



VAASAN AMMATTIKORKEAKOULU
UNIVERSITY OF APPLIED SCIENCES

Jimi Pukkinen

RUTIINIKOESTUSDATAN VERTAILU

Sähkömoottorit koot 71–112 ja 132–180

Tekniikka
2022

TIIVISTELMÄ

Tekijä	Jimi Pukkinen
Opinnäytetyön nimi	Rutiinikoestusdatan vertailu
Vuosi	2022
Kieli	suomi
Sivumäärä	32
Ohjaaja	Timo Rinne / VAMK Daniel Barg / ABB

Työn tarkoituksena oli vertailla rutiinikoestusdataa tietyltä ajanjaksolta. Tavoitteen on, löytää syy mikä aiheuttaa epätasaiset testaustulokset, mistä johtuu, että tietyillä ajanjaksoilla on tapahtunut niin sanottuja trendejä, jossa testaus tulokset ovat heitelleet lasketusta arvosta alle tai ylitse. Vertailussa katsottiin kolmen eri moottorin laskelmaa ja niiden koestustuloksia. Työssä keskityttiin pieniin moottoreihin, jotka olivat runkokooltaan 71 ja 132.

Vertailussa katsottiin MOT- Test-ohjelmaan ja WebEA:seen tulleita tuloksia. Tuloksissa keskityttiin pääosin I₀-, I_k-, V₀- ja P₀- arvoihin, jotka vaikuttavat hyötysuhteeseen ja lämpenemään. Adept-ohjelmalla yritettiin laskea vaikuttavia tekijöitä tulosten heittelyihin, kuten vähentämällä ja lisäämällä kuparin määrää vyyhdissä, jonka myötä hyötysuhde ja lämpenemät muuttuivat.

Suurin todennäköinen syy arvojen heittelyihin on se, että käämitäänkö paketit käsin vai koneella. Käsin käämityissä paketeissa staattori on harvemmin identtinen, mikä aiheuttaa heittoa arvoissa. Konekäämityissä staattoreissa jäljet ovat lähelle identtisiä, minkä syystä tuloksetkin ovat tasaisia.

Syiden etsiminen oli haasteellista ja työtä vaikeutti myös se, että alihankkijoiden työmenetelmät eivät olleet tiedossa.

Avainsanat	sähkömoottorit, rutiinikoestusdata, koestus, sähkösuunnittelu
------------	---

ABSTRACT

Author	Jimi Pukkinen
Title	Comparison of Routine Test Data
Year	2022
Language	Finnish
Pages	32
Name of Supervisor	Timo Rinne / VAMK Daniel Barg / ABB Oy

The purpose of the work was to compare routine test data over a period. The aim was to find the cause of the uneven test results, due to which there are so-called trends in several data, where the test results have been fluctuating below or above the calculated value. In the comparison was three different motor calculations and the results of their testing data were examined. The thesis focused on small motors with frame sizes 71 and 132.

The results of the MOT-Test program and WebEA were compared. The results focused mainly on the values of I_0 , I_k , V_0 , and P_0 , which affect the efficiency and warm up. The Adept program was used to calculate the factors influencing the fluctuation of the results, such as reducing and increasing the amount of copper in the coil, which changed efficiency and heat.

The most likely reason for uneven values is the winding method of the stator packages, by hand or by machine. In hand-wound packets, the stator is less often identical, causing fluctuation in values. In machine-wound stators, the trace is almost identical, and the results are even.

Finding the reasons was challenging and the work was also complicated by the fact that the working methods of the subcontractors were not known.

Keywords	electric motor, routine test data, electrical design, and testing
----------	---

SISÄLLYS

TIIVISTELMÄ

ABSTRACT

1	JOHDANTO.....	7
2	ABB OY.....	8
	2.1 ABB globaalisti	8
	2.2 ABB:n historia.....	8
	2.3 ABB Suomessa.....	9
	2.4 ABB OY moottorit ja generaattorit	10
3	OIKOSULKUMOOTTORI.....	11
	3.1 Rakenne	11
	3.2 Toimintaperiaate.....	12
	3.3 Käyttötarkoitukset	13
4	RUTIINIKOESTUSDATAN LÄPIKÄYNTI	14
	4.1 Rutiinikoestusdatan historia	14
	4.2 ATEM – Test	14
	4.3 MOT – Test.....	14
	4.4 Adept.....	14
	4.5 WebEA.....	15
5	KÄÄMIN PÄÄN PITUUDEN VAIKUTUS.....	16
	5.1 Hyötysuhde ja lämpenemä	16
	5.2 Häviöt	18
	5.3 Tuloksia	19
6	RUUTIINITESTAUSDATA.....	21
	6.1 Rutiinikoestus.....	21
	6.2 Moottori 71.....	22
	6.3 Moottorin 132 tulokset.....	24
7	JOHTOPÄÄTÖKSET	30
	LÄHTEET	31

SYMBOLI- ja LYHENNELUETTELO

Käytetyt symbolit ja suureet

LM1	-	Vyyhdin puolikas pituus
Io	-	Tyhjäkäyntivirta
I _k	-	Lukittuneen moottorin kuormitusvirat
V ₀	-	Tyhjäkäyntijännite
P ₀	-	Tyhjäkäyntiteho
U _n	-	Nimellisjännite
I _n	-	Nimellisvirta
P _n	-	Nimellisteho
P ₁	-	Moottorin ottama teho
P ₂	-	Mekaaninen teho
IE	-	International Efficiency, Kansainvälinen hyötysuhde
K	-	Kelvin
ADEPT	-	Advanced Electrical Design Program Tool, Sähkömoottorin laskentaohjelma
ElApp	-	ABB Oy:n käyttämä arvokilpisuunnitteluohjelma
MOT Test	-	Moottorin rutiinikoestuksessa käyttämän ohjelmiston nimi
ATEM Test	-	ABB Oy:n käyttämä testitulosohjelma
SAP	-	ABB Oy:n Käyttämä ERP -ohjelmiston nimi
ERP	-	Enterprise Resource Planning, toiminnanohjausjärjestelmä

KUVA- JA TAULUKKOLUETTELO

Kuva 1. Oikosulkumoottorin rakenne.....	12
Kuva 2. Tehojakokaavio	19
Kuva 3. Hyötysuhteen lasketut pisteet.....	20
Kuva 4. Lämpenemän lasketut pisteet	20
Kuva 5. I0-arvon tulokset runkokoon 71 moottorista.	22
Kuva 6. Ik-arvon tulokset runkokoon 71 moottorista.	23
Kuva 7. V0-arvon tulokset runkokoon 71 moottorista.....	23
Kuva 8. P0-arvon tulokset runkokoon 71 moottorista.	24
Kuva 9. Lasketut tarkastusarvot runkokoon 71 moottorille.....	24
Kuva 10. I0-arvon tulokset laskelmalta 1 runkokoon 132 moottorissa.....	25
Kuva 11. Ik-arvon tulokset laskelmalta 1 runkokoon 132 moottorissa.	25
Kuva 12. V0-arvon tulokset laskelmalta 1 runkokoon 132 moottorissa.	26
Kuva 13. P0-arvon tulokset laskelmalta 1 runkokoon 132 moottorissa.....	26
Kuva 14. Lasketut arvot laskelmalta 1 runkokoon 132 moottorissa.	26
Kuva 15. I0-arvon tulokset laskelmalta 2 runkokoon 132 moottorissa.....	27
Kuva 16. Ik-arvon tulokset laskelmalta 2 runkokoon 132 moottorissa.	28
Kuva 17. V0-arvon tulokset laskelmalta 2 runkokoon 132 moottorissa.	28
Kuva 18. P0-arvon tulokset laskelmalta 2 runkokoon 132 moottorissa.....	29
Kuva 19. Lasketut arvot laskelmalta 2 runkokoon 132 moottorissa.	29
Taulukko 1. Hyötysuhdevaatimukset IEC / EN 60034-30-1-2014 mukaan.....	17
Taulukko 2. Eristysvastuksen raja-arvot.	21

1 JOHDANTO

Opinnäytetyö on tehty toimeksiantona ABB Oy, moottorit ja generaattorit, Vaasa. Opinnäytetyö käsittelee moottoreiden rutiinikoestusdataa ja tuloksiin vaikuttavia tekijöitä.

Työssä käydään läpi kuinka eri asiat ovat vaikuttaneet moottoreiden testaustuloksiin ja kuinka paljon tietystä moottorissa on heittoa testaustuloksissa. Käydään moottorin läpikäymistä ja otetaan huomioon, kuinka kuparin pituus vyyhdissä vaikuttaa moottorin hyötysuhteeseen ja lämpenemään.

Tälle työlle on ollut tarvetta, jotta voidaan verrata, onko moottorin hyötysuhteet ja lämpenemät muuttuneet vuosien varrella. Vertaamalla vuosien tuomia tuloksia, pystyy yritys mahdollisesti vaikuttamaan siihen, mistä osat tulevat, jotta testaustulokset olisivat tasaisempia.

Rutiinikoestusdataan kuuluu lämpenemät, jännitteet, virta, värinät ja kierrokset minuutissa. Työssä käytetyt ohjelmat, kuten laskentaohjelma Adept ja testitulosohjelma Atem-test ovat suunnittelijoilla päivittäisessä käytössä, jotta saadaan parhaat mahdolliset tulokset ja skenaariot laskettua ja tarkastettua. Niitten toimintaa ja tarkoitusta käydään hieman läpi tässä työssä ja mihin niitä tarvitaan, jotta voidaan luoda sopiva moottori asiakkaan pyytämällä arvoilla.

