



Ustin Kiselev

**SAGEDUSMUUNDURI TEST
OPERATSIOONI TOOTLIKKUSE
TÕSTMINE *LEAN SIX SIGMA*
MEETODEID KASUTADES**

LÕPUTÖÖ

Tehnoloogia ja ringmajanduse instituut

Tootmine ja tootmiskorraldus

Juhendaja: Ruslan Raid

Tallinn 2023

Mina, Ustin Kiselev, tõendan, et lõputöö on minu kirjutatud. Töö koostamisel kasutatud teiste autorite, sh juhendaja teostele on viidatud õiguspäraselt.

Kõik isiklikud ja varalised autoriõigused käesoleva lõputöö osas kuuluvad autorile ainuisikuliselt ning need on kaitstud autoriõiguse seadusega.

Juhendaja Ruslan Raid (allkirjastatud digitaalselt)

Lõputöö on kaitsmisele lubatud tehnoloogia ja ringmajanduse instituudi direktori korraldusega.

Lihtlitsents lõputöö reprodutseerimiseks ja lõputöö üldsusele kättesaadavaks tegemiseks

Mina, Ustin Kiselev

sünnikuupäev: 12.04.1990

annan Tallinna Tehnikakõrgkoolile (edaspidi kõrgkool) tasuta loa (lihtlitsentsi) enda loodud teose

„Sagedusmuunduri test operatsiooni tootlikkuse tõstmine *Lean Six Sigma* meetodeid kasutades“

1. reprodutseerimiseks paberkandjal kõrgkooli raamatukogus avaldamise ja säilitamise eesmärgil;
2. elektroonseks avaldamiseks kõrgkooli repositooriumi kaudu;
3. kui lõputöö avaldamisele on instituudi direktori korraldusega kehtestatud tähtajaline piirang, lõputöö avaldada pärast piirangu lõppemist.

Olen teadlik, et nimetatud õigused jäävad alles ka autorile ja kinnitan, et:

1. lihtlitsentsi andmisega ei rikuta teiste isikute intellektuaalomandi ega isikuandmete kaitse seadusest tulenevaid ega muid õigusi;
2. PDF-failina esitatud töö vastab täielikult kirjalikult esitatud tööle.

Tallinnas (allkirjastatud digitaalselt, kuupäev digiallkirjas)

SISUKORD

SISUKORD.....	3
1 SISSEJUHATUS.....	5
1.1 Sihttegevõtte tutvustus ja taust.....	6
1.2 Eesmärk ja ulatus.....	14
1.3 Struktuur.....	15
2 SIX SIGMA.....	6
2.1 <i>Lean Six Sigma</i> projektimeeskond.....	7
2.2 Variatsioon.....	8
2.3 DMAIC probleemide lahendamise protsess.....	9
2.3.1 Probleemi defineerimine	10
2.3.2 Mõõtmine	11
2.3.3 Analüüs.....	11
2.3.4 Parendamine	12
2.3.5 Kontroll	13
3 LEAN	16
3.1 Raiskamine	16
3.2 Lisandväärtusega ja mitte-lisandväärtusega aeg.....	18
3.3 Statistiline protsessikontroll	19
3.4 Minitab tarkvara ja selle kasutamine <i>Lean Six Sigmas</i>	20
4 LEAN SIX SIGMA PROJEKTI ELLUVIIMINE	21
4.1 Probleemi defineerimine.....	21
4.2 Mõõtmine.....	25
4.2.1 SIPOC diagramm	25
4.2.2 Protsessi kaardistamine ja testimisetappide mõõtmine	26
4.2.3 Testimis aja mõõtmise süsteemi katsetamine ja selle täpsus	29
4.2.4 Praegune olukord - sagedusmuunduri katsetamise aeg.....	30
4.3 Analüüs.....	30
4.3.1 Koondaruanne konverteri ajaloolise testimise aja kohta.....	31

4.3.2	Protsessi võimekuse aruanne.....	33
4.3.3	Aegrea graafik, mis võrdleb kahe erineva operaatori test sammu aega	36
4.4	Parandamine	38
4.4.1	Puu diagramm	39
4.4.2	<i>FMEA</i>	40
4.4.3	Puu diagrammi ja <i>FMEA</i> kombinatsioon	43
4.4.4	Soovitatavad lahendused	44
4.5	Kontroll.....	46
4.5.1	Rakendamise heakskiitmine	46
4.5.2	Vana ja uue sagedusmuunduri testimise aegade võrdlemine	47
4.5.3	Histogramm	48
4.5.4	Hüpoteesi test	49
5	JÄRELDUSED.....	52
	KOKKUVÕTE.....	54
	SUMMARY	56
	VIIDATUD ALLIKAD.....	58
	LISAD	61
	Lisa 1. Testimise aeg, vana protsess	61
	Lisa 2. Operaatorite võrdlus	62
	Lisa 3. Puu diagramm.....	63
	Lisa 4. Testimise aeg, uus protsess	64

1 SISSEJUHATUS

Tänapäeva konkurentsivõimelises ärimaastikus seisavad organisatsioonid pidevalt silmitsi survega parandada oma toodete kvaliteeti ja vähendada läbimisaegu. Efektiivne toodete testimine on vahend nende eesmärkide saavutamiseks. Tootetestimine hõlmab toote jõudluse, usaldusväärsuse ja ohutuse hindamist erinevates tingimustes. See mängib olulist rolli kvaliteedikontrollis, tagades, et toode vastab kliendi nõuetele ja ootustele [1].

Testimise läbimisaja vähendamine võib parandada operatiivset efektiivsust ja vähendada toodete testimisega seotud kulusid. See on eriti oluline suuremahulise tootmisega tegelevates tööstusharudes, kus iga hetk on väärtuslik. Mida kiiremini ettevõtte testimisprotsessi lõpetab, seda varem saab ta järgmise tootmistsükli juurde asuda, lõppkokkuvõttes suurendades väljundit ja kasumlikkust [2].

Kokkuvõtteks, toodete testimine ja testimise läbimisaja vähendamine on kvaliteedikontrolli olulised aspektid, mis võimaldavad ettevõtetel parandada toodete kvaliteeti, vähendada kulusid ja saavutada konkurentsieelis.

2 SIX SIGMA

Edaspidistes alapeatükkides käsitletakse nii *Lean* (eesti k timmitud), *Six Sigma* (eesti k kuus *Sigmat*) metoodikaid kui ka nende vahelisi seoseid ja põhimõtteid. Tuginedes üldiselt aktsepteeritud tavale, kasutatakse järgnevalt töös metoodikate üldtunnustatud rahvusvahelisi nimetusi – *Lean*, *Six Sigma* ning *Lean Six Sigma*.

Six Sigma metoodika võttis Motorola kasutusele 1980ndate keskel. Tol ajal seisis Motorola silmitsi märkimisväärse konkurentsiga Jaapani tootjate poolt ja pidi turuosa säilitamiseks parandama oma kvaliteedikontrolli. Insener Bill Smith, keda sageli nimetatakse "*Six Sigma* isaks", mängis metoodika väljatöötamisel otsustavat rolli. Smith tuvastas kvaliteediprobleemid mitte ainult lõppkatsete etapis, vaid ka tootmisprotsessi ajal, mis viis statistilise lähenemisviisi väljatöötamiseni, mis on *Six Sigma* aluseks. Metoodika eesmärk oli vähendada defekte 3,4ni miljoni võimaluse kohta, mis tähendab peaaegu täiuslikku protsessi [6].

Six Sigma populaarsus tõusis, kui General Electricu (GE) endine tegevjuht Jack Welch rakendas seda 1990ndatel kogu GEs. Welch nägi *Six Sigma* kui vahendit, mis aitab parandada kogu ettevõtte tulemuslikkust, ning tema edukas rakendamine tõi kaasa miljardite dollarite suuruse kokkuhoiu. Welch propageerimine *Six Sigma* poolt suurendas oluliselt selle tunnustamist ja kasutuselevõttu väljaspool tootmistööstust, näiteks finantsteenuste ja tervishoiu valdkonnas [7].

1990ndate lõpus ja 2000ndate alguses tekkis *Lean Six Sigma* algse *Six Sigma* metoodika kõrvalharuna. *Lean Six Sigma* integreerib *Lean Manufacturing* (eesti k timmitud tootmine) põhimõtteid, mis on metoodika, mis keskendub raiskamise vähendamisele ja protsessivoo parandamisele. *Lean Manufacturing* on oluliselt mõjutatud Toyota tootmissüsteemist (TPS), mis töötati välja Jaapanis pärast Teist maailmasõda. TPS eesmärk oli kõrvaldada tootmisprotsessis raiskamine (*muda*), ebajärjekindlus (*mura*) ja ülekoormus (*muri*) [8].

Kombineerides *Six Sigma* statistilist lähenemist ja *Lean Manufacturing* jäätmetekke vähendamisele keskendumist, pakub *Lean Six Sigma* terviklikumat lähenemist protsesside täiustamisele. Vähendades nii varieeruvust kui ka jäätmeid, aitab *Lean Six Sigma* organisatsioonidel tõsta kvaliteeti, parandada klientide rahulolu ja suurendada tegevuse tõhusust [9].

Nii *Six Sigma* kui ka *Lean Six Sigma* metoodika põhikomponent on *DMAIC*, mis on lühend sõnadest *Define, Measure, Analyze, Improve, Control* (eesti k määratleda, mõõta, analüüsida, parandada, kontrollida). Edaspidi tuginedes üldiselt aktsepteeritud tavale, kasutatakse järgnevalt töös metoodikate üldtunnustatud rahvusvahelisi nimetust – *DMAIC*. See andmepõhine protsesside parandamise tsükkel on edasiarendus *PDCA* (*Plan, Do, Check, Act*) tsüklist, mille võttis kasutusele kvaliteedikontrolli pioneer W. Edwards Deming. *DMAIC* pakub struktureeritud lähenemist probleemide lahendamisele, mis suurendab protsesside parandamise tõhusust ja järjepidevust [10].

Määratlemisfaasis visandatakse selgelt projekti eesmärgid, kliendi nõuded ja probleemsed valdkonnad. Mõõtmise etapis hinnatakse protsessi praegust tulemuslikkust statistiliste meetmete abil. Analüüsi faasis selgitatakse välja protsessivariatsioonide ja defektide algpõhjused. Parandamisetapis töötatakse välja, katsetatakse ja rakendatakse lahendused, et kõrvaldada analüüsietapis tuvastatud algpõhjused. Lõpuks jälgitakse täiustatud protsessi kontrollifaasis, et tagada tulemuslikkuse paranemise püsivus aja jooksul.

Kokkuvõttes kujunes *Six Sigma*st *Lean Six Sigma*ks tänu sellele, et *Lean Manufacturing* keskendus jäätmete vähendamisele ja protsesside täiustamisele. *DMAIC* metoodika, mille juured on statistilises protsessikontrollis ja kvaliteedijuhtimises, annab tugeva raamistiku protsesside täiustamiseks. *Lean Six Sigma* võimaldab organisatsioonidel nii varieeruvuse kui ka raiskamisega tegelemise kaudu parandada kvaliteeti, kiirust ja kulutasuvust samaaegselt.

2.1 *Lean Six Sigma* projektimeeskond

Lean Six Sigma projektimeeskond on struktureeritud nii, et kasutada ära erinevaid oskusi ja teadmisi organisatsioonis. Kuigi meeskonna täpne koosseis võib varieeruda, hõlmab see tavaliselt erinevaid rolle, millest igaühel on konkreetsed kohustused.

Projektijuhil (käesoleva lõputöö autoril), antud juhul kollase vööga, on põhiteadmised *Lean Six Sigma* metoodikast ja vahenditest. Ta vastutab projekti juhtimise eest, tagades sammude järgimise ja oodatavate tulemuste saavutamise. Kollased vööd tegelevad tavaliselt väiksemate projektidega, kuid on hindamatu väärtusega kaasaaitajad suuremates algatustes [11].

Rohelised vööd on *Lean Six Sigma* praktikud, kes on saanud edasijõudnute koolituse ja võivad juhtida

projekte. Nad teevad sageli statistilist analüüsi ja tegelevad projektide keerukamate elementidega [12].

Mustad vööd on *Lean Six Sigma* alal kõrgelt koolitatud ja tegutsevad sageli mentorite või treenerite rollis. Nende teadmised statistilistest meetoditest ja projektijuhtimisest võimaldavad neil anda meeskonnale tehnilist juhendamist ja abi probleemide lahendamisel [13].

Master Black Belts on *Lean Six Sigma* tipptasemel spetsialistid, kes tavaliselt juhivad mitut projekti ja annavad strateegilisi suuniseid. Nad koolitavad ja juhendavad ka musti ja rohelisi vöösid, aidates luua organisatsiooni *Lean Six Sigma* võimekust [6].

Meistrid või sponsorid, tavaliselt organisatsiooni kõrgetasemelised liikmed, pakuvad strateegilist järelevalvet, hõlbustavad ressursside kasutamist ja aitavad kõrvaldada kõik takistused, millega projektimeeskond kokku puutub [9].

Teiste meeskonnaliikmete hulka võivad kuuluda asjatundjad, kes annavad väärtusliku ülevaate täiustatavast protsessist, ja protsessi omanikud, kes vastutavad protsessi eest ja hoiavad täiustatud protsessi pärast projekti lõppu käigus [9].

Kokkuvõttes koosneb *Lean Six Sigma* projektimeeskond erinevatest rollidest, millest igaühel on erinevad oskused ja teadmised. Kuigi kollase vööga projektijuht juhib projekti, on kõigi teede ühised pingutused liikmed on projekti edukuse seisukohalt üliolulised.

2.2 Variatsioon

Stabiilseid protsesse on lihtsam hallata ja ühtlustada võrreldes ebastabiilsete protsessidega. Seetõttu on tootmisvoo tõhusaks kontrollimiseks väga oluline, et protsessid oleksid võimalikult stabiilsed. Ebastabiilsed protsessid põhjustavad lisatööd, materjalikadu, suuri varusid ja pikemaid tsükliperioode, mis kõik takistavad tegevuse parandamist [14].

Igas olemasolevas protsessis on sisendite ja väljundite puhul teatav varieeruvus, mistõttu on võimatu toota kahte täiesti identset toodet. Alati on mingi erinevus. Varieerumine tekitab probleeme, mille tulemuseks on defektsed tooted, sest nullvarieeruvusega protsess annaks järjepidevalt 100%-lise edukuse määra. Järelikult on varieeruvuse vähendamine kriitiline aspekt protsessikulude minimeerimisel ja *Six*

Sigma metoodika põhirõhk [15].

Kuue *Sigma* kontekstis liigitatakse variatsioon veel kahte kategooriasse, mis mõlemad nõuavad analüüsiks ja vähendamiseks erinevaid lähenemisviise. Esimesse kategooriasse kuuluvad kõik variatsioonid, mida ei saa täielikult kõrvaldada, kuigi mõningaid neist saab vähendada. Vahetevahel võib see vastata kellakujulisele normaaljaotusele, mis tuleneb loomupärasest juhuslikkusest. Tavalise põhjusliku varieeruvuse vähendamine nõuab sageli muutatusi kogu süsteemis [15].

Teist varieerumise kategooriat nimetatakse erilise põhjusega varieerumiseks. Need sündmused ei ole juhuslikud, neid esineb suhteliselt harva, kuid need annavad olulise panuse kogu varieeruvusse. Näiteid sündmustest, mis sageli põhjustavad erilise põhjusega varieerumist, on näiteks masinate tõrked, erinevatelt tarnijatelt pärit toorainete erinevused või mittestandardiseeritud tööprotseduurid. Parimaid parendusvõimalusi, arvestades vajalikke ressursse, leidub sageli just nende eriliste põhjuste hulgas. Seetõttu on oluline teha vahet tavapäraste ja eriliste põhjuste variatsioonidel [15].

2.3 DMAIC probleemide lahendamise protsess

DMAIC-probleemide lahendamise protsess on *Six Sigma* raamistikus väljakujunenud metoodika, mille eesmärk on protsesside parandamine ja optimeerimine. *DMAIC* tähendab *Define, Measure, Analyze, Improve, Control* (määratle, mõõda, analüüsi, paranda ja kontrolli), mis kujutab endast probleemi lahendamise protsessi viit olulist etappi [16].

Määratlege: Esimeses etapis, mida nimetatakse "Defineerimiseks", keskendutakse probleemi või parendamisvõimaluse täpsele piiritlemisele. See etapp hõlmab projekti eesmärkide ja ülesannete seadmist ning projekti ulatuse selget piiritlemist. Oluline on kindlaks määrata konkreetne protsess, mida on vaja parandada, saada põhjalik ülevaade kliendi nõuetest ja kehtestada peamised mõõtmisnäitajad [6].

Mõõtmine: Mõõtmise etapis keskendutakse eelkõige andmete kogumisele, et hinnata protsessi praegust seisundit. See etapp hõlmab protsessi asjakohaste sisendite ja väljundite tuvastamist, sobivate mõõtmismeetodite valimist ja andmete kogumist võrdlusnäitajate kehtestamiseks. Selles etapis kogutud andmed võimaldavad kvantifitseerida probleemi ulatust ja on aluseks edasisele analüüsile [16].

Analüüsige: Analüüsi" etapis on peamine eesmärk tuvastada probleemi algpõhjused. Eelmises etapis

kogutud andmete uurimiseks kasutatakse statistilisi ja analüütilisi vahendeid. Probleemi tekkimist soodustavate tegurite kindlakstegemiseks ja nende seose mõistmiseks protsessiga kasutatakse selliseid meetodeid nagu algpõhjuste analüüs, hüpoteeside testimine ja protsesside kaardistamine [6].

Parandada: Parandamise etapp hõlmab võimalike lahenduste väljatöötamist ja hindamist tuvastatud algpõhjuste kõrvaldamiseks. Innovatiivsete lahenduste väljatöötamiseks kasutatakse loomingulisi probleemi lahendamise meetodeid ning seejärel katsetatakse ja rakendatakse neid lahendusi väikeses mahus, et hinnata nende tõhusust. Eesmärk on rakendada muudatusi, mis viivad protsessi paranemiseni [16].

Kontroll: Viimane etapp, "Kontroll", keskendub soovitud lahenduste suuremahulisele rakendamisele ja kontrollimeetmete kehtestamisele, et tagada paranduste püsivus aja jooksul. Protsessi jälgimiseks ja soovitud tulemusnäitajate jätkuvaks saavutamiseks töötatakse välja kontrollikavad. Pidev järelvalve ja korrapärane läbivaatamine toimub tagasilanguse vältimiseks ja saavutatud edusammude säilitamiseks [6].

DMAIC-protsess pakub organisatsioonidele süstemaatilist lähenemist probleemide lahendamisele, mis võimaldab neil tuvastada ja lahendada protsesside ebaefektiivsust, vähendada defekte ja parandada üldist tulemuslikkust [16].

