



TALLINNA TEHNIKAÜLIKOOL  
INSENERITEADUSKOND

Mehaanika ja tööstustehnika instituut

## CNC FREESPINGI SPINDLIHOIDJA

CNC MILLING MACHINE SPINDLE HOLDER

MAGISTRITÖÖ

Üliõpilane: Ivo Väli

Üliõpilaskood: 178030MATM

Juhendaja: Professor Martin Eerme

Tallinn 2019

## 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.

“.....” ..... 201.....

Autor: .....

/ allkiri /

Töö vastab bakalaureusetöö/magistritööle esitatud nõuetele

“.....” ..... 201.....

Juhendaja: .....

/ allkiri /

Kaitsmisele lubatud

“.....” .....201... .

Kaitsmiskomisjoni esimees .....

/ nimi ja allkiri /

**Mehaanika ja tööstustehnika instituut**

**LÕPUTÖÖ ÜLESANNE**

**Üliõpilane:** Ivo Väli, 178030MATM..... (nimi, üliõpilaskood)  
**Õppekava:** Tootearendus ja tootmistehnika.....(kood ja nimetus)  
**Peeriala:** Mehhanotehnika MATM02/15.....(kood ja nimetus)  
**Juhendaja(d):** Professor, Martin Eerme, 620 3270.....(amet, nimi, telefon)  
**Konsultandid:** .....(nimi, amet)  
.....(ettevõtte, telefon, e-post)

**Lõputöö teema:**

CNC freespingi spindlihoidja  
CNC milling machine spindle holder

**Lõputöö etapid ja ajakava:**

Nr	Ülesande kirjeldus	Tähtaeg
1.	Info otsimine	08.02.2019
2.	Arvutused	12.03.2019
3.	Projekteerimine	27.04.2019
4.	Magistritöö vormistamine	22.05.2019

**Töö keel:** Eesti **Lõputöö esitamise tähtaeg:** "....." .....201....a

**Üliõpilane:** Ivo Väli..... "....." .....201....a  
/allkiri/

**Juhendaja:** Martin Eerme..... "....." .....201....a  
/allkiri/

**Konsultant:** .....  
.....

"....." .....201....a

/allkiri/

# SISUKORD

EESSÕNA.....	5
LÜHENDITE JA TÄHISTE LOETELU .....	6
SISSEJUHATUS.....	7
1 Andmete kogumine .....	10
1.1 OÜ Muvor ja AS Luksusjaht freespinkide kirjeldus.....	10
1.2 AS Luksusjahi freesimisprotsessi kirjeldus.....	11
1.3 Sarnaste freespinkide, spindlihoidjate ja spindlite tehnilised andmed .....	12
1.4 Sarnaste freespinkide kirjeldused .....	14
2 Arvutused spindlihoidja projekteerimiseks .....	19
2.1 Lõiketerale mõjuva jõu arvutamine.....	22
2.2 Freespingi konstruktsioonile mõjuva jõu arvutamine .....	25
2.3 A ja C telje mootorite arvutused .....	27
3 Spindlihoidja projekteerimine .....	31
3.1 Topoloogia optimeerimine .....	31
3.2 Spindlihoidja optimeerimine NX-i topoloogia optimeerimise mooduliga .....	32
4 Tootmistehnoloogia - madalsurve liivvormvalu .....	38
5 Hinnakalkulatsioon .....	40
KOKKUVÕTE .....	42
SUMMARY .....	43
KASUTATUD KIRJANDUSE LOETELU.....	45
LISAD.....	47
LISA 1 – Spindlihoidja üldine kavand .....	48
LISA 2 – Spindlihoidja koostejoonis .....	49
LISA 3 – Spindlihoidja detailijoonis.....	50
LISA 4 – Vaheplaadi 02 detailijoonis.....	51
LISA 5 – Vaheplaadi 01 detailijoonis.....	52

## EESSÕNA

Antud magistritöö teemaks on CNC freespingi spindlihoidja projekteerimine. Kolmeteljelise freespingi töötlemise operatsioonid on piiratud kolme vabadusastmega. Toota on võimalik detaile mille töödeldavad pinnad on positiivse kaldega. Selleks, et töödelda horisontaalseid või negatiivse kaldega detaili pindasid on vaja spindlihoidjat käsitsi pöörata. Selleks on vaja lahti keerata kaks kinnitusmutrit kui hoidjat on vaja pöörata kahe telje suunas. Pöörata hoidja õigesse asendisse, kinnitada ja seadistada tööriista nullpunkt. Teema autor töötab CNC freespingi operaatorina. Spindlihoidja manuaalselt seadistamine on ajakulukas protsess. CNC freespingi efektiivsuse tõstmiseks tuli autor ideele projekteerida spindlihoidja, mis on võimalikult kerge, täpne ja mille on kaks lisatelge. Lisateljed võimaldavad spindlihoidjat automaatselt pöörata. Selle arvelt on võimalik kokku hoida detaili töötlusaega. Keerukama kujuga ja negatiivsete kaldega pindasid on võimalik töödelda palju kiiremini ja lihtsamalt. Suureneb freespingi tootlikus, täpsus ja töödeldavate detailide keerukus. Kahe lisatelje olemasolu tagab ligipääsu ka töödeldava detaili kõige keerukamatesse kohtadesse. Magistritöö sisaldab spindlihoidja projekteerimiseks vajalikke arvutusi, tarkvarde loetelu mida kasutati spindlihoidja projekteerimiseks, projekteerimise metoodikat, tootmistehnoloogia väljatöötamist ja tasuvuseanalüüsi.

## LÜHENDITE JA TÄHISTE LOETELU

CAD – Arvuti abil kolmemõõtmeliste objektide loomine

CAE – Kolmemõõtmeliste objektidele tugevusarvutuste tegemine

CAM – Masinkoodi genereerimine kolmemõõtmeliste objektide töötlemiseks

CNC – Arvprogrammjuhtimine ehk tööpinkide ja masinate tähtedest ja numbritest koosneva programmiga juhtimine

Direct drive mootor – Sünkroonmootor millel koormus on kinnitatud otse mootori võllile

NX – Raalprojekteerimise tarkvara

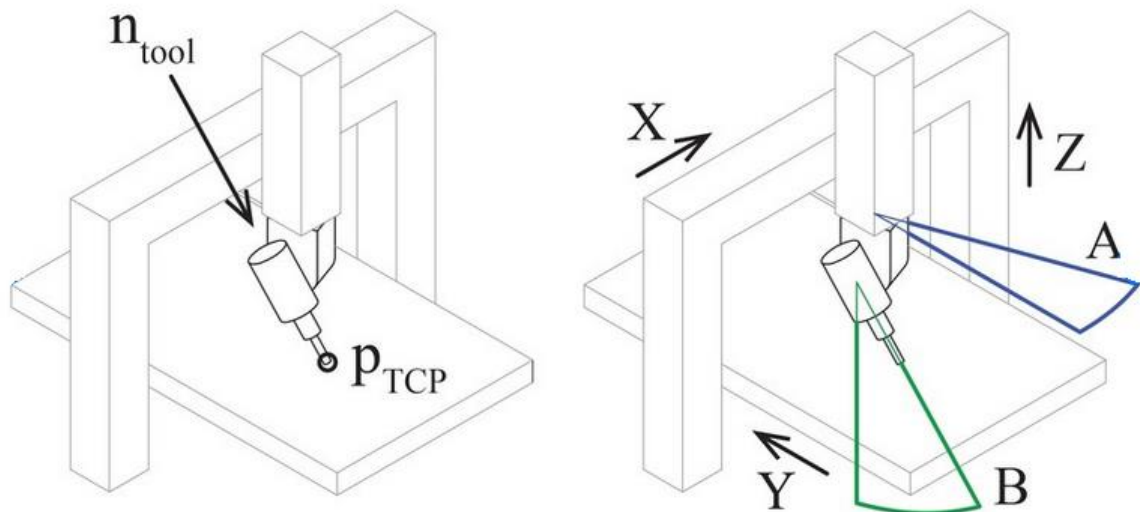
Shore D - Kõvaduse skaala mida kasutatakse kõvade kummide, pooljäikade plastide ja kõvade plastide kõvaduse mõõtmiseks

## SISSEJUHATUS

Lõiketöötlemine on töötlusviis, mille käigus materjali lõigatakse. Lõikamiseks kasutatakse lõikeriista, mille abil materjal tükeldatakse või osa sellest eemaldatakse. Lõigata võidakse nii käsitsi kui ka masinaga. Eristatakse laastuga (näiteks freesimine, saagimine, puurimine) ja laastuta (näiteks lõikamine giljotiinkäärde, veejoa või laseriga) lõikamist. [1]

Freesimine on materjalide lõiketöötlemine pöörleva lõikeriistaga, mida nimetatakse freesiks. Frees võidakse paigaldada nii freespinkide kui ka käsifreesmasinasse (näiteks ülafreesi). Mittelahtivõetavad tervikfreesid valmistatakse ühest tükist ning need on üldjuhul profiilsete lõiketeradega. Lahtivõetavate freeside (koostusfreeside) korpuse moodustab noavõll (freespea), mille külge kinnitatakse lõikurid. Freesimine on suure tootlikkusega ja eriti levinud töötlusviis nii metallide kui ka puidu puhul. Freesimise abil antakse toorikule soovitud mõõtmed, väliskuju ja pinnakvaliteet. Freesida võib muuhulgas sooni ja profiilseid pindu. On ka freesid pöördekehade töötlemiseks, metallide mahalõikamiseks, keermetamiseks, hammasrataste töötlemiseks jne. [2]

Tänapäeval kasutatakse arvprogrammjuhtimist masinaehituses ja metallitööstuses väga laialdaselt. Esimesed arvprogrammjuhtimisega algelised seadmed loodi 1950. aastatel lennukitööstuses. Need olid kohmakad ja arvutiprogrammid vajasisid mahukat matemaatilist ettevalmistust. Tänapäeval toodetakse mitmesuguseid eriotstarbelisi arvprogrammjuhtimisega tööpinke. Pingitootjad on välja arendanud APJ-pinkidele ehk CNC freespinkide moodul tehnika, mis võimaldab koostada eri otstarbega ja erinevate detailide töötlemiseks ette nähtud tööpinke. Tänapäeval on selliste pinkide märksõnadeks tootlikkus, paindlikkus ja kvaliteet. Uued kiiremad protsessorid, täpsemad andurid ja muundurid võimaldavad infot üha kiiremini töödelda. Juba praegu on võimalik pingi mälu salvestada palju erinevaid programme ja detailide jooniseid. [3]



Sele 1: CNC freespingi telgede kinemaatikaskem [4]

Lõputöö eesmärgiks on projekteerida kahe teljega spindlihoidja mida on võimalik kinnitada CNC freespingile. Ettevõttes praegu kasutusel olev kolme teljega freespingi teljed liiguvad X, Y ja Z suundades (Sele 1). Tihtipeale, aga nõuab keeruka kujuga detaili freesimine viite telge mida ka lõputöös käsitletav spindlihoidja võimaldab. Spindlihoidja annab kolme teljega CNC freespingile kaks lisatelge A ja B (Sele 1), mis vähendavad keeruka kujuga detaili töötlusaega oluliselt. Spindlihoidja on optimeeritud selliselt, et ta oleks massilt võimalikult kerge ilma täpsuse jaoks nõutavat jäikust kaotamata. Autoril on kavas välja töötada spindlihoidja tootmistehnoloogia ja plaanis on ka antud toode turustada ülemaailmselt. Sihtgrupiks on ettevõtted, kes on soetanud odavalt kasutatud või uue kolme teljega CNC freespingi, nüüd aga otisvad odavat täiustust kahe lisatelje kasutamiseks. Lõputöö teema on autori jaoks oluline ka sellepärast, et tegemist tundub olevat tulusa äriaga. Magistritöö autor töötab CNC freespingi operaatorina ja kasutab freesimiseks kolme teljega freespink. Freespingil on võimalik käsitsi pöörata spindlihoidjat, aga see on väga ajakulukas. Sealt tuli ka idee projekteerida ja valmis ehitada spindlihoidja, mis annab freespingile kask lisatelge. Lõputöös teostatakse kõik modelleerimised ja arvutused, mis on vajalikud spindlihoidja tootmise alustamiseks. Spindlihoidja projekteerimine hõlmab alumiiniumi töötlemisel tekkiva lõikejõu arvutamist, lõikekiirust ja spindli asendi muutmiseks vajaminevat jõudu.



Tarkvarad mida kasutatakse spindlihoidja projekteerimisel: Siemens NX



NX on uue põlvkonna digitaalse tootearenduse süsteem (CAD/CAM/CAE). NX omab kõige laiemat integreeritud rakenduste ringi, mis hõlmavad nii toote disaini, inseneriarvutusi kui ka tootmist. NX on intelligentse kasutajaliidesega, mis organiseerib tööriistu, käske ja informatsiooni lihtsal, kasutajale arusadaval viisil, muutes uute töövõtete omandamise kergeks.

NX CAD funktsionaalsus automatiseerib tänapäeva tootmisettevõtetes esinevaid inseneri-, projekteerimis- ja joonestusülesandeid. NX CAM funktsionaalsus võimaldab luua NX CAD osas disainitud detailide tootmiseks vajalikud NC programmid modernsetele arvjuhtimisega tööpinkidele. NX CAE funktsionaalsus pakub kasutajale palju erinevaid inseneriarvutusi toote, koostu ja detaili töövõime simuleerimiseks. NX on kolmemõõtmeline, topelttäpsusega süsteem, mis võimaldab täpselt kirjeldada peaaegu iga mõeldavat geomeetrilist kuju. Kombineerides neid geomeetriaid saab kasutaja oma toodet modelleerida, analüüsida ja luua jooniseid. Kui toote disain on valmis, võimaldab tootmise moodul, kasutades juba loodud geomeetriaid ja tootmisparameetreid nagu lõikeriista kuju, ettenihke kiirus jne. [5]

# 1 Andmete kogumine

## 1.1 OÜ Muvor ja AS Luksusjaht freespinkide kirjeldus

Spindlihoidja projekteeritakse ettevõttes OÜ Muvor kasutatavale freespingile. Freespink on ettevõtte juhatuse liikmete konstrueeritud ja seadistatud. Kuna ehitamise käigus andmeid alles ei hoitud ei ole ka seadme tehnilised andmed täpselt teada. Seega tehakse arvutused samm-mootorite valikuks vabadusastmete liigutamiseks ja spindli valikuks. Arvutused on vajalikud, et teada saada jõudude suurused mis mõjuvad masina konstruktsioonile löiketöötlemisel ja lõiketera seismisel maksimaalsetel vabadusastmete liikumise kiiruste juures vastu detaili põrkumisel. Lõpptulemuseks arvutatakse ja modelleeritakse spindlihoidja piisavalt tugev konstruktsioon, et vastu detaili põrkumisel seisva lõiketeraga deformeeruks ainult lõiketera.

