



TALLINNA TEHNIKAÜLIKOOL  
INSENERITEADUSKOND

Elektroenergeetika ja mehhatroonika instituut

EE40LT

## **TRÜKKPLAADI KIIRPROTOTÜÜPIMISMASINA VÄLJA ARENDAMINE**

**BAKALAUREUSETÖÖ**

**MEHHATROONIKA ÕPPEKAVA**

Üliõpilane: Henri Sink

Üliõpilaskood: 142924

Juhendaja: Heigo Mõlder

Tallinn 2017

## AUTORIDEKLARATSIOON

Deklareerin, et käesolev lõputöö on minu iseseisva töö tulemus.

Esitatud materjalide põhjal ei ole varem akadeemilist kraadi taotletud.

Töös kasutatud kõik teiste autorite materjalid on varustatud vastavate viidetega.

Töö valmis Heigo Mõlderit juhendamisel

“.....”.....201...a.

Töö autor: .....

/allkiri/

Töö vastab bakalaureusetööle esitatavatele nõuetele.

“.....”.....201...a.

Juhendaja .....

/allkiri/

Lubatud kaitsmisele

“.....”.....201... a.

..... õppekava kaitsmiskomisjoni esimees: .....

/allkiri/

# LÕPUTÖÖ ÜLESANNE

**Üliõpilane:** Henri Sink, 142924MAHB  
**Õppekava, peeriala:** MAHB02/13 - Mehhatroonika  
**Juhendaja:** Teadur Heigo Mölder

## Lõputöö teema:

(eesti keeles) Trükkplaadi kiirprototüüpimismasina välja arendamine  
(inglise keeles) Development of a PCB rapid prototyping machine

## Lõputöö põhieesmärgid, lahendatavad ülesanded ning töö koostamise kava:

1. Anda ülevaade olemasolevatest tehnoloogilistest võimalustest (20.03)
2. Seadme mehaaniliste komponentide kirjeldus, valik (3.04)
3. Seadme elektroonika, tarkvara kirjeldus, valik (17.04)
4. Seadme projekteerimine CAD keskkonnas (1.05)

## Täiendav info ja nõuded:

**Töö keel:** Eesti keel

**Üliõpilane:** Henri Sink ..... ”....”.....2017 a  
/allkiri/

**Juhendaja:** Heigo Mölder ..... ”....”.....2017 a  
/allkiri/

## Sisukord

AUTORIDEKLARATSIOON .....	2
LÕPUTÖÖ ÜLESANNE .....	3
Jooniste loetelu .....	6
Tabelite loetelu .....	7
EESSÕNA .....	8
SISSEJUHATUS .....	9
1 TÖÖ TEOREETILISED ALUSED .....	10
1.1 Arvprogrammjuhtimisega ehk CNC masinate ülevaade .....	10
1.2 Trükkplaadi tootmise tehnoloogia .....	11
1.3 Olemasolevad lahendused .....	13
1.3.1 Trükkplaadi freesimismasinad.....	13
1.3.2 Prototüüpimisteenuse sisse ostmine .....	18
1.3.3 Muud olemasolevad lahendused.....	20
1.3.4 Kokkuvõte .....	22
2 MASINA MEHAANILISE OSA ARENDUS .....	24
2.1 Masina üldparameetrite määramine.....	24
2.2 Raam.....	25
2.2.1 Nõuded raamile .....	25
2.2.2 Raami materjalivalik .....	25
2.3 Teljed .....	28
2.3.1 Pöördliikumise teisendamine lineaarliikumiseks .....	28
2.3.2 Lineaarjuhid.....	31
2.3.3 Telgede mootorite valik.....	34
2.4 Spindel .....	36
2.4.1 Nõuded spindlile.....	36
2.4.2 Spindli lahendus .....	37
2.5 Jootepasta dosaator .....	43
3 MASINA ELEKTROONIKA ARENDUS .....	45
3.1 Elektroonika ülevaade .....	45
3.2 Mikrokontrolleri valik .....	47
3.3 Samm-mootorite draiverid.....	49
3.4 Spindli mootori draiver.....	51

3.5 Jootepasta dosaatori juhtimine.....	53
3.6 Toiteallika valik.....	54
3.7 Lülitid ja kaablite valik.....	56
4 KASUTATAVAD TARKVARALAHENDUSED.....	58
4.1 Kontrolleri tarkvara .....	58
4.2 CAD.....	59
4.3 CAM.....	60
4.4 G-koodi saatja.....	61
5 VALMINUD LAHENDUS JA SELLE ANALÜÜS .....	62
5.1 Masina projekteerimine CAD-keskkonnas.....	62
5.2 Majanduslik analüüs .....	64
5.3 Valminud masina tehnilised parameetrid .....	66
KOKKUVÕTE.....	69
SUMMARY .....	71
KASUTATUD KIRJANDUS .....	73
LISAD .....	76
Lisa 1. Spindli 3D-mudeli detailvaade .....	76
Lisa 2. Masina 3D-mudeli eestvaade.....	77
Lisa 3. Masina 3D-mudeli isomeetriline vaade .....	78
Lisa 4. Masina 3D-mudeli isomeetriline vaade 2.....	79
Lisa 5. Masina 3D-mudeli külgsvaade.....	80

## Jooniste loetelu

Sele 1.1 LPKF ProtoMat E34/E44 .....	13
Sele 1.2 AccurateCNC A421 .....	14
Sele 1.3 Cirqoid .....	15
Sele 1.4 Othermill Pro .....	16
Sele 1.5 Voltera V-One .....	21
Sele 2.1 30x60 mm <i>T-slot</i> profiil.....	26
Sele 2.2 Kuulkruvi.....	29
Sele 2.3 Trapetskruvi.....	29
Sele 2.4 Vedruga lõtkuvastane mutter .....	31
Sele 2.5 SBR16 lineaarjuhik.....	32
Sele 2.6 MGN15 lineaarjuhik.....	32
Sele 2.7 23HS8430 samm-mootor.....	35
Sele 2.8 Painduv sidur .....	36
Sele 2.9 GoolRc 3674 2250KV .....	38
Sele 2.10 ER11 tsangihoidja.....	39
Sele 2.11 Tolerantsiklasside tabel avadele .....	41
Sele 2.12 Spindli läbilõikevaade .....	42
Sele 2.13 Jootepasta dosaatori süstlakinnitus .....	43
Sele 2.14 Jootepasta dosaatori läbilõige .....	43
Sele 3.1 Lihtsustatud elektroonikaskeem .....	46
Sele 3.2 Arduino Nano V3 .....	47
Sele 3.3 Füüsilised sisendid ja väljundid vastavalt GRBL tarkvarale.....	48
Sele 3.4 <i>Chopper</i> -tüüpi voolupiiraja .....	49
Sele 3.5 TB6600 samm-mootori draiver .....	50
Sele 3.6 EMAX BLHeli 80A.....	52
Sele 5.1 Masina arvutigraafiline kujutis .....	62
Sele 5.2 Tööriistahoidja.....	63

## Tabelite loetelu

Tabel 1.1 Trükkplaadi prototüüpimismasinate võrdlus.....	17
Tabel 1.2 Trükkplaadi prototüüpimisteenuste võrdlus.....	19
Tabel 1.3 Voltera V-One parameetrid .....	21
Tabel 2.1 Raami materjalide võrdlus.....	27
Tabel 2.2 Kuulkruvi ja trapetskruvi võrdlus.....	30
Tabel 2.3 SBR16 ja MGN15 lineaarjuhikute võrdlus .....	33
Tabel 3.1 Arduino Nano V3 arendusplaat .....	48
Tabel 5.1 Komponentide ja materjalide maksumus .....	64
Tabel 5.2 Masina teoreetilised parameetrid.....	68

## **EESSÕNA**

Lõputöö teema valik tulenes isiklikust huvist, praktilisest vajadusest ja teema sobivusest mehhatroonika erialaga. Uusi seadmeid luues on tihti tarvis valmistada trükkplaate, kuid kodused võimalused selleks on suhteliselt piiratud.



## SISSEJUHATUS

Kiirprototüüpimine on arvutis eksisteeriva kolmemõõtmelise kujutise väikese ajakuluga viimine “päris” 3D kujule, ehk kujundi muutmine käegakatsutavaks objektiks. Traditsioonilisi meetodeid saab nimetada siiski aegavõtvateks, kulukateks ning tööjõurohkeks. Oluliselt lihtsam on kasutada dokumendiprintimise sarnast lahendust – annad printimiskäsu ning mingi seade teeb vähemalt suure osa tööst ise ära, printija enda tegevus on võimalikult vähene. Ka kulub taoliseks väljatrukkimisprotsessiks vähem aega, mis on mõõdetav juba tundides, mitte enam päevades. [1]

Elektroonika alal on prototüüpimine väga tähtsal kohal. Elektroonika plaadi ehk trükkplaadi disainimine ja skeemi simuleerimine arvutis on muutnud trükkplaadi tootmise oluliselt kiiremaks, kuid simulatsioonid ei anna alati täit informatsiooni, disainimisel tehakse ikka vigu ja tihti tuleb lihtsalt skeem ringi teha, seetõttu valmistatakse trükkplaatidest enne tootmise alustamist prototüüpe.

Trükkplaatide prototüüpimiseks on erinevaid meetodeid, kõige kiirem neist on kasutada spetsiaalset prototüüpimismasinat. Kahjuks on need masinad hobiharrastajale, või näiteks koolile või väiksele ettevõttelegi tihti liiga kallid. Proovitakse luua nn tee-see-ise lahendusi, kuid tihti ei vii see soovitud tulemuseni. Korraliku masina välja arendamine on väga ajamahukas ja teadmisi nõudev protsess, kuna sisaldab keerukaid mehaanilisi lahendusi, elektroonilisi komponente ja juhtimisalgoritme.

Antud bakalaureusetöö eesmärgiks on välja arendada multifunktsionaalne trükkplaadi kiirprototüüpimismasin, millega on võimalik trükkplaadi rajad isoleerida, vajalikud augud puurida, jootepasta doseerida ja trükkplaat lõpetuseks ka välja freesida. Samas proovitakse masinale jätta võime töödelda ka muid materjale, näiteks puitu, plastikut ja alumiiniumi.

Töö käigus antakse ülevaade CNC masinatest, trükkplaatide valmistamise tehnoloogiast. Uuritakse olemasolevaid lahendusi, erinevaid masina komponente, nende tööpõhimõtteid ja valimise eeskirju, ning seejärel töötatakse saadud teadmiste põhjal välja soovitud parameetritele vastav masin.

# 1 TÖÖ TEOREETILISED ALUSED

## 1.1 Arvprogrammjuhtimisega ehk CNC masinate ülevaade

Arvprogrammjuhtimine on tööpinkide ja masinate automatiseerimise meetod, kus seadet juhib arvuti, mis täidab inseneri kirjeldatud numbritest ja tähtedest koosnevaid käsked. Kõige tihedamini on antud käsustik kirjutatud G-koodina.

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

Arvjuhtimisprogramm koosneb lausetest, programmi algust ja lõppu tähistavatest sümbolitest. Laused koosnevad sõnadest. Sõna omakorda koosneb adressaadist ja arvsõnast. Kui arvsõna ees puudub miinusmärk, loetakse tema väärtus positiivseks. Lauses on kindel sõnade järjekord. Mõned sõnad võib lausest ära jätta, kui neid on programmis eelnevalt kasutatud ja nad kehtivad vaikimisi. Juhtprogrammi lause koostis on reglementeeritud DIN-normidega. [2]

## 1.2 Trükkplaadi tootmise tehnoloogia

Trükkplaat on vahend, millele kinnitatakse elektroonikakomponendid ning seotakse nad omavahel elektriliselt. Tänapäevane trükkplaat koosneb õhukestest vaselehtedest, mis on lamineeritud mittejuhtivale materjalile (tüüpiliselt FR-4 klaaskiud-epo komposiit). [3]

Trükkplaadil moodustatavaid ühendusi nimetatakse radadeks. Trükkplaat võib olla ühepoolne, kahepoolne või mitmekihiline. Erinevate kihtide vahel luuakse ühendusi läbiviikude abil. Mitmekihilisi plaate saab luua liites kokku kahepoolseid plaate, seetõttu on ka reeglina mitmekihilistel plaatidel paarisarv vase kihte. Mitmekihilistel trükkplaatidel on võimalik saavutada suurem komponentide paigutuse tihedus, kuna ühenduste moodustamiseks on rohkem ruumi.

Trükkplaadi väljatöötamise protsess algab trükkplaadi disainimisest elektroonika CAD<sup>1</sup> tarkvaras. Esimese asjana luuakse elektroonikalülituse skeem. Lähtudes korpusest, kuhu skeem paigutatakse, määratakse trükkplaadi suurus, kinnituste, radiaatorite ja teatud komponentide paigutus. Otsustatakse trükkplaadi kihtide arv, alates ühest kuni mitmekümne kihini, olenevalt skeemi keerukusest. Komponentid paigutatakse plaadile ja luuakse rajad komponentide vahele. Komponentide paigutus ja rajad muutuvad käsikäes pika disainiprotseduuri jooksul. Viimaks saadakse trükkplaadi tootmiseks vajalikud töötlusfailid. Tihti on tegemist kas Gerber, Excellon või muude sarnaste failidega, olenevalt kasutatavast tarkvarast.

Protsess jätkub CAM<sup>2</sup> tarkvaras, kus töötlusfailidest luuakse vastavalt vajadusele puurimise, freesimise ja muude tööde juhised masinale.

Tööstuses kasutatakse erinevaid meetodeid trükkplaadi radade isoleerimiseks. Põhilisemad neist on:

1. Siiditrükk söövituskindlate tintidega, tekitades radadele kaitsekihi. Ülejäänud vask söövitatakse ja alles jäävad rajad.

---

<sup>1</sup> CAD – Computer-aided design – arvuti abil kujundamine

<sup>2</sup> CAM – Computer-aided manufacturing – arvuti abil tootmine

2. Fotogravüür – kilele trükitakse trükkplaadi rajad või nende negatiiv, kile asetatakse valgustundlikule trükkplaadile ja trükkplaati valgustatakse UV valgusega.
3. Freesimine – mehaanilise lõiketötluse käigus eemaldatakse trükkplaadilt mittevajalikud vasepiirkonnad.
4. Lasergravüür – laseri abil eemaldatakse mittevajalik vask, eraldades rajad.

