s komplexnou bázou sodíka, ktoré majú horné a dolné limity prevádzkovej teploty 140 °C a -20 °C [50].

Bezmydlové organické zahusťovadlá, vrátane močovín, amidov a farbív, sa používajú na zabezpečenie vyššej teploty, než je možné pri použití kovových zahusťovadiel. Zlepšená oxidačná stabilita oproti kovovým mydlám nastáva, pretože tieto materiály nekatalyzujú oxidáciu oleja. Body zvratu pre mazivá týchto typov sú všeobecne okolo 260 °C so všeobecne dobrými vlastnosťami pri nízkych teplotách. Bod zvratu je teplota pri ktorej sa mazivo mení na kvapalinu. Najobľúbenejšie z týchto zahusťovadiel je polymočovina, ktorá sa vo veľkej miere používa vo vysokoteplotných aplikáciách guľkových ložísk pre elektromotory [50].

Počas fázy rozprašovania je vývoj tepla určený hlavne konzistenciou maziva. Mäkké mazivo ľahko preteká späť, zatiaľ čo tuhé mazivo ostáva mimo drážky hneď, ako je tam vytlačené. Táto vlastnosť maziva sa nazýva channeling. Slabé charakteristiky channelingu spôsobia prúdenie maziva do koľaje, čo vedie k zvýšenému treniu a vývoju tepla [48].

Väčšina modelov životnosti je obmedzená na stredné rýchlosti. Model životnosti maziva vyvinutý spoločnosťou *Gesellschaft für Tribologie* (ďalej GfT) [51] (obr. 17) pokrýva pomerne širokú rýchlostnú oblasť.



Obr. 17 Intervaly mazania podľa nemeckej spoločnosti GfT. pre mazivá na báze lítiového mydla, prevádzkové teploty 70 °C a zaťaženie $P/C < 0,1$? [48].

Model životnosti plastického maziva [48]:

$$L_{10} = 20 \left(\frac{14 \cdot 10^6}{n \cdot \sqrt{d}} - 4d \right) \quad (16)$$

Pre priemer diery 20 mm a otáčky n 20 000 ot./min. je to:

$$L_{10} = 20 \left(\frac{14 \cdot 10^6}{20\,000 \cdot \sqrt{20}} - 4 \cdot 20 \right) = 1530 \text{ h}$$

Pri nižších rýchlostiach dominuje prvý člen, ktorý dáva viacmenej rovnú čiaru v grafe životnosti L_{10} na $dm \times n$. Pri vyšších rýchlostiach dominuje druhý výraz lebo čiara odvodenia odtiaľto vedie do vysokorýchlostných oblastí ako je na obr. 17 [48].

Pri guľkových ložiskách s kosouhlým stykom a otvorom 20 mm [10] by mala životnosť maziva dosiahnuť 15 000 hodín pri $dm \times n = 1,04 \times 10^6 \text{ mm} \times \text{ot./min.}$ ale len pár hodín pri $dm \times n = 1,8 \times 10^6 \text{ mm} \times \text{ot./min.}$ pri teplote 70 °C, ktoré sa definujú ako limit pre mazanie plastickým mazivom.

Pre ložiská s priemerom diery väčším ako 10 mm je však mazanie mazivom všeobecne obmedzené na hodnotu $dm \times n = 1,8 \times 10^6 \text{ mm} \times \text{ot./min.}$ [10].

3.3.3.2 Materiály klieťok

Hoci klieťky sú vyrobené z mnohých druhov materiálov, vrátane hliníka, S-Monel, grafitu, nylonu a liatiny, hlavné ložiskové produkty používajú oceľ. Pri valivých ložiskách, hlavne ale v guľôčkových ložiskách, tieto kovy nahrádzajú polyméry.

Obyčajná, nízko uhlíková pásová oceľ, sa používa pri hromadnej výrobe lisovaných, dvojdielných oceľových klieťok. Dvojdielne klieťky sú spojené mechanickými zámkami, nitmi alebo zvarmi. Materiál má pevnosť v ťahu 300-400 MPa. Mnohé klieťky sú povrchovo kalené alebo potiahnuté fosfátmi, aby sa dosiahli zlepšené charakteristiky opotrebenia.

Použitie polyméru, najmä nylonu-6,6 (polyamidu), ako materiálu klieťky, je rozšírené v mnohých aplikáciách valivých ložísk. Spracovanie polymérnych materiálov často umožňuje jednostupňovú výrobu komplexných konštrukcií, čím sa eliminujú operácie obrábania potrebné na výrobu oceľového komponentu. Polymérové klieťky majú tendenciu byť bez nečistôt, ktoré sprevádzajú výrobu kovových klieťok. Zvýšená čistota prispieva k zníženiu hluku ložiska. Ďalej sú polyméry pružnejšie ako kovy. To je výhodné pri montáži klieťok a pri prevádzke ložiska v niektorých náročných podmienkach zaťaženia.

Priaznivé fyzikálne vlastnosti polymérnych materiálov vedú v mnohých aplikáciách k výhodám výkonu klieťok; napríklad nízka hustota (znížená hmotnosť klieťky), dobrá chemická odolnosť, nízke trenie a tlmiace vlastnosti pre nízky krútiaci moment a tichý chod. Hlavnou nevýhodou použitia polyméru je zhoršenie počiatkových vlastností materiálu v dôsledku teploty, mazania a vystavenia životného prostredia. Poškodenie polyméru spôsobuje stratu pevnosti a pružnosti, čo je dôležité pre funkciu

klietky počas prevádzky ložiska. Otáčanie ložísk spôsobuje, že na klietku pôsobia odstredivé sily, ktoré ju radiálne deformujú. Nesprávne nastavenie vnútorného a vonkajšieho krúžku môže spôsobiť veľké namáhanie klietky počas prevádzky ložiska. Strata pevnosti klietky môže teda viesť k zlyhaniu.

Nízka hustota materiálu, približne 15% z ocele, má za následok nízku hmotnosť klietky. Odstredivá sila vyvolaná fenolovou klietkou je teda len 15% sily pre oceľovú klietku. Pri vysokých rýchlostiach odstredivá sila spôsobuje, že sa klietka rozťahuje radiálne. Klietka s nízkou hustotou preto ponúka lepšiu rozmerovú stabilitu pri vysokých rýchlostiach. Použitie fenolového materiálu je však obmedzená na ložiskové aplikácie, ktoré neprekračujú teploty 100 °C.