Töötlemisala mõõtmed		
X-Telg	Y-Telg	Z-Telg
7,5 m	4,1 m	1,5 m

Tabel 1: OÜ Muvor freespingi tehnilised andmed

Muu informatsioon:

- Lõikeriista manuaalne vahetus
- Freespingi lineaarlaagrite manuaalne määrimine
- Spindlihoidja manuaalne pööramine

Magistritöö autor külastas Saaremaal laevaehitusega tegelevat ettevõtet AS Luksusjaht. Kui OÜ Muvor toodetakse hanke korras suurematele laevaehitusfirmadele Damen Group, Dutch Craft ja Zeelander Yachts komposiitmaterjalist roolimajade ja laevade korpuseid, siis AS Luksusjaht tegeleb komposiitmaterjalist luksusjahtide ja -kaatrite tootmisega. Luksusjahi puhul on tegemist valmistoodanguga. Mõlemad ettevõtted kasutavad freespinke samal eesmärgil. Luksusjaht kasutab freesimiseks ostetud freespinkide CMS Poseidon. Ettevõtte külastamise eesmärk oli koguda infot freesimisprotsessi ja freespingi kohta.

CMS Poseidon töötlemisala mõõtmed				
X-Telg	Y-Telg	Z-Telg	A-Telg	C-Telg
30 m	6 m	2,5 m	+/- 110°	+/- 360°

Tabel 2: AS Luksusjaht freespingi tehnilised andmed

Muu informatsioon:

- Laseriga lõiketera mõõtmise võimalus
- Lõiketerade hoidja
- Automaatne lõiketera vahetus
- Liikuvate osade automaatne määrimine
- Automaatne laastueemaldus
- Spindlihooldja automaatne pööramine

## 1.2 AS Luksusjahi freesimisprotsessi kirjeldus

1. Freesitava detaili ümber modelleeritakse CAD tarkvaraga 3D toorik.
2. Toorik valmistatakse tootmises vastavalt joonistele ja kinnitatakse freespingi tööalale.
3. 3D mudelis määratakse nullpunktiks üks tooriku nurkadest.
4. Freespingi lõiketera tsepter liigutatakse täpselt samasse tooriku nurka kuhu määrati nullpunkt ja nullitakse freespingi teljed.
5. Freespingi tarkvarasse sisestatakse CAM programm ja alustatakse lõiketöötlust.

### 1.3 Sarnaste freespinkide, spindlihoidjate ja spindlite tehnilised andmed

Järgnevalt toob töö autor välja tabelkujul sarnaste freespinkide tootjad ja nende suuremate pinkide tehnilised andmed.

	Töötlemisala mõõtmed m			Lineaarsete telgede ajamid X, Y, Z telg				Täpsus
	X-telg	Y-telg	Z-telg	Ettenihke kiirus m/min			Ettenihke kiirendus m/s <sup>2</sup>	Standard
				X-telg	Y-telg	Z-telg	X, Y, Z-telg	
Zimmerman FZ42	3-40	2,5-6	1-3	60	60	60	Kuni 4	ISO 230-2
Poseidon CMS	2,5-60	2,6-8,5	1,3-4	85	85	45	Kuni 3	
FIDIA GTF/L	6-18	3,5-4	1-2,5	60	60	40		

Tabel 3: CNC freespinkide tehnilised andmed

	Vändemoment pöördtelgedel Nm				Telgede pöörderaadiused +/- °		Pöördtelgede ajamid						Täpsus	Mass koos spindliga kg
	Fikseerimata		Fikseeritud				Ettenihke kiirus °/s		Ettenihke kiirendus °/s <sup>2</sup>		Resoluteioon °		Korratavus arc-sec	
	A-telg	C-telg	A-telg	C-telg	A-telg	C-telg	A-telg	C-telg	A-telg	C-telg	A-telg	C-telg	A ja C-telg	
Zimmermann FZ45	3000	3000	5600	6000	110	360	360	360	700	700	0,0001	0,0001	6	
Poseidon KX5					110	360	150	150	500	500				
Poseidon PX5					120	270	150	150	500	500				
FIDIA M5C					95-110	360								
HSD HST610	480	680	1800	2000	110	270	180	180					4	260
HSD HST810	707	1250	2000	4000	110	270	180	180					2	550
PDS 5AX-J50-YAS	320	320	570	570	185	320	115	115						55
PDS 5AX-H50-YAS	320	670	740	980	185	320	160	190						140
Technai TCH-L13	165	241	312	442	105	250	300	300					10	390
Fisher S19i	110	154	1900	1900	110	360								

Tabel 4: CNC freespinkide spindlihoidjate tehnilised andmed

	Võimsus kW		Väändemoment Nm		Kiirus rpm		Tööriista		Jahutus
	S1 (100%)	S6 (40%/2 min)	S1 (100%)	S6 (40%/2 min)	Max	Nom	Hoidik	Vahetus	
M3ABC	60	79	95	126	22 000		HSK-A63	Automaatne	Vedelik
VH60	63	82	300	392	15 000		HSK-A100	Automaatne	Vedelik
KX5	31,4	31,4	100	100	15 000		HSK-A63	Automaatne	Vedelik
PX5	12	15	9,7		24 000		HSK-F63	Automaatne	Vedelik
HST610 – ES505	25	30	30	36	24 000	8000	HSK-A63		
HST810 – ES510	45	55	67	87,5	24 000	6000	HSK-A63		
M5C	35				24 000		HSK-A63		
PDS XLHA135-18/12	18	20			24 000	12 000	HSK-F63		Vedelik
TCH-L13 EVO	27		40		24 000		HSK-A63		
PDS XLHA110-8.5/12	8,5	10			24 000	12000	HSK-F63		Vedelik
MFWS-1709/30/44 VC HSK-A63	20	22	21,5	23,7	30000		HSK-A63	Automaatne / manuaalne	

Tabel 5: CNC freespinkide spindlite tehnilised andmed

## 1.4 Sarnaste freespinkide kirjeldused

Zimmermann FZ42/100 CNC freespink on modulaarse disainiga mis võimaldab kombineerida omavahel erinevate suurustega tööpiirkondi ja spindlihoidjaid. Pukk – stiilis konstruktsioon fikseeritud küljeseinadega võimaldab töödelda erinevaid detaile. Sõltumata freespingi massist ja suuruselt on freesimisprotsess väga suure täpsusega. Zimmermann FZ42 on suure stabiilsuse ja jäikusega mitmekülgne viie teljega freespink millega on võimalik valmistada erinevaid tooteid nagu: mudelite ja vormide freesimine täites lennunduse ja autotööstuse nõudeid. Sobib kasutamiseks ka laevanduses kasutatavate detailide freesimiseks ja alternatiivenergia tööstuse jaoks vajalike detailide valmistamiseks. VH60 spindlihoidjaga on võimalik töödelda suure kõvadusega materjale nagu titaanium, teras, kerged metallid ja malm. [6]



Sele 2: Zimmermann FZ42/100 CNC freespink [6]

CMS Poseidon on viie interpolaarse teljega freespink spetsiaalselt disainitud suurte alumiiniumist, malmist, komposiidist, ja puidust detailide kiireks töötlemiseks. Poseidon on stabiilse terasest konstruktsiooniga, tugevate ja jäikadega mehhaaniliste sõlmedega, freespingi tööala on võimalik kohandada vastavalt vajadusele – kõik see tagab suurte detailide täpse ja kiire töötlemise. [7]



Sele 3: CMS Poseidon freespink [7]

FIDIA GTF/L viie teljega CNC freespink on sobilik keeruliste alumiinium ja komposiit materjalist detailide freesimiseks. M5C spindlihoidja tagab dünaamilise, interpolaarse ja suure täpsusega viieteljelise freesimise. CNC freespingi konstruktsioon on tehtud keevitatud terasest ja betoonseintest, et tagada vajalik jäikus ja täpsus. Modulaarsus võimaldab klientidel valida just nende nõudmistele vastava suurusega freespingi. Viieteljelisel freesimisel on võimalik A ja C telg hüdrauliliste piduritega jäigalt lukustada ühte asendisse võimaldades ära kasutada maksimaalset spindli väändemomenti. [8]



Sele 4: FIDIA GTF/L freespink [8]



HSD on tootevalikus erineva konstruktsiooniga spindlihoodjad. Valida saab ühe- või kahepoolse spindli kinnitusega mudelite vahel. HSD spindlihoodjates on innovaativsus kombineeritud tehnoloogiaga ja saadaval on spindlid võimsusega 4 kW – 50 kW. Spindlihoodjad sobivad metalli, puidu ja plastiku freesimiseks. [9]



Sele 5: HSD spindlihoodja [9]

PDS on tootevalikus erinevad kahe teljega spindlihoodjad. Spindlite võimsus on vahemikus 7,5 kW - 17 kW. A - telje kaldenurk on 50°, et spindlil oleks rohkem ruumi töötlemiseks. Mõlemat telge juhivad madala tolerantsiga täpsed reduktorid mis võimaldavad telgede täpset positsioneerimist ja täpsuse kordamist. Lisaks samaaegsele töötlemisele on võimalik mõlemad teljed lukustada, et tagada suurem jäikus ja täpsus. Võimalik on töödelda puitu, kergmetalle ja komposiitmaterjale. 5-telje kasutamine tagab CNC seadmete suurema tootlikuse ja kvaliteedi. [10]



Sele 6: PDS spindlihoodja [10]

Technai TCH-L13 EVO spindlihoodja on disainitud saavutamaks suurepärase alumiiniumist, terasest ja komposiitmaterjalist mudelite ning vormide pindade viimistlust. Spindlihoodja mõlemate telgede ajamiseks on ``direct drive`` mootorid. ``Direct drive`` mootorid tagavad suurema täpsuse, sest jõud kantakse otse telgedele ja süsteemis on vähem mehaanilisi liikuvaid detaile. 500 mm raadiuse juures on täpsus +/- 20 mikromeetrit. [11]



Sele 7: Technai spindlihoodja [11]

Fischer S19i spindlihoidja on kompaktse disainiga, mis võimaldab detaile töödelda ka kõige kitsamatest kohtadest kuhu suuremate spindlihoidjatega on ligipääs raskendatud. [12]



Sele 8: Ficheri spindlihoidja [12]

## 2 Arvutused spindlihoidja projekteerimiseks

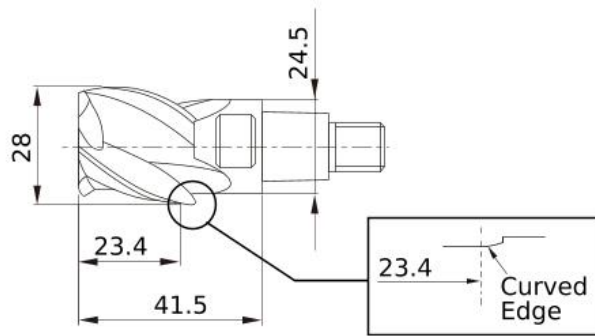
Freespingiga töödeldakse nelja erinevat tüüpi materjali: MDF, EPS, alumiinium ja polüesterpasta. MDF on keskmise tihedusega puitkiudplaat. Toodetakse peenetest puidukiududest, mis pressitakse kokku kõrge rõhu ja temperatuuri juures. Lisatakse orgaanilist side- ja kõvendusainet. Saadav materjal on ühtlase tiheduse ning homogeense struktuuriga, kergesti töödeldav.[13]

EPS on väikese tihedusega poorne soojusisolatsioonimaterjal, mis koosneb 98% ulatuses õhust. EPS-soojusisolatsiooniplaadid koosnevad paisutatud polüstüreeni graanulitest, mis on veeauru toimel omavahel tihedalt kokku ühendatud. EPS - i graanulitel on osaliselt avatud mikropoorid, kuhu vesi ei tungi, kuid veeauru liikumine neis toimub. Taoline mikropoorne homogeenne materjal tagab soojustatavale konstruktsioonile suurepärase ehitusfüüsikalised ja mehaanilised omadused.[14]

Polüesterpasta PF07E on mehaaniliseks töötlemiseks mõeldud pahtel. Kasutatakse eeltöödeldud tooriku (MDF, komposiit, klaaskiud, polüuretaan vaht) katmiseks ja seejärel töötlemiseks. Pastat on detailidele lihtne kanda õhukese kui ka paksu kihina. Kõveneb kiirelt ja ühtlaselt. Kahekomponentse pasta pealispinna *Shore-D* kõvadus tahkes olekus on 54 +-2. [15]

Alumiinium on kergmetall mida on lihtne töödelda. Alumiiniumi eelised tulevad esile siis kui kasutatakse ära materjali väikest massi koos mehaaniliste omadustega. Need omadused teevad alumiiniumist suurepärase alternatiivi terasele kohtades, kus on tähtis väike mass ja korrosioonikindlus.[16]

Töödeldavaks materjaliks valib töö autor 7000 seeria alumiiniumsulami. AL 7075 Brinelli kõvadus on 150 ja tõmbetugevus 572 Mpa. Lõiketera valikul lähtutakse sellest millisesse materjaligruppi lõiketera kuulub. Alumiiniumi töötlemiseks valitakse lõiketera (Sele 9), mis kuulub mitterauasulamid ja mittemetalsete materjalide N01 gruppi. Lõiketera materjaliks võib olla tööriistateras. Tööriistateras sobib suurte muutuvate lõikejõudude korral plastide ja alumiiniumsulamite töötlemiseks.[17] Lõiketera valik tehakse alumiiniumsulami järgi, sest alumiinium on eelpool toodud materjalidest omaduste poolest kõige suurema pinnakõvadusega.