Suure tootmismahu juures kasutatakse lihtsamate trükkplaatide puhul siiaamaani põhiliselt siiditrükki, täpsemate plaatide tootmisel fotogravüüri. Väiksemate mahtude juures kasutatakse freesimist ja fotogravüüri meetodeid. [3]

Kodustes tingimustes on põhiline meetod trükkplaadi valmistamiseks järgnev:

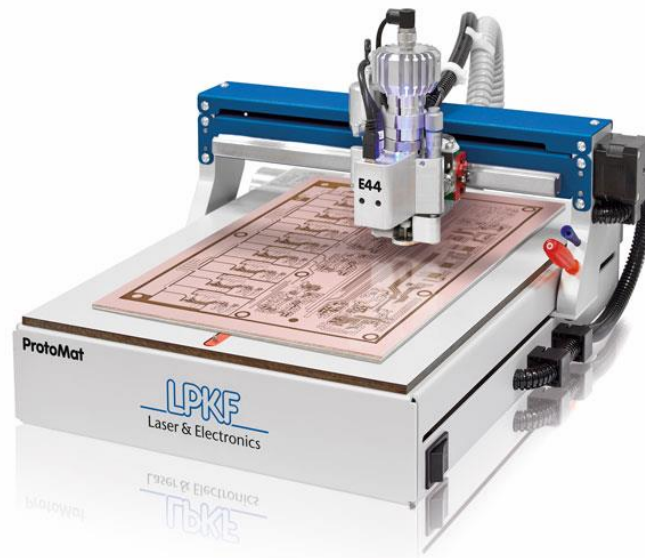
1. Laserprinteriga (spetsiaalsele) paberile radade peegelpildi printimine
2. Triikrauaga või muu kuumutusvahendiga paberilt radade trükkplaadile kandmine
3. Radade ülekontrollimine, markeriga täiendamine
4. Söövitamine
5. Puurimine

Antud protsess on suhteliselt aeganõudev ja ebatäpne. Täpsem lahendus on kasutada spetsiaalset valgustundlikku trükkplaati ja fotogravüüri meetodeid, kuid ka see on suhteliselt tülikas ja on kallim kui esimene meetod.

## 1.3 Olemasolevad lahendused

### 1.3.1 Trükkplaadi freesimismasinad

Trükkplaadi kiirprototüüpimismasinaid on võimalik osta ka valmislahendusena. Antud punktis tuuakse välja mõned näited masinatest, mis kasutavad freesimist radade isoleerimiseks. Enamikel professionaalsete masinate tootjatel ei ole hinnad avalikult internetis ja hinna teada saamiseks tuleb esitada päring, mis loomulikult raskendab masinate seas orienteerumist. Hindade kohta saadi vastus tuntud firmadelt nagu LPKF, Mits, AccurateCNC. Samuti uuriti mõnda nn uut tulijat, mis on alguse saanud Kickstarter kampaaniast, näiteks Cirqoid ja Othermill Pro. Järgnevalt tuuakse välja mõned leitud masinatest ning hiljem võetakse kokku kirjeldatud seadmete spetsifikatsioonid tabelis 1.1.



Sele 1.1 LPKF ProtoMat E34/E44

Üks tuntumaid firmasid antud alal on LPKF. Nende tootevalikus on mitmeid masinaid, erinevate võimaluste ja suutlikkustega. LPKF'ilt võeti uurimise alla nende kõige odavam tootmisel olev mudel ProtoMat E34 (selel 1.1). Tegemist on lihtsalt trükkplaatide freesimiseks ja puurimiseks mõeldud masinaga, muid lisafunktsioone sellel ei ole. Tootekirjelduse järgi on tegemist odava koduseks trükkplaadi prototüüpimiseks mõeldud masinaga. Päringule vastuseks saadi, et kõige odavama baasmudeli hind on 6000 EUR + maksud ja saatekulu. Kuna tegemist on spetsiaalselt trükkplaatide tootmiseks mõeldud masinaga, on Z-teljele jäetud vaid 10 mm liikumisruumi. X- ja Y- telgedel on kasutatud

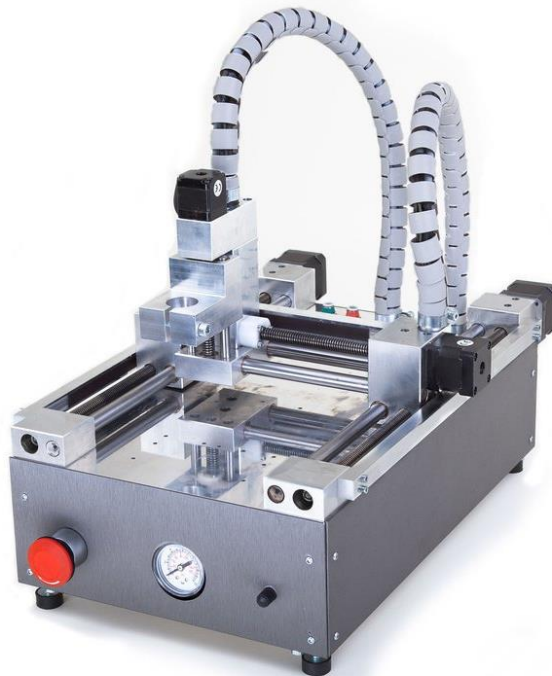
mitteümaraid juhikuid võimalikult minimaalselt – Y-teljel on näha vaid üks laagriplokk, see tähendab, et plokile hakkavad mõjuma ka väändejõud, erinevalt kahe plokiga süsteemist, kus väändejõud teisenduvad surve ja tõmbejõududeks. Küll aga on antud tüüpi lineaarlaagrid ka väga jäigad väändejõudude suhtes. Mootoriteks on telgedel samm-mootorid. Näha on väga keerulisi spetsiaalselt oma eesmärgiks freesitud detaile, painutatud plekist väliskesta, kõik masina lineaartelgede kruvid, kaablid, elektroonika on peidetud. Masin on väga kompaktne, kuna ei kasuta liikuvat alust. [4]



Sele 1.2 AccurateCNC A421

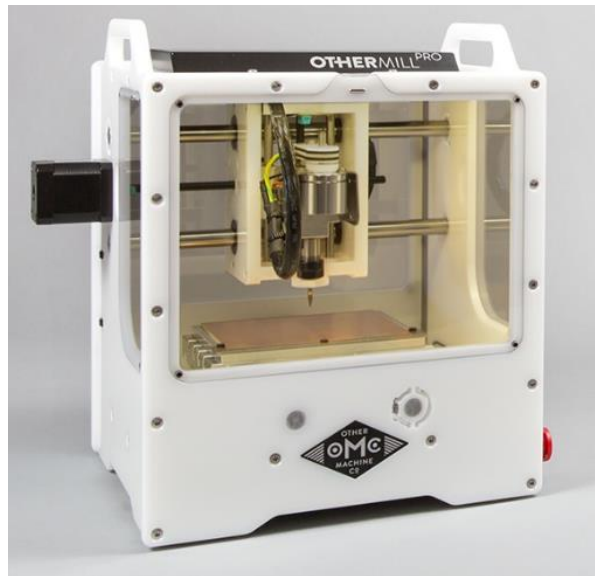
AccurateCNC on samuti väga professionaalsete trükkplaadi prototüüpimismasinate valmistaja. Nende tootevalikus on palju erinevaid masinaid, vaatluse alla võeti kõige odavam – AccurateCNC A421 (selel 1.2). Lineaartelgedel on kalibreeritud trapetskruvid koos samm-mootoriga, Z-telje peal on lisaks veel lineaarne enkooder, mis annab sügavuse täpsuseks 1 mikromeetri. Sügavust monitooritakse töötamise käigus ja lõikesügavus hoitakse ühtlane. Telgede juhtimisalgoritm on ka temperatuurikompensatsioon. Spindel on maksimaalselt 5 mikromeetrise viskumisega, 3-faasilise induktsioonimootoriga, mida juhitakse anduriteta vektorjuhtimise teel. Masina korpus on valmistatud alumiiniumist ja roostevabast terasest. Tööriistavahetus toimub käsitsi, kõrguse kalibreerimine automaatselt. Resolutsiooniks on märgitud 0,1 mikromeetrit, täpsuseks 254 millimeetri kohta 7,5 mikromeetrit. Sedavõrd täpset resolutsiooni kasutatakse ära põhiliselt kruvi kalibreerimiseks ja temperatuuri

kompensatsiooniks. Masin on suhteliselt kompaktne, kasutab samuti igal teljel liikuvat tööriista. [5]



Sele 1.3 Cirqoid

Cirqoid on Lätis loodud avatud lähtekoodiga tarkvara kasutav trükkplaadi valmistamise masin. Tootja kirjelduse järgi on masin võimeline trükkplaadi rajad freesima, puurima avad, jootepastat doseerima ja isegi komponendid paigaldama. Telgedel kasutatakse toestamata ümarjuhikuid pronkspuksidega, trapetskruvisid plastikmutritega ja väikeste Nema 17 mõõdus samm-mootoritega. Täpsemalt asja uurides selgus, et jootepasta doseerimiseks on tarvis masinas olevas suruõhupaagis hoida sees hoida 1,5 kuni 2 bar'i rõhku. Selleks on masina küljes autorehvidelgi kasutatav Schrader'i ventiil, kust on võimalik kas käsitsi või kompressoriga masina suruõhupaaki täita. Samuti on komponentide paigaldamine „pool-automaatne“ ehk masin on võimeline võtma ettemääratud kohtadest vaakumnõelaga komponente, tõstma neid enam-vähem õigele kohale, kuid komponendi asendi peab kindlustama operaator. Õnneks on võimalik masinat, jootepasta dosaatorit ja komponentide paigutamise tööriista eraldi osta. Masinat on võimalik isegi ilma spindliga osta, tabelisse 1.1 on siiski kantud hind koos spindliga. [6]



Sele 1.4 Othermill Pro

Othermill Pro on reklaamitud kui kõige kiirem ja taskukohasem viis kodus prototüüpida kõrge täpsusega trükkplaatide. Othermill Pro raam on kõrge tihedusega polüetüleenist. Tegemist on väga tugeva plastikuga, kuid võrreldes näiteks alumiiniumiga on polüetüleen oluliselt elastsem. Telgedel kasutatakse suhteliselt suure diameetriga kuid toestamata ümaraid lineaarjuhikuid, mis fikseeritakse mõlemast otsast otse raamis olevatesse avadesse, kusjuures iga juhiku ühe otsa kinnitus on töödeldud nii, et lubada juhiku otsa liikumist teatud ulatuses. Seda tehakse ebatäpse paigalduse, kõverate detailide, erinevate paisumistegurite jms kompenseerimiseks. Juhikutel kasutatakse polüoksümetüleen (POM) plastikust pukse. Kruvideks on USA-s valmistatud teflonkattega trapetskruvid. Elektroonika poole pealt kasutatakse valmis TinyG CNC kontrolliplaati, spindlimootori juhtimiseks kasutatakse raadioteel juhitud hobiseadmetes kasutatavat draiverit. Spindel on rihmülekanega, mootor on harjadeta alalisvoolumootor, mille korpus on avatud ja ei paku mootorile kaitset tolmu eest. [7]



Tabel 1.1 Trükkplaadi prototüüpimismasinade võrdlus

	Cirqoid	Othermill Pro	LPKF ProtoMat E34	AccurateCNC A421
Tööala [mm]	100x160x20	140 × 114 × 34,3	229 x 305 x 5	300 x 250 x 3,3
Radade laius ja vahe [mm]	0,2	0,152		0,1
Resolutsioon [mm]	0,01	0,0254	0,0008	0,0001
Maksimaalne liikumiskiirus (mm/min)	1500	2 600	6 000	9 000
Spindli pöörlemissagedus [1/min]	30 000	26 000	30 000	60 000
Tööriistahoidja	ER11 tsangihoidja	ER11 tsangihoidja	1/8" tsang, käsitsi tööriistavahet us	1/8" tsang, käsitsi tööriistavahet us
Lisafunktsioonid	Jootepasta dosaator (+200 EUR) Komponentid e tõstmise tööriist (+200EUR)	Võimeline töötleva ka muid materjale	Mõned lisavarustuse valikud, nt inspektsioonik aamera	Palju lisavarustuse valikuid, sh vaakumlaud, inspektsioonik aamera jm
Hind käibemaksuta	2 400 EUR	3 199 USD	6 000 EUR	12345 GBP

Kokkuvõtvalt võib öelda, et trükkplaadi prototüüpimismasinade hinnad algavad umbes 3000 eurost, kui võtta arvesse ka käibemaks ja transpordikulud. Arvestades, et tegemist on rohkem kui kolmekordse Eesti 2016. aasta keskmise netopalgaga, võib öelda, et

suurel osal Eesti harrastuselektroonikutel käib selline hind üle jõu, eriti arvestades seda, et eelmainitud odavamate masinate materjalide hind on võib-olla kümnendik masina koguhinnast.

### **1.3.2 Prototüüpimisteenuse sisse ostmine**

Prototüüpimisteenust on võimalik sisse osta nii Eestist kui ka loomulikult mujalt maailmast. Kõige suurem trükkplaaditootja on siiski konkurentsilt Hiina, kus toodetakse peaaegu pool kogu maailma trükkplaatidest. Hiina prototüüpimisteenuse hinnad on reeglina väga odavad. Loogiline eeldus oleks, et Eestist saab toote kiiremini kätte.

Eestis on tuntuimad trükkplaadi prototüüpimisteenust pakuvad firmad Kamitra (QPC Technology Group OÜ) [8] ja Brandner PCB OÜ [9]. Eelnimetatud firmad mõlemad pakuvad hobielektroonikutele prototüüpimisteenust. Samas uuriti ka teenusepakkujaid üle maailma. Hinnaarvestusi uuriti 25lt erinevalt trükkplaaditootjalt. Päringu parameetrid määrati sarnaselt Eestis pakutava teenusega.

