



TALLINNA TEHNIKAÜLIKOOL
INSENERITEADUSKOND
MEHAANIKA JA TÖÖSTUSTEHNICA INSTITUUT

TOOTE DISAINI PARENDAMINE LÄBI X-KESKSE PROJEKTEERIMISE METOODIKA

IMPROVING THE DESIGN OF A PRODUCT USING DESIGN FOR X METHODOLOGY

MAGISTRITÖÖ

Üliõpilane: Oscar Eskor

Üliõpilaskood 183693MATM

Juhendaja: Toivo Tähemaa, teadur

(Tiitellehe pöördel)

AUTORIDEKLARATSIOON

Olen koostanud lõputöö iseseisvalt.

Lõputöö alusel ei ole varem kutse- või teaduskraadi või inseneridiplomit taotletud.

Kõik töö koostamisel kasutatud teiste autorite tööd, olulised seisukohad, kirjandusallikatest ja mujalt pärinevad andmed on viidatud.

Autor: Oscar Eskor

/ digiallkirjastatud /

26. mai 2021

Töö vastab bakalaureusetöö/magistritööle esitatud nõuetele

Juhendaja: Toivo Tähemaa

/ digiallkirjastatud /

26. mai 2021

Kaitsmisele lubatud

"....."20... .

Kaitsmiskomisjoni esimees

/ nimi ja allkiri /

Lihtlitsents lõputöö reprodutseerimiseks ja lõputöö üldsusele kättesaadavaks tegemiseks¹

Mina Oscar Eskor (*autori nimi*) (sünnikuupäev: 20.01.1996)

1. Annan Tallinna Tehnikaülikoolile tasuta loa (lihtlitsentsi) enda loodud teose „Toote disaini parendamine läbi X-keskse projekteerimise meetodika“, mille juhendaja on Toivo Tähemaa

1.1 reprodutseerimiseks lõputöö säilitamise ja elektroonse avaldamise eesmärgil, sh Tallinna Tehnikaülikooli raamatukogu digikogusse lisamise eesmärgil kuni autoriõiguse kehtivuse tähtaja lõppemiseni;

1.2 üldsusele kättesaadavaks tegemiseks Tallinna Tehnikaülikooli veebikeskkonna kaudu, sealhulgas Tallinna Tehnikaülikooli raamatukogu digikogu kaudu kuni autoriõiguse kehtivuse tähtaja lõppemiseni.

2. Olen teadlik, et käesoleva lihtlitsentsi punktis 1 nimetatud õigused jäävad alles ka autorile.

3. Kinnitan, et lihtlitsentsi andmisega ei rikuta teiste isikute intellektuaalomandi ega isikuandmete kaitse seadusest ning muudest õigusaktidest tulenevaid õigusi.

¹*Lihtlitsents ei kehti juurdepääsupiirangu kehtivuse ajal, välja arvatud ülikooli õigus lõputööd reprodutseerida üksnes säilitamise eesmärgil.*

Oscar Eskor

/ digiallkirjastatud /

26. mai 2021

Mehaanika ja tööstustehnika instituut

LÕPUTÖÖ ÜLESANNE

Üliõpilane: Oscar Eskor, 183693MATM

Õppekava, peeriala: MATM02/18 – Tootearendus ja tootmistehnika

Juhendaja(d): teadur, Toivo Tähemaa, 620 3252

Lõputöö teema:

Toote disaini parendamine läbi X-keskse projekteerimise meetodika
(Improving the design of a product using Design for X methodology)

Lõputöö põhieesmärgid:

1. Tutvustada X-keskset projekteerimist ja *lean* kontseptsiooni
2. Tutvustada toodet
3. Parendada toote disaini x-keskse projekteerimise vaatevinklist
4. Valida koosteliini jaoks vajalikud tööriistad
5. Kirjeldada ümbritsevaid projekte, mis mõjutasid toote disaini
6. Teha järeldusi õpitu kohta ja jagada soovitusi tulevastele sarnastele projektidele

Lõputöö etapid ja ajakava:

Nr	Ülesande kirjeldus	Tähtaeg
1.	Ülesande püstitus ja tutvustus	9.12.2019
2.	Esmase kokkupaneku tulemus	6.01.2020
3.	Teise kokkupaneku tulemus	11.02.2020
4.	Väiketarvikute ja tööriistade analüüs	10.08.2020
5.	Kolmanda kokkupaneku tulemus	10.09.2020
6.	Magistritöö kirjutamine	26.05.2021

Töö keel: eesti keel

Lõputöö esitamise tähtaeg: 26.05.2021

Üliõpilane: Oscar Eskor / digiallkirjastatud / 26.05.2021

Juhendaja: Toivo Tähemaa / digiallkirjastatud / 26.05.2021

Programmijuht: ".....".....20.....a
/allkiri/

Kinnise kaitsmise ja/või lõputöö avalikustamise piirangu tingimused formuleeritakse pöördel

SISUKORD

EESSÖNA	7
1 SISSEJUHATUS.....	8
2 X-keskne PROJEKTEERIMINE	9
2.1 Koostamiskeskne projekteerimine	10
2.2 <i>Lean</i> printsiip	12
2.2.1 Väärtus kliendi silmis	12
2.2.2 „Prügi“	13
3 TOOTE TÖÖPÕHIMÕTE JA ÜLDINE DISAIN	14
3.1 Paispoolid on mooduli südameks	15
3.2 Kondensaatorid ühtlustavad voole	16
3.3 Jahutus tagab mooduli pika eluea.....	17
3.4 Voolulattide alamkoostud	19
3.4.1 Mahalaadimistakisti ohutuselemendina.....	19
4 PAISPOOLID.....	22
4.1 Paispoolide positsioneerimine.....	22
4.2 Peamised ühendused	22
5 KONDENSAATORITE SELJAKOTT	28
5.1 Voolulattide paigaldamine.....	28
5.2 Voolulattide ülemised kinnitused	28
5.3 Kondensaatorite pehmenduste positsioneerimine	31
5.4 Kondensaatoritevaheline PC leht	32
5.5 Kondensaatorite kaablid	33
6 MOODULI JAHUTAMINE	34
6.1 Ventilaatori korpuse neetimine	34
6.2 Õhusuunajate tähtsus	35
6.2.1 Õhusuunajad tarnijalt	36
6.2.2 Õhusuunajate kohandamine montaaži käigus.....	37
6.2.3 Õhusuunajate positsioneerimine.....	37
6.3 Kaablite kinnitused	37
6.4 2X ventilaatori kinnitus	38
7 VOOLULATTIDE ALAMKOOSTUD.....	41
7.1 W-faasi kondensaatori voolulatt	41
7.1.1 1X mooduli W-faasi kondensaatori voolulatt	41
7.1.2 2X mooduli W-faasi kondensaatori voolulatt	42
7.2 2X mooduli kondensaatori voolulattide kinnitamine.....	44
7.3 Mahalaadimistakisti kaablite kinnitamine väljundlattidele.....	46
8 TÖÖRIISTADE JA VÄIKETARVIKUTE VALIK	48

8.1	Elektrilised kruvikeerajad	48
8.1.1	„Porgandid“ on eelistatud	48
8.1.2	Püstolikujulised elektrilised kruvikeerajad	49
8.1.3	Targad tööriistad	50
8.2	Filtermooduli monteerimise tööjaamad	52
8.3	Filtermooduli monteerimise tööriistade valik	53
8.4	Tööriistade valikust tingitud disainimuudatused	54
8.4.1	2X väljundlattice PC leht	54
8.4.2	1X peamised ühendused	55
8.4.3	Poolide pakkide ühendused	55
9	ÜMBRITSEVAD PROJEKTID	57
9.1	Automaattestimine	57
9.2	Tootmisliini loomine	59
9.2.1	Tootmisliinist tingitud muudatused	61
9.3	Alusvankrite ohutumaks tegemine	62
9.3.1	Muudatused tootmisliinile	63
9.3.2	Alusvankrite automaatne lukustamine	65
9.4	Sisend- ja väljundlattice koostamise rakis	66
9.5	Klaaskiudisolatsiooni juhtivus niiskes keskkonnas	67
9.5.1	Sisendlattice alamkoost	67
9.5.2	Väljundlattice alamkoost	69
10	TULEMUS	73
10.1	Poolide pakkide positsioneerimine	73
10.2	Õhusuunajate positsioneerimine	74
10.3	Üldised nõrgad kohad	74
10.4	Tagasiside tehtud tööle	75
10.5	Lõppkontrollis leitud vead	75
	KOKKUVÕTE	79
	SUMMARY	81
	KASUTATUD KIRJANDUSE LOETELU	83

EESSÕNA

Antud magistritöö on välja pakutud ettevõtte ABB AS poolt. Probleem, millele käesoleva töö puhul lahendust otsitakse, on filtermooduli disaini parendamine eelkõige tootmiskeskse projekteerimise kuid ka *lean* printsiibi vaatevinklist. Töö teostati ettevõttes ABB AS, kust koguti ka põhilised algandmed ning kus autor töö tegemise ajal töötas protsessiinseneri ametil.

Pildimaterjal on enamasti kas autori enda pildistatud, mooduli koostejuhendist võetud või CAD-mudeli renderdus programmis Creo View 6.0. Lisa 1 joonis on tehtud programmiga Solidworks.

Autor soovib tänada abistamise eest ettevõtet ABB AS, juhendajat Toivo Tähemaad (teadur, TalTech) ja kolleege ABB-st, kes aitasid lõputöö valmimisele kaasa.

Järjepidev arendus, *lean*, X-keskne projekteerimine, tootedisain, magistritöö.

1 SISSEJUHATUS

Käesoleva magistritöö teema tulenes ettevõtte ABB AS soovist, kus liigutati varasemalt tarnija juures monteeritud filtermooduli koostamine ABB enda tehasesse. See tekitas soodsa võimaluse parendada vähesel määral mooduli disaini eelkõige kokkupanemise hõlbustamise eesmärgil.

Lõputöö eesmärk on parendada filtermooduli toodetavust, sealhulgas vähendada tootmiseks kuluvaid ressursse ja võimalike koostevigade tekkimist. Parendusettepanekute hindamiseks tuleb hinnata muudatuse mõju kogu tarne- ja koosteahelas, ehk mitte ainult toote enda koosteprotsessi, vaid ka tarneahelas üles- ja allavoolu ning koosteliiniga ühildavust. Samuti tuleb arvestada muudatuse tasuvuse ning muudatuse realiseerimiseks vajamineva ressursikulu suhet. Muudatused lihtsalt nende tegemise pärast pole kasulikud. Neil peab olema selge eesmärk ning nad peavad seda ka täitma.

Lõputöö tulemusena väheneb

- filtermooduli koosteprotsessile kuluv aeg ja keerukus,
- koosteliini poolt hõivatav põranda pindala ja
- võimalike montaaživigade arv ja sagedus.

Autor töötas lõputöös kirjeldatud sündmuste ajal ABB-s protsessiinsenerina ning puutus igapäevaselt kokku käesolevas töös käsitletud tootele sarnaste toodete kvaliteediprobleemidega. Sagedased ülesanded olid ka olemasolevate toodete disainimuudatused, mille ajenditeks võisid olla ka võimalused koosteprotsessi optimeerimiseks. Olles näinud probleeme ja võimalusi mujal, oli autoril lihtne leida sarnaseid kohti ka analüüsitud filtermoodulis. Lisaks oli autor kogunud, et lahendamata jäänud probleemid ilmuvad hiljem taas välja. Seega tuleks pideva edasiarengu käigus üritada jooksvalt lahendada kõiki esinenud probleeme nii, et nende taasilmumine poleks võimalik.

Magistritöö põhiosa algab teoreetiliste selgitustega, et anda lugejale parem arusaam mõtteviisist, millele tuginedes muudatusi tehti. Tutvustatakse ka toodet ennast, et mis on selle eesmärk ja milline oli algne disain.

Edasine on juba toote analüüsimine erinevates etappides ja parendusettepanekud koos põhjendustega, miks ettepanek realiseeriti või jäeti kõrvale. Lisaks viidi läbi küsitlus toote disaini rahulolule ning analüüsiti esinenud vigu.

2 X-KESKNE PROJEKTEERIMINE

X-keskne projekteerimine on protsess, kus proaktiivselt projekteeritakse toode selliselt, et see

- optimeerib kõiki tootmise funktsioone:
 - komponentide ettevalmistamine,
 - koostamine,
 - testimine,
 - transportimine,
 - hooldus,
 - parandus;
- tagab parima
 - tootmiskulu,
 - kvaliteedi,
 - töökindluse,
 - nõuetele vastamise,
 - ohutuse ja
 - kliendi rahulolu. [1]

Tasuvus tuleb eelkõige kulude vähendamise arvelt. Kaks kõige suuremat kulu tootmises on komponentide hind ja töötajate palk ning ainus tulu on müüdüd tooted või teenused. Enamasti on tulu otseses seoses sellega, kui optimeeritult kasutatakse ära montöörade tööaega. Kui montööri tööd toetavad üksused ei täida oma ülesannet, ei saa ka montöör oma tööaega kasulikult kasutada, vaid see kulub muude ülesannete täitmisele. Samuti pidurdavad montööri tempot ka koosteprobleemid.

Lean printsiipi silmas pidades tuleb tasu vaadata kliendi silmade läbi – mille eest on klient nõus maksma?

Klient ei maksa selle eest, kui montöör otsib tootmisest kindlat komponenti või tööriista taga. Samuti ei maksta valesti paigaldatud komponentide õigesti ümberpaigaldamise eest. Klient soovib tellitud toodet ja on nõus vaid selle eest maksma. Kõik muud kulud jäävad tootja kanda.

Siin muutubki oluliseks X-keskne projekteerimine. Jätkusuutlik tootmine on selline, kus iga komponent on tööjaamale, kus teda paigaldatakse, võimalikult lähedal, tema paigaldamine võtab minimaalselt aega ja valesti paigaldamise oht on samuti minimaalne. Head lahendused on need, kus toodet ei ole füüsiliselt võimalik valesti kokku panna ja kui kõik on õigesti tehtud, saab toodet mängleva lihtsusega koostada.

X fraasi ees tähistab, et see võib olla ükskõik, mille keskne. Enimlevinud vormid on näiteks

- koostamiskeskne projekteerimine, et toodet oleks võimalikult lihtne koostada,
- ohutuskeskne projekteerimine, et toodet oleks ohutu kasutada kogu toote eluea vältel ja igas eluea etapis,
- lahtikoostamiskeskne projekteerimine, et toodet oleks võimalikult lihtne lahti võtta,
- taaskasutuskeskne projekteerimine, et toodet oleks võimalik taaskasutada võimalikult suurel määral kasutades võimalikult vähe energiat,
- töökindluskeskne projekteerimine, et toode oleks võimalikult töökindel,
- kulukeskne projekteerimine, et toode nõuaks võimalikult vähe kulutusi igas valdkonnas, ja
- hoolduskeskne projekteerimine, et toodet oleks võimalikult lihtne hooldada. [2]

Tegelikkuses on n-ö X-e palju rohkem kui nimetatud, kuid käesolevas töös pandi kõige suurem rõhk koostamiskesksele projekteerimisele. Autor toob välja mõned koostamiskeskse projekteerimise põhimõtted, et lugeja viia kurssi töö eesmärgiga.

2.1 Koostamiskeskne projekteerimine

Detailide arv koostus sõltub funktsionaalsusest ja töökindluse nõuetest, ehk tuleb otsustada, mida on tarvis dubleerida ja mida mitte. Kui detailide arvu vähendada sama funktsionaalsust säilitades, siis on võimalik suurendada töökindlust, kuna purunevate, kuluvate või muud moodi oma omadusi kaotavate osade hulk väheneb. Küll aga on võimalik detailide dubleerimisel vähendada koormust detailile, mis omakorda hoopis suurendab töökindlust. Seega puudub kindel reegel ja igat juhtumit tuleb hinnata eraldi. [3]

Koostamiskeskset on üldjuhul vähim detailide arv eelistatud, kuna kiirendab koosteprotsessi ja vähendab montööri vea tekkimise võimalust.

Käsitsi monteerimise võib jagada kaheks:

1. käsitlemine (haaramine, liigutamine ja orienteerimine) ja
2. paigaldamine (detaili lisamine ja kinnitamine teisele koostule või detailile). [3]

Käsitlemise lihtsustamiseks tuleks detailid konstrueerida võimalusel sümmeetrilised, et vältida montööri viga valet pidi monteeritud detaili näol. Küll aga pole sümmeetria alati võimalik või otstarbekas. Sellisel juhul tuleks detail teha ilmselgelt asümmeetriliseks, et jällegi poleks võimalik detaili valesti kinnitada ega poleks tarvis õiget orientatsiooni pikemat aega otsida. Hoiustamiseks üksteise sisse sisestatavad detailid tuleb teha selliselt, et nad ei jääks üksteise sisse kinni. Väiksemate detailide puhul tuleb hoiduda omadustest, mis võimaldavad detailidel üksteise külge takerduda või liimuda, mis on õrnad, painduvad, väga väiksed, suured või ohtlikud. [3]

Paigaldamise hõlbustamiseks tuleb tagada materjalide vahel piisavad lõtkud, et kinnitamise vastupanu oleks minimaalne, kuid liiga väike lõtk võib põhjustada detailide takerdumist või kinni kiilumist, võib vajada õhutusavasid, lisajõudu ja faaside lisamist. Astmetega detailide sisestamisel avasse tuleb astmed asetada võimalusel üksteisest nihkesse, et vältida samaaegseid sisenemisi. Heaks tavaks on kasutada püramiidkoostamist ja vältida liigset koostu ümberpööramist või olukordi, kus kinnitamisel tuleb detaili positsiooni säilitada detailist käega kinni hoides. [3]

Ligipääsetavus on samuti väga olulisel kohal koostamiskesksel projekteerimisel, kuid seda on väga lihtne märkamata jätta disainiinseneril, kes loob toote CAD-programmis, kus ligipääsetavus pole probleemiks. Seda tüüpi probleemid ilmnevad lihtsamini toodet füüsiliselt koostades, mis on väga hea näide sellest, et juba toodet disainides tasub projekti kaasata inimesi, kes on disainitava tootega sarnaseid tooteid juba monteerinud.

Tasuvust koheselt koostamiskeskselt projekteerides võib kõrvutada vea esinemisega tootes, kus on üldistav reegel, et vea avastamisel iga järgnevas tootmise etapis maksab vea kõrvaldamine 10 korda rohkem, kui see oleks maksnud eelnevas tootmisetapis.

Ütleme, et kui montöör teeb vea, aga ka ise märkab ja suudab viga kõrvaldada, kulub tal parandamiseks 1 minut. Kui vea teinud montöör ise ei märka seda, vaid seda märkab temast järgmine montöör, kes peab toote tagasi eelnevasse tööjaama viima, tekitades kogu tootmisliinil lühiajalise seisaku, siis kulunud aeg on juba pigem 10 minutit. Kui vigane toode leiab oma tee lõppkontrolli, siis sealt tuleb toode tagasi parandamisse saata, toode tuleb uuesti lahti võtta, viga kõrvaldada, toode uuesti kokku panna ja testida, siis on ajakulu juba suurusjärgus 100 minutit. Kui ka lõppkontroll ei tuvasta viga ja toode lahkub tootmisüksusest, võtab vea kõrvaldamine aega 1000 minutit jne. Tasub meeles pidada, et iga töötaja kulutatud minuti võib ümber arvutada kaotatud rahaks.

Sarnane üldistav reegel eksisteerib ka projekteerimisel. Kui toote disaini alles töötatakse välja, on lihtne teha suuri muudatusi. Kui disain hakkab valmis saama, on

muudatuste tegemine aina keerulisem. Lisaks võib iga väiksem muudatus tähendada suuremaid muudatusi teistel detailidel. Kui disaini on valmis ja tellitakse juba esimesed füüsilised komponendid, ja alles siis leitakse, et toodet pole üldse võimalik kokku panna, siis tuleb lisaks disaini muutmisele veel ka tarnijatelt uued detailid tellida või olemasolevaid ümber töödelda, kui selleks võimalus on.

See tähendab, et ideaalses maailmas disainitakse toodet vaid üks kord ja peale disaini välja töötamist puudub vajadus selle muutmisele. Reaalses maailmas on aga see võimatu, mis viib autori kahele seisukohale:

1. Toodet disainides tuleks uurida võimalikult paljude erinevate taustadega inimestelt, kes hakkavad seda disaini kasutama, et mida nad enda kogemuse põhjal disainis muudaksid. Mida varem saab õigeid muudatusi teha, seda odavam on muudatuse teostamine. Seetõttu on oluline meeskondade ja ka ettevõtete vaheline koostöö, et jagada oma teadmisi.
2. Ka kõige parema koostöö tulemusena ei valmi koheselt väga hea disain, vaid seda tuleb aja jooksul parendada. Siin tuleb mängu pidev edasiarendus, mis on *lean* printsiibi üks alustalasid.
 - a. Vea esinemisel tuleb viga kõrvaldada nii, et selle uuesti ilmnemine poleks võimalik, muidu tuleb igaveseks kõrvaldamata jäänud viga hiljem tagasi.
 - b. Kui vigu ei ilmne, siis see ei tähenda, et disain on ideaalne. Alati on võimalik muuta toodet, et seda oleks kiirem, ohutum või odavam kokku panna, lahti võtta, hooldada, taaskasutada või mis muud X-i paremaks muuta, mis toodi välja peatükis 2.

2.2 Lean printsiip

Lean printsiipi on juba mainitud, kuid autor soovib põgusalt veel täpsustada, mida on selle all mõeldud, kuna see ühtib paljuski X-keskse projekteerimisega.

Väga lühidalt kirjeldatuna on ideoloogia tuumaks kliendi silmis toote või teenuse väärtuse tõstmine, samal ajal „prügi“ vähendades. [4]

2.2.1 Väärtus kliendi silmis

Lihtsasti öeldav, kuid keeruliselt defineeritav. Kes on üldse klient? Klient ei pea olema tingimata lõpptarbija, vaid ta võib olla toote ostja, teenuse kasutaja, töötaja ülemus või

inimene ise. See on üldistades öelduna see, kellele tehakse toode või osutatakse teenust, ehk kes saab kasu.

Väärtus on see, mida klient on nõus tarnijale maksma. Kõige lihtsam väärtuse vorm on rahaline väärtus, kuid võib olla ka näiteks mingi ese, aeg või intellekt ehk mis kasu pakub klient tarnijale tarnija kulutatud ressursi eest. [5]

2.2.2 „Prügi“

„Prügi“ ei ole autor kogemata jutumärkidesse kirjutanud, kuna see ei pea olema tingimata tavaline prügikasti visatav jääde. „Prügi“ on kõik, mille eest klient ei maksa ehk mis tootele, teenusele või mida iganes kliendile osutatakse, väärtust ei lisa. [6]

Kõige lihtsam on ehk ette kujutada tootmisettevõtet, mis tegeleb komponentide monteerimisega terviklikuks tooteks. Tootmisettevõtte on tarnija, kes müüb enda toodet lõppkliendile, kes maksab tootmisettevõttele raha tehtud töö eest.

Kas klient maksab selle eest, et tema toode on korrektselt koostatud ning töötab korrapäraselt? Jah. Kas klient maksab selle eest, et vigane toode tehti tootmises korda? Ei. Kas klient maksab selle eest, kui montöör peab otsima õiget komponenti riiulist? Ei. Kas klient maksab selle eest, kui montöör peab ootama mõne muu ressursi taga? Ei. Kõik, mille eest klient ei maksa, on „prügi“ ja tuleb eemaldada. Iga toode tuleb esimesel korral korrektselt koostada, raiskamata aega tegevustele, mille eest klient ei maksa.

Lisaks on samas tootmisüksuses käimas veel mitu erinevat protsessi. Ka montöör ise on tarnija enda tööandjale. Montöör müüb oma aega ja vastutasuks maksab tööandja talle selle eest raha.

Lean printsiipi võib rakendada elu igas valdkonnas [7], kasvõi trenni tehes, kus huvitaval kombel on tarnija ja klient samad inimesed. Trenni tegija on tarnija, kuna ta müüb oma aega ja energiat. Klient on samuti trenni tegija, kuna tasustab tarnijat hea enesetunde, paremate spordialaste tulemustega vms. Klient ei maksa antud protsessis tarnijale looderdamise eest, vaid ainult selle eest, kui toimub füüsiline aktiivsus.

3 TOOTE TÖÖPÕHIMÕTE JA ÜLDINE DISAIN

Analüüsitavat toodet kasutatakse elektriabla harmoonikute väljafiltreerimiseks. Eraldiseisvana pole temast just palju kasu, kuid keerulisemates elektriablates on võimalik nii tõsta süsteemi kasutegurit. [8]

Tooted jagunevad raami suuruse järgi kaheks: 1X ja 2X. 1X on kergem ja veidi väiksem, kuid 2X on loodud tugevamaks vooluks. Joonistelt 3.1 ja 3.2 on näha, et erinevad tüübid on üsna sarnased väljast.



Joonis 3.1 1X filtermoodul külili asendis, esialgne disain



Joonis 3.2 Ventilaatorita 2X filtermoodul külili asendis, esialgne disain

3.1 Paispoolid on mooduli südameks

Toote tuumaks on paispoolide pakid või *choke*'id. Kuna toode on loodud 3-faasilise voolu jaoks, on igas pakis 3 pooli. Pakkide arv varieerub ühest kolmeni, kuid enamasti kasutatakse kahte pakki. Joonistel 3.3 ja 3.4 on näha, et moodulid on ka seest üsna sarnased. Poolide puhul seisneb erinevus nende kaalus ning voolu tugevusest tingituna ka väiketarvikute valik. Väiketarvikute all mõeldakse polte, kruve, mutreid, seibe, kaablikingi, klepse, käepidemeid, kaablisidemeid, neete jms lihtsaid ja laialt levinud mehaanikakomponente. 1X kasutab igas ühenduses ühte M10 polti, 2X kasutab sisendis ühte M12 polti, pakkide vahel kahte M12 polti ning väljundis küll ühte M12 polti, aga koos topeltlattidega, mis võimaldavad ühe poldiga saavutada sama hea elektrilise juhtivuse nagu kahe eraldi poldina. [9]



Joonis 3.3 1X moodul ilma pealmise küljekaaneta, paispoolide pakid nähtaval



Joonis 3.4 2X moodul ilma pealmise küljekaaneta, paispoolide pakid nähtaval

3.2 Kondensaatorid ühtlustavad voole

Voolude ühtlustamiseks kasutatakse kondensaatoreid, mis asuvad eraldiseisvas „seljakotis“. Selline nimi, kuna kondensaatorite koost näeb mooduli külge kinnitatuna välja nagu seljakott. Peale kondensaatorite on seljakotis ka neid ühendavad vooluladid.

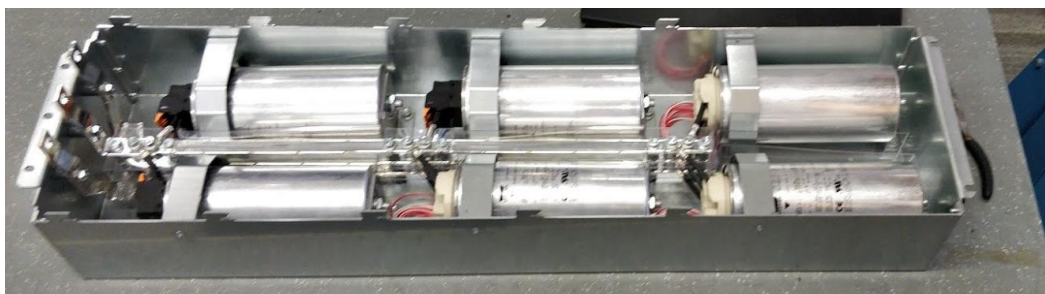
Varasem seljakoti disain oli kinnine, mis ei võimaldanud kondensaatorite jahutamist ega seljakoti parandamist. Vea ilmnemisel tuli terve kondensaatorite pakk välja vahetada.

