



SEINÄJOEN AMMATTIKORKEAKOULU
SEINÄJOKI UNIVERSITY OF APPLIED SCIENCES

Jesse Lindholm

**Kaarevahampaisen kartiohammaspyörän vertailumit-
taukset sovitettaessa hammaspyöriä
hammaspyörärakenteeseen**

Opinnäytetyö
Kevät 2023
Insinööri (AMK), Konetekniikka



SEINÄJOEN AMMATTIKORKEAKOULU

Opinnäytetyön tiivistelmä

Tutkinto-ohjelma: Insinööri (AMK), Konetekniikka

Suuntautumisvaihtoehto: Kone- ja tuotantotekniikka

Tekijä: Jesse Lindholm

Työn nimi: Kaarevahampaisen kartiohammaspyörän vertailumittaukset sovitettaessa hammaspyörää hammaspyörärakenteeseen

Ohjaaja: Juho Yli-Suomu

Vuosi: 2023

Sivumäärä: 34

Liitteiden lukumäärä: 2

Opinnäytetyö tehtiin metallityöstökoneiden huoltoyritykselle Maint Way Oy:lle. Työn tavoitteena oli määritellä mittausmenetelmä sekä laskentatapa, joiden avulla saadaan laskettua sovitelevyt hammaspyörille. Mittausmenetelmän ja laskentatavan avulla pystyttäisiin vähentämään huomattavasti hammaspyörrien sovittamiseen kuluva aikaa.

Perehtymällä olemassa oleviin mittausvälineisiin todettiin, että joko mittausvälineet eivät sovellu kaarevahampaisen kartiohammaspyörän mittaamiseen tai mittausvälineen hankintahinta on toimeksiantajalle kohtuuton. Tutkimalla olemassa olevia mittausvälineitä ja -menetelmiä saatiin kuitenkin hyödyllistä tietoa tärkeimmistä mitattavista asioista hammaspyörissä. Vertailumittausmenetelmä saatiin lopulta tutkimalla ja tekemällä mittauksia erilaisille hammaspyörille sekä tekemällä koekasauksia hammaspyörärakenteille.

Hammaspyörrien koesovitusta ja -mittausta varten hankittiin kaksi BMW:n 215K tasaussyörästä. Tasaussyörästä esivalmisteluiden jälkeen ne purettiin, mitä seurasi hammaspyörrien mittausvaihe. Varsinaisten vertailumittausten tavoitteena oli saada hammaspyöristä mittaeroja, joiden avulla saadaan laskettua hammaspyörän asennusetäisyyden muutos vaihdettaessa hammaspyörää. Hammaspyörän asennusetäisyys laskettiin mittauksen tuloksista.

Mittausten jälkeen hammaspyörät koekasattiin, jolloin varmistettiin vertailumittaus-tuloksen suhde hammaspyörän asennusetäisyyteen. Mittausmenetelmän tarkkuustavoite saavutettiin. Koekasauksessa sivuhuomiona tutkittiin myös hammaspyörrien sovitelevyjen vahvuuksien muutosten vaikutusta hammasvälykseen.

Opinnäytetyössä laadittiin toimeksiantajalle selkeä ohje, jota noudattamalla työntekijät pystyvät suorittamaan mittauksia ja vähentämään näin hammaspyörrien sovittamiseen käytettävää työaikaa.

¹ Asiasanat: hammaspyörä, kaarevahampainen kartiohammaspyörä, tasaussyörästä, vertailumittaus

SEINÄJOKI UNIVERSITY OF APPLIED SCIENCES

Thesis abstract

Degree programme: Mechanical Engineering

Specialisation: Mechanical and Production Engineering

Author: Jesse Lindholm

Title of thesis: Comparing the Measurements of Spiral Bevel Gears in Fitting the Gears to Gearwheel Structure

Supervisor: Juho Yli-Suomu

Year: 2023

Number of pages: 34

Number of appendices: 2

The thesis was made for Maint Way Oy, which is a company that provides service and maintenance work for metal industry machines. The goal of the thesis was to define a measuring method and a calculation method that would help to calculate shims for gears. With the help of these methods, the time used for fitting the gears is significantly reduced.

In reviewing the existing measuring devices, it was noticed that either the measuring devices were not suitable for measuring spiral bevel gears specifically, or the cost of the measuring devices was too high for the client. However, a lot of useful information about the most important measuring points of the gears was received in examining the existing measuring devices and methods. A comparative measuring method was achieved by examining and executing measurements to different gears and doing test assemblies for gear structures.

Two BMW 215K differentials were acquired for the gear measuring and test assemblies. After preparing the differentials, the differentials were disassembled, and the gears were measured. The goal in comparing the measurements was to acquire differences in the measurement of the gears, which were then used to calculate the change in the gear mounting distance when switching gears. The gear mounting distance was calculated from the measuring results.

After the measurements, the differentials were test assembled, which verified the comparing measurement results in relation to the gear mounting distance. The measuring method accuracy goal was achieved. In addition, the effect of the differences in the thickness of the gear shims to the gear backlash was examined.

The thesis provides clear instructions for the employees of the client company, with the help of which measurements can be done and therefore fitting the gears will be more time efficient.

¹ Keywords: gear, spiral bevel gear, differential, comparing measurements

SISÄLTÖ

Opinnäytetyön tiivistelmä.....	2
Thesis abstract.....	3
SISÄLTÖ.....	4
Kuva-, kuvio- ja taulukkoluettelo.....	6
Käytetyt termit ja lyhenteet.....	7
1 JOHDANTO JA TYÖN TAVOITTEET.....	8
2 TEORIAA HAMMASPYÖRISTÄ.....	10
2.1 Käsitteitä hammaspyöristä.....	10
2.1.1 Moduuli.....	10
2.1.2 Jakohalkaisija.....	11
2.1.3 Hammasjako.....	11
2.1.4 Ryntökulma.....	11
2.1.5 Offset.....	12
2.2 Hammaspyörätyypit.....	13
2.2.1 Suorahampainen hammaspyörä.....	13
2.2.2 Kartiohampainen hammaspyörä.....	13
2.2.3 Vinohampainen hammaspyörä.....	13
2.2.4 Kaarevahampainen kartiohammaspyörä.....	14
2.3 Hammaspyörien asennukseen ja kunnossapitoon liittyvää teoriaa.....	15
2.3.1 Asennusetäisyys.....	15
2.3.2 Hammasvälys.....	16
2.3.3 Hammaskosketus.....	18
2.3.4 Laakerointi.....	19
3 Nykytilanteen kuvaus.....	20
3.1 Nykytilanteen kuvaus Maint Way Oy:llä.....	20
3.2 Työn tavoitteet.....	21
4 Työn toteutus.....	22
4.1 Hammaspyörien mittaustavat ja -välineet.....	23
4.2 Työn esivalmistelu.....	24
4.3 Mittaus.....	27

4.4 Koekasaukset.....	28
4.5 Mittausohje.....	28
5 TULOKSET JA YHTEENVETO.....	29
LÄHTEET.....	32
LIITTEET.....	34

Kuva-, kuvio- ja taulukkoluetelo

Kuva 1 Hammaspyöräparin offset.....	12
Kuva 2 MTE kulmapään hammaspyörän merkinnät	17
Kuva 3 Sovitevärillä tarkastettu hammaskosketus hammaspyörässä.....	18
Kuva 4 Havainnekuva koordinaatiston akseleista	22
Kuva 5 Työssä käytetyt tasauspyörästöt.....	24
Kuva 6 Hammasvälyksen mittaus tasauspyörästöstä	25
Kuva 7 Havainnollistava kuva tasauspyörästön merkittävistä osista.....	26
Kuva 8 Irrotettu tasauspyörästö ja lautaspöytä	26
Kuvio 1 Hammaspyörän jakohalkaisija	11
Kuvio 2 Hammaspyörän asennusetäisyys	16
Taulukko 1 Hammaspyörien kätisyyden taulukko	15