Täpsema uurimise tulemusena selgus, et enamik teenusepakkujate puhul on jootemask ja vähemalt ühepoolne märgistamine tasuta. Praktiliselt kõigil Hiina teenusepakkujatel on minimaalne tellimus 5 plaati, muul juhul tuleb teha eritellimus ning sellisel juhul on üksiku plaadi hind praktiliselt sama, mis tüüptellimusel 5 plaadi hind.

Paljud Hiina firmad pakuvad tüüptellimusena väga odavat prototüüpimisteenust plaatidele kuni 100 x 100 mm. Kuumtina pinnakate, jootemask, märgistused on hinna sees, saadaval on ka õhemast materjalist plaadid ja teenuse hind 5 plaadi eest on tihtipeale alla 10 euro. Samuti on äärmiselt lihtsaks tehtud plaatide tellimine – teenusepakkuja kodulehel on võimalik valida oma plaadi parameetrid, üles laadida oma tootmisfailid ja vajadusel lisada kommentaare, kui on midagi erilist. Tüüpilise tellimuse puhul jääb üle vaid maksta ja oodata valmis plaate.

Tabelis 1.2 võrreldakse eelmainitud kahe Eesti firma teenust ja ühe Hiina firma, PCBWay [10] teenust. Võrdlusesse võetakse kahepoolsed plaadid ja just prototüüpimisena reklaamitav teenus.

Tabel 1.2 Trükkplaadi prototüüpimisteenuste võrdlus

Firma	Kamitra	Brandner	PCBWay
Materjal	FR4 1.6 mm, 35 µm vask	FR4 1.6 mm, 35 µm vask	FR4 1.6mm, 35 µm vask (õhemad sama hinnaga)
Plaadi mõõtmed [mm]	80 x 100 160 x 100 160 x 200	230 x 180	100 x 100 kuni 10 tükki
Min radade laius ja vahe	0,3 mm	0,1 mm	0,15 mm
Avade suurus	0,4 – 3,2 mm	Alates 0,2 mm	Alates 0,3 mm
Pinnakate	Kuumtina	Kuumtina	Kuumtina
Jootemask	Puudub	Puudub	Valikus 9 värvi, kuid roheline on kiireim
Markeeringud	Puuduvad	Puuduvad	Valge/must
Plaadi kuju	Nelinurkne	Nelinurkne	Vaba
Tootmisaeg	10 päeva	5 päeva	2-3 päeva või 24H (+\$34)
Transport	Omniva ELS 4,45 EUR	Omniva ELS 4,45 EUR	DHL 3-5p \$25
Hind teenuse eest	80x100 25 EUR 160x100 35 EUR 160 x 200 50 EUR	73,2 EUR	5 USD 10 plaadi eest

Sisseostetav teenus on mõistlik juhul, kui erinevaid trükkplaadi disaine on vaja prototüüpida suhteliselt harva. Kõige parema hinna-kvaliteedi suhtega teenus on eelnevatest pakkujatest Hiina ettevõttel PCBWay.

Kuigi masina omamine ja teenuse sisseostmine erinevad oluliselt selle poolest, et isikliku masina peal on võimalik teha kasvõi mitu erinevat iga päev, siis teenust sisse ostes läheks taoline tegevus väga kalliks. Tellides PCBWay'lt kolme erineva disainiga plaate ühe kuu jooksul, on juba poole aastaga antud töös valmistatava masina materjalide hind koos. Loomulikult on saadav tulemus ka erinev, kuid mõlemal juhul on tegemist lõpp-produktiga ühte moodi töötava lahendusega.

### **1.3.3 Muud olemasolevad lahendused**

Peale radade isoleerimise materjali eemaldamise teel on võimalik ka trükkplaate toota materjali lisades. Turule on tulnud tehnoloogiaga, mis suudab printida elektrit juhtivat tinti erinevatele materjalidele. Selliseid 3D printeri tüüpi lahendusi on tulnud või varsti turule tulemas mitmeid, seal hulgas näiteks Voltera V-One, Cartesian CO Ex<sup>1</sup> ja ettevõtetele mõeldud Nano-Dimensions DragonFly 2020.

Kõik eelnimetatud masinad prindivad hõbeda baasil tinti mittejuhtivale materjalile, mis tuleb seejärel küpsetada. Pärast seda on võimalik radade peale joota. Kõige rohkem oli andmeid vabalt saadaval Voltera V-One kohta, seega tuuakse välja eelnimetatu spetsifikatsioonid ja uuritakse lähemalt masina võimalusi. Masina parameetrid tuuakse välja tabelis 1.3.



Sele 1.5 Voltera V-One

Tabel 1.3 Voltera V-One parameetrid

Minimaalne radade vahe	0,8 mm
Minimaalne SMD passiivkomponendi suurus	1005
Radade eritakistus	$9,5 * 10^{-7} \Omega/m$
Trükkplaadi materjal	FR4
Maksimaalne trükkplaadi paksus	3 mm
Jootmistemperatuur	180-210 °C
Tööala	135 mm x 113.5 mm
Maksimaalne töölaua temperatuur	240 °C
Töölaua temperatuuri kasvamise kiirus	~2 °C/s
Mõõtmed	390 mm x 257 mm x 207 mm
Hind:	Masin ca 3150 EUR Juhtiv tint 2ml ca 100 EUR

Voltera V-One võimaldab suhteliselt täpselt printida rajad nii trükkplaadile, kui ka tegelikult muudele materjalidele. See on antud tehnoloogia eelis, et printida on võimalik

praktiliselt kõigele, mis kannatab vähemalt 200 kraadist kuumust. Samuti on võimalik printida ka muude tintide ja pastadega, kuigi see ei ole tootja kodulehe järgi soovituslik. [11]

Negatiivse poole pealt ei ole võimalik antud masinaga puurida avasid. Samuti soovitab firma kasutada ainult nende müüdatavat jootetina ja jootepastat ja jootmistehnika, mida hõbedat sisaldavate radade puhul tuleb kasutada, on ka traditsioonilisest natuke erinev. Rada liialt kaua kuumutades võib rajast hõbeda eemaldada ja elektrijuhtivus kaob. [12]

Tänapäeva elektroonikalahendustes kasutatakse trükkplaadil reeglina ka maakihti, mis aitab parandada elektroonikaskeemi elektrilisi omadusi. Hõbedat sisaldava tindiga on aga maakihi loomine suhteliselt kulukas ettevõtmine.

#### **1.3.4 Kokkuvõte**

Töös loodava masinaga sarnast tehnoloogiat kasutavad trükkplaadi prototüüpimismasinad on suhteliselt kallid. Isegi väga odavate ja kohati kaheldavate tehnoloogiliste lahendustega masinad võivad maksta üle mitme tuhande euro. Professionaalsete masinate hinnad algavad vahemikus 6 000 – 8 000 eurot.

Lineaartelgedel kasutatakse odavamatel masinatel toestamata ümarjuhikuid koostöös tundmatu tootja trapetskruvide ja väikeste samm-mootoritega. Kallimatel lahendustel kasutatakse reeglina mitteümaraid juhikuid, kuid siiski trapetskruvisid ja samm-mootoreid, alles alates ca 15 000 eurost hakkavad masinad, mis kasutavad servomootoreid ja kuulkruvisid.

Juhtivat tinti printivad 3D printerid on küll toredad erinevate fantaasiarohkete ja huvitavate üksikute lahenduste loomiseks, kuid pidevalt erinevate keerulisemate elektroonikaprototüüpide loomiseks ei ole tegemist praktilise lahendusega, eriti kui puudub võimalus auke puurida.

Üllatavalt heaks lahenduseks osutus teenuse sisseostmine Hiinast. Juhul kui tegemist on plaatidega, mille mõõtmed jäävad piiridesse 100 mm x 100 mm, on võimalik sisuliselt lõplik produkt kätte saada ligi nädala aja või vähemaga ja hind on 10 plaadi eest koos DHL'i postikuludega vaid 30 eurot. Küll aga suuremate plaatide korral või erilisemate

parameetrite korral tõuseb hind märgatavalt. Eestis pakutav teenus on suhteliselt kallis ja sama hinna juures mitte kiirem kui Hiinast tellimine.

Igal juhul on aga teenuse sisse ostmine väga kallis juhul, kui on soov plaadi disaini pidevalt testimise ja mõõtmiste jooksul muuta. Kiirprototüüpimismasin võimaldab ka väikeste muutuste korral, kasvõi mitu korda päevas, trükkplaadi uuesti valmis teha, et juba uusi katseid sooritada. Isegi vähem kui 20 erineva plaadi tellimine on juba kallim kui antud töös koostatava masina materjalide hind. Eestist teenust sisse ostes ei pruugi isegi kümme erinevat plaati saada selle hinna eest.

## **2 MASINA MEHAANILISE OSA ARENDUS**

### **2.1 Masina üldparameetrite määramine**

Selleks, et alustada masina projekteerimist, tuleb esiteks määrata üldised parameetrid, mille põhjal ülejäänud komponendid valitakse. Antud töös ehitatav masin ei peaks olema piiratud ainult trükkplaatide freesimisele, sellisel juhul on tegemist praktilisema masinaga.

Masin peaks olema nõ lauapealne, see tähendab, et masinal ei ole oma alusraami, mis seaks masina inimesele mugavale kasutuskõrgusele. Lauapealse lahendusega kaasneb kohe ka nõue, et masin ei tohi olla liiga raske ega liiga suur.

Parima masina kompaktsuse annab tööpink, mille kõik teljed liigutavad tööriista, parima jäikuse annab trükkplaat tootes masin, mille kõik teljed liigutavad töötlusalust. Antud töös valitakse masina tüübiks hübriid – x-telje suunas liigutatakse alust, y-telg ja z-telg liigutavad tööriista. Nii saavutame olukorra, kus nii x- kui y-telje lineaarjuhikud on fikseeritud liikumatu raami külge.

Tööala võiks mahutada 200 mm x 160 mm trükkplaadi. Kuigi tänapäevased trükkplaadid on reeglina väiksemad, siis antud suurusega tööala peal on võimalik korraga valmistada näiteks 80 mm x 100 mm plaate neli tükki korraga, mis annab võimaluse vajadusel ka plaate kiiremini hulgi toota.

Hinnapiiriks kõikidele materjalidele ja komponentidele määrati 500 eurot.



## **2.2 Raam**

CNC masina kõige olulisem osa on vastupidav, jäik raam. Raamist sõltub kogu süsteemi stabiilsus ja täpsus. Suurem osa isetegijaid eksivad just raami koostamisel.

### **2.2.1 Nõuded raamile**

Korrektset projektteeritud ja koostatud raam vastab järgmistele kriteeriumitele:

1. Raam peab olema küllalt jäik, et raami deformeerumistest ei tekiks mõõtemääramatust, telgede kinni kiilumist, lõikeriista hüppamist jms
2. Raami ja lineaarjuhikute kokkupuutepind peab olema tasane ja võimaldama pingeteta sirget paigaldust. Lineaarlaager on juhiku peal mõeldud liikuma vaid sirgelt. Kinnitades juhiku ebatasasele pinnale, kõverdub juhik ning laagriplakk ei saa enam vabalt liikuda mööda juhikut. Tekivad pinged, suureneb takistus ja kulumine.
3. Raam peab võimaldama lineaarjuhikute paralleelset paigaldust, see tähendab, et lineaarjuhikute kinnituskohad peavad paiknema ühel tasandil ja juhikud peab olema võimalik paigaldada sama sihiga. Lineaarjuhikute paigaldamisel erinevale kõrgusele või eri nurga all tekitab sirge plaadi külge kinnitades laagriplakile pinge avaldamist. Lineaarjuhikute paigaldamine eri sihiga tekitab pingeid punktides, kus juhikute vahekaugus on suurem või väiksem kui ette nähtud.
4. Raami osad, kuhu kinnituvad erinevate telgede juhikud, peavad ristuma võimalikult täpselt. Mitteristuvad teljed tekitavad koordinaatidega probleeme – detaili koordinaadid antakse kolme ristuva telje suhtes, kui mõni masina telgedest nendega ei ühti, tuleb koordinaadid ümber arvutada. See nõuaks aga iga kord koordinaatide korrigeerimist õige tulemuse saavutamiseks.

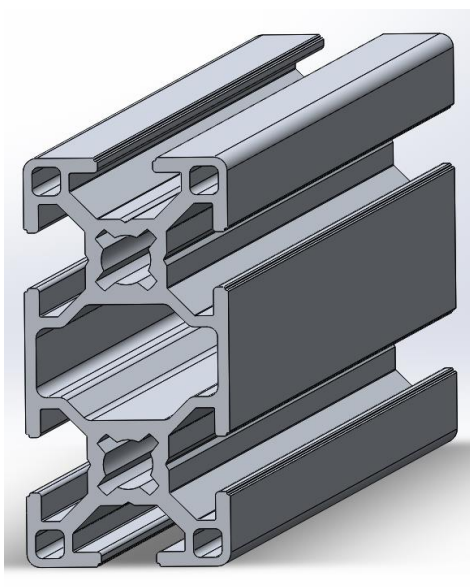
### **2.2.2 Raami materjalivalik**

CNC masinate raame on võimalik valmistada puidust (vineer, MDF), alumiiniumist, terasest. Täpse masina jaoks on kõige olulisem materjali jäikus, antud töö käigus on aga

rõhk pandud ka lihtsale kättesaadavusele, töödeldavusele ning odavale hinnale. Loomulikult peab materjal olema ka küllalt tugev.

Raami ehitamisel puidust on palju positiivseid külgi – puit on odav, lihtsasti töödeldav, kergelt asendatav. Vineer võib olla ka väga jäik ja tugev. Puidu puudustena võib välja tuua sõltuvuse keskkonnast – sõltuvalt niiskusest ja temperatuurist muudab puit oma geomeetriat. Samuti on sama jäikuse saavutamiseks puit raskem kui alumiinium, võrreldav lausa teraskonstruktsiooniga.

Terasraami võib koostada profiilidest või plekist. Teras on suhteliselt odav, samas tugev ja jäik. Küll aga on teras raske ja terase töötlemine on tülkam kui teise kahe materjali. Terast on lihtsasti võimalik keevitada, kuid keevitamisel tekivad pinged ja hea lõpptulemuse saavutamine on suhteliselt keerukas töö.