1X kasutab kahe kondensaatori kõrgust seljakotti, mis võimaldab kasutada kuni 4 kondensaatorit. Täpsem kondensaatorite arv sõltub mooduli võimsusest, kuid tavaliselt on neid kas 3 või 4.

2X kasutab 3 kondensaatori kõrgust seljakotti, kuhu mahub kuni 6 kondensaatorit. Täpsem arv sõltub samuti mooduli võimsusest, kuid tavaliselt on neid 5 või 6.

Kondensaatoreid ei ole mitte üks faasi kohta, vaid kõik on 3-faasilised kondensaatorid. Muidu oleks kogu kondensaatori paki mahtuvuse muutmine erinevate võimsusklasside korral keerulisem. 3-faasilised kondensaatorid tähendavad aga veidi keerulisemat montaaži, kuna iga kondensaatori ühendamiseks tuleb kasutada kolme juhet kahe asemel.

Joonisel 3.5 on näha esimest „lahtise“ disainiga kondensaatorite seljakotti. Kokkupanemisel katsetati ka erinevate terminalidega kondensaatoreid. Joonisel paremale poole jäävad heledate terminalplokkidega kondensaatorid on traditsioonilised, kus kaabel kruvitakse terminali kinni, ning vasakul mustade terminaliplokkidega kondensaatorid on uuemat tüüpi, kangiga kinnitatavad terminalidega. Uuemate eelis on see, et pole vaja kruvikeerajat ega kruvi keeramisele aega kulutada ja kui mõni kaabel peaks kondensaatori terminalist lahti tulema või kondensaator tuleb tervikuna välja vahetada, siis piisab vaid kangiga lahtisesse asendisse lükkamisest ja kaabel tuleb terminalist lahti. Kui tuleb kruvitava terminaliga kondensaator välja vahetada, tuleb sisuliselt terve seljakott lahti võtta ja pärast uuesti kokku panna.



Joonis 3.5 2X kondensaatorite seljakott, prototüüp

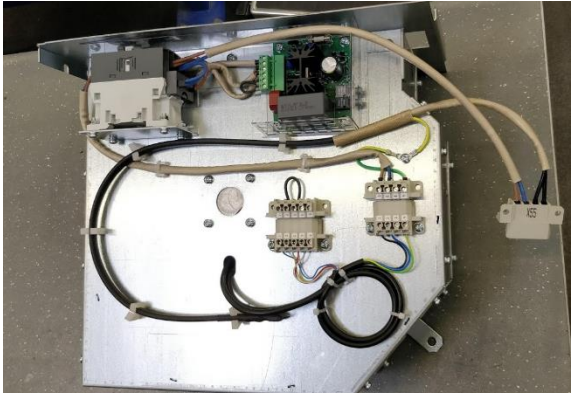
3.3 Jahutus tagab mooduli pika eluea

Kuna toode on loodud kandma edasi kuni 2 MW voolu, on ka sundjahutus moodsapääsmatu. Jahutuse keskses on ventilaator, mis puhub õhku mööda poole üles, jahutades neid. Õhuvoolu suunajad jätavad enda ja poolide välispindade vahele minimaalse läbipääsukanali, suunates õhuvoolu võimalikult poolide välispindade lähedalt läbi, tõstes jahutamise kasutegurit. Kuna ka kondensaatoritest võib läbi käia suuri voole, suunatakse õhuvool ka seljakotti tänu uuele „lahtise“ disainiga seljakotile. Lisaohutusena on kõik poolid varustatud ka *klixon*-tüüpi temperatuurilülititega, mis ühendatakse omavahel jadamisi ja kui nende temperatuur tõuseb üle 140°C, lülituvad nad lahti, katkestades vooluringi. Katkenud vooluring registreeritakse eraldiseisva kontrollmooduli poolt, mis ühendab vea ilmnmisel lahti ka peamised vooluahelad, et vältida suuremaid vigastusi komponentidele liiga kõrge temperatuuri tõttu.

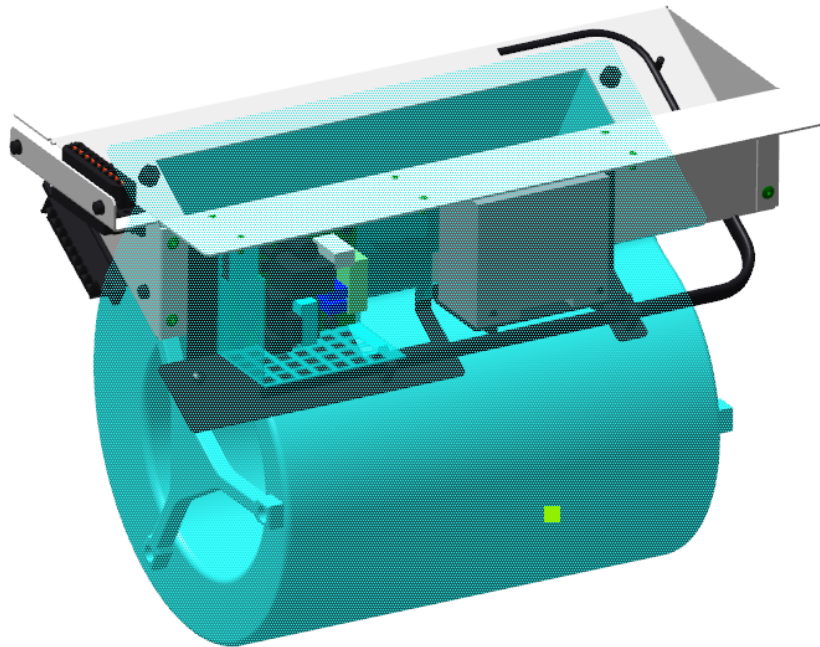
Ventilaatorite koostud erinevad 1X ja 2X moodulite vahel. Kui 1X kasutab radiaalset ventilaatorit, siis 2X tsentrifugaalset. Kuna need ventilaatorid erinevad oma ehituselt täielikult, siis on ka nende komplektid erinevate mehaaniliste osadega. Sarnasusi leidub vaid elektroonilistes komponentides.

Mõlemaid ventilaatoreid saab sisse-välja lülitada, kuid mitte hoida poole võimsusega töös. Kuigi ventilaatorite mootorid võimaldaksid ka muutuva võimsusega tööd, nähti seda ebavajalikuna ja kogu juhtmestik disainiti seda funktsiooni mitte kasutades. Ventilaator saab oma töövoolu läbi kontaktori, mida juhitakse valguskaablitega. Optilise signaali muundamiseks elektrisignaaliks, kasutati trükkplaati. Lisafunktsioonina on võimalik paigaldada ka veel kütteelementi, kuid seda pole igal moodulil vaja.

Joonis 3.6 näitab komplekteeritud 1X mooduli ventilaatorit kahest erinevast vaatest ja joonis 3.7 näitab CAD-renderdust 2X mooduli ventilaatorist.



Joonis 3.6 1X ventilaatori komplekt



Joonis 3.7 2X ventilaatori komplekt

3.4 Voolulattide alamkoostud

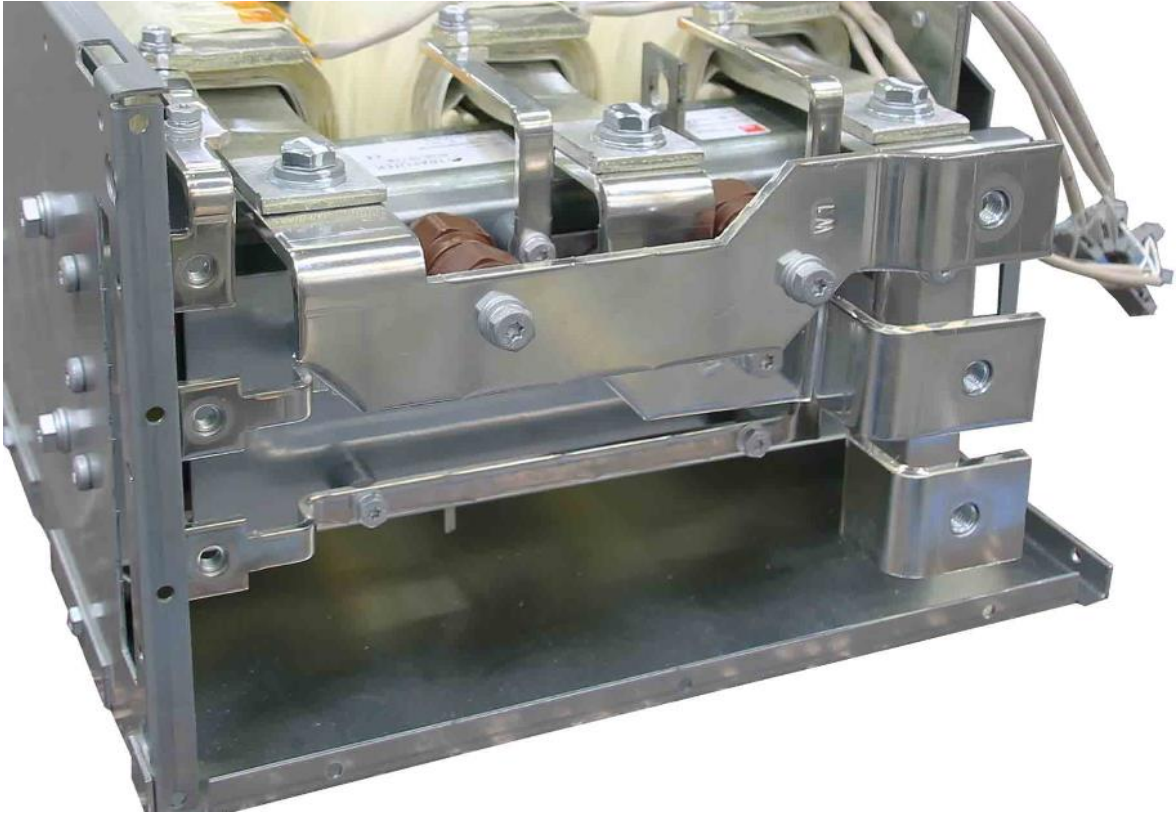
Moodul ühendatakse elektrikabinetti läbi voolulattide. Laias laastus jagunevad need kahte alamkoostu: sisend- ja väljundlatid. Sisendlattide alamkoostu küljes on ka kondensaatorite seljakotti minevad latid.

1X ja 2X voolulattid erinevad teineteisest täielikult kahel põhjusel:

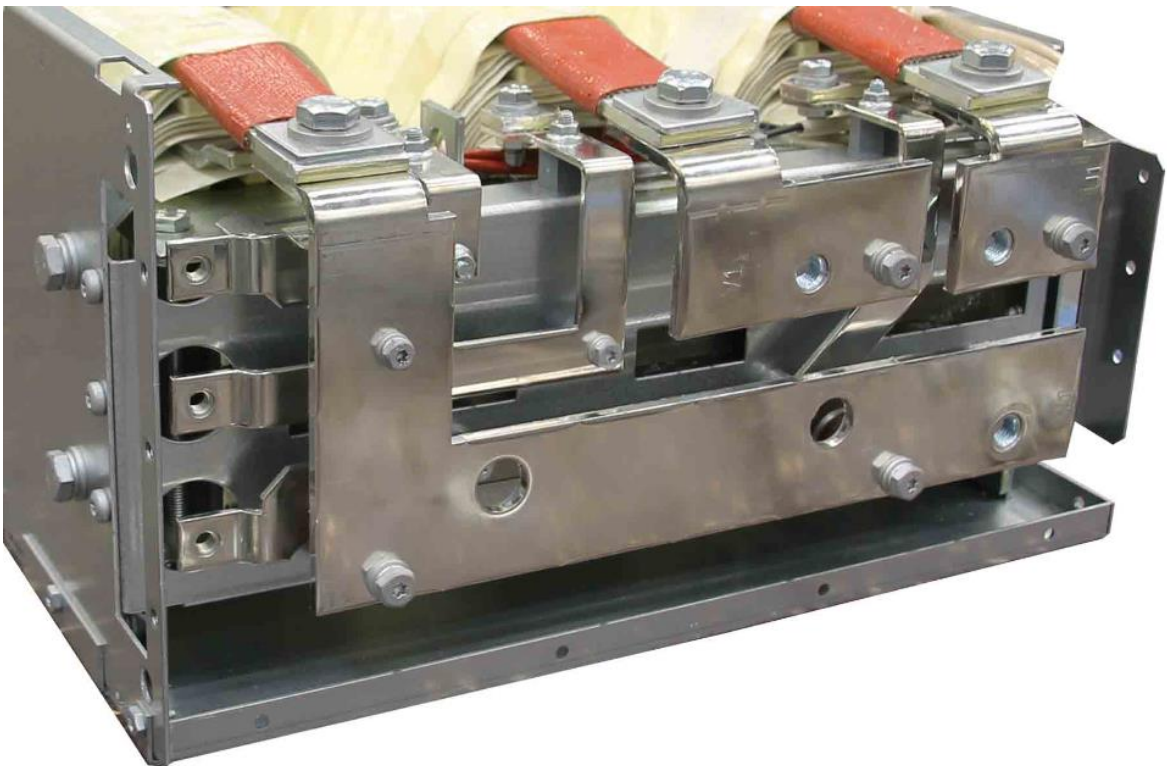
1. 2X moodul on loodud palju tugevama elektrivoolu filtreerimiseks, mis tähendab
 - a. suuremat lattide ristlõike- ja kontaktpindala ning
 - b. suuremat jõudu, mis kontaktpindu kokku suruks;
2. ühenduskohad ja -viisid mooduli ja kabineti vahel on erinevad:
 - a. sisendlattidel on 1X kinnituskohad toodud võimalikult mugavaks kinnitamiseks mooduli etteotsa, 2X puhul aga pole see suuremate lattide tõttu võimalik,
 - b. 1X kasutab väljundis kiirkinnitusi, 2X polditavaid kinnitusi.

3.4.1 Mahalaadimistakisti ohutuselemendina

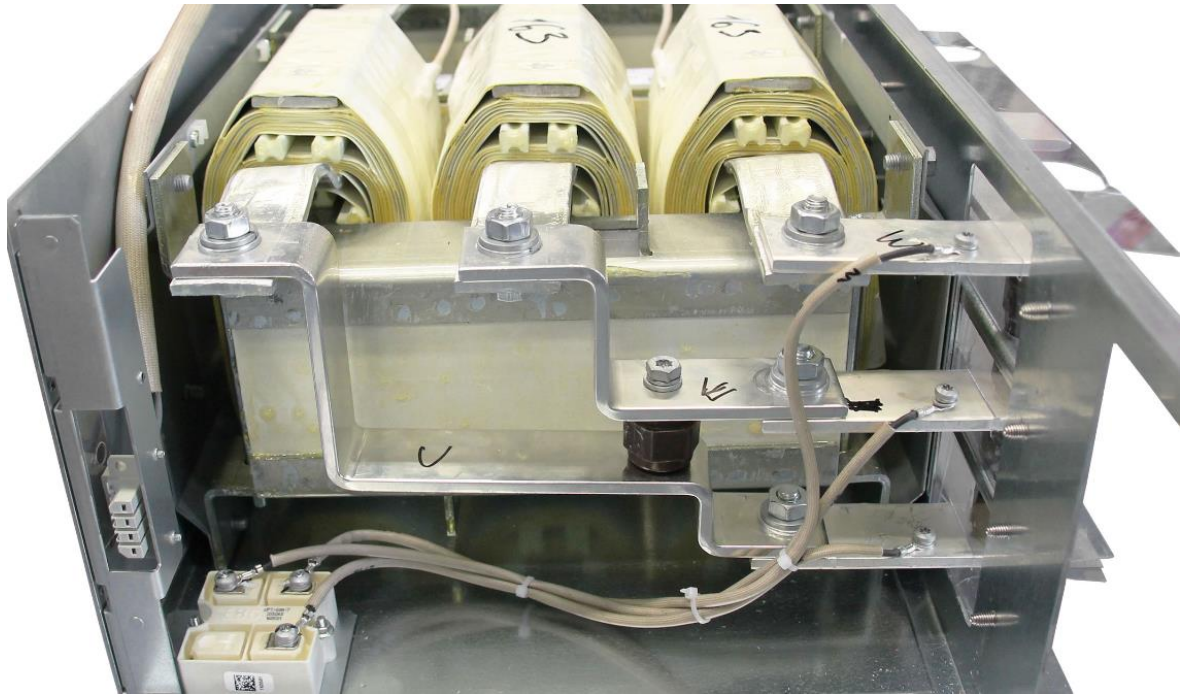
Väljundlattidega on ühendatud ka mahalaadimistakisti. See on kui suurt võimsust taluv takisti, mis lühistab läbi takisti faasid omavahel ja raami ära. Otstarbest aru saamiseks tuleb mõelda mooduli testimisele, parandamisele ja hooldusele. Peale mooduli montaaži tuleb see ka ära testida, et veenduda, et see korrektselt töötaks. Kui moodul testrist lahti ühendada, jääb elektrilistesse komponentidesse potentsiaal sisse. Kui nüüd maandatud keha läheks potentsiaaliga komponendi pihta, muutuks keha juhiks. Kui kehaks on inimene, siis jääks ta voolu alla. Kõik eelnev kehtib ka selle kohta, kui moodul on juba kliendi juures töösse pandud ning seda tuleb parandada või hooldada. Seetõttu on mahalaadimistakisti inimeluliselt kriitiline ohutuskomponent.



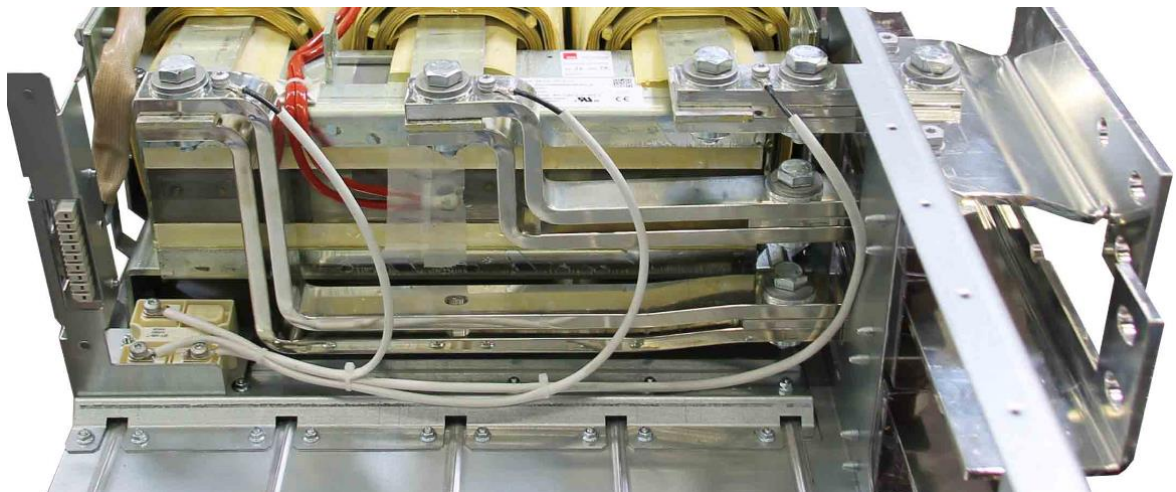
Joonis 3.8 1X sisendlatid



Joonis 3.9 2X sisendlatid



Joonis 3.10 1X väljundlatid



Joonis 3.11 2X väljundlatid

4 PAISPOOLID

4.1 Paispoolide positsioneerimine

Autoril oli põhjust arvata, et mooduli kõige nõrgemaks kohaks on poolide positsioneerimine ja ühendamine. See arvamus põhineb sellel, et poolide pakid olid disainitud mõttega, et lattide kinnituskohti pole võimalik teha piisavalt täpsete asetustega, seega juba projekteerimise käigus toetuti lattide õigesse positsiooni väänamisele. See oli aga *lean* printsiibiga vastuolus, kuna moodulit pole võimalik ladusalt monteerida, vaid oli vaja kinnituspunkte kohandada. Lisaks andsid sellised pehmed ühenduskohad võimaluse ebapiisava kliirensi jaoks. Kliirensi all on mõeldud õhuvahet laetud ja maandatud kehade vahel. Täpsemalt olid kõige suuremateks murekohtadeks poolidevahelised ühendused, mis võisid olla väänatud liiga alla või liiga üles, viies mõlemal juhul kliirensi allapoole lubatud.

Lisaks olid kõik ühendused tehtud n-õ vankripoltide, seibide ja mutritega. Vankripoldid sisestati altpoolt üles läbi lati. Teiselt poolt pandi seibid ja mutrid. Probleeme esines sellega kolm:

1. kuna vankripoldid olid pikad ja ühenduskoha all olid poolide pakkide risttalad, polnud alati piisavalt ruumi poldi sisestamiseks,
2. vankripolt tuli sisestada altpoolt üles, mis on ebaergonoomiline operatsioon, ja
3. iga ühenduse loomiseks oli vaja nelja erinevat väiketarvikut (polt, 2 erinevat seibi ja mutter)

Poolide pakkide positsioneerimise parendamiseks prooviti esimesena leida täpsemaid positsioneerimise kinnitusi, kuid leiti, et pakkide raam on küllaltki hästi ise positsioneeritud mooduli eesmise ja tagumise plaadi järgi. Seega seisnes probleem hoopis poolides endis. Probleemi lahenduse puudumisega leppimine tuli tarnijalt, kui selgus, et nii suuri poole pole võimalik teha piisavalt täpselt.

4.2 Peamised ühendused

Poolide ühenduskohade puhul oli väiketarvikute valik väga hea elektrilise ühenduse tagamiseks, kuid monteerimise vaatevinklist olid vankripoldid liiga kohmakad. Joonis

4.1 illustreerib vankripolte. Eesmärgiks sai monteerimise hõlbustamine ilma elektrilise ühenduse kehvemaks tegemiseta.



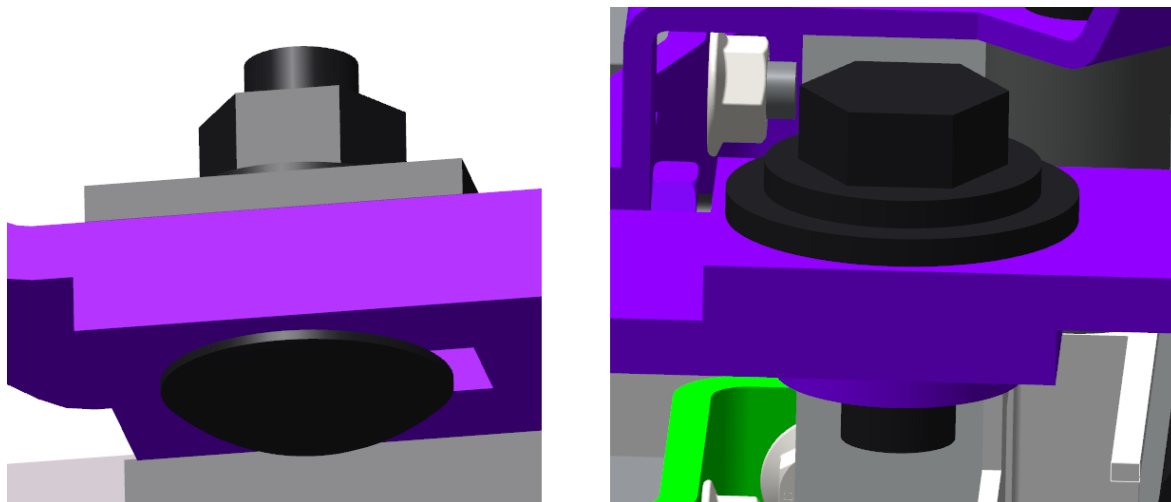
Joonis 4.1 Vankripoldid [10]

Lahendust otsiti pressmutrite näol. Pressmutrid on, nagu nimigi viitab, materjali sisse pressitud mutter. Nad teevad monteerimise lihtsamaks, kuna mutter on juba ühenduses olemas ja fikseeritud. See tähendab, et montöör ei pea otsima õiget mutrit ning seda ühe käega ühenduse loomisel õiges kohas hoidma. Kuna pressmutter on täielikult polditava keha külge fikseeritud, ei ole poldi keeramisel vaja ka mutrist kinni hoida selle pöörlemise vältimiseks. Nii väheneb näiliselt ka vale mutri kasutamise oht, kuid tegelikult viiakse see oht tarnija juurde, kes võib samuti vale mutri sisestada.

Teisalt aga on juhtunud, et pressmutter tuleb oma pesast vabaks. Kui ühendus on vaid mehaaniline, siis eksisteerib võimalus, et ühenduse loomiseks võib kasutada ka seibi ja tavalist mutrit. Kui aga tegemist on elektrilise ühendusega, siis selline käitumine tekitaks liiga suure võimaluse kehvaks elektriliseks kontaktiks, mis viiks ühenduskoha ülekuumenemiseni. See tähendab, et elektrilise ühenduse korral ei ole võimalik lahti tulnud pressmutriga materjali enam kasutada, vaid tuleb kogu materjal välja vahetada uue vastu. Lisaks, pole alati tootmistehnikast tulenevalt pressmutri kasutamine võimalik või piisaval määral põhjendatud.

Antud juhul oli materjaliks vasest või alumiiniumist voolulattid. Seni olid pressmutrid kasutusel vaid kondensaatorite seljakoti ja sisendvoolulattide alamkoostu vahelises ühenduses, kuid autor ei näinud põhjust, miks mitte neid ka mujal kasutada. Kui mooduli poolide ühendused teha vankripoltide asemel pressmutritega, oleks võimalik ühendust luua otse ülevalt alla polti sisestades ning oleks üks põhjus vähem voolulatte

väänata, et saada piisavalt ruumi poldi sisestamiseks alt üles. Joonis 4.2 visualiseerib kahte käsitletud poltliite süsteemi.



Joonis 4.2 Poltühenduste süsteemid. Vasakul on vankripoldi, paremal pressmutri süsteem

Pressmutreid taheti kasutusele võtta nii palju kui võimalik. Tabel 1 näitab kohtade arvu, kus sai muudatust teha.

Tabel 1

Mooduli tüüp	Ühenduse koht	Ühenduste arv	Pressmutri võimalus
1X	Sisend, peavool	3	3
1X	Sisend, kondensaatorid	3	3
1X	Poolidevaheline	3	0
1X	Väljund, pooli küljes	3	2
1X	Väljund, keskmised	2	2
1X	Väljund, välimised	0	0
1X	Kokku	14	10
2X	Sisend, peavool	3	3
2X	Sisend, kondensaatorid	3	3
2X	Poolidevaheline	6	0
2X	Väljund, pooli küljes	3	3
2X	Väljund, keskmised	3	3
2X	Väljund, välimised	3	3
2X	Kokku	21	15

Pressmutri kasutust piirati kahel juhul:

1. 1X mooduli W-faasi väljundi ühenduses ja
2. mõlema mooduli tüübi puhul poolidevahelised ühendustes.