2.3.1 Probleemi defineerimine

Defineerimisfaas on *DMAIC*-metoodika esimene samm, mille eesmärk on täpselt kirjeldada käsitletavat probleemi. Selles etapis määrab meeskond kindlaks projekti eesmärgi, ulatuse ja eesmärgid. Projekti ulatus tuleb hoolikalt määratleda, et tagada meeskonna keskendumine ja vältida ulatuse muutumist. See etapp ei ole pelgalt probleemi tuvastamine, vaid probleemi mõistmine üldise äristrateegia kontekstis. Defineerimisfaas hõlmab ka klientide, nende vajaduste ja nõuete kindlaksmääramist. See eeldab selgust selle kohta, mida projektiga soovitakse saavutada ja millist väärtust see organisatsioonile toob. Selle etapi edu seisneb probleemi selge ja ühise mõistmise saavutamises, mis toob kaasa sidusrühmade nõusoleku ja loob eeldused järgmistele *DMAIC*i etappidele [13].

Selles etapis kasutatavad peamised vahendid on järgmised [9]:

- Projekti põhikiri: määratleb projekti eesmärgid, ulatuse ja osalejad;
- *SIPOC* (tarnijad, sisendid, protsess, väljundid, kliendid): Annab kõrgetasemelise ülevaate protsessist;
- Kliendi hääl (*VOC*): Võtab kokku kliendi ootused, eelistused ja vastumeelsused;
- Kriitilis-kvaliteetne (*CTQ*) puu: Tõlgib kliendi vajadused ja ootused mõõdetavateks nõueteks.

2.3.2 Mõõtmine

Mõõtmise faas seisneb olemasoleva süsteemi kvantifitseerimises. See etapp hõlmab andmete kogumist, et luua statistiline baastase, millest lähtudes mõõdetakse protsessi parandamist. Väga oluline on mõista praegust protsessi ja mõõta selle tulemuslikkust täpselt, et teha kindlaks, kus on probleeme. Mõõtmisfaas hõlmab ka mõõtmisüsteemi usaldusväärsuse kontrollimist, sest usaldusväärsed andmed on olulised järgnevate *DMAIC*-faaside edukaks rakendamiseks. Tegemist on anekdootilise teabe muutmisega kindlateks andmeteks ja protsessi hetkeseisu mõistmisega. Küsimus on selles, kuidas kasutada neid andmeid, et tuvastada lüngad praeguse tulemuslikkuse ja soovitud eesmärgi vahel. See etapp nõuab hoolikat ja põhjalikku mõõtmiskava, et tagada õigete andmete kogumine edasiseks analüüsiks [9].

Tüüpilised vahendid, mida kasutatakse mõõtmisetapis, on järgmised [16]:

- Andmete kogumise kava: Tagab, et kogutud andmed on kasulikud ja asjakohased;
- Mõõtesüsteemi analüüs (*MSA*): Hindab mõõtmisüsteemi statistilisi omadusi;
- Protsessi võimekuse analüüs: Hinnatakse protsessi võimet täita spetsifikaate;
- Voolukaart: Visualiseerib tegevuste järjestust protsessis.

2.3.3 Analüüs

Analüüsi faasis uuritakse kogutud andmeid, et tuvastada probleemi algpõhjus(ed). See etapp hõlmab süvaanalüüsi, et mõista, miks probleem esineb. See nõuab statistilise analüüsi kasutamist, et kinnitada algpõhjuseid ja tagada, et meeskond ei tegutse lihtsalt oletuste või intuitsiooni põhjal. Esmane eesmärk on luua statistiline seos sisendite (*X*) ja väljundite (*Y*) vahel. Kui algpõhjused on kontrollitud, võib meeskond liikuda edasi täiustamisfaasi. Analüüsimise faasi eesmärk on muuta kogutud andmed väärtuslikeks arusaamadeks, mis võivad suunata meeskonna jõupingutusi täiustamise faasis. See hõlmab

selliste võimalike põhjuste kõrvaldamist, mida ei saa statistiliselt probleemiga seostada, piirates seega fookust nendele, mis on kõige olulisemad [16].

Analüüsi faasis tavaliselt kasutatavad vahendid on järgmised [13]:

- Põhjuse ja mõju diagramm (kalaluu diagramm): Nimetab mitmeid võimalikke põhjusi, mis võivad põhjustada mõju või probleemi;
- Hüpoteesi testimine: Määratleb, kas rühmade vaheline erinevus on statistiliselt oluline;
- Regressioonianalüüs: Uurib seost sõltuva muutuja ja ühe või mitme sõltumatu muutuja vahel;
- Pareto diagramm: Rõhutab tegurite hulgast kõige olulisemaid.

2.3.4 Parendamine

Parandamisfaas hõlmab analüüsifaasis tuvastatud algpõhjustega seotud lahenduste väljatöötamist, valimist ja rakendamist. Tegemist on muudatuste tegemisega, mis parandavad protsessi ja lahendavad probleemi. See etapp hõlmab sageli loomingulisi probleemide lahendamise tehnikaid ja võib nõuda teatud määral riskide võtmist. Eesmärgiks ei ole mitte ainult parema protsessi kavandamine, vaid ka statistiliste tõenditega tõestamine, et protsessi tulemuslikkust on oluliselt parandatud. Selles etapis tehtud muudatused peaksid olema kooskõlas organisatsiooni eesmärkidega ja lahendusi tuleks testida, et tagada oodatud paranemine. Parandamisetapis kasutatakse analüüsietapis saadud teadmisi, et sõnastada ja rakendada lahendusi, mis tegelevad tuvastatud algpõhjustega. See nõuab meeskonnalt loomingulist mõtlemist ja koostööd, et töötada välja ja rakendada tõhusaid lahendusi [9].

Parandamisetapis kasutatavad vahendid on järgmised [16]:

- Ajurünnak: Tekitab grupi hulgaliselt ideid;
- Katsete kavandamine (*DOE*): Leiab protsessi optimaalsed tingimused;
- Pilootuuringud: Katsetab muudatusi väikeses mahus enne täiemahulist rakendamist;
- Tasuvusanalüüs: Võrreldakse kavandatavate muudatuste kulusid ja kasu.

2.3.5 Kontroll

Kontrollifaas seisneb tehtud paranduste säilitamises. Pärast protsessi optimeerimist täiustamisfaasis tagab kontrollifaas, et protsess säilitab uue tulemuslikkuse taseme. See hõlmab kontrollisüsteemide rakendamist, et protsessi pidevalt jälgida, tagades seeläbi, et protsess ei läheks tagasi vanale tasemele. Selles etapis peab meeskond töötama välja standardse töökorra, koolituskavad ja protsessi kontrolliplaanid. Kehtestatakse kontrollimeetmed tagamaks, et täiustatud protsessist saadav kasu hoitakse ja säilitatakse. Need meetmed võivad hõlmata statistilise protsessikontrolli (SPC) diagrammide kasutamist, et jälgida protsessi ja tuvastada kõik kõrvalekalded soovitud tulemuslikkusest. Kontrollifaasi eesmärk on tagada, et *DMAIC*-projektiga saavutatud kvaliteedi paranemine säilib ka pärast projekti lõppu. Kontrollifaas on *DMAIC*-tsükli viimane, kuid mitte vähem tähtis faas. Selle eesmärk on tagada protsessiparanduste pikaajalisus ning tekitada protsessi operaatorite ja omanike seas vastutustunne. Kontrollifaas paneb aluse pidevale täiustamisele, mis on *Lean Six Sigma* peamine põhimõte [9].

Selles etapis kasutatavad peamised vahendid on järgmised [16]:

- Protsessi kontrolli plaanid: Protsessi kontrollimise strateegiad;
- Standardne töökord (*Standard Operating Procedures, SOP*): Tagab protsessi järjepideva läbiviimise;
- Statistiline protsessikontroll (*SPC*): Jälgib protsessi aja jooksul, et tuvastada kõik muutused protsessi tulemuslikkuses;
- Kontrollkaardid: Joonistab tulemuslikkuse andmed aja jooksul, et tuvastada kõik nihked või suundumused, mis võivad protsessi mõjutada;
- Reageerimisplaan: Üksikasjalikud meetmed, mida tuleb võtta protsessi muutustele reageerimiseks.

2.4 Sihtettevõtte tutvustus ja taust

ASEA Brown Boveri (ABB) on rahvusvaheline ettevõte, mille peakorter asub Šveitsis ja Rootsis. Ettevõtte tegutseb mitmes sektoris, sealhulgas robootika, energeetika, automaatika ja elektrifitseerimine. ABB loodi 1988. aastal Rootsi energeetikafirma Allmänna Svenska Elektriska Aktiebola (ASEA) ja Šveitsi elektrotehnikaettevõtte Brown, Boveri & Cie ühinemisel. Tänapäeval on ABB tunnustatud

ülem maailmne liider elektri- ja automaatikatehnoloogiate valdkonnas, mis tegutseb üle 100 riigis ja kus töötab ligikaudu 105 000 inimest [3].

Ettevõtte pakub laia valikut tooteid ja teenuseid erinevatele tööstusharudele, nagu energeetika, transport, tootmine ja infrastruktuur. Ettevõtte pakkumine hõlmab robootika- ja automaatikasüsteeme, kõrge- ja keskpinge tooteid, elektrimootoreid ja ajamit, elektrivõrke ning taastuvenergia lahendusi. ABB põhiülesanne on võimaldada oma klientidel suurendada jõudlust, vähendades samal ajal keskkonnamõju. Seega on ABB tooted ja teenused loodud selleks, et suurendada klientide tootlikkust, tõhusust ja jätkusuutlikkust [4].

Üks ABB tehastest, ABB AS Drives, asub Eestis ja on spetsialiseerunud madalpingeajamite ja tuulemuundurite tootmisele. See 2004. aastal asutatud tehas on kujunenud oluliseks tegijaks Balti regiooni elektriajamite tootmises. Tallinna lähedal Jüris asuvas ABB AS Drives tehases töötab üle 400 inimese ja see tegutseb 17 000 ruutmeetri suurusel territooriumil. Tooteportfelli kuuluvad tuulemuundurid ja mitmesugused ajamid sellistele tööstusharudele nagu vee- ja reovee-, kaevandus- ning nafta- ja gaasitööstus. ABB AS Drives on kõrgelt hinnatud oma pühendumise eest kvaliteedile ja jätkusuutlikkusele, mille tooted on projekteeritud energiatõhususe suurendamiseks ja keskkonnamõju vähendamiseks [5].

Käesolev lõputöö keskendub ABB AS Drives tehasele Eestis ja uurib, kuidas *Lean Six Sigma (LSS)* *DMAIC* meetodika ja tööriistade praktiline rakendamine võib suurendada tuulekonverterite katsetamise tõhusust, vähendades lõppkokkuvõttes testimisaega.

2.5 Eesmärk ja ulatus

Lõputöö eesmärk on uurida ja parandada Eestis asuva ABB AS Drives tehases toodetud tuulekonverterite testimisaega. Uuring piirdub tuulemuunduritoodete testimisprotsessiga alates hetkest, mil kokkupandud kapp antakse üle testimisalale, kuni muundurid on valmis kaubavarudes ja valmis pakendamiseks.

Selle eesmärgi saavutamiseks kasutatakse uuringus *Lean Six Sigma* vahendeid ja *DMAIC*-meetodikat, et teha kindlaks tegurid, mis aitavad kaasa testimise kestusele, ja töötada välja tõhusad lahendused selle kestuse vähendamiseks. Seetõttu keskendub käesolev uuring *LSS* seotud teooriatele ja vahenditele ning

ei hõlma muid metoodikaid ega teooriaid.

Lisaks sellele on lõputöö eesmärk näidata, kuidas *LSS DMAIC* saab tõhusalt kasutada projektis, mis keskendub testimise kestuse vähendamisele. Eesmärgiks on ka esitada hulk praktilisi lahendusi, mida sihtettevõtte ABB AS Drives saab rakendada, et minimeerida oma tuulekonverterite toodete testimisperioodi. Lisaks rõhutatakse käesolevas uuringus, kui oluline on kasutada lahenduste loomisel alusena andmeanalüüsi, mitte tugineda üksnes intuitsioonile.

Oluline on märkida, et käesolev uuring keskendub üksnes ABB AS Drives tehase tuulekonverterite toodetele ning ei hõlma muid ABB või teiste ABB tehaste pakutavaid tooteid. Eesmärk on töötada välja praktilised lahendused, mida saab rakendada minimaalsete investeeringutega ja mis toovad rohkem kasu kui kahjulikke mõjusid.

2.6 Struktuur

Lõputöö on üles ehitatud kahte põhiosasse. Esimene osa hõlmab teist ja kolmandat peatükki, mis panevad aluse *Six Sigma* ja *Lean* teooriate tutvustamisele. See alus on väga oluline, kuna parendusprojekt viiakse ellu *Lean Six Sigma* metoodika abil. Teine osa, mis koosneb neljandast ja viiendast peatükist, keskendub projekti elluviimisele ja sihtettevõtte saavutatud kasu uurimisele. Neljandas peatükis järgitakse hoolikalt *Six Sigma DMAIC*-projekti samme, et tagada parendusprojekti süstemaatiline ja range elluviimine. Viiendas peatükis esitatakse uuringust saadud tulemused ja järeldused, mis sisaldavad *Lean Six Sigma* metoodika rakendamisega seotud eeliste ja probleemide hindamist ning projekti teostamise kriitikat. Lõpuks esitatakse kuuendas peatükis kokkuvõtte lõputöö käigus esile toodud põhipunktidest.

Kokkuvõttes on käesoleva uurimisprojekti eesmärk töötada välja praktilised lahendused ABB AS Drives tehases toodetud tuulekonverterite katsetamise aja vähendamiseks. Uuringus kasutatakse *Lean Six Sigma* metoodikat ja vahendeid, et teha kindlaks tegurid, mis aitavad kaasa testimisaja pikendamisele, ja pakkuda välja kulutasuvaid lahendusi, mis pakuvad rohkem kasu kui puudusi. Oluline on märkida, et käesoleva uuringu ulatus piirdub ABB AS Drives tehases toodetud tuulemuunduritoodetega ning ei hõlma teisi ABB tooteid ega tehaseid.

3 LEAN

Lean Manufacturing, mida tuntakse ka lihtsalt "*Lean*" nime all, pärineb Toyota tootmissüsteemist (TPS), mille Toyota töötas välja Jaapanis pärast Teist maailmasõda. Taiichi Ohno ja Shigeo Shingo, kaks Toyota tööstusinseneri, on sageli nimetatud süsteemi peamisteks arendajateks [8]. Toyota tootmisfilosoofia eesmärk oli kõrvaldada raiskamine ja suurendada tõhusust, mille tulemuseks oli kvaliteetsete toodete tootmine võimalikult väikeste kuludega ja lühima tarneajaga.

Termin *Lean* võeti hiljem kasutusele John Krafciku 1988. aasta artiklis "*Triumph of the Lean Production System*" ning seda populariseerisid James P. Womack ja Daniel T. Jones oma 1990. aasta raamatus "*The Machine That Changed the World*" (Masin, mis muutis maailma) [17]. Nende uuringud näitasid, et *Leani* põhimõtteid rakendavad ettevõtted olid tõhusamad ja reageerisid paremini klientide nõudlusele.

Lean keskendub mitmele põhiprintsiibile [18]:

- Väärtus: see määrab, mille eest kliendid on valmis maksma;
- Väärtusvoog: tegevused, mis on vajalikud toote või teenuse viimiseks kontseptsioonist kuni tarnimiseni;
- Vool: töö sujuv ja katkematu voo tagamine läbi väärtusvoo;
- Tõmba: toota ainult seda, mida järgmine protsess vajab, kui ta seda vajab;
- Täiuslikkus: täiuslikkuse poole püüdlemine pideva täiustamise kaudu.

Leani põhimõtteid rakendades püüavad organisatsioonid luua klientide jaoks rohkem väärtust vähemate ressurssidega, mis toob kaasa suurema tegevuse tõhususe, väiksema raiskamise ja parema kliendirahulolu.

3.1 Raiskamine

Lean-tootmises on raiskamise ehk jaapani keeles *muda* mõiste ülimalt oluline. Taiichi Ohno, keda peetakse Toyota tootmissüsteemi isaks, määras kindlaks seitse liiki jäätmeid, mis eksisteerivad tootmisprotsessides [8]:

- Transport: Materjalide või teabe tarbetu liikumine;
- Inventuur: Üleliigne tooraine, pooleliolev töö või valmistoodang;

- Ettepanek: Inimeste tarbetu liikumine;
- Oodates: Ootamata aeg, mis tekib, kui materjal, teave, inimesed või seadmed ei ole valmis;
- Ületootmine: Tootmine rohkem kui vaja, kiiremini kui vaja;
- Liigne töötlemine: Suurema töö tegemine, kui klient nõuab;
- Defektid: Töö, mis sisaldab vigu, ümbertöötamist või vigu.

Need jäätmed ei ole seotud ainult tootmisega. Neid võib leida praktiliselt igas äriprotsessis, sealhulgas teeninduses, tervishoius, tarkvaraarenduses ja mujal. Viimastel aastatel on lisatud kaheksas jäätmekategooria, "Talentide alakasutamine", et tunnustada inimeste oskuste, teadmiste ja loovuse mittetäieliku ärakasutamisega seotud jäätmeid [19].

Variatsioon on mõiste, mis on tihedalt seotud jäätmetega. Protsesside varieerumine põhjustab sageli jäätmeid, sest see häirib töövoolu, põhjustades viivitusi, järeltööd ja muud ebatõhusust. *Lean*'i puhul on eesmärk vähendada varieeruvust, et parandada tulemuste prognoositavust ja järjepidevust, vähendades seeläbi raiskamist [20]. Siiski on oluline tunnistada, et teatav varieeruvus on igas protsessis omane ja vältimatu. Selle varieeruvuse põhjuste mõistmine on protsessi tõhususe ja kvaliteedi parandamise võti. Variatsioonid võib jagada kahte liiki: tavapäraste põhjuste variatsioon ja eriliste põhjuste variatsioon. Tavapärase põhjustega variatsioonid on protsessile omased. Need tulenevad loomulikest ja vältimatutest põhjustest, mis püsivad aja jooksul [10].

Varieerumise sagedased põhjused on järgmised:

- Keskkonnategurid: Muutusi võivad põhjustada ilmastiku, niiskuse, temperatuuri või muude keskkonnatingimuste muutused;
- Materiaalsed erinevused: Väikesed erinevused toorainetes, näiteks tiheduse, koostise või kvaliteedi osas, võivad põhjustada erinevusi lõpptootes;
- Operaatori variatsioon: Isegi hästi koolitatud operaatoritel võivad olla väikesed erinevused ülesande täitmisel;
- Masinate kulumine: Seadmete korrapärane kasutamine põhjustab kulumist, mis võib põhjustada väikesi erinevusi toodangus;
- Mõõtmisviga: Mõõtmisüsteemid ise võivad põhjustada kalibreerimisprobleemide või operaatori vea tõttu kõrvalekaldeid.

Ühise põhjusega varieerumise lahendamine nõuab sageli protsessi põhjalikku muutmist. See võib hõlmata protsessi ümberkujundamist, investeerimist uutesse seadmetesse või uute koolitusprogrammide rakendamist operaatorite jaoks. Oluline on siiski märkida, et kõiki tavapäraste põhjuste varieeruvusi ei ole vaja kõrvaldada. Selle asemel peaks eesmärk olema vähendada varieeruvust tasemeni, mis vastab protsessi nõuetele ja kliendi vajadustele [21].