Offset type

## RECOMMENDED CUTTING CONDITIONS

### Side milling

Work material		Aluminium alloy A6061, A7075					
L/D	Dia. DC (mm)	Cutting Speed (m/min)	Main Spindle Revolution (min <sup>-1</sup> )	Feed per Tooth (mm/tooth)	Table Feed per Min. (mm/min)	Depth of Cut ap (mm)	Cutting Width ae (mm)
≤3	12	500	13000	0.117	4600	9.6	2.4
	14	500	11000	0.118	3900	11.2	2.8
	18	500	8800	0.153	4000	14.4	3.6
	22	500	7200	0.175	3800	17.6	4.4
	28	500	5700	0.211	3600	22.4	5.6
5	12	300	8000	0.09	2200	9.6	1.0
	14	300	6800	0.09	1800	11.2	1.1
	18	300	5300	0.12	1900	14.4	1.4
	22	300	4300	0.14	1800	17.6	1.8
	28	300	3400	0.17	1700	22.4	2.2
7	12	200	5300	0.08	1300	9.6	0.5
	14	200	4500	0.08	1100	11.2	0.6
	18	200	3500	0.11	1200	14.4	0.7
	22	200	2900	0.12	1000	17.6	0.9
	28	200	2300	0.15	1000	22.4	1.1
Depth of cut							DC: Dia.

Sele 9: Lõiketera mõõtmed ja soovituslikud lõikeparameetrid [18]

Lõiketera vahetelg valitakse vastavalt lõiketerale (Sele 10). Vahetelg on valmistatud inconel 718 materjalist, mis on nikli ja kroomi sulam. Sulamil on hea korrosioonikindlus ja plastilisus mitmesugustes tugevalt söövitavates keskkondades. [19]

Põhiparameetrid:

Sulamisvahemik - 1260 °C ~ 1320 °C

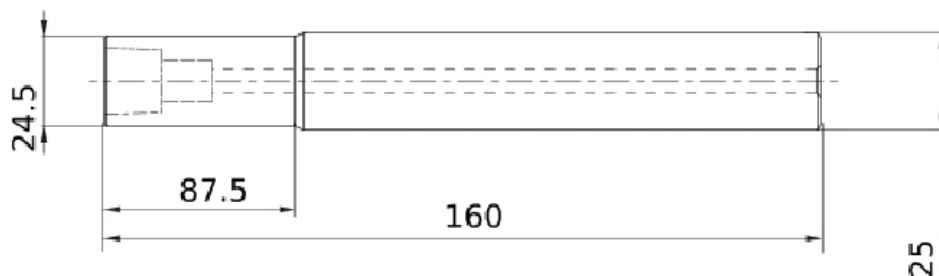
Tihedus - 8,24 g / cm<sup>3</sup>

Voolavuspiir - 1034 MPa

Tõmbetugevus 1240 MPa

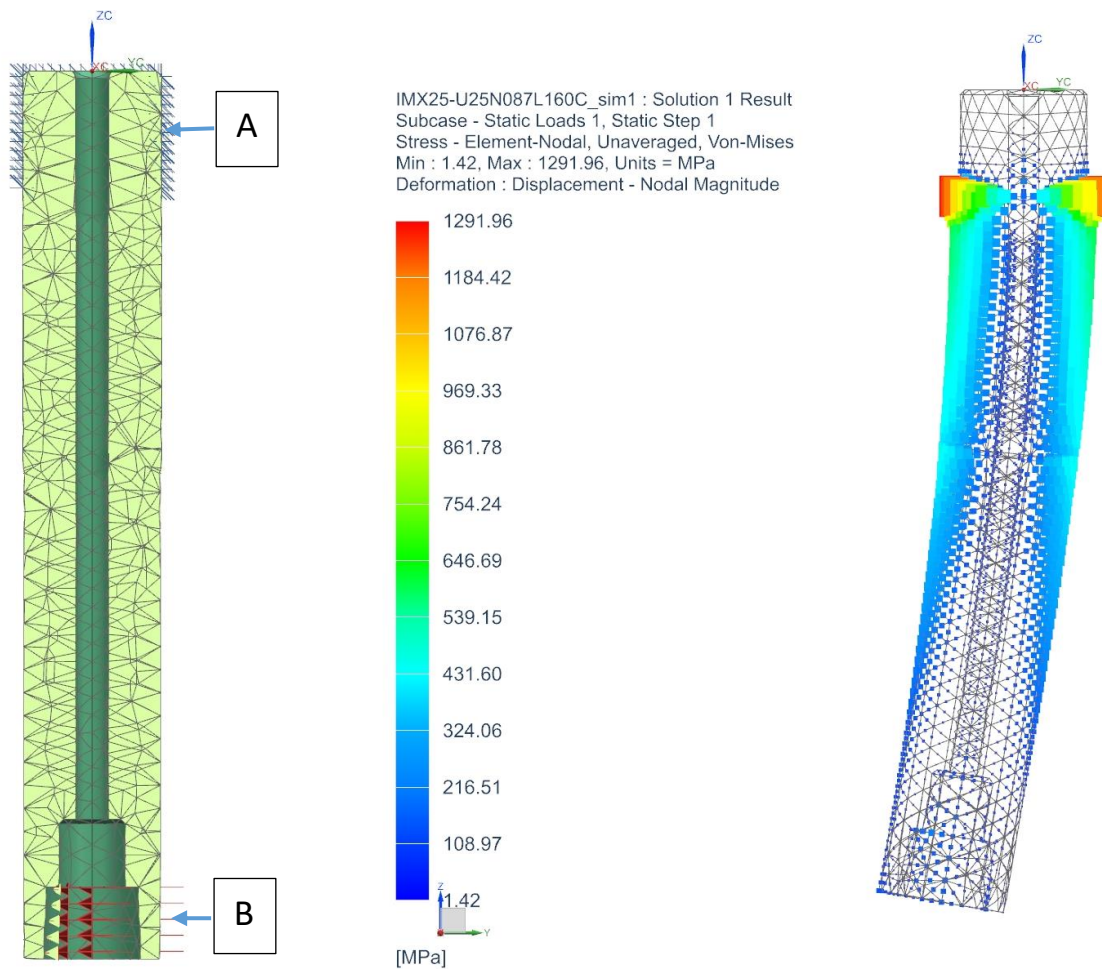
Brinelli kõvadus – 331

Diameter (Unit)		
CUB	connection unit basis	Coded neither metric nor inch
DCONWS	connection diameter workpiece side	24.5
DMM	shank diameter	25
DCONMS	connection diameter machine side	25
CCWS	connection code workpiece side	MIC02G2500\$\$\$\$
BMC	body material code	Solid Carbide
LB	body length	87.5
UST	unit system	metric
LF	functional length	160
TSYC	tool style code	IMX



Sele 10: Lõiketera vahetelje parameetrid [20]

Järgnevalt arvutatakse kui suurt jõudu on vaja, et lõiketera vahetelg puruneks. Selleks kasutab töö autor tarkvara NX tugevusarvutuste simulatsioonikeskkonda.



Sele 11: NX tugevusarvutuste simulatsioonikeskkond

A tähega on tähistatud siniselt viirutatud detaili fikseeritud ala. B tähega on tähistatud jõu mõjusuund  $F = 7500$  N. 7500 N juures on jõud piisavalt suured, et ületada sulami tõmbetugevus ja detail puruneb (Sele 11).

## 2.1 Lõiketerale mõjuva jõu arvutamine

1. Erilõikejõu arvutamine lõiketera ühele lõikehambale [21]

$a_p$  – lõikesügavus = 4 mm

$a_e$  – lõikelaius = 22.5 mm (Tööriista soovituslikud lõiketingimused Sele 9)

$v_c$  – lõikekiirus = 500 m/min (Tööriista soovituslikud lõiketingimused Sele 9)

$f_z$  – hambaettenihe = 0,21 mm (Tööriista soovituslikud lõiketingimused Sele 9)

$\eta$  – lõikepingi efektiivvõimsus = 0,8

$d$  – lõiketerea läbimõõt = 28 mm

$A$  – laastu ristlõige hamba kohta  $\text{mm}^2$

$$(1) A = a_p \cdot f_z$$

$$A = 4 \cdot 0,21 = 0,84 \text{ mm}^2$$

$h$  – laastu paksus =  $f_z = 0,21$  mm

$k_c$  – erilõikejõud = 1470 N/ $\text{mm}^2$  (Erilõikejõu standardväärtuste tabel. Mehaanikainseneri käsiraamat lk 339)

$F_c$  – erilõikejõud hambale N

$$(2) F_c = 1,2 \cdot A \cdot k_c \cdot C$$

$$F_c = 1,2 \cdot 0,84 \cdot 1470 \cdot 1 = 1481 \text{ N}$$

## 2. Lõikevõimsuse arvutamine [21]

$\phi$  – hambumisnurk

$$(3) \phi = \frac{d}{a_e}$$

$$\phi = \frac{28}{22,5} = 1,25$$

$\phi = 106^\circ$  - Hambumisnurga tabel (Mehaanikainseneri käsiraamat lk 340)

$N_e$  – lõikavate hammaste arv

$N$  – hammaste arv = 3

$$(4) N_e = N \cdot \frac{\phi}{360^\circ}$$

$$N_e = 3 \cdot \frac{106^\circ}{360^\circ} = 0,9$$

$P_c$  – lõikevõimsus

$$(5) P_c = N_e \cdot F_c \cdot v_c$$

$$P_c = 0,9 \cdot 1481 \cdot \frac{500 \text{ m}}{60 \text{ s}} = 11108,5 \text{ Nm/s} = 11,1 \text{ kW}$$

## 3. Spindli võimsuse ja pöörlemissageduse arvutamine [21]

$P_1$  – Spindli võimsus kW

$$(6) P_1 = \frac{P_c}{\eta}$$

$$P_1 = \frac{11,1}{0,8} = 13,8 \text{ kW}$$

$n$  – freesi pöörlemissagedus rpm

$$(7) n = \frac{v_c}{\pi \cdot d}$$

$$n = \frac{500}{3,14 * 0,028} = 5747 \text{ rpm (5700 rpm Tööriista soovituslikud lõiketingimused Sele 9)}$$

	HSD -ES929 - H6161H0765	PSD – DLA120 880-120- A010	Ficher MFW-1224/42/7 VC HSK-E40 PNP
Võimsus S1 kW	16	15	15
Pööret minutis rpm	12000	12000 – 24000	42000
Väändemoment Nm	12,7		6
Pinge V	380	220 / 380	
Efektiivsus	0,9		
Jahutus	Vedelik	Vedelik	
Mass kg	34	34	25
Tööriistavahetus	Automaatne / HSK F63	Automaatne / HSK F63	HSK-E40

Tabel 6: Erinevate spindlite võrdlus

HSD ES929 - H6161H0765 spindel valitakse suurema võimsuse ja väändemomendi pärast.

#### 4. Lõiketerale mõjuva jõu arvutamine lõiketöötlemise käigus [22]

$v_f$  – ettenihkekiirus mm/min

$$(8) v_f = N * f_z * n$$

$$v_f = 3 * 0,21 * 5747 = 3620 \text{ mm/min (3600 mm/min Tööriista soovituslikud lõiketingimused Sele}$$

9)

T - tangentsiaalne jõud lb

hp - lõikamiseks vajalik võimsus 18,4 hp

d - lõikuri läbimõõt = 1,1 tolli

rpm = 5700 rpm

$$(9) T = \frac{126000 * hp}{d * rpm}$$

$$T = \frac{126000 * 18,4}{1,1 * 5700} = 369,7 \text{ lb} = 1644,5 \text{ N}$$

Tangentsiaaljõu komponentide arvutamine:

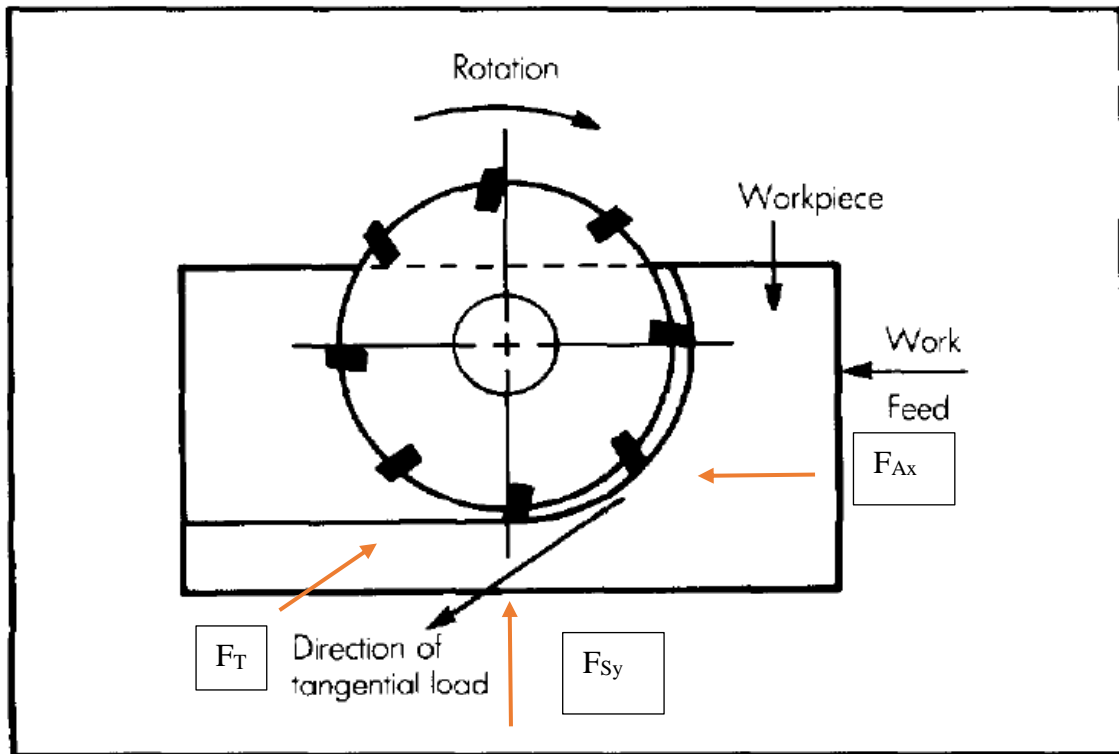
A – resultantjõud piki x telge

S – resultantjõud piki y telge

T – lõiketera poolt tekitatud tangentsiaaljõud

$\alpha$  – tangentsiaalsejõu ja x telje vaheline nurk kraadides





**Fig. 10-78 Tangential load for face milling cutter.**

Sele 12: Tangentsiaaljõu komponendid [22]

$$(10) A = T * \cos \alpha$$

$$A = 1644,5 * \cos 45^\circ = 1162,8 \text{ N}$$

$$(11) S = T * \sin \alpha$$

$$S = 1644,5 * \sin 45^\circ = 1162,8 \text{ N}$$

## 2.2 Freespingi konstruktsioonile mõjuva jõu arvutamine

Vabadusastmeid liigutavate samm-mootorite poolt freespingi konstruktsioonile tekitava jõu arvutamine. [23; 24]