Käytetyt termit ja lyhenteet

Hammasjako	Kahden vierekkäisen hammaspyörän hampaan etäisyys jakoympyrällä.
Jakohalkaisija	Hammaspyöräparissa on jakoympyrät, jotka pyörivät yhdessä ja koskevat toisiaan liukumatta. Näiden halkaisija on jakohalkaisija.
Moduuli	Moduuli on standardisoitu hammaspyörävalmistuksen monikäyttöinen laskennallinen apusuure, joka kartoittaa hampaan kokoa.
Offset	Hammaspyöräparin offset tarkoittaa hammaspyörien akselien keskilinjojen välistä etäisyyttä toisistaan.
Ryntökulma	Hammaspyörän hampaiden kyljen kosketuspisteiden kautta kulkevan viivan kulmaa kutsutaan ryntökulmaksi.
Tasauspyörästö	Nelipyöräisten ajoneuvojen voimansiirron osa, joka jakaa tasaisesti vääntömomenttia vetäville pyörille niiden yksilöllisestä nopeudesta riippumatta.

1 JOHDANTO JA TYÖN TAVOITTEET

Opinnäytetyö tehtiin Maint Way Oy:lle, jonka toimipiste sijaitsee Lapualla. Maint Way Oy on konepajateollisuuden kunnossapitopalveluihin erikoistunut yritys. Maint Way Oy on perustettu vuonna 2011. Maint Way Oy on erikoistunut metallintyöstökoneisiin, mutta toimintaan kuuluu myös puun- ja muovintyöstökoneiden kunnossapito. Maint Way Oy:n toimintaan kuuluu mm. vikahuollot, ennakkohuollot, karahuollot, johdehuollot, konesiirrot, Fanuc robottihuolto ja ESAB-huolto. Asiakastyöt sisältävät hammaspyöräkäyttöisiä rakenteita, kuten esimerkiksi työstökoneiden kulmapää ja erilaiset vaihteistot, jotka vaativat usein korjaus- ja kunnossapitotöitä. Hammaspyörien sovitustyöt ovat joissain rakenteissa hyvin työläitä, sillä hammaspyörien sovitukset ja säätölevyjen vaihto vaativat koko kokoonpanon purkamista ja kasaamista.

Työn tavoitteena oli määrittellä mittausmenetelmä ja laskentatapa, jolla saadaan alustavat tai jopa valmiit säätölevyt laskettua hammaspyörille. Tavoitteen saavuttamiseksi määriteltiin vanhojen ja uusien hammaspyörien vertailumittaukset. Mittausmenetelmän ja laskentatavan avulla pystytään lyhentämään korjaustöihin kuluva työaika.

Opinnäytetyötä varten hankittiin kaksi BMW henkilöauton tasauspyörästä tutkimustarkoitukseen. Myös muita hammaspyöriä käytettiin tutkimusmittauksissa. Työn alussa tutkittiin olemassa olevien hammaspyörien mittavälineitä ja mittausmenetelmiä. Tehtiin myös tutkimustyötä hammaspyörien vertailumittauksesta ja sen mitaustulosten vaikutuksesta hammaspyörän asennusetäisyyteen. Alustavan selvitystyön jälkeen tasauspyörästäille ja niiden hammaspyörille tehtiin tutkimustarkoituksessa mittauksia ja koekasauksia.

Varsinaisten vertailumittausten tavoitteena oli saada hammaspyöristä mittaeroja, joiden avulla saadaan laskettua hammaspyörän asennusetäisyyden muutos vaihdettaessa hammaspyöriä. Mittauksissa mitattiin sekä uudet että vanhat hammaspyörät, joita verrattiin keskenään.

Hammaspyörien mittausten jälkeen tasauspyörästöt koekasattiin, ja tällä varmistettiin hammaspyörien vertailumittaustulosten suhde hammaspyörän asennusetäisyyteen. Koekasauksessa sivuhuomiona tutkittiin myös hammaspyörien sovitelevyjen vahvuuksien muutosten vaikutusta hammasvälykseen.

Mittauksista laadittiin työohje Maint Way Oy:n henkilöstölle nopeuttamaan hammaspyörien korjaustyötä. Mittausohjeita tehtiin kaksi. Toisessa ohjeessa on tunnetun hammaspyörän vertailumittausohje ja toisessa on ei-tunnetun hammaspyörän mittausohje.

Mittausmenetelmien tarkkuustavoite saavutettiin. Ei-tunnetun hammaspyörän mittausohjeella saatiin suuntaa antavat mittaustulokset, joiden perusteella hammaspyörärakenne voidaan koekasata. Tunnetun hammaspyörän mittausohjeesta saatiin tarkempi, ja se nopeuttaa ja helpottaa kyseisen hammaspyörärakenteen korjausta jatkossa.

2 TEORIAA HAMMASPYÖRISTÄ

Hammaspyörien tarkoitus on välittää tehoa pyörimisliikkeenä akselilta toiselle. Hammaspyörillä voidaan samalla muuttaa myös akseleiden pyörimisnopeutta tai vääntömomenttia tai molempia. (Blom ym. 1999, 247.) Hammaspyörävälityksessä on aina vähintään kaksi hammaspyörää. Toinen hammaspyörä on käytävä pyörä ja toinen käytettävä pyörä. Käyttävää pyörää voi pyörittää esimerkiksi sähkömoottori. (Ansanharju 2009, 178–179.) Omien havaintojeni mukaan varsinkin välitetyissä hammaspyörärakenteissa käytävää pyörää kutsutaan pinioniksi ja käytettävää lautaspyöräksi.

2.1 Käsitteitä hammaspyöristä

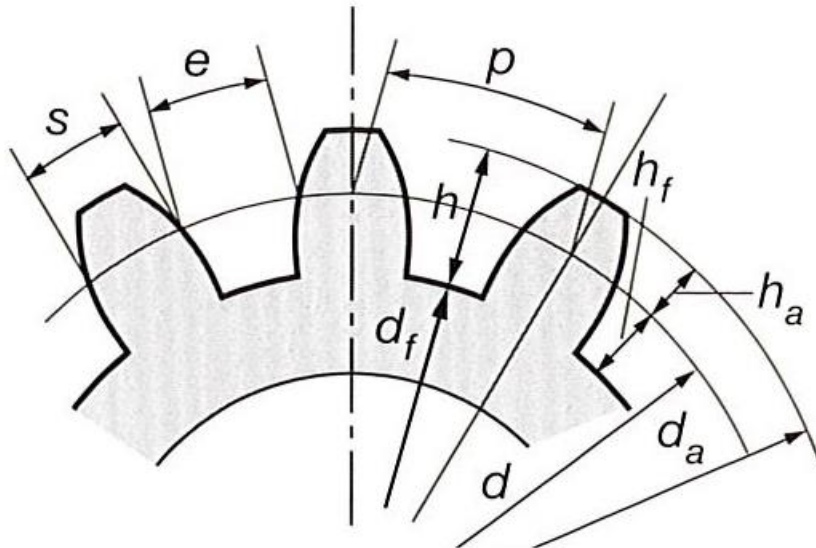
2.1.1 Moduuli

Moduuli on hammaspyörävalmistuksen monikäyttöinen laskennallinen apusuure, joka kartoittaa hampaan kokoa. Moduulista käytetään myös termiä halkaisijajako. Moduulia käytetään esimerkiksi jakohalkaisijan tai hammasluvun laskennassa. Hammaspyörien valmistuksessa eri moduulit vaativat erilaisen terän koneistukseen. Moduulit on standardisoitu, ja standardissa, SFS 3093, esitellään suosittavat moduulit. Standardissa määriteltyjen suosittavien moduulien käyttö vähentää terien lukumäärää tuotantolaitoksissa. (Blom ym. 1999, 251–252.) Valitettavasti hammaspyörien valmistajat eivät yleensä merkitse käytettyä moduulia hammaspyörään (Keinänen & Järvinen 2014, 137).