3.2 Lisandväärtusega ja mitte-lisandväärtusega aeg

Lean-mõtlemises liigitatakse protsessis olevad tegevused tavaliselt kas lisandväärtusega (VA) või lisandväärtuseta (NVA) tegevusteks. *Leani* eesmärk on maksimeerida lisandväärtusega tegevusi ja minimeerida või kõrvaldada lisandväärtuseta tegevused [22].

Lisandväärtust loovad tegevused on need, mille eest klient on valmis maksuma, sest need muudavad toote või teenuse kliendi jaoks mõttekaks. Need on olulised sammud, mis lisavad kliendi seisukohast väärtust. [23]. Näidetena võib tuua detaili mehaanilise töötlemise tootmises või patsiendi diagnoosimise tervishoius.

Mittetulunduslikud tegevused on seevastu need, mis ei anna kliendi seisukohalt lisaväärtust ja mida saab kõrvaldada, ilma et see mõjutaks protsessi. Neid tegevusi peetakse sageli jäätmeteks ehk *Lean*-terminoloogias *muda*. Näidetena võib tuua transpordi, ootamise, ületootmise ja defektid [8].

Siiski on oluline märkida, et on olemas veel üks kategooria, mida sageli nimetatakse "lisaväärtuseta, kuid vajalikuks" või "äriliseks lisaväärtuseks". Need on tegevused, mis ei anna kliendi seisukohast otseselt lisaväärtust, kuid on vajalikud kehtivate tegevuspiirangute, õiguslike nõuete või äritavade tõttu [24]. Näiteks võib olla kvaliteedikontrolli etapp, mis ei muuda toodet, kuid on vajalik regulatiivsete nõuete täitmiseks.

Liigitamine VA-deks ja NVA-deks tehakse sageli väärtusvoo kaardiga (VSM), mis on vahend, mis kaardistab visuaalselt materjali- ja teabevoolu läbi protsessi. VA ja NVA tegevuste tuvastamise ja analüüsimise abil saavad organisatsioonid suunata parandusi, ühtlustada protsesse ja suurendada tõhusust [23].

Kokkuvõttes on lisandväärtuse ja lisandväärtuseta aja mõisted *Lean*'i jaoks fundamentaalsed.

Keskendudes VA-tegevuste suurendamisele ja NVA-tegevuste vähendamisele, saavad organisatsioonid vähendada raiskamist, parandada kliendiväärtust ja suurendada tegevuse tõhusust.

3.3 Statistiline protsessikontroll

Statistiline protsessikontroll (*SPC*) on nii *Lean* kui ka *Six Sigma* peamine metoodika, mis kasutab statistilisi meetodeid protsessi jälgimiseks ja kontrollimiseks, tagades selle täieliku potentsiaali kasutamise [21]. See on võimas vahend varieeruvuse vähendamiseks, protsessi tulemuslikkuse parandamiseks ja pideva täiustamise suunas liikumiseks.

SPC hõlmab kontrollkaartide kasutamist, mis on *Six Sigma* põhiline vahend, et tuvastada ja jälgida protsessi varieerumist aja jooksul [16]. Kontrollkaardid kujutavad protsessi andmeid aja jooksul, kusjuures kontrollpiirid on seatud nii, et need näitavad vastuvõetava varieeruvuse vahemikku. Kui protsess toimib nende piiride piires, siis on protsess statistiliselt kontrollitud ja kõik variatsioonid on tingitud loomulikest teguritest. Kui aga andmepunktid jäävad neist kontrollpiiridest välja, siis viitab see erilisele variatsiooni põhjusele, mida tuleb uurida ja mis võib-olla kõrvaldada.

Lean-mõtlemises kasutatakse *SPC*-d koos teiste vahendite ja põhimõtetega, et vähendada raiskamist ja parandada protsessi kulgemist. Näiteks võib *SPC*-d kasutada kriitilise protsessiparameetri jälgimiseks, kusjuures reaajas tagasisidet kasutatakse kohe korrigeerimise tegemiseks, vähendades defekte ja järeltöötlust [18].

Lisaks sellele on *SPC* kasutamine *Six Sigma* projektides, eriti *DMAIC*-tsükli kontrollifaasis, kriitilise tähtsusega. *SPC* aitab tagada, et protsessiparandused on aja jooksul püsivad, sest see aitab tuvastada muutusi protsessis enne, kui need põhjustavad defekte [11].

Kokkuvõttes on *SPC* võimas vahend protsessi stabiilsuse säilitamiseks, varieeruvuse vähendamiseks ja pideva täiustamise edendamiseks. Nii *Lean* kui ka *Six Sigma* meetodid kasutavad *SPC*-d kui põhielementi oma lähenemisviisis protsesside parandamisele, mis rõhutab selle väärtust tegevuse tipptaseme algatustes.

3.4 Minitab tarkvara ja selle kasutamine *Lean Six Sigmas*

Minitab on juhtiv statistiline tarkvarapakett, mida kasutatakse laialdaselt *Lean Six Sigma* algatustes selle jõuliste ja kasutajasõbralike statistiliste analüüsivõimaluste tõttu [25]. See pakub ulatuslikke vahendeid statistiliseks analüüsiks ja graafiliseks esitamiseks, mis sobivad hästi kokku *Lean Six Sigma* andmepõhise lähenemisviisiga.

Minitabi peamine eelis on selle võime aidata kasutajatel liikuda läbi keerulise statistilise analüüsi, ilma et see nõuaks statistilise teooria põhjalikku tundmist. See muudab selle eriti kasulikuks *Lean Six Sigma* puhul, kus praktikud peavad sageli tegema andmepõhiseid otsuseid, kuid neil ei pruugi olla kõrgetasemelist statistilist koolitust [26].

DMAIC-tsükli määratlemis- ja mõõtmisfaasis saab Minitabi kasutada andmete uuriva analüüsi läbiviimiseks, näiteks histogrammide või Pareto diagrammide koostamiseks, et tuvastada mustreid või võimalikke probleeme. Samuti aitab see kaasa mõõtmisüsteemi analüüsi (MSA) läbiviimisele, mis on andmete usaldusväärsuse tagamise oluline aspekt [16].

Analüüsi faasis tulevad esile Minitabi täiustatud statistilised võimalused, mis hõlbustavad muu hulgas hüpoteeside testimist, regressioonianalüüsi ja *ANOVA*. Need vahendid aitavad tuvastada muutujate vahelisi seoseid ja määrata probleemide algpõhjuseid [27].

Parandamisfaasis toetab Minitab katsete kavandamist (*Design of Experiments, DoE*), mis aitab kindlaks teha optimaalseid protsessi seadistusi, et parandada jõudlust [28].

Lõpuks kasutatakse kontrollifaasis Minitabi statistilise protsessi kontrolli (*SPC*) võimalusi, et jälgida protsessi tulemuslikkust ja tagada, et parandused oleksid püsivad [11].

Kokkuvõttes on Minitab hindamatu tööriist *Lean Six Sigma* praktikutele, pakkudes võimsaid statistilisi analüüsivõimalusi kasutajasõbralikus pakettis. Selle lai funktsionaalsus toetab andmepõhist otsustamist kogu *DMAIC*-tsükli jooksul, aidates kaasa protsessi tõhusamale ja jätkusuutlikumale parandamisele. Autor kasutab Minitabi käesoleva lõputöö projekti teostamise osas.

4 LEAN SIX SIGMA PROJEKTI ELLUVIIMINE

Selles peatükis kirjeldatakse parendusprojekti elluviimist, keskendudes eelnevalt tutvustatud teooriate praktilisele rakendamisele. Teoreetilisi aluseid on eelnevates peatükkides põhjalikult käsitletud ja nüüd on rõhk nende kontseptsioonide ülevõtmisel tegelikku rakendamisse. Projekt järgib *Six Sigma DMAIC*-protsessi ja integreerib *Lean*-vahendeid kõigis selle eri etappides. Käesoleva lõputöö autor on sertifitseeritud kollase vööga ja tegutseb projektijuhina.

4.1 Probleemi defineerimine

Uuritav toode on tuuleturbiinide sagedusmuundur (Joonis 1). See on oluline osa tuulegeneraatorist, mis on hädavajalik efektiivse tuuleenergia tootmise jaoks. Need muundavad tuulegeneraatori muutuva sagedusega väljundi fikseeritud sageduseks. See kriitiline protsess võimaldab efektiivset ja usaldusväärset võrguühendust, optimeerides tuuleenergia muundamist elektrienergiaks [29].



Joonis 1. Sagedusmuundur [4]

Six Sigma DMAIC-parandusprotsessi esimene samm on faas "Defineerimine". Selles etapis käsitletakse järgmisi põhiküsimusi:

- Millised äriküsimused vajavad lahendamist?
- Millised on projekti eesmärgid?
- Millised on mõõdetavad ärimõõdikud?
- Kes on kliendid?
- Kes on peamised isikud, kes moodustavad projekti esmase meeskonna?

Projekt algas 2022 aasta septembris ABB-s toimunud esialgse kohtumisega, kus osalesid kohalik tootmisliini juht ning kvaliteedi ja pideva täiustamise juht. Koosoleku eesmärk oli tuvastada äriküsimus ja jõuda ühisele arusaamisele projekti parameetritest.

Kõik ABB ASi konverterid on tellimustööna valmistatud. Klientidele esitatakse arve 21 tunni pikkuse garanteeritud konverteri testimise eest, kusjuures ABB AS võtab kõik lisatunnid enda kanda.

Siiski ei ole kavandatud testimise aeg alati saavutatav. Muutuva testimisaja tõttu on keeruline ennustada, millal tooted on tarnimiseks valmis, ja planeerida tootmisvõimsust. Lisaks sellele ei jälgita järjepidevalt testimisaja normide täitmist.

Arvestades neid küsimusi, püstitati projekti raames järgmised peamised ärilised eesmärgid:

- Vähendada konverteri testimise aega 2023. aasta teiseks kvartaliks;
- alandada maksimaalset piirmäära (21 tundi) ületavate testide arvu, nihutades keskmist vasakule.

Neid kahte eesmärki kombineerides määrati testimisele kulutatud tundide arv peamiseks ärimõõdikuks.

Üks peamisi põhimõtteid *Six Sigma* projektides on kliendikesksuse säilitamine algusest peale. Selleks on vaja teada, kes on protsessi väljundite lõppkasutajad. Käesoleval juhul on esialgne klient tootmisliini juht, kes näeb kasu testimise lühendatud ettevalmistusajast kiirema ja usaldusväärsema testimise kaudu. Parem testimisvõime võib viia klientide rahulolu suurenemiseni ja potentsiaalsesse müügi kasvu, kuna rohkem tunde saab arvele võtta. Testimisprotsessiga seotud ressursside vabastamine võimaldab neid suunata ümber teistele toodetele.

Pärast probleemide ja eesmärkide kirjeldamist määrati kindlaks projekti võtmeisikud. Selleks kasutati

Six Sigma projektimeeskonna raamistiku kohandamist. Käesoleva lõputöö autor on sertifitseeritud kollase vööga ja tegutseb projektijuhina. Määratletud võtmerollide hulka kuulusid:

- Tegevussponsor: tegevjuht,
- Projekti eestvedaja: kvaliteedi ja pideva täiustamise juht,
- Roheline vöö: tootmis inseneride meeskonnajuhataja,
- Kollane vöö: Ustin Kiselev,
- Finantsanalüütik: rahanduse esindaja,
- Protsessi omanikud: tootmisliini juht ja katsetamis ala töödejuhataja.

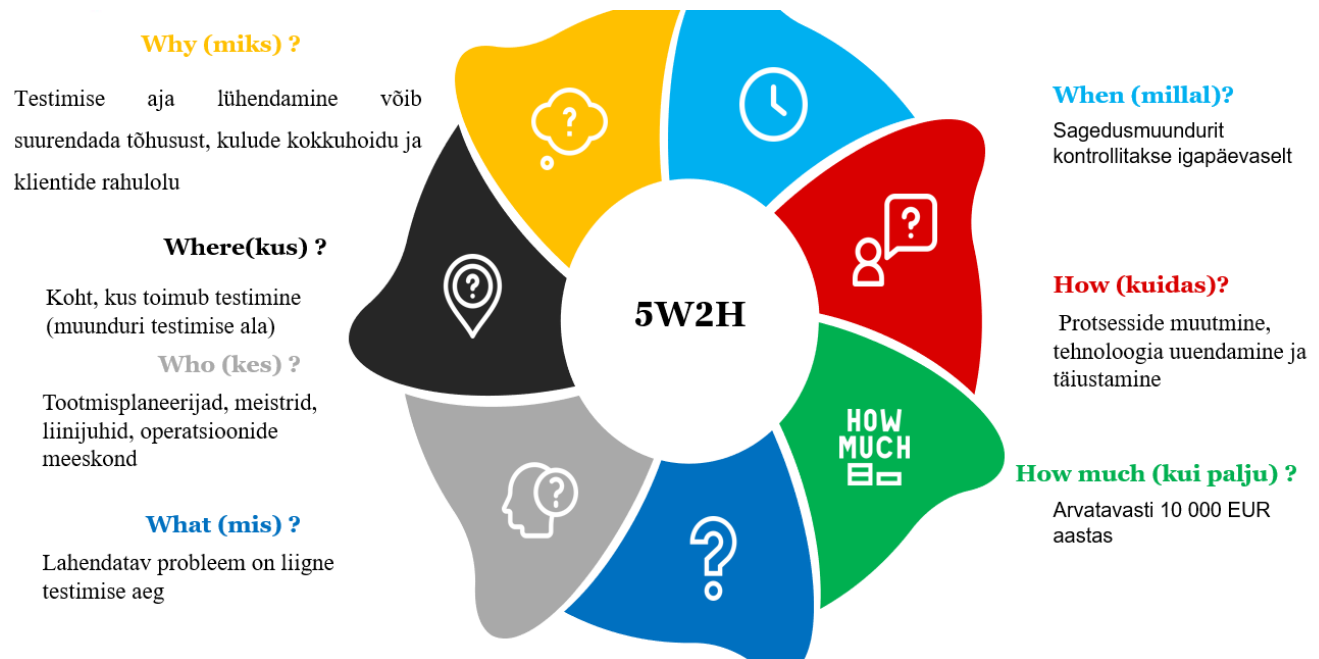
Pärast määratlemisfaasi lõpetamist määratleti äriprobleem ja jäeti kõrvale mittekriitilised äriküsimused. See tagab, et projekti ulatus on hallatav ja et projekt on tõhusalt fokuseeritud. Protsessi omanikud ja projekti eestvedaja, kes on kõige paremini kursis ettevõtte praeguste äriprobleemidega, tegid suurema osa tööst määratlemisfaasis.

Autor on valinud *5W2H* meetodi (Joonis 2) ka üheks *Lean Six Sigma* vahendiks, mida kasutada Define etapis.

5W2H raamistik aitab selgelt määratleda probleemi, selle olulisuse, asukoha, esinemise aja, kaasatud isikud, probleemi lahendamise protsessi ja vajalikud ressursid [9]. Selline terviklik probleemi raamistamine soodustab süstemaatilist, ranget lähenemist probleemilahendusele, võimaldades meeskondadel uurida probleemi erinevatest vaatenurkadest.

Nende kriitiliste küsimuste esitamisega saavad meeskonnad tagada, et neil on põhjalik arusaam kõnealusest probleemist, selle mõjust, sellega seotud protsessidest ja inimestest ning selge plaan selle lahendamiseks [16]. Selle meetodi kasutamine aitab luua kindla aluse ülejäänud *DMAIC*-protsessile, mis viib tõhusamate ja jätkusuutlikumate lahendusteni.

5W2H meetod on tõhus vahend, mida kasutatakse *Lean Six Sigma* (L6S) projektide määratlemisfaasis, näiteks katseaja vähendamise algatuses. See probleemilahenduse meetod tagab probleemi või olukorra tervikliku mõistmise, käsitledes seitset kriitilist küsimust: Mis, miks, kus, millal, kes, kuidas ja kui palju.



Joonis 2. 5W2H põhi internetist, autori poolt täidetud [30]

Testimise aja vähendamise projekti raames:

- Mis: lahendatav probleem on liigne testimise aeg;
- Miks: testimise aja lühendamine võib suurendada tõhusust, kulude kokkuhoidu ja klientide rahulolu;
- Kus: koht, kus toimub testimine (muunduri testimise ala);
- Millal: praegune testimise ajakava, kuna muundureid testitakse kogu aeg;
- Kes: asjaomaste isikute hulka kuuluvad testimismeeskond, kvaliteedi tagamine, töödejuhataja, tootmise planeerijad, operatsioonimeeskond;
- Kuidas: strateegiad võivad hõlmata protsesside muutmist, tehnoloogia uuendamist ja täiustamist;
- Kui palju: lahenduste rakendamiseks vajalikud ressursid on hinnanguliselt umbes 10k eur.

5W2H meetodi rakendamine LSS määratlemisfaasis annab süstemaatilise viisi probleemi ja parendusprojekti kujundamiseks [9]. See aitab kindlaks määrata projekti ulatuse, eesmärgid, meeskonna, ajakava ja võimalikud parendusstrateegiad. Selline terviklik arusaam viib tõhusamate ja jätkusuutlikumate lahenduste väljatöötamiseni [16].

4.2 Mõõtmine

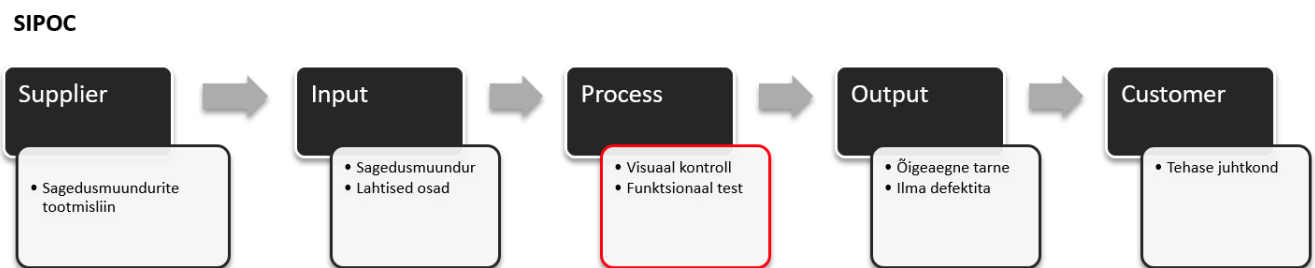
Kui probleem on määratletud, hõlmab järgmine samm kõigi sellega seotud protsesside kindlaksmääramist ja nende praeguste võimaluste hindamist. Selleks koostatakse esialgu testimisprotsessi kaart ja mõõdetakse iga etapi ajakulu. Pärast seda uuritakse tulemuslikkuse mõõtmise süsteemi, et kinnitada andmete kehtivust ja täpsust. Seejärel pööratakse tähelepanu nii testimisprotsessi kui ka varasemate tulemuste jälgimisele. Selles osas käsitletakse järgmisi päringuid:

- Millised on asjakohased protsessid ja vastavad alamprotsessid?
- Kui tõhus on kasutatav mõõtmissüsteem?
- Kas kasutatavad andmed on kehtivad ja täpsed?
- Milline on nende protsesside praegune jõudlustase?
- Kas andmed näitavad mingit märgatavat suundumust?