$T_m$  – kuulkruvi pöörlemisel tekkiv pöördemoment Nm

$F_a$  – tõukejõud piki kuulkruvi telge N

$l$  – kuulkruvi läbitud tee ühe täispöörde tegemisel m

$\eta$  – kuulkruvi efektiivsus 0,9

$$T_m = \frac{F_a * l}{2 * \pi * \eta}$$

$$F_a = \frac{T_m * 2 * \pi * \eta}{l}$$

$n$  – samm-mootori maksimaalsed pöörded = 220 rpm

$v_a$  – ettenihke kiirus m/s

$$(12) n = \frac{v_a}{l}$$

$$l = \frac{v_a}{n}$$

$$l = \frac{0,06}{220} = 0,00027 \text{ m} = 0,27 \text{ mm/p}$$

Kuulkruvi peab vähemalt 0,3mm liikuma ühe pöördega, et saavutada maksimaalset ettenihkekiirust. See tingimus on täidetud, sest kataloogist valitud kuulkruvi läbib ühe täispöörde tegemisel 5mm. Seega võib valida madalamate pööretega samm-mootori. Pöörete arvu ja pöördemomenti samm-mootorilt kuulkruvile on võimalik muuta ka ülekandesuhte muutmisega.

$$l = 5 \text{ mm/p}$$

$\alpha$  – kiirendus

t – kiirenduse konstant = 0,15 s

$$(13) \alpha = \frac{v_f}{t}$$

$$\alpha = \frac{3,6}{0,15} = 24 \text{ m/s}^2$$

$P_a$  – kiirendamiseks vajalik teljesihiline jõud N

W – liikuvate osade mass = 750 kg

$\mu$  – hõõrdekoefitsient = 0,02

g – raskuskiirendus 9,81 m/s<sup>2</sup>

$$(14) P_a = W * \alpha + \mu * W * g$$

$$P_a = 750 * 24 + 0,02 * 750 * 9,81 = 18147,15 \text{ N}$$

$$(15) T_m = \frac{(P_a + T) * l}{2 * \pi * \eta}$$

$$T_m = \frac{(1644,5 + 18147,15) * 0,005}{2 * 3,14 * 0,9} = 17,5 \text{ N/m}$$

$$(16) F_a = \frac{T_m * 2 * \pi * \eta}{l}$$

$$F_a = \frac{17,5 * 2 * 3,14 * 0,9}{0,005} = 19782 \text{ N}$$

Samm-mootorite maksimaalsete pöörete arvutamine. Samm-mootorite poolt freespingi konstruktsioonile x, y, z suunas tekitatav jõud on 19782 N. Samm-mootori valikul arvestatakse maksimaalsete pöörete arvuga ja kuulkruvi pöörlemisel tekkiva pöördemomendiga.

JVL MST432C213-X1AA9.0 mootori minutis tehtavate pöörete arvu arvutamine [25]

$$(17) \text{rpm} = \frac{V}{2 * l * A * spr}$$

$$\text{rpm} = \frac{80}{2 \cdot 10^9 \cdot 0,002} = 220$$

V – nimipinge

I – induktiivsus

A – nimivool

spr – sammude arv ühele pöördele

Samm-mootoriks valitakse JVL MST432C213-X1AA9.0 kõige suurema väändemomendi järgi.

	Primopal PHB110S126- 460	JVL MST432C213- X1AA9.0	TDL 86-126	Nanotec ST11018S5504-A
Väändemoment Nm	6,8	25	9,4	8,5
Nimipinge V	48	80	60	48
Nimivool A	6,3	9	5,6	5,5
Pööret minutis rpm	185	220	300	240
Induktiivsus mH	10,5	10	5,8	9,8
Mass kg	2	11,7	3,8	5
Sammunurk °	1,8	1,8	1,8	1,8
Sammu pöördele spr	200	200	200	200

Tabel 7: Erinevate samm-mootorite võrdlus

## 2.3 A ja C telje mootorite arvutused

A ja C telje mootorite väändemomendi arvutamine [26]

Spindli mass = 34 kg

Lõiketerale mõjuv jõud  $T = 1644,5 \text{ N} = 164 \text{ kg}$

Kokku =  $1977,9 \text{ N} = 201,7 \text{ kg}$

Kokku mootoriga =  $235,7 \text{ kg} \sim 250 \text{ kg}$

A - kiirendus  $^\circ/\text{s}^2$

$\omega_1$  - lõppkiirus  $^\circ/\text{s}$

$\omega_2$  - algkiirus  $^\circ/\text{s}$

t - aeg s

$$(18) A = (\omega_1 - \omega_2) / t$$

$$A = (360^\circ - 0^\circ) / 2 = 180^\circ/\text{s}^2$$

J - inertsmoment  $\text{kg}/\text{m}^2$

m – mass = 250 kg

r – raadius = 150 mm

$$(19) J = 0,5 \cdot m \cdot r^2$$

$$J = 0,5 * 250 * 150^2 = 2,8 \text{ kg/m}^2$$

T - väändemoment Nm

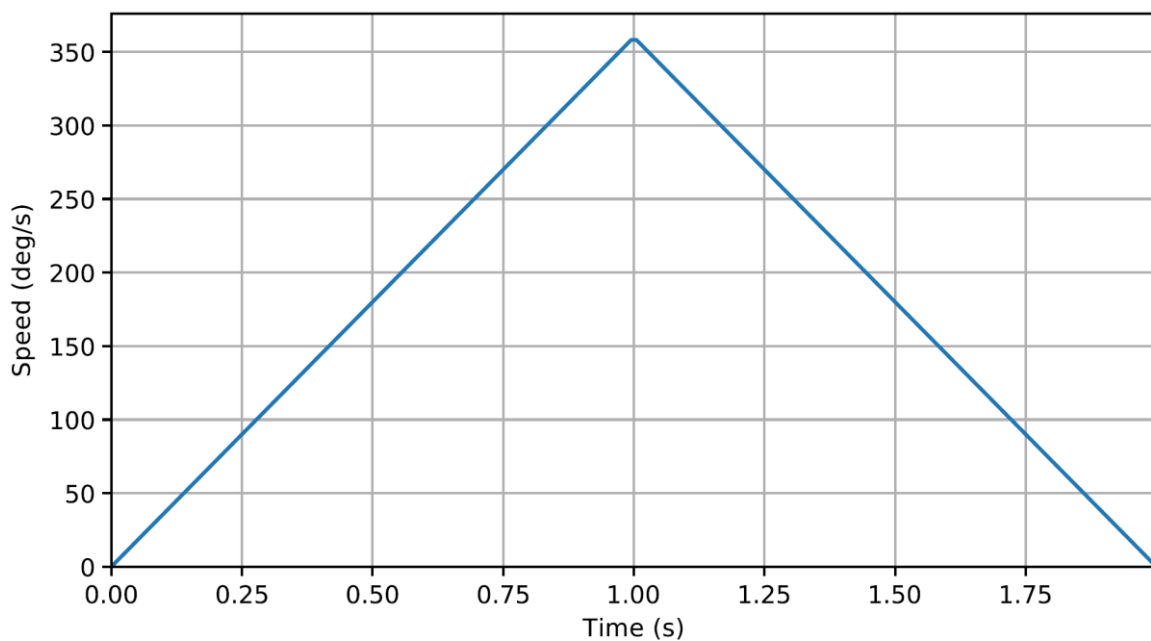
$$(20) T = J \times A = 2,8 * 180$$

$$T = 2,8 * 3,14 \text{ rad/s}^2 = 8,79 \text{ Nm} \sim 10 \text{ Nm}$$

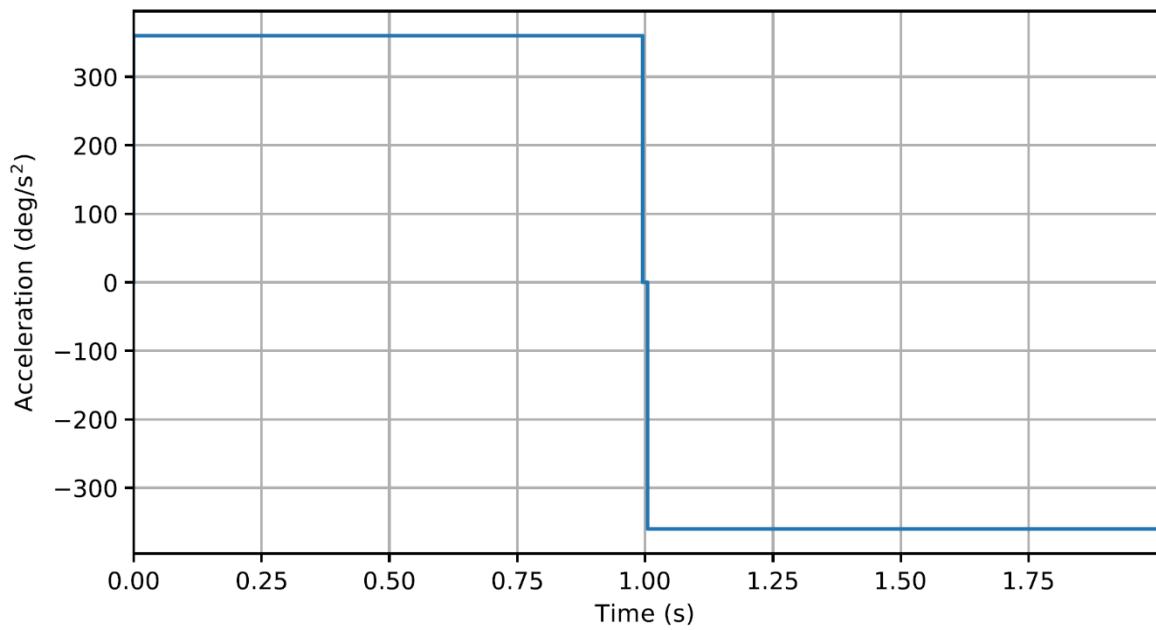
10 Nm väändemomenti on vaja, et liigutada sellise massiga spindlihoidjat sellise kiirusega. Liikumiskiirust, kiirendust ja läbitud teekonda iseloomustab Sele 13.

Yaskawa SGMCS-35E-B11 direct - drive mootor valitakse sellepärast, et teljesuunaline koormusetaluvus on kõige suurem. Direct – drive mootoril on koormus kinnitatud otse mootori võllile ilma, et oleks kasutatud mehaanilisi jõuülekandeid nagu reduktorid, rihm- või hammasülekandeid. Direct – drive mootorid on võimelised tootma suurt väändemomenti madalatel kiirustel. Direct – drive mootorid on sarnased servo mootoritega, harjadeta sünkroonmootorid. [27]

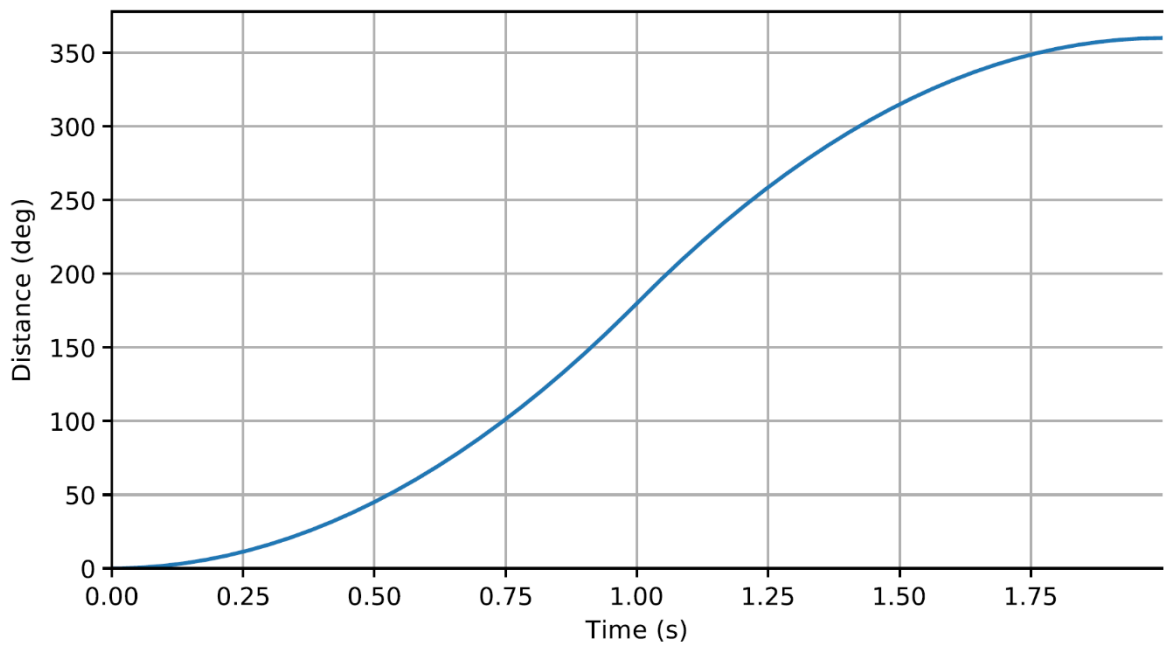
### Speed QTR-A-160-34Z



## Acceleration QTR-A-160-34Z



## Motor position QTR-A-160-34Z



Sele 13: Liikumiskiiruse, kiirenduse ja läbitud teekonna graafik

	Akribis ACW 220	Akribis ADR220- A165	Kollmorgen D062-AKD- X00606	Yaskawa SGMCS-35E- B11	Yaskawa SGMCS- 10C-C11
Läbimõõt mm	220	220	175	290	175
Kõrgus mm	42	165	133,5	112	90
Väändeemoment S1 Nm	10,25	94,9	9,8	35	10
Väändeemoment S6 Nm	23,2	284,6	33,5	105	30
Mass kg	6,5	24,1	13,8	34	10,2
Pöörded rpm	300	483	500	250	200
Täpsus +- arc sec	5	25		15	15
Korratavus +- arc sec	0,57	2		1,3	1,3
Telgkoormus N	300	2800		11000	3300
Koormusmoment Nm	55,2	95		320	75

Tabel 8: Direct – drive mootorite võrdlus

## 3 Spindlihoidja projekteerimine

### 3.1 Topoloogia optimeerimine

Topoloogia on matemaatika haru, mis uurib kujundite omadusi, mis on invariantseid topoloogiliste teisenduste suhtes. Sõna "topoloogia" tuleb kreekakeelsetest sõnadest topos (koht) ja logos (sõna, mõiste, õpetus).