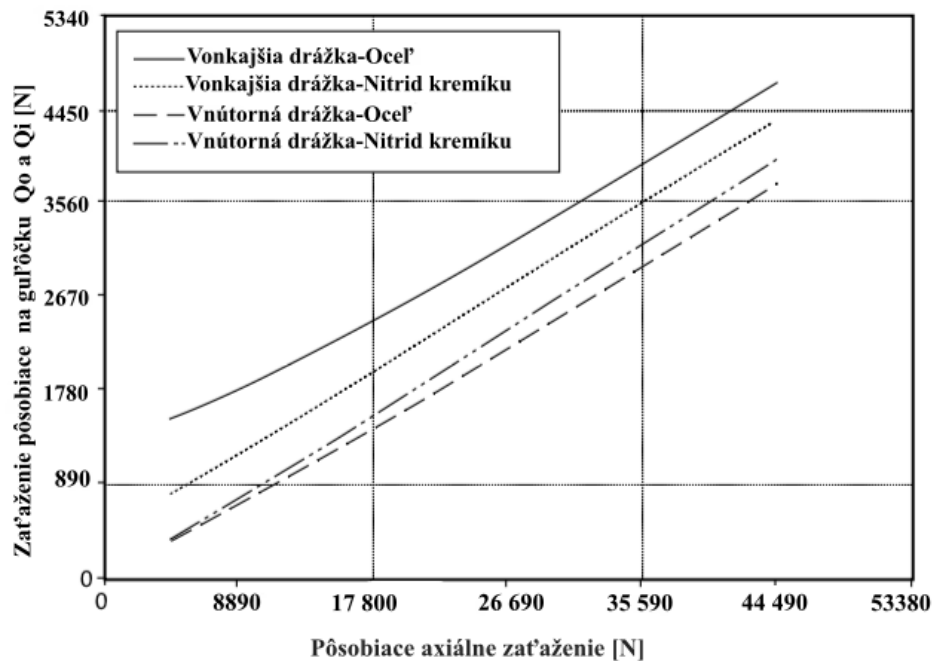
Materiál PEEK je termoplast, ktorý vykazuje vynikajúce fyzikálne vlastnosti do 250 °C. Je odolný voči oderu a má dobrú únavovú pevnosť a húževnatosť. Tento kryštalický materiál sa môže vstrekať.

Testy kompatibility maziva vykazujú vynikajúci výkon do 200 °C. Testy tiež ukazujú, že účinok proti opotrebeniu je rovnaký alebo lepší ako nylon-6,6 [50]. Karbónom vystužená klietka PEEK (polyakryletherketonová klietka) prispieva k vyššej trvanlivosti klietky a rieši problém obrovskej odstredivej sily vznikajúcej kvôli vysokej rýchlosti otáčania. Použitie korunkového tvaru klietky pre vedenie guľôčok redukuje vibračne a šmykové poškodenie spôsobené hádzaním klietky [42]. Prstencová časť klietky bola zúžená a zosilnená kvôli zvýšeniu odolnosti voči odstredivej sile [41]. Jedinou známou nevýhodou rozsiahleho použitia PEEK ako materiálu ložiskovej klietky sú náklady. To zatiaľ obmedzuje jeho použitie na špecializované aplikácie [50].

3.3.3.3 Keramické valivé elementy

Na umožnenie prevádzky guľkových ložísk pri vyšších rýchlostiach je možné znížiť nepriaznivé účinky zotrvačnosti valivého elementu znížením jeho hmotnosti. Na zníženie hmotnosti sa konštruktéri najprv pokúsili prevádzkovať ložiská s dutými guľôčkami, čo sa však ukázalo ako nepraktické, z hľadiska náročnej výroby [49]. Použitím keramických guľčiek sa nielen redukuje rotačná odstredivá sila vďaka nižšej hmotnosti valivých elementov, ale taktiež sa zlepšujú mazacie vlastnosti. Pri týchto ložiskách sa používa mazanie plastickým mazivom [39]. Použitý olej má optimalizovanú kombinovanú konzistenciu, ktorá môže odolávať veľkým odstredivým silám pri vysokých otáčkach a viskozite, vďaka ktorej sa dostanú mazacie zložky na povrch drážky, čím sa rieši nedostatok maziva pri vysokých rýchlostiach [40]. Vzduch a malé množstvo oleja s presným dodávaním medzi guľčičky a drážku zabezpečujú dostatočne mazanie a zabraňujú zvýšeniu teploty [39].

Ako prijateľný materiál na výrobu keramických valivých elementov sa vyvinula kremíkovo-nitridová keramika (HIP), ktorá má hustotu približne 42% z ocele a vynikajúcu pevnosť v tlaku. Obr. 18 porovnáva parametre guľčkového ložiska s kosouhlým stykom 218 s oceľovými guľôčkami a guľôčkami nitridu kremíka HIP pre operácie pri vysokej rýchlosti [49].



Obr. 18 Zaťaženie vonkajšej a vnútornej drážky v závislosti od ťahového zaťaženia guľôčkového ložiska s uhlovým stykom 218 pracujúcim pri 15 000 ot./min s guľôčkami z ocele alebo nitridu kremíka.

Nitrid kremíka má modul pružnosti približne $3,1 \times 10^5$ MPa. U hybridného guľôčkového ložiska, to znamená ložiska s oceľovými krúžkami a guľôčkami nitridu kremíka, v dôsledku vyššieho modulu pružnosti guľôčkového materiálu, budú kontaktné plochy medzi guľôčkami a obežnými drážkami menšie ako v celooceľovom ložisku. To spôsobuje, že kontaktné napätie je väčšie. V závislosti od veľkosti zaťaženia môže byť úroveň napätia prijateľná pre materiál guľôčok, ale nie pre oceľ obežnej drážky. Táto situácia môže byť zlepšená na úkor zvýšeného trenia kontaktov zvýšením zhody obežných drážok s guľami; napríklad zmenšenie polomeru zakrivenia drážky obežnej dráhy. Toto zníženie je špecifické pre každú aplikáciu v závislosti od zaťaženia a rýchlosti ložiska. Tento materiál sa používa vo vysokorýchlostných aplikáciách ako ložiská hlavného motora [49].

V prípade EV/HEV motorov sú používané aj vysokorýchlostné guľôčkové ložiská od NSK, ktoré majú vnútorný priemer 160 mm a vonkajší priemer 190mm. Optimalizovaný počet guľôčok spolu s vnútornými rozmermi guľôčok, radiálnej vôle a drážok znižuje trenie a tvorbu tepla, čím sa zabraňuje zadreniu. Napriek ich veľkosti sú schopné sa otáčať vysokou rýchlosťou viac ako 2×10^6 dm \times n, čo je rýchlejšie ako ktorékoľvek iné ložisko podobnej veľkosti určené pre automobily [42].

3.3.4 Elektrické prúdy v ložiskách

K zlyhaniu ložiska môže dôjsť v dôsledku mnohých rôznych dôvodov, no 9% všetkých porúch ložísk v EV/HEV je spôsobených ložiskovými prúdmi. Ložiskové prúdy v elektromotoroch môžu pochádzať z niekoľkých základných príčin. Elektrostatické výboje, magnetické asymetrie a spoločné režimové napätie spárované s vysokými rýchlosťami spínania sú tri hlavné príčiny ložiskových prúdov [44].

Trenie v elektrickom stroji môže spôsobiť nahromadenie elektrostatického poľa, čo vedie k rozdielu napätia medzi hriadeľom a zemou, čo vedie k elektrostatickému výboju v ložiskách [44]. Pri sínusových napätiach v sieti je prúd ložiska generovaný asymetriou v magnetickom obvode motora. Asymetrický tok vo vnútri motora vyvoláva axiálne napätie hriadeľa, čo ďalej vedie k nízkofrekvenčnému cirkulujúcemu prúdu prúdiacemu cez ložiská [46].