4.2.1 SIPOC diagramm

Suppliers, Inputs, Process, Outputs, Customers (*SIPOC*) on *Lean Six Sigma* metoodikas kasutatav protsessikaart. See annab protsessist kõrgetasemelise ülevaate, mis võimaldab projektimeeskonnal mõista protsessi kulgu ja tuvastada selle võtmeelemendid selle varajases etapis. *SIPOC*i kasutatakse tavaliselt *DMAIC*-tsükli mõõtmisfaasis, kuna see aitab protsessi struktureeritult määratleda enne üksikasjaliku andmekogumise ja analüüsi algust [30].

Konverteri katsetamise kontekstis võib (Joonis 3) esitatud *SIPOC* diagramm olla väärtuslikuks abivahendiks.



Joonis 3. Autori poolt loodud *SIPOC* diagramm

Joonise seletus:

- Tarnijad on need, kes pakuvad testimise jaoks vajalikke ressursse. Nende hulka kuuluvad muundurite tootjad;
- Sisendid viitavad sellele, mida protsessis kasutatakse. Konverteri katsetamisel on need konverteriüksused ise ja lahtised osad, mis tarnitakse töötlemata ja lõpuks paigaldatakse kliendile;
- Protsess kujutab muunduri katsetamise etappe;
- Väljundid on protsessi tulemused. Käesoleval juhul hõlmavad väljundid muundurit, mis on katsetatud kokkulepitud aja jooksul ja ilma vigadeta;
- Kliendid on väljundite saajad. Muundurite testimisel võivad klientideks olla kvaliteedikontrollimeeskonnad, tootejuhtkond ja lõpuks lõppkasutajad, kes vajavad muundurite usaldusväärset toimimist.

SIPOC-diagrammi koostamisel mõõtmisfaasis on autor saanud tervikliku ülevaate konverteri testimisprotsessist, määrares kindlaks peamised sisendid ja väljundid ning kliendid, kes sõltuvad nendest väljunditest. See võib aidata tuvastada potentsiaalset raiskamist, ebatõhusust või kvaliteediprobleeme, luues eeldused sügavamaks analüüsiks ja parendamiseks järgmistes *DMAIC*-faasides [9].

4.2.2 Protsessi kaardistamine ja testimisetappide mõõtmine

Protsessi etappide kaardistamine ja mõõtmine on kriitilised ülesanded mõõtmisfaasis. Protsessi kaardistamine hõlmab protsessi etappide visuaalset kujutamist, mis võimaldab meeskonnal mõista tegevuste kulgu, tuvastada kitsaskohti ja paljastada võimalikud ebatõhususe valdkonnad [11]. Võib kasutada mitmesuguseid kaardistamistehnikaid, näiteks vooskeeme, ujumisgraafikuid ja väärtusvoogude kaarte.

Mõõtmine seevastu tähendab asjakohaste andmete kogumist iga protsessietapi kohta. See võib hõlmata iga sammu jaoks kuluvat aega (tsükliäeg), töödeldud ühikute arvu (läbilaskevõime) või toodetud defektide arvu (defektimäär). Eesmärk on saada kvantitatiivne ülevaade protsessi tulemuslikkusest [12].

Testimisoperatsioonide kontekstis võivad need meetodid olla hindamatu väärtusega. Protsesside kaardistamine aitab visualiseerida testimismenetlust, hõlbustades üleliigsete etappide või ebatõhususe

tuvastamist. Iga testimisoperatsiooni etapi ajakulu mõõtmine võib aidata tuvastada erinevusi tulemuslikkuses, mis võib tuua esile parandamist vajavad valdkonnad. Neid andmeid saab seejärel analüüsida, et tuvastada mustreid, luua seoseid muutujate vahel ja määrata kindlaks probleemide võimalikud algpõhjused [27].

Autor on teinud stopperi ajamõõtmisi 1 minuti täpsusega, lisanud toetavaid märkusi ja kaardistanud iga katseprotsessi sammu, olles füüsiliselt kohal katsealal, kus ta jälgis katseala operaatori tööd. Seejärel korraldati seda teise katseala operaatoriga, et saada rohkem andmeid ja võrrelda erinevate operaatorite tulemusi.

Kahe erineva operaatori tulemused salvestati Excelisse ja koostati tabel, kus iga sammu kohta märgiti NVA ja VA tegevused. Lisa 1 ja 2. Neid andmeid kasutatakse hiljem Analüüsi faasis.

Pärast ülaltoodud andmete analüüsimist koostas autor protsessikaardi (Joonis 4), mis sisaldab peamisi testimisprotsessi etappe, kohvipausid/lõuna-/õhtusöögiajad filtreeriti välja ja VA/NVA tegevused märgiti ära. Autor otsustas visualiseerida protsessikaardi vooskeemi asemel lihtsa tabeli abil järgmistel põhjustel:

- Testimisprotsessis on palju erinevaid etappe, et neid saaks parema visualiseerimise eesmärgil ühele lehele mahutada;
- Konverter seisab kõigi nende etappide ajal paigal ja seda ei transpordita;
- Katseseadmed on töökoha lähedal;
- Kõik testimise etapid viib läbi üks operaator.

	Tegevuste number:	Protsessi kirjeldus:	Aeg, minutites:	Aja tüüp:
Päev 1	1	Vaba arvuti otsimine	2	NVA
	2	Vali testkappi	2	NVA
	3	Visuaalne kapi kontroll	2	NVA
	4	SAP laadimiskuupäevade kontroll	4	NVA
	5	Tootmisdokumentatsiooni kogumine	5	VA
	6	Kapi dokumentatsiooni kontroll	14	NVA
	7	Kliendidokumentatsiooni printimine	36	VA
	8	Komponentide ja siltide kontroll vastavalt osad	46	NVA
	9	Kontrolli muunduri välissilte	7	NVA
	10	Visuaalne kontroll	158	NVA
	11	Tõmbetest + kontrolli tühjade kontaktide pingu	56	VA
	12	Seadista DIP lülid	19	VA
	13	Kontrolli optilisi kaableid testeriga	18	NVA
	14	Raporteeri aeg SAP/CEP-sse	6	NVA
	15	6S, tööjaama koristamine	12	NVA
Päev 2	16	Koostaja teeb parandustööd leitud vigadele	70	NVA
	17	Kontrolli vooluringi skeemi ohm-meetriga	101	NVA
	18	Ettevalmistus isolatsioonitestiks	59	VA
	19	Isolatsioonitest	22	VA
	20	Katsetusjuhtmete lahtiühendamine	12	NVA
	21	Sidumistest	101	VA
	22	Testaruande printimine	3	VA
Päev 3	23	Raporteeri aeg SAP/CEP-sse	5	NVA
	25	Juhtmete ühendamine	8	NVA
	26	Paigalda BAMU kaart	13	NVA
	27	Ühenda arvuti kappi	1	NVA
	28	Ühenda ping 230/400V	2	NVA
	29	Lülita toide sisse	3	NVA
	30	Tarkvara üleslaadimine	28	VA
	31	Proovi lahendada probleemi BAMU kaardiga	4	NVA
	32	Jätka tarkvara laadimist	22	VA
	33	Taaskäivita kapp ja laadi uus tarkvara üles	26	VA
	35	Seadista parameetrid	29	VA
	37	Digitaalsete väljundite testimine	110	NVA
	39	Katete paigaldamine	10	VA
	40	Ühenda 690V kaablid	5	NVA
	41	Ohutussildid ja märgid	2	NVA
	42	Takistite ühendamine	2	NVA
	43	Visuaalne kontroll enne 690V käivitamist	1	NVA
	44	Kapi funktsionaalne testimine	42	NVA
	45	Lahuta 690V toitekaablid	2	NVA
	46	Lõplik tarkvara üleslaadimine	26	VA
	47	Komponentide pakkimine	13	VA
	49	Jälgituskontroll	34	NVA
	50	Otsi lahtisi osi	11	NVA
	51	Pane lahtised osad kappi	3	VA
	52	Raporteeri aeg SAP/CEP-sse	4	NVA
	53	6S, tööjaama koristamine	10	NVA

Joonis 4. Autori poolt koostatud protsessikaart VA tegevused - roheline värv,
NVA tegevused - punane värv

Kokkuvõttes on mõõtmise faas, mille rõhuasetus on protsesside kaardistamisel ja mõõtmisel, *Lean Six Sigma* puhul andmepõhise otsustamise alus, mis loob aluse järgnevale analüüsile ja parendustegevusele.

4.2.3 Testimis aja mõõtmise süsteemi katsetamine ja selle täpsus

Katsete läbiviimise aja analüüsimiseks kasutatud andmed pärinevad ettevõtte SAP-andmebaasist. Iga konverter on üheselt identifitseeritav selle seerianumbri abil ning üksikasjalik teave selle kohta, kui palju aega monteerijad ja katsetajad erinevates töökohtades veedavad, on salvestatud. See tähendab, et konverterite kokkupaneku ja katsetamisega seotud andmed registreeritakse minutite kaupa.

SAP, mis tähendab "*Systems, Applications, and Products in Data Processing*" (süsteemid, rakendused ja tooted andmetöötles), on juhtiv ettevõtte rakendustarkvara pakkuja. See 1972. aastal Saksamaal asutatud ettevõtte pakub ettevõtte ressursside planeerimise (*ERP*) tarkvara, mis integreerib erinevaid äriefunktsioone ühtsesse süsteemi, mis on kättesaadav kogu organisatsioonile. Moodulid hõlmavad muu hulgas finants-, kontrolli-, müügi- ja turustus-, materjali- ja personalijuhtimist. SAP tarkvara peamine omadus on reaalaajas andmetöötlus, mis võimaldab andmete kohese töötlemise ja aruandluse süsteemi sisenemisel [31].

Seda andmete kogumise praktikat teostatakse igapäevaselt. Katsete läbiviijad registreerivad päeva jooksul kulunud täpse aja, mis kulus konkreetsele konverterile, mis on identifitseeritud selle kordumatu seerianumbriga, mis on läbinud katsed. Selline kindel, igapäevane andmete kogumise protsess tagab, et kogutud andmed on kvaliteetsed ning annavad selge ja täpse pildi montaaži- ja katsetamistoimingutest.

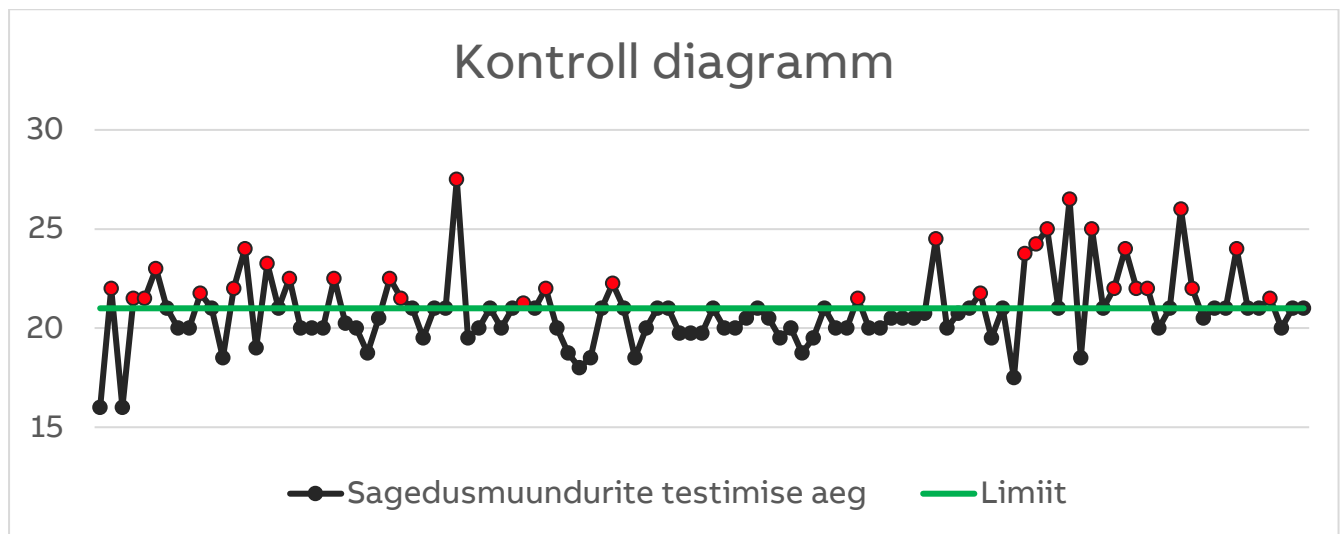
Andmete täpsus on märkimisväärne, sest need on salvestatud minutilise täpsusega. Vaatamata sellisele detailsusele on see asjakohane mõõteskaala, arvestades, et konverterite kogutöötlemisaeg on kvantifitseeritud päevades. Selline andmete detailsus võimaldab täpselt hinnata ajalist tõhusust ja kitsaskohti ning annab selge lähtepunkti, millest lähtudes on võimalik mõõta parandusi. Andmeid saab seejärel kasutada protsessi optimeerimise võimaluste kindlaksmääramiseks, mis lõppkokkuvõttes viib üldise üleminekuaja lühenemisele.

Kokkuvõtteks võib öelda, et igapäevane ja täpne minutilise täpsusega montaaži- ja testimisaegade registreerimine annab usaldusväärse andmekogumi tööaja analüüsiks. Hoolimata sellest, et konverterite

kogutöötlemisaeg on mõõdetud päevades, toetab andmete minutiline täpsus protsessi täpset ja üksikasjalikku mõistmist, mis sillutab teed tõhusatele ja andmepõhiste protsessiparandusalgatustele.

4.2.4 Praegune olukord - sagedusmuunduri katsetamise aeg

Nagu eespool öeldud, ei ole testide läbiviimise aeg varem olnud stabiilne. See kõikumine on näha joonisel 5, kus on esitatud 109 üksiku muunduri testimise aeg kogu 2022. aasta jooksul (Lisa 1). Keskmine testimisaeg 2022. aastal oli 20,94 tundi ja mediaan 21 tundi.



Joonis 5. Autori poolt koostatud kontroll diagramm (SAP väljavõetud andmete põhjal)

Iga punkt graafikul tähistab ühte muundurit (Joonis 5). Roheline joon tähistab 21 tunni piiri.

109-st muundurist 32 olid üle 21 tunni piiri, mille eest tarbija on valmis maksma. See tähendab, et 29,4% ümberkujundajatest kulub rohkem aega kui 21 tunni piir. Ettevõtte kaotas kokku 64 töötundi 109 ümbertöötlejalt.

4.3 Analüüs

Lean Six Sigma meetodika mõõtmise etapi lõpus on nüüdseks kindlaks tehtud testimisprotsessi praegune tulemuslikkus. Analüüsi faasi üle minnes on järgmine eesmärk kasutada neid tulemuslikkuse andmeid, et teha kindlaks erinevus praeguse ja ideaalse tulemuslikkuse vahel ning tegurid, mis selle tulemuslikkuse

erinevuse põhjustavad. Analüüsi läbiviimiseks koostati Minitabi tarkvara abil mitu statistilist aruannet, sealhulgas kokkuvõttev aruanne, protsessivõime aruanne ja ajasarjade graafik, milles võrreldakse kahte erinevat operaatorit.

Kokkuvõtlik aruanne: Minitabi kokkuvõttev aruanne annab andmekogumi kirjeldava statistika, näiteks keskväärtuse, mediaani, standardhälbe ja vahemiku. See aruanne võimaldab mõista andmete keskset tendentsi ja dispersiooni testimise käigus [32]. See hõlbustab andmete esialgset uurimist, võimaldades tuvastada võimalikke probleeme või suundumusi, mis võivad mõjutada tulemuslikkuse erinevust.

Protsessi suutlikkuse aruanne: see aruanne annab statistilise mõõtmise protsessi võime kohta toota toodangut kindlaksmääratud piirides. Protsessi võimekuse aruanne võrdleb protsessi väljundit selle spetsifitseeritud piiridega, kasutades võimekuse näitajaid, nagu C_p , C_{pk} , P_p ja P_{pk} . Need indeksid annavad ülevaate sellest, kui hästi on protsess oma spetsifikatsioonide piires keskendatud ja kui suur on protsessi varieeruvus [28]. See võib aidata kindlaks teha, kas praegune testimisprotsess vastab soovitud spetsifikatsioonidele ja kus võib olla vaja teha parandusi.

Aegrea graafik: aegrea graafik on graafiline kujutis andmepunktidest järjestikuste ajavahemike kaupa. Selles kontekstis kasutati seda kahe erineva operaatori jõudluse võrdlemiseks aja jooksul. See võib tuua esile kõik erinevused operaatorite tulemuslikkuses, mis võivad põhjustada tulemuslikkuse erinevust. See võib tuua esile operaatorispetsiifilised probleemid, nagu koolitusvajadus, meetodi erinevused või ajastuserinevused, mida võiks parandada [33].