Apusuuremoduuli, m , lasketaan jakamalla hammasjako (kuviossa 1 kohta p) piillä, jonka arvo on pyöristettynä 3,14. Tuloksena saadaan päättymätön desimaaliluku. Standardoidussa moduulijärjestelmässä on vain kokonaislukuja ja päättyviä desimaalilukuja. Hammaspyöräparilla täytyy olla aina sama moduuli. (Ansanharju 2009, 180–181.) Tuumajärjestelmää käyttävissä maissa käytetään standardin sijaan circular-pitch (CP)- ja diametral-pitch (DP) -järjestelmiä (Keinänen & Järvinen 2014, 132).

2.1.2 Jakohalkaisija

Hammaspyöräparissa on jakoympyrät, jotka pyörivät yhdessä ja koskevat toisiaan liukumatta. Näitä kutsutaan jakoympyröiksi, jonka halkaisijaa puolestaan kutsutaan jakohalkaisijaksi. (Ansanharju 2009, 180–181.) Kuvion 1 kohta d havainnollistaa jakohalkaisijaa.



Kuvio 1 Hammaspyörän jakohalkaisija (Ansanharju 2009, 180–181).

2.1.3 Hammasjako

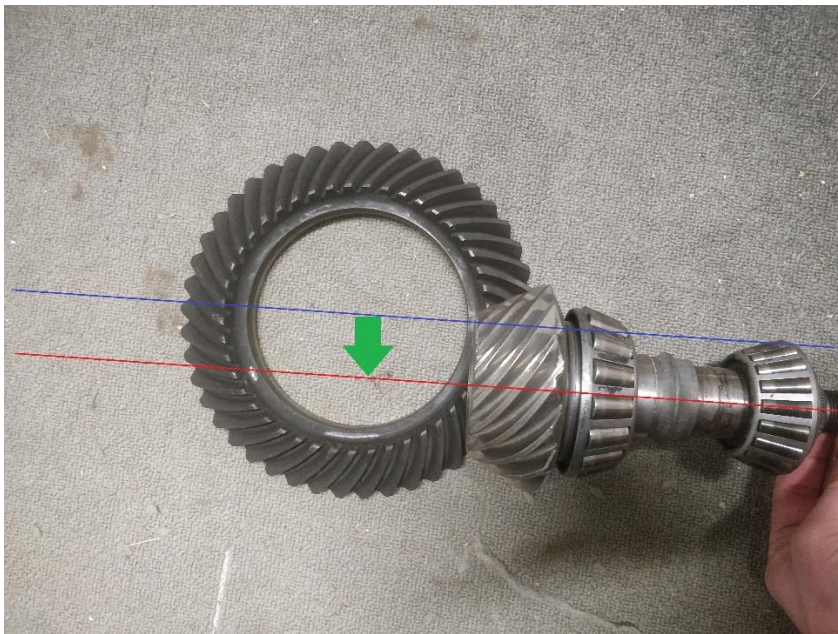
Hammasjako kutsutaan kaaren pituutta, joka saadaan, kun katsotaan jakoympyrän kohdasta kahden vierekkäisen hampaan keskiosien etäisyyttä toisistaan. Hammasjako on havainnollistettu kuvion 1 kohdassa p. (Ansanharju 2009, 180–181.)

2.1.4 Ryntökulma

Hammaspyörän hampaiden kyljen kosketuspisteiden kautta kulkevan viivan kulmaa kutsutaan ryntökulmaksi (α , alfa). Tavanomaisin ryntökulma on 20 astetta. (Ansanharju 2009, 180–181.) Pienellä ryntökulmalla vähähampaisissa hammaspyörissä muodostuu tyvilovi, joka heikentää hammaspyörää (Keinänen & Järvinen 2014, 132).

2.1.5 Offset

Hammaspyöräparin offset tarkoittaa hammaspyörien akseleiden keskilinjojen välistä etäisyyttä toisistaan. Hammaspyörien offsetilla mahdollistetaan suuremmat välitykset. Offsetilla saadaan suurennettua käytettävän hammaspyörän halkaisijaa ja täten myös sen kontaktipinta-alaa, joka parantaa hammaspyörien kestävyyttä. Hammaspyöräparin offsetilla saadaan tehtyä myös akseleiden laakeroinnista tukevampi. (Collins 2017.) Oman kokemukseni mukaan offset-hammaspyöräparit ovat pääsääntöisesti välityksellisiä eli hammaspyörien välitys on jokin muu kuin 1:1. Kuvassa 1 on havainnollistettu offset eli akseleiden keskilinjojen välistä etäisyyttä.



Kuva 1 Hammaspyöräparin offset

2.2 Hammaspyörätyypit

Seuraavissa luvuissa esitellään lyhyesti hammaspyörätyyppejä, mitä eri hammaspyörätyypeillä haetaan sekä kerrotaan niiden etuja ja haittoja.

2.2.1 Suorahampainen hammaspyörä

Suorahampaisia hammaspyöriä käytetään yksinkertaisissa vaihteistoissa esimerkiksi manuaalityöstökoneen vaihteistossa. Hammaspyöriä voidaan siirtää aksiaalisesti esimerkiksi vaihteen vaihtamiseksi. (Keinänen & Järvinen 2014, 132.) Suorahampainen hammaspyörä on kaikista helpoin ja edullisin valmistaa. Suorahampaisen hammaspyörän käynti on epätasaista ja äänekkästä. (Ansanharju 2009, 180–181.) Suorahampaisissa hammaspyörissä ei ole tehohäviötä akselin suunnassa, ja niissä on hyvä hyötysuhde. Suorahampaiset hammaspyörät ovat luotettavia ja kestäviä. Hampaiden pinnassa ei tapahdu liukumista. Suorahampaiset hammaspyörät eivät kestä suuria kuormia tai kierroksia. (Kumar 2020.) Suorahampaisia hammaspyöriä käytetään myös esim. ralliautojen vaihteistossa (Samsonas Motorsport, [viitattu 5.10.2022]).

2.2.2 Kartiohampainen hammaspyörä

Kartiohampaiset hammaspyörät mahdollistavat akseleiden kulman muutoksen toisiinsa nähden (Keinänen & Järvinen 2014, 132).