1X mooduli W-faasi väljundi ühendust polnud võimalik teha pressmutriga, kuna mooduli väljundlatid peavad läbima PC (polükarbonaat) lehes oleva ava

- a. PC leht peab olema paigaldatud parema jahutuse tagamiseks. Selle puudumisel pääseks ventilaatori poolt puhutud õhuvool mooduli tagant välja, mis viiks mooduli ebapiisava jahutamiseni, mis kulmineeruks mooduli ülekuumenemisega.
- b. Ava PC lehes peab olema võimalikult väike, et võimalikult väike osa jahutavast õhuvoolust „lekiks“ sealt avast välja. See tähendab, et PC lehte läbiv latt peab lehes oleva ava täielikult ära täitma. Kui ava sisse teha süvend pressmutri jaoks, pääseks jahutav õhuvool sealt avast välja, mis oleks jällegi negatiivse mõjuga jahutamisele.

U ja V faaside puhul kasutatakse veel lisaks poolide väljundlattidele ja mooduli väljundlattidele, n-ö välimiste väljundlattide vahel vahelatte ehk seesmiseid väljundlatte, kuid 1X mooduli W faasil pole vahelati kasutus vajalik, kuna latid asuvad juba väga lähestikku ning samas tasapinnas. Vahelati loomine tähendaks veel ühte erikujulist latti ja kahte ühenduskohta. See on *lean* printsiipidega [11] vastuolus, kuna

1. Lisalatt vajab kohta riulis, mis suurendaks tootmiseks vajaminevat pindala, mis on omaette kulu, kuid suurendab ka montööri sammude arvu töökohast materjalide riulini.
2. Mida rohkem on erikujulisi komponente, seda suurem on eksimise tõenäosus, et paigaldatakse vale komponent. Esialgse disainil olid mooduli kõige välimised väljundlatid kõik ühesugused.
3. Mida rohkem on ühendusi, seda suurem on montööri eksimise tõenäosus.
4. Ühendusi peab olema võimalikult vähe, et montööri aega ja väiketarvikute kulu vähendada.

Kuldse keskteena tundus disain, kus ainult 1X mooduli väljundi ühendustest jääb ainsana W-faas pressmutrita ühenduseks. Ka see polnud ideaalne lahendus, kuna nii jääks üks ühendus ainsana teistest erinev, mis võiks viia montööri eksimiseni, kuid seda ohtu hinnati üsna madalaks.

Joonis 4.3 näitab lõplikku lahendust. Lillaga on märgitud W-faasi, rohelisega V-faasi väljundlatid ja türkiissinisega PC lehed. On näha, kuidas V-faas saab kasutada pressmutreid nii pooli ühenduses kui ka väljundi ühenduses tänu sellele, et seal on kasutatud nende kahe ühendamiseks vahelatti. W-faasi puhul pole otstarbekas vahelatti kasutada ja seetõttu on seal kasutatud traditsioonilist mutrit pressmutri asemel. On ka näha, kuidas PC lehes olev ava on tehtud nii väike kui võimalik ja et latt täidab selle ava peaaegu täielikult ära.

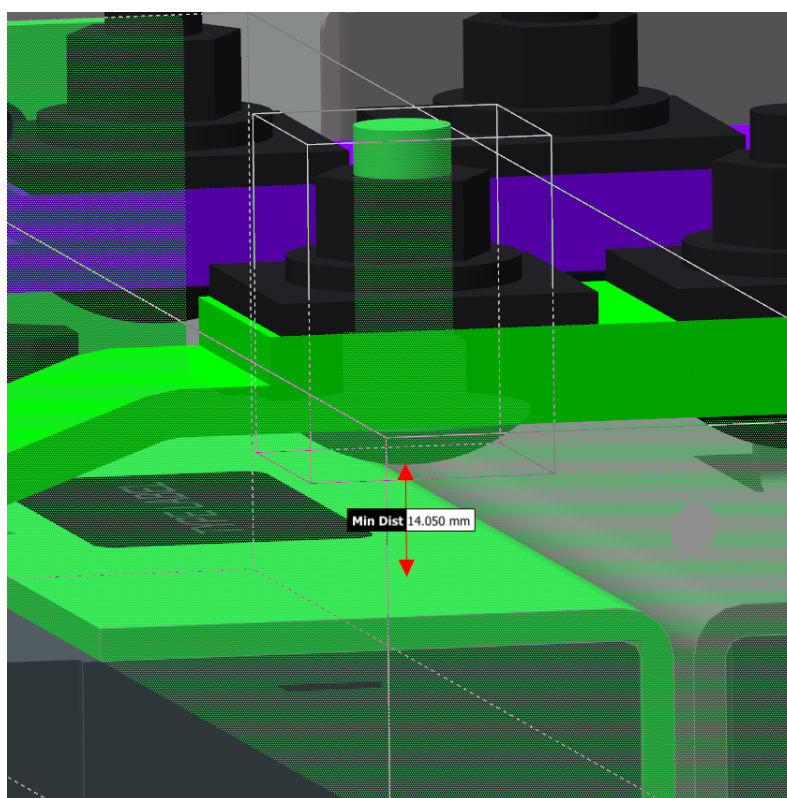


Joonis 4.3 1X mooduli W-faasi väljundühendused

Poolidevahelisi ühendusi ei olnud võimalik kummalgi mooduli tüübil pressmutriga teostada, kuna poolide lattide külge polnud võimalik pressmutreid kinnitada, kuna kõik poolide pakid kaeti tarnija juures täielikult dielektrilise vaiguga, et vältida lühiste tekkimise võimalust. See vaik oleks pääsenud ka pressmutri keerme vahele, mis oleks keerme kasutuskõlbmatuks muutnud. Peale vaigu pealekandmist eemaldati vaik kontaktpindadelt ning pressmutter oleks ka seda protsessi tugevalt raskendanud.

Poolide tarnijal polnud ka lahendusi, et vaigu pealekandmise hetkeks keermed ära katta, et vaik nendeni ei pääseks.

Lisaplaadi kasutamisega otsiti ka lahendust, kus poolidevaheliste ühenduste loomiseks on pressmutrid lisaplaadi küljes. Lisaplaad paigaldataks siis poolide voolulattide alla ja neid siduv polt sisestatakse ülevvalt alla läbi poolide voolulattide lisaplaadi pressmutrisesse. Selle lahenduse probleem seisnes eelkõige kliirensis. Kui lisaplaad lisada poolide lattide alla, millest jääb veel madalamale ulatuma poldi „saba“, siis väheneks õhuvähe poolide paki raamiga. Joonis 4.4 näitab kliirensit vankripoldi ja pooli paki raami vahel. Minimaalne lubatud kliirens oli 14 mm. Lisaplaadi kasutamine vähendaks kliirensit veelgi. Kliirensi suurendamine pooli paki raami arvelt poleks olnud otstarbekas, kuna sama raami kasutatakse mitmete erinevate pakkidega ja osadel puhkudel oleks pidanud ka poole muutma. Lisaks oleks lisaplaadi kasutamine ka ise vastuolus *lean* printsiibiga, kuna see oleks veel üks lisa komponent, mis ei ole mooduli tööks tingimata vajalik. Lõplik idee maha kandmine tuli aga hoopis ohutusest. Kui montöör kinnitaks polti lisaplaadi küljes oleva pressmutri keermesse, võinuks poldi pöörlemine lisaplaadi endaga kaasa pöörlema tõmmata. See võinuks vigastada montööri sõrmi või toodet ennast. Kuna seda peeti liiga suureks riskiks, otsustatigi lisaplaati poolidevahelises ühendustes mitte kasutada.



Joonis 4.4 Kliirens vankripoldi ja pooli paki raami vahel 2X moodulil.

See kõik viis leppimiseni, et puudub hea lahendus olukorra parendamiseks ja poolidevahelised ühendused jäävad vankripoltide süsteemi kasutama. Kõikides võimalikes kohtades aga võeti pressmutri lahendus kasutusele.

5 KONDENSAATORITE SELJAKOTT

Kuna varem oli seljakoti disain hoopis teistsugune, oli see esimene täiesti uue seljakoti disaini prototüüp. Küll aga oli koost üsnagi lihtne ja ei leitud palju võimalusi parendamiseks.

5.1 Voolulattide paigaldamine

Seljakoti kõige nõrgemaks kohaks tootmisekeskse disaini vaatevinklist oli voolulattide paigaldamine. Selle tegi keeruliseks asjaolu, et kondensaatorite külge tuli kaablid paigaldada enne nende sisestamist seljakotti. Mainitud kaablid pidid olema ka üsna suure ristlõikepindalaga (10 mm²), kuid üsna lühikesed. See tähendas, et nad olid väga jäigad. Voolulatt tuli saata ülevalt alla läbi jäikade kaablite.

Et voolulattide paigaldamine hõlpsamaks muuta, hakati uurima teistsuguste kondensaatorite kasutuselevõttu, mis erinesid kaablite terminalide poolest. Täpsemalt on kondensaatorite erinevusi kirjeldatud alapeatükis 3.2. Seda tüüpi terminalidega kondensaatorite kasutusele võtmine võimaldaks voolulattide sisestamist enne kaablite paigaldamist kondensaatorite külge.

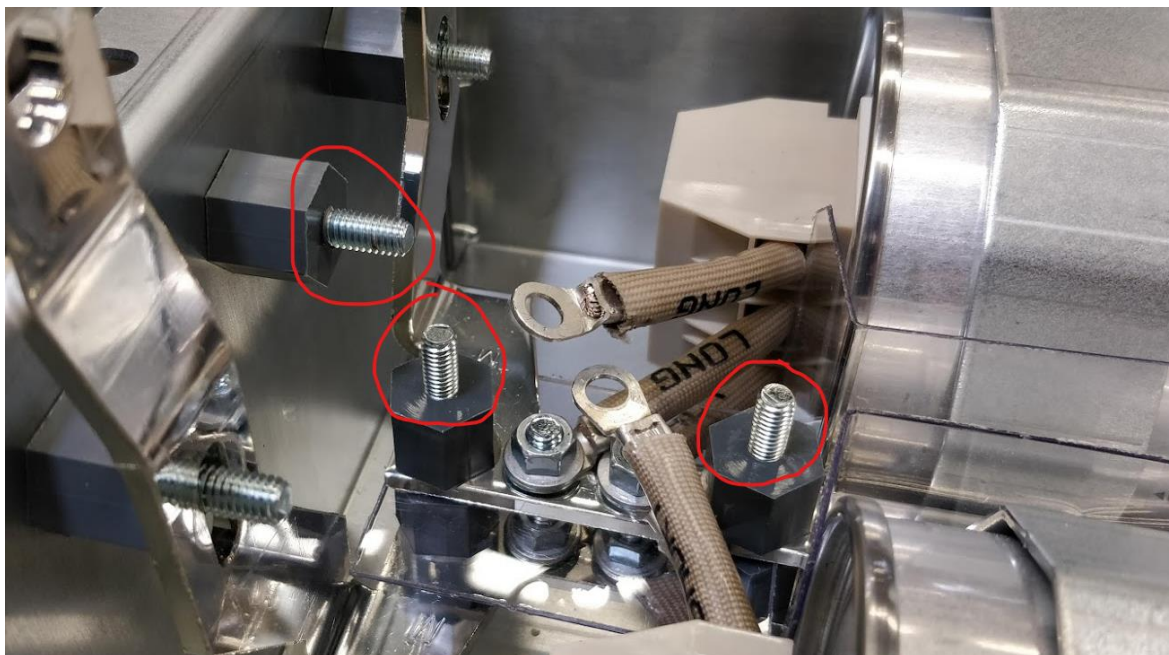
Uue tüüpi kondensaatorite kasutusele võtmisele kulub aga aega ja seda muudatust pole veel implementeeritud.

5.2 Voolulattide ülemised kinnitused

Fikseerimaks voolulatte mehaaniliselt seljakoti külge, et saavutada hea lattide positsioneerimine, kasutati isolaatorpukse. Need aga tegid voolulattide paigaldamise veel keerulisemaks kui kondensaatorite kaablid üksi, kuna voolulattid tuli läbi kaablite allapoole saata veidi teises asendis oma lõplikust positsioonist ja alles õigele kõrgusele jõudes õigesse positsiooni keerata. Omakorda keerukust lisas ka asjaolu, et alumised isolaatorpuksid asusid ka seljakoti põhjas. Kõik see tähendas, et kui voolulatt oli läbi kaablite saadetud nii madalale kui võimalik, tuli voolulatt lükata ülespoole, et ülemise isolaatorpuksi isane pool läheks läbi voolulatis oleva ovaalse ava, ja siis jälle allapoole, et ka alumised isolaatorpuksid läbistaksid voolulatti. Kõige keerulisem oli see keskmise, V-faasi latiga, kuna see oli kõige lühem, mis tähendas vähimat mänguruumi.

Joonis 5.1 näitab kolme lähestikku asuvat V-faasi kinnituskohta, mis asuvad kahel erineval tasapinnal ja on kahe erineva suunaga. Kuigi ülemise kinnituse ava on nendel

lattidel ovaalne, ei olnud võimalik latti hõlpsasti paigaldada, kuna ava ei olnud piisavalt pikk.



Joonis 5.1 V-faasi lati kinnituskohad punase ringiga märgituna

Joonis 5.2 näitab paigaldamise meetodit, kus on näha, et tasapinnaliste liigutamistega pole võimalik latti üldsegi paigaldada, kuna ülemine isolaatorpuks ei mahu ovaalsest avast sisse ja alumise isolaatorpuksi tõttu pole võimalik latti ka madalamale liigutada. Lahenduseks on viia latti nurga alla, sisestada ülemine isolaatorpuks esimesena ja siis alles latti õigesse asendisse keerates sisestada teised. Kuigi võib tunduda, et probleem pole üldsegi nii mastaapne, et vajaks millegi muutmist, tasub meeles pidada, et nii nurga alla latti lükates on latti saatmine läbi kondensaatorite kaablite veel vaevalisem. Ning kõige lõpuks ei lähe ikka latti hõlpsasti oma asendisse, vaid see tuleb sinna logistada. Kõik see on vastuolus *lean* printsiipidega.



Joonis 5.2 V-faasi lati paigaldamine enne ava pikendamist

Lahendust otsiti kõige pealt isolaatorpuksist. Kui lati poole jääks isolaatorpuksi emane pool, siis probleem kaoks. Kahjuks aga isolaatorpuksi ümberkeeramisega tuleb ka vahetada lehtmetaili PEM-sisend keermetatud ava vastu, mis ei ole nii töökindlad kui PEM-sisendid. Otsiti ka mõlemast otsast emast isolaatorpuksi, kuid ei leitud sobiva kõrgusega.

Realiseeritud lahenduseni jõuti alles kolmanda kokkupaneku käigus. Hoopis lihtsam oli lati ovaalse ava pikemaks tegemine. Sellise lahenduse korral tuli arvestada sellega, et voolulatil on piiratud ristlõige suurema pikkuse peale, mis piiraks voolulati elektrilist juhtivust. Antud juhul aga polnud probleemi, kuna

1. kondensaatorite latid olid juba algsest üledimensioneeritud,
2. muudatus seisnes vaid ava veidi pikemaks muutmisel, mis on üsna minimaalne muudatus, mis puudutab lati elektrivoolu läbilaskvust, ja
3. kondensaatoritest käib antud mooduli puhul läbi vaid hetkelised voolud, mitte pikaajalised.

5.3 Kondensaatorite pehmeduste positsioneerimine

On paratamatu, et moodul töörežiimis vibreerib. Et vältida vibratsioonist tulenevat kolinat, tuleb kõik komponendid korralikult ära fikseerida. Kondensaatorid fikseeritakse alt korralikult ära seljakoti kere külge, kuid ülemise osa fikseerimiseks polnud head lahendust. See tähendas, et kondensaatorite ümber tuli kasutada pehmedusi, mis väldiks kondensaatori vibreerimisel kolinat. Kõige mugavam on neid pehmedusi kleepida siis, kui seljakoti kere on veel täiesti tühi. Sel hetkel aga pole millegi järgi pehmedusi positsioneerida ja väga keeruline on teada pehmeduste täpset positsiooni. Lisaks, kui positsiooniga eksida, tuleb kogu seljakott lahti võtta, et viga kõrvaldada saaks. See tähendaks väga suurt ajakulu, mille eest klient ei soovi maksta.

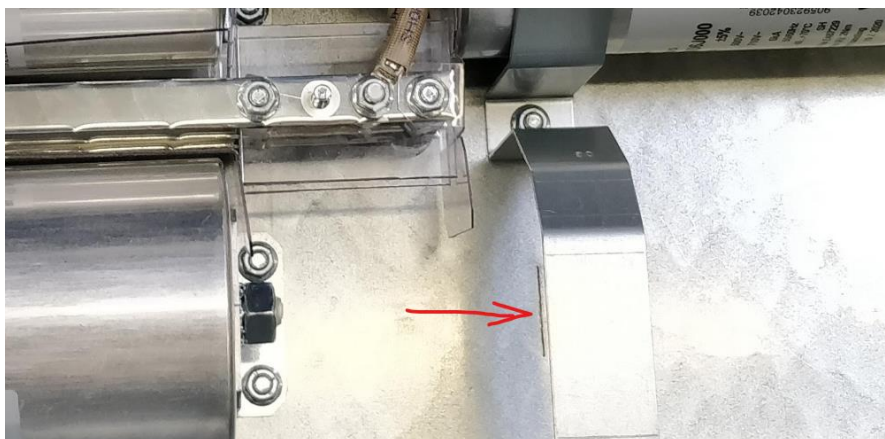
Ühe lahendusena nähti pehmeduste kleepimist kondensaatori enda külge, kuna kondensaatorite positsiooni järgi tuli pehmedusi kleepida.

Seni kasutati pehmedustena rulli pealt tulevat pehmedusriba, mille ühel pool oli tootja poolt peale kantud liimiriba. Selliselt pikka riba on tülikas kondensaatorile kleepida. Lisaks tuli pehmeduse riba väga kergelt kondensaatori pealt ära. Lõpuks leiti, et need lahendused ei teeks olukorda oluliselt paremaks.

Teise lahendusena nähti paksu rõngastihendit, mille oleks saanud kondensaatori peale venitada. Küll aga ei leitud sobivat tihendit ja eritellimusel tihendi tellimine on üsnagi kulukas ning ei tasuks end ära.

Lahendus, mille teed mindi, oli seljakoti põhja tihendi asukohtade markeerimine. Selle lahenduse eelis oli see, et olemasolevat protsessi ei muudetud olulisel määral ning tarnijal on nende tootmisprotsessist tulenevalt markeeringute lisamine äärmiselt lihtne.

Joonis 5.3 näitab mainitud markeeringut päris tootel ja osutab sellele punase noolega.



Joonis 5.3 Kondensaatorite pehmeduste positsiooni markeering

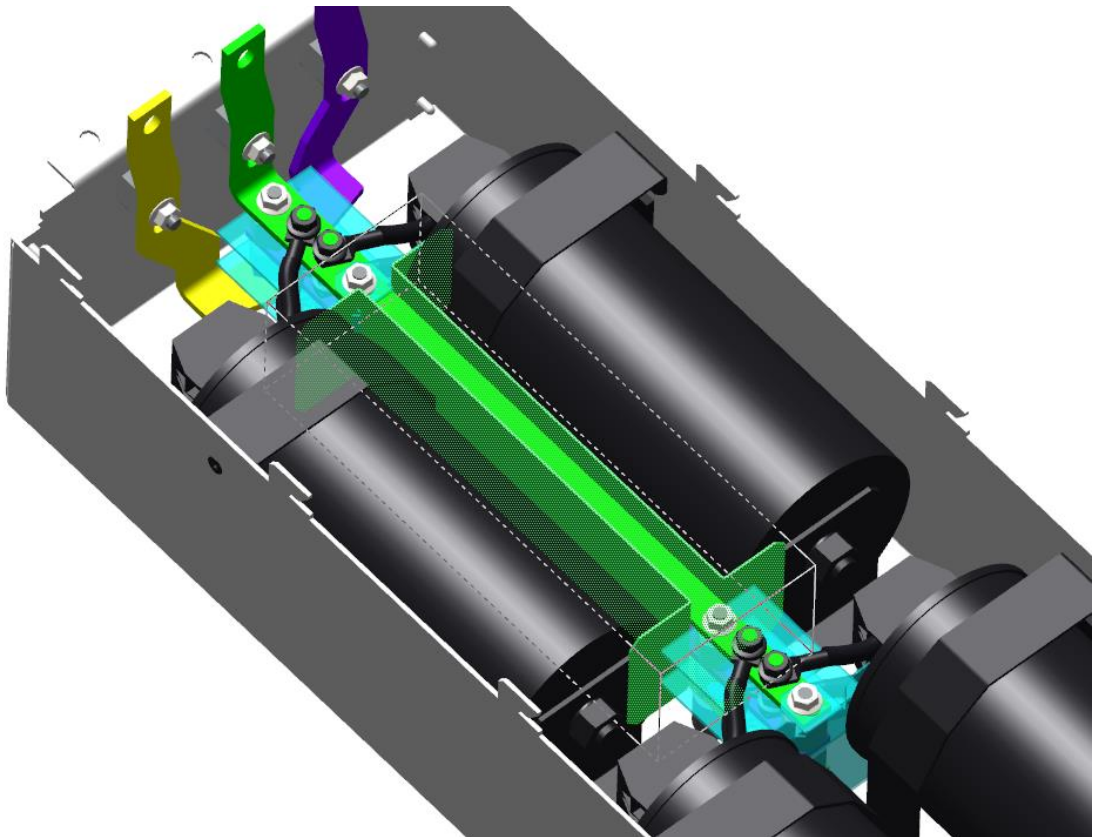
5.4 Kondensaatoritevaheline PC leht

Kõnealune PC leht väldib lühise tekkimist voolulati ja kondensaatori kere vahel. Selle esialgne kuju oli selline, et kuigi teda oli keerulisem paigaldada valet pidi, oli see piisava jõu kasutamisel võimalik. Sedasi paigaldatud PC lehe tõttu võis tekkida kaarleek voolulati ja kondensaatori kere vahel, mis oleks kulmineerinud

- paremal juhul lekkevoolu veaga ja moodul oleks automaatselt välja lülitatud, või
- halvemal juhul kondensaatori plahvatamisega.

Riski võis lihtsasti vähendada, muutes PC lehe kas ilmselgelt asümmeetriliseks, et seda poleks olnud võimalik valet pidi paigaldada, või sümmeetriliseks, et mõlemat pidi paigaldades oleks see õiget pidi.

Kuna sümmeetriline komponent vähendas riski tõhusamalt ja kuna mõlema muudatuse tegemine nõudis sama palju ressursse, siis mindi sümmeetrilise PC lehe teed.



Joonis 5.4 Sümmeetriline kondensaatoritevaheline PC leht esiletõstetuna seljakotis

5.5 Kondensaatorite kaablid

Kondensaatorite kaablite paigaldamine oli keeruline kahel põhjusel:

1. Neid läbiva voolu tõttu pidi nende ristlõike pindala olema suur. Suurem läbimõõt aga tähendab suuremat jäikust.
2. See, et nad olid lühikesed, tähendas, et ei olnud palju „mänguruumi“ nende painutamiseks.

Olukorra parendamiseks leiti optimaalsed pikkused kaablitele. Kuna parempoolsete kondensaatorite kaablite kinnituskohad oli kondensaatoritele lähemal, ei leitud sobivat pikkust, mis sobiks ka vasakpoolsetele kondensaatoritele. Selle tulemusena tehti kaks eraldi kaablit, mis erinesid vaid pikkuse poolest ning sedagi vaid 8 mm. Et kaableid oleks lihtne eristada, lisati kaabli isolatsioonile ka vastavad tähised „*Short*“ ja „*Long*“.

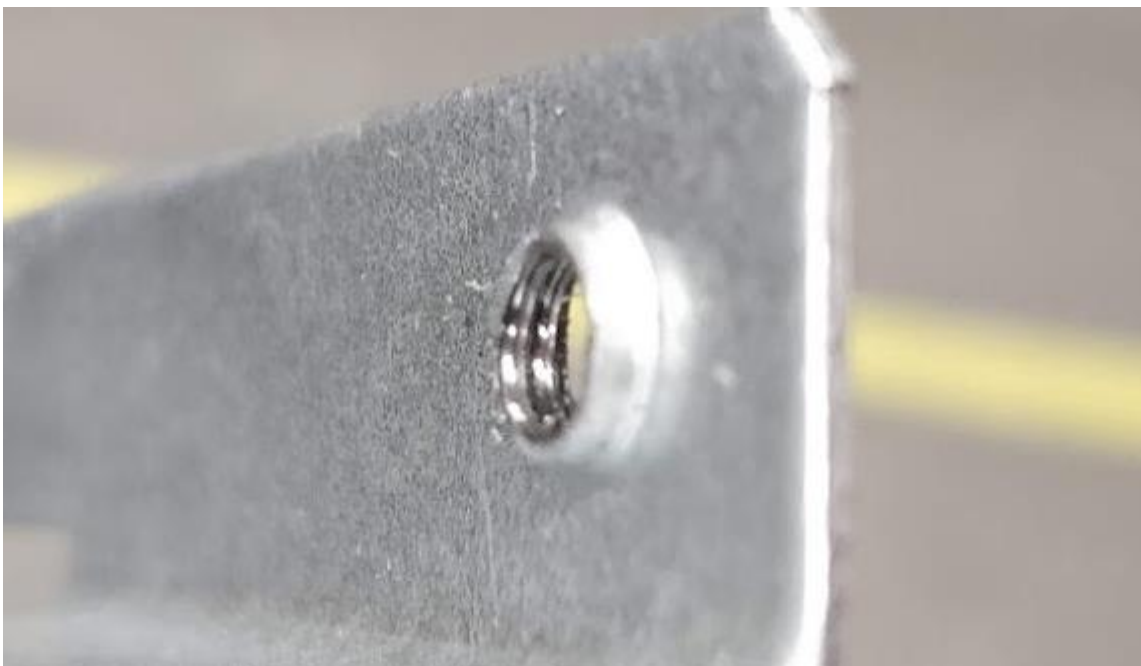
6 MOODULI JAHUTAMINE

Moodulite jahutuse parendamine oli tegelikult alus ka ühele paralleelprojektile, mis hõlmas ventilaatorist tuleva õhuvoolu suunamist ka läbi kondensaatorite seljakoti. Muuhulgas oli ka välja vahetatud 1X mooduli ventilaator, mis ei vajanud enam välist kondensaatorit.

6.1 Ventilaatori korpuse neetimine

Ventilaatori koost, nii 1X kui 2X moodulil, oli kokku pandud nii kruvidega kui ka neetidega. Autori silmis olid kruvid eelistatumad, kuna neid on võimalik lihtsama vaevaga lahti teha ja uuesti kinnitada, kui peaks selleks vajadus tekkima, nii tehases tootmise kui hiljem kliendi juures hoolduse käigus.

Kruvide miinuseks aga on keerme olemasolu ja kvaliteet. Kui neetimisel piisab vaid lihtsast august, peab kruvi kasutamisel augu tegema selliselt, et oleks võimalik augu seinu keermestada, ehk tegema n-ö *drawhole*'i ja selle ära keermestama. Materjali enda paksus suuresti dikteerib, kui kõrge tuleb *drawhole*'i koonus. Koonuse kõrgus on kriitiline, kuna liiga madala koonuse puhul jääb kruvi hoidma vähema kui kolme keerme jagu, mis on kõige väiksem arv keermeid lubatud. Joonis 6.1 näitab liiga väheste keermetega (2 keeret) koonuse kõrgust.