Kujundi all mõeldakse topoloogias punktihulka, mille alamhulgad rahuldavad teatud aksioome. Neid kujundeid nimetatakse topoloogilisteks ruumideks. Praktiliselt iga kujundit mõne teise geomeetria (afiinse geomeetria, projektiivse geomeetria, diferentsiaalgeomeetria jne) tähenduses saab loomulikult moel vaadelda topoloogilise ruumina. Selles mõttes on topoloogia kõige üldisem geomeetria. Topoloogia uurib ka sõlmedega seotut.

Topoloogia peamine ülesanne on tuua välja ja uurida ruumide selliseid topoloogilisi omadusi, mis ei muutu topoloogilistel teisendustel – topoloogilisi invariante. Tähtsaimate topoloogiliste invariantide hulka kuuluvad näiteks sidusus, kompaktsus, mõõde, mass, fundamentaalrühm, homoloogiarühmad jne.

Samuti selgitab ja uurib topoloogia pidevuse ideed. Intuitiivselt väljendab see ruumi ja aja fundamentaalseid omadusi ning järelikult on sel tunnetuse seisukohast fundamentaalne tähtsus. Vastavalt ilmub topoloogia, milles pidevuse idee saab matemaatilise kehtastuse, loomulikult moel enamikus matemaatika harudes. Ühenduses algebraga moodustab topoloogia matemaatika üldise aluse ja aitab kaasa selle ühtsusele. [28]

Topoloogia optimeerimine on matemaatiline meetod mis optimeerib materjali koguse etteantud disainipiirkonna ulatuses, arvestades koormus- ja rajatingimustega. Eesmärgiks on süsteemi maksimaalne toimimine. Topoloogia optimeerimine on erinev kuju ja suuruse optimeerimisest sellepolest, et disain võib võtta mistahes kuju etteantud disaini piirides selle asemel, et järgida etteantud disaini. Topoloogia optimeerimine kasutab lõplike elementide meetodit disaini tulemuse hindamiseks. Disain on optimeeritud kasutades gradiendil põhinevaid matemaatilisi programmeerimistehnikaid nagu optimaalsuse kriteeriumi algoritm ja asümptootide liigutamise meetod või mitte gradiendil põhinevaid algoritme nagu geneetilised algoritmid. Topoloogia optimeerimisel on palju rakendusi kosmose-, mehaanika ja tsiviilehituse aladel. Insenerid kasutavad topoloogia optimeerimist disaini kontseptsiooni väljatöötamisel. Tänu loomulikult genereeritud kujunditele on tulemust sageli raske toota. Seetõttu on vajalik topoloogia optimeerimisega saadud tulemust kohandada tootmisele sobilikuks. [29]

### 3.2 Spindlihoidja optimeerimine NX-i topoloogia optimeerimise mooduliga

Konstruksioon on projekteeritud selliselt, et kui CNC freespink peaks pörkuma mitte töödeldava objektiga, siis kõigepealt puruneb lõiketera vahetelg 7500 N juures, (Sele 11) seejärel direct – drive mootori telg 11000 N juures (Tabel 7) ja viimasena puruneb spindlihoidja saavutades 19782 N (Valem 16).

Spindlihoidja materjal - Valualumiinium A356 – T6

Poissoni tegur – 0,33

Tihedus – 2,6 g/cm<sup>3</sup>

Elastsusmoodul – 70000 MPa

Voolavuspiir – 200 MPa

Koormusolukord:

Samm-mootorite jõud = 19782 N

Väändemoment = 105 Nm

Vaja on leida kõige optimaalsem massi ja tugevuse suhe. Ületada ei tohi voolavuspiiri, sest sellisel juhul pärast jõudude lakkamist taastab detail oma esialgse kuju.

Töö käik:

Määratakse spindli ja direct-drive mootorite omavaheline optimaalne asukoht. Mootorite ümber modelleeritakse kompaktne ala nõ. disainiala kuhu sisse algoritmid hakkavad materjali jaotama (Sele 13). Tegemist on sümmeetrilise kehaga, seega modelleeritakse ainult pool spindlihoidjat. Disainialale modelleeritakse avad ja läbiviigud mootorite kinnitamiseks. Rajatingimused ja koormused on kirjeldatud Selel 17. Disainialale modelleeritakse mootorite asemele tahked kehad (Sele 14 märgitud siniselt). Tahkete kehade ümber modelleeritakse eelseadistatud programmis shell käsuga 5 mm seinapaksusega mootori paigaldus asukohad. Programm ei tohi materjali modelleerida avadesse ja mootorite asukohale.

Programmi seadistamine:

Disainiala ja mootorite mudelid programmi sisestamine.

Kehale materjali määramine.

Materjali jaotamise tingimuseks valitakse materjali laotamine ilma tuge deta. Materjali jaotamisel jääb kehasse minimaalselt õhutühimikke. Määratakse detaili sümmeetriatelg, et materjali jaotatakse sümmeetriliselt. Järgnevalt fikseeritakse ja määratakse jõud nagu kirjeldatud Selel 17. Lisaks määratakse avade ümber 10 mm materjali. Keelatakse avadesse materjali voolamine. Elemendi suuruseks valitakse 25 mm ja keha massiks 15 kg. Disainiala hinnanguline mass on 60 kg. Programmi käivitamine.



Tulemus:

Approximate results for [LINKED\_BODY(1)]:

	Max Disp (mm)	Max VM Stress (MPa)
LC 1	5.14	194
LC 2	7.98e-05	0.00397
LC 3	4.46e-06	0.00131
Max	5.14	194

Optimization report for [LINKED\_BODY(1)] (approximate values):

Approximate Mass: 13.484543kg (29.728293lb): 77.212562% reduced.

Objective:

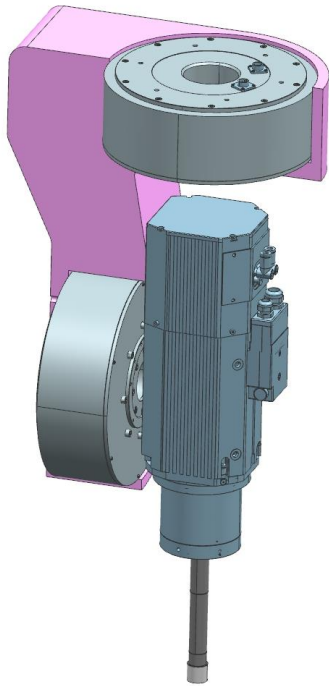
-Compliance minimized

Constraint:

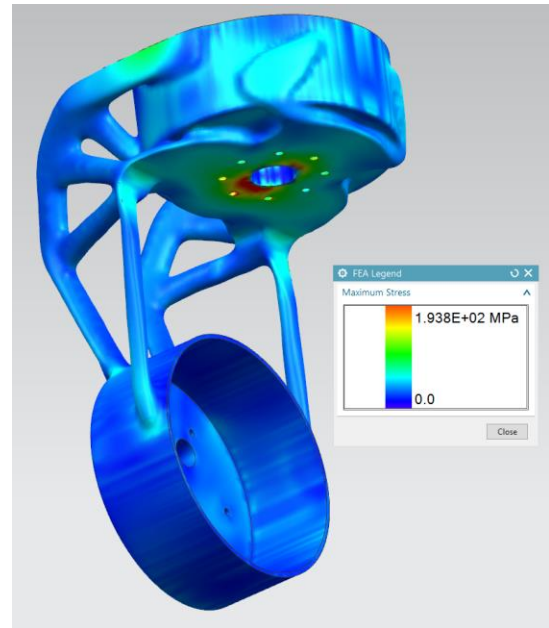
--Volume fraction 22.7874% (Specified as 22.0287%)

Recipe finished in 1905.8s.

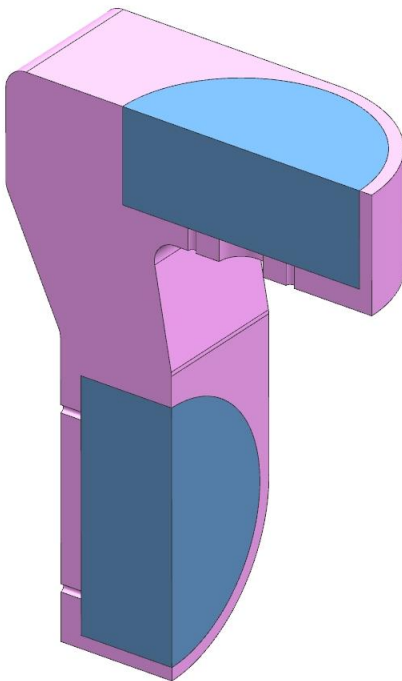
Materjali voolavuspiiri ei ületatud ja keha mass on 13,4 kg. Selel 15 on näha kuhu kõige suuremad pinged koonduvad. Tulemustes on näha, et maksimaalne läbipaine on 5,14 mm. Spindlihoidja modelleeritakse uuesti järgides optimeerimise tulemusel saadud materjali jaotumist disainialas. Modelleeritud spindlihoidja mass on 18 kg (Sele 16). Konstruktsioonile tehakse täiendavad tugevusarvutused lõiketöötlemise koormusolukorras, et teada saada kui palju konstruktsioon lõiketöötlemise ajal läbi paindub. Konstruktsioonile mõjuva jõu suurus lõiketöötlemise ajal on 1644,5 N ja mootorite poolt tekitatav väändemoment 105 Nm. Koormusolukorda iseloomustab Sele 18. Tugevusarvutused on välja toodud Selel 19. Tugevusarvutustes on näha, et maksimaalne koormus spindlihoidjale lõiketöötlemise ajal on 37,66 Mpa ja maksimaalne läbipaine 0,6 mm. Lõiketera, lõiketera vahetelje ja spindlihoidja läbipainet on võimalik kompenseerida kasutades lühemat vahetelge spindli ja lõiketera vahel või vähendada lõiketerale mõjuvat jõudu lõikekiiruse ja sügavuse muutmisega.



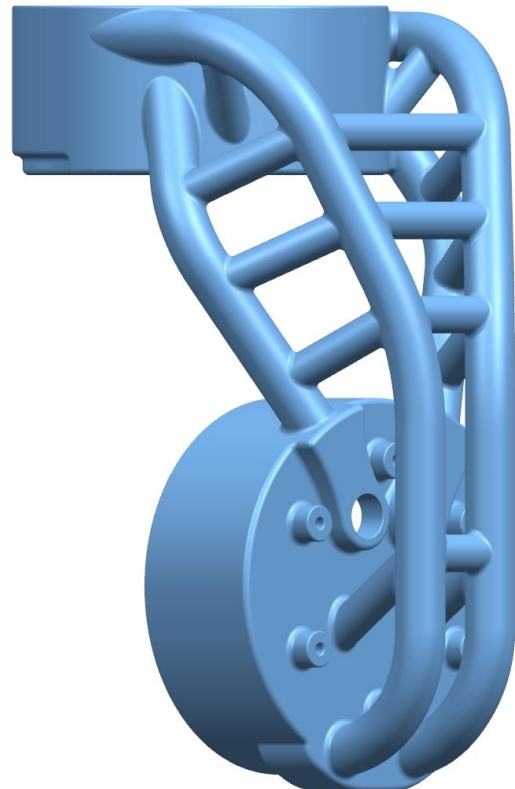
Sele 13: Mootorite ümber modelleeritud disainiala