2.2.3 Vinohampainen hammaspyörä

Vinohampaisen hammaspyörän hammaskosketus jakautuu laajemmalle alueelle kuin esimerkiksi suorahampaisen hammaspyörän. Laajempi hammaskosketus kestää enemmän kuormaa ja on myös hiljaisempi. Vinohampaisissa hammaspyörissä liike siirtyy liukumalla, joka vaikuttaa osaltaan hiljaisempaan ääneen verrattuna suorahampaiseen hammaspyörään. Vinohampaista hammaspyörää käytetään esimerkiksi henkilöautojen vaihteistossa. (Keinänen & Järvinen 2014, 132.)

2.2.4 Kaarevahampainen kartiohammaspyörä

Edellisiin hammaspyörätyyppeihin verrattuna, kaarevahampainen hammaspyörä kestää kuormaa ja pyörintänopeutta eniten. Käynti on hiljaista ja tasaista. Hammaskosketuspinta laajenee kuorman mukaan suuremmaksi. Hammaskosketuspinta-ala on suuri, ja täten hammaspyörän koko voi olla pienempi verraten muihin hammaspyörätyyppeihin. Kaarevahampaisen kartiohammaspyörän hyötysuhde on hyvä ja lähes verrattavissa suorahampaisen hammaspyörän hyötysuhteeseen. (Army Materiel Command 1974, 7-5 – 7-10.) Kaarevahampainen hammaspyöräpari sietää jonkin verran voimansiirron/akseliston virheitä, ja se on mahdollista ottaa huomioon hammaspyörän suunnittelussa ja valmistuksessa (Radzevich 2018, 600–601).

Suuresta kokonaisryntösuhteestaan ja jäykästä hammasmuodostaan johtuen kaarevahampaiset hammaspyörät ovat tehonsiirtokyvyltään ylivoimaisia verrattuna muihin hammaspyörätyyppeihin (Rontu 2010, 3).

Kaarevahampaisissa hammaspyörien hampaissa on aina kovera ja kupera puoli. Hammaspyörillä on aina pääsääntöinen pyörimissuunta, mutta hammaspyöriä voidaan pyörittää molempiin suuntiin. (KHK Stock Gears, [viitattu 5.8.2022].) Epänormaali pyörimissuunta on yleensä epäedullinen hammaspyörien toiminnan kannalta. (Rontu 2010, 3). Kaarevahampaisissa hammaspyörä parissa toinen hammaspyörä on aina vasenkätinen ja toinen oikeakätinen. Yleensä normaalissa pyörimissuunnassa pyörittävän hammaspyörän kontaktissa olevan hampaan puoli on kovera ja pyöritettävä hammaspyörän hampaan puoli kupera. (KHK Stock Gears, [viitattu 5.8.2022].) Taulukossa 1 havainnoidaan hammaspyörien pyörimissuunnan vaikutus hampaiden pintoihin.

Taulukko 1 Hammaspyörien kätsyyden taulukko (KHK Stock Gears, [viitattu 5.8.2022]).

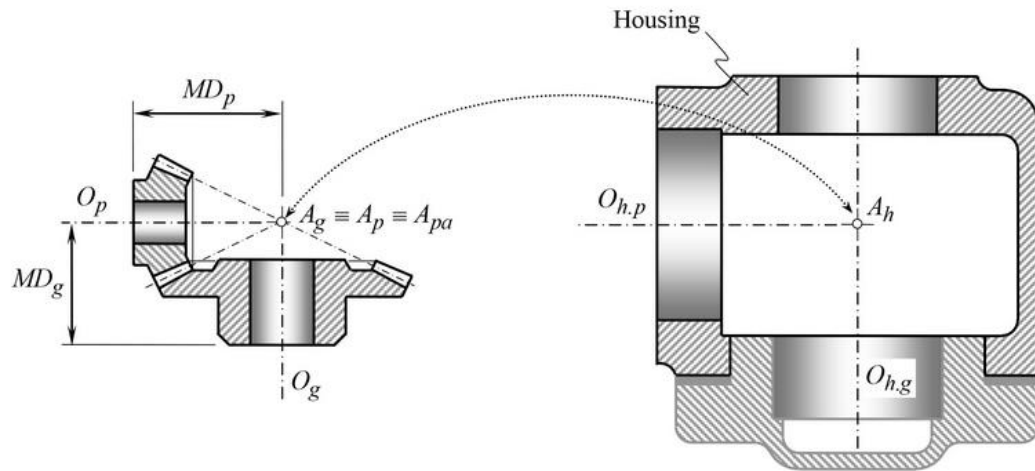
Oikeakätinen pyörittävä hammaspyörä	Kontakti pinta	
Pyörittävän hammaspyörän pyörimissuunta	Pyörittävä hammaspyörä (Oikeakätinen)	Pyöritettävä hammaspyörä (Vasenkätinen)
Oikeakätinen pyörimis-suunta (myötäpäivään)	Kupera	Kovera
Vasenkätinen pyörimis-suunta(vastapäivään)	Kovera	Kupera
Vasenkätinen pyörittävä hammaspyörä	Kontakti pinta	
Pyörittävän hammaspyörän pyörimissuunta	Pyörittävä hammaspyörä (Vasenkätinen)	Pyöritettävä hammaspyörä (Oikeakätinen)
Oikeakätinen pyörimis-suunta (myötäpäivään)	Kovera	Kupera
Vasenkätinen pyörimis-suunta(vastapäivään)	Kupera	Kovera

2.3 Hammaspyörien asennukseen ja kunnossapitoon liittyvää teoriaa

Hammaspyörien asennuksessa tulee ottaa huomioon hammaspyörien optimi kuormanjako, tasainen käynti ja sopiva vällys. Yleensä hammaspyörien valmistaja määrittää hammaspyörien sopivan etäisyyden toisistaan. (Marsh 2013, 66–67.) Hammaspyörien valmistuksessa on omat toleranssit, jotka tulee ottaa huomioon vaihdettaessa uusia hammaspyöriä hammaspyörärakenteeseen (Curtis & Farago 2014, 481–495).

2.3.1 Asennusetäisyys

Tärkein säädettävä parametri hammaspyörien asennuksessa on asennusetäisyys. Asennusetäisyys määrittää hammaspyörän sijainnin määrittävistä tasosta hammasjaon kartion kuviteltuun kärkeen. Pinionihammaspyörän asennusetäisyys on havainnollistettu kuvion 2 kohdassa MDp ja lautashammaspyörän asennusetäisyys kohdassa MDg. (Stephen & Radzevich 2019.) Asennusetäisyys on kuitenkin suunnittelijan määrittelemä erilaisista arvoista koostuvan laskentakaavan kiinteä muodollinen arvo, jolla on myös oma toleranssinsa (Marsh 2013, 60–62). Molempien hammaspyörien hammasjaon kartion kuvitellut kärjet tulisi olla toisissaan kiinni. Nämä ovat myös akseleiden poikkileikkaukseen nähden hammaspyörävaihteen pesän keskipisteessä. (Stephen & Radzevich 2019.)



Kuvio 2 Hammaspyörän asennusetäisyys (Stephen & Radzevich. 2019).

Jos hammaspyörät koneistetaan pareiksi, voi valmistaja testaamalla hakea hammaspyöräparin optimin käynnin ja kuorman jakautumisen hammaspyörien hampaiden kesken. Hammaspyörien optimi asennusetäisyys voidaan testata, säätää ja tallentaa kokoonpanoa varten. (Marsh 2013, 66–67.)