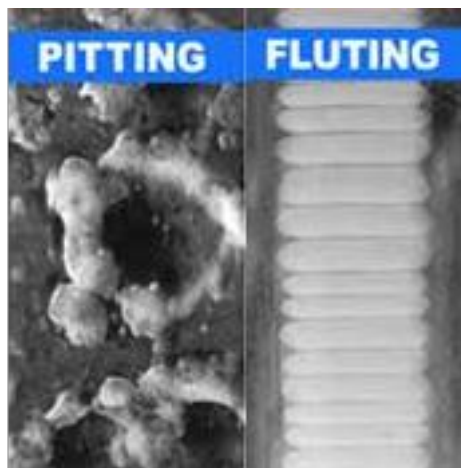
Magnetická asymetria je najčastejšou príčinou prúdu ložiska v motoroch poháňaných sínusovými vlnami. Tieto nízkofrekvenčné prúdy typicky prúdia cez vodivé materiály, ako sú hriadeľ, rám, ložiskové závesy a ocelové valivé elementy. Tieto typy ložiskových prúdov možno riešiť pomocou izolácie na prerušenie vodivej dráhy vo forme izolovaných ložísk [44].

V každom EV je trakčný motor so striedavým prúdom. Batérie dodávajú jednosmerný prúd, ktoré vyžadujú meniče inak povedané aj pohony s premenlivou frekvenciou VFD (Variable-frequency drive), na premenu jednosmerného prúdu na striedavý [43]. Pre elektrické poškodenie ložísk motora je hlavným vinníkom napätie spoločného režimu vznikajúce z nesínusových vlnových priebehov vytvorených obvody spínania výkonového meniča. Extrémne rýchle doby nárastu napätia spojené s izolovanými bipolárnymi tranzistormi (IGBT), ktoré sa bežne nachádzajú v dnešných meničoch s moduláciou šírky impulzov (PWM), môžu spôsobiť vznik náboja na hriadeľ motora [47], čo spôsobuje únik prúdu a to môže poškodiť komponenty, ako sú ložiská a znížiť ich životnosť [26].

Tieto napätia prechádzajú ložiskami a spôsobujú nechcené elektrické výbojové obrábanie (EDM), ktoré eroduje valivé elementy a oporné steny a vedie k predčasnemu zlyhaniu ložiska a následne motora. Zakaždým, keď je prekonané dielektrikum maziva, elektrický oblúk cez ložisko spaľuje olej a vytvára malú jamku (taviaci kráter) v povrchu ocele. Pri frekvenciách meniču nad 12 kHz sa môže vo veľmi krátkom čase vytvoriť veľké množstvo až milióny jamiek [47].

Pitting je výsledkom jediného pulzového výboja a časom sa môže pozorovať náhodný vzor, ako je vidieť na obr. 19 vľavo. Fluting na obr. 19 vpravo je najbežnejším vzorom poškodenia, ktorý je výsledkom niekoľkých opakovaných prúdových impulzov, ktoré systematickejšie erodujú povrch ložiskových krúžkov. Valivý odpor ložiska sa zvyšuje v dôsledku poškodenia a časom sa mazanie stáva kontaminované kusmi ložiska, čo vedie k ďalšiemu mechanickému opotrebeniu a prípadnému zlyhaniu [44].

Existujú dva hlavné spôsoby, ako zabrániť poškodeniu ložiska VFD. Prvým je spôsob, akým sa prúd v hriadeľi dostane na zem bez toho, aby prechádzal



Obr. 19 Povrchové poškodenia pitting a fluting

ložiskami, čo sa uskutočňuje uzemňovacou kefou alebo krúžkom [45]. Je to jeden z najspoľahlivejších a nákladovo najefektívnejších uzemňovacích zariadení [47]. Uzemňovacie krúžky hriadeľa AEGIS, obr. 20, sú ideálnou voľbou pre motory s výkonom nižším ako 100 konských síl. Zapadajú okolo hriadeľa elektromotora a predlžujú jeho životnosť bezpečným odvádzaním prúdov z hriadeľa na elektrickú zem. Využívajú modernú technológiu transportu elektrónov, obsahuje sadu ultravodivých mikrovlákien odolných voči opotrebeniu, ktoré zostávajú v kontakte s rotujúcim hriadeľom a umožňujú prúdu prechádzať [45].



Obr. 20 Uzemňovací krúžok AEGIS a jeho použitie

Druhý spôsob zahŕňa montáž motora so špeciálne izolovanými ložiskami, ktoré zabráňujú prechodu škodlivého množstva prúdu [45]. Tieto kombinujú kľetku z nehrdzavejúcej ocele s keramickým valivým prvkom, ktorý pomáha izolovať únik prúdu a chrániť komponenty pred uniknutým prúdom. Tieto ložiská dokážu zvládnuť vysokú rýchlosť elektrických hnacích ústrojenstiev, ako aj prípady zlého mazania [26].

Izolačné ložiská FAG sú špeciálne skonštruované tak, aby zabránili priechodom prúdov hriadeľa, zabránili poškodeniu ložísk a predĺžili životnosť motora. Rozmery týchto ložísk sú v súlade s normami, čo znamená, že sú zameniteľné so štandardnými ložiskami. Dodávajú sa v dvoch typoch a to buď čisto keramické alebo hybridné (keramicko-kovové). Keramické ložiská FAG majú tvrdý oxido-keramický povlak odolný voči opotrebeniu, ktorý poskytuje vynikajúce izolačné vlastnosti pri zachovaní dobrej tepelnej vodivosti. To je dôležité pre zabránenie hromadeniu tepla v ložiskách. Pre rôzne aplikácie je k dispozícii rad rôznych povlakov s rôznymi vlastnosťami [45]. Použitie keramických povlakov alebo keramických valivých elementov je v konštrukciách ložísk, ktoré potrebujú elektrickú izoláciu voči prúdom z hriadeľa. Keramické povlaky sa často aplikujú pomocou plazmového spreja. Keramický povlak je ošetrený akrilovou živicom na utesnenie povrchu a zabránenie vniknutiu vlhkosti [29].

Hybridné ložiská, ako vidíme na obr. 21, sa vyznačujú keramickými valivými elementmi a oceľovými závesmi pre jazdu pri vyšších rýchlostiach s menším trením ako ložiská s keramickým povlakom. Udržujú si veľmi dobré izolačné vlastnosti a sú cenovo výhodnejšie ako ložiská s keramickým povlakom pre menšie aplikácie [45].