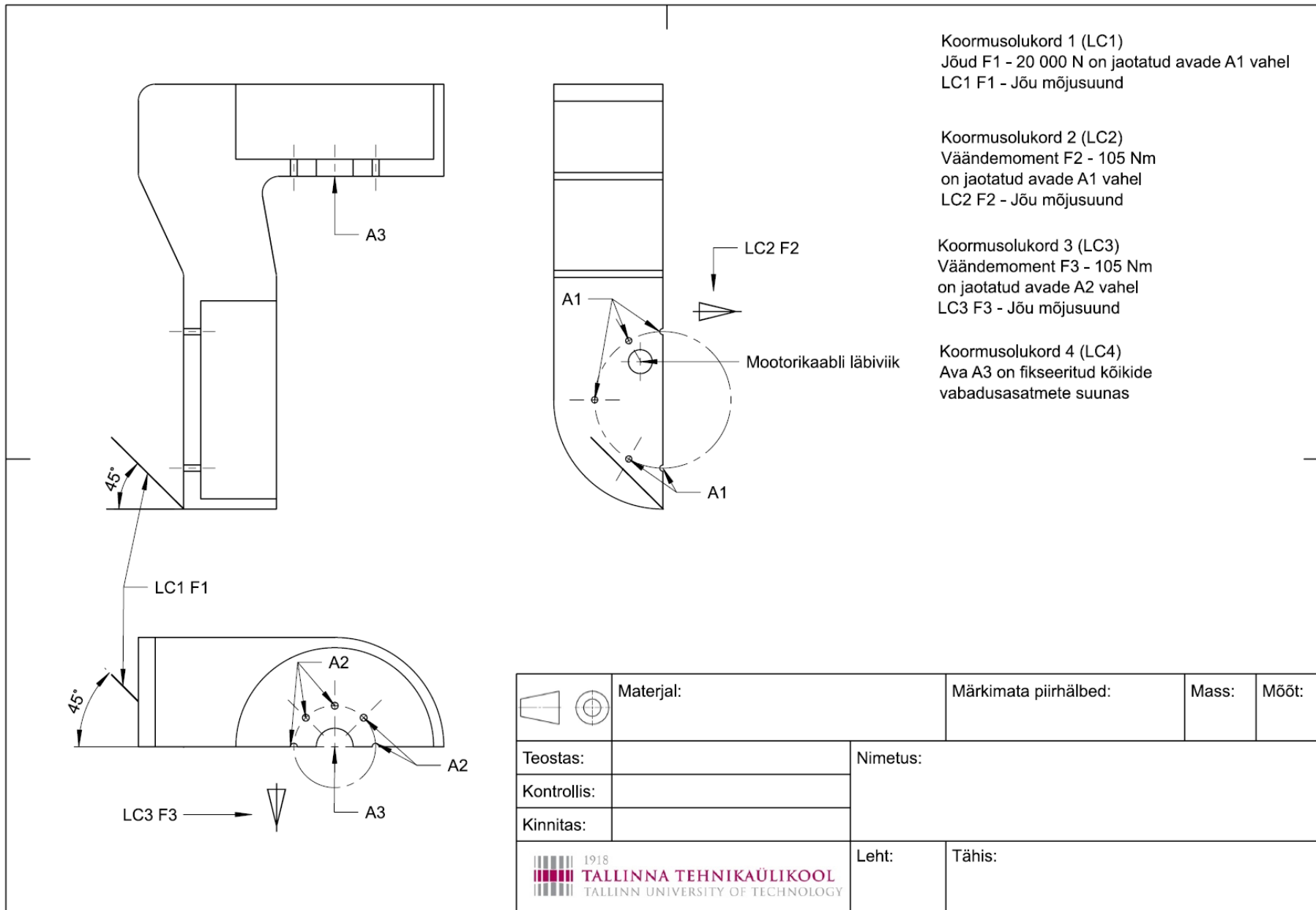
Sele 15: Pingete koondumine



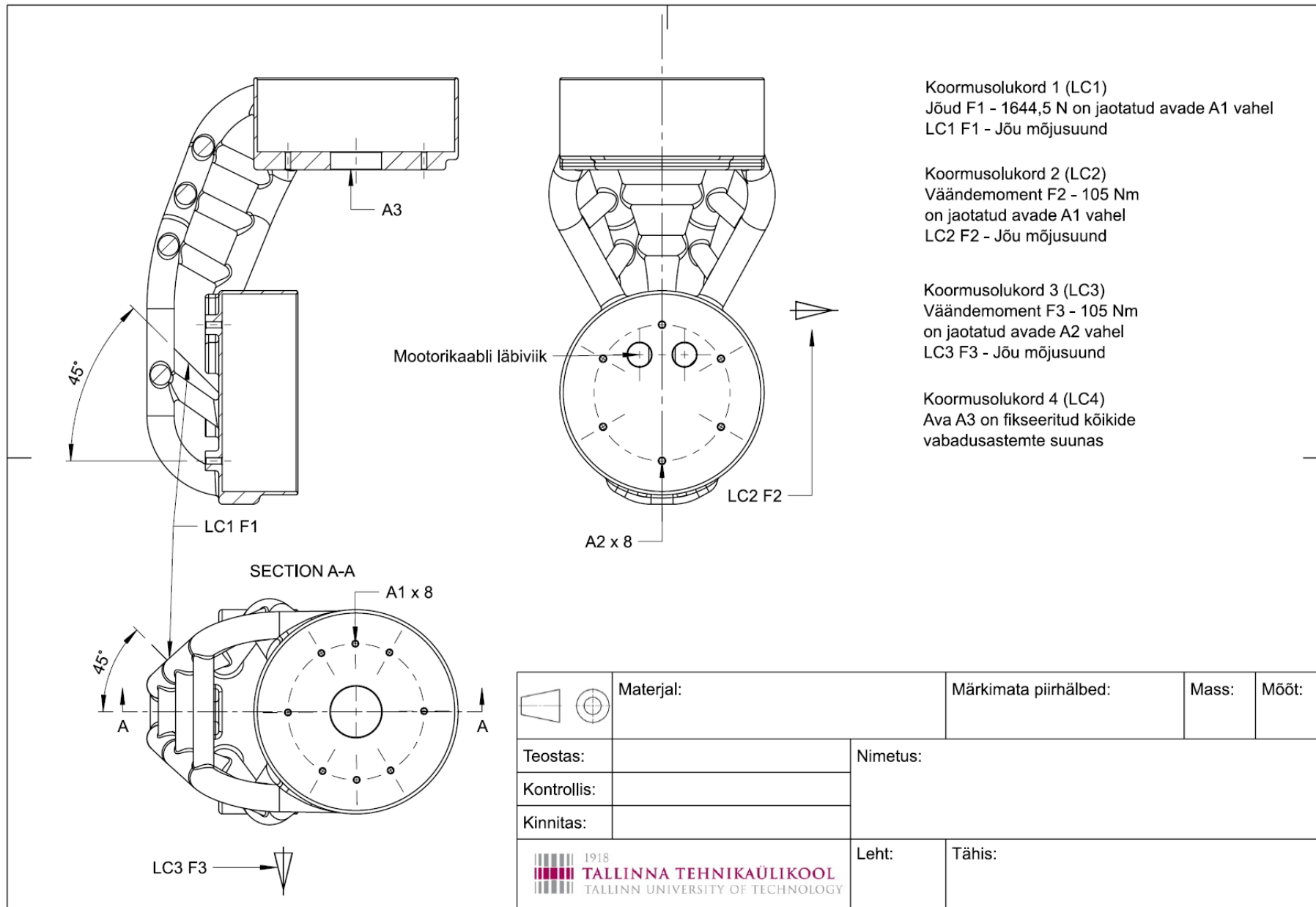
Sele 14: Mootorite mudelid



Sele 16: Modelleeritud spindlihooldja

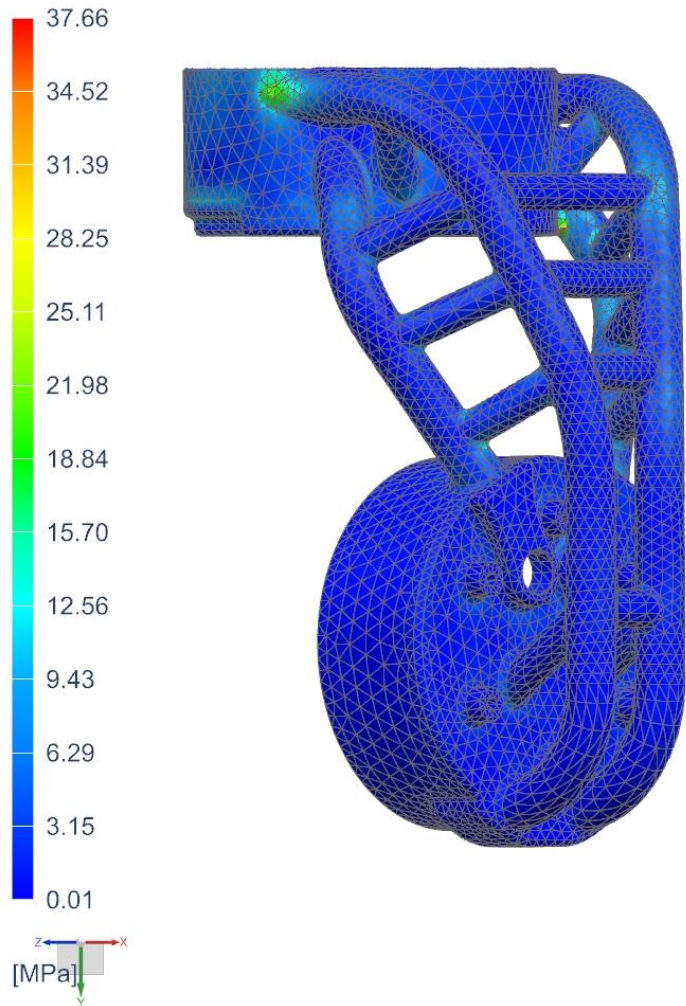


Sele 17: Disainiala koormusolukord

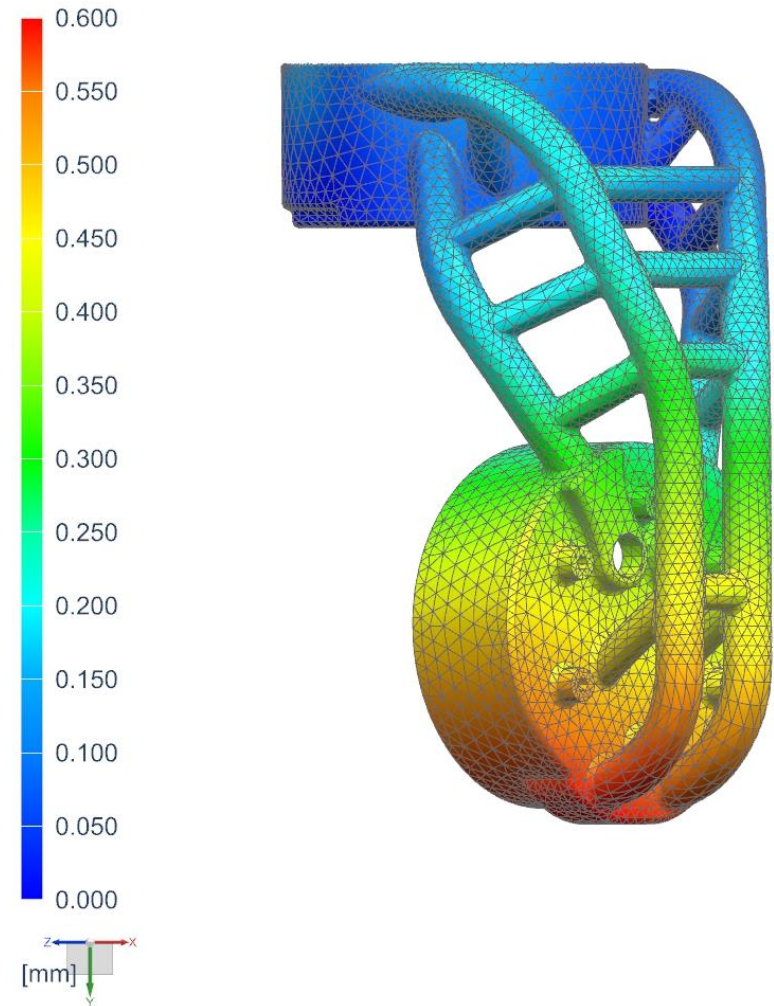


Sele 18: Spindlihooldja koormusolukord

Holder\_Design\_01\_sim1 : Solution 1 Result  
Subcase - Static Loads 1, Static Step 1  
Stress - Element-Nodal, Unaveraged, Von-Mises  
Min : 0.01, Max : 37.66, Units = MPa  
Deformation : Displacement - Nodal Magnitude



Holder\_Design\_01\_sim1 : Solution 1 Result  
Subcase - Static Loads 1, Static Step 1  
Displacement - Nodal, Magnitude  
Min : 0.000, Max : 0.600, Units = mm  
Deformation : Displacement - Nodal Magnitude



Sele 19: Tugevusarvutuste tulemus

## 4 Tootmistehnoloogia - madalsurve liivvormvalu

Valumaterjal A356-T6

Alumiiniumil on väga hea korrosioonikindlus ja kõrge tugevuse ja massi suhe. Spindlihoodja valmistatakse madalsurve liivvormvalu meetodil. Detaili poorsuse vähendamiseks valatakse sulametall aeglaselt hoidmise reservuaari, et ei tekiks turbulentset voolamist. Seejärel juhitakse sulametall oma raskuskjõu mõjul läbi tõusukanali vormi kus toimub tahkestumine. On võimalik valmistada keerulise kujuga tooteid massiga 1 – 50 kg. [30] Keerulise kujuga valanditele vormide valmistamine on võimalik tänu 3D printimise tehnoloogia arengule. Topoloogia optimeerimise meetodi ja 3D printimise tehnoloogia kasutamisega on võimalik toota väga keeruka kujuga detaile. Võimalik on vähendada oluliselt toote massi ja funktsioneerimiseks vajalikke detailide arvu. Kui varem koosnes toode mitmest erinevast omavahel kokku keevitatud detailist siis nüüd on võimalik valada ühe detailina. Keerulise kujuga liivast vormid valmistatakse 3D printimise tehnoloogiat kasutades. Binder – Jetting 3D printimise tehnoloogiat kasutades pihustatakse eelnevalt 300 mikromeetri paksune kvartsiiva kiht töölaual. Tööorgan seob sideainega liivaterad omavahel sealt kuhu on vaja vormimaterjali tekitada. 3D mudelist tehakse iga kihi jaoks ristlõige. Iga järgneva kihi lisamisel liigub töölaud ühe kihi võrra allapoole. Protsessi korratakse seni kuni valuvorm on valmis. Kui üleliigne liiv on valuvormist eemaldatud on vorm valmiseks valmis. 3D prinditud valuvormide eeliseks on see, et nad ei vaja eraldi masintöötlemist. Kui võrrelda valamist 3D printimisega siis valandile ei ole vaja projekteerida tugesid. [31]