Sele 2.1 30x60 mm *T-slot* profiil

Alumiinium on eelnevatest materjalidest küll pisut kallim, kuid kergem ja peaaegu sama jäik kui teras. Alumiiniumist on olemas spetsiaalseid profiile raamide ehitamiseks inglise keeles *T-slot profile*, üks 30x60 mm näide on kujutatud seel 2.1. Seda tüüpi profiilid on raami ehituseks väga head, neile on loodud spetsiaalsed kinnitusvahendid, nurgad jms, mis lihtsustavad raami koostamist. Küll aga ei ole nende kättesaadavus eriti hea ja hind on suhteliselt kallis. Variant on ka kasutada lihtsamaid profiile. Ristkülikprofiilid on näiteks odavad, hästi kättesaadavad ja samuti suhteliselt mugavad 90 kraadiste liidete koostamiseks. Probleem on vaid profiilide omavahel kinnitamisest ning pindade tasasuses.

Täpsemaks materjalivalikuks koostati tabel kolme materjali omaduste võrdlemiseks. Väga heade omadustega vineer on Balti kasevineer. Tüüpiline terasprofiilide materjal on S235 ja vaadeldavate alumiiniumprofiilide materjal oli AW-6060-T6.

Tabel 2.1 Raami materjalide võrdlus

	Voolavu spiid [MPa]	Elastsus moodul [GPa]	Tihedus [kg/m <sup>3</sup> ]	Brinelli kõvadus [HB]	Viide
Kasevin eer	28-35	8-10	680-700	<30	[13]
S235	235	190-210	7700 - 8000	100-140	[14]
AW- 6060-T6	140	70	2700	60	[15]

Tala jäikus tõmbel ja survel on võrdeline elastsusmooduli ja pindalaga. Teras ja alumiiniumi tiheduste vahe on umbes kolmekordne. Ka elastsusmoodulite vahe on umbes kolmekordne, aga vastupidises suunas, see tähendab, et sama massi juures on tõmbel ja survel eelnimetatud materjalide jäikus praktiliselt sama.

Tala jäikus paindel on aga võrdeline elastsusmooduli ja telginertsimomendiga. Alumiiniumi madalam tihedus lubab kasutada suuremat profiili, mis omakorda tähendab suuremat telginertsimomenti, seega paindel on alumiiniumprofiil suurema jäikusega kui sarnase kuju ja massiga terasprofiil.

Vineeri jäikus on teistest materjalidest madalam ja samaväärse raami koostamiseks tuleb kasutada oluliselt rohkem vineeri, kui terast või alumiiniumi.

Antud töös otsustati kasutada alumiiniumist ristkülikprofiile mõõduga 80 mm x 40 mm, seinapaksusega 4 mm. Profiili valik tehti raami mõõtmete projekteerimise käigus, antud mõõt andis võimaluse teatud sõlmed koostada lihtsamini, kui mõne teise profiiliga.

Samuti on seinapaksus küllaldane, et vähemalt M3 keermega polte kinnitada profiili keermestatud avasse.

Raami koostamisel kasutatakse spetsiaalset tööstuslikku alumiiniumi liimi, mille tugevus on võrreldav või isegi parem kui keevisliitel, kuid väldib keevitusest tekkivaid pingeid ja deformatsioone. Taolisi liime pakub näiteks Lord, 3M, Loctite. Lord'i MaxLok liimi hind 50 mL tuubi eest on 22,50 USD ja 375 mL eest 50 USD. Väiksemast tuubist peaks antud raamile piisama. Poltliide on ka võimalus, kuid siis on mõistlikum juba kasutada eespool mainitud spetsiaalseid raamiehitus profiilsüsteeme, kus on kõik vajalikud nurgad ja kinnituselemendid olemas.

## **2.3 Teljed**

Mehaanilise poole pealt on telgedel kaks funktsiooni – muuta mootori pöörliikumine lineaarliikumiseks ning linearsel liikumisel lubada ühes suunas vabalt liikuda samal ajal teistes suundades liikumist takistades.

### **2.3.1 Pöörliikumise teisendamine lineaarliikumiseks**

Mootori pöörliikumise muutmiseks lineaarliikumiseks on kolm põhilist võimalust: erinevad kruvid, hammasrihmad ja hammaslati ja hammasratta kombinatsioonid. [16] Järgnevalt tehakse valik antud töös kasutatavale meetodile.

Hammasrihmadest on vabalt saadaval põhiliselt 3d printerites kasutatavad rihmad erinevate laiuste ja sammudega. Küll aga on rihmade kasutamine täpsetes seadmetes suhteliselt keeruline – rihma õige pinge all hoidmiseks võivad pingutusmehanismid minna suhteliselt keerukaks. Samuti on probleeme rihma kulumisega, libisemisega jms.

Hammaslatte ja vastavaid hammasrattaid ei ole just eriti hästi saada, need, mis on, on suhteliselt kallid.

Kaks põhilist tüüpi kruvisid, mida kasutatakse CNC masinates, on kuulkruvid ja trapetskruvid. Mõlemad on olemas erinevate diameetrite, keermetiheduste, sammudega.

Kuulkruvid on kruvid, kus spetsiaalses mutris olevad kuulid veerevad mööda kruvipinda. Täpsem ehitus on nähtav läbilõikest seel 2.2. Asendades traditsioonilise metallkeermete libiseva kontakti kuulide veemisega, saavutatakse väiksem takistus ja suur täpsus. Kuulkruvisid on olemas erinevate tolerantsidega, mis määravad ära ka suuresti kuulkruvi hinna. Kõige odavamad kuulkruvid maksavad Hiinast *Ebay* või *AliExpress* kaudu tellides ca 25-40 eurot sobiva 500 mm kruvi ja vastava mutri eest.



Sele 2.2 Kuulkruvi

Trapetskruvid (selel 2.3) on keermestatud latid, kus keeme profiil on trapets. Mutter on tüüpiliselt valmistatud pronksist. Pronksi hõõrdetegur terasel on madalam kui teras-terasega kontaktis. Trapetskruvi on aga oluliselt odavam kui kuulkruvi. 500 mm trapetskruvi koos mutriga maksab Hiinast tellides 8-10 eurot.



Sele 2.3 Trapetskruvi

Antud töös kasutatakse kruviülekanet, kuna seda on kõige lihtsam realiseerida. Järgnevalt tuuakse välja trapetskruvide ja kuulkruvide parameetrite võrldus.

Tabel 2.2 Kuulkruvi ja trapetskruvi võrdlus

	Kuulkruvi	Trapetskruvi
Hind	Kallim	Odavam
Efektiivsus	90%	20-80% (sõltub sammust)
Hooldus	Tuleb hoida puhtana, samas pidevalt määratuna. Korrektselt hooldatuna kestavad kauem kui trapetskruid.	Mutter puhastab keeret, pakub kerget mäaret, kuid kulub.
Resolutsioon	Minimaalne samm 4 mm	Minimaalne samm 1 mm
Lõtk	Odaval hinnaklassil suurem kui trapetskrivil, raskesti likvideeritav	Väiksem, kergemini likvideeritav
Paigaldus ja kasutamine	Nõutav suur täpsus ja pidurdamisfunktsioon, raske kasutada vertikaalselt	Lubatud rohkem ebatäpsusi, pidurdab ise
Müra	Valjem	Vaiksem

Antud töös otsustati trapetskruvi kasuks. Kuulkruvi kasuks on mõistlik otsustada, kui tegemist on suurema tootmismahuga, kus efektiivsus, töökindlus ja tööiga on olulisemad. Tuleb ka arvestada, et trükkplaaditolm on abrasiivne ja kuulkruvi puhul tuleb hoolitseda selle eest, et tolmu mutrisse ei jõuaks, trapetskruvi puhul pole see nii oluline. Ise valmistatava prototüüpimismasina puhul on aga oluline hind ja kasutajasõbralikkus.

Kuna trükkplaatide valmistamise juures eriti suuri löikejõude ei teki, siis võib arvestada, et trapetskruvi diameeter ja samm tuleb valida soovitud liikumiskiiruste, -kiirenduste ja pidurduste järgi, arvestades liigutatavate osade massi. Loomulikult tuleb ka arvestada hõõrdejõududest tingitud takistust.

Trapetskruidest on Hiina turul kõige populaarsemad ja seetõttu ka kõige odavamad 8 mm läbimõõduga Acme keermega trapetskruid. Nendele lubatav survejõud on erinevate allikate andmetel 1500-2500 N, mis on igati piisav antud töö rakenduses. [17, 18]

Horisontaalsuunaliste telgede peal kasutatakse lõtkude vastu vedruga eelpingestatud mutreid (selel 2.4). Mutter koosneb kahest omavahel lukustuvast mutrist mille vahele jääb vedru pingesse. Vedru pinge surub kahte poolt lahku ja aitab lahti saada kruvi lõtkust.



Sele 2.4 Vedruga lõtkuvastane mutter

Trapetskruvid toestatakse laagripukkidega mõlemast otsast. Mutri ühendamiseks telje alusplaadiga kasutatakse alumiiniumist plokki, millel on läbiv ava ja mutri jaoks sobilikud astmed ja kinnitusavad.

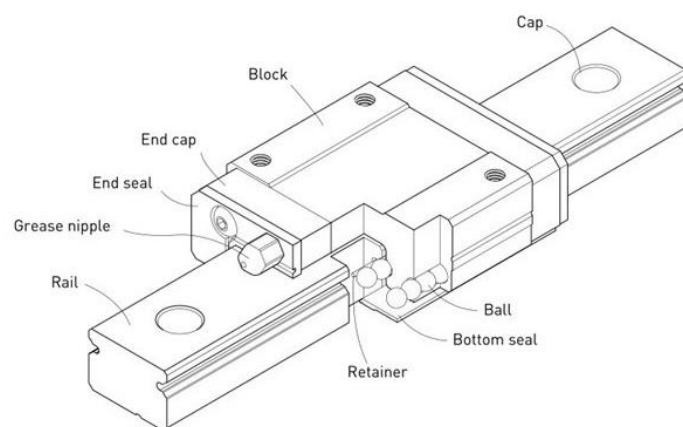
### 2.3.2 Lineaarjuhikud

Lineaarjuhikuid võib jaotada profiili järgi kaheks – ümarad juhikud ja mitteümarad. Ümarad lineaarjuhikud on isevalmistatud CNC masinate puhul kõige populaarsem valik. Kuna ümarat juhikut on lihtne toota, on ta odavam kui mitteümar juhik. Samuti on ümarate lineaarjuhikute korral lubatavad ebatäpsused paigalduses suuremad. Küll aga on ümarad juhikud ka reeglina kõige ebatäpsemad ja sama jäikuse juures suuremad ja raskemad. Kui üldse kasutada ümarjuhikut, on soovitatav kasutada toestatud juhikuid, need on oluliselt jäigemad, kuna on kinnitatud kogu pikkuses. Odavad Hiina ümarjuhikud on tihti kõverad, toestatud juhikute poldiavad on puuritud käsitsi ja ei asetse üksteisest ühel kaugusel (viga 10% ja üle). Samuti ei ole soovitatav toestatud ümarjuhiku lineaarlaagrit paigutada tõmmatud asendisse, kuna laagri korpusele hakkab mõjuma jõud, mis painutab laagri korpust ja laagrit ennast laiali [19]

Tabelis 2.3 võrdlus toestatud ümarjuhiku SBR16 ja MGN15 mitteümara juhiku vahel. Tegemist on sarnases suuruses juhikuga ja praktiliselt võrdse hinnaga lahendustega. MGN15 ehitus on näha seel 2.6, SBR16 seel 2.5.



Sele 2.5 SBR16 lineaarjuhik



Sele 2.6 MGN15 lineaarjuhik



Tabel 2.3 SBR16 ja MGN15 lineaarjuhikute võrdlus

	SBR16	MGN15
Juhiku laius	Alus 40 mm, juhik 16 mm	15 mm
Laagriploki laius x pikkus	45 x 45 mm	32 x 58.8 mm
Kogukõrgus	45 mm	16 mm
Hooldus	Kehvem laagri tihendus, lihtsamini puhastatav juhiku pind. Laagrid tuleb hoida määrituna.	Laager üsna tolmuindel, juhiku pinna puhastamine ebamugavam. Hoida määrituna.
Paigaldus ja kasutamine	Kinnitusavad tuleb üle mõõta Paigalduses lubatud rohkem ebatäpsust  Soovituslik paigaldada vaid surve alla	Nõutud väga hea paigaldustäpsus. Avad täpsetel kohtadel, võib puurida CNC pingis.  Lubatud paigaldada igas asendis
Lubatud koormus	Staatiline 1176 N  Dünaamiline 770 N  Väändel jäikus halb, andmed puuduvad	Staatiline 9300 N  Dünaamiline 6500 N  Lubatud 60-75 Nm väändemoment laagri kohta sõltuvalt momendi teljest
Juhiku kaal	1 kg/m + 0,15 kg laagri kohta	0,65 kg/m + 0,06 kg laagri kohta

Antud töös otsustati MGN15 kasuks, kuna antud juhik on igas suunas mõjuvate jõudude suhtes oluliselt jäigem kui ümarjuhik ja teiste ehitajate kogemuste alusel võib öelda, et ka oluliselt täpsem ja lõtkuvabam.

Igasuguste lineaarjuhikutega on siiski jätkuvalt probleem – pinnad, millele juhikud kinnitatakse peavad olema sirged ning iga telje juhikud tuleb paigaldada täpselt

paralleelselt. Selle eelduseks on korralik raami ehitus ja seejärel täpne kinnitusavade puurimine ja vajadusel ka kinnituspindade töötlus, et pind oleks sirge ja juhikud asetseksid ühel tasandil.

### 2.3.3 Telgede mootorite valik

Lineartelgede positsioneerimine võib toimuda, kas avatud süsteemina või tagasisidestatud süsteemina. Avatud süsteem tähendab, et me ei tea telje tegelikku asendit, me arvutame selle vastavalt teadaolevatele parameetritele. Suletud süsteemis on olemas asendi kohta tagasiside. Asendi tagasiside jaguneb omakorda kaudseks ja otseseks – kaudne tagasiside käib mootori asendi tagasiside kaudu ja otsene tagasiside eeldab lineaarset enkooderit. Mootorite maailmas tähendab avatud süsteem samm-mootori kasutamist ja suletud süsteem servomootori kasutamist.