2.3.2 Hammasvällys

Toiseksi tärkein säädettävä parametri hammaspyörien asennuksessa on hammasvällys. Hammasvällys on rako hammaspyörien hampaiden välissä. Tietty määrä välystä on välttämätön olla, jotta voidaan saavuttaa hammaspyörien oikea toiminta ja käynti. Liiallinen hammasvällys aiheuttaa iskumaista kuormaa hammaspyörän hampaille käynnistyksissä ja suunnanvaihoissa, mikä voi aiheuttaa hampaiden vaurioita. Riittämätön hammasvällys voi aiheuttaa liiallista kulutusta ja vaurioita hammaspyörille. (Marsh 2013, 66–67.)

Kuvassa 2 on MTE työstökoneen kulmapään kaarevahampainen kartiohammaspyörä, johon on merkitty hammasvälys. Kuvaan on korostettu nuolimerkintä, jonka avulla on merkitty hampaat hammaspyöräparin kesken. Hammaspyörien keskinäinen välitys on 1:1, joten ne pyörivät samalla hampaalla koko ajan. Näissä tapauksissa kokemukseni mukaan hammaspyörät on hyvä laittaa samalle hampaalle, missä ne ovat olleet. Näin taataan optimi käynti hammaspyörille. Melu voi lisääntyä, jos hammaspyörät laitetaan eri hampaalle.



Kuva 2 MTE kulmapään hammaspyörän merkinnät

2.3.3 Hammaskosketus

Jotta voitaisiin taata hammaspyörien oikea toiminta, tulee siinä olla tietty hammaskosketus. Hammaskosketus on pinta-alue, jossa hammaspyörien hampaat ovat kontaktissa toisiinsa. Kuormitettuna hammaspyörien hammaskosketuksen tulisi tyypillisesti olla leveä ja keskellä hammasta sekä leveys- että korkeussuunnassa. (Marsh 2013, 66–67.) Kaarevahammaspyörien pyöriessä hampaiden kontakti alkaa ulkokehältä ja liukuu hampaan sisäkehälle. Hammaskosketus voidaan tarkastaa erikoismaalilla tai sovitevärillä. Hammaskosketusta säädetään soviterenkailla, joilla hammaspyörän sijaintia muutetaan akselin suunnassa toiseen hammaspyörään nähden. (Rauti, 2013, 4–6.) Kuvassa 3 on sovitevärillä tarkastettu hammaskosketus BMW:n tasauspyörästön hammaspyörässä.



Kuva 3 Sovitevärillä tarkastettu hammaskosketus hammaspyörässä

2.3.4 Laakerointi

Tärkeä hammaspyörien toimintaan vaikuttava asia on se, että hammaspyörä ei saa päästä elämään akselin suunnassa. Päittäisvälystä ei siis saa olla. (Stephen & Radzevich 2019.) Omien havaintojeni perusteella päittäisvällys muuttaa hammasvälystä sekä hammaskosketusta, mikä on aina huono asia hammaspyörien käynnin ja toiminnan kannalta.

3 Nykytilanteen kuvaus

3.1 Nykytilanteen kuvaus Maint Way Oy:llä

Kunnostettaessa hammaspyörärakenteita Maint Way Oy:llä hammaspyörärakenteissa on yleensä jokin vika ja sille pyritään etsimään aiheuttaja. Joskus vian aiheuttajana voi olla vain osien käyttöiän täytyminen. Hammaspyörärakenteissa laakerointi yleensä uusitaan kunnostuksen tai korjauksen yhteydessä.

Hammaspyörärakenne, jossa hammaspyörät ovat kunnossa ja vain laakerointi uusitaan, pyritään laakeroinnin sovitteet sovittamaan siten, että hammaspyörien sijainti pesässä pysyisi samana. Ideaalitulanteessa tällöin vältetään hammaspyörien sovittamiselta kokonaan. Myös laakereilla on oma valmistustoleranssinsa ja niiden vahvuus muuttuu usein, kun vaihdetaan uudet laakerit.

Hammaspyörärakenteen korjaustyö, jossa hammaspyörät ovat vialliset, hammaspyörät on uusittava. Hammaspyörissä on valmistukseen liittyviä mittaeroja, jolloin uudet hammaspyörät joudutaan pääosin aina sovittamaan vanhaan hammaspyörärakenteeseen. Hammaspyörien sovittaminen vaatii hammaspyörärakenteen koekasauksia, hammasväläyksen mittauksia ja hammaskosketuksen tarkastuksia. Ensimmäiseen koekasaukseen saatetaan jopa arvata sovitelevyjien mitat tai kasataan se vanhojen hammaspyörien sovitteilla. Jos hammasväläys ja/tai kosketus on pielessä, arvioidaan, mitä sovitelevyjä tulee muuttaa seuraavaan koekasaukseen. Joskus sovittaminen vie huomattavasti aikaa ja koekasauksia joutuu tekemään useaan kertaan. Jotkut hammaspyörärakenteet ovat työläitä purkaa ja kasata, jolloin koekasaukseen ja hammaspyörien sovittamiseen kuluu huomattavasti aikaa. Hammaspyörärakenteesta riippuen ongelmana hammaspyörien sovittamisessa on yleensä myös se, että hammaspyörien sovitteet vaikuttavat laakeroinnin sovitteisiin ja päinvastoin.

3.2 Työn tavoitteet

Työn päätavoitteena oli saada hammaspyörärakenteiden kunnostus- sekä korjaustöiden läpimenoaika lyhyemmäksi. Tavoitteen saavuttamiseksi tuli määritellä vanhojen ja uusien hammaspyörien vertailumittaustapa. Mittaukset vaativat mahdollisesti mittavälineen ja/tai mittajigin, johon hammaspyörä asetetaan. Mittavälineen ja/tai mittajigin tulisi käydä moneen erikokoiseen hammaspyörään tai sen tulisi olla helppo ja nopea valmistaa aina hammaspyöräkohtaisesti. Maint Way Oy:llä korjattavat hammaspyörärakenteet vaihtelevat paljon ja täten myös hammaspyörien mitat ja muut parametrit poikkeavat usein toisistaan. Työn mittaukset pyritään tekemään Maint Way Oy:n korjaamotiloissa, jolloin asiakastöissä on käytettävissä samat resurssit kuin tutkimustilanteessakin. Hammaspyörien mittauksista tehdään myös työohje Maint Way Oy:n henkilöstölle.

Mittauksilla pyritään saamaan vanhasta hammaspyörästä vertailumitat uuteen hammaspyörään, ja niiden avulla voidaan laskea alustavia sovitelevyjä uusille asennettaville hammaspyörille. Tämä vähentäisi hammaspyörien sovittamisen ja koekausuksien määrää ja täten hammaspyörärakenteiden korjauksien läpimenoaikaa.

4 Työn toteutus

Tässä työssä puhutaan XYZ-koordinaatistosta. Koordinaatistossa Z-suunta on aina vertikaalinen. Kuvassa 4 on havainnollistettu pyörähdysakselien suunnat. A on X-akselin suuntainen pyörähdysakseli, B on Y akselin suuntainen pyörähdysakseli ja C on Z akselin suuntainen pyörähdysakseli. Havainnekuvassa nuolen päät osoittavat akseleiden + suuntaan.



Kuva 4 Havainnekuva koordinaatiston akseleista

4.1 Hammaspyörien mittaustavat ja -välineet

Työ aloitettiin tutkimalla olemassa olevia hammaspyörien mittausmenetelmiä, mikäli mahdollisesti löydettäisiin jopa valmis mittaväline.