Työssä esitetyt tulokset ovat asiakkaille menevistä moottoreista, joista pitää huomioida myös se, että vaikka moottori ei ole mennyt läpi toleranssirajoista, on se korjattu ja testattu uudelleen. Moottoreita ei siis lähetetä asiakkaille ennen kuin ne täyttävät niille vaaditut standardit.

2 ABB OY

2.1 ABB globaalisti

ABB Oy on johtava sähkövoima- ja automaatioteknologiayhtymä, joka toimii yli 100 maassa työllistäen noin 105 000 ihmistä, joista Suomessa noin 5500 henkilöä. Yrityksen pääkonttori sijaitsee Sveitsin Zürichissä. ABB:n liikevaihto oli n.2 miljardia euroa vuonna 2021. ABB on listautunut pörssiin Zurichissa, Tukholmassa ja New Yorkissa. ABB:n kasvu perustuu sen teknologiseen voimaan ja vahvoihin paikallisiin juuriin, joita Suomessa edustaa Strömberg. ABB käyttää vuosittain tuotekehitykseen yli miljardi euroa. ¹

2.2 ABB:n historia

ABB Oy:n historia alkoi suomessa vuonna 1889, jolloin suomalainen Gottfried Strömberg perusti Helsinkiin sähköliikkeen, joka valmisti dynamo- ja tasavirtageneraattoreita, sekä sähkövalaistuslaitoksia. Myöhemmin Strömberg avasi uuden tehtaan Sörnäisiin 1890 luvulla ja Helsingin Pitäjämäkeen 1910 luvulla. Vaasaan tehtaiden rakentaminen aloitettiin 1940 luvulla ja pian sen jälkeen ruvettiin siirtämään Helsingin Pitäjämäen tuotantoa Vaasaan. 1980-luvulla Kymi-kymmenen ja Strömberg fuusioituivat ja nimeksi tuli kymi-Strömberg, jonka seurauksena Strömberg päätyi ruotsalaisen Asean omistukseen. Nykyinen ABB Oy muodostui lopulta vuonna 1988, jolloin Asea ja sveitsiläisen Brown Boverin sähkötekniiset liiketoiminnot yhdistyivät. ²

¹ ABB Oy ABB:stä lyhyesti. 2022. Viitattu 10.5.2022. <https://new.abb.com/fi/abb-lyhyesti>

² ABB Oy History of ABB. 2022. Viitattu 10.5.2022. <https://global.abb/group/en/about/history>

2.3 ABB Suomessa

Suomessa ABB toimii noin 20 paikkakunnalla, joissa työskentelee noin 5 000 henkilöä. Tehdaskeskittymät sijaitsevat Helsingissä, Vaasassa ja Porvoossa. ABB Oy on Suomen suurin teollisuuden kunnossapitäjä. ABB on yksi suurimmista teollisista työnantajista ja pääkaupunkiseudulla suurin. Suomen ABB:n liikevaihto on noin 2 miljardia euroa, ja tuotekehitykseen käytetään vuosittain noin 200 miljoonaa euroa. Helsingissä ABB:llä on toimintaa Vuosaarella ja Pitäjänmäellä, joista Vuosaarella tuotetaan sähköistys- ja automaatio- ratkaisuja meriteollisuuteen sekä Azipod –ruoripotkurijärjestelmiä. Pitäjänmäellä tuotantoon puolestaan kuuluvat moottorit, generaattorit, taajuusmuuttajat, energianhallinta-, linjakäyttö-, sähköistys-, ja instrumentointiratkaisut, tehdastietojärjestelmät ja kunnossapitopalvelut. Vaasan tehtailla valmistetaan moottoreita, erikoismuuntajia, kytkintuotteita, suojarkeitä, sähköverkon ohjaus-, valvonta- ja automaatio-, sähkönsiirto- ja jakelujärjestelmiä, energianhallinta-, linjakäyttö-, sähköistys-, ja instrumentointiratkaisuja sekä tehdastietojärjestelmiä. Porvoossa valmistetaan sähköasennustuotteita.³

³ ABB Oy ABB Suomessa 2022. Viitattu 25.4.2022 <http://new.abb.com/fi/abb-lyhyesti/Suomessa>

2.4 ABB OY moottorit ja generaattorit

ABB on maailman johtava moottorivalmistaja ja edelläkävijä energiatehokkaiden moottoreiden kehittämisessä. Se työllistää maailmanlaajuisesti 14 000 henkeä 36 tehtaassa 11 maassa. Suomen moottorit ja generaattorit -yksikkö työllistää 1520 henkilöä, joista Vaasassa 530 ja Helsingissä 910. Se panostaa vahvasti korkean hyötysuhteen moottoreiden ja generaattoreiden tutkimukseen ja tuotekehitykseen. Tehtaat sijaitsevat Helsingissä ja Vaasassa. Vaasan tehtaalla on maailmanlaajuinen vastuu yhtiön valmistamista räjähdysvaarallisten tilojen pienjännitemoottoreista. Tehtaalla valmistetaan myös korkean hyötysuhteen IE4- luokan pienjännitemoottoreita. Helsingin tehtaalla valmistetaan korkeajännitemoottoreita, kestopagneettimoottoreita ja dieselgeneraattoreita. ⁴

⁴ ABB Oy Motors and Generators. 2022. Viitattu 20.4.2022. <http://search.abb.com/library/Download.aspx?DocumentID=9AKK105408A8219&LanguageCode=fi&DocumentPartId=&Action=Launch>

3 OIKOSULKUMOOTTORI

3.1 Rakenne

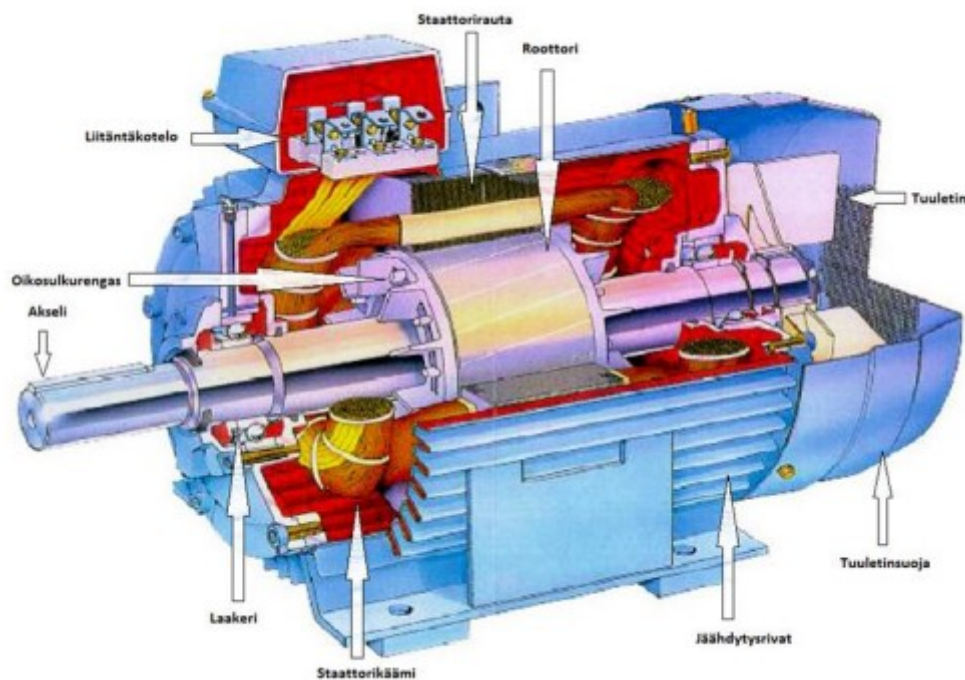
Sähkömoottoreissa kulutetaan lähes kolmasosa kaikesta maailmassa tuotetusta sähköenergiasta ja määrän uskotaan kasvavan vielä tulevaisuudessa, joten moottorien hyötysuhteen ja ohjausmenetelmien kehittäminen on suuri kohde. Oikosulkumoottori on kaikista eniten käytetty moottorityyppi ja se on suosittu koska siinä on yksinkertainen rakenne, luotettavuus ja vähäinen huollontarve.

Oikosulkumoottori on yksinkertaisen rakenteensa vuoksi erittäin suosittu sähkökone. Verrattuna muihin yleisimpiin moottorityyppeihin, oikosulkumoottorissa ei ole erillisiä magneetointikämmityksiä, vaan ainoastaan suhteellisen yksinkertaiset staattori- ja roottorikämmitykset.

Moottorin toiminnan kannalta tärkeimmät osat ovat staattorin kämmitykset levypaketteineen ja roottorin kämmitys levypaketteineen. Tämän lisäksi moottorin perusosia ovat runko, laakerit, laakerikilvet, liitinkotelo sekä tuuletin ja tuuletinsuoja. Oikosulkumoottorin rungossa on paljon jäähdytysripoja liiallisen lämpenemisen estämiseksi. Oikosulkumoottorin ainoat kuluvat osat ovat laakerit.