Kuna magistritöö autor ei ole jõudnud veel spindlihoodjale valuvormi projekteerida, seega tuuakse näide sarnase geomeetriaga detaili valandist saksamaa põllumajandusmasinate tootja Amazone varal. Uue kandevankri raami (Sele 20) disainiga vähendati massi 18% võrra. Liivvalu vorm prinditi ühe maailma suurima tööstusliku just liivvalu vormide tootmiseks ehitatud 3D printeriga. Eelnevalt oli valmsitatud kandevankri raam keeviskonstruktsioonist, mille mass oli 245 kg ja keevisõmbelusi oli 16,5 m. Keeviskonstruktsiooni oli keeruline toota ja Amazone otsustas kasutada valutehnoloogiat. Kasutades Inspire topoloogia optimeerimise tarkvara saadi sobilik disain, mis pidas vastu nõutavatele koormustingimustele ja mida oli võimalik valada. Uus kandevankri raam oli 45 kg kergem kui keeviskonstruktsioon ja 275% pikema tööeaga. Valudefektide vältimiseks simuleeriti sama tarkvaraga sulametalli voolamine valuprotsessi käigus. [32]

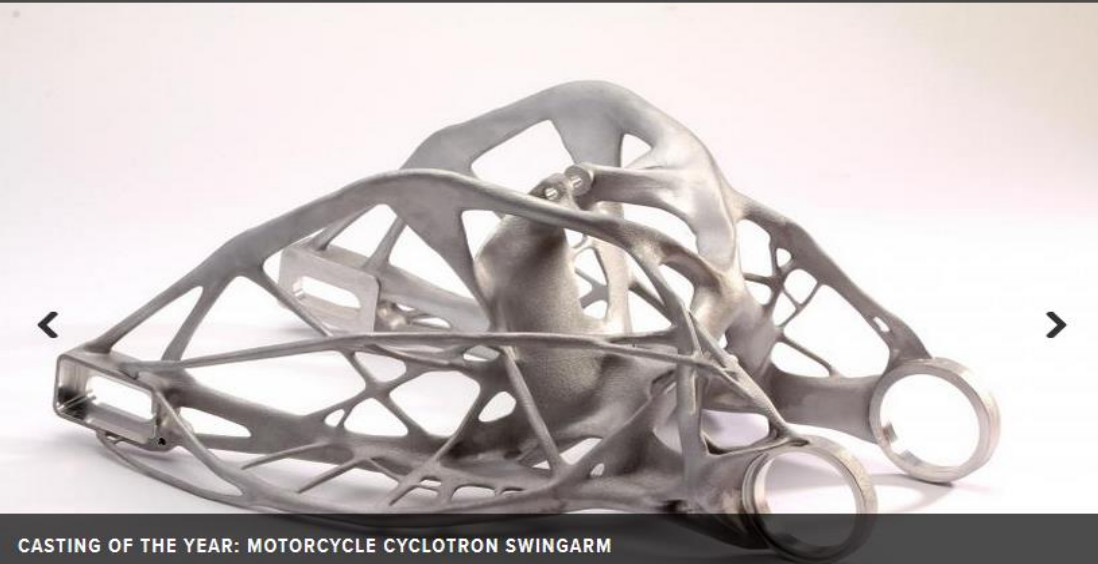
Sama meetodikaga on valmistatud ka 2018 aasta parima valandi auhinna võitnud mootorratta tagahark (Sele 21).





Sele 20: Kanderaami vankri valand [32]

## 2018 CASTING OF THE YEAR WINNERS



### CASTING OF THE YEAR: MOTORCYCLE CYCLOTRON SWINGARM

Casting of the Year: A356-T6 motorcycle swingarm produced by Tooling & Equipment International (Livonia, Michigan) in the low pressure sand casting process.

Sele 21: Mootorratta tagahark [33]

## 5 Hinnakalkulatsioon

Ostutoodete hinnad ja metalltoodete valmistamisega tegelevatelt ettevõtetelt on hinnapakumised võetud 21. mai 2019 seisuga. Hinnad sisaldavad transpordikulu maksumust. Hinnad ei sisalda käibemaksu. Spindli ja direct drive mootori maksumus on saadud HSD ja Yaskawa tehniliselt toelt. Poldid, mutrid ja seibid maksumus on saadud tööriistamarketi kodulehelt. Vaheplaat 01 ja 02 hinnapakumine on saadud ettevõttelt Istrek OÜ. Spindlihoidja valandi maksumus on arvatud Custompart.net kalkulaatoriga. [34]

Valandi maksumuse arvutamiseks tuleb sisestada kalkulaatorisse:

- 1) Valatavate detailide kogus - 1
- 2) Valandi materjal – Alumiinium 356 – T6
- 3) Risttahuka mõõtmed mm kuhu valatava detail sisse mahub -  $645 * 340 * 470$
- 4) Valatava detaili ristlõike pindala  $\text{mm}^2$  – 200000
- 5) Valatava detaili ruumala  $\text{cm}^3$  – 6707
- 6) Valataval detailil olevate avade ja ribide arv - < 50

Kalkulaator arvestab tööjõukulu järgnevalt:

- 1) Valuvormi valmistamine – 125 eur/h
- 2) Valandi valamine – 30 eur/h
- 3) Valandi puhastamine – 25 eur/h
- 4) Tootmistehase tõhusus - 85%
- 5) Valumaterjali maksumus – 2 eur/kg

Spindlihoidja valmistamise maksumus

Ostutooded

1tk HSD -ES929 - H6161H0765 – 3500 eur

1tk Yaskawa SGMCS-35E-B11 –6804 eur (2tk = 13608 eur)

Poldid, mutrid ja seibid – 32 eur

Tellimusel valmistatud tooted

Vaheplaat 01 – 120 eur

Vaheplaat 02 – 150 eur

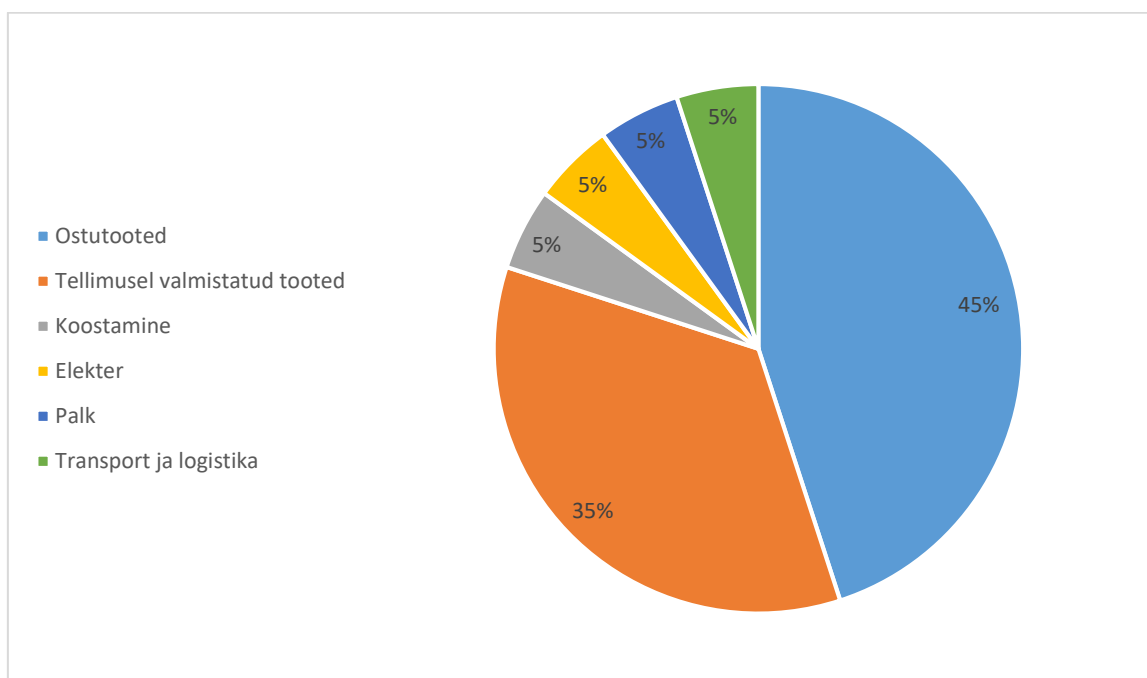


Spindlihoodja valand – 11766 eur

- 1) Materjali maksumus – 75 eur
- 2) Tootmiskulud – 30 eur
- 3) Tööriistade, rakiste ja vormide valmistamine – 11661 eur

Kuna spindlihoodja masintöödeldavate pindade maht ja keerukus on sama mis vaheplaat 01 ja 02. Arvestatakse spindlihoodja valandi masintöötlemise maksumuseks 300 eurot, võttes aluseks Istrek OÜ hinnapakumise vaheplaat 01 ja 02 valmistamiseks.

Arvestades ostutoodete ja tellimusel valmistatud toodete maksumusega on spindlihoodja valmistamise maksumus on 29476 eurot. Spindlihoodja lõpliku omahinna moodustavate komponentide osakaal on protsentuaalselt välja toodud Selet 22. Hinnakalkulatsioonist on puudu spindlihoodja koostamise, juhtsüsteemide ja juhtmestiku maksumus. Ei ole arvestatus ka elektri maksumusega, palgakuluga ja transpordi- ja logistikakuluga. Võrdluseks tuuakse välja Technai TCH-L13 spindlihoodja maksumus 58000 eurot.



Sele 22: Spindlihoodja omahinna komponentide osakaal

## KOKKUVÕTE

Magistritöö eesmärgiks on spindlihoidja projekteerimine ja valmistustehnoloogia väljatöötamine. Spindlihoidja põhieesmärgiks on anda kolmeteljelisele CNC freespingile kaks lisatelge. Spindlihoidja on projekteeritud ettevõtte OÜ Muvor juhatuse liikmete konstrueeritud ja seadistatud kolmeteljelisele freespingile.

Magistritöös on võrreldud erinevate tootjate CNC freespinkide, spindlihoidjate ja spindlite tehnilisi andmeid, et oleks võrdlusmoment ostutoodete ja omavalmistatud prototüübi vahel. Spindlihoidja projekteerimisel tehtud arvutuste tulemuste alusel valitakse välja spindlihoidja valmistamiseks vajaminevad komponendid. Vastavalt valitud lõiketerale ja töödeldavale materjalile on arvutused tehtud erilõikejõu, lõikevõimsuse ja lõiketerale mõjuva jõu väärtuse saamiseks. Teades lõiketerale mõjuvat jõudu ja freespingi liikuvate osade massi arvutatakse freespingi telgesid liigutavate mootorite pöörded minutis ja väändemoment. Järgnevalt arvutatakse freespingi konstruktsioonile mõjuvad jõud ja spindlihoidjat ning spindlit liigutavate mootorite pöörded minutis ja väändemoment.

Teades koormusolukordasid, millele spindlihoidja peab vastu pidama, kasutab magistritöö autor topoloogia optimeerimise meetodit spindlihoidja geomeetria loomiseks. Antud magistritöö raskuskohaks võib pidada topoloogia optimeerimisest saadud tulemust 3D mudeli näol, mis tuli magistritöö autoril uuesti modelleerida kuna mudeli pinnad olid defektsed. Teostatud on ka täiendavad konstruktsiooni tugevuse analüüsid läbipainde väärtuse teadasaamiseks lõiketöötlemise olukorras.

Spindlihoidja keerulise konstruktsiooni tõttu otsustab magistritöö autor kasutada spindlihoidja korpuse valmistamiseks madalsurve liivvormvalu meetodit. Tänu 3D printimise tehnoloogia arengule on võimalik liivast printida valuvorme väga keerulise kujuga detailidele.

Magistritöö tulemuseks on kahe vabastusastme suunas liikuv spindlihoidja, mis on projekteeritud erinevate materjalide lõiketöötlemiseks. Projekteeritud spindlihoidja on massilt kergem ja odavam võrreldes ostutoodetega. Spindlihoidja koostu- ja detailijoonised on välja toodud lisadena.

Magistritöös ei ole kirjeldatud freespingi ja spindlihoidja mootorite juhtsüsteeme. Puuduvad elektrooniliste süsteemide kirjeldus nagu andurite, juhtmestiku ja kontrollrite valik, programmeerimine ning seadistamine.

## SUMMARY

The aim of the Master's thesis is to design the spindle holder and to develop the manufacturing technology. Main purpose of the spindle holder was to give an additional two axes to the three axis milling machine. Spindle holder is designed for the three axis milling machine. Milling machine has been made by board members of company OÜ Muvor.

In master's thesis has compared CNC milling machines, spindle holders and spindles technical data. This is needed for comparing self made product to the product that has been bought from the manufacturer. The components used to manufacture the spindle holder are selected based on the results of the calculations. According to the selected cutting blade and material being processed, the calculations are made to obtain the value of the force on the blade tooth, the cutting power and the force exerted on the blade. Knowing the force exerted on the blade and the weight of the moving parts of the milling machine, the rotations per minute and the torque of the motors that move the milling machine axes are calculated. The forces exerted on the milling machine construction has been calculated. Calculations of rotational speed and torque have also been made to the motors that move the spindle and spindle holder.

By knowing the load conditions that the spindle holder has to carry out, the author of the master thesis uses the method of optimizing topology to create spindle holder geometry. The most difficult part of this Master's thesis can be considered to the result of topology optimization in the form of a 3D model that had to be modeled again by the author of the master's thesis because the surfaces of the model were defective. Further structural strength analysis have also been carried out to obtain the value of deflection in the cutting process.

Due to the complex design of the spindle holder, the author of the master's thesis decided to use a low-pressure sand mold casting method to manufacture the spindle holder housing. Thanks to the advancement of 3D printing technology, it is possible to print sand molds on very complex shapes products.

The result of the master's thesis is two axis spindle holder which is designed for cutting different materials. The designed spindle holder is lighter in mass and cheaper compared to manufactured products. The assembly and detail drawings of the spindle holder are shown in the annexes.