Yksinkertaiset mittaussvälineet on pääosin tarkoitettu vain suora- ja vinohampaisille hammaspyörille. Esimerkiksi suorahampaisten hammaspyörien mittaukseen käytetään hammasvälimikrometriä, joka on varustettu lautaskärjillä. Mittauksessa mitataan hampaiden ylimittauspituutta, jota verrataan tiedetyn moduulin ja hammasluvun perusteella taulukon arvoihin. Mittausmenetelmää voidaan käyttää koneistusvirheiden lisäksi myös hammaspyörän kuluneisuuden tarkastukseen. Ylimittausmatka on ryntöjaon ja hampaan paksuuden summa. (Keinänen & Järvinen 2014, 132.)

Kaareva- ja vinohampaisten hammaspyörien mittaväline on 3D-koordinaattimittauskone. 3D-koordinaattimittauskoneessa on yksi täysin ohjelmoitava mittauspää, jolla se voi mitata hammaspyörästä eri asioita, kuten esimerkiksi profiilivirheitä. Mittauskoneella voidaan jopa skannata hammaspyörä. (Curtis & Farago 2014, 481–495.) 3D-koordinaattimittauskoneeseen saa ohjelmistoja, joihin syötetään hammaspyörän parametrit, ja kone mittaa hammaspyörän automaattisesti (Mitutoyon jälleenmyyjä 2022).

3D-koordinaattimittauskone olisi mielestäni hyvä ja tarkka vaihtoehto hammaspyörien mittaukseen, mutta Maint Way Oy:llä ei ole 3D-koordinaattimittakonetta. 3D-koordinaattimittauskoneen ja lisävarusteena hammaspyörien mittaushjelmistojen yhteishankintahinta olisi niin suuri, että mittauksien tiheyteen nähden se olisi tarpeettoman kallis hankinta. 3D-koordinaattimittauksen voisi tehdä myös alihankintana, mutta tämä lisäisi mahdollisesti hammaspyörärakenteen korjauksen läpimenoaikaa, kun hammaspyörät lähetetään alihankkijalle ja ne viettävät tietyn aikaa mittauksessa ennen paluuta. Opinnäytetyön toimeksiantaja ei halunnut keskittyä hammaspyörien 3D-koordinaattimittausvaihtoehtoon.

Olemassa olevien mittavälineiden ja -menetelmien tutkimisesta havaittiin oleellisia mitattavia kohtia hammaspyöristä sekä mittauksissa hyödynnettäviä ominaisuuksia hammaspyörissä.

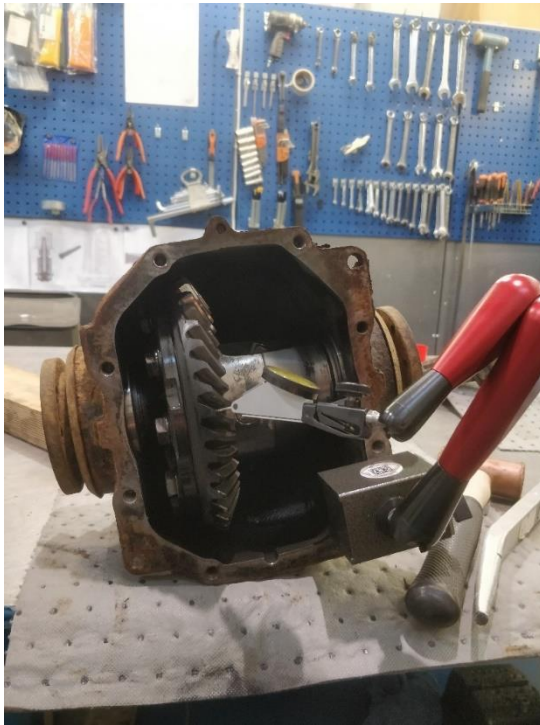
4.2 Työn esivalmistelu

Hammaspyörien koesovitusta ja -mittausta varten tarvittiin hammaspyörärakenne. Yleisimmät Maint Way Oy:n korjaukseen tulevat hammaspyörärakenteet, joissa on kaarevahampaiset kartiohammaspyörät, ovat hyvin työläitä tehdä, ja hammaspyörien koesovitukset vaativat paljon purkamista ja kasaamista. Opinnäytetyön aihe liittyi pääosin hammaspyöriin eikä muihin hammaspyörärakenteen osiin. Opinnäytetyötä varten hankittiin kaksi BMW:n henkilöauton tasauspyörästä työn tutkimustarkoitukseen (kuva 5). Tasauspyörästäissä hammaspyörien vaihto sekä koekasaukset ovat helppoja ja nopeita tehdä. Tasauspyörästäöt ovat BMW 215K -tasauspyörästäötä 2,28 välityksellä. BMW 215K -tasauspyörästäössä on kaarevahampaiset kartiohammaspyörät. Suurin ero Maint Way Oy:n yleisimpiin korjattaviin hammaspyörärakenteisiin on välitys. Pääosin Maint Way Oy:n korjaamat hammaspyörärakenteet ovat 1:1 välityksellä, joissa hammaspyörillä haetaan muita asioita, kuten esim. akseleiden kulman muutoksia. Tasauspyörästäössä myös pinionakseli on offsetissä suhteessa lautaspyörän akseliin, 1:1 välityksellä olevat hammaspyörät eivät kokeukseni mukaan ole yleensä offsetissä toisiinsa nähden.



Kuva 5 Työssä käytetyt tasauspyörästäöt

Esivalmistelut alkoivat tasauspyörästöjen huolellisella pesulla ennen purkua. Tällöin lika ei pääse purkuvaiheessa muun muassa laakereille ja työpöydät pysyvät puhtaampana. Ennen purkua tasauspyörästöjen hammasvälykset mitattiin (kuva 6) ja kirjattiin ylös. Tasauspyörästöt puhdistettiin myös sisäpuolelta öljystä ja liasta, jotta saatiin tarkastettua hammaskosketukset sovitevärillä ennen tasauspyörästön purkamista.



Kuva 6 Hammasvälyksen mittaus tasauspyörästöstä

Purkuvaiheessa laakerit, soviterenkaat, hammaspyörät ja muut osat (kuva 7) merkittiin, jotta osat eivät mene sekaisin tasauspyörästöjen kesken. Kuvassa 8 on purettu tasauspyörästö.



Kuva 7 Havainnollistava kuva tasauspyörästä merkittävistä osista



Kuva 8 Irrotettu tasauspyörästä ja lautaspöörä

4.3 Mittaus

Mittausten tarkoitus oli vertailla hammaspyöriä keskenään ja saada niistä mittaeroja. Mittaerojen suhde hammaspyörän asennusetäisyyteen pyritään havainnollistamaan, jotta tiedetään mahdolliset sovitelevyjien muutokset vaihdettaessa uutta hammaspyörää hammaspyörärakenteeseen. Mittaukset suunniteltiin tehtäväksi Maint Way Oy:llä olevassa mittapöydässä, jolla mittauksiin saadaan tarkkuutta sekä Z-suunta pysyy aina vakiona mittauksissa.

Hammaspyörän mittausta varten tulee olla jokin jigi tai paikannin hammaspyörälle, jotta vertailtavat hammaspyörät asettuvat mittapöytään samaan kohtaan myös X-, Y- ja C-akseleiden suhteen. Hammaspyörän asetusta varten valmistettiin säädettävät paikantimet. Paikannin on säädettävissä eri kokoisille hammaspyörille. Erikoisempia hammaspyöriä varten voidaan valmistaa uudet paikantimet, jotka voidaan valmistaa Maint Way Oy:n metallintyöstökoneilla.