Obr. 21 Hybridné ložisko s keramickými guľôčkami

SKF vyvinula elektricky izolované ložiská, nazývané INSOCOAT na ochranu pred poškodením elektrickým prúdom. Tieto ložiská sú vybavené elektricky izolovaným vonkajším krúžkom (séria VL0241). Povlak pozostáva z nominálnej vrstvy oxidu hlinitého s hrúbkou 100 μm a nanáša sa špeciálnym procesom nanášania plazmou. Rozmery a tolerancie ložísk INSOCOAT sú rovnaké ako pre štandardné ložiská. Pri jednosmerných prúdoch pôsobí povlak ako čistý odpor a zaručuje dostatočnú izoláciu proti elektrickým prúdom. Ohmický odpor je ďaleko väčší ako 50 $\text{M}\Omega$ [46].

Spoločnosť Schaeffler vyvíja prepínacie ložisko, ktoré obchádza tento prúd cez sekundárny vodič, čím eliminuje obrábanie elektrickým výbojom. Navyše sú pre EV vyvinuté nové mazivá, ktoré môžu znížiť výkon týchto elektrických výbojov [25].

Okrem poškodenia ložiskových prvkov sa tiež mení štruktúra maziva vplyvom prúdiaceho prúdu. Všetky rotujúce stroje, AC aj DC motory, potenciálne trpia týmto javom [46]. Pri elektromotoroch s viac ako 16 000 ot./min. sa veľmi tenká vrstva oleja medzi valivými prvkami a drážkami môže rozpadáť kvôli napätovým výbojom od 5V do až 40V [43]. Miestna vysoká teplota spôsobuje, že aditíva a základný olej reagujú a môžu

spôsobit' horenie alebo zuhoľnatenie základného oleja [46]. Navyše pri každom prekonaní dielektrického maziva elektriky oblúk spaľuje olej a na povrchu ocele ložiská vzniká malý taviaci kráter. Pri frekvenciách meniča viac ako 12 kHz je možné vo veľmi krátkom čase vytvoriť množstvo jamiek. Tento jav taktiež vytvára čiastočky ocele a uhlíka ktoré kontaminujú olej, čím znižujú svoje mazacie vlastnosti a dávajú mu čiernu vypálenú farbu [43].

Najlepším spôsobom, ako sa vysporiadať s akýmkoľvek problémom, je vo všeobecnosti jeho zdroj. Vysoká frekvencia spínania meniča spojená s nevyváženým signálom spôsobuje vysokofrekvenčné napätie. Prvým riešením by mohlo byť zníženie spínacej frekvencie meniča. Filter so spoločným režimom sa môže použiť na zníženie ložiskových prúdov pri relatívne nízkych nákladoch (5-10% nákladov na motor). Ukázalo sa, že tento typ filtra znižuje prúd na hriadelí až o 85%. Veľká väčšina prúdu sa odvráti od motora a vráti sa do meniča [44].

3. DISKUSIA

Valivé ložiská sa stávajú čoraz používanjšie v automobilovom priemysle hlavne vďaka nižším trecím účinkom. Dnes už vieme rozdeliť automobily do 3 kategórií: automobily s ICE, HEV a čisté EV. Kvôli názornosti sú zlúčené HEV a EV do jednej kategórie a tú porovnávať s vozidlami používajúcimi ICE.

Na ložiská kolies pri ICEV aj pri HEV/EV nemá typ pohonu veľký dopad, preto je táto kategóriu ložísk rozobratá iba v kapitole elektromobily.

Ložiská kolies musia odolávať veľkým zaťaženiam z dôvodu nesenia celej hmotnosti vozidla. Tu sa používajú prevažne dvojradové guľôčkové alebo kuželíkové ložiská vďaka dobrej odolnosti voči extrémnym otrasom spôsobeným nerovnosťou terénu. Túto požiadavku spĺňajú aj vďaka použitej ušľachtilej oceli. Ďalším dôležitým parametrom je dobrá tesnitosť, kvôli možnej korózii ložiska pri častom kontakte kolesa s vodou a kvôli zamedzeniu vniknutiu cudzích častíc do maziva a následnej kontaminácie maziva alebo trvalému poškodeniu ložiska. Najnovšie ložiská môžu obsahovať aj integrované snímače napr. snímač polohy pre systém ABS. Bývajú zabudované priamo v celom mechanizme a nepotrebujú žiadnu údržbu počas svojej životnosti.

Životnosť väčšiny ložísk kolies dokáže za bežných jazdných podmienok trvať až 320 000 km [8].

Príslušenstvo EV používa mazané, uzatvorené elektrické motory. Mazivá pre EV musia byť kompatibilné s novými materiálmi, ako sú medené drôty a vinutia alebo pokročilé polyméry, ako aj kompatibilita s elektrickými prúdmi a magnetickými poľami.

HEV, ktoré majú batériu aj spaľovací motor, používajú motorový olej. V porovnaní s konvenčnými vozidlami, HEV/EV vyžadujú výkonné mazivá. Dopyt motorového oleja je tak viac zasiahnutý, čo vedie k pomalšiemu rastu celkového dopytu po mazivách [24]. Výber a typ maziva závisí od stupňa elektrifikácie, konfigurácie a konštrukcie vozidla a polohy elektrického motora / komponentov. Pokiaľ ide o požadované vlastnosti kvapalín pre EV, vo všeobecnosti by mali byť najdôležitejšie výkonové kritériá elektrickej vodivosti, vlastnosti tepelného prenosu, ochrana proti korózii medi a kompatibilita elastomérov. V niektorých prípadoch môže byť potrebná nová základná tekutina, ako aj prísady, aby sa dosiahla požadovaná kombinácia výkonnostných vlastností pre HEV / EV vozidlá [25].

Hybridné motory majú tendenciu pracovať pri podmienkach zaťaženia / rýchlosti súvisiacich s bodmi s veľkou účinnosťou, aby sa maximalizovala spotreba paliva. Motor tiež nefunguje po celú dobu kvôli zavedeniu technológie štart / stop a tak má motorový olej tendenciu mať nižšiu teplotu ako pri bežnom motore. To ponúka možnosť používať motorový olej s nižšou viskozitou, ktorý môže ďalej znižovať spotrebu paliva pri zachovaní porovnateľnej minimálnej hrúbky olejového filmu [25].

V pohonnej jednotke ICEV sú používané ihličkové ložiská, zatiaľ čo v EV prevládajú guľôčkové vysokorýchlostne ložiská. Tieto ložiská musia mať nízky trecí moment kvôli častému rozbehu pri systéme Štart-Stop. Pri vysokých rýchlostiach v motore EV môže vzniknúť poškodenie creepom. Na zamedzenie tohto problému firma NSK vyvinula Creep-free ložiská ktoré majú dvojnásobne zvýšenú odolnosť voči creepu [34,35].

Nové ložiská od NSK guľôčkového charakteru s nízkym krútiacim momentom umožňujú 50 až 65% zlepšenie strát od trenia v porovnaní s bežnými ložiskami, čo prispieva k vyššej účinnosti paliva a nižším emisiám [29].