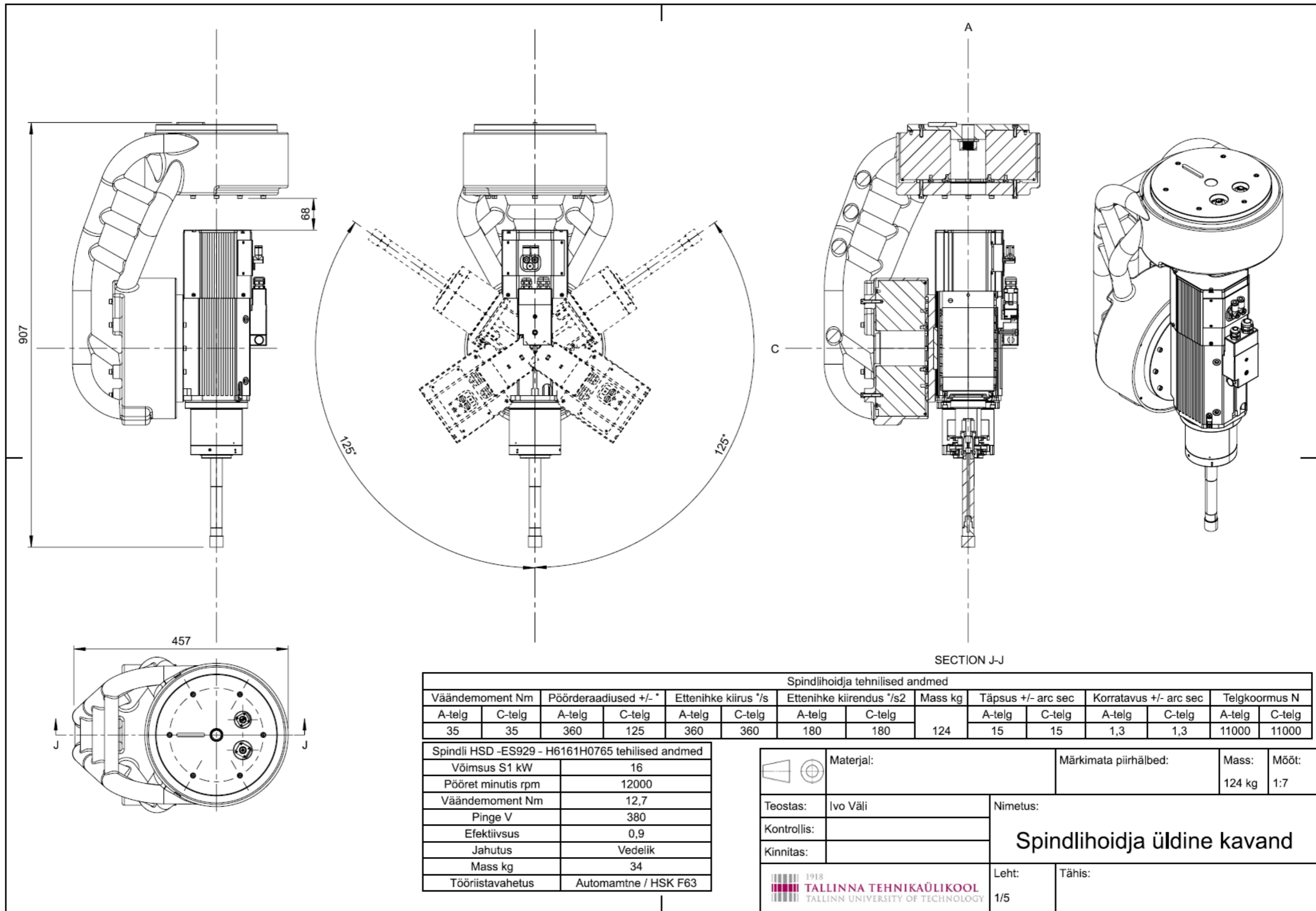
The masters thesis do not describe motors control systems of the milling machine and spindle holder. Electronic systems such as selecting sensors, wiring and controllers are not described. Also programming of the controllers are not described.

## KASUTATUD KIRJANDUSE LOETELU

1. <https://et.wikipedia.org/wiki/L%C3%B5iket%C3%B6%C3%B6tlemine> (08.02.2019)
2. <https://et.wikipedia.org/wiki/Freesimine> (08.02.2019)
3. <https://et.wikipedia.org/wiki/Arvprogrammjuhtimine> (08.02.2019)
4. [https://www.researchgate.net/figure/5-axis-CNC-router-schematic-with-axis-notations\\_fig17\\_316106442](https://www.researchgate.net/figure/5-axis-CNC-router-schematic-with-axis-notations_fig17_316106442) (08.02.2019)
5. <http://www.pro-step.ee/index.php/cad/nx> (08.02.2019)
6. <https://www.f-zimmermann.com/> (11.02.2019)
7. <https://www.scmgroup.com/en/cmsadvancedmaterials/products/composite-material-aluminium-and-advanced-material-working-systems.c12350/high-speed-5-axis-cnc-machining-centres.12351/poseidon.12366> (14.02.2019)
8. <http://www.fidia.it/en/products/> (14.02.2019)
9. [https://www.hsusa.com/viewdoc.asp?co\\_id=503](https://www.hsusa.com/viewdoc.asp?co_id=503) (14.02.2019)
10. <https://www.pdsspindel.de/en/automatic-tool-change/2-axis-milling-heads-for-5-axis-processing> (17.02.2019)
11. <http://www.technai.it/en/Products/Details/17/tch-l13-evo> (17.02.2019)
12. <https://shop.fischerspindle.com/FISCHER-Milling-Heads> (17.02.2019)
13. <http://www.probex.ee/mdf-est.html> (22.02.2019)
14. <http://www.estplast.ee/et/misoneps> (22.02.2019)
15. <https://www.intecslm.it/en/.../pf07e-pasta-poliestere-fresabile-light/> (05.03.2019)
16. <http://www.urmet.ee/alumiinium/> (05.03.2019)
17. Mehaanikainseneri käsiraamat. TTÜ kirjastus. Tallinn 2013. Lk 334-335
18. [http://www.mitsubishicarbide.net/mht/enuk/solid\\_end\\_mills/20000199/20094751](http://www.mitsubishicarbide.net/mht/enuk/solid_end_mills/20000199/20094751)
19. <http://ee.fortune-metal.com/nickel-alloys/nickel-alloy-718/inconel-718-nickel-alloy-forged-round-bar.html> (10.04.2019)
20. [http://www.mitsubishicarbide.net/mht/enuk/spare\\_parts/no\\_srs/20087152](http://www.mitsubishicarbide.net/mht/enuk/spare_parts/no_srs/20087152) (15.04.2019)
21. Mehaanikainseneri käsiraamat. TTÜ kirjastus. Tallinn 2013. Lk 340-345
22. Tool and manufacturing engineers handbook, Vol 1 Machining. Thomas J. Drozda, PE, CMfgE; Charles Wick, CMfgE (Peatükk 10 lk 51-52)

23. [http://www.learneasy.info/MDME/MEMmods/class\\_projects/backstop/controller/Topic4-BallscrewCalculations.pdf](http://www.learneasy.info/MDME/MEMmods/class_projects/backstop/controller/Topic4-BallscrewCalculations.pdf) (27.04.2019)
24. <https://us.misumi-ec.com/pdf/tech/mech/p2799.pdf> (03.05.2019)
25. <https://www.allaboutcircuits.com/tools/stepper-motor-calculator/> (03.05.2019)
26. <http://www.t2cnc.hu/downloads/leptetomotormeretezes.pdf> (05.05.2019)
27. <https://www.linearmotiontips.com/what-is-a-direct-drive-motor/> (06.05.2019)
28. <https://et.wikipedia.org/wiki/Topologia> (08.05.2019)
29. [https://en.wikipedia.org/wiki/Topology\\_optimization](https://en.wikipedia.org/wiki/Topology_optimization) (08.05.2019)
30. <https://www.open.edu/openlearn/science-maths-technology/engineering-technology/manupedia/low-pressure-sand-casting> (10.05.2019)
31. <https://www.etmm-online.com/how-classic-foundries-remain-competitive-against-3d-printing-a-744988/> (12.05.2018)
32. <https://additivemanufacturingtoday.com/amazone-creates-new-agricultural-chassis-with-3d-printed-sand-casting-moulds> (12.05.2018)
33. <https://www.moderncasting.com/photo-galleries/2018-casting-year-winners> (12.05.2018)
34. <https://www.custompartnet.com/estimate/sand-casting/> (14.05.2018)

**LISAD**

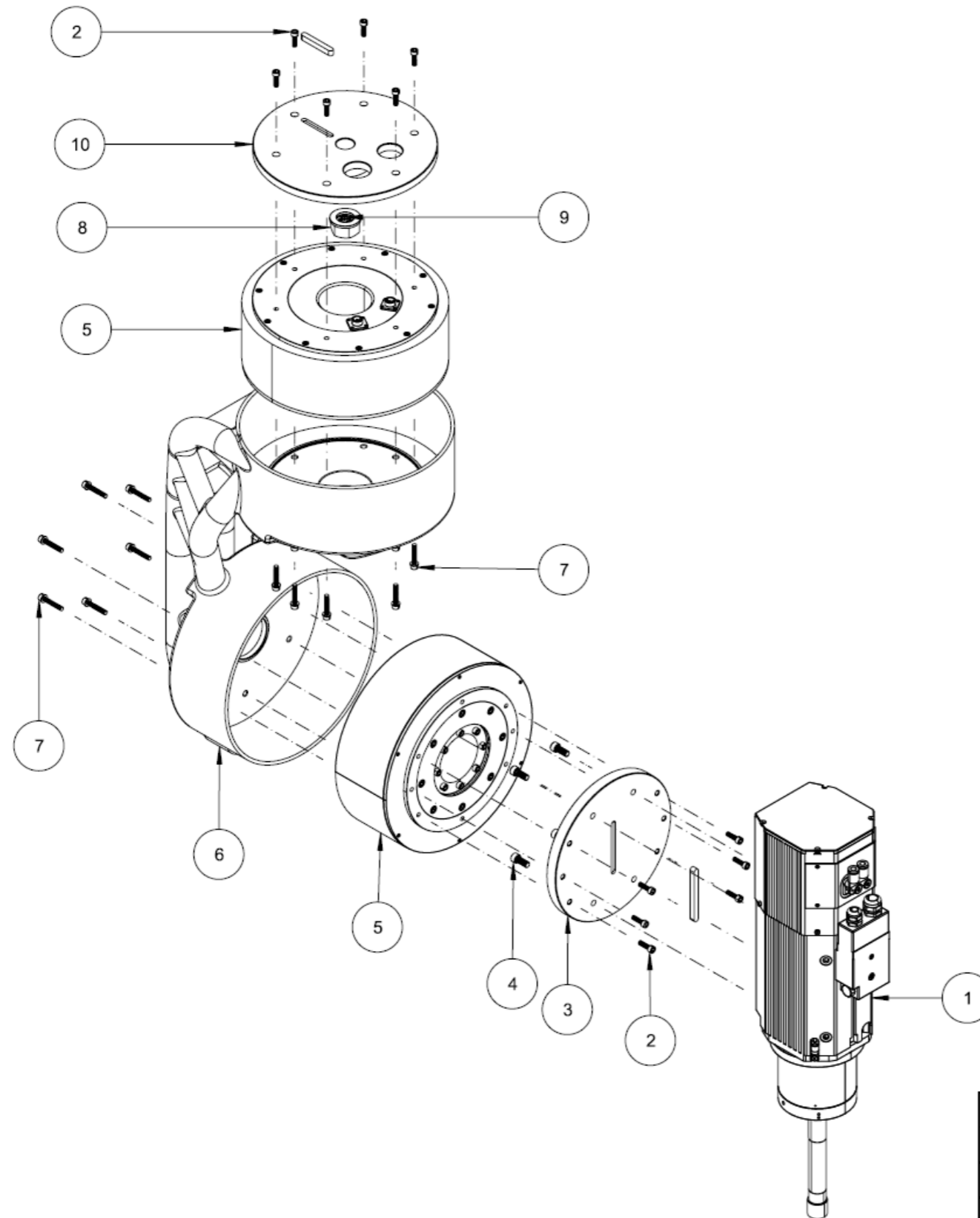


Spindlihoidja tehnilised andmed															
Väändemoment Nm		Pöörderaadiused +/- °		Ettenihke kiirus °/s		Ettenihke kiirendus °/s <sup>2</sup>		Mass kg	Täpsus +/- arc sec		Korratavus +/- arc sec		Telgkoormus N		
A-telg	C-telg	A-telg	C-telg	A-telg	C-telg	A-telg	C-telg		A-telg	C-telg	A-telg	C-telg	A-telg	C-telg	
35	35	360	125	360	360	180	180	124	15	15	1,3	1,3	11000	11000	

Spindli HSD -ES929 - H6161H0765 tehnilised andmed	
Võimsus S1 kW	16
Pööret minutis rpm	12000
Väändemoment Nm	12,7
Pinge V	380
Efektivsus	0,9
Jahutus	Vedelik
Mass kg	34
Tööriistavahetus	Automatne / HSK F63

	Materjal:	Märkimata piirhälbed:	Mass:	Mööt:
	Ivo Väli		124 kg	1:7
Teostas:		<b>Spindlihoidja üldine kavand</b>		
Kontrollis:				
Kinnitas:				
	1918 TALLINNA TEHNIKAÜLIKOOL TALLINN UNIVERSITY OF TECHNOLOGY	Leht:	Tähis:	
		1/5		





Nr	Nimetus	Kogus
1	HSD -ES929 - H6161H0765 spindel	1
2	Sisekuuskant polt M6x20 A4-70 DIN 912 ISO 4762	12
3	Vaheplaat 01	1
4	Sisekuuskant polt M8x20 A4-70 DIN 912 ISO 4762	4
5	Yaskawa SGMCS-35E-B11 direct-drive mootor	2
6	Spindlihooidja	1
7	Sisekuuskant polt M6x35 A4-70 DIN 912 ISO 4762	14
8	Mutter M24x24 A4-70 DIN 985	1
9	Seib M24x4 A4 DIN 125	1
10	Vaheplaat 02	1

	Materjal:	Märkimata piirhälbed:	Mass:	Mööd: 1:7
Teostas:	Ivo Väli	Nimetus: <b>Spindlihooidja koostejoonis</b>		
Kontrollis:				
Kinnitas:				
	1918 TALLINNA TEHNIKAÜLIKOOL TALLINN UNIVERSITY OF TECHNOLOGY	Leht: 2/5	Tähis:	