Vertailtavista hammaspyöristä mitataan kaksi eri asiaa. Mittausmenetelmällä saatiin mittaustuloksiin tarkkuutta vähentäen hammaspyörien valmistukseen liittyviä mittaheittoja. Mittaustulokset vaikuttavat toisiinsa, ja hammaspyörän asennusetäisyys laskettiin eri mittausten tuloksista. Mittauksissa mitattiin hammaspyöräparin molemmat hammaspyörät sekä vanhoista että uusista hammaspyöristä.

Mittausmenetelmä pystytään suorittamaan myös hammaspyörille, jotka ovat kulu-neet hampaan tavanomaisen pyörimissuunnan puolelta, ja vertaamaan tämän asennusetäisyyttä uuteen hammaspyörään. Mittausmenetelmää ei pysty suorittamaan pahasti vaurioituneisiin hammaspyöriin, joissa hammaspyörän hampaat ovat vaurioituneet pahasti molemmin puolin, sulaneet tai irronneet kokonaan.

4.4 Koekasaukset

Tasauspyörästöt koekasattiin toistensa lautaspöyrillä. Hammaspyörien vaihdossa tulee huomioida, että ne tulisi aina vaihtaa pareittain, koska ne ovat parisovitettuja. Koekasaus tehtiin tutkimustarkoituksessa, eikä tasauspyörästöjä otettu käyttöön tai kuormitettu koekasauksen hammaspyörillä.

Koekasauksella varmistettiin hammaspyörien vertailumittaustuloksen suhde hammaspyörän asennusetäisyyteen. Kasauksessa testattiin myös hammaspyörien sovittelevyjen vahvuuksien muutosten vaikutusta hammasvälykseen.

Koekasauksissa todettiin, että toisessa tasauspyörästössä hammasvälys pienei ja toisessa suureni. Myös hammaskosketus tarkastettiin sovitevärillä ja havaittiin eri hammaspyörien ja välyksien vaikutusta hammaskosketukseen.

4.5 Mittausohje

Hammaspyörien vertailumittauksista tehtiin selkeä ohje, jota noudattamalla Maint Way Oy:n henkilöstö pystyy suorittamaan mittauksia. Mittausohjeita tehtiin kaksi. Toisessa mittausohjeessa on tunnetun hammaspyörän vertailumittausohje. Tunnetun hammaspyörän vertailumittausohjeessa on tietyn hammaspyörärakenteen hammaspyörien tarkka ja koekasaamalla testattu mittausohje. Ei-tunnetun hammaspyörän mittausohje on aina työläämpi suorittaa. Ei-tunnetun hammaspyörän mittausohjeella saadaan kuitenkin suurpiirteiset mittaustulokset ja tieto, paljonko vertailtavan hammaspyörän mittaustulos vaikuttaa asennusetäisyyteen, jotta hammaspyörärakenne voidaan koekasata. Koekasauksen jälkeen kyseisestä hammaspyörärakenteesta tehdään tunnetun hammaspyörärakenteen mittausohje edellisiä ohjeita pohjana käyttäen. Tunnettujen hammaspyörien mittausohjeissa voi vaihdella esimerkiksi hammaspyörien pitimet ja niiden asetus, mittaustulosten vaikutus asennusetäisyyteen ja sovittelevyjen vahvuuksien muutoksien vaikutus hammasvälykseen. Kun kyseistä hammaspyörärakennetta korjataan toistamiseen, hammaspyörien vaihto ja/tai säätö on huomattavasti helpompaa.

5 TULOKSET JA YHTEENVETO

Työn tavoitteena oli vähentää hammaspyörärakenteiden korjaukseen kuluva työaika määrittelemällä hammaspyörän mittausmenetelmä sekä mittojen laskentatapa. Mittausmenetelmän avulla saatiin korjattavien hammaspyörärakenteiden läpimenoaika lyhyemmäksi tapauksissa, jossa hammaspyörät vaihdetaan ja sovitetaan hammaspyörärakenteeseen.

Kaarevahampaisten kartiohammaspyörien vertailumittausmenetelmä saatiin selville perehtymällä hammaspyörien ja niiden mittausten teoriaan sekä tutkimalla erilaisia hammaspyöriä ja tekemällä mittauksia sekä koekasauksia hammaspyörärakenteille.

Työn alussa perehdyttiin olemassa oleviin hammaspyörien mittausmenetelmiin. Todettiin kuitenkin, että yksinkertaiset mittausvälineet oli pääosin tarkoitettu vain suora- ja vinohampaisille hammaspyörille, ja kaareva- sekä vinohampaisten hammaspyörien mittavälineenä käytetään usein 3D-koordinaattimittauskonetta. Tätä menetelmää ei kuitenkaan käytetty tässä työssä sen kalliin hankintahinnan vuoksi. Olemassa olevien mittausvälineiden selvityksen ansiosta saatiin selville olennaisimmat mitattavat pinnat hammaspyörässä.

Mittausmenetelmän tuli olla mitattavissa Maint Way Oy:n korjaamotiloissa, jonka vuoksi hyödynnettiin Maint Way Oy:n mittapöytää. Mittapöytään valmistettiin pitimet hammaspyörille, ja mittauksissa hyödynnettiin Maint Way Oy:llä olevia mittavälineitä. Mittausmenetelmän tuli soveltua erilaisille kaarevahampaisille hammaspyörille, koska korjattavat hammaspyörärakenteet vaihtelevat paljon.

Hammaspyörien mittausta ja koesovitusta varten hankittiin kaksi BMW:n 215K tassaupyörästä 2,28 välityksellä. Valitut hammaspyörästä erosivat Maint Way Oy:llä korjattaviin hammaspyörärakenteisiin välityksen ja pinionakselin offsetin osalta. Tassaupyörästä puhdistettiin ja niistä tarkastettiin sekä mitattiin oleelliset asiat ennen niiden purkamista.

Varsinaisten mittausten tarkoituksena oli vertailla hammaspyöriä keskenään ja saada niistä mittaeroja. Mittaukset toteutettiin eri kohdista hammaspyörää. Mittaus tulokset vaikuttivat toisiinsa ja hammaspyörän asennusetäisyyden muutoksen vaikutus laskettiin mittausten tuloksista. Hammaspyörien vertailumittauksilla päästiin näkemään vertailumittauksen suhde hammaspyörän asennusetäisyyteen, joka testattiin koekasauksilla. Koekasauksien sivuhuomiona todettiin myös hammaspyörien sovitelevyjen vahvuuksien muutosten vaikutusta hammasvälykseen.

Mittausmenetelmän tuli soveltua erilaisille kaarevahampaisille hammaspyörille, ja hammaspyörien asetusta varten tehdyt pitimet ovat säädettävissä. Tehtyjen pitimien avulla vertailtavan hammaspyörän voi vaihtaa pitimiin koskematta mittausvälineiden ja pitimien asetuksiin. Pitimet ovat muokattavissa eri kokoisille hammaspyörille. Erikoistapauksia varten Maint Way Oy:n työstökoneilla on mahdollista valmistaa uudet pitimet hammaspyörien asetukseen.

Mittausten jälkeen tasauspyörästöt koekasattiin toistensa lautaspöyrillä. Koekasauksessa varmistettiin myös vertailumittaus tuloksen suhde hammaspyörän asennusetäisyyteen. Kasauksissa todettiin, että toisessa tasauspyörästössä hammasväly pieneni ja toisessa suureni.