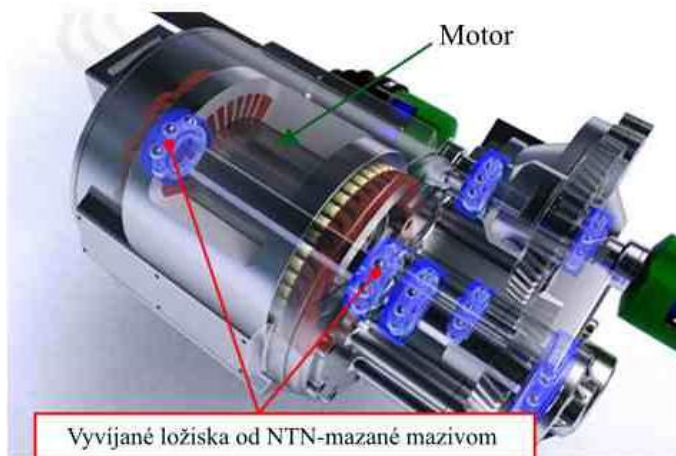
Potreba nižšej údržby EV viedla k použitiu keramických hybridných ložísk. Na keramické guľôčky vďaka nižšej hmotnosti ako na ocelové valivé elementy pôsobí menšia odstredivá sila, čo môžete vidieť na obr. 22. Hybridné ložiská môžu pracovať o 20 až 40% rýchlejšie ako bežné ocelové ložiská. Potrebné mazanie keramiky je tiež nižšie ako mazanie ocele, čím prehľbujeme rozdiel medzi valivými ložiskami a klznými [30]. Ložiska s keramickými guľôčkami dosahujú $dm \times n$ až $2,6 \times 10^6 \text{ mm} \times \text{ot./min.}$ [39]. V porovnaní s $dm \times n$ bežných ložísk v ICEV, čo činí v priemere $dm \times n 5 \times 10^5 \text{ mm} \times \text{ot./min.}$ vidíme skoro rádový rozdiel. Ak by dosiahli ložiská ICEV podobných rýchlostných hodnôt, vydržali by len pár hodín [48].



Obr. 22 Rozdiel odstredivej sily pri ocelových a keramických guľôčkach [39]

Okrem nových keramických guľôčok sa začali používať aj polymérne klietky ktoré vykazujú pri vysokých rýchlostiach pozitívnejšie odozvy ako ocelové klietky [50].

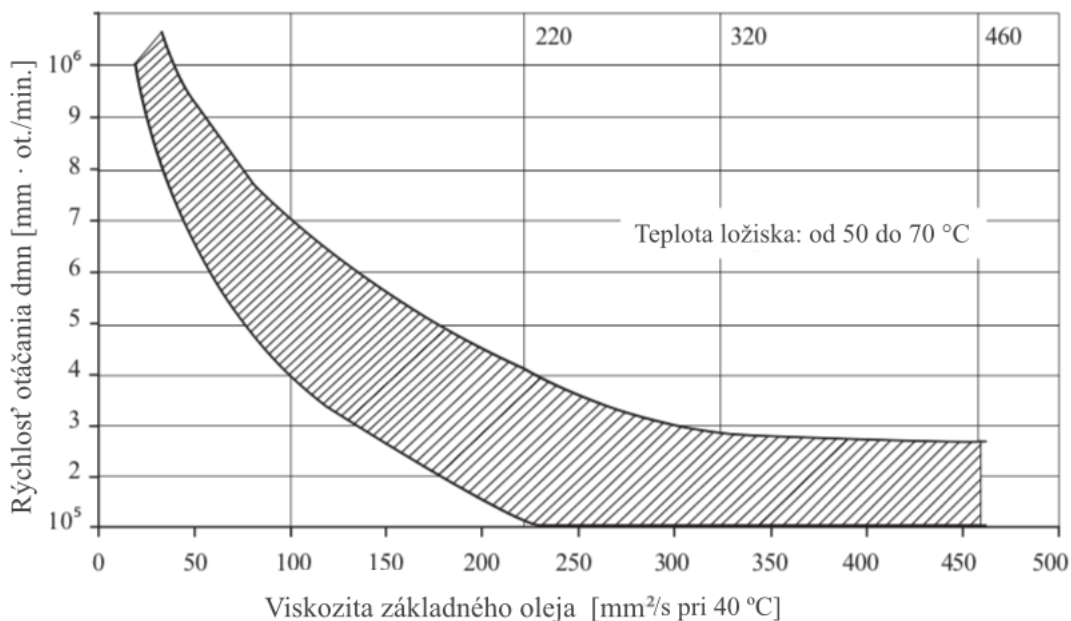
Pre príklad firma NTN vyvinula guľôčkové ložiská, ktoré sú zobrazené na obr. 23, pre EV/HEV predstavujúce použitie novej plastovej klietky. Tvar klietky a pomer materiálu bol upravený tak, aby sa minimalizovala deformácia v dôsledku odstredivých síl pri vysokých rýchlostiach otáčania. Rýchlosť rotácie je až dvojnásobná v porovnaní s bežnými výrobkami a je to dokonca aj najvyššia rýchlosť otáčok v motoroch ktoré sa používajú v EV a HEV [40].



Obrázok 23 Gul'ôčkové ložiská od NTN v EV motore [40]

Ďalším veľkým rozdielom medzi ložiskami HEV/EV a ICEV je pôsobenie nežiaducich prúdov a napätí. V HEV/EV musia byť ložiská odolné voči namáhaniu elektrickým prúdom. To zabezpečuje použitie čisto keramických ložísk, ktoré majú veľmi nízku vodivosť oproti oceli, alebo použitie rôznych ochranných krúžkov ako napr. AEGIS či vedľajších odvodov prúdov do zeme.

GfT vyvinula graf, obr. 24 ukazujúci limitnú rýchlosť v $dm \times n$ pre olejom mazané ložiská ako funkciu viskozity základného oleja, ukazujúc, že nízka viskozita je uprednostňovaná hlavne pre vysoké otáčky. Taktiež Naka [10], ktorá testovala rýchlosť otáčania vysokorýchlostných gul'ôčkových ložísk s uhlovým kontaktom, dospela k záveru, že viac preferované sú nízko viskózne oleje a mazivá.



Obr. 24 Limitná charakteristická rýchlosť a viskozita oleju pri 40 °C pre olejom mazané gul'ôčkové ložiská s hlbokou drážkou pracujúce medzi 50 a 70 °C.

Na druhú stranu ložiská pracujúce pri veľmi nízkych rýchlostiach a veľmi nízkom zaťažení potrebujú olej s nízkou konzistenciou. Ložiská pracujúce pri veľmi nízkych rýchlostiach a veľmi vysokým zaťažením potrebujú olej s vysokou viskozitou [48].

Ak sa pozrieme na doterajší vývoj ložísk, môžeme indikovať značný nárast využívania rôznych polymérov ako nylon 6,6 alebo PEEK pre výrobu vodiacich kliebok, či keramických materiálov ako napr. nitrid kremíku ako materiál pre valivé elementy vďaka vysokej odolnosti voči vedeniu elektrických prúdov, nižšej hmotnosti a výbornej kompatibilitate s novými mazivami. Z týchto poznatkov je zrejmé, že oceľ postupne nahradia nové polymérne a keramické materiály. Generované teplo v ložiskách narastie z dôsledku vyšších prevádzkových rýchlostí ale na druhú stranu bude eliminované výkonnejšími mazivami. Dôležitú úlohu zohrajú hlavne plastické maziva, ktoré sú už dnes na popredných miestach v rebríčku používania medzi mazivami v EV. Ložiská ako také sa začnú viac vyrábať ako integrované jednotky s rôznymi snímačmi, ktoré dokážu vyhodnotiť stav ložiska, poškodenie ložiská, množstvo maziva atď. Trvanlivosť sa z obchodných dôvodov príliš meniť nebude.