Joonis 6.1 Keermestatud *drawhole*

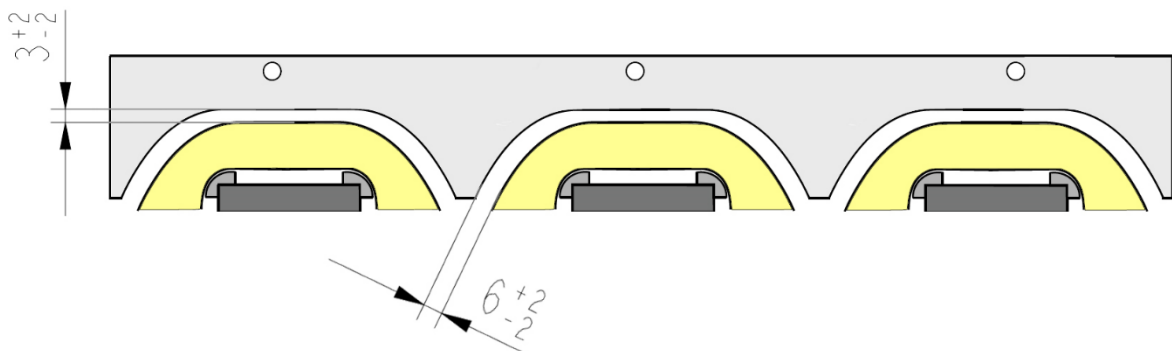
Lisaks keermete arvule on ka oluline keermete kvaliteet. See tähendab, et keermete väiksem ja suurem diameeter peavad olema tolerantsides. *Drawhole*'ide puhul on kerge eksida just väiksema diameetri tolerantside vastu, kunagi need pannakse suuremalt jaolt paika *drawhole*'i tehes. Seda protsessi on keerulisem kontrollida kui keermestamist. Suurem diameeter sõltub keermestamise protsessist, seega suurem diameeter väljub tolerantsidest harva.

Filtermooduli ventilaatorite alamkoostudel üritati asendada neetimist kruvidega, kuid liiga õhukese materjali tõttu polnud võimalik tekitada piisava kõrgusega koonust keermestamiseks. Seega kasutati kruve seal, kus see oli võimalik. Mujal jäid needid kasutusele.

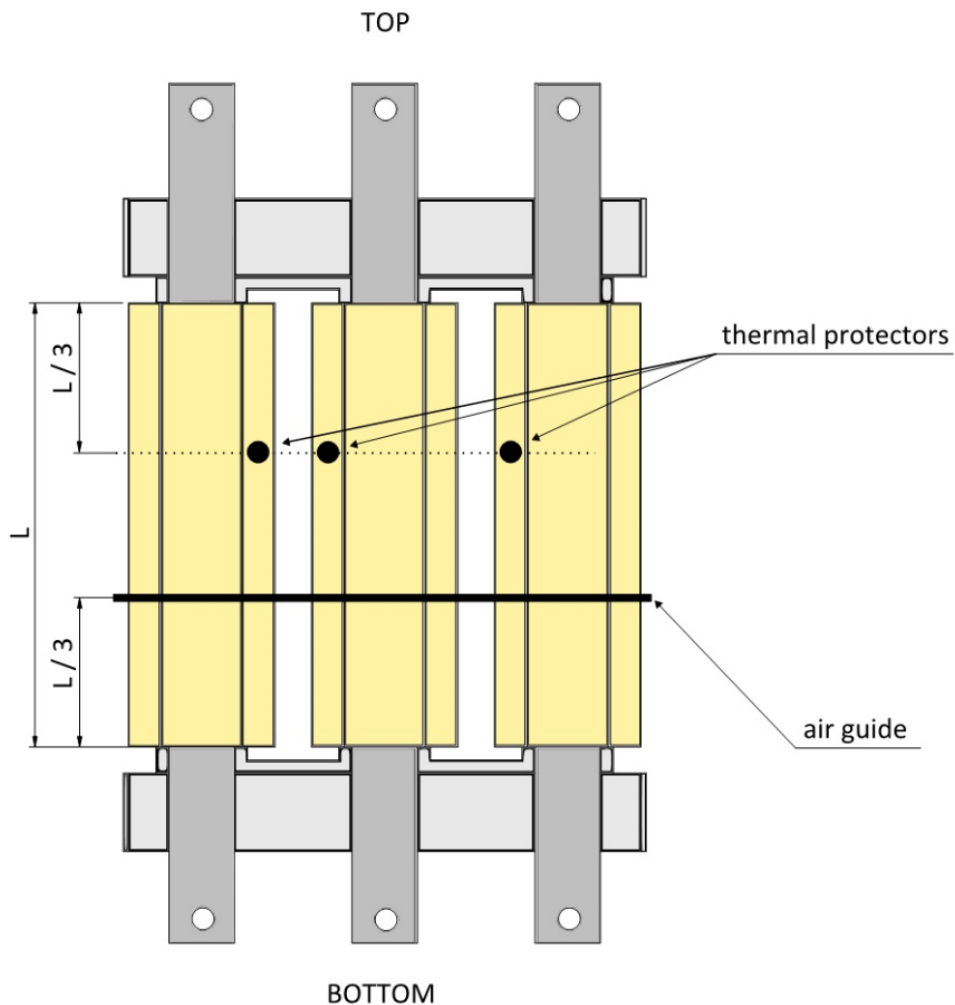
6.2 Õhusuunajate tähtsus

Et optimeerida mooduli jahutust, kasutatakse õhusuunajaid, mis suunavad ventilaatori tekitatud õhuvoolu võimalikult lähedale vastu pooli pinda. Ehituslikult on nad kui plastist tammid, mida on võimalik paberkääridega lõigata.

Oluline nende puhul on nende poolt tekitatud õhuvähe poolidega ning nende asetus piki poole. Joonis 6.2 näitab, kui rangelt on õhuvähe õhusuunajate kaugus poolide pinnast reguleeritud. Joonis 6.3 täpsustab õhusuunajate positsiooni ka piki poole. Kuna õhusuunajad on üllatavalt rangelt reguleeritud, siis võib sellest järeldada ka nende olulisust jahutamisel ja pikemas perspektiivis ka kogu mooduli eluea pikkust.



Joonis 6.2 Õhusuunajate kaugus poolide pinnast



Joonis 6.3 Õhusuunajate (*air guide*) ja temperatuurilülitite (*thermal protectors*) positsioneerimine piki poole

6.2.1 Õhusuunajad tarnijalt

Poolide pakke on 28 erinevat tüüpi ning kuigi nad on kõik pealtnäha sarnased, on kõik erinevate mõõtmetega. Lisaks, on pakkide kuju ülevalt ja alt erinevad, seega igal pakil peaks olema kaks erinevat õhusuunajat. Seega peaks õhusuunajaid olema 56 erinevat, mis omakorda tähendaks, et liinil materjalide riulil peab olema ruumi 56 erineva materjali jaoks ning montöör peab alati nende 56 seast valima välja õige. Lisaks, ka kaks ühte tüüpi poolide pakki ei pruugi olla samade mõõtmetega, mis tekitaks vajaduse käsitsi kohandamiseks.

Esmalt mindi seda teed, et tarnija, kes koostab poolide paki, lõikab ka täpselt selle pakiga kokku sobiva õhusuunaja ning pakendab selle koos poolide pakiga. Kahjuks aga juba esimesena tarnitud pakkidel olid sobimatud suunajad kaasa pakitud. See näitas, et tarnija ei olnud suuteline ülesandega toime tulema.

6.2.2 Õhusuunajate kohandamine montaaži käigus

Teisena prooviti sarnaseid pakke kokku koondada ja luua nende õhusuunajate jaoks ühine toorik, mida montaaži käigus sai vajadusel minimaalse vaevaga kohandada. Leiti, et tegelikkuses ei kujunenudki poolid oma mõõtmetelt niivõrd erinevaks ning kirjeldatud lahendus osutuski seeläbi kõige mõistlikumaks.

6.2.3 Õhusuunajate positsioneerimine

Algse disaini järgi olid õhusuunajad sümmeetrilised, mis võimaldas suunajaid paigaldada küljeplaatide külge mõlemat pidi. Lisaks olid kinnitusavad piklikud ovaalid, mis võimaldasid palju erinevaid positsioone saavutada piki poole. Joonis 6.4 näitab õhusuunajat. Suur positsioneerimise vabadus toob aga tootmisliinil endaga kaasa suure võimaluse paigaldada õhusuunajad valesse positsiooni. Otsiti võimalust, kuidas vähendada õhusuunajate valesti positsioneerimist.

Joonis 6.3 sätestab õhusuunajate asukoha piki poole. Kuna poolid on erinevate pikkustega, kõige lühem pikkusega 400 mm ja kõige pikem 610 mm, pidi olema võimalik positsioneerida õhusuunajad alati 1/3 pikkuse peale. Kuna ei olnud otstarbekas hakata hoidma tootmisliini riulis iga poolide paki jaoks eraldi õhusuunajaid, siis otsustati jätta positsioneerimine montööride endi kontrollida.



Joonis 6.4 Õhusuunaja küljeplaadile kinnitatuna

6.3 Kaablite kinnitused

Ventilaatori koostu kuulus ka mitmeid kaableid, 3 peamist pistikut ja valikulise lisafunktsioonina ka kütteelement.

Kütteelement kinnitati lehtmetailist korpuse külge mugavate plastikust kinnitustega. Nende mugavus seisnes selles, et neid oli lihtne kinnitada korpuse külge, neid oli vajadusel lihtne sealt eemaldada ning kütteelementi oli lihtne nendesse kinnitada.

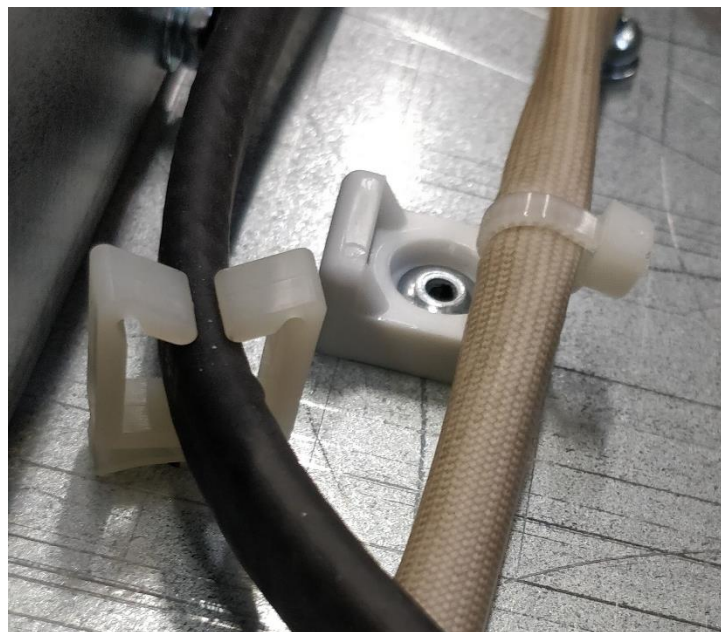
Kaablite kinnitamiseks korpuse külge kasutati kolme osa:

1. kaabliside kinnitus, mis kinnitati korpuse külge poldiga
2. kaabliside
3. polt/neet

Oli selge, et kütteelemendi kinnitamiseks kasutatud vahend oli parem, kuna koosnes vähematest osadest, selle kinnitamiseks polnud tarvis tööriista ja seda oli montaaži käigus kiirem kasutada.

Kui otsiti põhjust, miks kaablite kinnitamiseks nähti algselt ette kaablisidet, siis vastuseks oli lihtsalt, et toote algse disaini eest vastutav insener ei tulnud mõttele kasutada kütteelemendis kasutatud kinnitusvahendit. Kuna puudus hea põhjendus, oli kinnitusvahendi vahetus lihtsasti teostatav.

Joonis 6.5 näitab kumbagi kinnitusvahendit.

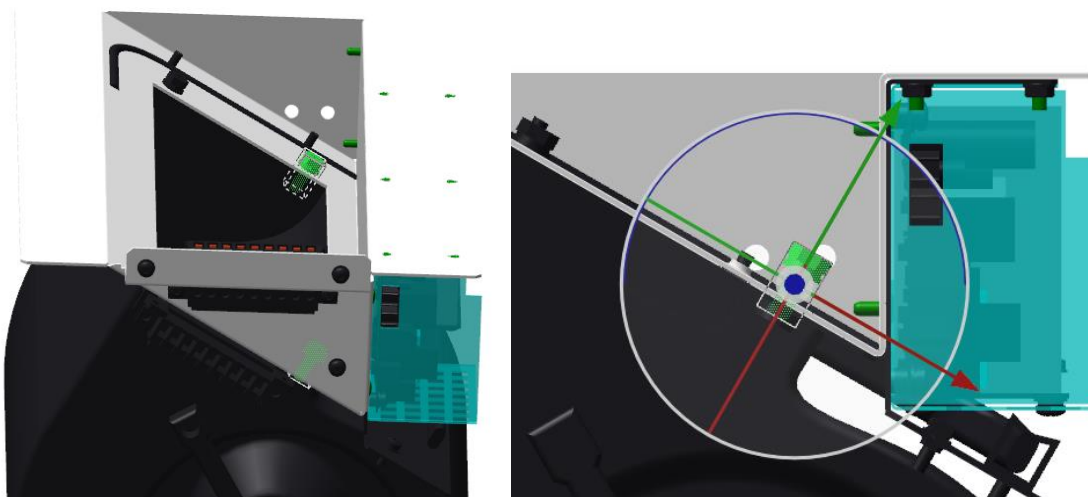


Joonis 6.5 Ventilaatori alamkoostu kaablite kinnitusvahendid. Vasakpoolne, musta isolatsiooniga kütteelemendi kinnitus, oli eelistatud parempoolse, heleda klaaskiudisolatsiooniga kaabli kinnituse, ees.

6.4 2X ventilaatori kinnitus

Ventilaatori koost libistatakse moodulisse ettenähtud sahtlisse. Seda saab ka hõlpsasti töötaval moodulil välja vahetada. Sahtlis libisemiseks on ventilaatori korpusel krae, millele kinnitatakse ka trükkplaat ja kontaktor.

2X mooduli ventilaator kinnitatakse krae külge nelja kruviga. Need kruvid tuleb kinnitada aga nurga all. Kaks neist õnnestub hõlpsasti kinnitada, kuid kahe alumise kinnitamine on mõnevõrra keerulisem, kuna ventilaatori krae jääb kinnitamisel ette.



Joonis 6.6 2X ventilaatori kinnitamine krae külge, alumised kruvid esiletõstetuna

Joonis 6.6 näitab kõnealust kahte kruvi esiletõstetuna. Parempoolsest ristlõikest on näha roheline joone näol kruvide normaaljoont, millele jääb ette krae parempoolse serv. See tähendab, et neid kruvisid pole võimalik tavalise või elektrilise kruvikeerajaga kinnitada. See viib vajaduseni kasutada ainult nende kahe kruvi jaoks eraldi tööriista.

Lean printsiipi silmas pidades peab tööriistade arv liinil olema minimaalne, kuna nii

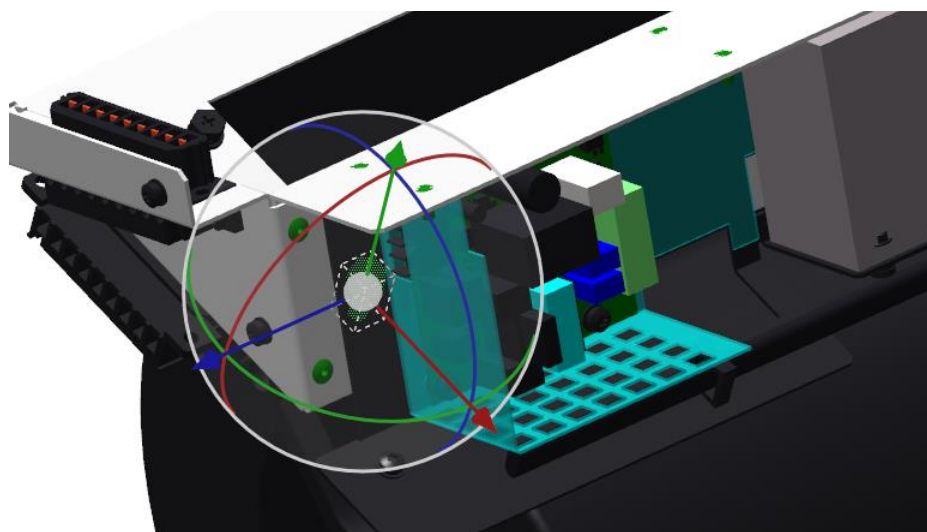
1. veedab montöör vähem aega õiget tööriista ja hiljem tööriistale õiget kohta otsides,
2. kuna ventilaatori ülemised kaks kruvi on samasugused nagu alumisedki,
 - a. poleks montööril vaja üldse tööriista vahetada ja
 - b. ei peaks liinil ruumi võtma veel üks tööriist, mida tuleb ka kalibreerida ja hooldada,
3. oleks väiksem võimalus, et montöör eksib tööriista valikuga,
4. oleks väiksem kulu tootmisliin tööriistadega täita ja
5. kui kasutada universaalseid tööriistu, siis
 - a. on suurem tõenäosus, et leidub samasugune mitte kasutuses olev tööriist

- b. tööriista varu saab olla väiksem, kuna varu saab jagada erinevate töökohtade vahel.

Oli selge, et on kasumlikum leida viis, kuidas saaks kõnealuseid kruvisid kinnitada tavalise elektrilise kruvikeerajaga ning poleks tarvis eraldi spetsiaalset tööriista ainult kahe lihtsa kruvi pärast.

Kõige tavapärasem lahendus sellistel juhtudel on alumised kruvid tõsta kõrgemale, krae nurga tagant välja, kuid kruvikohad tulenesid ventilaatori korpusest, mis tuli tarnijalt juba masstoodanguna koos ventilaatoriga kokku monteerituna. Lisaks, kasutati sama ventilaatorit mujalgi. Seda, kas muudes toodetes on sama probleem, ei uuritud, kuna juba esimene põhjus tegi muudatuse teostamise liiga keeruliseks.

Otsiti ka viise, kuidas oleks võimalik teha krae sisse ava, et kruvikeeraja otsik mahuks läbi krae seina kruvi kinnitama. Mooduli eestpoolt vaadatuna tagumise kruvi jaoks oleks see õnnestunud, kuid eesmisest kruvist teiselpool krae seina asus trükkplaat. Joonis 6.7 illustreerib seletatud olukorda.



Joonis 6.7 2X ventilaatori kinnitamine krae külge, alumine eesmine kruvi esiletõstetuna

Kuigi tehniliselt oleks trükkplaadi liigutamine kaugemale olnud üsnagi lihtne, oleks vajaminev 25 mm pikkune liigutamine viinud trükkplaadi mooduli eest otsast liiga kaugele. See tähendaks, et optiliste kaablite ühendamise trükkplaadil olevatesse pesadesse oleks muutunud oluliselt keerulisemaks. Lisaks oleks pidanud ka muid kinnitusmehhanisme, eelkõige neete, ümber tõstma, mis oleks veel muudatuse teostamisele keerukust lisanud.

Kuna ei leitud lahendust, kuidas olukorda parendada ilma muudes valdkondades karuteenet teha, otsustati jätta esialgne disain.

7 VOOLULATTIDE ALAMKOOSTUD

Voolulattide alamkoostud koostatakse moodulist väljas ning seejärel kinnitatakse mooduli külge. Kuigi mooduli erinevate tüüpide sisendlattide ja väljundlattide alamkoostud näevad sarnased välja, on need teineteisest erinevad, mistõttu esinesid neil ka erinevad puudujäägid.

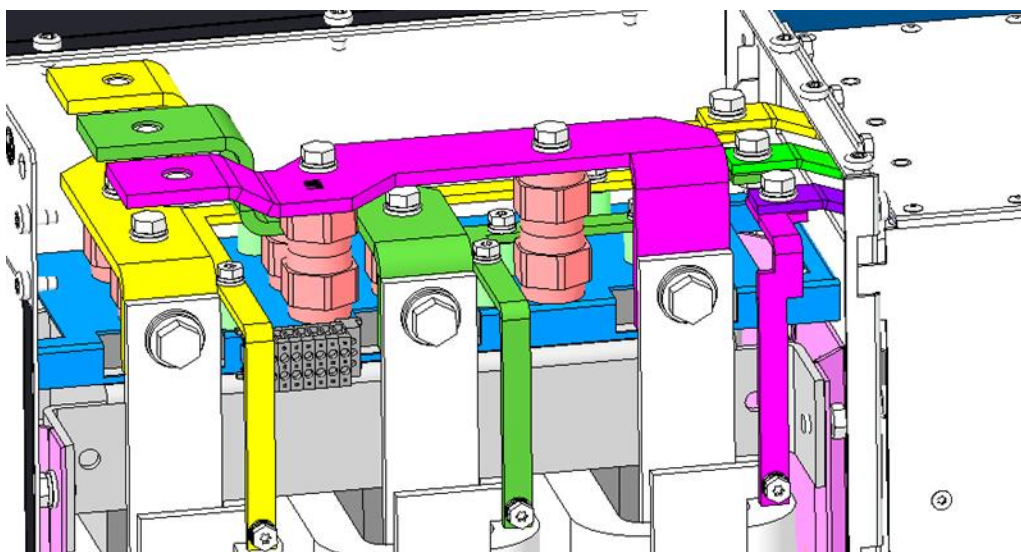
7.1 W-faasi kondensaatori voolulatt

Ainuke ühine puudujääk mõlemal mooduli tüübil oli sisendlattide alamkoostu W-faasi kondensaatori voolulatt. Kuigi ka puudujäägi olemus oli mõneti erinev.

7.1.1 1X mooduli W-faasi kondensaatori voolulatt

Probleemist aru saamiseks tuleb meeles pidada monteerimise järjekorda. Esmalt paigaldatati mooduli tagumine paneel, mille järgi positsioneeriti paispoolide pakid, mille järgi positsioneeriti sisendlattide alamkoost, kuhu kuulus ka kõnealune W-faasi kondensaatori voolulatt. Kui moodul oli seest monteeritud, suleti see kinni ülemise küljepaneeliga, peale mida oli väga raske mooduli sisemusse tööriistadega ulatuda. Alles peale ülemise küljepaneeli paigaldamist oli võimalik paigaldada kondensaatorite seljakott, peale mida oli võimalik ühendada vastavad latid mooduli ja seljakoti vahel.

W-faasi kondensaatori voolulatil oli ainult kaks ühenduse punkti – W-faasi paispool ja kondensaatorite seljakoti W-faasi latt.

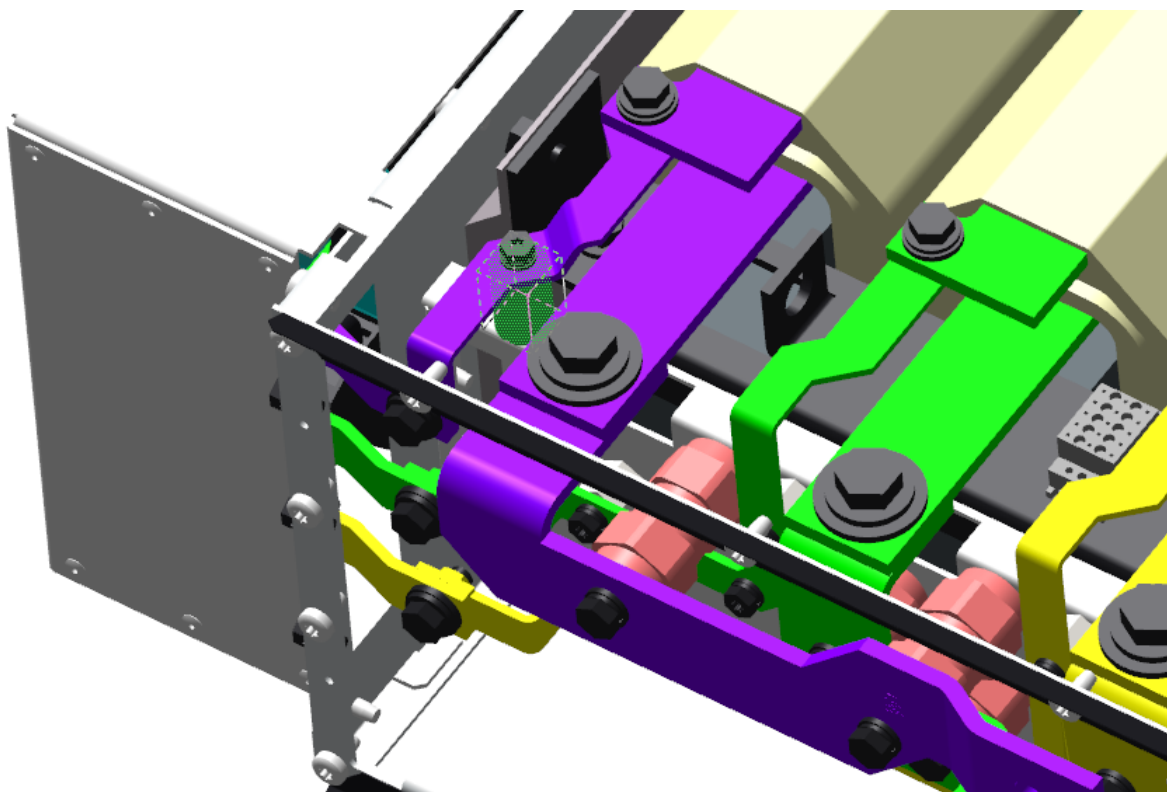


Joonis 7.1 Esialgne 1X mooduli W-faasi kondensaatori voolulati disain, väiksem vertikaalne lilla latt paremal

Lati õigesse positsiooni saamiseks on vaja teada vähemalt kahte tema ühenduskoha positsiooni. Kuna kondensaatorite seljakott paigaldati alles montaaži lõpus, ei olnud võimalik W-faasi kondensaatori latti õigesti positsioneerida koheselt, vaid alles peale seljakoti paigaldamist. Kuna seljakoti paigaldamise eelduseks oli ülemise küljepaneeli paigaldamine, mis kattis ära kõnealuse latti ühe kinnituse, polnud võimalik poolipoolset kinnitust peale küljeplaadi paigaldamist enam muuta.

See tähendas, et oli võimatu paigaldada W-faasi kondensaatori voolulatti 1X moodulil õigesti.

Lahenduseks tekitati latile juurde lisatugi, mis võimaldas latti õigesti positsioneerida ja kinnitada enne pealmise küljepaneeli paigaldamist. Joonis 7.2 näitab mainitud lisatuge esiletõstetuna.



Joonis 7.2 Parendatud 1X mooduli W-faasi kondensaatori voolulati disain, lisatugi esiletõstetuna

7.1.2 2X mooduli W-faasi kondensaatori voolulatt

2X moodulil oli sama koht juba ühe lisatoega, kuid sellega, nagu ka 1X mooduli parendatud lahendusega, kaasnes puudujääk, millest aru saamiseks tuleb meeles pidada, et sisendvoolulattide alamkoost monteeritakse moodulist väljas. See tähendas, et voolulati paigaldamisel oli seal vaid üks kinnituskoht, ümber mille sai latt pöörelda. Joonis 7.3 illustreerib latti pöörlemist ümber oma ainsa kinnituskoha. Kruvi kinni

keeramisel haaras kruvi pöörlemine latti endaga kaasa pöörlema tõmbama, mis tegi lati õige positsiooni saavutamise äärmiselt keeruliseks, kuna latti tuli ühe käega õiges asendis hoida. Isegi, kui ebatäpne lõplik positsioon poleks kujutanud endast suuremat probleemi, oli kirjeldatud tegevus montöörile ohtlik, kuna latt oleks võinud pöörlema hakata ootamatult ning võinuks vigastada montööri sõrmi.