Oikosulkumoottorin roottorin kämmitys on ns. häkkikämmitys, joka on sijoitettu roottorin uriin ja suljettu molemmista päistä oikosulkurenkaalla. Yleensä roottorikämmityksessä on yksi sauva yhtä uraa kohti, mutta haluttaessa muuttaa moottorin ominaisuuksia, sauvan muoto ja lukumäärä vaihtelevat. Roottorikämmitys valmistetaan yleensä alumiinista painevalamalla. Staattorissa on puolestaan normaali kolmivaiheinen kämmitys, joka on sijoitettu staattorin uriin. Staattorikämmitys on symmetrinen ja se on kytketty joko tähteen tai kolmioon. Staattorikämmitykseen käytetään yleensä kuparia. Oikosulkumoottorin toiminnan edellytyksenä oleva pyörivä magneettikenttä syntyy staattorin kolmivaiheikämmityksessä ilman erillisiä lisälaitteita. Kuvassa 1 on esitetty oikosulkumoottorin rakenne.⁵

⁵ Korpinen L. Sähkökoneet osa 1. Viitattu 5.4.2022 http://www.leenakorpinen.fi/archive/svt_opus/10sahkokoneet_1osa.pdf



Kuva 1. Oikosulkumoottorin rakenne

3.2 Toimintaperiaate

Oikosulkumoottorin staattoria syötetään yleensä kolmella vaiheella. Staattorin navan synnyttämä sulkeutuva magneettivuo kulkee staattorin ja roottorin välisen ilmävälin läpi kaksi kertaa, jonka ansiota roottoriin indusoituu jännite. Magneettikenttä syntyy, kun moottori ottaa tarvittavan magnetointivirran verkosta. Staattorin synnyttämän pyörivän magneettikentän vuoviivat leikkaavat roottorikäänin sauvoja. Roottorivirta syntyy, kun roottorin sauvoihin indusoituu sähkömotorinen voima. Virran ja pyörivän magneettikentän yhteisvaikutuksesta syntyy sähköinen vääntömomentti. Vääntömomentti saa akselin ja siihen kiinnitetyn roottorin pyörimään, jos sähköinen vääntömomentti on suurempi kuin jarruttava vastamomentti. Roottorin nopeuden kasvaessa roottorisauvojen ja magneettikentän nopeusero pienenee, jolloin roottorijännite ja taajuus pienentyvät. Oikosulkumoottorin roottori pyörii magneettikentän tahtinopeutta hitaammin, jonka vuoksi oikosulkumoottoria kutsutaan epätahtimoottoriksi. Tästä syntyy myös jättämä, jota ilman ei syntyisi vääntömomenttia ja näin ollen magneettikenttä roottoriin nähden pysyisi paikallaan. Oikosulkumoottorin yksinkertaisesta rakenteesta huolimatta sen tarkka nopeudensäätö on vaativa tehtävä juuri jättämän takia. ⁵

3.3 Käyttötarkoitukset

Oikosulkumoottoreilla on monta käyttötarkoitusta esimerkiksi teollisuudessa, tuulimyllyissä, veneissä, työkoneissa ja monessa muussa päivittäin käytössä olevassa asiassa.

4 RUTIINIKOESTUSDATAN LÄPIKÄYNTI

4.1 Rutiinikoestusdatan historia

Työssä käydään läpi historiaa ja kehitystä moottoreiden koestuksessa ja miten asiat ovat muuttuneet. Myöhemmin työssä käydään läpi testituloksia, joista huomataan miten ne ovat muuttuneet vuosien varrella.

Työssä käytettiin ATEM- Test-ohjelmapohjaa, johon rutiinikoestusdata menee moottorin koestuksen jälkeen. Sieltä löytyy kaikki tarvittava tieto moottorista, kuten testitulokset ja tarkat mittausarvot.

4.2 ATEM – Test

ATEM – Test on ohjelmapohja, josta voi hakea laskelman pohjalta eri näkymiä ja koestusarvoja, kuten moottorin no-load ja locked-rotor-testit. ATEMista näkyy kaikki koestettut moottorit ja niiden arvot

4.3 MOT – Test

Ohjelma, jota käytetään Rutiinikoestuksessa, sillä voidaan asetetta jännitteet ja tehot tyhjäkäynti ja locked-rotor testejä varten. Kun moottori on koestettu, menee data ATEM- Test ja WEBeelis-ohjelmaan.

4.4 Adept

Adept on laskentaohjelma, jota käytetään uusien rivien ja staattoreiden laskentaan. Sillä saa laskettua moottorin lämpenemät, väännön, nopeuden, virran, käynnistysvirran, tyhjäkäyntivirran ja häviöt. Laskelmapohjia on useampia, joilla voi esimerkiksi laskea eri tilanteita, ajoaikoja ja lämpötilamuutoksia ja muita tärkeitä asioita moottoriin liittyen.

4.5 WebEA

WebEA on selainpohjainen ohjelma, josta voidaan tarkastella rutiinikoestuksesta saatuja tuloksia. Se eroaa ATEM- Test ohjelmasta sillä, että tulokset tulevat kuvaajalle, jossa on moottorille lasketut tarkastusarvot ja toleranssirajat. Ohjelmasta on helppo käydä katsomassa mitkä moottorit eivät ole osuneet toleransseihin. Sieltä näkee myös moottorin kauppanumeron ja päivänmäärän, kun se on testattu.

5 KÄÄMIN PÄÄN PITUUDEN VAIKUTUS

5.1 Hyötysuhde ja lämpenemä

Hyötysuhteeseen vaikuttaa moni tekijä, mutta käämin pituus on yksi niistä ja kuparilangan paksuus toinen. Seuraavista kuvista voidaan huomata kuinka ne vaikuttavat hyötysuhteeseen, esimerkki laskelmana on käytetty 1, jota on käytetty myös runkokoon 132 moottorin vertailussa. Tulokset on laskettu ohjelmalla Adept.

Oikosulkumoottorin hyötysuhde on helposti laskettavissa moottoriin asennetusta arvokilvestä. Arvokilpeen on yleensä leimattu moottorin antama nimellisteho P_n , joka on moottorin akselilta työkoneelle antama teho. Oikosulkumoottorille syötetään sähköenergiaa suoraan verkosta, josta voidaan laskea moottorille sen verkosta ottama teho P_1 .

$$P_1 = \sqrt{3} * U_n * I_n * \cos \varphi_n \quad (1)$$

Moottorin antama nimellisteho P_n , eli moottorin mekaaninen teho P_2 on myös laskettavissa kaavan 2 mukaisesti.

$$P_2 = \omega * M_{Mek} = 2 * \pi * n * M_{Mek} \quad (2)$$

Moottorin ottama sähköteho P_1 on suurempi kuin sen akselille antama teho P_2 . Moottorin häviöt vaikuttavat siihen, että moottorin ottamassa ja antamassa tehossa on eroja. Sitä eroa kutsutaan häviötehoksi. Isoimmilla moottoreilla hyötysuhde on luokkaa 94–98 %, kun taas pienemmillä moottoreilla hyötysuhde ei ole kuin 60–80 % kuten taulukosta 1 voidaan huomata. Moottorille voidaan laskea nimellishyötysuhde kaavan 3 mukaisesti, missä P_1 on moottorin ottama kolmivaiheteho sähköverkosta ja P_2 on moottorin akseliltaan antama teho.⁶

⁶ Aura L. & Tonteri A. 1996. Teoreettinen sähkötekniikka ja sähkökoneiden perusteet. 2. uudistettu painos.

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} = \frac{P_n}{\sqrt{3} \cdot U_n \cdot I_n \cdot \cos \varphi_n}$$

(3)

Taulukossa 1 on viitattu IEC / EN 60034-30-1-2014-standardin vaatimiin hyötysuhteisiin, jotka moottorin pitää läpäistä testausmenetelmällä, joka on mainittu IEC / EN 60034-30-1-2014.

Taulukko 1. Hyötysuhdevaatimukset IEC / EN 60034-30-1-2014 mukaan.