Keďže vo vozidle s ICE má primárna funkcia mazania popri chladení zaistiť aj hydrodynamickú nosnosť na oddelenie kovových povrchov ako sú krúžky, piesty a všetky druhy ložísk, nastane zmena aj v tejto oblasti. V nosných konštrukciách elektrického motora už neexistujú bežné zaťaženia alebo radiálne zaťaženia, ktoré vznikajú pri mechanizme posúvača kľuky v ICE. Obavy týkajúce sa trvanlivosti vyvolané NVH vzrastú ako primárne výzvy v porovnaní s problémami trvanlivosti v ICEV. Riadenie a dynamika rotora pre vysokorýchlostné rotorové a vzduchové mazanie vo vysokorýchlostnom kompresore budú naďalej obľúbenými výskumnými témami [25].

4. ZÁVER

Cieľom tejto bakalárskej práce bolo vytvoriť prehľad o valivých ložiskách používaných v elektromobilite. Úlohou bolo analyzovať terajšie ložiská používané v elektromobilite, sformulovať kritické požiadavky a popísať výzvy, ktoré pripadajú na vývoj nových valivých ložísk v tejto oblasti.

V prvej časti sú kvôli názornosti a možnému porovnaniu popísané ložiská používané v ICEV v motore a prevodovke. Časť elektromobily začala kapitolou 3.2. V nej sú popísané ložiská používané v HEV a EV spoločne. Táto kapitola pozostávala z analýzy ložísk kolies, ložísk používaných v motore a prevodovke, kde sú zjednotené aj ich potrebné špecifické vlastnosti ako značne vyššie prevádzkové rýchlosti a teploty. Vo všeobecnosti ložiská v EV/HEV pracujú pri vyšších prevádzkových rýchlostiach a teplotách. To sa odzrkadlilo aj na vyšších požiadavkách v porovnaní s ICEV.

V kapitole 3.3 Kritické parametre ložísk je priblížená problematika týkajúca sa dynamických účinkov pôsobiacich na ložisko a jeho časti pri vysokých rýchlostiach, ako je napríklad odstredivá sila alebo trecie a gyroskopické momenty. Ložiská v EV sú navyše namáhané aj elektrickými výbojmi vznikajúcimi v EV motore, ktoré poškodzujú ložiská svojim pôsobením. V tejto kapitole čitateľ nájde aj predstavené riešenia zamedzení týmto nežiaducich prúdov prechádzať cez ložisko. Posledná časť bola venovaná predikcií vývoja valivých ložísk v EV od použitých materiálov valivých elementov cez mazivá až po špeciálne povrchové úpravy ložísk.

Výstupom tejto bakalárskej práce je prehľadná analýza trendov v oblasti použitia valivých ložísk v elektromobilite a sformulovanie ich kritických požiadavok a následným popisom nových vyziev do blízkej budúcnosti.

5. ZOZNAM POUŽITÝCH ZDROJOV

- [1] How many bearings are there in a car?. *Ntn-snr.com* [online]. 2018 [cit. 2019-04-30]. Dostupné z: <https://www.ntn-snr.com/blog/how-many-bearings-are-there-car>
- [2] GRAYEN, Michael. Wheel Bearings: Descriptions of Bearings, Races, Seals, and Hubs. *Carid.com* [online]. 2014 [cit. 2019-04-30]. Dostupné z: <https://www.carid.com/articles/wheel-bearings.html>
- [3] Wheel Bearing Parts. *Gmb.jp* [online]. [cit. 2019-04-30]. Dostupné z: <https://www.gmb.jp/en/product/axle/wheel.html>
- [4] Wheel Bearing. *Carparts.com* [online]. [cit. 2019-04-30]. Dostupné z: <https://www.carparts.com/wheel-bearing>
- [5] WHEEL BEARINGS AND WHEEL BEARING HUBS. *Kavoparts.com* [online]. [cit. 2019-04-30]. Dostupné z: <https://www.kavoparts.com/product/wheel-bearings-and-wheel-bearing-hubs/>
- [6] Wheel Hub Bearings. *Nsk-autoaftermarket.com* [online]. [cit. 2019-04-30]. Dostupné z: <https://www.nsk-autoaftermarket.com/en/products/chassis/car-wheel-bearings.html>
- [7] The Purpose of Wheel Bearings. *Bluestar.com* [online]. 2018 [cit. 2019-04-30]. Dostupné z: https://www.bluestar.com/get_informed/article/the-purpose-of-wheel-bearings
- [8] CARLEY, Larry. What Kind Of Wheel Bearings Are Used On Cars Today?. *Counterman.com* [online]. 2016 [cit. 2019-04-30]. Dostupné z: <https://www.counterman.com/what-kind-of-wheel-gearings-are-used-on-cars-today/>
- [9] Automatic Transmission Bearings. *Freeasestudyguides.com* [online]. 2018 [cit. 2019-04-30]. Dostupné z: <https://www.freeasestudyguides.com/automatic-transmission-bearings.html>
- [10] D.Miller. *The ELGI Oil Separation Handbook*. European Lubricating Grease Institute, 2003.
- [11] Ultra-Long-Life Ball Bearings for Transmissions. *Nskeurope.com* [online]. 2011 [cit. 2019-04-30]. Dostupné z: <https://www.nskeurope.com/en/company/news-search/2011-press/ultra-long-life-ball-bearings.html>
- [12] Ultra Low-Friction Sealed Clean Ball Bearings for Transmissions. *Nskeurope.com* [online]. 2010 [cit.2019-05-04]. Dostupné z:

<https://www.nskeurope.com/en/company/news-search/2010-press/product-ultra-low-friction.html>