Kahjuks ei ole servomootoritele loodud veel korralikku vabalt kättesaadavat tarkvara. Samuti on valmis servomootorid kallid ja samas võimsuses samm-mootorid suhteliselt odavad. Servomootoreid võiks ise luua ka näiteks odavast harjadega alalisvoolumootorist ja enkooderist, kuid selle juhtimine nõuab kõige lihtsamal kujul vähemalt PID-algoritmidega juhtimist.

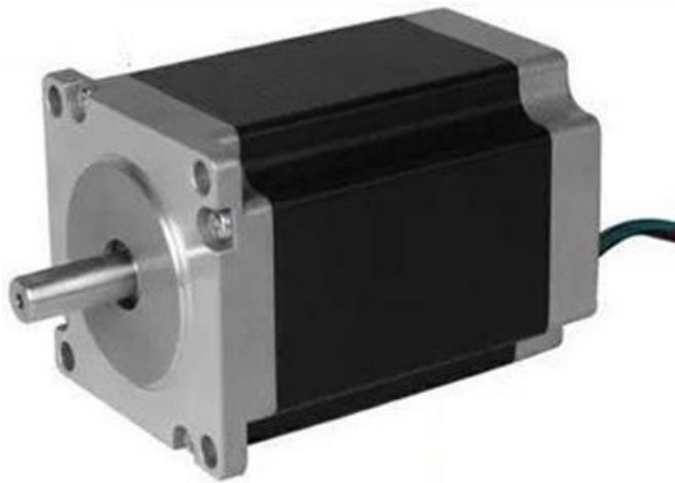
Antud töös otsustati kasutada samm-mootoreid. Samm-mootoreid kasutades on võimalik asendit määrata teades mootori sammu suurust ja tehtud samme mingi fikseeritud punkti suhtes. Mugavaks ja täpseks kalibreerimiseks on igal teljel ka lõpulülid, mille järgi saab korralik tarkvara kalibreerida ka teljed automaatselt.

Vajaliku mootori suuruse arvutamine ei ole antud töö etapis praktiline. Mootorile mõjuvad jõud tulenevad põhiliselt teljel asetseva massi kiirendamisest ja pidurdamisest. Lõikejõud trükkplaadi radade freesimisel on olematud, seega mootorite võimekus määrab sisuliselt ära saavutatavad kiirused. Selle arvutuse jaoks on vajalikud minimaalselt järgnevad andmed:

- Soovitavad töörežiimid, režiimid ülesõitudel, lõikejõud
- Liikuvate osade mass
- Ülekande efektiivsus, ülekandearv

Nende andmete järgi võib hinnata mootorilt nõutavat väänet ja võimsust, kuid reaalselt ei ole võimalik neidki andmeid antud staadiumis täpselt määrata. Mõistlikum on mootor valida kogemuslikult – arvestades, milliseid mootoreid on valmis lahendustes kasutatud ja millised režiimid on võimalik nendega saavutada. Loomulikult on võimsama mootoriga võimalik saavutada kiirem töötus, seega on üheks piiravaks argumendiks veel hind.

Antud töö käigus valiti samm-mootoriteks NEMA 23 standardi mootor LONGS 23HS8430 (selel 2.7).



Sele 2.7 23HS8430 samm-mootor

Järgnevalt on toodud välja antud mootori põhiandmed.

Sammu nurk:  $1.8^{\circ}$

Vool: 3.0 A/faas

Takistus: 1.0 Ohm/faas

Induktiivsus: 3.5mH/faas

Maksimaalne väändemoment: 19.59 kg\*cm

Pingestamata olekus liigutamiseks vajalik väändemoment: 0,6 kg\*cm

Mass: 1 kg

Antud mootorid on ka suhteliselt odavad – 73,89 eurot kolme mootori eest, seal hulgas tasuta saatmine DHL'iga Saksamaalt.

Mootorite ja trapetskruvide vaheline sidur valiti painduv alumiiniumist sidur (selel 2.8), mille ühel pool on 6.35 mm diameetriga ava, teisel pool 8 mm diameetriga. Sidur fikseerib võllid omakorda veel seadekruvidega. Hind kolme siduri eest oli ca 5 eurot.



Sele 2.8 Painduv sidur

## 2.4 Spindel

### 2.4.1 Nõuded spindlile

CNC freesimismasinale annab tööriista pöördliikumise spindel. Tavaliselt kasutatakse selleks spetsiaalseid spindlimootoreid, kuid spindel võib olla ka mootorist eraldi. Sellisel juhul on võimalik kasutada näiteks rihmülekannet või sidurit mootori ja spindli võlli vahel.

Spindli olulisemad parameetrid on:

- võimsus nii lühiajaline kui ka pidev
- maksimaalne koormus radiaalselt, aksiaalselt
- maksimaalne pöörlemissagedus
- tööriistahoidja tüüp, suurus, võimekus

Trükkplaadi radade freesimisel on koormus väike, seega spindel ei pea olema kuigi võimas, kontuuri välja freesimisel võiks aga olla võimalus lühiajaliselt suuremat võimsust kasutada.

Trükkplaadi rajad on väga kitsad, seega on ka löikeinstrumendi otsa diameeter väga väike. Selleks, et saavutada sobivat löikekiirust, peab spindel olema väga kõrge pöörlemissagedusega, soovitatavalt lausa üle 30 000 pöörde minutis.

Trükkplaadiga töötades mõjuvad põhiliselt radiaalsed jõud. Kõige suurem aksiaalne jõud mõjub puurides ja väljalõikamist alustades, kuid trükkplaadis olevad avad on reeglina väga väikesed, seega ei tekita ka see erilist koormust. Seega võib spindlilahenduses ära jätta tugilaagri, mis reeglina võiks jääda maksimaalset pöörlemissagedust piirama.

Kõige kättesaadavamad tööriistahoidjad kasutavad löikeinstrumendi kinnitamiseks tsangi. Tsangid on odavad ja lihtsasti kasutatavad, küll aga mitte kõige täpsemad. Tsangidel on probleeme viskumisega, mis tekitab probleeme täpsusega, suurendab kulumist ja võib lõhkuda väikese diameetriga puure. Professionaalsetes lahendustes kasutatakse kuumpressliidet, kuid see on kallid ja keeruline lahendus.

#### **2.4.2 Spindli lahendus**

Kõige odavamad spetsiaalsed spindlimootorid maksavad Aliexpressi kaudu tellides ca 50-100 eurot, kuid nende maksimaalne pöörlemissagedus jääb reeglina alla 15000 pöörde minutis. Samuti ei ole odavad spindlimootorid reeglina muud, kui tavalised mootorid, millel on tsangihoidjaga võll. Tihtipeale on neil kasutatud lihtsalt radiaalkuullaagreid, sedagi suhteliselt kehva lahendusega. Korralikumad spindlimootorite hinnad jäävad aga antud töö hinnapiirist välja, seega pakutakse välja spindlile kaks lahendust.

Mõlemas lahenduses kasutatakse mootorina harjadeta alalisvoolumootorit. Antud mootoritel on pöörlemissageduse vahemik väga suur, kusjuures maksimaalse võimaliku pöörlemissageduse määrab laagritele mõjuvatest jõududest tingitud takistus. Harjade puudumise tõttu on ka mootori hooldus praktiliselt olematu.

Mootoriks sai valitud GoolRC 3674 2250KV mootor (selel 2.9).



Sele 2.9 GoolRc 3674 2250KV

Mootori põhiandmed:

- Diameeter 36 mm, pikkus 74 mm
- KV(RPM/V): 2250KV
- Pooluste arv: 4
- Maksimaalne võimsus: 1800W
- Tööpinge: <22.2V
- Maksimaalne vool: 80A
- Võlli diameeter: 5mm
- Hind: 25,06 EUR

Teoreetiliselt peaks antud mootor olema võimeline arendama pöörlemissagedust

$$f_{max} = U_{max} * K_v \quad (2.1)$$

$U_{max}$  on maksimaalne tööpinge ja  $K_v$  on mootori kiiruskonstant

$$f_{max} = 22.2 * 2250 = 49950 \frac{1}{\text{min}}$$

Reaalselt võib maksimaalne pöörlemissagedus olla madalam, kuid siiski suhteliselt kõrge. Samuti tuleb arvestada, et märgitud maksimaalne võimsus ja vool on lühiajalised. Kuigi harjadeta alalisvoolumootorid on väga hea efektiivsusega, tuleb siiski teadmiseks võtta, et nii väikese mootori korpus ei ole võimeline ära juhtima väga suurt hulka soojust. Soojuse ära juhtimise parandamiseks on müügil spetsiaalsed jahutusradiaatorid just antud tüüpi mootoritele. Raskematel koormustel on soovituslik kasutada maksimaalses ulatuses radiaatoreid ja lisada ka ventilaator.

Esimene lahendus spindlile on kasutada otse mootori võlli otsa paigaldatavat tsangihoidjat. Antud lahendus on väga odav ja lihtsasti realiseeritav, kuid tõenäoliselt kulutab üleliigselt mootori laagreid. ER11 tsangidele mõeldud 5mm võlli avaga tsangihoidja maksab koos 1/8 tollise tsangiga 8.98 eurot ja on paigaldatav otse mootori võllile.



Sele 2.10 ER11 tsangihoidja

Teine lahendus on spindel ise valmistada ja sidurdada mootoriga. Spindli korpus koosneb kolmest osast. Põhiosa on korpus, kuhu paigutatakse laagrid ja võll. Spindli korpuse kinnitamiseks mootorile on flants, millel on poldiavad nii mootori kui spindli korpuse külge kinnitamiseks. Kolmas osa on spindli alumises otsas, mis kaitseb tolmu eest ja fikseerib alumiste laagrite välimised saaled aksiaalselt.

Kuna eesmärk on valmistada kõrgel pöörlemissagedusel kasutatav spindel, valiti spindli võlli diameetriks 8 mm. Sellise diameetriga on saadaval väga palju laagreid, mis on mõeldud kasutamiseks kiire pöörlemissagedusega. Suurema võlli ja suuremate laagrite puhul on nõ kiiremad laagrid väga kallid, sest mida suurem on laagri diameeter, seda suuremad on ka mõjuvad jõud. ER11 tsangihoidjaga 8 mm läbimõõduga võll on saadaval järjekordselt Hiina turul näiteks Aliexpressi vahendusel.

Spindli alumises otsas kasutatakse radiaal-tugilaagrite paari vastastikku koos. Ülemises otsas toestab võlli lihtne 608 radiaallaager. Alumised laagrid ei lase võllil aksiaalselt liikuda, samuti on radiaal-tugilaagrid väga täpsed ja peaksid võimaldama väga väikest viskumist ja samas suurt pöörlemissagedust. [20]

Kõik kolm laagrit on välisdiameetriga 22 mm, h5 tolerantsiklassiga, st ülemine piirhälve 0 µm, alumine -9 µm. Ülemise laagri puhul ei ole pinguga ist tingimata oluline, sobib ka siirdeist. Alumiste kahe laagri puhul oleks soovitatav pinguga ist. Soovitatav tolerantsiklass laagri korpusele kerge pinguga istu jaoks on N6 (SKF'i kodulehelt)

Järgnevalt analüüsitakse antud istu korral mõjuvaid pingeid ja koostamise võimalusi.

Nominaalne diameeter  $d = 22$  mm

Spindli korpuse diameeter  $d_0 = 36$  mm

Spindli korpuse materjal on AW-6082-T6, elastsusmooduliga  $E_0 = 70$  Gpa

Poisson'i suhe  $\nu_0 = 0,33$

Laagri sisediameeter  $d_i = 8$  mm

Laagri materjal on 100Cr6 teras, elastsusmooduliga  $E_i = 210$  Gpa

Poisson'i suhe  $\nu_i = 0,3$

Istu koostamisel tekkiv pinge on arvatav valemist

$$p = \frac{\delta}{\frac{d}{E_0} \left( \frac{d_0^2 + d^2}{d_0^2 - d^2} + \nu_0 \right) + \frac{d}{E_i} \left( \frac{d^2 + d_i^2}{d^2 - d_i^2} - \nu_i \right)}$$

Pinge arvutamiseks leiame tolerantsiklassile vastavad piirhälbed JIS B 0401 ISO standardi järgi.



Dimension Tolerance of Hole, Regularly Used Fitting

Reference Dimension (mm)	More than or Less	Class of Tolerance Range for Holes																												
		B10	C9	C10	D8	D9	D10	E7	E8	E9	F6	F7	F8	G6	G7	H6	H7	H8	H9	H10	JS6	JS7	K6	K7	M6	M7	N6	N7	P6	P7
-	3	+180	+85	+100	+34	+45	+60	+24	+28	+39	+12	+16	+20	+8	+12	+6	+10	+14	+25	+40	±3	±5	0	0	-2	-2	-4	-4	-6	-6
		+140	+60	+60	+20	+20	+20	+14	+14	+14	+6	+6	+6	+2	+2	+2	+2	+2	+2	+2	0	0	0	0	-6	-10	-8	-12	-10	-14
3	6	+188	+100	+118	+48	+60	+78	+32	+38	+50	+18	+22	+28	+12	+16	+8	+12	+18	+30	+48	±4	±6	+2	+3	-1	0	-5	-4	-9	-8
		+140	+70	+70	+30	+30	+30	+20	+20	+20	+10	+10	+10	+4	+4	0	0	0	0	0	0	±4	±6	-6	-9	-9	-12	-13	-16	-17
6	10	+208	+116	+138	+62	+76	+98	+40	+47	+61	+22	+28	+35	+14	+20	+9	+15	+22	+36	+58	±4.5	±7.5	+2	+5	-3	0	-7	-4	-12	-9
		+150	+80	+80	+40	+40	+40	+25	+25	+25	+13	+13	+13	+5	+5	0	0	0	0	0	0	±4.5	±7.5	-7	-10	-12	-15	-16	-19	-21
10	14	+220	+138	+165	+77	+93	+120	+50	+59	+75	+27	+34	+43	+17	+24	+11	+18	+27	+43	+70	±5.5	±9	+2	+6	-4	0	-9	-5	-15	-11
		+150	+95	+95	+50	+50	+50	+32	+32	+32	+16	+16	+16	+6	+6	0	0	0	0	0	0	±5.5	±9	-9	-12	-15	-18	-20	-23	-26
18	24	+244	+162	+194	+98	+117	+149	+61	+73	+92	+33	+41	+53	+20	+28	+13	+21	+33	+52	+84	±6.5	±10.5	+2	+6	-4	0	-11	-7	-18	-14
		+160	+110	+110	+65	+65	+65	+40	+40	+40	+20	+20	+20	+7	+7	0	0	0	0	0	0	±6.5	±10.5	-11	-15	-17	-21	-24	-28	-31
24	30																													

Sele 2.11 Tolerantsiklasside tabel avadele

Tolerantsiklassis P7 on ülemine piirhälve -14 µm, alumine -35 µm. Sellega on kindlustatud vähemalt 5 µm ping, maksimaalne ping tekib siis, kui laager on ülemise piirhälbega ja ava alumise piirhälbega. Kuna laagri ülemine piirhälve on 0 siis pingu suurus ongi ava alumine piirhälve.