Output kW	IE1				IE2				IE3				IE4			
	2 pole	4 pole	6 pole	8 pole	2 pole	4 pole	6 pole	8 pole	2 pole	4 pole	6 pole	8 pole	2 pole	4 pole	6 pole	8 pole
0.12	45.0	50.0	38.3	31.0	53.6	59.1	50.6	39.8	60.8	64.8	57.7	50.7	66.5	69.8	64.9	62.3
0.18	52.8	57.0	45.5	38.0	60.4	64.7	56.6	45.9	65.9	69.9	63.9	58.7	70.8	74.7	70.1	67.2
0.20	54.6	58.5	47.6	39.7	61.9	65.9	58.2	47.4	67.2	71.1	65.4	60.6	71.9	75.8	71.4	68.4
0.25	58.2	61.5	52.1	43.4	64.8	68.5	61.6	50.6	69.7	73.5	68.6	64.1	74.3	77.9	74.1	70.8
0.37	63.9	66.0	59.7	49.7	69.5	72.7	67.6	56.1	73.8	77.3	73.5	69.3	78.1	81.1	78.0	74.3
0.40	64.9	66.8	61.1	50.9	70.4	73.5	68.8	57.2	74.6	78.0	74.4	70.1	78.9	81.7	78.7	74.9
0.55	69.0	70.0	65.8	56.1	74.1	77.1	73.1	61.7	77.8	80.8	77.2	73.0	81.5	83.9	80.9	77.0
0.75	72.1	72.1	70.0	61.2	77.4	79.6	75.9	66.2	80.7	82.5	78.9	75.0	83.5	85.7	82.7	78.4
1.1	75.0	75.0	72.9	66.5	79.6	81.4	78.1	70.8	82.7	84.1	81.0	77.7	85.2	87.2	84.5	80.8
1.5	77.2	77.2	75.2	70.2	81.3	82.8	79.8	74.1	84.2	85.3	82.5	79.7	86.5	88.2	85.9	82.6
2.2	79.7	79.7	77.7	74.2	83.2	84.3	81.8	77.6	85.9	86.7	84.3	81.9	88.0	89.5	87.4	84.5
3	81.5	81.5	79.7	77.0	84.6	85.5	83.3	80.0	87.1	87.7	85.6	83.5	89.1	90.4	88.6	85.9
4	83.1	83.1	81.4	79.2	85.8	86.6	84.6	81.9	88.1	88.6	86.8	84.8	90.0	91.1	89.5	87.1
5.5	84.7	84.7	83.1	81.4	87.0	87.7	86.0	83.8	89.2	89.6	88.0	86.2	90.9	91.9	90.5	88.3
7.5	86.0	86.0	84.7	83.1	88.1	88.7	87.2	85.3	90.1	90.4	89.1	87.3	91.7	92.6	91.3	89.3
11	87.6	87.6	86.4	85.0	89.4	89.8	88.7	86.9	91.2	91.4	90.3	88.6	92.6	93.3	92.3	90.4
15	88.7	88.7	87.7	86.2	90.3	90.6	89.7	88.0	91.9	92.1	91.2	89.6	93.3	93.9	92.9	91.2
18.5	89.3	89.3	88.6	86.9	90.9	91.2	90.4	88.6	92.4	92.6	91.7	90.1	93.7	94.2	93.4	91.7
22	89.9	89.9	89.2	87.4	91.3	91.6	90.9	89.1	92.7	93.0	92.2	90.6	94.0	94.5	93.7	92.1
30	90.7	90.7	90.2	88.3	92.0	92.3	91.7	89.8	93.3	93.6	92.9	91.3	94.5	94.9	94.2	92.7
37	91.2	91.2	90.8	88.8	92.5	92.7	92.2	90.3	93.7	93.9	93.3	91.8	94.8	95.2	94.5	93.1
45	91.7	91.7	91.4	89.2	92.9	93.1	92.7	90.7	94.0	94.2	93.7	92.2	95.0	95.4	94.8	93.4
55	92.1	92.1	91.9	89.7	93.2	93.5	93.1	91.0	94.3	94.6	94.1	92.5	95.3	95.7	95.1	93.7
75	92.7	92.7	92.6	90.3	93.8	94.0	93.7	91.6	94.7	95.0	94.6	93.1	95.6	96.0	95.4	94.2
90	93.0	93.0	92.9	90.7	94.1	94.2	94.0	91.9	95.0	95.2	94.9	93.4	95.8	96.1	95.6	94.4
110	93.3	93.3	93.3	91.1	94.3	94.5	94.3	92.3	95.2	95.4	95.1	93.7	96.0	96.3	95.8	94.7
132	93.5	93.5	93.5	91.5	94.6	94.7	94.6	92.6	95.4	95.6	95.4	94.0	96.2	96.4	96.0	94.9
160	93.8	93.8	93.8	91.9	94.8	94.9	94.8	93.0	95.6	95.8	95.6	94.3	96.3	96.6	96.2	95.1
200	94.0	94.0	94.0	92.5	95.0	95.1	95.0	93.5	95.8	96.0	95.8	94.6	96.5	96.7	96.3	95.4
250	94.0	94.0	94.0	92.5	95.0	95.1	95.0	93.5	95.8	96.0	95.8	94.6	96.5	96.7	96.5	95.4
315	94.0	94.0	94.0	92.5	95.0	95.1	95.0	93.5	95.8	96.0	95.8	94.6	96.5	96.7	96.6	95.4
355	94.0	94.0	94.0	92.5	95.0	95.1	95.0	93.5	95.8	96.0	95.8	94.6	96.5	96.7	96.6	95.4
400	94.0	94.0	94.0	92.5	95.0	95.1	95.0	93.5	95.8	96.0	95.8	94.6	96.5	96.7	96.6	95.4
450	94.0	94.0	94.0	92.5	95.0	95.1	95.0	93.5	95.8	96.0	95.8	94.6	96.5	96.7	96.6	95.4
500-1000	94.0	94.0	94.0	92.5	95.0	95.1	95.0	93.5	95.8	96.0	95.8	94.6	96.5	96.7	96.6	95.4

Seuraavaksi laskettiin Adept- ohjelmalla, kuinka kuparilangan pituus vyyhdissä vaikuttaa moottorin tuottamaan hyötysuhteeseen ja lämpenemään. Seuraavissa lasketuissa pisteissä on käytetty riviä 400VD 50Hz 5.5kW ja laskelmana toimi runkokoon 132 2 laskelma.

Vakiona LM1-arvo on 335 mm, kun moottorin laskee näillä arvoilla, tulee hyötysuhteesta 91.35 % ja staattorin lämpenemästä 43.4 K. Työssä lähdettiin laskemaan ja nostamaan LM1-arvoa 20 mm välein.

Seuraava piste laskettiin LM1 315 mm arvolla, jolloin hyötysuhteesta tuli 91.61 % joten se parani 0.26 prosenttiyksikköä ja staattorin Lämpenemä muutosta tuli -1.7 Kelviniä, jolloin uudeksi lämpenemäksi tuli 41.7 K.

Alimpana pisteenä käytettiin LM1 295 mm ja hyötysuhde nousi 91.89 % joten se parani 0.54 prosenttiyksikköä, jolloin moottori paransi IE3 hyötysuhdeluokasta IE4 luokkaan. Lämpenemä muutosta tuli -3.5 Kelviniä, jolloin uudeksi lämpenemäksi tuli 39.9 K.

Seuraavaksi lähdettiin nostamaan LM1 355 mm, jolloin hyötysuhde laski 91.08 %, jolloin muutosta tuli 0.17 prosenttiyksikköä vakioon ja lämpenemä muutosta tuli +1.9 Kelviniä, jolloin uudeksi lämpenemäksi tuli 45.3 K.

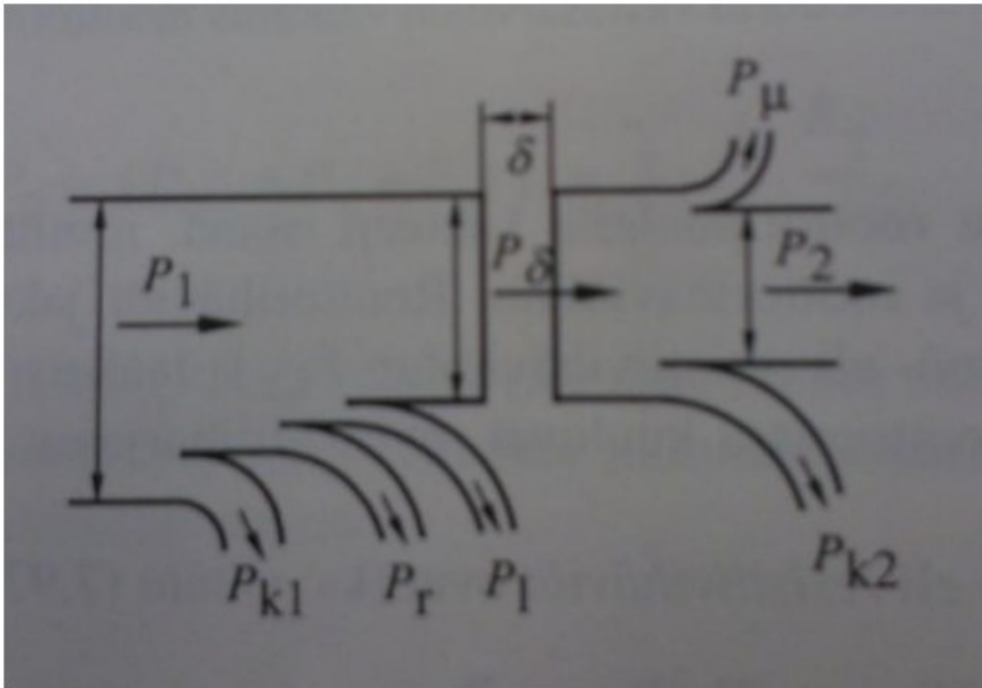
Viimeisenä pisteen käytettiin LM1 375 mm, jolloin hyötysuhde laski 90.8 % ja muutosta vakioon tuli 0.27 prosenttiyksikköä ja lämpenemä muutosta tuli +3.8 Kelviniä, jolloin uudeksi lämpenemäksi tuli 47.2 K.

Lasketuista pisteitä voidaan huomata, kuinka paljon kuparin määrä vaikuttaa hyötysuhteeseen ja lämpenemään. Tämän takia käämiminen on tarkkaa.