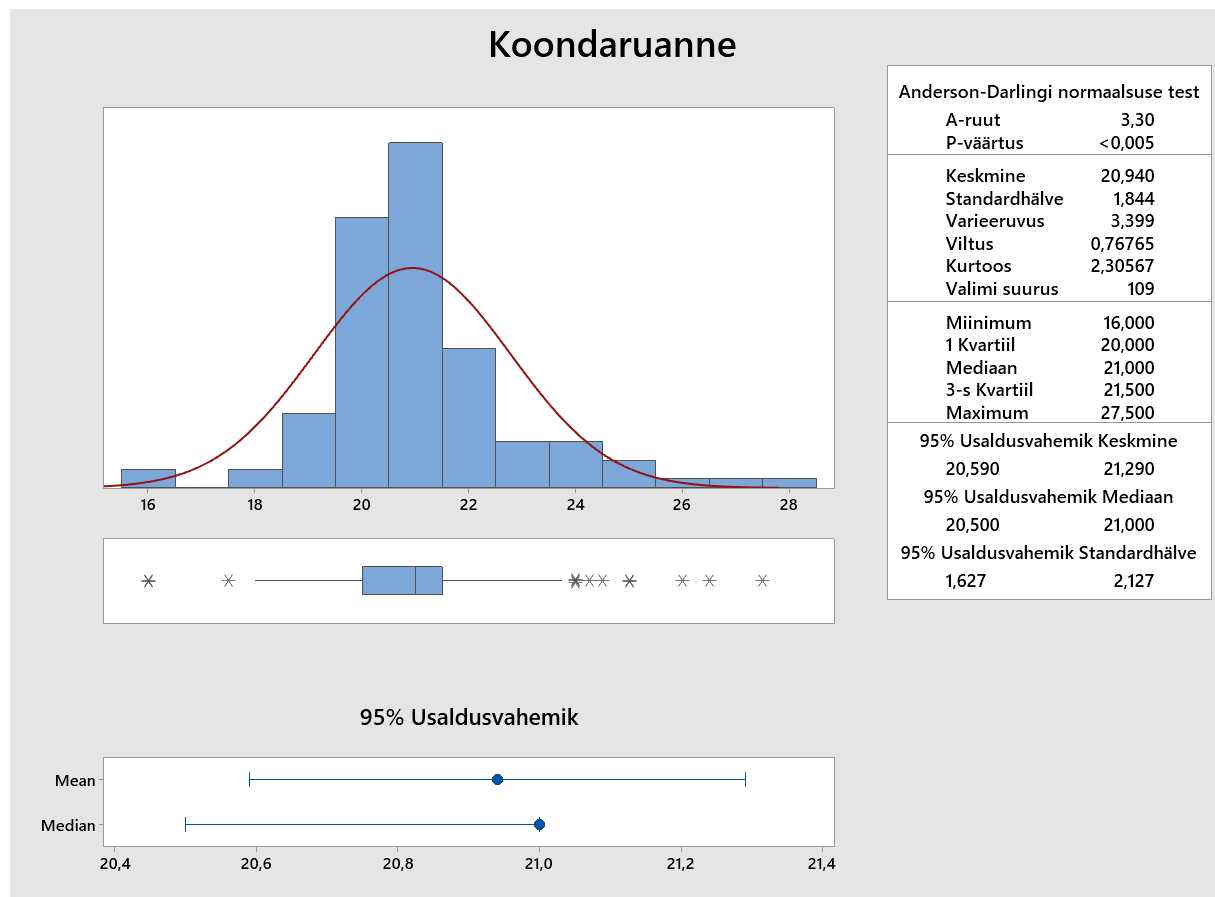
Nende aruannete abil saab analüüsifaasis kvantifitseerida tulemuslikkuse mahajäämust ja tuvastada võimalikud põhjused. Neid tulemusi kasutatakse seejärel *DMAIC*-protsessi parandamisetapis.

4.3.1 Koondaruanne konverteri ajaloolise testimise aja kohta

Autor on hankinud SAPist 109 kabineti kohta, mis toodeti 2022. aastal, ajaloolise testimisaja andmed ja sisestanud need Minitabi, et koostada kokkuvõtlik aruanne testimisprotsessi aja kohta (Joonis 6).

Konverteri katseaja ajaloolised mõõtmised annavad hindamatut teavet protsessi omaduste ja selle loomuliku varieeruvuse kohta. Käesolevas peatükis käsitletakse ajamõõtmiste statistilist analüüsi, kasutades Andersoni-Darlingi normaalsuse testi ja mitmesugust kirjeldavat statistikat, et selgitada

andmete aluseks olevat jaotust, kesk tendentsi ja hajuvust.



Joonis 6. Autori poolt Minitab tarkvaras loodud koondaruanne

Andersoni-Darlingi normaalsuse testi kasutati selleks, et teha kindlaks, kas andmed järgivad normaaljaotust. Test andis A-ruut statistikaks 3,30 ja P-väärtuseks vähem kui 0,005 Tavaliselt peetakse P-väärtust, mis on väiksem kui 0,05, statistiliselt oluliseks ja see võimaldab lükata tagasi normaalsuse nullhüpoteesi. Seega ei järgi katseaja andmed normaaljaotust [34].

Testimisaja mõõtmiste keskmine (keskmine) on 20,940 ja standardhälve 1,844, mis näitab vastavalt keskmist aega ja varieeruvust keskväärtuse ümber. Variatsioon, mis näitab andmete hajuvust, on 3,399 [35].

Kalduvus ja kurtoosimõõdikud annavad meile täiendavat teavet jaotuse kuju kohta. Viltuse väärtus 0,76765 viitab kergele positiivsele viltusele ja pikemale sabale jaotuse paremal poolel. Kurtoosi väärtus

2,30567 viitab suhteliselt lamedale jaotusele, millel on kerged sabad, mis näitab, et kõrvalekaldeid on vähe [35].

Valimi suurus on 109, mis annab analüüsile tugeva aluse. Kirjeldav statistika näitab, et minimaalne väärtus on 16, esimene kvartiil 20, mediaan 21, kolmas kvartiil 21,5 ja maksimaalne väärtus 27,5. Need arvud annavad põhjaliku ülevaate katseaja mõõtmiste jaotusest.

Keskmise, mediaani ja standardhälve jaoks arvutati 95% usaldusvahemikud. Keskväertuse usaldusvahemik on 20,590 kuni 21,290, mediaani puhul 20,500 kuni 21,000 ja standardhälbe puhul 1,627 kuni 2,127. Need intervallid annavad hinnangulise väärtusvahemiku, mis tõenäoliselt sisaldab tegelikku populatsiooniparameetrit usaldusnivoo 95% juures [35].

DMAIC-metoodika kontekstis kuulub see analüüs analüüsifaasi. See etapp on oluline põhjus-tagajärg seoste tuvastamiseks ja probleemi algpõhjuse kindlaksmääramiseks [27]. Kirjeldav statistika ja normaalsuse test võimaldavad mõista protsessi jaotust, tuvastada kõik kõrvalekalded normaalsusest ja tuua esile muutujate testimise aegade varieeruvuse. Need teadmised võivad suunata edasisi analüüse ja parendusstrateegiaid, et vähendada protsessi tulemuslikkuse suurendamist.

4.3.2 Protsessi võimekuse aruanne

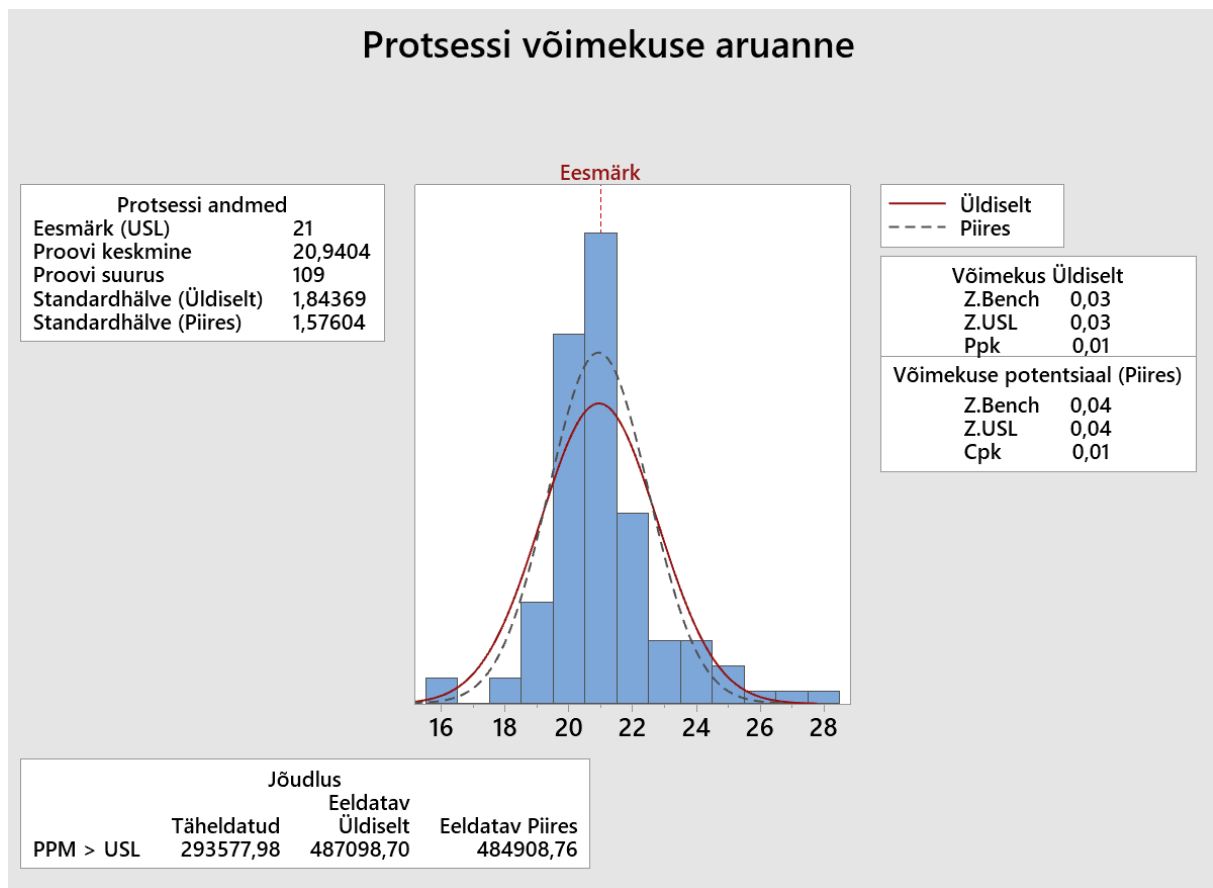
Protsessi võimekuse aruanne on oluline vahend *DMAIC* projekti analüüsi faasis, et parandada aega või mis tahes muud protsessi parendusprojekti. Aruanne annab põhjaliku statistilise analüüsi protsessi praegusest tulemuslikkusest, selgitades välja, kas protsess on võimeline täitma spetsifikatsioone või nõudeid [28].

Aruanne sisaldab selliseid näitajaid nagu protsessi võimekuse indeks (*Cpk*) ja protsessi tulemuslikkuse indeks (*Ppk*), mis kajastavad, kui hästi protsess toimib võrreldes spetsifikatsiooni piiridega [36]. Samuti tuuakse esile protsessi varieeruvuse valdkonnad ja see, mil määral protsesside keskmine tase erineb eesmärgist, mis näitab parendamisvõimalusi.

Neid mõõdikuid analüüsides saavad meeskonnad tuvastada protsesside ebaefektiivsust, mõista erinevuste olemust ja ulatust ning määrata kindlaks probleemide algpõhjused, mis on *DMAIC*-projekti analüüsifaasi kriitilised sammud [11].

Lisaks sellele annab protsessi suutlikkuse aruanne aluspunkti, mille suhtes saab *DMAIC*-projekti hilisemates etappides parendusi mõõta. See on oluline, et kontrollida, kas rakendatud muudatused toovad kaasa statistiliselt olulisi parandusi [27].

Seega ei ole protsessi võimekuse aruanne (Joonis 7) mitte ainult vahend protsessi hetkeseisu analüüsimiseks, vaid see on ka aluseks järgnevatele parandamis- ja kontrollietappidele *DMAIC*-tsükliis.



Joonis 7. Auti poolt Minitab tarkvaras loodud protsessi võimekuse aruanne

Spetsifikatsiooni alumine piirnorm (*LSL*) ja ülemine piirnorm (*USL*): need on protsessi tulemuslikkuse vastuvõetava vahemiku piirid. Kui protsessi väljund jääb nendesse piiridesse, loetakse see rahuldavaks. Mõõtmised väljaspool neid piire kujutavad endast mittevastavaid või defektseid ühikuid [28].

Proovi keskmine: See on mõõtmiste kogumi aritmeetiline keskmine. See on andmete kesk suundumuse mõõõtühik [37].

Valimi N: See näitab valimi suurust või vaatluste või mõõtmiste koguarvu [37].

Standardhälve - see on andmete hajuvuse või varieeruvuse mõõt. Suurem standardhälve näitab andmete suuremat varieeruvust. Mainitakse kahte liiki standardhälvet:

- Üldine standardhälve võtab arvesse kõikide andmepunktide vahelist varieeruvust;
- Standardhälve piires arvestab andmete alarühmade siseselt esinevat varieeruvust [37];
- Z-skoor ($Z.Bench$, $Z.LSL$, $Z.USL$): need on mõõdikud, mis näitavad, mitu standardhälvet vaatlus või andmepunkt on keskmisest. $Z.Bench$ on võrdlus- või sihtväärtuse Z-skoor, $Z.LSL$ on alumise spetsifikatsioonipiiri Z-skoor ja $Z.USL$ on ülemise spetsifikatsioonipiiri Z-skoor. Neid kasutatakse selleks, et hinnata tõenäosust, et andmepunkt jääb spetsifikatsioonipiiridesse [38];
- Protsessi jõudluse indeks (Ppk): see mõõdab, kui hästi vastab protsess oma spetsifikatsioonidele, võttes arvesse nii protsessi keskmist kui ka varieeruvust. Selle arvutamisel kasutatakse üldist standardhälvet ja võetakse arvesse protsessi kogu varieeruvust [28];
- Protsessivõime indeks (Cpk): see mõõdab protsessi potentsiaali toota toodangut spetsifikatsiooni piirides, võttes arvesse protsessi varieeruvust ja protsessi keskvärtuse suhet sihtspetsifikatsiooniga. Arvutamisel kasutatakse standardhälvet, võttes arvesse alarühmade siseselt esinevat varieeruvust [39];
- Osad miljoni kohta (PPM): see on mõõtühik, mis näitab, mitu ühikut ühe miljoni toodetud ühiku kohta jääb spetsifitseeritud piiridest välja. See mõõdab protsessis esinevaid defekte ja seda kasutatakse protsessi kvaliteeditaseme hindamiseks [16].

Protsessi võimekuse analüüsis, mis oli tehtud Minitab tarkvara abil, analüüsiti konverteri testimise ajalisi andmeid. Analüüs näitas 109 mõõtmist, keskmist testimise aega 20,9404 ja ülemist spetsifikatsioonipiirangut (eesmärki) 21, mis näitab märkimisväärset arenguruumi. Nii üldised kui ka potentsiaalsed võimekuse näitajad, sealhulgas Z-punktid ning protsessi tulemuslikkuse ja võimekuse indeksid (Ppk ja Cpk), näitasid, et protsess ei vasta optimaalselt oma spetsifikatsioonidele. Lisaks täheldati suurt tõenäosust ületada universaalset kasutuseesmärki, mis rõhutab vajadust protsessi täiustamise strateegiate järele. See analüüs on oluline DMAIC-metoodika analüüsi faasi jaoks, mis annab põhjaliku ülevaate protsessi tulemuslikkusest ja parandamist vajavatest valdkondadest. Edasi liikudes aitavad saadud teadmised kaasa strateegiatele, mille eesmärk on parandada protsessi tulemuslikkust, vähendada testimisaega ja täita pidevalt spetsifikatsioone, mis toob kaasa kulude kokkuhoiu ja parema

tootekvaliteedi.

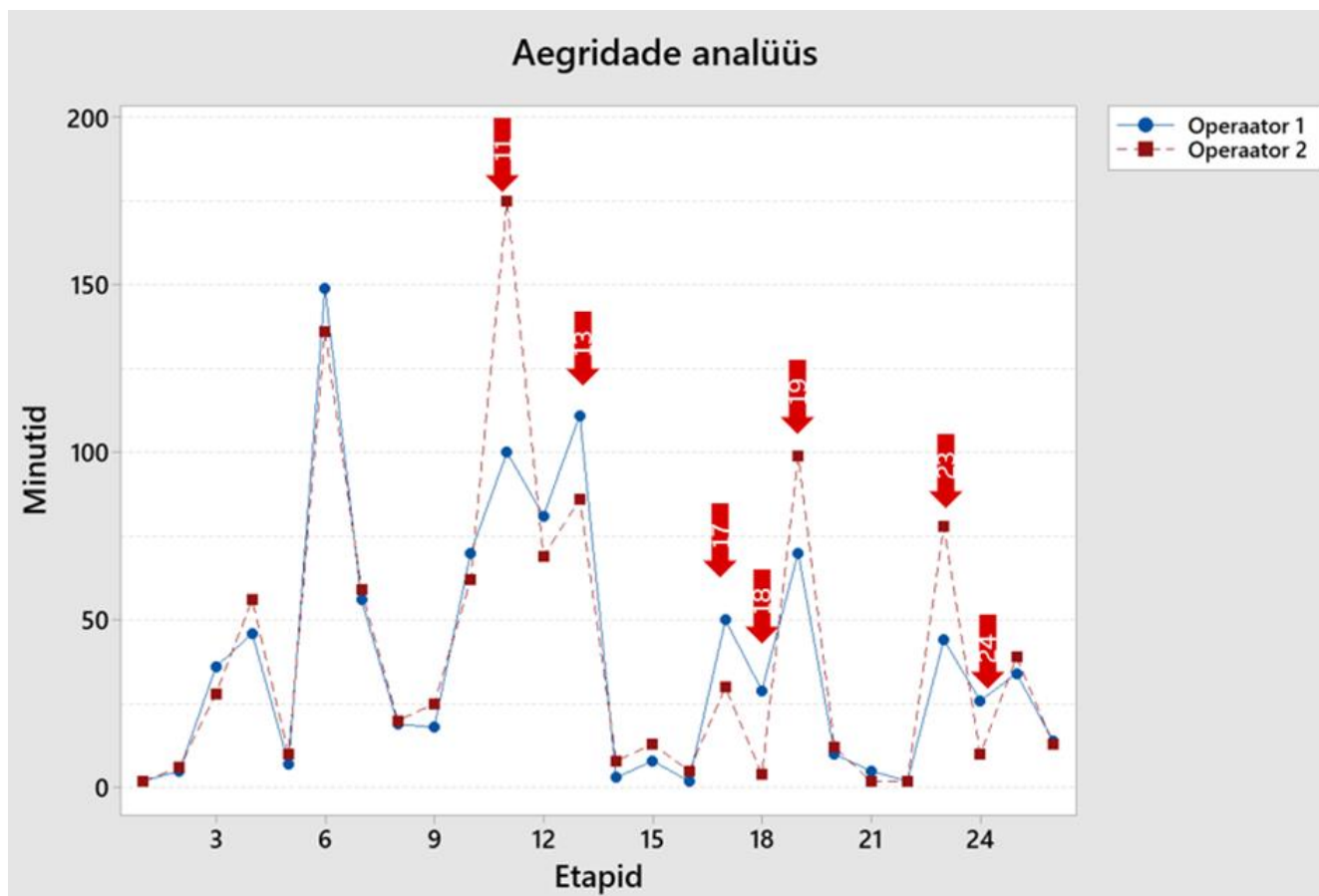
4.3.3 Aegrea graafik, mis võrdleb kahe erineva operaatori test sammu aega

Aegrea graafik, mis visualiseerib muutuja või muutujate kogumi muutumist aja jooksul, on *DMAIC*-projekti analüüsifaasis keskne tööriist. See võimaldab tuvastada suundumusi, mustreid ja võimalikke muutlikkuse allikaid protsessis [36].

Võrreldes kahe erineva operaatori poolt erinevatele testimisetappidele kulunud aega, võib see graafik anda olulist teavet. See võib näidata, kas operaatoril kulub teatud etappide jaoks pidevalt rohkem aega või kas teatud etappide jaoks kulub üldiselt rohkem aega.

Nende mustrite ja varieeruvuse allikate tuvastamise abil saab meeskond paremini mõista protsessi ja määrata kindlaks võimalikud parandamisvaldkonnad. Näiteks võib pidevalt aeglasem operaator vajada rohkem koolitust või ressursse. Kui teatavad etapid nõuavad regulaarselt rohkem aega, võib nende suhtes teha jõupingutusi protsessi parandamiseks [11].