- [13] EITEL, Lisa. Six FAQs about bearings and choosing between oil and grease. *Www.motioncontroltips.com* [online]. 2016 [cit. 2019-05-04]. Dostupné z: <https://www.motioncontroltips.com/faqs-about-bearings-choosing-between-oil-grease/>
- [14] NSK Develops High-Reliability, low-torque ball bearings(BELTOP8) for Continuously Variable Transmissions. *Nsk.com*[online]. 2011 [cit. 2019-05-04]. Dostupné z: <http://www.nsk.com/company/news/2011/press110705.html>
- [15] SASAKI, Katsuaki. Low-torque Deep-groove Ball Bearings for Transmissions. *Ntnglobal.com* [online]. 2011 [cit. 2019-05-04]. Dostupné z: https://www.ntnglobal.com/en/products/review/pdf/NTN_TR79_en_p078_082.pdf
- [16] YOKOTA, k. Technological Trends and Outlook of Automotive Bearings. *Eb-cat.ds-navi.co.jp* [online]. 2017 [cit. 2019-05-04]. Dostupné z: http://eb-cat.ds-navi.co.jp/enu/jtekt/tech/ej/img/no1014e/1014e_03.pdf
- [17] SCHLEREGE, frank. *Schaeffler-events.com* [online]. 2018 [cit. 2019-05-04]. Dostupné z: <http://schaeffler-events.com/symposium/lecture/e7/index.html>
- [18] Needle roller bearing catalogue. *Zvlslovakia.sk* [online]. 2017 [cit. 2019-05-04]. Dostupné z: <https://www.zvlslovakia.sk/download/Needle-Roller-Bearing.pdf>
- [19] Needle roller and cage assemblies for crank pins and piston pins. *Schaeffler.bg* [online]. 2013 [cit. 2019-05-04]. Dostupné z: https://www.schaeffler.bg/remotemedien/media/_shared_media/08_media_library/01_publications/schaeffler_2/tpi/downloads_8/tpi94_de_en.pdf
- [20] Turbocharger bearings. *Lily-bearing.com/* [online]. [cit. 2019-05-04]. Dostupné z: <https://www.lily-bearing.com/application-solutions/turbocharger-bearing/>
- [21] Water pump bearings. *Bajajbearings.com* [online]. [cit. 2019-05-04]. Dostupné z: <https://www.bajajbearings.com/water-pump-bearings.htm>
- [22] Water pump bearings. *Wd-bearing.com* [online]. [cit. 2019-05-04]. Dostupné z: <http://www.wd-bearing.com/product/water-pump-bearings-2/>
- [23] FANNING, Paul. Electric vehicles drive bearing innovation. *Eurekamagazine.co.uk* [online]. 2014 [cit. 2019-05-04]. Dostupné z:

<http://www.eurekamagazine.co.uk/design-engineering-features/technology/electric-vehicles-drive-bearing-innovation/62524/>

- [24] PERLANGERI, Antonio. Impact of electric vehicles on lubricants demand. *Mckinseyenergyinsights.com* [online]. 2017 [cit. 2019-05-04]. Dostupné z: <https://www.mckinseyenergyinsights.com/insights/impact-of-electric-vehicles-on-lubricants-demand/>
- [25] WHITBY, David. Oils for hybrid electric vehicles. *Stle.org* [online]. 2018 [cit. 2019-05-04]. Dostupné z: http://www.stle.org/files/TLTArchives/2018/09_September/Worldwide.aspx?WebsiteKey=a70334df-8659-42fd-a3bd-be406b5b83e5
- [26] Electric power drives the future of cars. *skf.com* [online]. 2017 [cit. 2019-05-04]. Dostupné z: <https://www.skf.com/group/news-and-media/news-search/2017-04-06-electric-power-drives-the-future-of-cars.html>
- [27] SKF ePowertrain portfolio reduces costs for hybrid and electric vehicles. *Skf.com* [online]. 2015 [cit. 2019-05-04]. Dostupné z: https://www.skf.com/group/news-and-media/news-search/2015-04-13_skf_epowertrain_portfolio_reduces_costs_for_hybrid_and_electric_vehicles.html
- [28] SKF Rotor Positioning Sensor-Bearing Units. *Skf.com* [online]. [cit. 2019-05-04]. Dostupné z: <https://www.skf.com/group/industry-solutions/cars-and-light-trucks/e--powertrain/electric-traction-motor/skf-rotor-positioning-sensor-bearing-unit/index.html>
- [29] ROMAIN, Nicolas. Bearing design choices for electric motors. *car-engineer.com* [online]. 2014 [cit. 2019-05-04]. Dostupné z: <http://www.car-engineer.com/bearing-design-choices-electric-motors/>
- [30] NOVEL BEARING AND ELECTRIC MOTOR TECHNOLOGY IS CRITICAL TO A NEW DESIGN OF ELECTRIC VEHICLE. *Industrialtechnology.co.uk* [online]. [cit. 2019-05-04]. Dostupné z: <https://www.industrialtechnology.co.uk/products--novel-bearing-and-electric-motor-technology-is-critical-to-a-new-design-of-electric-vehicle.html>
- [31] Tapered roller bearings. *Nskeurope.com* [online]. [cit. 2019-05-04]. Dostupné z: <https://www.nskeurope.com/tapered-roller-bearings-plastic-cage-2337.htm>
- [32] Low-Friction Tapered Roller Bearing with Plastic Cage. *Nskeurope.com* [online]. 2011 [cit. 2019-05-04]. Dostupné z:

<https://www.nskeurope.com/en/company/news-search/2011-press/low-friction-tapered-roller.html>

- [33] NSK Develops a Long-Life Lipped Thrust Race for Use in Severe Lubrication Conditions. *Nskeurope.com* [online]. 2012 [cit. 2019-05-04]. Dostupné z: <https://www.nskeurope.com/en/company/news-search/2012-press/nsk-develops-a-long-life-lipped.html>
- [34] NSK : Develops Next Generation of Creep-Free Bearings for Hybrid and Electric Vehicles. *Marketscreener.com*[online]. 2016 [cit. 2019-05-04]. Dostupné z: <https://www.marketscreener.com/NSK-LTD-6491187/news/NSK-Develops-Next-Generation-of-Creep-Free-Bearings-for-Hybrid-and-Electric-Vehicles-22186727/>
- [35] Creep-Free™ Bearing Series. *Nskeurope.fr* [online]. 2016 [cit. 2019-05-04]. Dostupné z: <https://www.nskeurope.fr/fr/company/news-search/2014-press/creep-free-bearing-series.html>
- [36] Needle Roller Bearing - Silent NRB for Automotive Electrical Components. *Nskeurope.com* [online]. [cit. 2019-05-04]. Dostupné z: <https://www.nskeurope.com/en/products/nsk-innovative-products/needle-roller-bearing-automotive-electrical-components.html>
- [37] Ultra-High Temperatures. *Ntnglobal.com* [online]. [cit. 2019-05-04]. Dostupné z: <https://www.ntnglobal.com/en/products/technology/hot.html>
- [38] NSK Develops Quiet, Low-Friction Ball Bearing for EV Drive Motors. *Nsk.com* [online]. 2014 [cit. 2019-05-04]. Dostupné z: <https://www.nsk.com/company/news/2014/press1222a.html>
- [39] Ultra high speed. *Ntnglobal.com* [online]. [cit. 2019-05-04]. Dostupné z: <https://www.ntnglobal.com/en/products/technology/speed.html>
- [40] Development of “Grease Lubrication Type High Speed Deep Groove Ball Bearing” for EV/HEV. *Bearing-news.com*[online]. 2015 [cit. 2019-05-04]. Dostupné z: <http://www.bearing-news.com/development-of-grease-lubrication-type-high-speed-deep-groove-ball-bearing-for-evhev/>
- [41] NSK develops Ultra High-Speed Ball Bearings for Next Generation Hybrid Vehicles. *Nskeurope.com* [online]. 2012 [cit. 2019-05-04]. Dostupné z: <https://www.nskeurope.com/en/company/news-search/2012-press/nsk-develops-ultra-high-speed.html>