5.2 Häviöt

Häviöt vaikuttavat myös moottorin hyötysuhteeseen ja lämpenemään. Eri häviöt on esitetty kuvan 5 mukaisella tehojakokaaviolla, missä

- P_1 = sähköteho
- P_2 = Mekaaninen hyötyteho
- P_{k1} = Staattorin lämpöhäviöt
- P_r = Rautahäviöt
- P_δ = Ilmaväliteho
- P_μ = Mekaaniset häviöt
- P_{k2} = Moottorin lämpöhäviöt

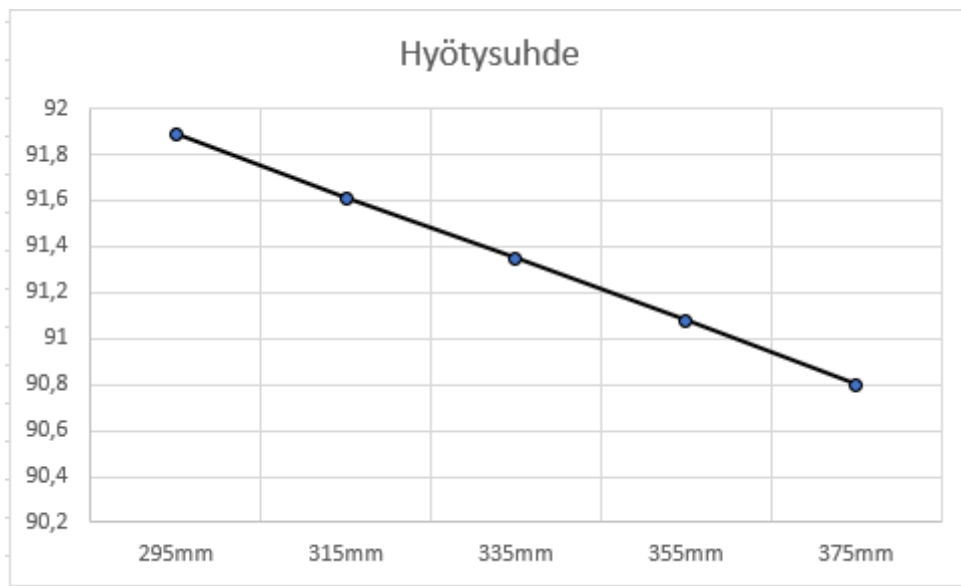


Kuva 2. Tehojakokaavio

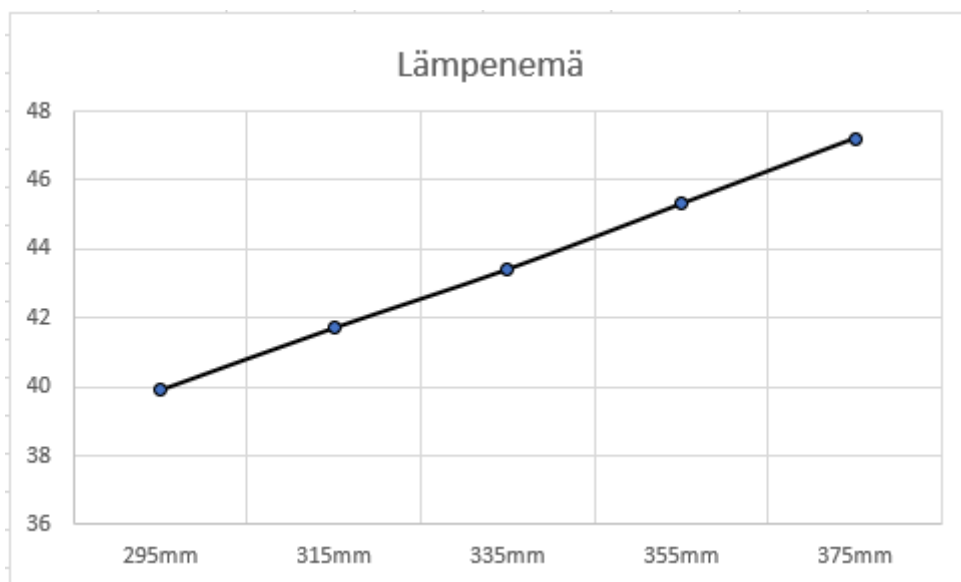
Kun moottorista lasketaan sen ottamat ja antamat tehot, voidaan sille laskea nimellishyötysuhde.

5.3 Tuloksia

Kuvaan 3 ja 4 on otettu työssä aiemmin lasketut hyötysuhteen ja lämpenemien pisteet, käyristä voidaan huomata kuinka lämpenemä ja hyötysuhde muuttuvat, kun LM1:stä muutetaan.



Kuva 3. Hyötysuhteen lasketut pisteet



Kuva 4. Lämpenemän lasketut pisteet

6 RUUTIINITESTAUSDATA

6.1 Rutiinikoestus

Rutiinikoestus ohjeen FIMOT0068 mukaisesti. Rutiinikoestuksessa ensimmäisenä tehdään silmämääräinen tarkastus, jossa katsotaan seuraavat kohdat:

- arvokilven merkinnät
- IP luokitus
- akselin kunto
- läpivientiholkit
- Koneen jalkojen ja laippakilven reikien yleinen kunto ja symmetrisyys
- voiteluun kuuluvien osien yleinen kunto ja oikeellisuus
- asentomerkki vastaa koneen rakennetta, B3, V1 jne.

Seuraavaksi moottorista mitataan:

- vaihevastukset
- käämityksen testaus tostoaltokoestukella
- lisälaitteiden tarkistus
- eristyskoestus
- eristysvastukset, raja-arvot nähtävissä taulukosta 2.

Taulukko 2. Eristysvastuksen raja-arvot.

Ilman suhteellinen kosteus (%)	Eristysvastuksen minimiarvo (GigaOhm)
< 40	2
≥ 40	1

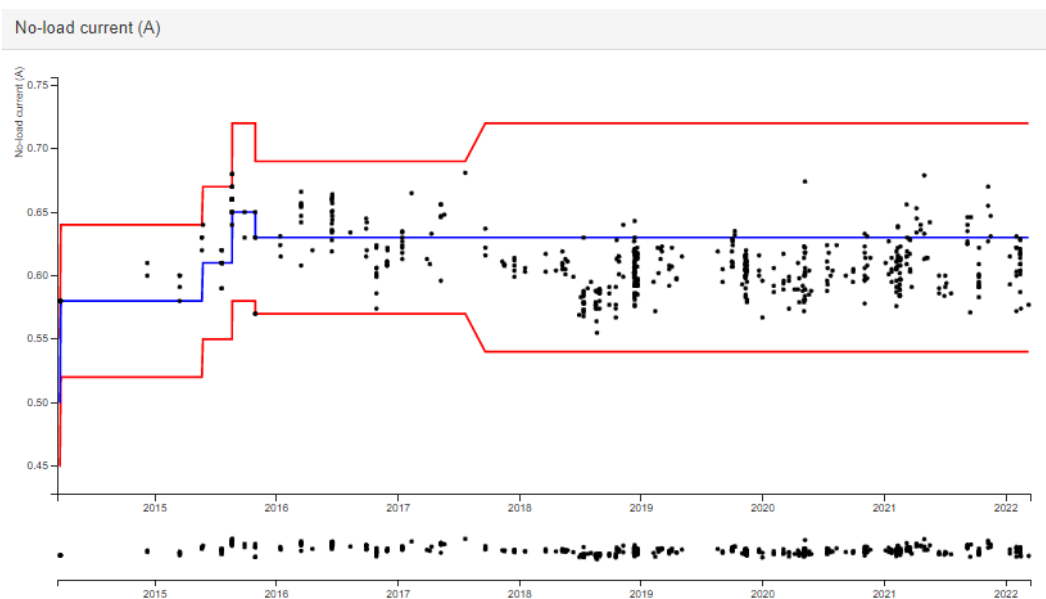
Viimeisessä vaiheessa moottoriin kytketään jännite, jolloin tehdään seuraavat asiat:

- tyhjäkäyntikoe
- tärinänmittaus, tyhjäkäyntikokeen yhteydessä
- oikosulkukoe

Rutiinikoestuksessa on haastavaa pienissä moottoreissa se, että toleranssirajat ovat prosentuaalisia, jolloin pienikin heitto vaikuttaa. Otetaan esimerkiksi se, että moottorille on laskettu tarkastusarvoihin $I_0=1$ A ja tulokseksi syntyy 1.2 A, jolloin heittoa on jo 20 % mikä aiheuttaa sen, että moottori ei pysy toleranssien sisällä.

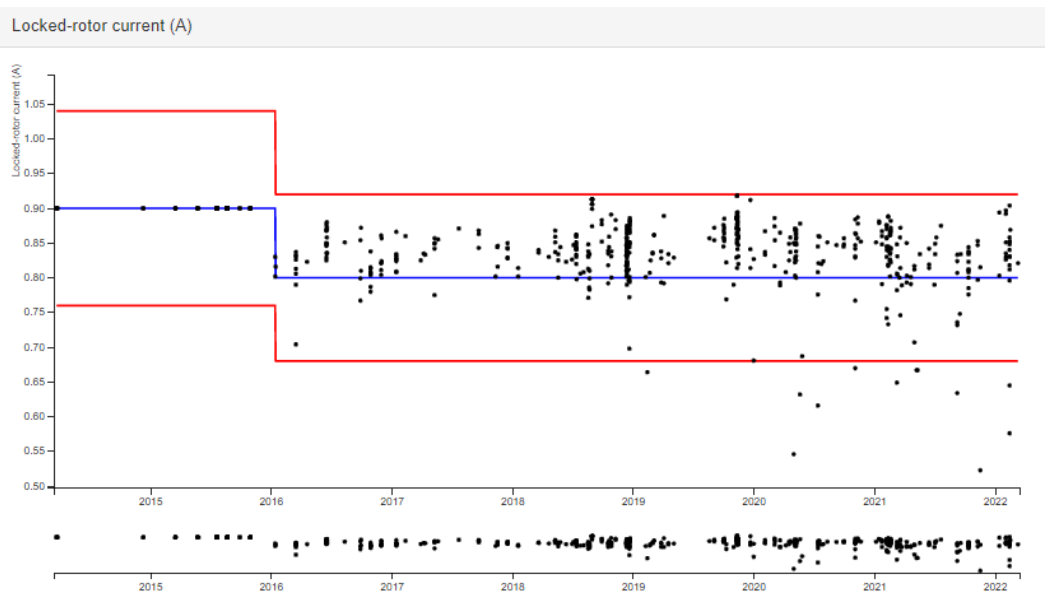
6.2 Moottori 71

Kuten kuvasta 4 voidaan huomata, on suurin osa koestetuista moottoreista osunut alle lasketun arvon. Kiinnostavaa on tietää, miksi moottorin tarkastusarvoja on muutettu niin monta kertaa vuosina 2015–2016. Koska tyhjäkäynti laskelmassa arvoa on nostettu, mutta lukitusajossa arvoa on laskettu. Kuvassa 17, on nähtävissä, kuinka tyhjäkäyntivirta on ollut testeissä suurimmaksi osaksi alle lasketun arvon.