Autor on filtreerinud kahe erineva operaatori ajaandmetest, mis ta kogus eelnevalt projekti kaardistamise ja mõõtmise faasis (Lisa 2) välja ebastandardised tegevused (nagu vigade parendamine). Seejärel koostas Minitabis aegrea graafiku (Joonis 8), et visualiseerida etapid (Tabel 1), millel on olulised ajalised erinevused (tähistatud punaste nooltega).



Joonis 8. Autori poolt Minitab tarkvaras koostatud aegrea graafik

Tabel 1. Katsetamisetapid ja nende ajaline erinevus

Etapi number	Kirjeldus	Aeg, minutites
11	Elektriskeem	75
13	Piiritlemise test	25
17	Tarkvara üleslaadimine	20
18	Parameetrite sisestamine	25
19	Digitaalse väljundi test	29
23	Võimsuse test	34
24	Lõplik tarkvara üleslaadimine	16
Kokku		224

Sellega on autor tuvastanud suurima ajavahega testimisetapid. Seda teavet kasutatakse edaspidi täiendava toetava informatsioonina projekti täiustamise etapis.

4.4 Parandamine

DMAIC-tsükli parandamise etapp on kriitiline etapp, kus eelmistest etappidest kogutud teadmisi kasutatakse tuvastatud probleemi vähendamiseks või kõrvaldamiseks vajalike lahenduste leidmiseks, valideerimiseks ja rakendamiseks. Käesoleva projekti kontekstis on eesmärk vähendada konverteri testimise aega.

Selles etapis kasutab meeskond otsustusprotsessi juhtimiseks kahte peamist *Lean Six Sigma* vahendit: puude diagrammi ning veamooduse ja mõjude analüüsi (*FMEA*). Puu diagramm aitab meeskonnal visualiseerida ja uurida võimalikke lahendusi, jaotades need konkreetsemateks meetmeteks. See aitab

mõista soovitud paranduse saavutamiseks vajalike sammude hierarhiat [40].

FMEA on seevastu ennetav vahend, mida kasutatakse võimalike rikete ja nende mõju ennetamiseks protsessile. Selles hinnatakse erinevate lahendustega seotud riske, seades need tähtsuse järjekorda nende tõsiduse, esinemise ja avastamise hinnangu alusel [41].

Puu diagrammi struktureeritud jaotuse ja *FMEA* riskihindamise kombineerimine võimaldab meeskonnal tuvastada kõige tõhusamad ja teostatavamad parendusmeetmed. Nende meetmete eesmärk on saavutada konverteri testimise aja märkimisväärne vähendamine, suurendades seeläbi protsessi tõhusust ja ettevõtte üldist tegevustulemust.

4.4.1 Puu diagramm

Puu diagramm, mis on *DMAIC* täiustamise faasi peamine vahend, hõlbustab võimalike lahenduste süstemaatilist lahtimõtestamist alamülesanneteks, et teha põhjalikku analüüsi [40].

See vahend on eriti kasulik *DMAIC*-projektis, mis keskendub muunduri testimise aja vähendamisele, võimaldades meeskonnal - mis koosneb lõputöö autorist, protsessiinsenerist, tootmisinsenerist, testimisjuhist ja katseala operaatorist - analüüsida võimalikke lahendusi granuleeritud tasemetele

Puu diagrammi valimisel töövahendiks lähtuti *DMAIC*-metoodika standarditest ja *Lean Six Sigma* põhimõtetest. See on vahend, mis toetab tõhusalt ajurünnakuid, probleemide lahendamist ja otsustusprotsesse struktureeritult, visuaalselt ja süstemaatiliselt [40]. See võimaldab mitmekesisel projektimeeskonnal oma kollektiivsete teadmiste ja kogemustega hinnata võimalike lahenduste tõhusust ja teostatavust.

Tõhusust, millega hinnatakse lahenduse potentsiaali vähendada testimise aega, ja teostatavust, millega hinnatakse lahenduse rakendamise praktilisust, võttes arvesse selliseid aspekte nagu ressursside kättesaadavus, tehnilised nõuded, kulude mõju ja organisatsioonilised piirangud, mõõdetakse skaalal 1-10 [16].

Kombineerides tõhususe ja teostatavuse individuaalseid hindeid, saadakse koondtulemus, mis annab igale pakutud lahendusele tervikliku väärtuse. See punktisüsteem pakub standardset raamistikku

ettepanekute objektiivseks hindamiseks ja prioriseerimiseks, tagades, et valitakse kõige tõhusamad ja teostatavamad meetmed, et vähendada muunduri testimise aega.

Puu diagramm on esitatud (Lisa 3).

4.4.2 FMEA

DMAIC-projekti parandamise etapis, mis keskendus muunduri testimise aja vähendamisele, kasutas autor veamooduste ja mõjude analüüsi (Tabel 2) et hinnata võimalikke riske, mis on seotud puu diagrammi abil loodud ideedega. Selline vahendite kombinatsioon andis tervikliku meetodi nii ideede genereerimiseks kui ka riskide hindamiseks.

Stamatise kirjeldatud *FMEA*-vahendi abil [41] kasutati selleks, et tuvastada iga idee raames võimalikud veamoodused, hinnata nendega seotud riske ja määrata kindlaks meetmed nende riskide vähendamiseks. Iga potentsiaalset rikkeolukorda hinnati kolme kriteeriumi alusel: mõju tõsidus, esinemissagedus ja avastamise kontrollide tõhusus. Selle analüüsi tulemusena arvutati iga veamooduse jaoks riskiprioriteedinumber (RPN), mille alusel määrati riskide prioriteetsus, millega tuleb tegeleda. [42].

Rikkevõimaluste ja mõjude analüüsi (*FMEA*) abil hinnatakse võimalikke rikkevõimalusi kolme põhinäitaja alusel, millest igaühele antakse hinnang skaalal 1-10:

- Raskusaste (*S*): see mõõdik hindab mõju võimalikku mõju või selle tõsidust, kui rike peaks toimuma. Hinnang 1 tähendab, et mõju on väike või puudub, samas kui hinnang 10 tähendab katastroofilist mõju, mis võib põhjustada süsteemi rikkeid või tõsiseid tagajärgi [41].
- Esinemine (*O*): see mõõdik kvantifitseerib vea esinemise tõenäosust või sagedust. Hinnang 1 näitab, et rike on äärmiselt ebatõenäoline, samas kui hinnang 10 näitab, et rike on peaaegu kindel [41].
- Tuvastus (*D*): see mõõdik hindab praeguste kontrollide tõhusust rikke tuvastamisel. Madal hinnang 1 viitab sellele, et praegused kontrollid on väga tõhusad ja suudavad rikke kergesti avastada, samas kui kõrge hinnang 10 viitab kehvale avastamise kontrollile või sellele, et rikkeolukorda on raske avastada [41].

Nende kolme hinnangu korrutis ($S \times O \times D$) annab riskiprioriteedinumbri (*RPN*), mida kasutatakse käsitlemist vajavate rikkevõimaluste prioriseerimiseks. *RPN* 1000 ($10 \times 10 \times 10$) tähistab suurimat võimalikku riski, samas kui *RPN* 1 ($1 \times 1 \times 1$) tähistab väikseimat võimalikku riski [42].

Selles protsessis mängis olulist rolli ajurünnakute meeskond, kuhu kuulusid lõputöö autor, protsessiinsener, tootmisinsener ja katse röövija. Nende mitmekülgsed teadmised ja arusaamine katsetamisoperatsioonist aitasid oluliselt kaasa võimalike veamooduste tuvastamisele ja nende mõju hindamisele.

Puu diagramm ja *FMEA* sellisel viisil integreerides suutis meeskond luua hulga võimalikke lahendusi ning seejärel süstemaatiliselt ja kvantitatiivselt hinnata igaühega seotud riske. Selline range lähenemisviis tagas, et rakendamiseks valitud lahendused ei olnud mitte ainult teostatavad ja tõhusad, vaid ka võimalikult väikese riskiga.

Põhjus	Tegevus	Võimalik implementeerimise protsess	Vea moodus	Mõju	SEV	Põhjused	OCC	Kontroll meetmed	DET	RPN
Projekti teadmised	Koolitused	Korraldage vajalikud koolitused FC töötajatele	Puudub	Puudub	1	Puudub	1	Puudub	1	1
Vase katkestamise testimine	Paranda BC testit	On vaja automatiseerida BC testit	Vajalikud on täiendavad investeeringud	Investeeringuid ei kiideta heaks	1	Puudub	1	Funktsionaalne testimine	6	6
Andmed sisestatakse käsitsi SAP-i	Ühenda Kikusui andmebaasiga	Parandada isolatsiooni- ja ühendustestereid	Puudub	Puudub	1	Puudub	1	Funktsionaalne testimine	6	6
Protsessi sammude järjestus	Optimeeri protsessi	Muuta testimise kontrollnimekirja	Puudub	Puudub	1	Puudub	1	Kontrollnimekirja	7	7
Tarkvara üleslaadimine	Lisa bootloader tarkvarauuendusele	Tarkvarameeskond peab uuendusfaali lisama täieliku tarkvarapaketi	Puudub	Puudub	1	Puudub	1	Funktsionaalne testimine	6	6
Ülelligsed visuaalsed kontrollid	Loo uus visuaalse kontrolli protsess	Loo raamistik visuaalse kontrolli nimekirja jaoks	Puudub	Puudub	1	Puudub	1	Puudub	10	10
Ümbertöötamine	Loo uus kvaliteedisüsteem	Muuta SAP ja monteeringute boonussüsteemi	Vajab juhtkonna heakskiitu	?	1	Puudub	1	Puudub	10	10
Ootamine vea parandamise ajal	Optimeeri protsessi	Muuta testimise kontrollnimekirja	Puudub	Puudub	1	Puudub	1	Puudub	10	10
Motivatsioon	Uus boonussüsteem	Sama süsteem nagu monteeringutele	Kiirendamine võib põhjustada tootes leidmata vigu	Kliendi mittevastavused	8	Töötaja üritab kappi kiiremini testida, kiirendades standardprotsessi	3	Puudub	10	240
Breaking chopper testimine	Elimineeri BC testimine	Eemaldage test lõplikult kontrollprotsessist	DC juhtmed võivad olla tootes valesti ühendatud	1. BC ei tööta Takisti võib üle kuumeneda ja põhjustada plahvatuse	8	Juhtmed ühendati kapis valesti	4	Visuaalne kontroll	8	256
Niiskus	Paigalda õhukuivatid	Tellida niiskuse eemaldajaid	Vajalikud on suured investeeringud	Ei kiideta heaks	7		3		10	210
Tarkvara üleslaadimine	Kasuta MU programmeerijaid	Rakenda tööriist, mis võimaldab tarkvara laadida korraga 10 kappi	MU programmeerija abil laetakse tarkvara üles ainult ZMU kaardile	BCU kaarti ei uuendata	8	Tuule tarkvara värskendus BCU ja ZMU plaadil samal ajal.	9	Funktsionaalne testimine	6	432
Elektriskeem	Tee vähem vajalikke teste	Tehke juhendid komponentidele, mida ei saa funktsionaalse testi käigus testida	Kontrollimata komponendid võivad põlema minna	Komponente tuleb kapi testi ajal vahetada	8	Komponendid põlesid funktsionaalse testi ajal	7	Funktsionaalne testimine	6	336
Elektriskeem	Elimineeri test	Eemaldage testimisprotsessist	Kontrollimata komponendid võivad põlema minna	Kliendi mittevastavused	8	Juhtmeid ei testitud funktsionaalse testiga	9	Funktsionaalne testimine	6	432

Tabel 2. FMEA tabeli põhi internetist, autori poolt täidetud [44]

4.4.3 Puu diagrammi ja FMEA kombinatsioon

Tabel 3 on esitatud *Lean Six Sigma* projekti võimalike lahenduste süstemaatiline analüüs, mille eesmärk on vähendada konverteri testimise aega. Meeskond on hinnanud iga ettepanekut, kasutades veamooduse ja mõju analüüsi (FMEA) ning puude diagrammi kombinatsiooni, mis annab tervikliku ülevaate iga lahenduse tõhususest, teostatavusest ja sellega seotud riskist .

Põhjus	Tegevus	RPN	Puu diagrammi summaarne punktide arv	Resultaad(RPN/Puu diagrammi punktid)
Projekti teadmised	Koolitused	1	11	0,090909091
Vase katkestamise testimine	Paranda BC testerit	6	18	0,333333333
Andmed sisestatakse käsitsi SAP-i	Ühenda Kikusui andmebaasiga	6	17	0,352941176
Protsessi sammude järjestus	Optimeeri protsessi	7	17	0,411764706
Tarkvara üleslaadimine	Lisa bootloader tarkvarauuendusele	6	13	0,461538462
Üleliigsed visuaalsed kontrollid	Loo uus visuaalse kontrolli protsess	10	19	0,526315789
Ümbertöötamine	Loo uus kvaliteedisüsteem	10	18	0,555555556
Ootamine vea parandamise ajal	Optimeeri protsessi	10	17	0,588235294
Motivatsioon	Uus boonussüsteem	240	16	15
Breaking chopper testimine	Elimineeri BC testimine	256	14	18,28571429
Niiskus	Paigalda õhukuivatid	210	5	42
Tarkvara üleslaadimine	Kasuta MU programmeerijaid	432	9	48
Elektriskeem	Tee vähem vajalikke teste	336	4	84
Elektriskeem	Elimineeri test	432	4	108

Tabel 3. Puu diagrammi tulemuste ja RPN kombineeritud tulemus, autori poolt täidetud [44]

Tabeli iga rida kujutab endast konkreetse põhjuse võimalikku lahendust, millele on lisatud *FMEA*-st saadud riskiprioriteedinumber (*RPN*) ja summaarne skoor Puu diagrammi järgi. Tulemus, mis on arvutatud *RPN* jagamisel Puuskeemi summaga, annab võrdlusväärtuse, mis aitab kindlaks teha kõige kasulikumat ja kõige vähem riskantsemad lahendused.

Näiteks koolitus projekti teadmiste parandamiseks annab madala *RPN*-i 1 ja Puu diagrammi summa 11, mis annab väärtuseks ligikaudu 0,09. See madal väärtus näitab, et koolitus on suure mõjuga ja teostatav lahendus, millega kaasneb minimaalne risk. Samamoodi annab BC testija täiustamine, et lahendada probleeme, mis on seotud vase testimisega, väärtuseks ligikaudu 0,33, mis tähendab, et selle mõju ja teostatavus on samuti tasakaalus ja risk on mõõdukas.

Spektri teises otsas on mõned lahendused, mis annavad kõrge tulemuse, mis näitab, et need kujutavad endast märkimisväärseid riske või on vähem teostatavad või mõjutatavad. Näiteks MU programmeerija kasutamine tarkvara üleslaadimisega seotud probleemide lahendamiseks annab kõrge tulemuse 48, mis näitab, et selle lahendusega kaasnevad märkimisväärsed riskid või probleemid.

Üldiselt annab tabel selge ja objektiivse raamistiku otsuste tegemiseks, tagades, et rakendamiseks valitud lahendused on kooskõlas projekti eesmärgiga vähendada konverteri testimise aega, minimeerides samal ajal riski ning maksimeerides teostatavust ja mõju.

4.4.4 Soovitavad lahendused

Selles peatükis tutvustatakse soovitatud lahendusi, pakkudes põhjalikku ülevaadet sellest, kuidas iga lahendus otseselt tegeleb tuvastatud algpõhjustega. Need soovitused põhinevad käesoleva töö eelnevates osades esitatud põhjalikel arusaamadel ja järeldustel.

Tarkvara uuendamine: kavandatud lahendus hõlmab uue iseseisva tarkvaraversiooni kasutuselevõttu, mis välistab vajaduse paigaldada eelmiste versioonide peale mitmekihiline paigaldus. Praeguse tarkvara puhul tuleb enne uue versiooni lisamist installeerida kõigepealt vanem versioon. See kaheastmeline protsess pikendab iga kabineti testimise aega. Uus tarkvara võib otseselt vähendada seda aega kuni 25 minutit kapi kohta.

Breaking Chopper (BC) testri parandamine: tehakse ettepanek suurendada oluliselt efektiivsust,

parandades BC testrit. Praegune tester nõuab jahtumisperioodi pärast 30 minutilist kasutamist ja suudab testida ainult ühte inverter-moodulit korraga. Kuna neli moodulit vajavad testimist, millest igaühe puhul kulub 10 minutit, on testimise koguaeg märkimisväärne. Kavandatud täiustus on lisada testirile rohkem takistusi, mis võimaldaks testida kõiki mooduleid samaaegselt. See lahendus võib vähendada testimise aega kuni 40 minutit ühe kabineti kohta, vähendades operaatorite elektrilist ohtu.

Testimisprotsessi optimeerimine: protseduuri täiustamise ettepaneku eesmärk on muuta vigade sisestamise protsess paralleelseks veaparandusetapiga. See võimaldaks testimisoperaatoritel jätkata ülesannete täitmist, mitte oodata, kuni kõik vead on kõrvaldatud montööri poolt. Töökorralduse ümberkorraldamisega saaks ühe sagedusmuunduri kohta kokku hoida umbes 15 minutit.

Lahtiste osade jälgitavuse parandamine: praegune lahtiste osade haldamise protsess hõlmab kaubaaluste tarnimist välislaost, mis on tähistatud ainult tootmistellimusega. Selline täpse identifitseerimise puudumine võib põhjustada aeganõudvaid otsinguid iga kapi jaoks õigete osade leidmiseks. Kavandatud lahendus on lisada igale detailile müügitellimuse number ja positsioon, mis hõlbustab nende identifitseerimist ja sobitamist sobiva konverteriga. Selle paranduse rakendamine võiks säästa umbes 15 minutit ühe kapi kohta.

Sagedusmuunduri raami alakoostu visuaalse kontrolli ümberpaigutamine : praegune protsess hõlmab raami visuaalse kontrolli etappi lõppkatsete alal. Ettepanekus tehakse siiski ettepanek viia see etapp ümber kokkupanekualasse, täpsemalt sinna, kus raami alakoostu viimistletakse. Selles etapis ei ole muundurile paigaldatud ühtegi täiendavat osa, mis võimaldab lihtsamat juurdepääsu kõikidele kriitilistele elektrilistele ühendustele ja kiiremat visuaalset kontrolli. Selline kavandatud ümberpaigutamine võib säästa kuni 50 minutit muunduri kohta ja hõlbustada probleemide varajast avastamist, vähendades veelgi hilisemat järeltöötluse võimalust.

4.5 Kontroll

DMAIC-protsessi kontrollifaasis keskendutakse paranduste säilitamisele ja nende tõhusale integreerimisele süsteemi. Pärast soovitatud lahenduste ja nende vastavate mõjude, nii positiivsete kui ka negatiivsete, kindlaksmääramist on väga oluline koostada nende rakendamiseks terviklik kava.

Võtmepersonalile on usaldatud vastutus nende paranduste elluviimise eest. Nende roll ei ole mitte ainult muudatuste elluviimine, vaid ka nende põhjenduste mõistmine, et tagada nende tõhus rakendamine ja muutumine igapäevase tegevuse osaks. Selline arusaamine soodustab vastutustunnet ja pühendumist, suurendades seeläbi eduka rakendamise võimalusi [16].