Kontrollime tekkivat pinget  $p_{max}$  maksimaalse pingu korral

$$p_{max} = \frac{35 * 10^{-6}}{\frac{22 * 10^{-3} \left( (36 * 10^{-3})^2 + (22 * 10^{-3})^2 \right)}{70 * 10^9 \left( (36 * 10^{-3})^2 - (22 * 10^{-3})^2 \right) + 0.33} + \frac{22 * 10^{-3} \left( (22 * 10^{-3})^2 + (8 * 10^{-3})^2 \right)}{210 * 10^9 \left( (22 * 10^{-3})^2 - (8 * 10^{-3})^2 \right) + 0.3}} = 39.1 \text{ MPa}$$

AW-6082-T6 tinglik voolavuspiir on 250 MPa, seega istul plastseid deformatsioone ei teki.

Istu koostamiseks on kaks võimalust. Esimene võimalus on laagrid pressida spindli korpusesse. Pressimisel tekkiva jõu arvutuseks on tarvis teada pindade vahelist hõõrdetegurit  $\mu$ , istu maksimaalset pinget  $p_{max}$  ja kokkupuute pindala  $S$ .

Alumiiniumi ja terase vaheline hõõrdetegur  $\mu = 0,6$

Laagri paksus on  $w = 8 \text{ mm}$

$$\text{Kokkupuutepindala } S = \pi * d * w = \pi * 22 * 8 = 553 \text{ mm}^2$$

Pressimiseks vajalik maksimaalne jõud on arvutatav valemist:

$$F = \mu * p_{max} * S = 0,6 * 39.1 * 10^6 * 553 * 10^{-6} = 12973 \text{ N}$$

Teine võimalus istu koostamiseks on kasutada ära alumiiniumi suurt soojuspaisumistegurit. Selleks, et ist koostada kuumpressliitena, peab teadma materjali

soojuspaisumistegurit  $\alpha$  ja istu suurimat pingu. Ist on koostatav kuumpressliitena kui materjali on võimalik kuumutada sedavõrd, et paisumine ületab pingu.

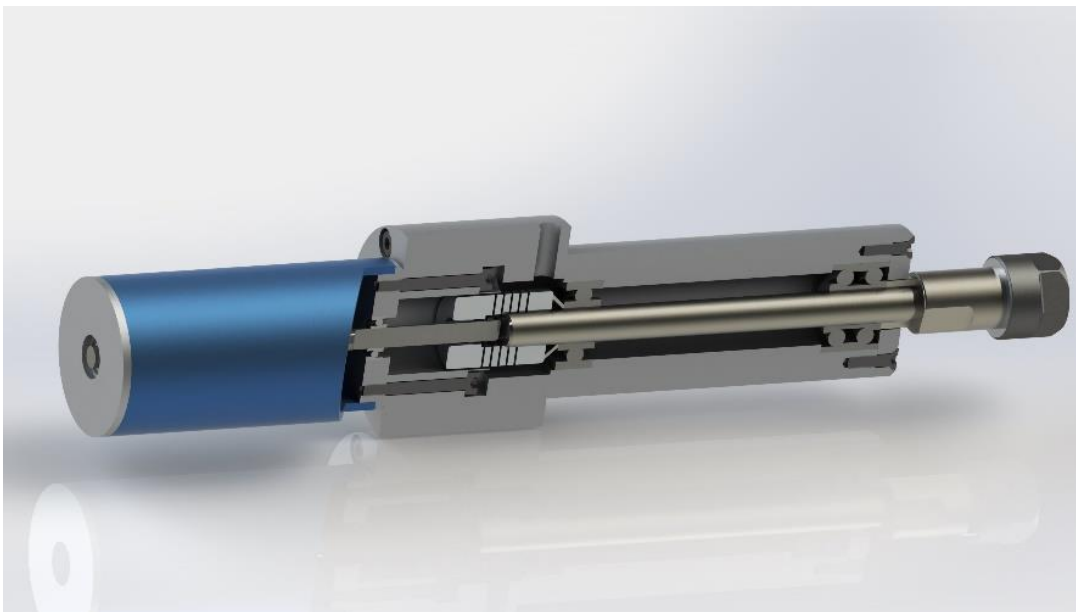
Alumiiniumi joonpaisumistegur  $\alpha = 23.1 \mu\text{m}/\text{m}\cdot\text{K}$

Seega on ava suurendamiseks  $35 \mu\text{m}$  võrra vaja materjali soojendada

$$\Delta t = \frac{35}{23.1 \cdot 0.022} = 68,9 \text{ K võrra.}$$

See tähendab, et kuumpressliide on võimalik koostada spindli korpuse kuumutamisel keevas vees. Seejärel on ava küllalt suur, et laagrid vabalt paigaldada. Keevas vees kuumutamine ei mõjuta ka materjali termotötlust.

Võlli ja laagrite vaheline ist on siirdeist. Koostamisel on võimalus võll jahutada ja määrida lihtsamaks paigalduseks. Võlli alumises otsas olev puks fikseerib võlli sobivale kaugusele ja ülemine ots kinnitatakse sidurisse. Selleks on spindli korpuses ava, mille kaudu on võimalik siduri seadekruvisid keerata. Siduri ja ülemise laagri vahel on vedruseib, mis normaalolekus paneb spindlile peale nõrga aksiaalse eelpinge suunaga alla.



Sele 2.12 Spindli läbilõikevaade

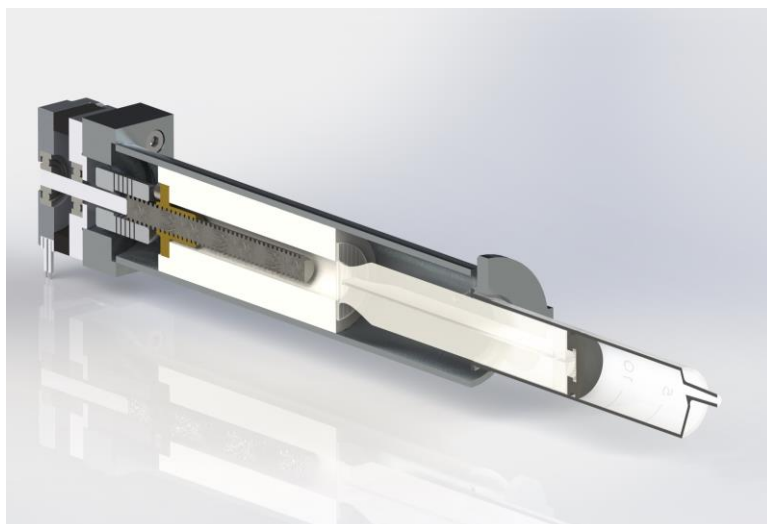
## 2.5 Jootepasta dosaator

CNC masin annab hea võimaluse ka jootepasta plaadile automaatselt paigaldada. Tavaliselt tehakse seda prototüübi puhul käsitsi, kuid trükkplaadi disainides saame nagunii joonised, kus on kohad märgitud, kuhu jootepastat tarvis on.

Elektrilisi ja pneumaatilisi jootepasta dosaatoreid on ennegi disainitud, kuid pigem käsitsi kasutamiseks või spetsiaalselt kindlatesse professionaalsetesse masinatesse. Antud töös luuakse lahendus, mis kinnitub pinki samamoodi nagu spindelgi, kuid lubab kasutada erinevaid jootepasta mahuteid. Tüüpiliselt on jootepasta süstaldes, seega loodi süstaldele lihtne ja universaalne kiirkinnitus, kuhu sobivad praktiliselt kõik enamlevinud suurustes süstlad.



Sele 2.13 Jootepasta dosaatori süstlakinnitus



Sele 2.14 Jootepasta dosaatori läbilõige

Jootepasta surutakse süstlast välja kolviga, mida liigutab trapetskruvi abil samm-mootor. Trapetskruvi on taaskord läbimõõduga 8 mm, sammuga 2 mm – see on väga odav ja telgedel juba kasutusel.

Mootor on väike NEMA 17 suuruses samm-mootor (17HS4401). Valitud mootor võib-olla tarbetult võimas, aga enam odavamat samm-mootorit ei ole töö autor leidnud. Antud mootori hind on 7 eurot. Lisavõimsus võimaldab mootoril kasutada mikrosammumist, mis tagab vaiksema ja sujuvama töö.

## **3 MASINA ELEKTROONIKA ARENDUS**

### **3.1 Elektroonika ülevaade**

CNC masina elektroonika on vahelülis arvuti ja mehaanika vahel. Põhikomponendiks on kontrolleri, mis võtab vastu arvuti poolt saadetud käsud g-koodi kujul ja arvutab vajalikud signaalid erinevatele seadmetele. Tänapäevastes lahendustes kasutatakse mikrokontrollereid, eelnevalt kasutati palju ka arvuti paralleelpordi kaudu juhtimist. Mikrokontrolleris toimub ka positsiooni arvutamine, salvestamine, andurite andmete lugemine ja tagasiside andmine arvutile.

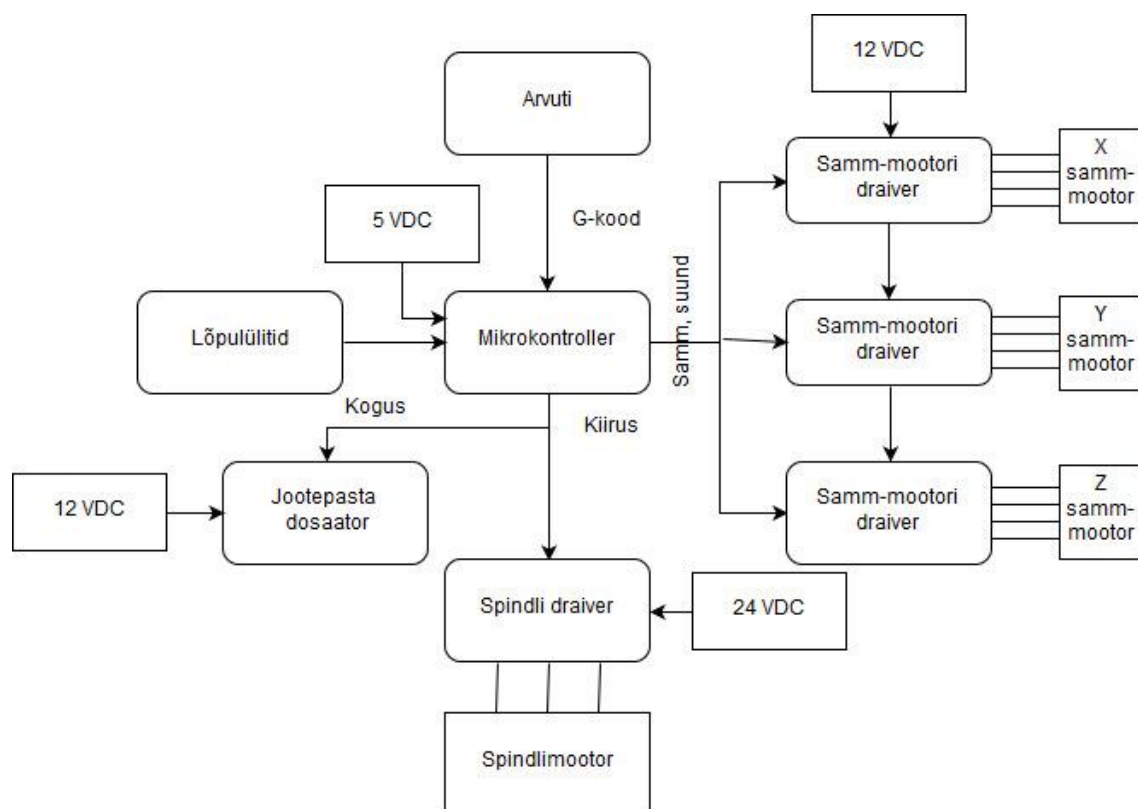
Kuna mikrokontrolleritel on piiratud arv sisendeid-väljundeid, on mõistlik teha osa signaalitöötlust ka mootorite draiverites, näiteks selle asemel, et mikrokontrollerist edastada iga samm-mootori iga mähise otsa väljund eraldi, on võimalik edastada lihtsalt suuna ja sammu signaal ja mootori draiver arvutab sealt edasi vastavad signaalid mootori mähistele.

Spindli mootor on harjadeta alalisvoolumootor ilma asendi tagasisideta, see tähendab, et antud mootori juhtimiseks on vaja spetsiaalset draiverit, mis suudab mootori mittepingestatud mähistelt mõõta vastuelektromotoorjõudu ja selle järgi määrata mootori asendi.

Joote pasta dosaator on tööriist, millele ei ole loodud standardset lahendust, seega tõenäoliselt tuleb sinna valmistada draiver.

Turvalisuse huvides ja positsioneerimise lihtsustamiseks lisatakse ka igale teljele lõpplülid. Lõpplülid kindlustavad, et masina mehaanilisi liikumisulatuse piire ei ületata. Lõpplüliteid võib olla ka topelt – üks, mille olek edastatakse mikrokontrollerile, et peatada liikumine, teine, mis mootorite toite füüsiliselt lahti ühendab, kas relee või mehaanilise lülitiga lahenduses. Tegemist peab olema täielikult kontrollerist eraldatud süsteemiga juhuks, kui kontroller ei reageeri.