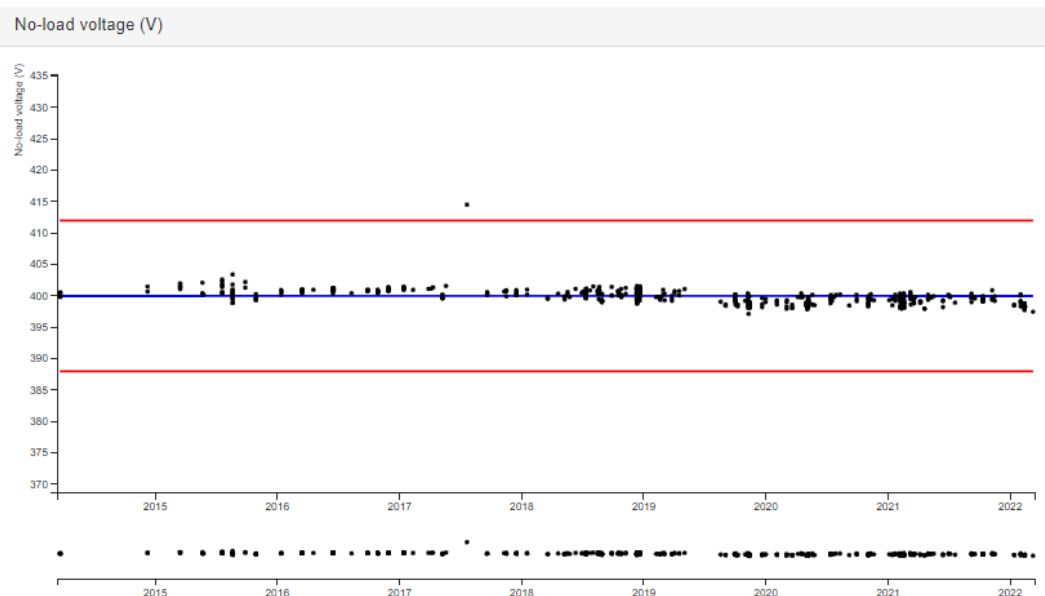
Kuva 5. I_0 -arvon tulokset runkokoon 71 moottorista.

Lukitustestin tulokset ovat osuneet suurimmaksi osaksi lasketun ylle. 2016 lk:ta on muutettu laskelmaan hieman pienemmäksi. Voidaan myös huomata, että muutama kone ei ole pysynyt toleranssirajoissa vuosina 2020–2022.



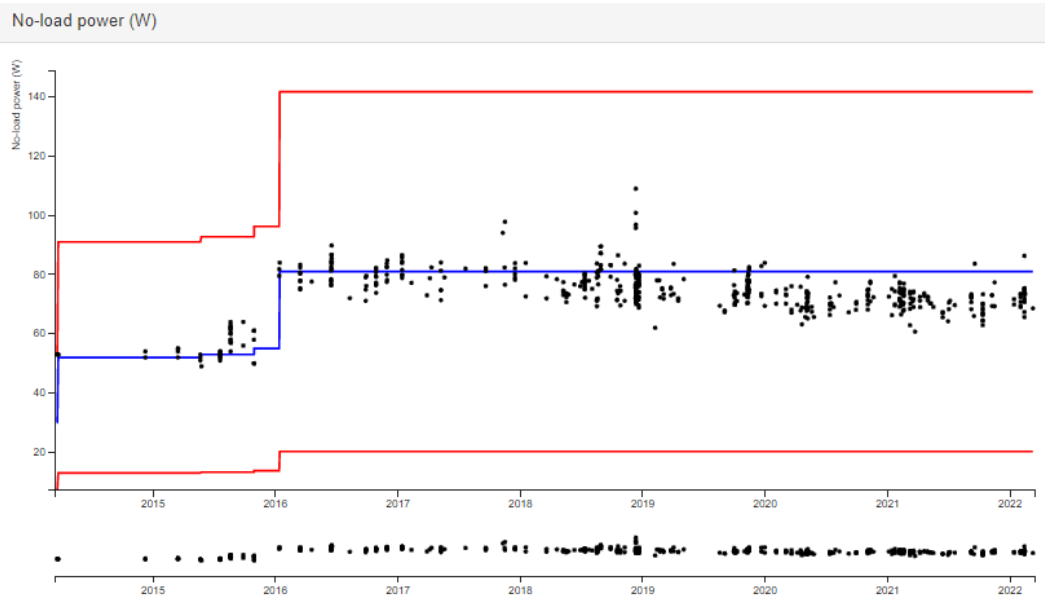
Kuva 6. Ik-arvon tulokset runkokoon 71 moottorista.

Tyhjäkäyntijännite on ollut tasaista ja suurempia heittoja ei ole ollut, kuten kuvasta 5 voidaan nähdä.



Kuva 7. V_0 -arvon tulokset runkokoon 71 moottorista.

Kuten kuvasta 6 voidaan huomata, on tyhjäkäyntitehon laskemaa muokattu 2016 kohdalla hieman ylöspäin ja toleranssirajatkin ovat laajentuneet.



Kuva 8. P₀-arvon tulokset runkokoon 71 moottorista.

Current values

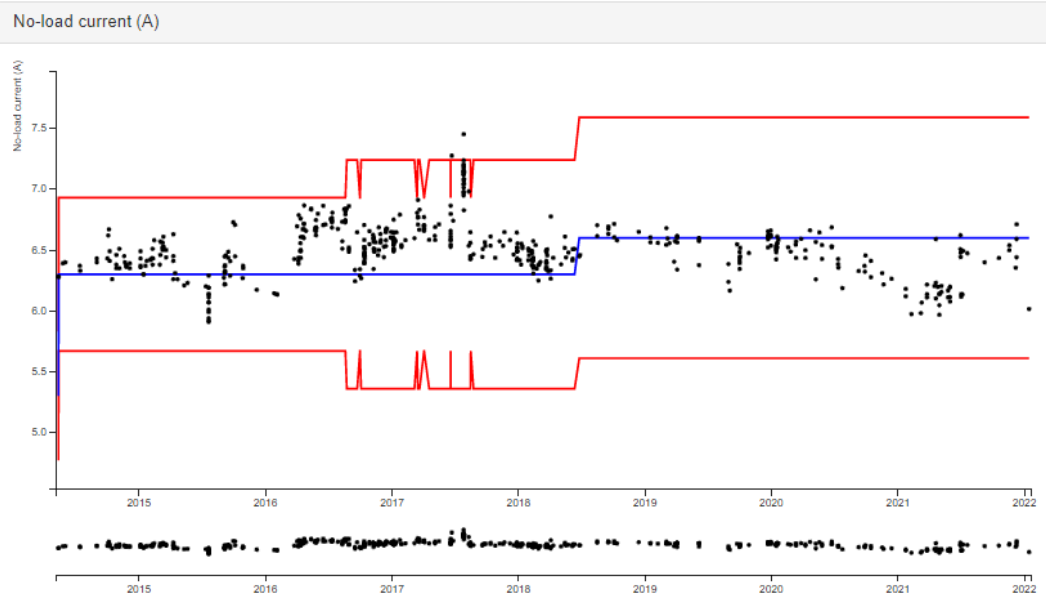
Create control value line

	LineNr	Un	Connection (Internal)	Fn	Poles	ID	Cos ϕ	P ₀	Ik	Cos θ	R _{1v}	R ₁₆	U _{km}	I _{km}	P _{km}	R _{2v}	U _{rt}	E _f	Created
1	1	400	Y (0)	50	4	0.63	0.185	81	5	0.85	17.013	17.013	70	0.8	73	0	0	0	

Kuva 9. Lasketut tarkastusarvot runkokoon 71 moottorille.