4.5.1 Rakendamise heakskiitmine

Püüdes saada heakskiitu kavandatavatele parandustele, on oluline samm veenda vastutavaid isikuid uute tavade paremuses võrreldes praeguste tavadega. Selleks pidi autor esitama selge, põhjaliku ja veenva võrdluse varasemate tulemuste ja rakendamise järgse hinnangulise tulemuslikkuse vahel.

Ajaloolise tulemuslikkuse esitamine hõlmab üksikasjalikku kirjeldust toimingute hetkeseisust, sealhulgas protsesside ajakulu, veamäärad ja muud asjakohased näitajad. See annab võrdlusalus ja konkreetse ülevaate olemasolevatest probleemidest [11].

Vastutus tarkvarauuenduse rakendamise eest lasub tarkvaratehnika meeskonnal ja nende juhil. Lisaks sellele mängivad selles protsessis olulist rolli ka tootmisliini juht ja kvaliteedijuht, kes jälgivad paljusid mõjutatud valdkondi tehases. Sellel rühmal on ühiselt nii volitused muudatuse rakendamiseks kui ka teadmised selle praktilise teostatavuse tagamiseks. Nende muudatuste arutamiseks korraldati koosolek. Selle arutelu aluseks olid eelmiste peatükkide järeldused, mis pakkusid selget ülevaadet kavandatava tarkvara uuendamise võimalikust mõjust. Selle muudatuse strateegilise väärtuse osas jõuti kokkuleppele. Tarkvara ajakohastamise rakendamine anti roheline tuli ja käivitati.

Breaking Chopper testeri parendusplaani rakendamine on peamiselt testisüsteemi spetsialisti ülesanne koos kvaliteedijuhi, protsessiinseneri ja tootmisliini juhiga. Need isikud kannavad kavandatud muudatuste rakendamiseks vajalikke volitusi ja neil on praktiline kogemus selle teostatavuse kinnitamiseks. Varasematest peatükkidest saadud arusaamade arutamiseks korraldati koosolek, mis

hõlbustas põhjalikku arutelu selle muudatuse mõjude üle. Rühm mõistis ühiselt, kui oluline on täiustada *Breaking chopper* testeri ja millist kasu see tõenäoliselt testimisprotsessile tooks. Ühise arusaama ja kokkuleppe alusel selle võimaliku mõju osas kiitis rühm heaks *Breaking Chopper* testeri täiustamise kava rakendamise.

Katseprotsessi etappide täiustamise, sealhulgas konverteri raami alakoostu visuaalse kontrolli ja vigadest teatamise ülesanne langeb peamiselt protsessiinseneri ja kvaliteedijuhi õlule. Selle protsessi lahutamatuks osaks on ka katsetamise töödejuhataja ja tootmisliini juht, kes omavad olulist mõju ja praktilisi teadmisi käimasolevatest protsessidest. Varasemates peatükkides esitatud arusaamade ja soovitude arutamiseks oli kavandatud spetsiaalne koosolek. Meeskond, mõistes, millist olulist kasu need täiustused võiksid pakkuda, jõudis konsensusele. Ühehäälselt heakskiiduga alustati testimisprotsessi etappide paranduste rakendamist.

Lõplik algatus lahtiste osade jälgitavuse parandamiseks lasub peamiselt tehase logistikajuhil, arvestades tema mõju laotööde üle. Olemasolev süsteem hõlmab lahtiste osade tarnimist kaubaalustel alltöövõtja laost, millel on ainult tootmistellimus. Autor korraldas kohtumise tehase logistikajuhiga, kes mõistis kavandatava muudatuse eeliseid ja selle rakendamise lihtsust. Pärast arutelu võttis logistikajuht ühendust alltöövõtja laojuhiga, et saada nende nõusolek kavandatava täiustamise kohta. Selle tulemusena kiideti lahtiste osade jälgitavuse paranduse rakendamine heaks ja võeti kasutusele.

4.5.2 Vana ja uue sagedusmuunduri testimise aegade võrdlemine

Järgnevatel peatükkidel võrdleb autor vana katseaja tulemusi nende tulemustega, mis on saavutatud pärast kõigi soovitatud ettepanekute rakendamist. Käesolev peatükk on pühendatud selle võrdleva analüüsi esitamisele, pakkudes mõõdetavat mõõdetavat mõõdet saavutatud paranemise ulatuse kohta.

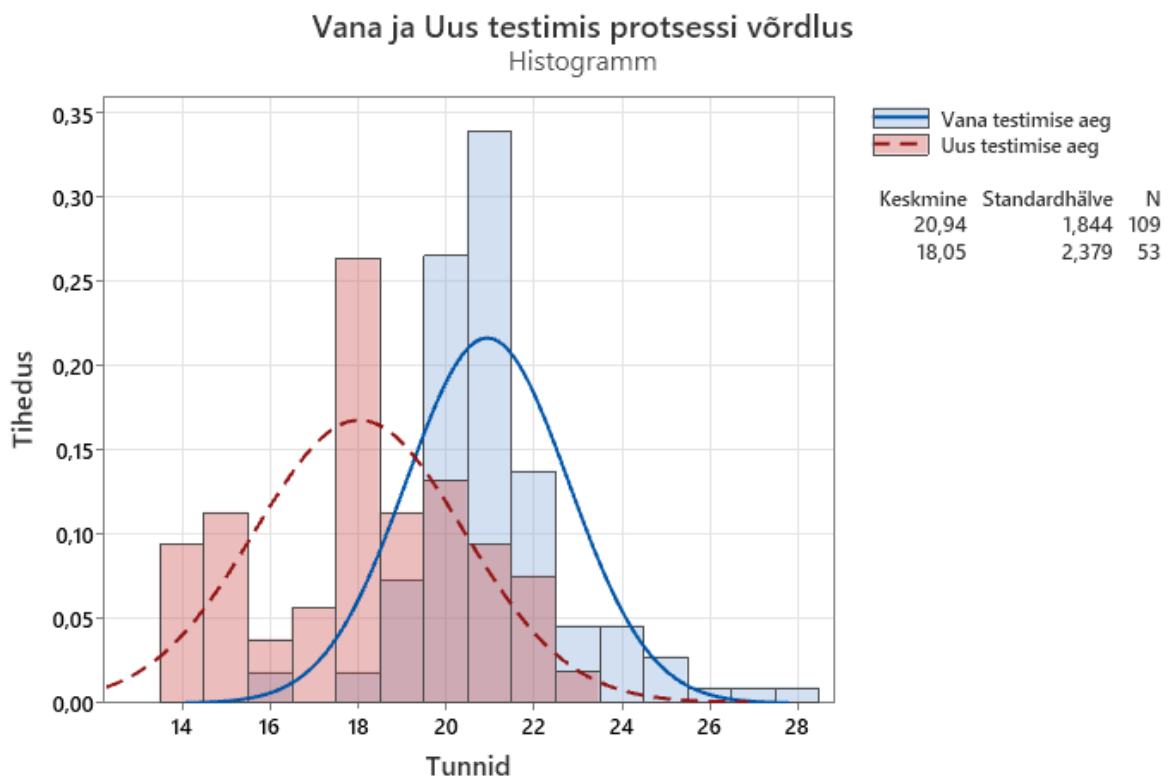
Autor kasutab selle võrdluse tegemiseks mitmeid statistilisi vahendeid, sealhulgas histogramme ja hüpoteeside testimist. Need vahendid ei võimalda mitte ainult hinnata rakendatud muudatuste mõju, vaid ka jälgida testimise käimasolevat tulemuslikkust.

4.5.3 Histogramm

Histogramme kasutatakse sageli statistilises protsessikontrollis (*SPC*), et visualiseerida ja võrrelda kahe erineva protsessi või sama protsessi andmete jaotust kahel erineval ajal [28].

Vana ja uue katseaja võrdlemisel saab histogrammide abil visuaalselt demonstreerida protsessis rakendatud parandustest tulenevat andmete jaotuse muutust. Vanade ja uute testimisaegade joonistamisel samale histogrammile on lihtne näha, kas testimisaeg on oluliselt vähenenud ja kas testimisaja varieerumine on minimeeritud [21].

Kontrollimeetme kirjutamise ajaks olid pärast protsessi täiustamise rakendamist kättesaadavad 53 muunduri katseaja andmed (Lisa 4). Neid andmeid kasutas autor, et koostada histogrammi graafik (Joonis 9), milles võrreldakse vana ja uue testimisprotsessi aegasid Minitabi tarkvaras.



Joonis 9. Autori poolt Minitab tarkvaras loodud histogramm mis võrdleb vana ja uue protsessi

Minitabi histogramm võimaldab visuaalselt võrrelda vanu ja uusi testimisaegu ning sellega seotud statistika annab täiendavaid ülevaateid.

"Vana" katseaja keskmine (keskmine) on 20,94 tundi ja standardhälve (StDev) on 1,844 tundi. Standardhälve näitab andmete hajuvust või varieeruvust; käesoleval juhul seda, kui suur on testimisaegade erinevus keskmisest. Vana katseaja valimi suurus (N) on 109.

Seevastu "uue" testimise aja keskmine on 18,05 tundi ja standardhälve 2,379 tundi. Uue katseaja valimi suurus on 53.

Kahe katseaja võrdlemisel võib teha mitmeid tähelepanekuid. Esiteks, keskmine testimise aeg on uue protsessi puhul vähenenud 20,94 tunnilt 18,05 tunnile. See viitab sellele, et testimisprotsessi tehtud muudatused on vähendanud keskmist testimise aega, mis viitab võimalikule tõhususe paranemisele.

Samas on oluline märkida, et standardhälve on uues testimisaegades suurenenud 1,844 tunnilt 2,379 tunnile. See näitab, et uute testimisaegade varieeruvus on suurem kui vanade testimisaegade puhul. See võib viidata ebajärjekindlusele testimisprotsessis, mis võib olla edasise uurimise ja võimaliku parandamise valdkond.

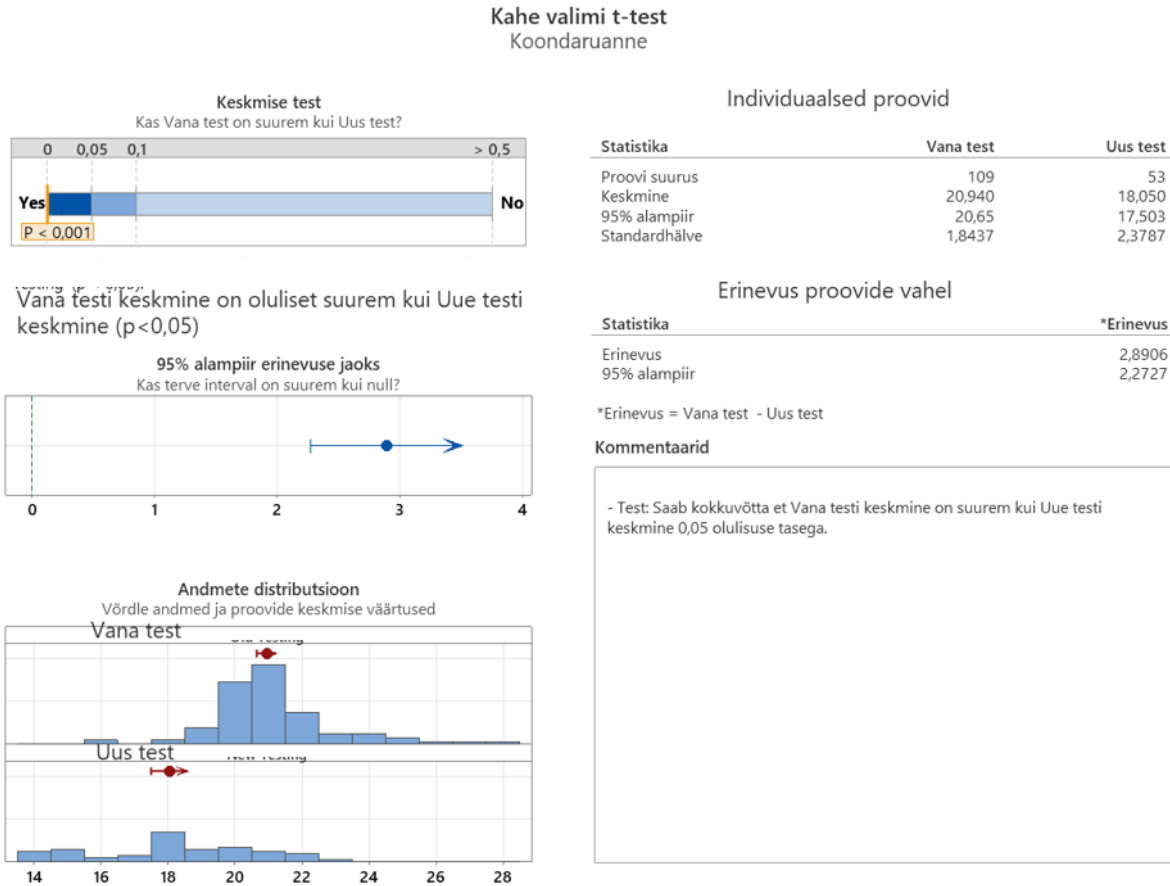
Lõpuks on valimi suurus vana ja uue katseaja puhul erinev, kusjuures vana katseaja puhul on rohkem andmepunkte. See võib mõjutada kahe katseaja komplekti vahelise võrdluse usaldusväärsust. Suuremad valimimahud annavad tavaliselt usaldusväärsemaid ja üldisemalt tõlgendatavaid tulemusi.

4.5.4 Hüpoteesi test

Kahe valimi t-test võib (Joonis 10) olla võimas vahend *DMAIC*i kontrollifaasis, kui võrrelda kahe sõltumatu rühma keskmist, et teha kindlaks, kas on olemas statistiliselt oluline erinevus. Minitabis saab seda vahendit kasutada vana protsessi ja uue protsessi keskmise testimise aja võrdlemiseks [32].

Selle testi nullhüpotees (H_0) oleks: "Vana katseaja keskmine on võrdne uue katseaja keskmisega". Alternatiivhüpotees (H_a), mida autor püüab tõestada, oleks: "Vana testimise aja keskmine on suurem kui uue testimise aja keskmine". Kui testist saadud p -väärtus on väiksem kui valitud olulisuse tase (tavaliselt 0,05), lükkame nullhüpoteesi tagasi ja võtame vastu alternatiivse hüpoteesi.

DMAICi kontekstis tähendab see, et kui p -väärtus on väiksem kui 0,05, võime kindlalt väita, et vana testimise aja keskmine on suurem kui uue testimise aja keskmine, mis tähendab, et parandused on viinud testimise aja statistiliselt olulisele vähenemisele [36].



Joonis 10. Autori poolt Minitab tarkvaras loodud kahe valimi t-test

Vanas testimisprotsessis 109 ja uues testimisprotsessis 53 valimi puhul leidis autor, et keskmine testimise aeg on 20,940 ja 18,050.

Vana testimisprotsessi 95% alampiir oli 20,65, uue testimisprotsessi puhul aga 17,503. See näitab, et me võime olla 95% ulatuses kindlad, et iga protsessi tegelik keskmine on nendest väärtustest kõrgem.

Kui võrrelda kahe protsessi vahelist erinevust, oli keskmine erinevus 2,8906, 95% alampiiriga 2,2727. See näitab, et uus testimisprotsess on keskmiselt 2,8906 tundi kiirem kui vana protsess ja me võime olla

95% ulatuses kindlad, et tegelik keskmine erinevus on suurem kui 2,2727.

Test võimaldab 0,05 olulisuse tasemel järeldada, et vana katseaja keskmine on suurem kui uus katseaeg. See näitab rakendatud paranduste tõhusust keskmise testimise aja vähendamisel.

5 JÄRELDUSED

Lõputöö peamine eesmärk oli parandada sihttegevõtte sagedusmuunduri testimise läbivusaega, kasutades *Lean Six Sigma* parendusprotsessi *DMAIC*. Selle lähenemisviisi eesmärk oli näidata selle metoodika ja sellega seotud vahendite tõhusust. Lisaks sellele pidi süsteemi hindamine ja lahenduse väljatöötamine põhinema protsessiandmete analüüsil, rõhutades, kui oluline on otsuste tegemisel tugineda tegelikele andmetele, mitte intuitsioonile ja oletustele.

Projekt saavutas oma eesmärgid. Uuringu lõpuks vähenes keskmine testide läbiviimise aeg 20,94 tunnilt ligikaudu 18,05 tunnini, mis tähendab, et kokku paranes ajakulu üle 2,89 tunni ja 14%.

Kuigi projekt oli üldiselt edukas, oleks võinud mõningaid aspekte tõhusamalt ellu viia. Esiteks võttis mõnede paranduste rakendamine oodatust kauem aega, mistõttu kasu realiseerumine võttis oodatust kauem aega.

Üks *Lean Six Sigma* väljakutseid on sobivate vahendite valimine iga projekti iga etapi jaoks. On olemas arvukalt vahendeid, kuid paljud neist sobivad ainult teatavat tüüpi projektide ja probleemide puhul. See tähendab, et *Lean Six Sigma* spetsialistid vajavad intuitsiooni ja kogemust, et valida ülesannete jaoks sobivad vahendid. Kui tööriistade valik ei ole usaldusväärne, kulub kas liiga palju aega liiga paljude tööriistade kasutamisele või ei kasutata optimaalse lahenduse leidmiseks vajalikke vahendeid. Sellest tulenevalt mõjutavad ettevõtte *Lean Six Sigma* projektide lõpptulemusi suuresti *LSS*-koolituse kvaliteet ja koolitatud töötajate võimekus.

Kuigi paljusid tootmiskeskkonna protsesse saab arvutada või simuleerida, on see sageli aeganõudev. Selleks, et teha sobiva aja jooksul häid otsuseid, vajavad otsustajad teadmisi teemast või sellega seotud juhtumitest. Need teadmised põhinevad sageli kogemustel, mille heaks näiteks on *lean*-vahendid ja -meetodid.

Käesolevas töös kirjeldatud projekt on näide projektist, mis sai kasu *Lean*-vahendite integreerimisest *DMAIC*-struktuuri. *Lean* andis optimaalse testimisprotsessi aluseks olevad põhimõtted, mis suunasid projekti mitmes etapis. Samal ajal võimaldasid *Six Sigma* vahendid andmete teaduslikku analüüsi ja täpseid hinnanguid protsessi parandamise potentsiaali kohta. *DMAIC*-protsess ise toimis seda tüüpi

projektis hästi, suunates projekti läbi erinevate etappide ja tagades, et ei kasutataks mingeid lühikesi lahendusi. Näiteks hõlmab etapp "Mõõtmine" mõõtmissüsteemi täpsuse hindamist, mis võib kergesti tähelepanuta jääda. Kui selline oluline etapp jäetakse tegemata, ei saa projekteerimeeskond olla kindel süsteemi tegelikus toimivuses ja järeldused võivad põhineda potentsiaalselt ebatäpsetel andmetel.