Olgu öeldud, et tagasi 1X mooduli juurde minnes, oli parendatud versioonil sama viga, aga seal puudus hea lahendus puudujäägi vältimiseks. Kuna 1X moodulil on see latt ülevalt hõlpsasti paigaldatav, siis muudeti montaaži järjekorda ning W-faasi kondensaatori voolulatti hakati paigaldama peale sisendlattide alamkoostu paigaldamist moodulisse. Nii saab kõnealuse voolulati paigaldada kohe ohutult ja mugavalt õigesse asendisse.

2X moodulil

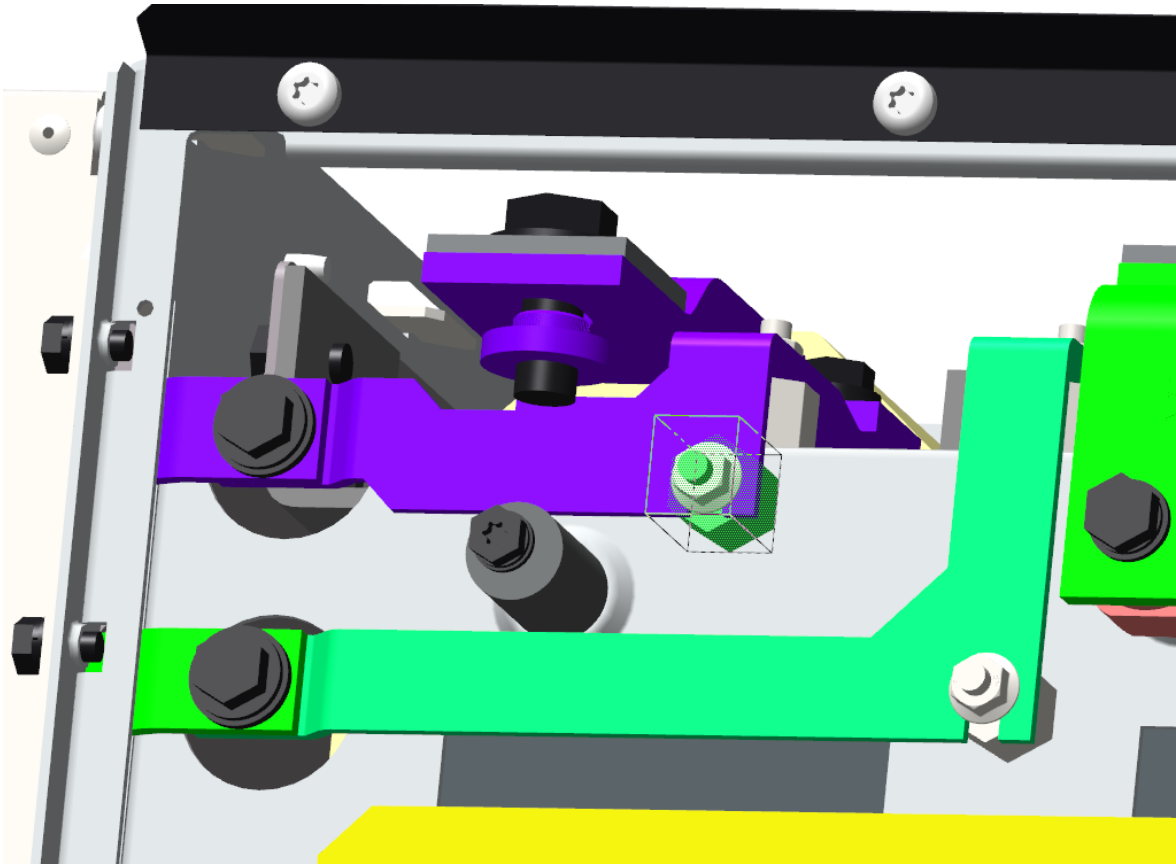
- oli kirjeldatud lati paigaldamine peale sisendlattide alamkoostu paigaldamist moodulisse raskendatud ja
- leidis lihtne lahendus,

seega otsustati olemasolevat lahendust parendada.



Joonis 7.3 Esialgne 2X mooduli W-faasi kondensaatori voolulati disain

Mainitud lihtne lahendus seisnes jällegi lisatõe loomises. Joonis 7.4 näitab esiletõstetuna lisatud isolaatorpuksi, mis täitis lisatõe funktsiooni. See võimaldas kinnitada sisendlattide alamkoostu montaaži käigus W-faasi kondensaatori voolulati kindlalt oma lõplikusse positsiooni.



Joonis 7.4 2X mooduli W-faasi kondensaatori voolulatt, lisatugi esiletõstetuna

7.2 2X mooduli kondensaatori voolulattide kinnitamine

Eelnevate alapeatükkide joonistelt võis silma torgata, et 1X mooduli U- ja V-faasi kondensaatorite voolulattid paigaldati kruvidega ja ühest suunast, aga 2X mooduli kõik kondensaatori latid mutritega ja kahest erinevast suunast. See tähendas, et tegelikult oli võimatu kinnitada 2X kondensaatori voolulatte, kuna kui asetada ühe isolaatorpuksi isane pool voolulatis olevast avast läbi, oli võimatu seda teises suunas asetseva isolaatorpuksiga teha.

Leiti, et 2X mooduli disaini pole võimalik teha 1X mooduliga sarnaseks, kuna 2X latid olid mõõtmetelt suuremad ja varem teostatud vibratsioonitest näitas, et 2X moodulil peavad kõnealused latid olema kinnitatud kahest erinevast suunast, kuid 1X moodulil seda nõuet ei olnud.

Uuriti ka erinevust selle vahel, et kas kõige pealmine kinnitusvahend peaks olema mutter või kruvi.

Esimesel juhul asetseks isolaatorpuks isase poolega lati poole, mis tähendaks, et

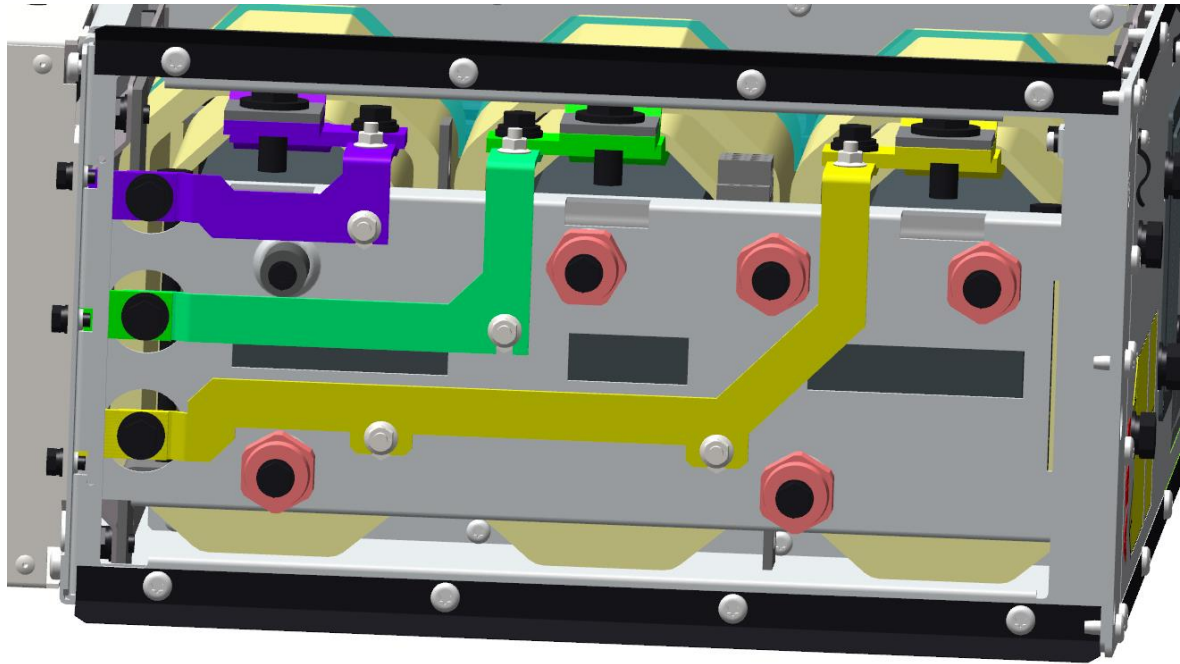
- latti saaks asetsema enne kinnitamist juba õigesse positsiooni,
- kruvide kinnikeeramisel oleks lati liikumine piiratud, mis tähendaks, et
 - montöör vajaks kruvimisel vaid ühte kätt ja
 - puuduks vajadus kruvid esialgu kõik sisestada keermesse ja peale seda kõik kruvid lõpuni keerata, eesmärgiga hoida latti kruvimisel vältel asendis, kus oleks kõiki kruve võimalik kinnitada,
- isolaatorpuksi kinnitamiseks lehtmetsi külge kasutatakse presspolti, mis tundus olevat kindlam kinnitusviis keermestatud *drawhole*'ist (pressmutri kasutus polnud võimalik, kuna see oleks jätnud liiga väikse õhuga lehtmetsi taga olevale poolide paki fikstuurile). Presspolti kasutamine aga tähendas, et lehtmetsi paksuse pidi tõstma 1,5 mm pealt 2 mm peale, kuid see ei esitanud suuremaid väljakutseid.

Kui pealmine kinnitusvahend oleks kruvi, siis ülalmainitud eeliseid ei oleks. Küll aga see tähendas, et 2X mooduli kondensaatori voolulatte polnud võimalik kinnitada. Uuriti ka erinevate kinnitusvahendite kombinatsiooni, kus ühel suunal asetseksid kruvid ja teisel mutrid, kuid see oleks tähendanud, et montöör peab 2 ülemäärast tööriista või otsiku vahetust tegema.

Et 2X sisendlatte oleks võimalik kinnitada, tehti aga lattidele sisselõiked, mis ulatusid kinnitusavast ääreni. Joonis 7.4 näitab selgelt mainitud sisselõiget V-faasi latil. See muudatus küll tõstis vähesel määral lati tootmise hinda, kuid sellise lahendusega oli latte kõige hõlpsam paigaldada.

Sisselõigete tulemusena võis aga väheneda vooluhulk, mida latt oli võimeline kandma. Et vältida lati ülekuumenemist ja liigset elektrivoolu takistamist, tekitati V- ja W-faasi lattidele sujuvam sisenuk. U-faasi latil puudus täisnurk sisselõike juures, seega puudus vajadus sellele veel sisenuka materjali lisada.

Joonis 7.5 näitab uuendatud kondensaatori voolulatte peakoostus.

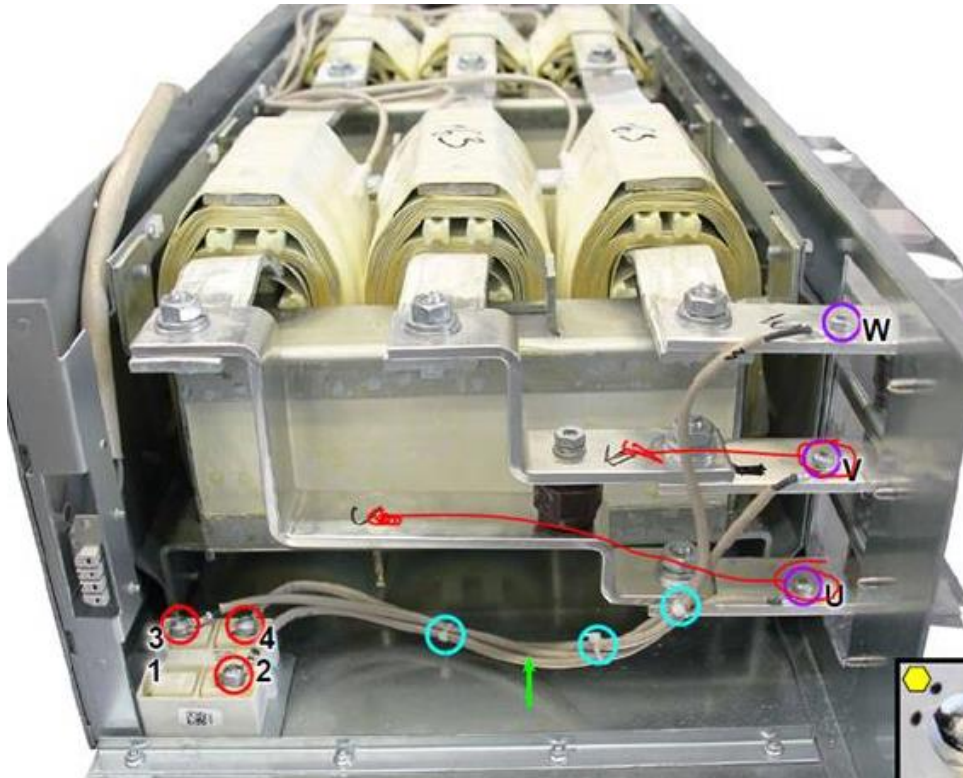


Joonis 7.5 Uuendatud 2X kondensaatori voolulatifid, peavoolulatifid eemaldatuna

7.3 Mahalaadimistakisti kaablite kinnitamine väljundlattidele

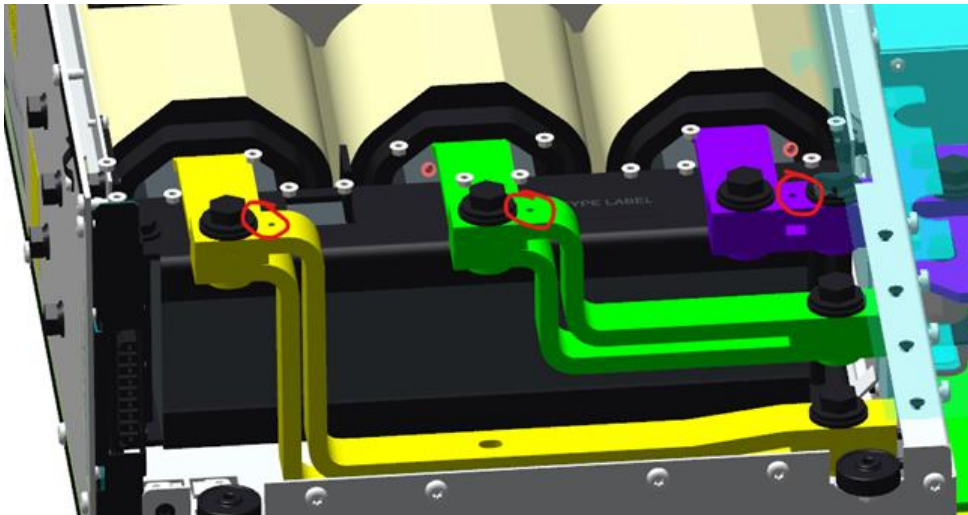
Mahalaadimistakisti kaablid kinnitati kruviga otse väljundvoolulattidele, mille sisse olid tehtud keermestatud avad.

Algselt olid mainitud keermestatud avad 1X moodulil kõige välimise lati peal, mis oli identne komponent kõigil kolmel faasil. See aga tähendas, et avad olid täpselt üksteise kohal, mis tähendas, et ülevalt oli ligipääsetav vaid kõige ülemise lati, W-faasi lati ava. Kahele alumisele poleks pääsenud tavalise kruvikeerajaga ligi, vaid oleks pidanud kasutama narret või lehtvõtit, mis on aeglasemad tööriistad või raskemat, 90-kraadise nurgaga kruvikeerajat. Joonis 7.6 näitab, kus mainitud kinnituskohad olid ning kuhu need liigutati. Olgu öeldud, et kuna kõige välimised latid olid kõikidel faasidel samad ja W-faasi kinnitusava asuski välimisel latil, siis ava jäi kõigi kolme välimise latile alles. Selles ei nähtud suurt probleemi, kuna loodeti korrektsetele koostamisjuhenditele, et neid kaableid ei kinnitata valesse avasse.



Joonis 7.6 1X mooduli mahalaadimistakisti kaablite kinnituskohad väljundlattel

2X moodulil olid kõnealused avad üleval, peakinnituste juures. Need olid lihtsasti ülevalt ligipääsetavad. Joonis 7.7 osutab punaste ringidega, kus asusid 2X moodulil mainitud kinnitusavad.



Joonis 7.7 2X mooduli mahalaadimistakisti kaablite kinnituskohad väljundlattel

8 TÖÖRIISTADE JA VÄIKETARVIKUTE VALIK

Lean mõtteviisi järgi peab montaažiks vajaminevate tööriistade ja erinevate väiketarvikute arv peab olema võimalikult minimaalne. See tähendab, et ideaalne toode justkui käiks kokku nulli tööriista ja nulli väiketarvikuga. Reaalsuses aga pole selline lahendus kõige parem ning tööriistade ja väiketarvikute kasutamine on möödapääsmatu. Antud toodet ei ole ka otstarbekas kokku panna ka ainult ühe tööriista ja väiketarvikuga, kuna kõige väiksem poldi suurus, mis kõikidele tugevusnõuetele vastaks, on M12 ning pole otstarbekas kasutada nii suurt polti näiteks kaablite kinnitamiseks terminali. Seega tööriistade ja väiketarvikute valikut tehes peab leidma kuldse kesktee otstarbekuse, koostamismugavuse ja füüsilise mahu vahel. Veel keerulisemaks teeb selle leidmise võimaluste hulk, kuna erinevaid sobivaid väiketarvikuid ja tööriista/otsiku kombinatsioone on mitmeid, mis teeb kõige optimaalsema lahenduse ressursimahukaks uuringuks.

Antud projekti käigus mindi ükshaaval üle kõik väiketarvikud, määrati neile kinnitamise moment ja kõige lõpuks tööriista/otsiku kombinatsioon. Keeruline on öelda, mitu erinevat väiketarvikut oli kasutusel enne projekti, kuna

- füüsilised, tarnija juures kokkupandud moodulitel oli kasutusel ettenähtust erinevad väiketarvikud ja
- andmed esialgselt ettenähtud väiketarvikute kohta on kadunud.

Enamasti oli väiketarvikute ühtlustamine lihtne, et muudeti poldi pikkust, diameetrit, pea tüüpi ja/või kinnitamiseks kasutatavat momenti, kuid lõputöö autor soovib välja tuua mõned ilmekamad näited. Alustada tuli aga peamiselt kasutatavatest tööriista tüüpidest.

8.1 Elektrilised kruvikeerajad

8.1.1 „Porgandid“ on eelistatud

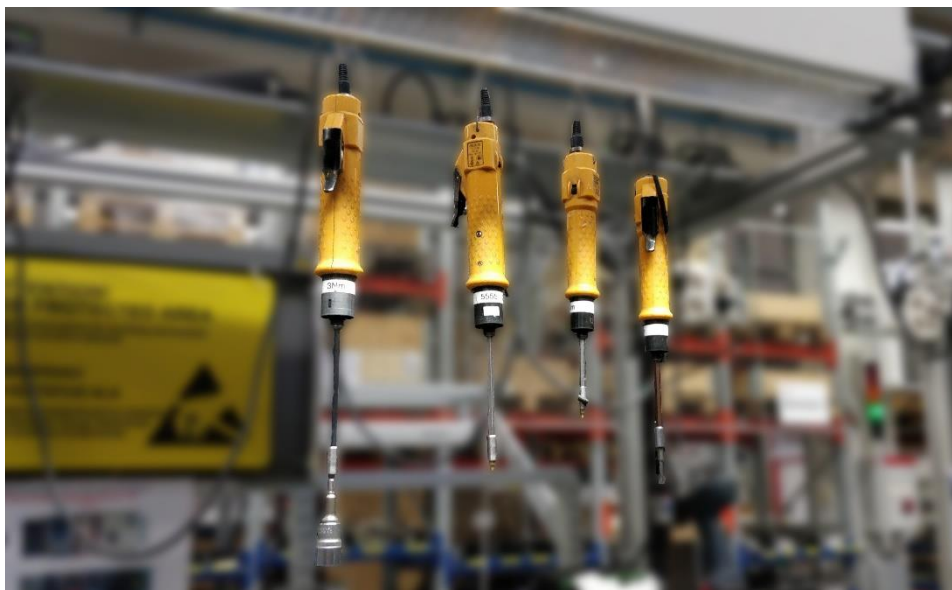
Kuigi montööride sõnul on kõige mugavamateks tööriistadeks automaatselt tagasikeriva trossi otsas ripuvad sirged elektrilised kruvikeerajad ehk „porgandid“, oli nende kasutamine antud mooduli kokkupaneku puhul limiteeritud. Piiravateks faktoriteks said asjaolud, et

- kuigi mooduli põhiühendusi sai teha põhikoostus ülevalt alla, olid need põhiühendused tihtipeale suurema kinnitusemomendiga kui 5 Nm, mis on „porgandi“ ülemiseks piiriks,
- ja paljud alla 5 Nm ühendustest ei olnud ülevalt alla suunaga.

Siiski oli võimalik kasutada „porgandeid“ näiteks alumiste õhusuunajate kinnitamiseks alumise küljeplaadi külge või mahalaadimistakisti kaableid väljundlattice külge.

Olgu ka mainitud, et „porgandeid“ tehakse ka pneumaatilisi, mida kasutati teisel tootmisliinil näiteks 20 Nm ühenduse loomiseks. Küll aga on pneumaatiliste tööriistade puuduseks nende täpsus ja ka täpsuse varieeruvus, mis sõltub suuresti suruõhu rõhust, mida on keeruline hoida konstantsena. Laias laastus on nende täpsus rahuldav, kui luuakse mehaanilisi ühendusi, kuid elektrooniliste ühenduste loomiseks, näiteks kahe voolulati ühendamiseks, on vaja täpsemat tööriista, kuna liiga nõrk ühendus viib lokaalse ülekuumenemiseni, mis lühendab märkimisväärselt toote eluiga, ning liiga tugev ühendus võib ülekoormamisel teel nõrgestada kinnitatavaid osi.

Joonis 8.1 illustreerib tööjaama kohal rippuvaid elektri toitel töötavaid „porgandeid“. Neid üleval hoidev pöördvedru ja trossi süsteem on jäänud kaadrist välja.



Joonis 8.1 "Porgandid" rippumas tööjaama kohal

8.1.2 Püstolikujulised elektrilised kruvikeerajad

Alternatiivina „porganditele“ kasutati püstolikujulisi elektrilisi kruvikeerajaid. Erinevalt „porganditest“ ei rippunud nad trossi küljes liini kohal, vaid neid sai käes hoida nagu püstolit, mis võimaldas neil igas suunas ja asendis kruvida.

Miinuseks aga olid kõnealused kruvikeerajad „porganditest“ palju raskemad ja kuna nad ei ripunud trossi otsas, pidi montööri käsi ainsana nende raskust kandma. Lisaks, kuna nad töötasid aku toitel, oli vajalik soetada akude laadimiseks laadimisjaamad ning nendele tootmisliinil leida koht ja elektripistik. Ka hoolduskulud on aku toitel tööriistadel kõrgemad just akude pärast, mida tuleb aeg-ajalt välja vahetada. Kõige lõpuks on akudega probleem, et need võetakse kasutusele kõrval asuva tootmisliini poolt ja jäävadki niimoodi esialgsel tootmisliinil kadunuks.

Ehk kõikjal, kus vähegi võimalik, on parem kasutada „porgandeid“, kuid kui muud ei jää üle, tuleb kasutada püstolikujulisi akutööriistu.

Joonis 8.2 näitab Bosch'i kõnealust kruvikeerajat.



Joonis 8.2 Püstolikujuline elektriline kruvikeeraja

8.1.3 Targad tööriistad

Targad tööriistad erinevad teistest eelkõige hinna, täpsuse ja seadistatavuse poolest. Väga suur eelis, eriti toote elueale kriitilise tähtsusega ühenduste puhul, on tarkadel tööriistadel programmeeritavus, kontrollitavus ja jälitatavus.

Näiteks on võimalik nendega luua kindel ühenduste loomise järjekord, kuid see võib ka erinevatel toodetel erineda. Näiteks tootel A luuakse ühendus 1 momendiga 3 Nm, ühendus 2 sama momendiga ning seejärel tuleb mõlemad ühendused üle pingutada momendini 5 Nm. Tootel B aga on neid ühendusi 3. Tooteid eristatakse kas digitaalse sisendsignaali, koodi skaneerimise vms lahenduse järgi. Mõnede tööriistadega on võimalik kohe sarnane vajadus kaheastmelise kinnitamise järele täita ühe, kahesammulise kinnitamisega, kus tehakse lühike paus sammude vahele. Nagu ka

mainitud, on võimalik ühe tööriistaga saavutada erinevaid lõppmomente. Et kui traditsiooniline elektriline kruvikeeraja lahutab oma siduri ainult seadistatud momendi juures, on võimalik ühe targa tööriistaga saavutada suurt momentide vahemikku. Samuti on võimalik valida ka keeramise kiirust ja kuidas lõppmoment täpsemalt saavutatakse. Kasutades uuemaid tehnoloogiaid on võimalik ka vähendada reaktsioonijõude montööri randmesse. Nende hulka kuuluvad näiteks Atlas Copco TurboTight [12] ja PulseTool [13] tehnoloogiad.

Paljudel tarkadel tööriistadel on võimalus ka mõõdetud momente andmebaasidesse salvestada ja hiljem tagantjärgi jälitada, kas mõnel kindlal tootel teostati kõik ühendused korrektselt. Tihtipeale on targad tööriistad aga üles seatud selliselt, et nad annavad halva ühenduse loomisel montöörile koheselt sellest teada ja käsivad ühendust uuesti luua või suunatakse tehnik ühendust uuesti looma. Sellest hoolimata on selline tagantjärgi jälitatus suurepärane viis tõestamiseks korrektselt ühenduse loomist või statistika koostamiseks, mis on aluseks kvaliteedihjeks.

Tarku tööriistu on ka väga lihtne integreerida n-ö tarkadesse tööjaamadesse, kus montööri iga tegevus on arvuti poolt juhendatud ja/või kontrollitud, et eksimuse võimalus oleks minimaalne.

Targad tööriistad tulevad erinevates kujudes, kõige levinumad on püstoli- ja võtmekujulised nii juhtmega kui juhtmevabad ja ka suruõhul töötavad tööriistad.

Nagu eelnevat lugedes võis mõista, on tarkade tööriistade kasutamisel limiteerivateks teguriteks vaid seda seadistava inseneri oskus, toetavate süsteemide võimekus ja ka seni täpsustamata hind.

Tarkade tööriistade ainsaks miinuseks ongi sisuliselt nende hind. Seda kahel erineval kujul:

1. tööriista ja toetavate süsteemide ostmise ja
2. nende ülalpidamise hind.

Autori kogemuse järgi on targad tööriistad vastavalt tootjale ja funktsionaalsusele oma traditsioonilistest teisikustest 10 kuni 50 korda kallimad. Ehk ühe targa tööriista ostuhinna eest võib osta 10 kuni 50 traditsioonilist elektroonilist kruvikeerajat. Lisaks on neid oma keerukuse tõttu keerulisem üles seada ning vajavad palju „käsi mustaks“ tegevaid inseneri töötunde. Ka montööridel on mõnevõrra keerulisem neid omaks võtta, mistõttu kulub inimressurssi ka väljaõppele.

Küll aga võimaldab tarkade tööriistade kasutusele võtmine teha paari aastaga märgatava edasihüppe tootmise statistilisele kontrollile allutamisele ja üleüldisele tootekvaliteedi kasvule.

Seega autori kogemuse järgi tasuks tarkadesse tööriistadesse investeerida tootmisettevõttel, kes soovib hüpata käimasoleva neljanda tööstusrevolutsiooni rongile.