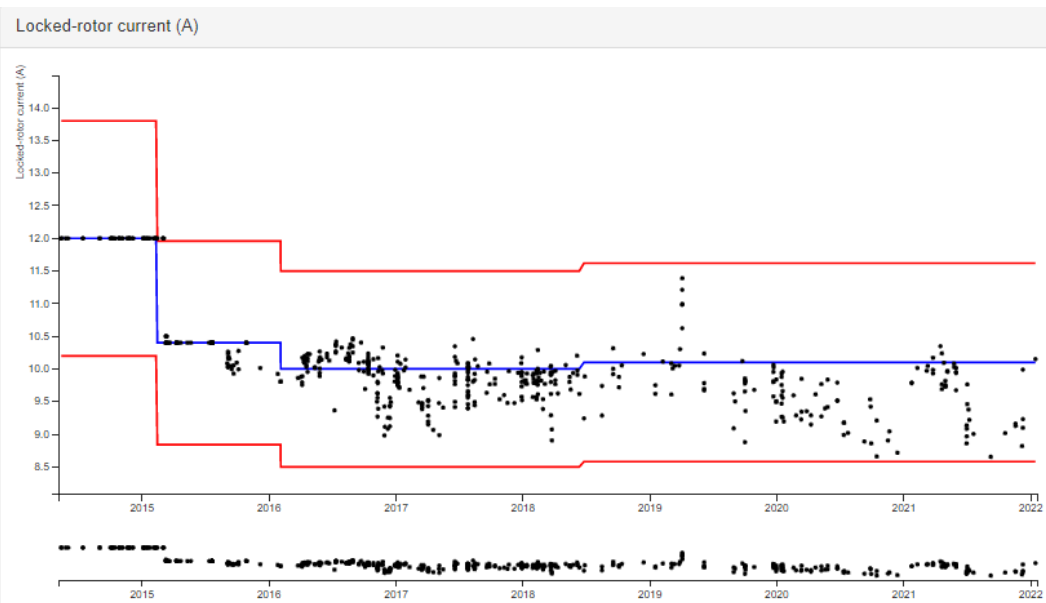
6.3 Moottorin 132 tulokset

Kuten mittaustuloksista voidaan huomata, on 2017 loppuvuodesta kaksi moottoria, jotka eivät osuneet annettuihin arvoihin ja 2018 puolivälissä on tapahtunut jotain, jonka takia laskettua arvoa on muutettu +0,2A. Laskelman 1 testituloksista kuvassa 22 voidaan huomata, että testausarvot ovat olleet hieman laskussa tyhjäkäyntivirran kohdalla 2018 jälkeen.



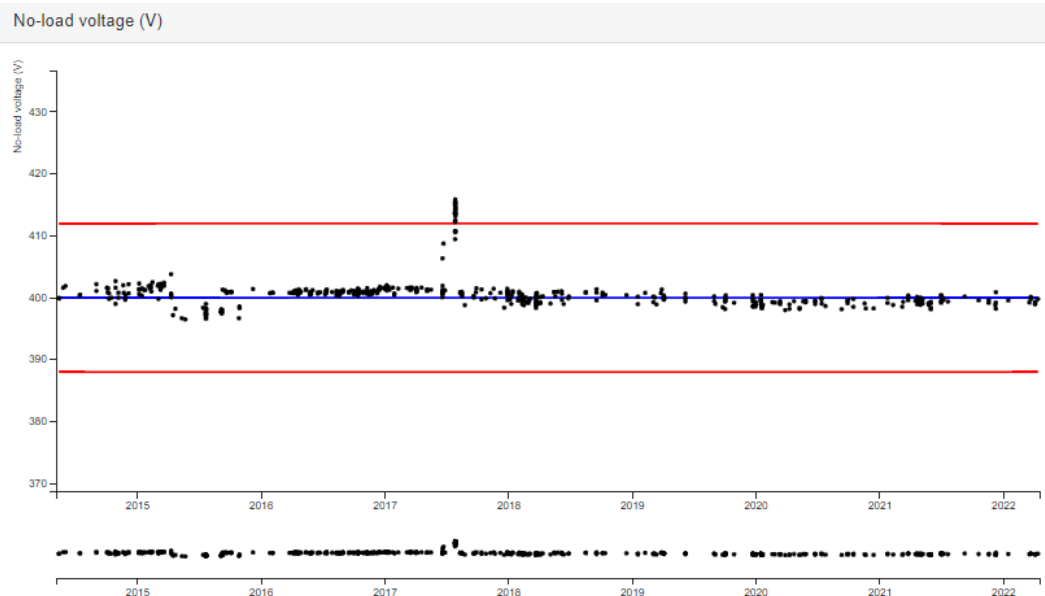
Kuva 10. I₀-arvon tulokset laskelmalta 1 runkokoon 132 moottorissa.

Lukitustestissä virran kohdalla on heittoja tuloksissa, kuten kuvassa 23 voidaan huomata, on testaustuloksissa jopa 3 A heittoja. Myös lukitusvirran laskettua arvoa on muutettu useampana vuotena tarkemmaksi.



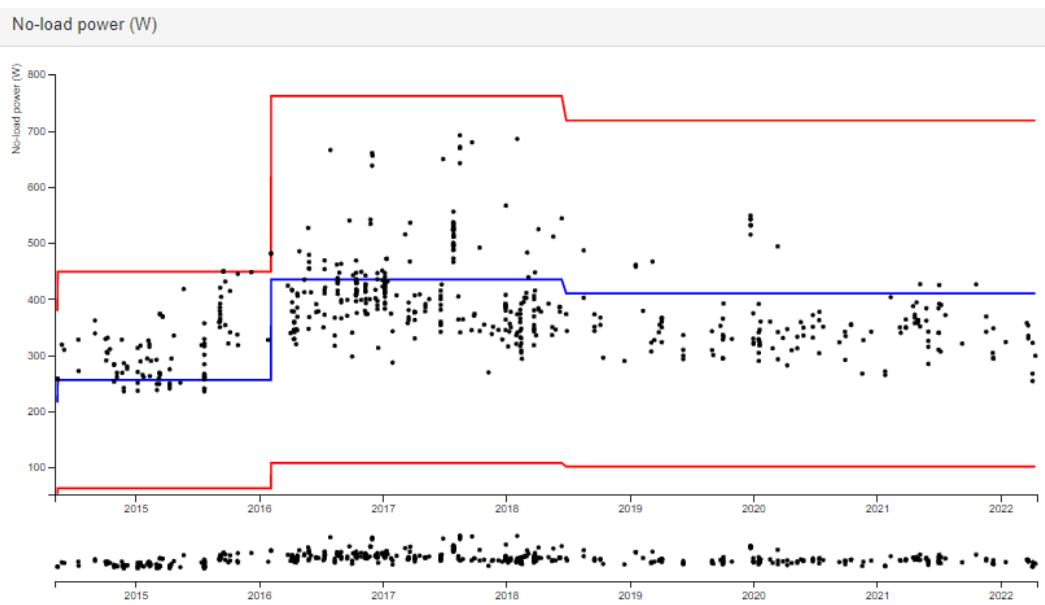
Kuva 11. I_k-arvon tulokset laskelmalta 1 runkokoon 132 moottorissa.

Tyhjäkäynti jännite on pysynyt hyvänä, pois lukien kuvassa 24 huomattavaa 2017 puolessa välissä olevaa rypästä, jossa on useampi kappale, joka ei ole osunut raja-arvoihin.



Kuva 12. V_0 -arvon tulokset laskelmalta 1 runkoon 132 moottorissa.

Tyhjäkäynti tehossa on paljon heittoja kuten kuvasta 25 voidaan nähdä.



Kuva 13. P_0 -arvon tulokset laskelmalta 1 runkoon 132 moottorissa.

Current values

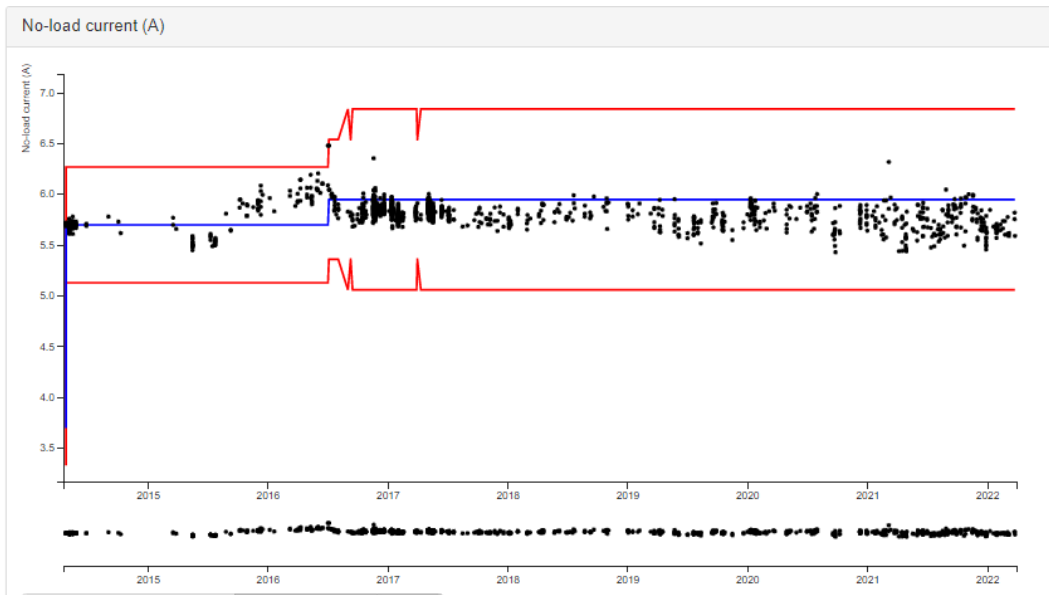
Create control value line

LineNr	Un	Connection (Internal)	Fn	Poles	IB	Cosφ	P0	Ik	Cosk	R1v	R16	Ukm	IkM	Pkm	R2v	Urt	Ef	Created
1	400	D (0)	50	4	6.6	0.09	411	56	0.36	0.607	1.82	72	10.1	453	0	0	0	17.06.2018

Kuva 14. Lasketut arvot laskelmalta 1 runkoon 132 moottorissa.