Elektroonikasüsteemi erinevatel komponentidel on veel tarvis erinevaid toitepingeid, kuid kõik seadmed töötavad alalisvooluga. Valitud spindlimootor tahab kuni 22.2 V pinget, selleks on mõistlik kasutada 24 V toiteallikat. Steppermootoreid hakatakse juhtima 12 voldiga, mikrokontroller on 5 V toitega. Lihtsustatud elektroonika plokk skeem asub seel 3.1.

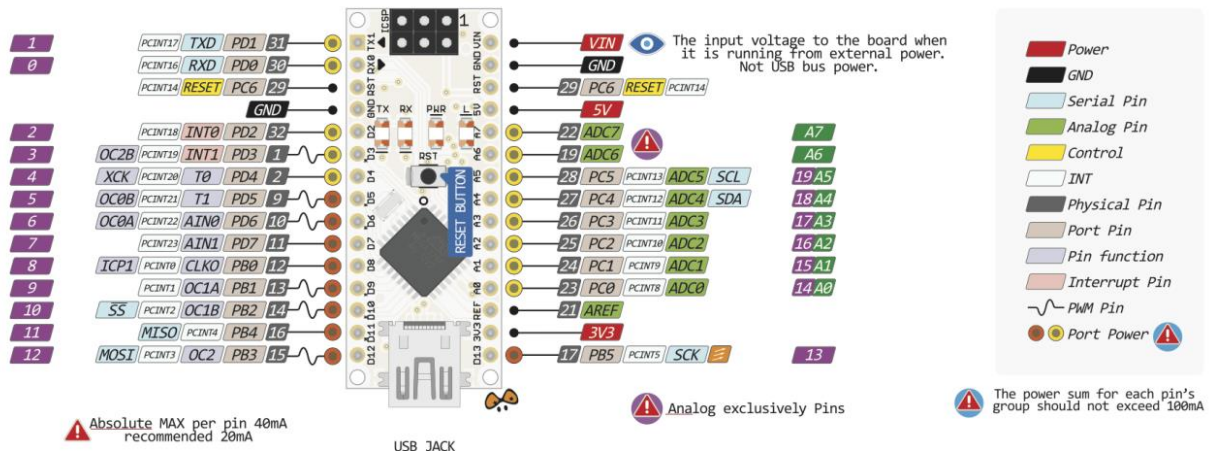


Sele 3.1 Lihtsustatud elektroonikaskeem

## 3.2 Mikrokontrolleri valik

Mikrokontrolerite valikuvõimalusi on lõputult. Antud töös on siiski oluline, et jupid oleks kõigile kättesaadavad ja suhteliselt lihtsasti kasutatavad. Kasutamise lihtsuse huvides on põhiargument tarkvara olemasolu. Tarkvarast räägitakse küll 4. peatükis, kuid parima open-source tarkvara kättesaadavusega on Arduino arendusplaadid. Antud töös on välja valitud Microchip'i (eelnevalt Atmel'i) megaAVR perekonda kuuluv ATmega 328. Antud kontrolleri on loodud CNC tarkvara, mis suudab mikrokontrolleri võimekuse väga suures ulatuses ära kasutada ja on vabalt kättesaadav kõigile.

Lihtsuse huvides võetakse kasutusele Arduino Nano V3 arendusplaat. Sobib ükskõik, milline ATmega 328 kontrolleri arendusplaat, kuid Nano on neist üks kompaktsmaid ja Hiina koopiad maksavad alla 2 euro. Antud arendusplaadil on olemas kõik mikrokontrolleri välised komponendid, ostsillaator, regulaatorid, usb liides, kaitselahendused jms. Arendusplaadi puhul ei ole ka tarvis eraldi programmeeritorit. Arendusplaadi sisendite-väljundite skeem on selal 3.2. Põhilised andmed, mida antud kontrolleri kohta võiks teada on tabelis 3.1.

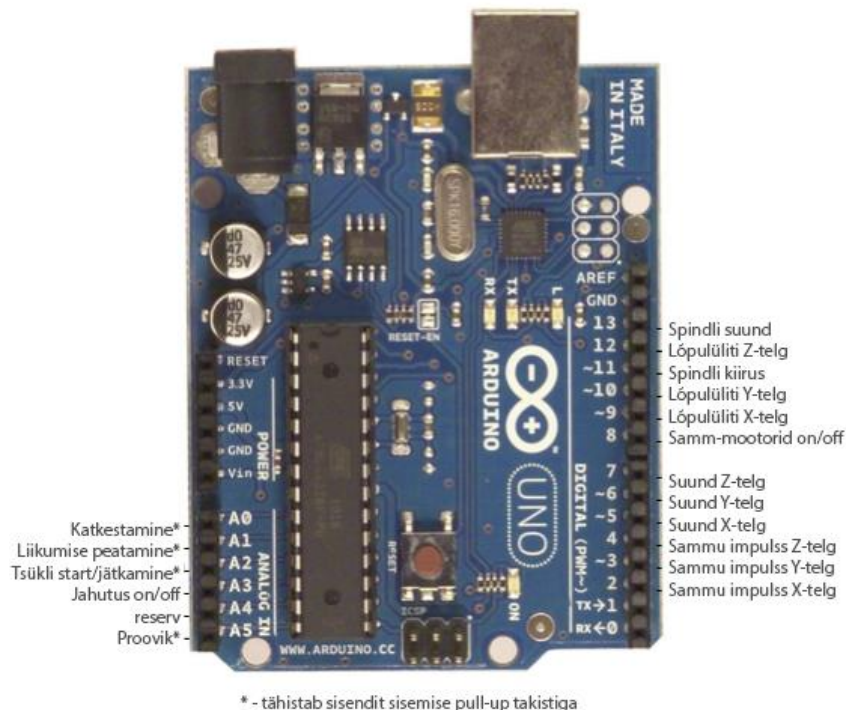


Sele 3.2 Arduino Nano V3

Tabel 3.1 Arduino Nano V3 arendusplaat

Mikrokontroller	Microchip AVR Atmega328
Flash mälu	32 KB
Taktsagedus	16 MHz
Analoog sisendid/väljundid	8
Digitaalsed sisendid/väljundid	22
PWM väljundid	6

Füüsilised sisendid-väljundid mikrokontrollerile seatakse vastavalt GRBL tarkvara vaikeseadetele. Seel 3.3. on füüsilised sisendid ja väljundid kuvatud Arduino Uno arendusplaadil, kuid ühendused on identsed Arduino Nano V3 kontrolleriaga.



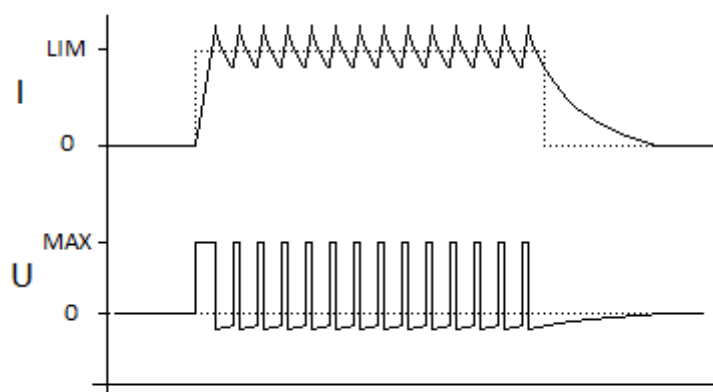
Sele 3.3 Füüsilised sisendid ja väljundid vastavalt GRBL tarkvarale



### 3.3 Samm-mootorite draiverid

Samm-mootoritest täisvõimsuse kätte saamiseks kasutatakse neid bipolaarsena. See tähendab et mootori draiver peab olema võimeline mootori mähiseid pingestama mõlemas suunas. Selleks kasutatakse poolsild-tüüpi lülitust. Samm-mootori puhul siis nelja poolsilda ehk kahte H-silda.

Samuti on samm-mootorite juhtimisel soovitatav kasutada nominaalsest kõrgemat pinget ja *chopper*-tüüpi draiverit. See tähendab, et mõõdetakse mähist läbivat voolu ja voolu piiratakse lülitades väljundit kiiresti sisse-välja. Kõrgema pingega saavutatakse mähise pingestamisel kiirem voolumuutus, mis omakorda tähendab suuremat väänet. Samuti on võimalik mootorit kiirendada suurema kiiruseni, sest vastu-emj hakkab kiirust piirama hiljem. Viimaks on veel võimalik saavutada sujuvam liikumine, kasutades mikrosammumist, mis üldiselt suurendab sujuvust väände arvelt, kuid kõrgemat pinget kasutades on väändekadu väiksem. Tasub ainult arvestada, et ülekuumenemise vältimiseks peab olema vool vastavalt piiratud, ja et draiver samuti saab kõrgema pinge juures suurema koormuse. Voolu piiramine antud meetodil on näha seel 3.4. [21]

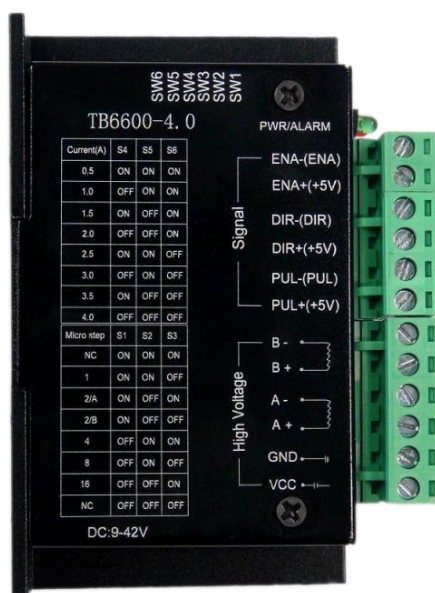


Sele 3.4 *Chopper*-tüüpi voolupiiraja

Samm-mootorite juhtimiseks on olemas palju erinevaid integraalskeeme, samuti on olemas erinevaid valmis H-sildasid. Olulised parameetrid draiveri valikuks on maksimaalne vool soovitava pinge juures, efektiivsus või pingelang üle väljundi, maksimaalne sagedus, ja loomulikult hind. Oluline on ka see, et antud skeem peab sisendina kasutama sammu ja suuna signaale.

Tüüpilised integraalskeemid, mida bipolaarsteppermootorite juures kasutatakse on Texas Instrumentsi L293, ST Microelectronicsi L298, Allegro Micro A4988 ja uuematest TI omadest näiteks DRV8825. Ükski neist aga ei talu piisavalt suurt voolu, et kasutada valitud samm-mootoritega.

Üksiku integraalskeemiga draiveritest on üks sobivamaid Toshiba TB6600 baasil tehtud draiverid. TB6600 on mikrosammumisega *chopper*-tüüpi samm-mootori juhtimiseks loodud integraalskeem, soovitusliku maksimaalse vooluga 4.2 amprit või 3 amprit RMS. Sisendsignaali on sammu ja suuna signaalid, mikrosammumise aste on reguleeritav 1:1 kuni 1:32 3 biti abil. Voolu limiit on seadistatav referentspingega. TB6600 abil saab suhteliselt lihtsa skeemiga piisavalt hea draiveri. Kõige mõistlikum on siiski valmistoode osta Hiinast, mis sisaldab küll odavate komponentidega, kuid mõistliku skeemi, optoisolaatoritega sisendeid, DIP lüliteid režiimide valikuks, tööstuslike pistikuid, korpust, radiaatorit ja muud juurdekuuluvat vaid 6-7 euro eest. Antud töös võeti esialgu kasutusele just need draiverid. Draiver on nähtav ka seel 3.5.



Sele 3.5 TB6600 samm-mootori draiver

Leadshine DM seeria nt DM542, DM556 ja analoogsed draiverid on samm edasi Toshiba TB6600 baasil valmistatud draiveritest. DM542 kontrolleri on Xilinx XC9536XL

CPLD<sup>1</sup> ja lõppastmes kasutatakse 8 N-kanaliga TO220 pakendis väljatransistori. Keerulisem kontrollilahendus ja välised lõppastme transistorid annavad mitmeid eeliseid TB6600 üle. Muuhulgas on antud draiver näiteks võimaline *auto-tune*'i teostama, st määrama mootori parameetreid ja leidma optimaalne seadistuse. TO220 pakendis väljatransistorid on tõenäoliselt ka madalama neelu-lätte takistusega lülitatud olekus ja on võimelised hajutama suurema hulga soojust, kui üksikus HZIP-25 pakendis TB6600. Näiteks võib võtta tüüpilise lülitina kasutatava N-kanaliga MOSFET'i IRFZ44N, mille neelu-lätte takistus on 0,028 oomi, samas kui TB6600 väljundi takistus on 0,4-0,6 oomi. TB6600'ga võrreldes on aga negatiivne see, et DM542 maksab ca 5 korda rohkem, hinnad on vahemikus 27-40 eurot, olenevalt tootjast. DM542 sobiks näiteks hästi siis, kui on teada, et masin hakkab pidevalt rasketes režiimides töötama.

### 3.4 Spindli mootori draiver

Harjadeta alalisvoolumootori juhtimine nõuab mootori mähiste lülitamist täpselt õigetel ajahetkedel, samuti on tarvis mähiseid pingestada mõlemat pidi. Mähiste pingestamiseks mõlemat pidi saab taaskord kasutada poolsild lülitusi, seekord siis kolme poolsilda.

Mähiste lülitamiseks õigetel ajahetkedel on tarvis mootori asendi kohta tagasisidet. Selleks kasutatakse põhiliselt kahte meetodit – esimeses meetodis kasutatakse 3 halli andurit, mis paigutatakse asenditesse, kus peaks muutma mähiste pingestatust. Teises meetodis kasutatakse ära rootori pöörlemisest indutseeritud vastuelektromotoorjõudu, mida mõõdetakse parajasti pingestamata mähistel. [22]

Vastuelektromotoorjõu järgi mootori asendi määramisel on omakorda kaks põhilist meetodit. Esimene meetod on indutseeritava pinge signaalis nullkohtade jälgimine. Nullkohad tekivad hetkedel, kus rootori magnetitel on üleminek põhja pooluselt lõuna poolusele või vastupidi. Kahe faasi nullkohtade ajaline vahe annab kahekordse kommutatsiooni takti antud kiirusel. Antud meetod ei ole aga kõige täpsem, kuna eeldatakse, et mootor pöörleb konstantsel kiirusel. Samuti tekib mootori juhtimisel nelinurksignaaliidega väga palju müra, mis eriti madalatel kiirustel, kus indutseeritud pinge amplituud on väiksem, tekitab suhteliselt suure vea mootori asendi hindamisel.