8.2 Filtermooduli monteerimise tööjaamad

Veel enne tööriistade valikut tuli paika panna tööjaamade arv ning jagada montaažietapid nende tööjaamade vahel võrdselt laiali. Võrdsus pidi seisnema ajas, et iga tööjaam vajab enda lõigu teostamiseks sama palju aega. See nõue tuleb *lean* meetodikast. [14]

Autori kolleegi poolt tehtud simulatsiooni tulemusena selgus, et ennustatava tootmismahu täitmiseks on vaja vaid kahte-kolme montööri. Tootmisliini hakati siis disainima selliselt, et eksisteeriks režiim nii kahe montööri kui ka kolme montööri kasutamiseks. Lisaks tuli ka arvestada eraldi ventilaatori alamkoostude ja kondensaatorite seljakoti tootmisega, kuna neid tuli koostama hakata ka varuosadena. Tulemusena hakkas tootmisliin koosnema kolmest osast:

1. põhikoostu esimene faas,
2. põhikoostu teine faas ja
3. varuosade faas (ventilaatori alamkoost ja kondensaatori seljakott).

Sellise süsteemiga sai tootmisliini kasutada kas ühe, kahe või kolme montööriga:

1. ühe montööri puhul teeb üks montöör kogu mooduli ise valmis;
2. kahe montööri korral teeb
 - a. esimese tööjaama montöör valmis suurema osa põhikoostust ja
 - b. teise tööjaama montöör koostab varuosad ja lõpetab esimese montööri poolt lõpetamata tegevused;
3. ning kolme montööri korral teeb
 - a. esimese tööjaama montöör pool peakoostu,

- b. teise tööjaama montöör teise poole peakoostust ja
- c. varuosade tööjaama montöör teeb varuosad.

Selline jaotus andis võimaluse seadistada liini võimekust vastavalt nõudlusele.

8.3 Filtermooduli monteerimise tööriistade valik

Projekti eelarvesse mahtus vaid üks tark tööriist. Ohutust ja toote eluiga silmas pidades otsustati tarka tööriista kasutada peamiste elektriühenduste loomisel, mis olid ühtlasi ka kõige suurema kinnitusemomendiga ühendused. Kõnealused momendid olid eelkõige 70 Nm, 42 Nm ja 20 Nm ühendused. Autoril oli tarkade tööriistade tootjatest kogemus vaid Atlas Copco'ga, seega uuriti nende toodetud tööriistu. Kuna aga soovitud lõppmoment varieerus ühenduste vahel 3,5-kordselt, ei leitud sobivat tööriista. Küll aga teadis autor kogemusest, et nende tööriistadega on võimalik saavutada spetsifikatsioonist allapoole jäävaid momente, kuid seda saab teha tööriista täpsuse arvelt. Atlas Copco inseneride jutu järgi on võimalik ka saavutada tööriista spetsifikatsioonist ülespoole jäävaid momente, kuid selle kohta puudub autoril kogemus.

Algselt valiti välja Atlas Copco tööriist ETP TBP-S91-80-13, mille poolt saavutatav momentide vahemik spetsifikatsiooni järgi oli 40 kuni 80 Nm, kuid testimine näitas, et rahuldava veaga +/- 0,5 Nm oli võimalik saavutada ka 20 Nm ühendusi. See aga ei pruugi alati nii olla, kuna ühenduste kõvadus varieerub palju, mis muudab ka tööriista täpsust, seega spetsifikatsioonivälisest kasutamist tuleb alati eelnevalt testida. [15]

Kuna iga erinev lõppmoment tähendas erineva otsiku kasutamist ja et vältida olukorda, kus ühendus, mis tuli teostada momendid 20 Nm, keerati tegelikkuses 70 Nm-ga kinni, telliti ka Socket Selector [16], mis töötab kui otsiku pesana ja suudab montöörile näidata, millist otsikut ta kasutama peaks. Kuna sellega oli välistatud olukord, kus montöör kasutab valet otsikut, oli seeläbi ka välistatud ka olukord, kus montöör kinnitab vale momendiga mõnda ühendust. Eelnev argument kehtib vaid olukorras, kus otsikud pannakse alati õigesse pesasse tagasi.

Kui oli selge, et 20+ Nm ühendused saab teha targa tööriistaga, tuli koondada kokku veel kõik ülejäänud momendid, et neile leida vajalikud tööriista/otsiku kombinatsioonid. Valitud tööriistade hulgas olid ka:

- pneumaatiline neetija

- 3 „porgandit“, millest üks pidi olema kinnitatud momendikompenseerija külge, et vähendada reaktsioonijõudu montööri randmesse
- pneumaatiline püstolikujuline kruvikeeraja
- 4 erinevat püstolikujulist elektrikruvikeerajat
- 2 momentvõtit (juhuks, kui tark tööriist läheb katki või pole usaldusväärne)
- 4 lehtvõtit
- erinevaid Torx, sise- ja väliskuuskandi otsikuid ning pikendusi.

8.4 Tööriistade valikust tingitud disainimuudatused

Kui selgusid täpsed tööriistad ja otsikud, käidi ühe korra veel läbi kõik ühendused, et veenduda tööriistade valikus ja et toodet oleks tõepoolest võimalik kokku panna ja seda teha võimalikult optimaalselt.

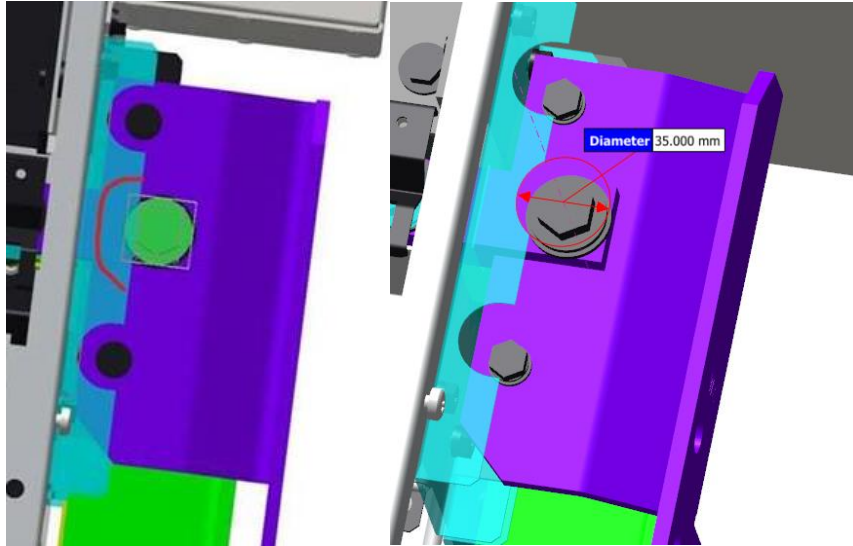
8.4.1 2X väljundlattice PC leht

Oli teada, et 70 Nm ühendused tehakse targa tööriistaga ja et nende ühenduste suurus on M12, siis sai ka valida nende ühenduste tegemiseks otsiku. Valituks osutus otsik, mille väline diameeter oli 33 mm [17]. Et otsikut oleks võimalik läbi avade mugavalt sisestada ka ava tolerantsi alumise piiri juures, võeti avade vähimaks lubatud diameetriks 36 mm, mis jättis 3 mm vaba ruumi otsiku sisestamiseks, keerlemiseks ja läbi ava välja võtmiseks.

2X mooduli väljundlattice välimiselt poolt leiti olukord, kus otsikule jääb ette PC leht. See tähendas, et ühendust oli võimalik teostada kontrollitult 70 Nm peale vaid silmusega momentvõtmega, mis on üsnagi aeglane, ebamugav ja kui on investeeritud nii kallisse tööriista, mida on tark tööriist, siis võiks seda ka kasutada maksimaalselt.

Et võimaldada targa tööriista kasutamist kõnealusel ühendusel, tehti PC lehe sisse poolkaarekujuline ava, mille keskkohas asus polti keskel ja diameeter oli 36 mm.

Sama nõue kehtis ka U ja V faaside kohta, kuid kuna kõnealune PC leht on kõigil kolmel faasil identne ja tegelikult ka sama materjalikoodi all, siis nõudis muudatust ikkagi vaid üks komponent.



Joonis 8.3 2X mooduli väljundlattide välimisel poolel targa tööriista kasutamist piirav PC leht ja sinna tehtud ava

8.4.2 1X peamised ühendused

Ainsad M10x30 ja pikemad poldid mõlemas moodulis olid 1X mooduli peaühendused, kuna 2X moodul kasutas suurema võimsuse tõttu M12 polte. Et 2X mooduli puhul oleks ulatuslikku ümberehitust vajanud M10 poltidele üleminek, siis leiti, et palju mõistlikum on 1X moodulil võtta kasutusele M12 poldid, kuna see tähendas vaid avade ja keermete suuruste muudatust, mida oli lihtne teostada.

See muudatus tähendas, et

1. väiketarvikute karpide arv tootmisliinil langes 4 karbi võrra tootmisjaama peale ehk kogu tootmisliini peale 8 karbi võrra,
2. enam ei olnud vajadust 42 Nm ühenduste tegemiseks, kuna M12 kinnitamise moment on 70 Nm, mis omakorda vähendas
 - a. tööriistade arvu liinil ühe 42 Nm momentvõtme võrra ja
 - b. targa tööriista seadistus muutus 1/3 võrra lihtsamaks, kuna polnud vaja eraldi 42 Nm seadistust.

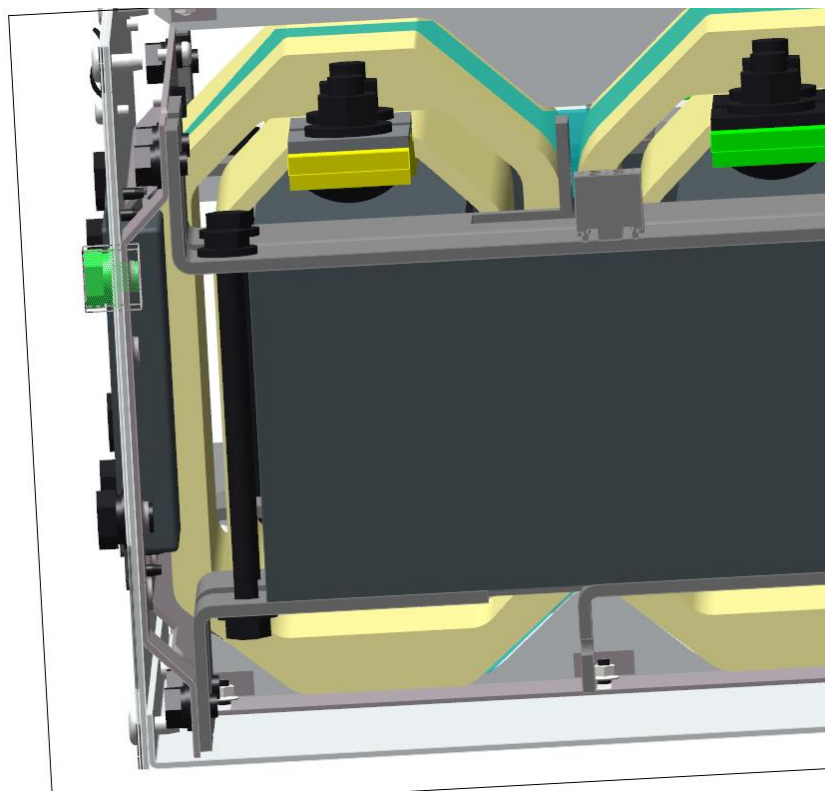
8.4.3 Poolide pakkide ühendused

Sarnaselt eelmisele punktile oli kasutatud M8x12 ja M10x12 polte vaid ühes kohas: poolide pakkide kinnitamisel esi- ja tagapaneeli külge. 1X moodul kasutas M8, 2X aga M10 polte.

Esimesena uuriti, kas polte saaks asendada mõne sellisega, mis oli kasutusel kuskil mujal moodulis. Leidus sama keermega, kuid pikemaid, ja sama pikkusega, kuid palju väiksema diameetriga keermega polte, aga mitte sobivaid. Kasutada ei õnnestunud ka pikemaid polte, kuna ruumi oli poldi saba jaoks vähe, ega väiksema diameetriga polte, kuna kõnealused poldid kandsid poolide pakkide raskuse edasi esi- ja tagapaneelile ja liiga väikse diameetriga poldid oleksid koormuse all purunenud.

Seejärel prooviti vähemalt mooduli tüüpide vahelised erinevused ühtlustada. 2X moodulis ei õnnestunud kasutada M8 polte, kuna need oleksid sel juhul ülekoormatud olnud. 1X mooduli poltide asendamine M10 poltidega ei õnnestunud aga hoopis muul põhjusel. Nimelt kasutati kõnealuseid ühendusi laevades mooduli fikseerimiseks laeva raami külge. Kõnealuse muudatuse täideviimine aga oleks tähendanud, et uued moodulid poleks enam vanemate kabinettidega kokku sobinud, hooldustöölised oleksid pidanud välja vahetama M8 tööriistad ning kõik hooldusjuhendid oleks pidanud ümber trükkima. Kuna see töö oleks tunduvat suuremaks kujunenud, oli selge, et otstarbekam on kõnealused poldid jätta muutmata.

Joonis 8.4 illustreerib 2X mooduli ristlõiget nii, et üks kõnealustest M10x12 poltidest on vasakul esile tõstetud rohelisega ja poldi saba taga olev piiratud ruum on samuti nähtaval.



Joonis 8.4 2X mooduli ristlõige

9 ÜMBRITSEVAD PROJEKTID

Kui hakatakse uut toodet tootma, tuleb uue tootega ühildada ka ümbritsevad ja tootmist toetavad süsteemid ja protsessid. See tähendas, et samal ajal oli käimas mitu erinevat projekti ja tegevust. Neist märkimisväärsed, mis ei puuduta juba käsitletut, on

- testimine,
- tootmisliini loomine,
- alusvankrite ohutumaks tegemine,
- sisend- ja väljundlattice koostamise rakis ning
- klaaskiudisolatsiooni juhtivus kõrge õhuniiskuse korral.

Autor käib mainitud ümbritsevatest projektidest üle vaid tema arvates märkimisväärsed aspektid ja millega tema kokku puutus. Selle eesmärk on näidata, et uue toote tootmisega alustamisega kaasnevad probleemid võivad esineda igas vormis ja kui oluline on modernses tootmisasutuses see, et meeskond koosneks erinevate taustadega spetsialistidest ja nendevaheline koostöö efektiivsus. Lisaks selgub järgmistes alapeatükkides, et tootmine ei ole vaid toote kokkupanek, vaid kui laia valdkonna tegevustega tuleb seejuures arvestada. Samuti ei pea piirduma X-keskse projekteerimise puhul vaid toote endaga, vaid tasub asja kaugemalt vaadata, et näha suuremat pilti.

9.1 Automaattestimine

Lõppkontrolli koha pealt on ABB Drives'i tehases äärmiselt tavaline, et testitakse kogu toode tervikuna peale kokkupanemist ja enne pakkimist ära. Mõnevõrra ebatavalisem on aga osakoostude testimine. Antud toote puhul ei hakatud testima mooduli erinevaid alamkooste tingimata eraldi, kuid eraldiseisvalt hakati testima kondensaatorite seljakotte ja ventilaatori alamkooste. Vajadus sellise testimise järgi tulenes asjaolust, et osad seljakoti ja ventilaatori alamkoostud tehakse varuosadena, ehk ainult need alamkoostud vahetatakse juba kliendi juures töös olnud moodulil välja, mitte ei vahetata sel juhul kogu moodulit.

Analoogi võib tõmmata autotööstuses näiteks mootorivahetuse koha pealt – tõsise mootoririkke korral ei vahetata terve auto välja, vaid ainult mootor. See tähendab, et mootori tootja peab peale mootori kokkupanekut testima, kas mootor on korrektselt kokku pandud ja kas ta ka töötab nii, nagu on ette nähtud. Peale seda mootor saadetakse töökohta, kus seda vajatakse, ning mehaanik teostab mootorivahetuse.

Küll aga selle analoogiga mitesobiv on asjaolu, et kui tõenäoliselt testitakse autotööstuses kõiki mootoreid eraldi, sõltumata kas need lähevad kasutusse uude autosse või asendatakse juba kasutuses auto rikkis mootor, siis kõnealusel tootel on äärmiselt lihtne ja ka märgatavalt kiirem testida koos peakoostuga neid alamkooste, mis saadetakse terve mooduliga koos. Nii teostatakse komplekse mooduli puhul ikkagi vaid üks test, mitte 3 (1 peakoostu, 1 kondensaatorite ja 1 ventilaatori alamkoostu test).

See aga teeb testrit keerulisemaks, kuna seda peab olema võimalik kasutada kolme erineva testi jaoks:

1. Komplektse mooduli test (peakoost + kondensaatori seljakoti + ventilaatori alamkoost)
2. Kondensaatori seljakoti test
3. Ventilaatori alamkoostu test

Automatiseeritud testimine on Drives'i tehases väga levinud just väiksemate toodete puhul, et

- vähendada inimese eksimisest tulenevalt vigase mooduli jõudmist kliendini,
- hoida testimise keskkonda võimalikult sarnasena läbi aja, kuni toodet toodetakse,
- vähendada testimiseks kuluvat aega ja
- et testimine oleks ohutum.

Toote lihtsust silmas pidades ei leitud ühtegi põhjust, miks ei peaks ka kõnealusele tootele ehitama automaattestrit. Lisaks saadi testri kamber, suurem osa testri riistvarast ja tarkvarast võtta kõrvaliselt tootmisliinilt, mis ei vajanud enam kahte testrit, vaid sai ühega hakkama.

Automaattestri kasutamiseks lükkab lõppkontrolli töötaja visuaalkontrolli läbinud mooduli testri kambri, teostab vajalikud ühendused, skaneerib toote seerianumbri testri arvutisse ja sulgeb kambri ukse. Seejärel käivitatakse testri tarkvara, mis otsib toodete andmebaasist seerianumbri alusel, mis tüüpi tootega on tegu, kuna erinevatel sama seeria toodetel on erinevad limiidid, mille vahele mõõtmistulemused peavad mahtuma. Toote tüübist selguvad ka kõik lisad, mis on tootele pandud, mida tuleb

samuti testida. Peale mõõtmiste teostamist kuvatakse lõppkontrolli töötajale testi tulemus:

- kui toode läbis testi edukalt, viiakse moodul pakkimisse, et saata lattu, järgmisele tootmisliinile või kliendi juurde;
- kui toode ei läbinud testi, kuvatakse läbikukkumise põhjus ja lõppkontrolli töötaja peab vigase komponendi tuvastama, välja vahetama ise või laskma seda montööril teha, ning seejärel tuleb toodet uuesti testida. Seda korratakse, kuni toode läbib testi.

Kuna toode on oma olemuselt üsna lihtne ja ka testimise tarkvara ei vajanud suuri erinevusi, saadi testri ehitamisega hakkama ilma suuremate seisakutega.

Probleem tekkis aga täpselt seal, mida pole varem tehtud – varuosade testimine.

Info toote tüübi kohta seerianumbri alusel laetakse ERP süsteemist. Igal valmistootel on tootetüüp mainitud, kuid varuosadel seisab sellel väljal vaid „*Sparepart kit*“, sõltumata sellest, mis tüüpi moodulile see varuosad kuulub. See tähendas, et seni kasutatud seose alusel ei olnud võimalik kindlaks teha varuosad tüüpi või mis moodulile see käib.

Lõputöö kirjutamise hetkeks pole veel probleem lahendatud. On arutletud selle üle, et varuosana väljasaadetavad tooted saaksid toote tüübi väljale vastava kirje, kuid see teeks katki andmevoo tervikmooduli kohta. On proovitud ka eraldi väljana vajaminevat infot sisse tuua, kuid ka see pole õnnestunud samal põhjusel nagu eelminegi väljapakutud lahendus.

See ei tähenda, et varuosadele testimist ei saa teostada, vaid et keegi peab käsitsi andmebaasi kirjutama, mis tüüpi moodulile varuosad läheb, mis on halb lahendus, kuna võimaldab teha sisestajal vigu ja nõuab liigset inimressurssi.

Lahendus, mille teed tõenäoliselt tuleb minna, on see, et andmebaas automaatselt tuvastab varuosad tehtava toote, uurib teisest andmebaasist selle tegeliku tüübi ja parandab siis toodete andmebaasis toote tüübi.

9.2 Tootmisliini loomine

Nagu eelnevalt peatükis 8.2 mainitud, oli mooduli tootmine jagatud kolmeks tööjaamaks, millest kaks koostasid peakoostu ning kolmas kondensaatorite seljakoti ja

ventilaatori alamkoostu. Et tööjaamad oleksid võimalikult efektiivsed ja ohutud, on *lean* printsiipi järgides saanud tavaks ehitada ka tootmisliini, mille peal pea- ja alamkooste koostatakse ning tööjaamade vahel liigutatakse.

Antud tootmisliini loomise muutsid keeruliseks kaks asjaolu:

1. toodete mass ja
2. asjaolu, et 1X ja 2X moodulid olid erinevate sügavustega

Tootmisliine oli tellitud pea igale moodulile, kuid mitte ükski neist pole nii palju kaalunud. See tähendas, et kuigi tootmisliini üldine kontseptsioon oli juba varasemate liinide ehitamistega paigas, tuli liini toestamine ja liikuvad osad täiesti uued valida, mis nõudsid tervikuna liini ümberdisainimist. Probleem ei ole midagi ületamatut, kuid nõuab väga palju inseneri töötunde.

Teise probleemi lahenduseks oli kaks võimalust:

1. teha liini „rööpalaius“ varieeruvaks või
2. jätta liini „rööpalaius“ fikseerituks ning kasutada aluseid toodete ühildamiseks liiniga

Esimene lahendus tundus lihtsamana, kuid teise lahenduse teed minnes oleks võimalik tellitud liinil toota ka teisi mooduleid, mida monteeritakse valdavalt ühest suunast. Kuna filtermoodul on seni kõige raskem moodul Eesti *Drives*'i tehases, siis moodulite massi taha poleks tõenäoliselt monteerimine jäänud. Oleks vaja olnud igale tootele lihtsalt enda alus teha, mis ei oleks olnud väga keeruline tegevus. Keerukus oleks selle lahenduse teostamine tulnud hoopis aluste ringluse tõttu – kui alused liiguvad toodetega tootmisliini lõppu, peavad nad kuidagi tühjana liini algusesse tagasi tulema. Lisaks, oleks vaja olnud erinevate toodete aluseid ka hoiustada ning transportida.

Otsustati minna esimese lahenduse teed, et hoida liini projekteerimise ja ehitamise kulud madalamal, kuna mainitud tegevused olid niigi juba plaanitust palju kulukamaks osutunud. Kiirustama utsitas ka tihe ajagraafik, mis soosis veelgi varieeruva „rööpalaiuse“ lahendust.

Tagasiulatuvalt tundub autorile langetatud otsus liiga kiirustatult tehtud ja tol hetkel lihtsama vastupanu teed minemisena. Lõputöö kirjutamise hetkeks on autorit köitma hakanud pigem aluste kasutamine, kõige suurema eelisena just see, et nii on ühel tootmisliinil võimalik monteerida mitmeid erinevaid tooteid.

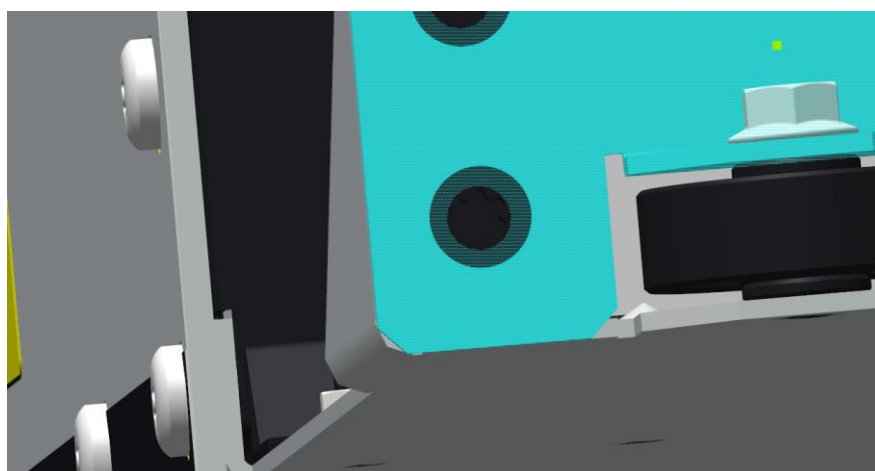
Lisas 1 oleval joonisel on näha 1X ja 2X mooduli välimisi mõõtmeid, mis ühtivad kõrguse ja seljakoti sügavuse poolest, kuid mitte moodulite endi sügavuste vahel. Lisaks on seal välja toodud, et seljakoti küljpaneelid ei asunud mooduli küljepaneeliga samas tasapinnas, mis võimaldas järgmises punktis kirjeldatud 45-kraadise nurga all olevat laagririda. Kui need oleksid asunud samas tasapinnas, siis seljakoti küljepaneel oleks takistanud kõnealuse lahenduse loomist.

9.2.1 Tootmisliinist tingitud muudatused

Liin projekteeriti selliselt, et toodet toestati kahe laagrireaga alt ja kahe laagrireaga alt nurkadest 45-kraadise nurga all. Kui esimesena mainitud kandsid lõviosa mooduli massist, siis viimastena mainitud laagriread hoidsid moodulit sirgelt mööda liini kulgemas, et vältida olukorda, kus moodul veereb liini pealt maha. 45-kraadine nurk tulenes sellest, et moodulit oli vaja küljelt toetada, kuid kogu esipaneeli kattis kleebis, mida ei tohtinud montaaži käigus rikkuda. Et moodulit küljelt toetada, aga kleebist mitte rikkuda, siis tuligi külgmised laagrid asetada 45-kraadise nurga alla.

Mooduli põhjaplaat koosnes 90-kraadiste ja ligi nullraadiusega välimiste nurkadega lehtmestallist. Kui prooviti tootmisliini prototüübil liigutada komplekteeritud moodulit, siis leiti, et mainitud põhjaplaadi liinipoolsemad nurgad takerdusid laagrite taha, mis takistas hõlpsasti moodulit liigutamast.

Joonis 9.1 illustreerib käsitletud probleemile lihtsat lahendust, kus on põhjaplaadi välimisse nurka tekitatud 45-kraadine faas. Ilma selleta oleks põhjaplaadi nurk jäänud välja ulatuma ülejäänud moodulist ning oleks liinil olevate laagrite taha kinni jäänud. Joonisel on kuvatud moodul orientatsioonis, nagu ta liinilgi lamab, ehk joonisel kõnealune nurk asub esile toodud plaadi vasakus all nurgas.



Joonis 9.1 Põhjaplaadi nurgale lisatud faas, põhjaplaat esile tooduna

9.3 Alusvankrite ohutumaks tegemine

Mooduli massist tulenevalt võis mooduli ümberkukkumine olla fataalse tagajärjega. See tähendas, et kogu tootmisprotsessi väljatöötamise käigus uuriti erinevaid võimalusi, kuidas moodul või mõni osa sellest saaks kas tootmisliinilt või alusvankril olles ümber kukkuda. Eriti ohtlikuna nähti just alusvankris hoidmist ja transportimist, kuna

1. toote raskuskese asus kõrgel, mis tähendas, et näiteks alusvankri ootamatul ja järsul seismajäämisel võis mooduli ülemine osa jätkata liikumist, kukkudes koos alusvankriga ümber, ja
2. mooduli lukustamine alusvankrisse ei toimunud automaatselt, mis tähendas, et
 - a. inimene, kes mooduli alusvankrile asetaski, võis unustada moodulit korrektselt alusvankri külge kinnitada, mis oleks teinud võimalikuks mooduli maha veeremise alusvankrilt;
 - b. inimene, kes mooduli alusvankrilt järgmisele platvormile tahtis lükata, võis mooduli valel ajal mooduli alusvankri küljest vabastada, mis oleks võimalikuks teinud mooduli veeremise kahe platvormi (alusvankri ja platvormi, millele moodulit taheti lükata) vahele.