Tutkimuksien jälkeen hammaspyörien vertailumittauksista laadittiin toimeksiantajalle selkeät ohjeet, joita noudattamalla työntekijät pystyvät suorittamaan mittauksia ja vähentämään täten hammaspyörärakenteiden korjaukseen käytettävää työaika. Työohjeita Maint Way Oy:n henkilöstölle tehtiin kaksi: tunnetun hammaspyörän mittausmenetelmä ja ei-tunnetun hammaspyörän mittausmenetelmä. Tunnetun hammaspyörän vertailumittausohjeessa on tietyn hammaspyörärakenteen hammaspyörien tarkka mittausohje. Ei-tunnetun hammaspyörän mittausmenetelmä on työlämpi suorittaa, mutta mittausohjeella saadaan kuitenkin sinnepäin olevat mittaus tulokset ja hammaspyörärakenne voidaan koekasata. Koekasauksen jälkeen kyseisestä hammaspyörärakenteesta tehdään tarkempi tunnetun hammaspyörärakenteen mittausohje edellisiä ohjeita pohjana käyttäen.

Kaiken kaikkiaan mittausmenetelmien tarkkuustavoite saavutettiin. Ei-tunnetun hammaspyörien mittausohjeella saadaan suuntaa antavat mittaustulokset, joiden perusteella hammaspyörärakenne voidaan koekasata. Tunnetun hammaspyörän mittausohje on tarkempi, ja se nopeuttaa ja helpottaa kyseisen hammaspyörärakenteen korjausta jatkossa. Hammaspyörissä on oma valmistustoleranssinsa, joten vertailumittausmenetelmän tarkkuus riippui myös kyseisen hammaspyörän valmistustoleranssista. Joissakin hammaspyörissä hammasvällys voi vaihdella eri kohdissa hammaspyöriä, ja se tulee ottaa huomioon hammasvällystä säädettäessä, jotta hammasvällys pysyy sallituissa rajoissa. Nämä asiat ovat yksilöllisiä hammaspyörärakenteesta riippuen: joissakin hammasvällystoleranssi voi olla suurempi tai pienempi, jolloin toisissa hammaspyörärakenteissa hammasvällys saadaan todennäköisesti vertailumittauksella kerralla kuntoon, kun taas toisissa voi joutua sitä hienosäätämään.

Tuleva kokemus hammaspyörärakenteiden korjauksesta lisää myös tietoutta hammaspyörien vertailumittauksen vaikutuksesta asennusetäisyyteen. On myös mahdollista, ettei tunnetun hammaspyörärakenteen ohjetta tarvitse aina tehdä, kun samaa ohjetta voi hyödyntää samoilla pohjatiedoilla oleviin hammaspyöriin.

Työn tuloksia hyödynnettäessä tulee huomioida, että mittauksissa saattoi tulla pieniä mittaheittoja. Mittaheittoja voi tulla myös hammaspyörien korjauksen myöhemmissä vaiheissa johtuen niiden valmistustoleranssista. Vaikka työssä saatiin siis laadittua hyvä pohja hammaspyörien mittaukseen, tulee korjauksissa kuitenkin aina huomioida eri hammaspyörien eroavaisuudet ja niiden aiheuttamat muutokset mittoihin.

LÄHTEET

Ansaharju, T. 2009. Koneenasennus ja kunnossapito. Helsinki: WSOY Oppimateriaalit.

Army Material Command .1974. Engineer Design Handbook – Helicopter Engineer, Part One – Preliminary Design: (AMCP 706-201). [Verkkokirja]. Yhdysvallat: U.S. Army Material Command. [Viitattu 10.9.2022]. Saatavana Knovel -palvelusta. Vaatii käyttöoikeuden.

Blom, S., Lahtinen, P., Nuutio, E., Pekkola, K., Pyy, S., Rautiainen, H., Sampo, A., Seppänen, P. & Suosara, E. 1999. Koneenelimet ja mekanismit. 4. uud. p. Helsinki: Edita..

Collins, D. 2017. Hypoid gearboxes: What are they and where are they used? [Verkkosivu]. [Viitattu 10.11.2022]. Saatavana: <https://www.motioncontrol-tips.com/hypoid-gearboxes-what-are-they-and-where-are-they-used/>

Curtis, M. & Farago, F. 2014. Handbook of Dimensional Measurement. [Verkkokirja]. Yhdysvallat: Industrial Press. [Viitattu 27.5.2022]. Saatavana Knovel -palvelusta. Vaatii käyttöoikeuden.

Keinänen, T & Järvinen, M. 2014. Mittaustekniikka. Helsinki: Sanoma Pro.

KHK Stock Gears. Ei päiväystä. Gear Forces. [Verkkosivu]. [Viitattu 5.8.2022]. Saatavana: https://khkgears.net/new/gear_knowledge/gear_technical_reference/gear_forces.html

Kumar, A. 17.5.2020. Spu Gear: Definition, Types, Terminology, Advantages, Disadvantages, Applications. [Verkkojulkaisu]. [Viitattu 30.6.2022]. Saatavana: <https://themechanicalengineering.com/spur-gear/>

Marsh, S. 2013. How to Design and Install Bevel Gears for Optimum Performance: Lessons Learned. [Verkkolehtiartikkeli]. Geartechnology 1.6.2013, 60-69. [Viitattu 1.11.2022]. Saatavana: <https://www.geartechnology.com/articles/21914-how-to-design-and-install-bevel-gears-for-optimum-performance-lessons-learned>

Mitutoyon jälleenmyyjä. 8.2.2022. Hammaspyörän mittaus. [Henkilökohtainen sähköpostiviesti]. Vastaanottaja: Jesse Lindholm. [Viitattu 2.10.2022].

Radzevich, S. 2018. Theory of Gearing – Kinematics, Geometry, and Synthesis (2nd Edition – Revised and Expanded). [Verkkokirja]. Yhdysvallat: CRC Press. [Viitattu 9.9.2022]. Saatavana Knovel -palvelusta. Vaatii käyttöoikeuden.

- Rauti, T. 2013. Gear failures: Lessons learned. [Verkkajulkaisu]. [Viitattu 1.8.2022]. Saatavana: https://dynamic-positioning.com/proceedings/dp2013/thrusters_Rauti_pp.pdf
- Rontu, J. 2010. Hammaskosketusanalyysi kaarevahampaisten kartiohammaspyörien suunnittelutyökaluna. [Verkkajulkaisu]. Tampere: Tampereen teknillinen yliopisto. Konetekniikan koulutusohjelma. Opinnäytetyö. [Viitattu 1.10.2022]. Saatavana: <https://trepo.tuni.fi/handle/123456789/25689>
- Samsonas Motorsport. Ei päiväystä. BMW M3 E36/E46 4 and 5 speed dogbox kit. [Verkkosivu]. [Viitattu 5.10.2022]. Saatavana: <https://samsonas.com/gear-box/13/>
- Stephen & Radzevich. 2019. Understanding the mounting distance: Intersected-axes gearing (bevel gearing). [Verkkolehtiartikkeli]. Gear Solutions. 15.11.2019. [Viitattu 30.9.2022]. Saatavana: <https://gearsolutions.com/features/understanding-the-mounting-distance-intersected-axes-gearing-bevel-gearing/>

LIITTEET

Liite 1. Ei-tunnetun hammaspyörän vertailumittausohje (salainen)

Liite 2. Tunnetun hammaspyörän vertailumittausohje (salainen)