KOKKUVÕTE

Lõputöös uuritakse *Lean Six Sigma* metoodika rakendamist, et parandada sagedusmuundurite testimise tootlikkust ABB AS Drives tehases Eestis. Uuring keskendub tuulemuundurite toodete testimise läbivusaegadele, alates kokkupanud kapi üleandmisest testimispiirkonda kuni muundurite valmimiseni. Eesmärgiks on tuvastada testimise läbivusaega mõjutavad tegurid ja pakkuda välja tõhusad, andmepõhised lahendused selle vähendamiseks, näidates *DMAIC* metoodika praktilist kasulikkust testimise läbivusaja vähendamise projektis.

Lõputöö on jagatud kahte põhiosasse. Esimeses osas tutvustatakse *Six Sigma* ja *Leani*, mis moodustab uuringu teoreetilise aluse. Teine osa keskendub projekti teostamisele ja ettevõtte poolt saavutatud kasu analüüsile, kasutades *Six Sigma DMAIC* projekti samme, mis juhivad parendusprojekti süstemaatilist teostamist.

Uuringus tuuakse esile ABB AS Drives tehase sagedusmuunduri ebastabiilne testimisaeg, sest 29,4% tuulemuunduritest võtab rohkem aega kui 21-tunnine piir, mille eest kliendid on valmis maksma, mistõttu ettevõtte kaotab kasumit. Uuringus seatakse peamiseks ärieesmärgiks vähendada konverterite testimise aega ja vähendada 21-tunnist ülempiiri ületavate testide arvu.

Lean Six Sigma analüüsi põhjal on esitatud mitu soovitus, sealhulgas tarkvara uuendamine, *breaking chopper* testi täiustamine, testimisprotsessi sammude optimeerimine, lahtiste osade jälgitavuse parandamine ja sagedusmuunduri raami visuaalse kontrolli sammu ümberpaigutamine. Nende paranduste rakendamine peaks hinnanguliselt säästa umbes 2,4 tundi testimise aega muunduri kohta.

Ettepanekud kiideti heaks ja rakendati vastavate funktsioonide omanike poolt. Nende paranduste tõhususe kinnitamiseks kasutatakse kahe valimi t-testi, et võrrelda vana protsessi ja uue protsessi keskmist testimise aega. Test näitab testimise aja statistiliselt olulist vähenemist, mis kinnitab seega rakendatud paranduste edukust.

Projekt saavutas oma eesmärgi, vähendades keskmist testimise aega 20,94 tunnilt ligikaudu 18,05 tunnile, mis tähendab kokku 2,89 tunni või 14% paranemist. Uuringus jõutakse järeldusele, et *LSS DMAIC* protsess on selles kontekstis tõhus ning rõhutatakse vajadust sobiva töövahendi valiku ja

kvaliteetse *LSS*-koolituse järele, et sellised projektid oleksid edukad.

SUMMARY

This graduation thesis, *Frequency Converter Test Operation Productivity Improvement using Lean Six Sigma Methods*, examines the application of *Lean Six Sigma* methodologies to improve the productivity of frequency converter testing operations at the ABB AS Drives factory in Estonia. The study focuses on the testing lead time of wind converter products, starting from when the assembled cabinet is handed over to the test area until the converters are ready for inventory. The aim is to identify contributing factors to the testing lead time and propose effective, data-driven solutions for its reduction, demonstrating the practical utility of *DMAIC* methodology in a testing lead time reduction project.

The thesis is divided into two main sections. The first part introduces *Six Sigma* and *Lean*, forming the theoretical foundation for the study. The second part focuses on executing the project and analyzing the benefits achieved by the company, using the *Six Sigma DMAIC* project steps to guide the systematic execution of the improvement project.

The research highlights the unstable testing lead time at ABB AS, with 29.4% of converters taking more time than the 21-hour limit that customers are willing to pay for, causing the company to lose profit. The study sets the primary business objective to decrease the converter testing lead time and lower the count of tests exceeding the 21-hour maximum limit.

Based on the *Lean Six Sigma* analysis, several recommendations are proposed, including a software update, breaking chopper tester improvement, testing process optimization, loose parts traceability improvement, and relocating visual control of the converter frame. Implementing these improvements was estimated to save around 2.4 hours of testing time per converter.

Proposals were approved and implemented by corresponding function owners. To confirm the effectiveness of these improvements, a two-sample t-test is used to compare the mean testing time of the old process with the new process. The test indicates a statistically significant reduction in the testing time, thus validating the success of the implemented improvements.

The project achieved its goal, reducing the average testing lead time from 20.94 hours to approximately 18.05 hours, a total improvement of over 2.89 hours and 14%. The research concludes that the LSS

DMAIC process is effective in this context and emphasizes the need for appropriate tool selection and quality LSS training for the success of such projects.

VIIDATUD ALLIKAD

- [1] P. Dhiravidamani, A. S. Ramkumar, S. G. Ponnambalam, and N. Subramanian, “Implementation of *Lean Manufacturing* and *Lean* audit system in an auto parts *Manufacturing* industry – an industrial case study,” *Int. J. Comput. Integr. Manuf.*, vol. 31, no. 6, pp. 579–594, Jun. 2018, doi: 10.1080/0951192X.2017.1356473.
- [2] I. Belekoukias, J. A. Garza-Reyes, and V. Kumar, “The impact of *Lean* methods and tools on the operational performance of *Manufacturing* organisations,” *Int. J. Prod. Res.*, vol. 52, no. 18, pp. 5346–5366, Sep. 2014, doi: 10.1080/00207543.2014.903348.
- [3] “History of ABB,” *ABB Group*. [htTPS://global.abb/group/en/about/history](https://global.abb/group/en/about/history) (accessed May 17, 2023).
- [4] “ABB products and services A - Z index.” [htTPS://new.abb.com/offerings](https://new.abb.com/offerings) (accessed May 17, 2023).
- [5] “Ajalugu | ABB.” [htTPS://new.abb.com/ee/meist/eestis/ajalugu](https://new.abb.com/ee/meist/eestis/ajalugu) (accessed May 17, 2023).
- [6] M. Harry and R. Schroeder, *Six Sigma: The Breakthrough Management Strategy Revolutionizing the World’s Top Corporations*. Sydney: Currency, 2006, p. 320.
- [7] J. Welch and Byrne, John, *Jack: Straight from the Gut*. New York: Grand Central Publishing, 2003, p. 496.
- [8] T. Ohno, *Toyota Production System: Beyond Large-Scale Production*. New York: Productivity Press, 1988, p.176.
- [9] M. George, *Lean Six Sigma: Combining Six Sigma Quality with Lean Production Speed*. New York: McGraw Hill, 2002, p. 300.
- [10] E. W. Deming, *Out of the Crisis*. Cambridge: Massachusetts Institute of Technology, Center for Advanced Engineering Study, 1986, p. 507.
- [11] M. George, J. Maxey, D. Rowlands, and M. Price, *The Lean Six Sigma Pocket Toolbook: A Quick Reference Guide to 100 Tools for Improving Quality and Speed*. New York: McGraw-Hill Professional, 2004, p. 225.
- [12] T. M. Kubiak and D. W. Benbow, *The Certified Six Sigma Black Belt Handbook*. Milwaukee: ASQ Quality Press, 2016, p. 946.
- [13] P. Pande, R. Neuman, and R. Cavanagh, *The Six Sigma Way: How GE, Motorola, and Other Top*

- Companies are Honing Their Performance*. New York: McGraw Hill, 2000, p. 448.
- [14] M. Rother, *Toyota Kata: Managing People for Improvement, Adaptiveness and Superior Results*. New York: McGraw Hill, 2009, p. 306.
 - [15] K. Magnusson, D. Kroslid, and B. Bergman, *Six Sigma The Pragmatic Approach*. Lund: Studentlitteratur AB, 2004, p. 408.
 - [16] T. Pyzdek and P. Keller, *The Six Sigma Handbook: A Complete Guide for Green Belts, Black Belts, and Managers at All Levels*. New York: McGraw Hill, 2014, p. 690.
 - [17] J. Womack, D. Jones, and D. Roos, *The Machine That Changed the World: The Story of Lean Production*. Cheney: Free Press, 2007, p. 352.
 - [18] J. K. Liker, *Toyota Way: 14 Management Principles from the World's Greatest Manufacturer*. New York: McGraw Hill, 2004, p. 330.
 - [19] B. Emiliani, D. Stec, L. Grasso, and J. Stodder, *Better Thinking, Better Results: Case Study and Analysis of an Enterprise-Wide Lean Transformation*. Kensington: Center for Lean Business Management, LLC, 2007, p.336.
 - [20] R. D. Snee, "Lean Six Sigma – getting better all the time," *Int. J. Lean Six Sigma*, vol. 1, no. 1, Art. no. 1, Jan. 2010, doi: 10.1108/20401461011033130.
 - [21] D. J. Wheeler, *Understanding Statistical Process Control*. Knoxville: SPC PRESS, 2010, p. 428.
 - [22] J. P. Womack and D. T. Jones, *Lean Thinking: Banish Waste and Create Wealth in Your Corporation*. New York: Simon & Schuster, 2010, p. 400.
 - [23] M. Rother, J. Shook, J. Womack, and D. Jones, *Learning to See: Value Stream Mapping to Add Value and Eliminate MUDA*. Cambridge: Lean Enterprise Institute, 1999, p. 102.
 - [24] D. Tapping, T. Luyster, and T. Shuker, *Value Stream Management: Eight Steps to Planning, Mapping, and Sustaining Lean Improvements*. New York: Productivity Press, 2002, p. 176.
 - [25] T. P. Ryan, *Statistical Methods for Quality Improvement*. Hoboken: Wiley, 2011, p. 704.
 - [26] R. Snee and R. Hoerl, *Leading Six Sigma: A Step-by-Step Guide Based on Experience with GE and Other Six Sigma Companies*. Upper Saddle River: FT Press, 2002, p. 304.
 - [27] J. Antony, "Design for Six Sigma: a breakthrough business improvement strategy for achieving competitive advantage," *Work Study*, vol. 51, no. 1, Art. no. 1, Jan. 2002, doi: 10.1108/00438020210415460, pp. 6-8.
 - [28] D. C. Montgomery, *Design and Analysis of Experiments*. Hoboken: Wiley, 2012, p. 357.

- [29] “Wind Energy Conversion System - an overview | ScienceDirect Topics.” [htTPS://www.sciencedirect.com/topics/engineering/wind-energy-conversion-system](https://www.sciencedirect.com/topics/engineering/wind-energy-conversion-system) (accessed May 17, 2023).
- [30] “Editable 5W2H Google Slides and PowerPoint Template,” *slideegg*. [htTPS://www.slideegg.com/5W2H-powerpoint-template](https://www.slideegg.com/5W2H-powerpoint-template) (accessed May 14, 2023).
- [31] N. R. Tague, *The Quality Toolbox*. Milwaukee: ASQ Quality Press, 2005, p. 584.
- [32] “About SAP,” *SAP*. [htTPS://www.sap.com/about.html](https://www.sap.com/about.html) (accessed May 17, 2023).
- [33] “[htTPS://www.minitab.com/en-us/products/minitab/](https://www.minitab.com/en-us/products/minitab/).”
- [34] C. Chatfield and H. Xing, *The Analysis of Time Series An Introduction with R*. Boca Raton: CRC Press, 2019, p. 414.
- [35] R. B. D’Agostino and M. A. Stephens, *Goodness-of-fit-techniques*. New York: Dekker, 1986, p. 584.
- [36] J. M. Bland and D. G. Altman, “Statistics notes: Calculating correlation coefficients with repeated observations: Part 1—correlation within subjects,” *BMJ*, vol. 310, no. 6977, Art. no. 6977, Feb. 1995, doi: 10.1136/bmj.310.6977.446, pp. 446.
- [37] G. Cumming, “The New Statistics: Why and How,” *Psychol. Sci.*, vol. 25, no. 1, Art. no. 1, 2014, pp. 7-29.
- [38] D. C. Montgomery, *Introduction to Statistical Quality Control*. Hoboken: Wiley, 2019, p. 768.
- [39] R. G. Schroeder, K. Linderman, C. Liedtke, and A. S. Choo, “Six Sigma: Definition and underlying theory,” *J. Oper. Manag.*, vol. 26, no. 4, pp. 536–554, Jul. 2008, doi: 10.1016/j.jom.2007.06.007.
- [40] D. R. Bothe, *Measuring Process Capability: Techniques and Calculations for Quality and Manufacturing Engineers*. New York: McGraw Hill, 1997, p. 897.
- [41] M. Brassard and D. Ritter, *The Memory Jogger 2: Tools for Continuous Improvement and Effective Planning*. Methuen: GOAL/QPC, 2010, p. 214.
- [42] D. H. Stamatis, *Failure Mode and Effect Analysis: FMEA from Theory to Execution*. Milwaukee: ASQ Quality Press, 2003, p. 455.
- [43] C. Lineberry and J. R. Carleton, *Achieving Post-Merger Success: A Stakeholder’s Guide to Cultural Due Diligence, Assessment, and Integration*. Zurich: Pfeiffer, 2004, p. 240.
- [44] J. Hartwell, “FMEA Template for Excel, Download & Quick Tips,” *IQASystem*, Apr. 29, 2020. [htTPS://www.iqasystem.com/news/FMEA-template-for-excel/](https://www.iqasystem.com/news/FMEA-template-for-excel/) (accessed May 17, 2023).

LISAD

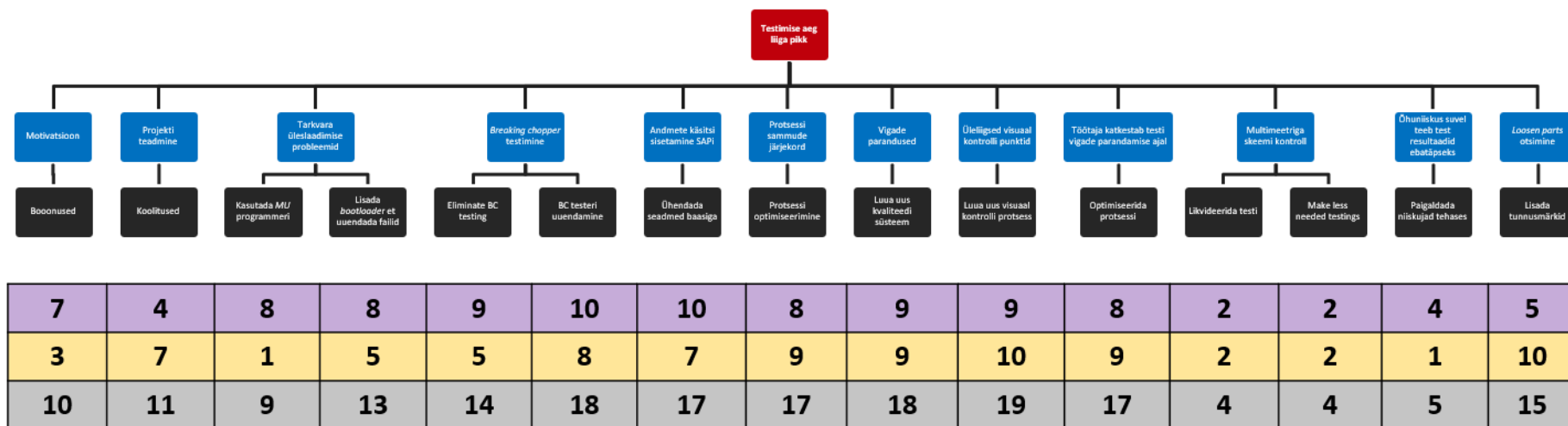
Lisa 1. Testimise aeg, vana protsess

Sagedusmuunduri number:	Testimise aeg, tundi:		Sagedusmuunduri number:	Testimise aeg, tundi:
1	23		56	21
2	21		57	20
3	20		58	20
4	20		59	20,5
5	27		60	21
6	27		61	20,5
7	21,75		62	19,5
8	21		63	20
9	18,5		64	18,75
10	26		65	19,5
11	22		66	21
12	24		67	20
13	19		68	20
14	23,25		69	21,5
15	21		70	20
16	22,5		71	20
17	20		72	20,5
18	20		73	20,5
19	20		74	20,5
20	22,5		75	20,75
21	20,25		76	24,5
22	20		77	20
23	25		78	20,75
24	18,75		79	21
25	29,5		80	21,75
26	20,5		81	19,5
27	22,5		82	21
28	21,5		83	17,5
29	21		84	23,75
30	19,5		85	24,25
31	21		86	25
32	21		87	21
33	27,5		88	26,5
34	19,5		89	18,5
35	20		90	25
36	21		91	21
37	20		92	22
38	21		93	24
39	21,25		94	22
40	21		95	22
41	22		96	20
42	20		97	21
43	18,75		98	26
44	18		99	22
45	18,5		100	20,5
46	21		101	21
47	22,25		102	21
48	21		103	24
49	18,5		104	21
50	20		105	21
51	21		106	21,5
52	21		107	20
53	19,75		108	21
54	19,75		109	21
55	19,75			

Lisa 2. Operaatorite võrdlus

		Operaator 1	Operaator 2
Samm:	Kirjeldus:	Aeg, minutid:	Aeg, minutid:
1	Arvuti otsimine	2	2
2	Dokumentide kokkupanek	5	6
3	Kliendidokumentatsiooni prindimine	36	28
4	Komponentide listi kontroll	46	56
5	Kleepsude kontroll	7	10
6	Visuaal kontroll	149	136
7	Tõmbetest	56	59
8	DIP lülitid	19	20
9	Optiliste kaablite kontroll	18	25
10	Vigade parandamine	70	62
11	Elektriskeemi kontroll	100	175
12	Isolatsiooni test	81	69
13	Piritlemise test	111	86
14	Raporti prindimine	3	8
15	Juhtmete ühendamine	8	13
16	Jõukaablite ühendamine	2	5
17	Tarkvara laadimine	50	30
18	Parameetrid	29	4
19	Digitaalse väljundite test	70	99
20	Võrkude lisamine	10	12
21	690V kaablid	5	2
22	Ohutusmärgid	2	2
23	Jõu test	44	78
24	Lõplik tarkvara laadimine	26	10
25	Komponenti numbrite kontroll	34	39
26	Lahtiste osade komplekteerimine	14	13

Lisa 3. Puu diagramm



Legend:

Efektiiivsus – ●
 Teostatavus – ●
 Summa – ●

Lisa 4. Testimise aeg, uus protsess

Sagedusmuunduri number:	Testimise aeg, tundi:
1	14
2	17
3	18,5
4	17,5
5	21
6	20,5
7	17,5
8	14
9	22
10	15
11	18,5
12	19
13	20
14	22
15	19
16	20,5
17	16
18	22
19	21
20	19
21	20
22	17
23	18
24	19,5
25	21,5
26	18
27	14
28	17,6
29	15
30	18,5
31	16,5
32	20
33	15
34	14
35	15
36	15
37	17,5
38	20
39	17,5
40	17,5
41	17,5
42	18
43	17,5
44	18
45	20
46	22,5
47	19,5
48	14
49	15
50	17,5
51	17,5
52	16
53	20,5