- [42] Ultra-High-Speed Large-Diameter Ball Bearings for Motors in Hybrid Cars. *Nskeurope.com* [online]. 2011 [cit. 2019-05-04]. Dostupné z: <https://www.nskeurope.com/en/company/news-search/2011-press/ultra-high-speed-large-diameter.html>
- [43] WILWERTH, Adam. Bearing damage in electric vehicles. *Today'smotorvehicles.com* [online]. 2014 [cit. 2019-05-04]. Dostupné z: <https://www.today'smotorvehicles.com/article/tmv0514-protective-bearings-components/>
- [44] A Review of Shaft Voltages and Bearing Currents in EV and HEV Motors. *Ieeexplore.ieee.org* [online]. 2016 [cit. 2019-05-04]. Dostupné z: <https://ieeexplore.ieee.org/document/7793357>
- [45] SCHROTTKY, William. Prevent VFD-induced damage in electric motors. *Plant.ca* [online]. 2019 [cit. 2019-05-04]. Dostupné z: <https://www.plant.ca/whitepapers/prevent-vfd-induced-damage-in-electric-motors/>
- [46] PREVENTION OF ELECTRIC EROSION IN BEARINGS. *Evolution.skf.com* [online]. 2001 [cit. 2019-05-04]. Dostupné z: <http://evolution.skf.com/prevention-of-electric-erosion-in-bearings/>
- [47] ROMAN, Matthew. Bearing damage: A lurking problem in electric cars. *Ecnmag.com* [online]. 2012 [cit. 2019-05-04]. Dostupné z: <https://www.ecnmag.com/blog/2012/05/bearing-damage-lurking-problem-electric-cars>
- [48] LUGT, P. M.: GREASE LUBRICATION IN ROLLING BEARINGS. first edition. Chichester: John Wiley & Sons Ltd, 2013. s. 459. ISBN: 978-1-118-35391-2.
- [49] HARRIS, T. A. - KOTZALAS, M. N.: Advanced Concepts of Bearing Technology. Boca Raton: Taylor & Francis Group, 2007. s. 360. ISBN 978-0-8493-7182-0.
- [50] HARRIS, T. A. - KOTZALAS, M. N.: Essential Concepts of Bearing Technology. fifth edition. Boca Raton: Taylor & Francis Group, LLC, 2007. s. 376. ISBN 978-0-8493-7183-7
- [51] GfT, Gesellschaft für Tribologie e.V. Arbeitsblatt 3, Wälzlagerschmierung, nově revidované vydání. Report, Gesellschaft für Tribologie e.V., September 2006.
- [52] LUDWIG, Jason. What is Bearing Brinelling?. *Rexnord.com* [online]. [cit. 2019-05-16]. Dostupné z: <https://www.rexnord.com/blog/articles/what-is-brinelling>

6. ZOZNAM POUŽITÝCH SKRATIEK, SYMBOLOV A VELIČÍN

Skratka	Význam
ICE	Internal Combustion Engine - Spaľovací motor
ICEV	Internal Combustion Engine Vehicle - vozidlo so spaľovacím motorom
HEV	Hybrid Electric Vehicle - Hybridne elektrické vozidlo
EV	Electric Vehicle - Elektrické vozidlo
NVH	Noise, vibration, harshness - hluk, vibrácie, drsnosť
VFD	Variable-frequency drive - Menič s premenlivou frekvenciou

Symbol	Jednotka	Popis
C_s	N	staticka únosnosť ložiska
D	mm	priemer guľôčky
F_s	N	statické zaťaženie
F_c	N	odstredivá sila
F_t	N	tretia sila
H	W	výkonové straty
M_g	Nmm	gyroskopický moment
M_v	Nmm	krútiaci moment
M_l	Nmm	trecí moment
ω	rad/s	uhlová rýchlosť
Q	N	zaťaženie
$dm \times n$	mm \times ot./min.	rýchlosť ložiska - roztečný priemer ložiska \times ot./min
i	-	inner ring - vnútorný krúžok
o	-	outer ring - vonkajší krúžok

7. ZOZNAM OBRÁZKOV A GRAFOV

Obr. 1	Model motoru a náprav automobilu.....	10
Obr. 2	Porovnanie klzného a valivého ložiska.....	11
Obr. 3	Použitie valivých ložísk.....	11
Obr. 4	Ihličkové ložisko KZK naľavo, KBK napravo.....	12
Obr. 5	Ihličkové ložisko v automatickej prevodovke.....	13
Obr. 6	Vybranie v kletke.....	14
Obr. 7	Gulôčkové ložisko v turbodúchadle.....	15
Obr. 8	Ložisko prvej generácie.....	17
Obr. 9	Ložisko druhej generácie.....	17
Obr. 10	Ložisko tretej generácie.....	18
Obr. 11	Dvojradowé gulôčkové ložisko kolesa.....	18
Obr. 12	Gulôčkové ložisko e-Drive so snímačom polohy od firmy SKF.....	21
Obr. 13	Dvojdielna kletka s vysokou tuhosťou.....	21
Obr. 14	Zaťaženia pôsobiace na gulôčku pri vysokorýchlostnom ložisku.....	24
Obr. 15	Gyroskopický moment v dôsledku súčasnej rotácie okolo neparalelných osí.....	25
Obr. 16	Posunutie vnútorného krúžku pri fixovanom vonkajšom krúžku v dôsledku použitia kombinovaného radiálneho, axiálneho a momentového zaťaženia.....	26
Obr. 17	Intervaly mazania podľa nemeckej spoločnosti GfT pre mazivá na báze lítiového mydla, prevádzkové teploty 70 ° C a zaťaženie P/C <0,1.....	31
Obr. 18	Zaťaženie vonkajšej a vnútornej drážky v závislosti od ťahového zaťaženia gulôčkového ložiska s uhlovým stykom 218 pracujúcim pri 15 000 ot./min. s gulôčkami z ocele alebo nitridu kremíka.....	34
Obr. 19	Povrchové poškodenia pitting a fluting.....	36
Obr. 20	Uzemňovací krúžok AEGIS a jeho použitie.....	36
Obr. 21	Hybridné ložisko s keramickými gulôčkami.....	37
Obr. 22	Rozdiel odstredivej sily pri oceľových a keramických gulôčkach.....	40
Obr. 23	Gulôčkové ložiská od NTN v EV motore.....	41
Obr. 24	Limitná charakteristická rýchlosť a viskozita oleju pri 40 °C pre olejom mazane gulôčkové ložiská s hlbokou drážkou pracujúce medzi 50 a 70 °C.....	41

8. ZOZNAM TABULIEK

Tabuľka 1	Hodnoty parametrov z a y	27
Tabuľka 2	Hodnoty faktoru f_0 pre určité druhy a mazania ložísk.....	29
Tabuľka 3	Ložiskové faktory a limitné rýchlosti pre rýchlostný faktor A	31