Esimesena väljatoodud probleem on väga reaalne, kuna autor teab omast kogemusest, et kõnealuses tootmisüksuses on levinud probleem, et väiketarvikud vedelevad põrandal. Osasid väiketarvikuid on keeruline märgata, kuid seda efektiivsemad nad on alusvankri ratta blokeerimisel. Lisaks on sarnane juhtum oli autor ise 1X mooduliga juhtunud, kui märkamata jäänud väiketarvik blokeeris alusvankri ratta, mis põhjustas väga ettevaatlikust edasiliikumiskiirusest sõltumata mooduli alusvankri tagumiste rataste õhku tõusmise, mis oleks veidike suurema liikumiskiiruse puhul põhjustanud mooduli ümberkukkumise. Joonis 9.2 näitabki olukorda peale mainitud intsidenti. Liikumine toimus joonistel vasakult paremale ja blokeeris liikumissuuna järgi parem eesmine ratas. Parempoolselt jooniselt on näha, kui väike ja märkamatuks jääv väiketarvik võib väga ohtliku olukorra tekitada.



Joonis 9.2 Peaaegu ümber kukkunud 1X moodul ja ohuolukorra põhjustanud väiketarvik

9.3.1 Muudatused tootmisliinile

Punktis 9.2 käsitletud tootmisliinile sai nõudeks, et kui moodul on valmis monteeritud ja püstisesse asendisse keeratud, siis enne mooduli vabastamist peab olema alusvanker, millele komplekteeritud moodul liigutatakse, lukustatud õigesse positsiooni. Kui alusvanker pole õigesti lukustatud või puudub üldse, siis moodulit liini küljest ei ole võimalik vabastada. Joonis 9.3 näitab 1X mooduli alusvankrit kinnitatuna liini külge. Joonise vasakus nurgas on näha komplekteeritud 1X mooduli alumist osa. Alusvankri all asuv moodul on osa tootmisliinist, mille eesmärk on positsioneerida sisestatav alusvanker ja õigesse positsiooni ka automaatselt lukustada. Alusvankri külgedel olevad punased käepidemed on mooduli lukustamiseks alusvankri külge.



Joonis 9.3 Liini külge kinnitatud alusvanker

Mooduli kallutaja ülesanne on lisaks mooduli püstisesse asendisse keeramisel ka selle langetamine õigele kõrgusele. See pealtnäha lihtne ülesanne osutus vägagi keeruliseks, eelkõige jällegi mooduli massi kuid ka masside erinevuste tõttu erinevate moodulite vahel. Kuigi projekteerides vaadeldakse tihtipeale kehasid jäikadena, toimub praktikas suurte masside liigutamisel kõikjal paindeid ja läbivajumisi. Nii juhtus ka kõnealuses projektis, kus kallutaja platvorm paindus kõige raskema mooduli puhul läbi, viies platvormi, millel moodul seisis, 3 mm madalamale kui kõige kergema mooduliga. See tähendas, et kuigi kallutaja asend ja alusvankri kõrgus maapinnast võisid olla samad, võisid erinevate moodulite puhul varieeruda kallutaja platvormi kõrgus maapinnast ja seeläbi ka mooduli enda kõrgus maapinnast. Kui kallutaja asend seadistada kõige kergema, kõige raskema või keskmise raskuse mooduli järgi, siis mooduli enda kõrgus võis varieeruda ikkagi 3 mm, mis võinuks viia mooduli ratta takerdumiseni alusvankri platvormi ääre taha või mooduli kukkumiseni alusvankri platvormile. Mainitud puudujääk oli ka põhjus esimese FAT-i (*Factory Acceptance Test*) põrumisele.

Lahendusena ehitati kallutaja platvormile maapinnale toetuv tugi, mis toestas kallutaja alumist platvormi altpoolt. Nii oli võimalik tagada, et moodul langetatakse kallutaja poolt alati õigele kõrgusele.

See oli aga ainult pool lahendust, kuna mainitud materjali läbipaine leidis aset ka alusvankri platvormil, mille kõrgus võis varieeruda veel näiteks alusvankri rataste

kulumisest või ebatasasest maapinnast. Küll aga leiti, et alusvankri platvormi kõrguse ohjamine on liiga keeruline ülesanne, mille roll tootmise ohutusele on minimaalne. Pigem leiti, et alusvankritel on ka muid puudujäärke, mille roll ohutusele on palju suurem, kuid probleemist jäeti logisse märge, et sellega arvestada uue alusvankri disainimisel. Probleemil oli ka tegelikult kolmas külg – mooduli veeretamine alusvankrilt järgmisesse tootesse, kuna ka nende platvormide kõrgus võis erineda ja/või vahele tekkida vahe, mis leidis samuti tee vaid logisse, mitte päris lahenduseni.

9.3.2 Alusvankrite automaatne lukustamine

Alapeatükis 9.3 välja toodud punktile 2 otsiti samuti lahendust. Probleem oli kolmeosaline:

1. kuidas moodul alusvankrile automaatselt lukustada,
2. kuidas hoida ära mooduli iseseisev vabanemine lukustusest ja
3. kuidas oleks mugav töötajal moodulit vabastada?

Mooduli vabastamine võis olla manuaalne, kuid eelistatud oli automaatne vabastamine, et kiirendada tootmisprotsessi ja et vähendada inimeksimuse võimalust.

Oli ka eelistatud, et lahendus ei nõuaks akude paigaldamist alusvankritele, kuna alusvankreid oli palju, mis teeks lahenduse liiga kalliks ja tõstaks märgatavalt ka hoolduskulusid. Ka muude elektrooniliste või pneumaatiliste komponentide kasutamine ei olnud soovituslik, kuna alusvankrid pidid olema ilmastikukindlad.

Ülal nimetatud arvesse võttes tundus järgmine kõige parem lahendus teha mehaaniline lukk. Täpsemalt prooviti luua vedruga survestatud ukسلukutaoline keel, mille lükkab alusvankrile tõmmatav moodul alla, ning mooduli põhjaplaadis oleva augu sisse saab mainitud keel üles tõusta, lukustades mooduli alusvankri külge. Keele ülemine osa oleks pidanud olema kolmnurkne, et võimaldada mooduli poolt keele alla lükkamist vaid ühes suunas. Teises suunas takerduks moodul keele taha kinni. Mooduli vabastamisele mõeldi teha väike pedaal, millega oleks võimalik lukustav keel alla tõmmata.

Lahendusele sai komistuskiviks mooduli põhjaplaadi jäikus ja tugevus kogu mooduli konstruktsiooni silmas pidades.

Keelt positioneerides tundus lihtsam lahendus mooduli liikumist takistada mooduli tagant, kuna nii ei oleks vaja teha mooduli põhjaplaati ava. See aga ei sobinud, kuna 1X ja 2X moodulid olid erineva sügavusega ehk keel oleks neil pidanud erinevates kohtades asuma.

Seni pole siiski leitud sobivat lahendust kirjeldatud probleemile, eelkõige limiteeritud eelarve ja inimressursi tõttu.

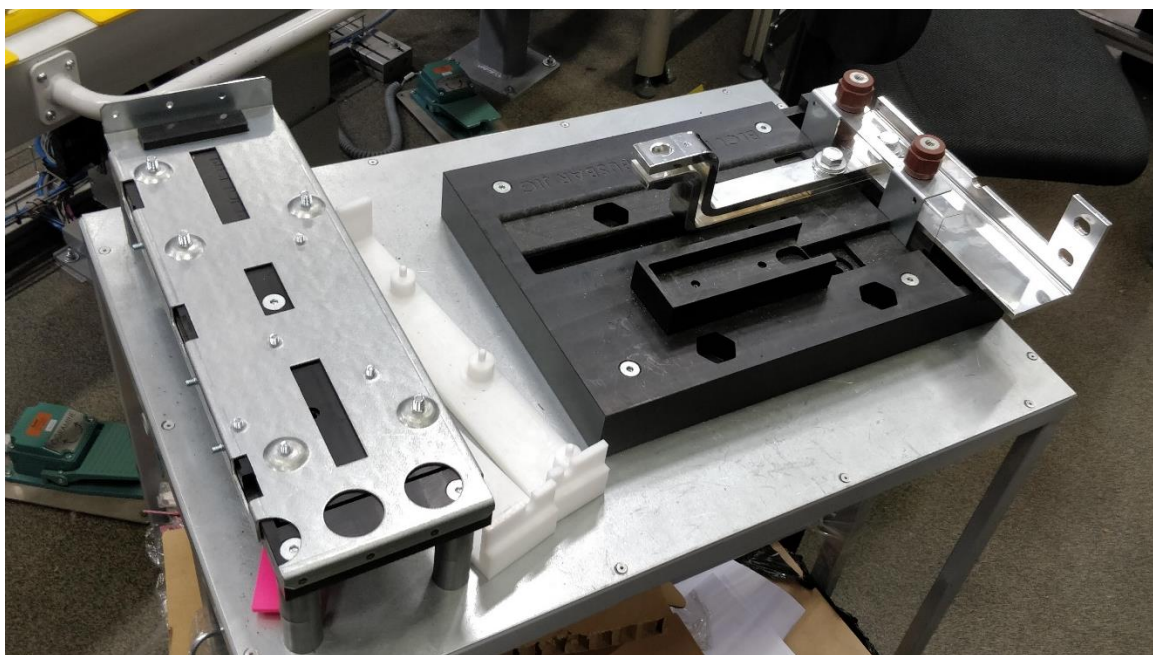
9.4 Sisend- ja väljundlattice koostamise rakis

Kuna nii sisend- kui väljundlatte koostati peakoostust väljas ja neis esines 70 Nm ühendusi, mida on keeruline, ebamugav ja lausa ohtlik teostada tavalise sileda laua peal, siis võib tekkida küsimus, et kuidas nii suure momendiga ühendusi üldse koostati.

Selleks tuli ka koostada neile eraldi rakised, mis ühenduste teostamise ajal fikseeriksid alamkoostud laua külge. See kujunes eraldiseisvaks projektiks, mida hakkas juhtima autori juhendatud praktikant. Kuigi mainitud praktikant sai ülesandega üsnagi iseseisvalt hakkama, tundis autor, et on vajalik seda mainida ka käesolevas lõputöös,

- et vähendada küsimuste tekkimist, millele seletuskiri vastuseid ei anna,
- et näidata, kuidas vahel tuleb luua montaaži hõlbustamiseks toetavaid lahendusi (nt rakiseid, positsioneerijaid vms abitööriistu),
- et anda ideid, milliseid ülesandeid praktikantidele anda nende arendamiseks ja inseneride töökoormuse vähendamiseks.

Joonis 9.4 näitab mainitud rakiseid, kuhu on kinnitatud 2X mooduli sisendlattice lehtmetailist raam ja 2X mooduli väljundlattice pooleliolev osakoost.



Joonis 9.4 Lattice alamkoostude koostamiseks tehtud rakised

9.5 Klaaskiudisolatsiooni juhtivus niiskes keskkonnas

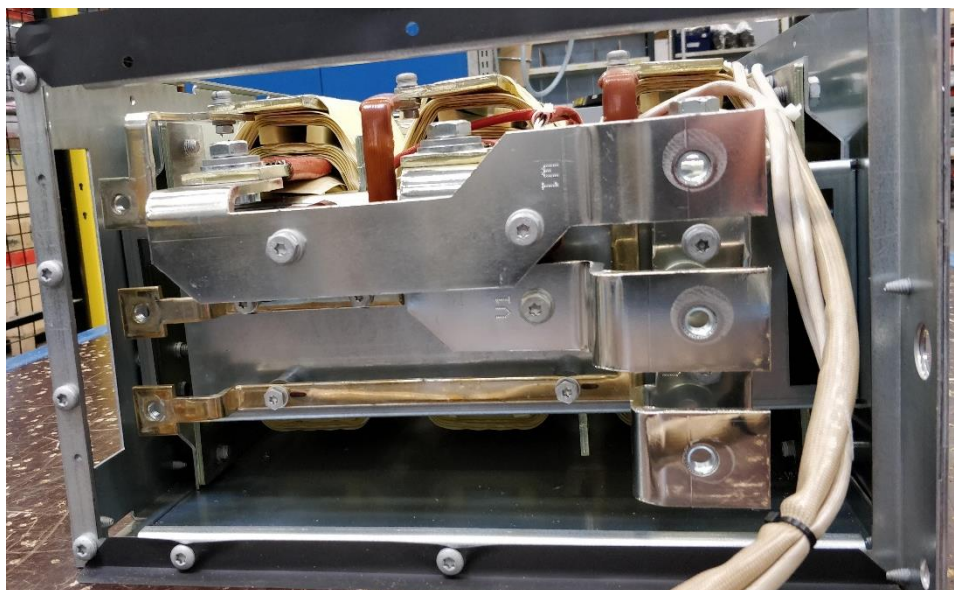
Seoses teise, kuid sarnase juba tootmises oleva mooduli kvaliteediprobleemiga, jõudis autori kolleeg murrangulise avastuseni, kus kaabli isolatsioon võis hakata elektrit juhtima. Mõeldagi, millist pahandust võib tekitada isolaatori, mille ainus eesmärk on isoleerida kaks keha elektriliselt, juhtivus. Täpsemalt leiti, et isolatsiooni varrukas ise ei hakka juhtima, kuid õhuniiskusest varruka pinnale kogunevad vee osakesed võivad hakata, vähendades mooduli isolatsioonitakistust.

Selle avastuse tulemusena vaadati üle kõikide moodulite kaablid, et neil oleva isolatsiooni varruka välimine pind puutuks kokku vaid ühe potentsiaali all oleva kehaga, tavaliselt siis kas U-, V- või W-faasi lattidega (ainult ühe faasi lattidega) või toote kerega, mis on alati maandatud.

Probleemseid kohti oli ka kõnealusel moodulil nii väljund- ja sisendlattide alamkoostude juures.

9.5.1 Sisendlattide alamkoost

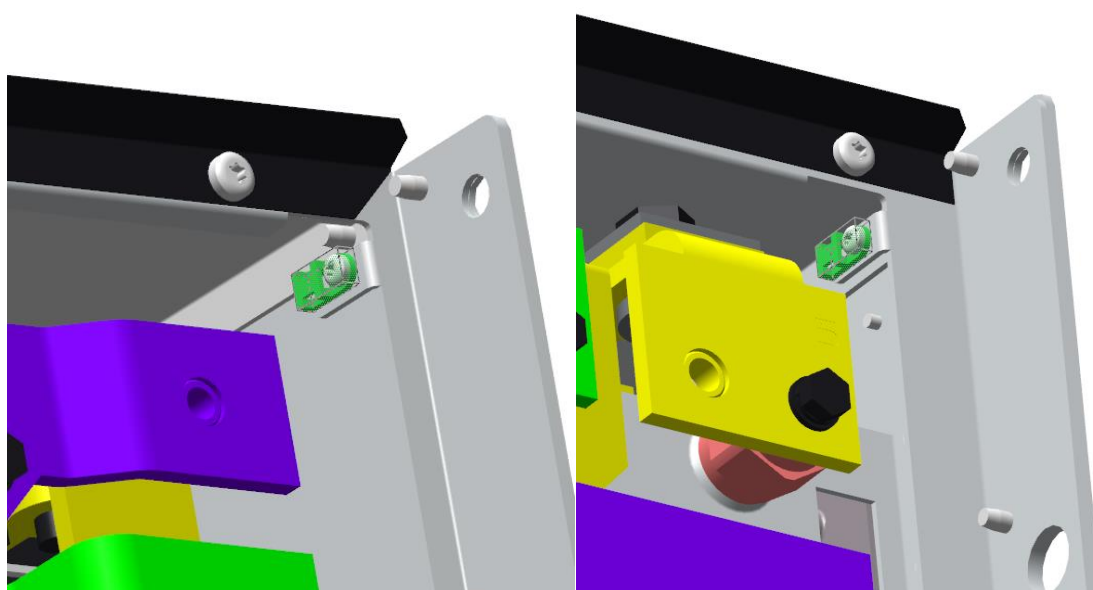
Sisendlattide juurest tuli välja mooduli peakaabel, puutudes kokku 1X moodulil peamiselt W-sisendlati ja mooduli kerega ning 2X moodulil U-faasi sisendlati ja mooduli kerega, mis juba iseenesest oli uue reeglga vastuolus. Lisaks juba mainitule võis peakaabel kokku puutuda veel teiste faaside lattidega. Joonis 9.5 näitab 1X mooduli ülemist otsa ehk sisendit. Samal joonisel paremal on näha heledad isolatsioonisukad, mis on väga lähedal kõikide faaside lattidele ja mooduli kerele. Olgu mainitud, et nimetatud joonisel on moodul ilma pealmise küljekaaneta ja külili, kuid lõpptootes tuleb mainitud kaabel sarnaselt moodulist välja, seega oht isolatsioonitakistuse vähenemiseks eksisteerib sellest sõltumata.



Joonis 9.5 1X mooduli sisend

Kuigi 1X ja 2X mooduli sisendlatid on erinevad, esines probleem mõlemal moodulil sarnaselt ning mõlemale mooduli tüübile sobis ühtne lahendus.

Lahenduseks prooviti esialgu teha sisendlattide kõrvalt läbiminev PC lehest tunnel. See aga tähendas veel ühte lisakomponenti, mida kuskil mujal ei kasutata. Seega paremaks lahenduseks peeti hoopis mooduli ülemise raami külge kõrva tekitamist, mille külge paigaldati kaablisideme alus, et mooduli peakaablit oleks võimalik fikseerida volulattide kõrvalt moodulist välja, volulattidega kontakti mitte luues. Joonis 9.6 näitab mõlema mooduli tüübi peal lõpplahendust.



Joonis 9.6 1X (vasakul) ja 2X (paremal) moodulite lahendus, kaablisideme kinnitus esiletõstetuna

Kuna mainitud kaabliside on üsna väike detail, on seda lihtne montööril unustada paigaldada ja lõppkontrolli töötajal unustada kontrollida. Kui testimiskeskkonnas on kuiv õhk, siis ka testimise käigus ei tule puudujääk välja ja nii võib sellise veaga toode jõuda lõppkliendini väga lihtsalt. Montööri eksimusele võib kaasa aidata ka see, et see ei tundu tähtsa osana mooduli tööks.

Veendumaks, et montöörid siiski paigaldavad alati ka kõige väiksemad ja kõige tühistena näivad osad, tuleb neid koolitada. Selle käigus ka põhjendada komponendi tähtsust mooduli elueale. Täiendava meetmena tasub ka kohad, mille vastu on lihtne eksida, välja tuua nii montööri kui lõppkontrolli kontroll-lehtedel (*check-list*'idel).

9.5.2 Väljundlattice alamkoost

Sarnaselt peatükis 9.5.1 käsitletud probleemile esines ka väljundlattice alamkoostus sarnane oht, samuti nii 1X kui 2X moodulil. Erinevalt aga sisendlatticest, oli väljundlattice puhul ohuallikaks peakaabli isolatsioonivarruka asemel mahalaadimistakisti kaablitel olev isolatsioon.

Erinevalt punktis 9.5.1 käsitletud lahendusest on väljundlattice puhul oluline jälgida ka seda, et ventilaatorist tulevat õhuvoolu ei tohiks segada, kuna see oleks negatiivse mõjuga kogu toote elueale. Põhjus, miks sisendlattice juures ei pidanud sellega arvestama, on see, et ventilaatori väljund asub mooduli väljundlatticele lähedal.

Lisaks pidi arvestama ka võimalusega, et mooduli sisse võib sattuda niiskus, mis võib tekitada väikeseid lompe tasastele pindadele, mis on maapinnaga paralleelsed, kui moodul on püstises asendis.

Joonis 7.6 näitab 1X mooduli peal, kuidas mahalaadimistakisti kaablid võivad kokku puutuda nii mooduli kerega ja erinevate faaside väljundlatticega. Mõlemal mooduli tüübil oli kolm erinevat trajektoori, mida mööda kaableid kinnitada:

1. lattice ülevalt viia kaablid mahalaadimistakisti kohale ning sealt alla mahalaadimistakistisse,
2. viia kaablid lattice ülevalt mahalaadimistakistist eemale W-faasi väljundlattice juurde, siis alla alumise põhjaplaadini ning siis mahalaadimistakisti juurde, või
3. viia kaablid otse lattice pealt alla ning siis mahalaadimistakistisse.

2X mooduli puhul tundus parim lahendus üsna lihtne olevat, kasutades trajektoori nr 1. Kui võrrelda seda trajektoori teistega, siis trajektoori nr 2 vajaks pikemaid kaableid, ühe PC lehe asemel kolme, rohkemaid kaablisidemeid ja muid kinnitusvahendeid ning

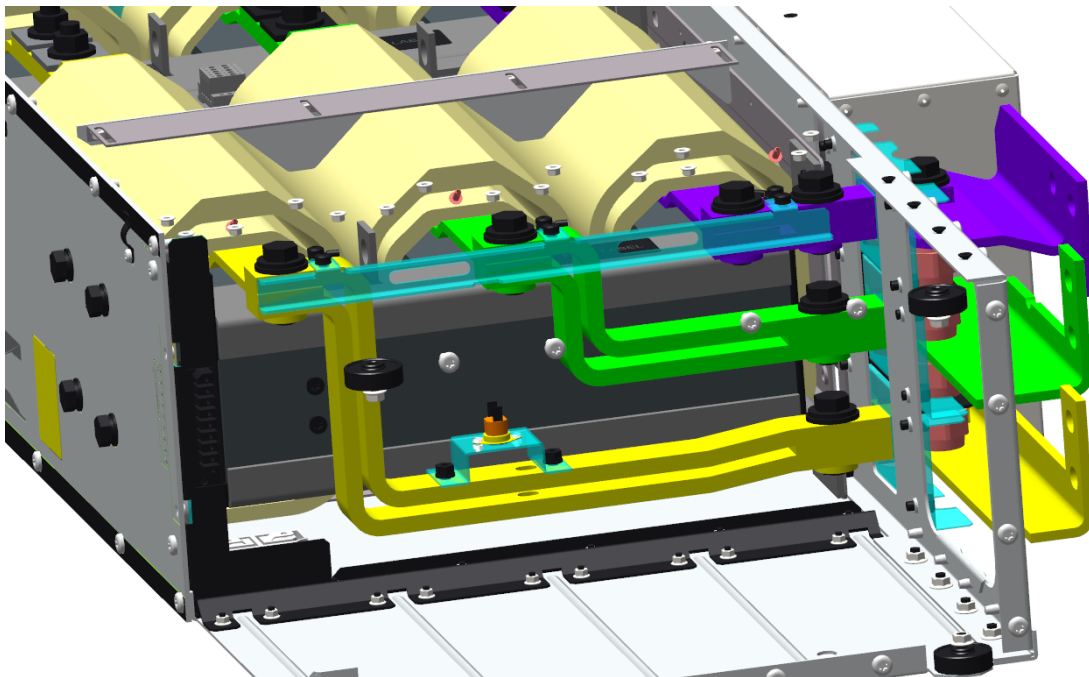
montöörilt rohkem aega selle kõige kokku panemiseks. Trajektoor nr 3 puhul oleks olnud kaks erinevat lahendust:

1. kas teha PC leht ühes tükis, millel on 3 väljaulatuvat osa ja neid kõiki ühendav neljas osa, või
2. teha PC leht neljas tükis.

Mõlemal juhul oli vaja suuremat või rohkemaid PC lehte, rohkem kinnitusvahendeid ja rohkem aega montöörilt. Lisaks häiriks trajektoori nr 3 kasutamine ventilaatori poolt tekitatud õhuvoolu, mis võis lühendada kogu mooduli eluiga, ning oli rohkem pindu, mis soodustaks veelompide moodustumist mooduli sees.

Trajektoor nr 1 vajab vaid ühte PC lehte ning iga faasi väljundlattidele veel ühte keermetatud ava nimetatud PC lehe kinnitamiseks. Viimane ei olnud suur probleem, kuna sarnane ava juba eksisteeris kaablite kinnitamiseks. Oli võimalik lihtsalt teha teine samasugune ava veel kõrvale.

Joonis 9.7 illustreerib lõpliku 2X mooduli lahendust, kus on näha väljundlattide ülemises osas neist risti üle minevat läbipaistvat PC lehte helesinises. PC lehes olevad kaks pikliku ava on selleks, et neist mahalaadimistakisti kaablid läbi viia. Kaablisidemed kinnitatakse ümber PC lehe.



Joonis 9.7 2X mooduli lahendus

1X mooduli lahendus oli mõnevõrra keerulisem, kuna mahalaadimistakisti kaablite kinnituskohad asusid erinevatel tasapindadel.

Kuna 2X moodulile leiti hea lahendus, prooviti sama teostada ka 1X moodulil. Selleks aga pidi uued kinnitusavad, mis loodi peatükis 7.3, ümber viima lattide ülemisse osasse, kus nad asusid ka 2X moodulil. Probleem tekkis sellega, et lattidel asus 90-kraadine pööre koheselt peale poolide külge kinnitamist. Et seda pööret viia kaugemale, et teha ruumi kaablite kinnitamiseks mõeldud avale, tuli samas suunas viia edasi ka U- ja V-faaside väljundlattide vahel olevat isolaatorpuksi või see ära kaotada.

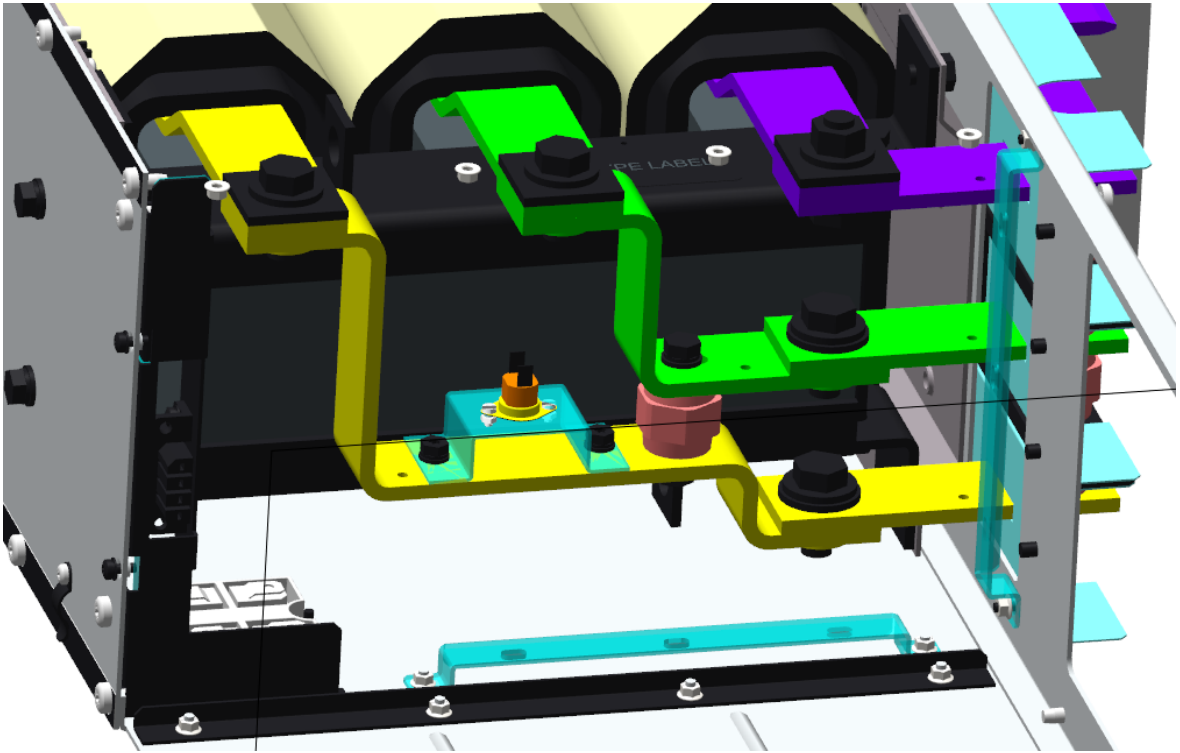
Isolaatorpuksi oli sinna vaja, et tagada lattide jäikus. Selle puudumisel võisid latid hakata töörežiimis vibreerima, mis oleks nende ja ka komponentide, mille külge neid kinnitati, eluiga lühendada.