Laskelmasta 2 on huomattavasti enemmän testituloksia, kuin laskelmalla 1. Kuten kuvassa 27 voidaan huomata, on testattuja moottoreita isokasa vuosina 2016–2022. Tyhjäkäynti

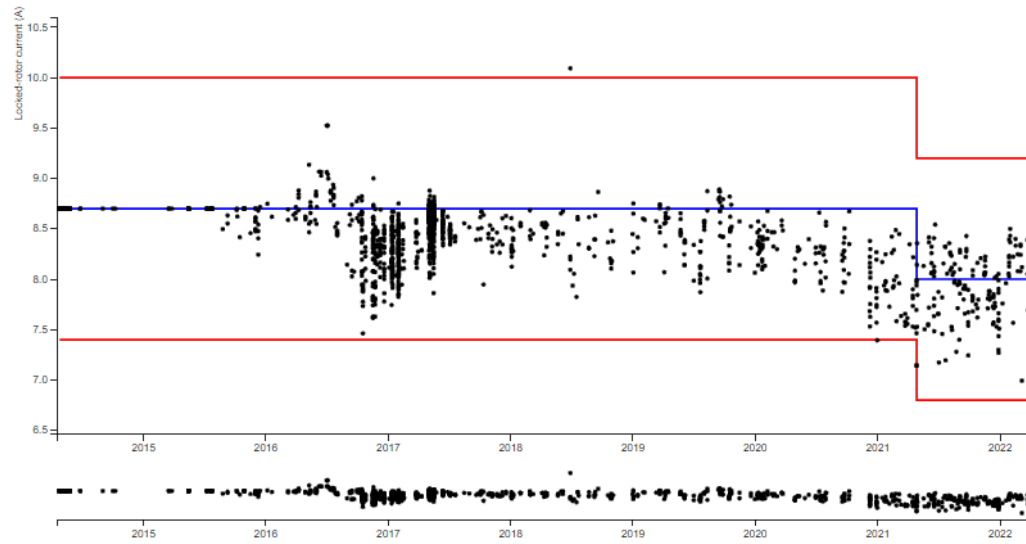
virta on ollut tasaista alusta lähtien ja toleranssien sisällä on pysytty. Tyhjäkäyntivirran laskettua arvoa on muutettu vain kerran.



Kuva 15. I₀-arvon tulokset laskelmalta 2 runkokoon 132 moottorissa.

Lukitus virrassa on paljon heittoa ja selvästi suurin osa alle lasketun niin kuin tyhjäkäyntivirrassakin oli. Myös lukitus virrasta voidaan huomata, että on ollut selviä trendejä, milloin on ollut isompia ryppäitä, jolloin testituloksissa on ollut saman päivän aikana suurempiakin heittoa.

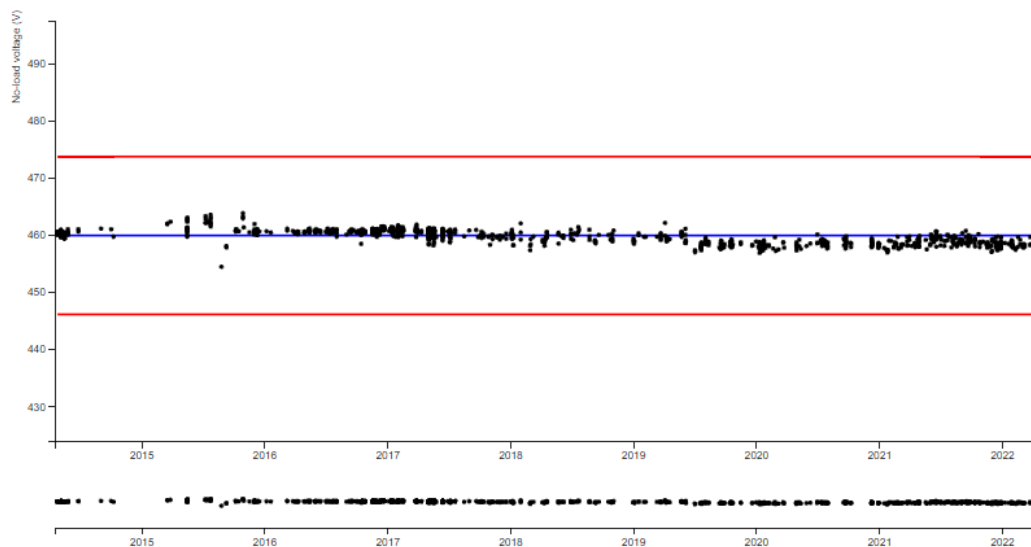
Locked-rotor current (A)



Kuva 16. Ik-arvon tulokset laskelmalta 2 runkokoon 132 moottorissa.

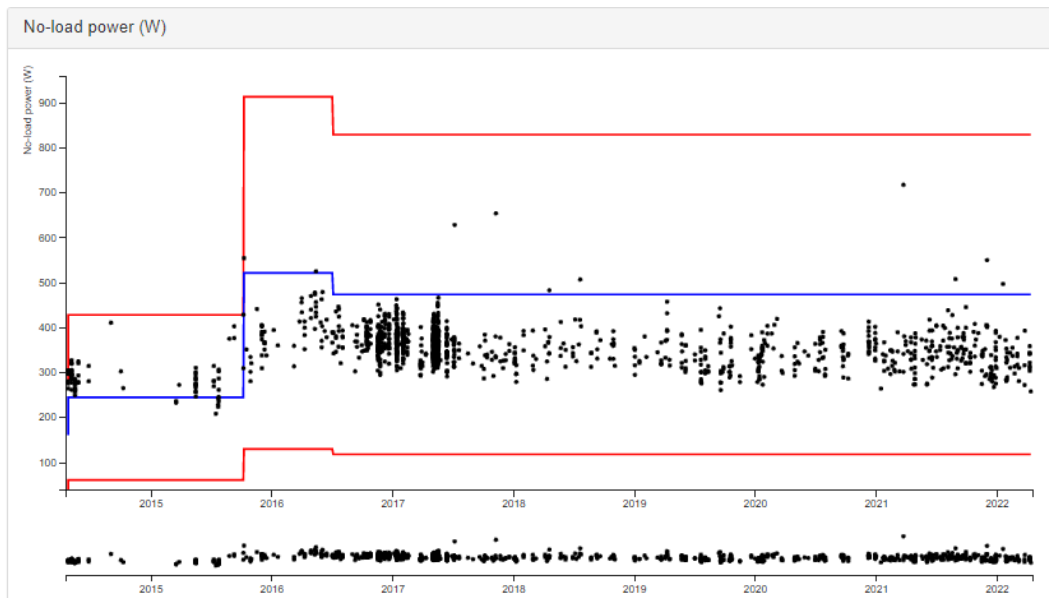
Tyhjäkäyntijännite on tasainen ilman suurempia heittoja.

No-load voltage (V)



Kuva 17. Vo-arvon tulokset laskelmalta 2 runkokoon 132 moottorissa.

Tyhjäkäynti tehossa on selviä trendejä, jossa kappaleita on testattu isoissa määrin, ja testit ovat selvästi lasketun alla. Laskettuihin tuloksiin P_0 kohdalla tehty 250w muutos 2015 vuonna.



Kuva 18. P₀-arvon tulokset laskelmalta 2 runkoon 132 moottorissa.

Current values

Create control value line

LineNr	Un	Connection (Internal)	Fn	Poles	β	Cosβ	P ₀	Ik	Cosk	R _{1v}	R _{1s}	U _{km}	Ik _m	P _{km}	R _{2v}	U _t	E _f	Created
1	460	D (0)	50	4	5.95	0.1	474	54	0.318	0.647	1.941	68	8	300	0	0	0	

Kuva 19. Lasketut arvot laskelmalta 2 runkoon 132 moottorissa.

7 JOHTOPÄÄTÖKSET

Jatkuvan maailman kehityksen ja teknologian mukana on myös tullut hyötysuhteeseen uusia vaatimuksia, joten ABB:n moottoreiden pitää muuttua sitä mukaan myös, jotta se voi olla kilpailullinen ja ympäristöystävällinen.

Laadussa saattaa olla heittoja koska osa staattoreista tulee eri alihankkijoilta, jonka myötä testituloksissa on heittoja. Käsien käämityissä paketeissa on se, että niistä ei tule koskaan identtisiä, jonka takia myös testaustuloksissa on eroavaisuutta.

Työssä päädyttiin siihen tulokseen, että suurin vaikuttaja hyötysuhteeseen, lämpenemiin ja testaustuloksien heittoihin on staattoripaketista johtuvat erinäiset häviöt ja sen käämintä-tavoista.

LÄHTEET

ABB Oy History of ABB. 2022. Viitattu 10.5.2022. <https://global.abb/group/en/about/history>

ABB Oy ABB:stä lyhyesti. 2022. Viitattu 10.5.2022. <http://new.abb.com/fi/abb-lyhyesti>

ABB Oy ABB Suomessa 2022. Viitattu 25.4.2022 <http://new.abb.com/fi/abb-lyhyesti/Suomessa>

ABB Oy Motors and Generators. 2022. Viitattu 20.4.2022. <http://search.abb.com/library/Download.aspx?DocumentID=9AKK105408A8219&LanguageCode=fi&DocumentPartId=&Action=Launch>

Aura L. & Tonteri A. 1996. Teoreettinen sähkötekniikka ja sähkökoneiden perusteet. 2. Uudistettu painos. Porvoo. WSOY

Korpinen L. Sähkökoneet osa 1. Viitattu 5.4.2022 http://www.leenakorpinen.fi/archive/svt_opus/10sahkokoneet_1osa.pdf