Isolaatorpuksi ei õnnestunud ka liigutada soovitud suunas, kuna peale isolaatorpuksi asus järgmine 90-kraadine pööre U-faasi väljundlatil. Selle pöörde edasi liigutamisele jäi ette sama faasi välimine väljundlatt, mis oli kõikide lattide vahel identne. Muudatus ühe faasi välimisele väljundlatile oleks edasi kandnud ka teiste faaside samadele lattidele ja seda ei saanud teha, kuna W-faasi latil kinnitati välimine väljundlatt otse pooli lati külge, ehk W-faasil puudus keskmine väljundlatt. Pooli väljundlati kauguse määras ära poolide paki paiknemine ja pooli enda laius. Poolide pakke polnud aga võimalik muuta, mistõttu jäi 1X mooduli W-faasi pooli väljundlatt samasse asukohta, ehk ka kõike eelnevalt kirjeldatud polnud võimalik muuta.

See kõik tähendas, et 1X moodulile polnud võimalik teha 2X mooduliga ühist lahendust, et vältida mahalaadimistakisti kaablite kokkupuudet erinevate potentsiaalide all olevate kehadega.

Järgmisena tundus kõige parema lahendusena kasutada trajektoori nr 2, kuna vanad kaablite kinnitusavad asusid välimistel väljundlattidel ehk üsna tagumise paneeli lähedal. Joonis 9.8 näitabki seda lahendust lõpliku lahendusena. Seal on näha mooduli tagapaneelil ning alumisel küljepaneelil helesinist läbipaistvat PC lehte, mille külge sai siduda mahalaadimistakisti kaableid. See aga nullis täielikult peatükis 7.3 tehtu, mis tähendas,

- et U- ja V-faaside lattidele tehtud kinnitusavad tuli taas eemaldada,
- et mahalaadimistakisti kaableid tuli taas hakata kinnitama väljundlattidele,
 - mis omakorda tähendas, et seda ei saanud enam teha mugava tööriistaga, vaid sellisega, millel oli 90-kraadine nurk,
- ja et eelnevale lahendusel kulutatud ressursid oli kaotatud asjata.



Joonis 9.8 1X mooduli lahendus

10 TULEMUS

Käesoleva projekti eesmärk oli sisuliselt teha teiste inimeste töö lihtsamaks. Seega on kõige paremaks tagasisideks tehtud töö kohta nende endi hinnang tehtud muudatustele.

Küsitlus viidi suulise diskussiooni käigus läbi nii, et kõigepealt küsis autor, mis murekohad olid mooduliga tekkinud. Peale seda näitas autor küsitletutele, milline oli disain enne projekti. Kõige lõpuks uuris autor veel lõppkontrolli poolt avastatud vigu, nii tarnija juures kui ABB montööri tekitatud vead.

10.1 Poolide pakkide positsioneerimine

Kõik küsitletud insenerid nõustusid koheselt üksteisega, et kogu mooduli kõige nõrgemaks kohaks on poolide pakkide positsioneerimine. Probleemi tõsisust tõstsid asjaolud, et poolide pakid kaalusid ligi 100 kg ning enne mooduli täielikku kokkupanekut oli keeruline poolide pakki täpselt positsioneerida, kuid pakk oli vaja positsioneerida koheselt moodulisse sisse tõstmise hetkel.

Sellela nõustus ka autor juba projekti alguses ning üritas olukorda parendada peatükis 4.1. Kahjuks aga ei jõutud sobiva lahenduseni ning probleem jäeti lahendamata.

Poolide pakkidega on nelja kuu jooksul tööd tehtud ja pakid on nüüd palju paremini joonisega kirjeldatud, eriti kriitiliste sõlmpunktide tolerantside kirjeldamisel.

Küll aga oli küsitlemise ajal prototüüpimisel uut tüüpi moodul, mis koosnes vaid ühes pikast poolide pakist, kus asus samuti 3 pooli, üks iga faasi jaoks. Poolide pakile andis jäikust 2 pikka keermelatit, mis olid asetatud paralleelselt poolidega, üks U- ja V-faaside poolide vahel, teine V- ja W-faaside. Nimetatud keermelati jaoks oli tehtud süvend õhu suunaja sisse. Kuna õhu suunajad olid fikseeritud alumise küljepaneeli külge ja põiksuunaliselt liikumatud, oli võimalik koheselt korrektselt positsioneerida poolide pakk mooduliga põiksuunaliselt. Pikisuunaliseks positsioneerimiseks tuli jätkuvalt kasutada esi- ja tagapaneelis olevaid kinnitusavasid, mis ei olnud kõige parem lahendus.

Joonis 10.1 osutab õhusuunajast läbiminevale keermelatile, mis võimaldas pooli pakki positsioneerida põiksuunaliselt. Ei ole teada, kas selline lahendus jõuab ka kahe poolide pakiga moodulitesse, mida käsitleti käesolevas lõputöös.



Joonis 10.1 Pooli paki põiksuunaline positsioneerimine

10.2 Õhusuunajate positsioneerimine

Insenerid töid välja, et neile ei meeldinud viis, kuidas õhusuunajaid tuleb montööril käsitsi positsioneerida, kuna see jätab võimaluse positsiooniga eksida. Montöörid olid teadlikud positsioneerimise nõuetega ega kurtnud mooduli elueale tähtsa lisaülesandega.

Autor käsitles kõnealust probleemi peatükis 6.2.3, kuid ei leidnud sobivat lahendust, kuigi nõustus küsitletud inseneridega, et silma järgi hindamiseks ei tohiks jätta mooduli eluea tähtsusega komponenti.

Kuid seni pole leitud lahendust, millega võtta ära õhusuunajate pikisuunaline positsioneerimise võimalus ning samal ajal mitte teha iga poolide paki jaoks eraldi õhusuunajat. Viimane pole soovitud, kuna iga erinev komponent tekitab lisakulu, kuna sellele on vaja leida koht tootmisliini materjalide riiulis ja ladudes ning montöör peab kõikide materjalide vahel valima ainult monteeritavale moodulile sobiva.

10.3 Üldised nõrgad kohad

Kogu moodulit kimbutavad üldiselt probleemid seoses

1. positsioneerimise ja/või tolerantsidega, kus erinevaid komponente ei ole võimalik hõlpsasti omavahel siduda. Montööride lahendus on tihtipeale kas

haamriga lüües või kruvikeerajaga vms tööriistaga kangutades panna komponendid omavahel klappima. See probleem esineb paljudel sarnastel moodulitel ja tihtipeale on süüdi probleemi tekitamises lehtmetalli tolerantsid. Lehtmetalli on lihtne augustada täpselt, kuid suured erinevused tulevad pigem painutamisest. Kui painded on tehtud viltu, siis pole tähtsust ka täpsel augustamisel, kuna need ei asuks enam õigel kohal.

2. montöörile liiga suure vastutuse andmine komponentide õigesti positsioneerimisel. Oht positsioneerimisel eksida on suur ja tagajärjeks on tihtipeale eelmisena nimetatud probleem, kus moodulit pole võimalik kokku panna.
3. koostamisjuhendid olid äärmiselt kehvad, kui mooduli tootmisega alustati, mis viis paljude arusaamatusteni, mis võisid areneda edasi valesti koostamiseks. Kehvad olid nad seetõttu, et nad ei olnud piisavalt konkreetsed või detailsed, mis jättis ruumi arusaamatusteks. Selle probleemi aluseks oli eelkõige ressursipuudus ning muid probleeme nähti pakilistemana, mistõttu ei nähtud koostamisjuhendite parendamist prioriteetse tegevusena.

10.4 Tagasiside tehtud tööle

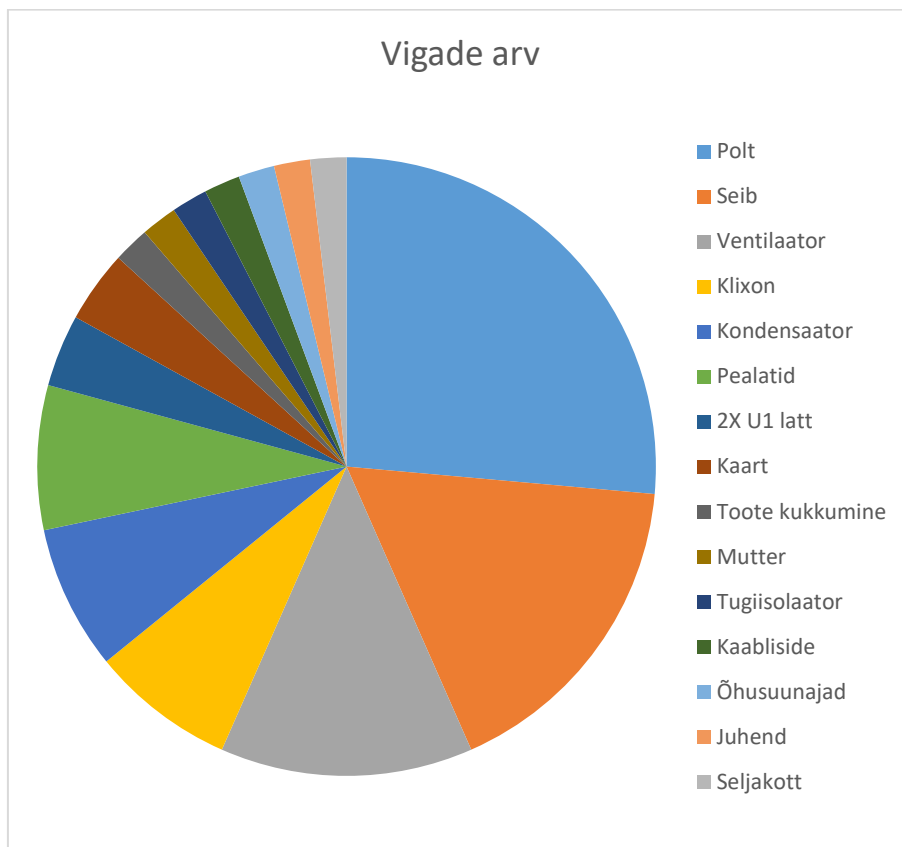
Üldiselt oli rahulolu mooduli disainiga üsna madal. Eelnevad peatükid tõid välja kõige tõsisemaid puudujääke. Kui aga autor tutvustas oma tehtud tööd ja milline oli mooduli disain enne projekti, siis muudeti veidi oma hinnangut positiivsemaks ning pinnale kerkis küsimus, et kuidas üldse oleks pidanud mooduli kokkupanek olema võimalik. Leiti, et autori tehtud muudatused olid põhjendatud ning ilma nendeta oleks rahulolu toote disainiga olnud veel madalam. Kõige parema muudatusena nähti pressmutrite lisamist sisend- ja väljundlattidele.

10.5 Lõppkontrollis leitud vead

Autor kasutas vigade ajaloo sirvimiseks ja analüüsimiseks autori enda tehtud Power BI raporti.

Leitud vigu on keeruline grupeerida, kuna neid on esinenud mitmetes erinevates vormides ja mooduli osades. Autor annab ülevaate nelja kuu jooksul kõige levinumatest vigadest. Kokku oli analüüsitavaid vigu 53.

Vaieldamatult kõige rohkem oli lõppkontrollis väiketarvikutega, mis moodustasid kokku ligi pooled vead, täpsemalt 25. Et neid vigu veidike detailsemalt kirjeldada, grupeeriti nad väiketarviku tüübi järgi poldiks, seibiks, mutriks ja kaablisidemeks. Joonis 10.2 illustreerib struktuuridiagrammil vigade jagunemist.



Joonis 10.2 Vigade arv struktuuridiagrammil

Poltide vead olid põhjustatud montööri unustamisest või märkamatuses

1. polte üldse mitte sisestadagi (6/14),
2. jätta sisestatud polt kinnitamata (4/14),
3. kinnitada sisestatud polt liiga väikse momendiga (2/14),
4. valida vale polt (1/14) või
5. jätta momentvõtmega kinnitatud polt märgistamata (1/14), mis on visuaalne indikaator, et polt kinnitati momentvõtmega, ja kohustuslik märkida.

Seibide vead sarnanesid poltide omadega ja kandsid unustamise ja märkamatuses jooni, kuid ka vihjeid oli kehvale juhendile. Vead olid, et

1. seib puudus (3/9),
2. mõlemale poole kinnitust oli sisestatud surveseib, kuid see peab olema vaid ühel pool (3/9),
3. seib oli vale (2/9) või
4. poolidevahelistel ühendustel oli kasutatud nii kandilisi kui ümaraid seibe (1/9).

Autor tunneb, et seibide täpsustus oli üks detail, mis oli juhendis mõnevõrra puudulikult kirjeldatud. Näiteks muudeti peale esmase juhendi loomist poolidevaheliste ühenduste seibid ümmargustelt nelinurksete vastu, kuid juhendis see muudatus ei kajastunud ja montöörid pidid ise seda meeles pidama. Samuti polnud ehk piisavalt rõhutatud, et surveseib käib vaid mutri poole ja poldipea alla pole surveseibi tarvis. Küll aga poltide kategoorias olevad puudujäägid on puhtalt montööride tähelepanu puudumisest tingitud.

Ventilaatori viga oli 7, kuid 4 neist oli seotud juhtmete ühendamise valedel aadressidel, mis polnud jällegi juhendis väga selgelt välja toodud. Ülejäänud 3 viga moodustasid tarnija vead (2/7) ning ventilaatori hõõrdumist vastu korpust (1/7), mis võis tuleneda ventilaatorist endast või kehvasti kokku pandud ventilaatori korpusest, kuid seda ei uuritud täpsemalt.

Klixoni viga oli 4, millest 2 olid põhjustatud montööri poolt valesti ühendades. Kuigi juhtmete ühendamine on väga lihtsa loogika alusel ja juhendis selgelt välja toodud, toob autor välja asjaolu, et *klixoni* juhtmete terminalid on väiksed ning juhtmeid on palju ja kõik sama värvi, mis teeb juhtmete eristamise ja seeläbi ka õigesti ühendamise keeruliseks. Kolmas viga oli samuti seotud juhtmega, kuid mitte aadressi poolest valesti ühendatud, vaid isolatsioon oli jäänud juhtme alla, mis tekitas lahtise ühenduse. Neljas viga seisnes ühes *klixonis* endas, mis oli lahtise ühendusega. Kuna *klixonid* kinnitatakse tarnija poolt poolidele, siis tuli välja vahetada kogu poolide pakk.

Autor märkas, et eelmises lõigus kirjeldatud viga on väga raske märgata visuaalkontrolli käigus ning selguvad alles lõppkontrollis automaattestris. Vea esinemisel tuleb moodul uuesti püstisest asendist külili tõsta ning eemaldada kondensaatorite seljakott ja pealmine küljepaneel. Peale eelnimetatud tegevusi on võimalik viga täpsemalt tuvastada ja kõrvaldada, moodul uuesti kokku panna, püsti tõsta ja taas testrisse sisestada. Kuna mooduli kallutamist saab teostada vaid tootmisliini lõpus oleva kallutajaga, siis nimetatud tegevused häirivad tugevalt ka kogu tootmisliini rütmi, kaotades veelgi väärtuslikku monteerimise aega. Kuigi viga on õigete töövahenditega väga lihtne tuvastada ja kõrvaldada, kulub selleks palju aega, kui viga leitakse alles

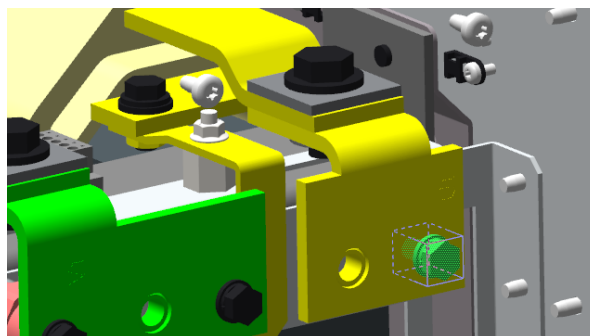
lõppkontrollis. Autor teeb ettepaneku, et montööridel võiks olla võimalus testida *klixonite* ahelat enne mooduli lõplikku kokkupanemist. See test võtab aega 30 sekundit, kuid võib säästa umbes tunni monteerimise ja testimise aega.

Kondensaatorite puudujäägid piirdusid nende mahtuvusega, kus automaattestri andmetel on kondensaatorite mahtuvus olnud ebapiisav, mida on juhtunud neljal korral. Kui mahtuvus on vale olnud, siis peaks olema võimalik kondensaator reklameerida. Kui reklameerimine pole võimalik, siis järelikult on kas automaattestri limiit või kondensaatori spetsifikatsioon mõnevõrra vale. Autoril puudub informatsioon, kas kõnealustel juhtudel kondensaatorid reklameeriti või ei, seega ei ole ka võimalik olukorda lõpuni hinnata ja konkreetsemaid parendustegevusi välja pakkuda.

Pealattide viga oli tuvastatud 4, millest kõik seisnesid viltustes lattides. Ainult ühe kohta on täpsustatud, et viga seisnes poolidevahelistes ühendustes, kus latid olid suunatud liiga üles, mis tekitas ebapiisava õhuvähe poldi saba otsa ja pealmise küljepaneeli vahel. Seda probleemi autor küll põgusalt puudutas peatükis 4.1, kuid kolleegide ja tarnija surve ei töötanud välja paremat lahendust, vaid jäeti asi sinnapaika.

2X U1 latt on viimane kategooria, mille autor sooviks tervikuna välja tuua. Kahel juhul oli juhtunud, kus lõppkontrollis on selgunud, et U1 latt on monteeritud viltu. Kuigi pole täpsustatud, mis pidi täpsemalt viltu, eeldab autor, et kõnealune latt oli isolaatorpuksi külge kinnitatud ühe poldiga, mis on lati ainus tugipunkt enne sisendlattide alamkoostu moodulisse kinnitamist, mille hetkel tekib latile teine tugipunkt U1 pooli sisendlati näol. Joonis 10.3 illustreerib kõnealust kohta. Kollane lai latt mooduli esotsas ongi U1 latt ning joonisel on selle ainsa kinnituspunkti polt rohelistega esile toodud.

Autor vaatles sarnaseid kohti peatükis 7.1, kuid 2X mooduli U1 latt oli jäänud märkamata. Autor pakub välja, et luua sellele latile veel teine tugipunkt, et latt asuks alati samas positsioonis juba sisendlattide alamkoostu moodulisse kinnitamise hetkel.



Joonis 10.3 2X U1 latt

KOKKUVÕTE

Lõputöö käigus üritati filtermooduli disaini parendada kasutades X-keskse projekteerimise ja *lean* meetodikaid. Kõige suurem rõhk oli koostamiskeskse disaini parendamisel. Selle käigus võeti füüsiliselt lahti ja pandi taas kokku kahte erinevat mooduli tüüpi kolmel korral, et märgata disaini puudujääke ja leida neile parendusi, ning virtuaalselt CAD-keskkonnas tehti sama lugematul arvul kordi. Igast puudujäägist koostati parendusettepanek, mida võrreldi olemasolevaga, seeläbi hinnates olukorra paremaks muutumist toote igas eluea tsüklis.

Tootmine pole aga ainult komponentide üksteise külge kruvimine, vaid arvestada tuleb ka kõige ümbritsevaga. Antud lõputöös arvestati ka automaattestimisega, tootmisliini projekteerimisega, toote transportimisega, montaaži abistava rakisega ja uute murranguliste avastustega inseneerias.

Tehtud muudatuste mõju on aga väga keeruline statistikaga tõestada, mistõttu uuris autor lõputöö kirjutamise hetkel vastutavate inseneride käest toode disaini nõrku kohti. Üldine rahulolu disainiga oli madal, aga väljatoodud aspektidega oli autor kursis ning juba ise proovinud lahendust leida, kuid tulutult. Käesolevas seletuskirjas kirjeldatud muudatustega tutvudes muutus hinnang veidi positiivsemaks, sest tekkis küsimus, et kuidas enne muudatusi üldse pidi toote kokkupanek võimalik olema, mis näitab, et kuigi disain oli veel kaugel ideaalsest, oli projekti käigus tehtud muudatused ikkagi sammud paremuse suunas.

Autor analüüsis ka nelja tootmise kuu jooksul lõppkontrollis avastatud vigu, millest suur osa oli seotud montöörade tähelepanematusel, kuid ka kehva juhendiga ja visuaalkontrolli käigus mittetuvastavate vigadega, mis on montöörade seni ainuke kasutuses olev kontrollimise viis. Analüüsi tulemusena jättis autor ka mõned edasised parendusettepanekud, kuidas läbi järjepideva edasiarenduse vigade tuvastamiseks ja elimineerimiseks vajaminevat ajakulu vähendada.

Autori seisukoht ühtib vastutavate inseneride omaga, et kuigi on lihtne leida toote disainis puudujääke, on puudujääkide arv ja tõsisus märgatavalt vähenenud. Kuigi puudujääke on lihtne märgata, on neid väga keeruline paremaks muuta, kuna toote disaini ümbritsevad mõttelised raamid on jäigad, mis ei luba radikaalseid muudatusi teostada. Autor soovib veel viimast korda rõhutada

- mitmekesisuse tugevust – kui meeskond koosneb erinevate taustadega inimestest ja igaüks suudab oma valdkonnast tähtsama välja tuua, siis selle tulemusena sobib tehtud töö laiemale kasutusvaldkondade ringile;

- ja järjepideva edasiarenduse tähtsust, kuna pole reaalne teha kohe ideaalne disain. Head lahendused tehakse eksides, millest õppides on lihtne edasi areneda. Ei tohi ka leitud puudujääkide elimineerimist pooleli jätta, kuna muidu ilmnevad nad hiljem uuesti.

SUMMARY

The target for this thesis was to improve the design of a filter module using Design for X and lean methodologies. It had the biggest impact on improving Design for Assembly. Two different types of modules were taken apart and reassembled on three different occasions, each with a different design, to find design's shortcomings and improve them. The design was also extensively studied in CAD environment. Every shortcoming was countered with a proposal on how to improve it, which was then compared with the current design to see if realizing the proposal would solve more problems than it would create.

Production is not only fixing components to each other, but everything surrounding should also be taken into consideration. This thesis also considered automated testing, designing the production line, transporting the module, creating fixtures that would help during the assembly process and new breakthroughs in engineering.

It is difficult to prove the profitability of the changes using statistics, which is why the author decided to ask the current engineers responsible for this product for the shortcomings of the current design. The overall satisfaction was low, and the author was aware of the problems the engineers pointed out but was unable to improve the situation. When introduced to some of the changes done during this project, the feedback changed a little towards the better, because it became apparent that it was not even possible to assemble the module before and it was even more tedious to assemble the bits that were possible to assemble. This shows that even though the design was still far from perfect, the changes done during the project were steps taken towards the better.

The author analyzed the faults found by the final inspection over 4 months' period. Bigger part of the faults were tied to the assemblers not paying enough attention, but also the assembly instructions could've been better and some of the faults were not detectable via visual inspection, which was the only form of inspection available to assemblers. As a result, the author also left some further improvement ideas on how to lessen the time wasted by identifying and eliminating production faults.

Author agrees with the questioned engineers that even though it is still easy to find shortcomings in the design of the module, their amount and severity has indeed gone down significantly. All the shortcomings are difficult to improve because the imaginary boundaries surrounding the product are strict and do not allow radical changes. The author wishes to emphasize for the last time

- the power of diversity – if a team consists of individuals with different backgrounds, then every one of them is able to contribute their unique know-how towards a better design;
- and the importance of continuous improvement, because it is not realistic to design a perfect product from the first try. Good solutions are made by mistakes, learning from which provides a simple way to improve. Also, once a shortcoming is found, a proper solution must be worked out, because untreated problems will find their way back into existence.

KASUTATUD KIRJANDUSE LOETELU

1. „Design for Manufacturability & Concurrent Engineering“, David M. Anderson, CIM Press, 2004
2. „GeometricDFX“ [Online] <https://dfmpro.com/cad-systems/dfx/> (23.05.2021, in English)
3. Design For Manufacturability, Handbook, James G Bralla. McGraw-Hill, 1998
4. „WHAT IS LEAN?“ [Online] <https://www.lean.org/whatslean/#:~:text=A%20lean%20organization%20und erstands%20customer,process%20that%20has%20zero%20waste.> (26.05.2021, in English)
5. „What Is Value in Lean?“ [Online] <https://kanbanize.com/lean-management/value-waste/what-is-value-lean> (26.05.2021, in English)
6. „What is Muda? The 7 Wastes Every Lean Business Needs to Combat“ [Online] <https://www.process.st/muda/> (26.05.2021, in English)
7. „Five ways to apply lean to your personal life“ [Online] <http://www.careerlions.com/all/2016/9/6/five-ways-to-apply-lean-to-your-personal-life#:~:text=So%20LEAN%20methods%20are%20based,personal%20projects%20effective%20and%20fun.> (26.05.2021, in English)
8. „Study of LCL filter performance for inverter fed grid connected system“ [Online] <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1742-6596/1000/1/012119/pdf> (7.03.2021, in English)
9. ABB-sisene standard
10. „Roostevabast terasest ja legeritud poldid“ [Online] <http://ee.cnthefasteners.com/stainless-steel-and-alloy-fasteners/stainless-steel-and-alloy-bolts/page-6/> (18.04.2021)
11. „See on LEAN“, Niklas Modig, Pär Åhlström, 2016

12. „Increase efficiency and productivity in your assembly line“ [*Online*]
<https://www.atlascopco.com/en-ee/itba/industry-solutions/power-focus-6000/turbotight> (29.04.2021, in English)
13. „TBP - Redefining what a pulse tool can do“ [*Online*]
<https://www.atlascopco.com/en-ee/itba/plp/tbp> (29.04.2021, in English)
14. „Takt Time“ [*Online*] <https://www.leansixsigmadefinition.com/glossary/takt-time/#:~:text=A%20calculation%20performed%20in%20lean,divided%20by%20the%20customer%20demand.> (26.05.2021, in English)
15. „Pocket guide to tightening technique“ [*Online*]
https://www.atlascopco.com/content/dam/atlas-copco/industrial-technique/general/documents/pocketguides/9833864801_L.pdf (26.05.2021, in English)
16. „Selector 6 series“ [*Online*] <https://www.atlascopco.com/content/dam/atlas-copco/industrial-technique/general/documents/brochures-leaflets/tool-accessories/Selector%206%20Series.pdf> (26.05.2021, in English)
17. „Sockets & Bits Catalogue 2019“ [*Online*]
<https://www.atlascopco.com/content/dam/atlas-copco/industrial-technique/general/documents/brochures-leaflets/tool-accessories/Saltus%20Sockets%20&%20Bits%20Catalogue%202019.pdf> (26.05.2021, in English)

Lisa 1 Mooduli tüüpe väliste mõõtude võrdlus