---

<sup>1</sup> CPLD – Complex programmable logic device – seade, mis sisaldab programmeeritavaid JA ja VÕI elemente ja nn. makroplokke, millega saab teostada nii kombinatsioonilist kui järjestikloogikat

Parem meetod on indutseeritud pingesignaali integreerida. Pingesignaali integreerimisel aja järgi saame sisuliselt magnetvoogu kirjeldava signaali. Kui magnetvoog jõuab teatud tasemeni, tuleb lülitada ümber mähiste pingestatus. Magnetvoogu jälgimine on vastuelektromotoorjõu mõõtmisest seetõttu parem, et olenemata mootori pöörlemissagedusest, tuleb kommuteerida mootorit pidevalt ühel ja samal magnetvoogu tasemel, see tähendab, et signaali amplituud ei sõltu mootori pöörlemissagedusest. Samuti töötab integreerimine kõrgsagedusfiltrina ja signaal on seega vastupidavam mürale. [23]

Valitud spindlimootoril halli andureid sees ei ole, seega on tarvis draiverit, mis suudab mootorit juhtida ilma otsese tagasisideteta. Voolu tarbimine ulatub maksimaalselt kuni 80 amprini, kasutatav pingesaadus võib olla kuni 24 volti.

Tüüpiliselt kasutatakse selliseid mootoreid raadio teel juhitud droonidel, lennukitel, autodel ja neile on loodud ka mootorite draiverid, mis suudavad antud mootoreid juhtida. Antud valdkonna lahendused on kõige odavamad ja kättesaadavamad viisid harjadeta alalisvoolumootori juhtimiseks. Eelmainitud draivereid on olemas sadu erinevaid, kuid sisu on neil kõigil väga sarnane, suhteliselt lihtne.

Raadioteel juhitud seadmete harjadeta mootori draiver koosneb kolmest põhiüksusest: mikrokontroller, võimendi väljatransistoride paisude juhtimiseks ja kolmest poolsildahelast koosnev lõppaste. Tarvis on veel tagasisidet mootori igalt mähiselt. Vajalik tarkvara on avatud lähtekoodiga vabalt saadaval, seega on võimalik draiver ka suhteliselt lihtsalt ise koostada. Küll aga on väga raske vastu saada Hiina turu hindadele – 30 amprist voolutugevust lubav draiver maksab vaid 3-4 eurot ja korralik 80 amprine draiver, mis suudab probleemideta juhtida antud töös valitud mootorit maksab vaid 18 eurot. Valitud draiveriks osutus EMAX BLHeli 80A harjadeta alalisvoolumootori kontrolleri (sele 3.6).



Sele 3.6 EMAX BLHeli 80A

### 3.5 Jootepasta dosaatori juhtimine

Jootepasta doseerimine ei ole trükkplaadi tootmise juures tüüpiline etapp, seega standardset lahendust selle teostamiseks ei ole olemas. Küll aga koostatakse tootmisfailidega koos joonised jootepasta peale kandmiseks mõeldud šabloonide valmistamiseks. Antud failidest saab CAM tarkvaraga luua freesimistekonnad, millega šabloon valmistada. Need samad teekonnad sobivad ka jootepasta doseerimiseks, kuid lisada tuleb käsud jootepasta välja pressimiseks.

Jootepasta doseerimiseks on tarvis teada kui kiiresti dosaatori mootor peaks pöörlema ehk kui suure kiirusega jootepastat välja pressida, samuti on tarvis teada hetki, millal pressida. Selleks otsustati kasutada ära spindli kiirust ja spindli sisse-välja lülitamise väljundeid vastavalt sammumise ja suuna signaalidena. Nii on ka veetavaid kaableid vähem.

Sammu ja suuna signaalidega on dosaatori juhtimiseks veel tarvis vaid sobiv samm-mootori draiver. Dosaatori samm-mootor on suhteliselt väike, seega selle juhtimiseks piisab ühe integraalskeemiga lahendusest. Selleks sobib väga hästi näiteks Texas Instrumentsi DRV8825. Järgnevalt tuuakse välja mõned olulisemad andmed DRV8825 integraalskeemi kohta.

Maksimaalne vool: 2.5 amprit faasi kohta

Tööpinge: 8.2 V kuni 45 V

Töötab nii 3.3 V kui 5 V loogikaga

Omab pingeregulaatorit, seega ei vaja loogikale eraldi toidet

Mikrosammumine kuni 1/32 sammuni

Omab kaitset ülekoormuse, temperatuuri ja madala tööpinge vastu.

DRV8825'i põhineva skeemi realiseerimiseks on vaja alla 10 välise komponendi, seega skeemi koostamine ei ole kuigi keeruline. Küll aga on antud integraalskeemi saadaval vaid HTSSOP 28 pakendis, mille jalgade vahe on 0,65 millimeetrit. Sellise täpsusega trükkplaadi loomine on suhteliselt tülikas protsess. Aliexpressist uurides tuleb välja, et Hiina turul on olemas antud mikroskeemiga draiver, kus on kõik vajalikud komponendid paigutatud korralikult neljakihilisele trükkplaadile ja toote hind on vaid 1,1 EUR + 0,4 EUR saatmiskulu. Sellise hinna eest ei ole võimalik üksikut DRV8825 mikroskeemigi osta, seega igal juhul on draiveri ostmine valmiskujul hetkel mõistlikum.

### **3.6 Toiteallika valik**

Käesolevas töös välja töötatav masin vajab toiteallikaks kolme erinevat toitepinget. Samm-mootorid, jootepasta dosaator ja lõpulülid ning ohutusega seotud lülituskeem töötavad 12 V alalispingega, spindlimootor 24 V alalispingega ja kontrolleri toimimiseks võiks olla 5 V alalispingeallikas. Kuna kontrolleri näol on tegemist arendusplaadiga, töötab see ka näiteks 12 V kasutades, kuid sellisel juhul kasutatakse arendusplaadi pingeregulaatorit, mis on suhteliselt väikese võimekusega.

Uued korralikud tööstuslikud toiteallikad jäävad antud töö hinnapiirist välja, 24 V 40 A toiteallikate hinnad hakkavad ligikaudu 300 eurost. Soovituslik on pigem otsida korralik kasutatud toiteallikas. Võimalik on ka toiteallikas ise ehitada, sellisel juhul piirduakse reeglina lineaarses režiimis töötavate skeemidega. See on mõistlik ainult juhul, kui juhtumisi on olemas näiteks sobiv transformaator. Uutest komponentidest vooluvõrgusagedusel töötavat alaldit sedavõrd energiamahukale tarbijale ehitada ei ole mõistlik, tegemist on ebaefektiivse ja suhteliselt kalli lahendusega.

Ühed kõige levinumad ja parima hinna-võimsuse suhtega toiteallikad on arvutite toiteplokid. Need on isegi uena suhteliselt odavad, aga kasutavad põhitoitena 5 V ja 12 V pinget. Tavaarvutite toiteplokkidest paremad on serverite toiteplokid. Serverid kasutavad põhitoitena 12 V, seega on nendel sama hinna eest reeglina oluliselt suurem 12 V pinges allika võimsus. Serveritel on toiteplokkide reeglina ühe serveri kohta 2, et ühe toiteallika rikke korral saaks teine tööd jätkata. Samuti on sisseehitatud palju ohutusega seotud funktsioone ja toiteplokid on väga robustsed ja loodud olema väga töökindlad.

Süsteemide uuendamisel uute serverite vastu jääb tihtipeale selliseid ühesuguseid toiteallikaid üle terve hulk, kuna tihtipeale kasutatakse mitut ühesugust serverit korraga,

igaühel neist 2 toiteplokki. Eestis kasutatud elektroonikaga tegelevas poes võis näha kümneid toiteplokke, mille maksimaalsed voolud 12 V juures jäid kõik 45-55 ampri lähikäiksesse. Toiteplokkidel oli kõikidel üks hind – 10 eurot. See on suhteliselt tüüpiline hind, mille eest neid kätte saab.

Antud töös olev masin töötaks tegelikult ka ilma 24 V toiteallikata, spindel töötab ka näiteks 12 V toitega – lihtsalt spindli pöörlemisagedus ja võimsus oleks sellega piiratud.

Selleks, et saada 24 V toiteallikas, on võimalik kasutada kahte 12 V toiteplokki. Järgnev tegevus on ohtlik, kui töö tegija ei tea täpselt, millega ta tegeleb. Tegemist on elektriohutusnõuete rikkumisega. Selleks, et seda teha ohutult, peab operatsiooni teostaja olema väga täpselt kursis impulsstoiteplokkide ehitusega ja elektriohutusega. Nimelt on võimalik kaks toiteplokki panna jadamisi. Selle eelduseks on, et toiteplokkid peavad olema võimalikult sarnased. Selle pärast ongi serverite toiteplokkid head – nad on loodud töötama koos, tihti ka paralleelselt ühendatuna.

Kahte toiteplokki ei saa tavaliselt otsekohe jadamisi ühendada, kuna toiteplokkide väljund on ühendatud maandusega. Toiteplokkide jadamisi ühendamiseks, tuleb kõikide, peale ühe, jadamisi ühendatavate toiteplokkide väljund lahti siduda maandusest. Kindlasti ei tohiks selleks lahti ühendada maandust ennast. Tuleb ära kaotada maanduse ja väljundi nulli vaheline ühendus, seejärel on võimalik toiteplokkid jadamisi ühendada. Toiteplokkidele jääb alles maandus, metallist korpus on siiani maandatud ja ohutus elektrivõrgust tuleva vahelduvvoolu suhtes peaks olema säilinud.

5 V toite saamiseks kasutatakse LM7805 regulaatorit koos kondensaatoritega toite silumiseks. Sisendina kasutatakse 12 V, seega regulaatoril tekib pingelang 7 V. Maksimaalne tarbitav vool 5 V ahelas jääb antud masinal alla 500 mA, kuid juba 500mA juures tekib regulaatoril Oomi seaduse järgi 3,5 W soojust. TO220 pakendis regulaatori temperatuuritõus on ligikaudu 50 °C/W, seega 3,5 W juures tõuseks regulaatori temperatuur lubamatult kõrgeks, 175 °C üle ümbritseva keskkonna temperatuuri. Seega tuleb regulaator paigutada radiaatorile. See on ka põhjuseks, miks kasutada välist regulaatorit – sama kogus soojust tuleks muidu kuidagi ära juhtida kontrolleri plaadil olevalt väikeselt regulaatorilt.

### 3.7 Lülitid ja kaablite valik

Masina põhijuhtimine toimub küll arvuti kaudu, kuid paar olulisemat käsku on võimalik anda ka nuppude kaudu, nendeks on tsükli peatamine, liikumise peatamine ja tsükli alustamine/jätkamine.

Tsükli peatamise nupuga jäetakse masin seisma, peatatakse spindel ja ka programmi järge ei jäeta meelde. Liikumise peatamise nupp annab võimaluse masina liikumine ajutiselt peatada, et teostada näiteks väike muudatus programmis. Seejärel on võimalik tsükli jätkata kolmanda nupuga.

Ohutuse nimel on masinal igal teljel lõpulülitid mõlemas tööpiirkonna lõpus, lisaks on masina küljes suur punane fikseeruv surunupp. Nii surunupule vajutamine kui lõpulüliti aktiveerumine lülitab välja mootorite toite. Surunupp on normaalselt suletud kontaktiga ja lülitab normaalselt avatud kahe kontaktipaariga releed, mis on ühendatud 12 V ja 24 V toite ahelasse. Eelnimetatud relee mähisega jadamisi on normaalselt suletud kontaktiga relee, mille mähise ühele otsale on 12 V otse peale ühendatud ja teist otsa lülitavad maha lõpulülitid.

Lõpulülitid on pandud töötama just sedasi, sest lõpulülititena on kasutusel induktiivandurid, millel on sisse ehitatud NPN tüüpi transistor. Teatavasti saab NPN transistoriga voolu juhtida läbi tarbija (antud juhul relee mähis) vooluallika nullile. Selleks, et juhtida vool läbi transistori tarbijani, peaks kasutama PNP tüüpi seadet. Lõpulülititena võib kasutada ka muid lahendusi, kasvõi mehaanilist lülitit. Antud töös on kasutatud LJ12A3-4-Z/BX induktiivandureid.

Valitud samm-mootorite nimivool on 3 A mähise kohta. Kaabli ristlõike valimise tabelitest ei pruugi nii väikesele voolutarbimisele vastavat kaablit leidagi. Piisab näiteks 0,75 mm<sup>2</sup> ristlõikepindalaga vaskkaablist, sellisel juhul jääb pingelang üle kaabli umbes 0,15 V meetri kohta. Ka samm-mootori kontrolleri voolutarbimine on suhteliselt väike ja ka kontrolleri toiteks sobib sama kaabel. Samuti sobivad taolised kaablid jootepasta dosaatori samm-mootorile. Suurema ristlõikepindalaga kaablit võib alati kasutada, kuid see võib olla ebapraktiline, kuna hind on kallim ja paigaldamine ebamugavam.

Valitud spindlimootori tarbitav vool võib ulatada piisava toiteallika võimsuse korral lühiajaliselt kuni 80 ampri, kuid voolutarve trükkplaatide freesimisel jääb pigem efektiivväärtuselt alla 10 ampri, st tarbitav võimsus jääb alla paarisaja vati. Nii nagu



mootor kannatab lühiajaliselt suuremat voolu, kannatavad ka kaablid. Sellegi poolest tasub valida pigem suuremale voolule sobiv kaabel. Kaablile ristlõikepindala 2,5 mm<sup>2</sup> annavad kaabli koormustabelid lubatavaks vooluks 25 amprit. Analüüsimise pingelangu üle 2,5 mm<sup>2</sup> ristlõikepindalaga kaabli, et näha, kui suur võimsuskadu tekib ühe meetri kaabli kohta tüüpilises kasutamises.

Pingelang  $U$  on leitav Oomi seadusest

$$U = I * R \quad (3.1)$$

$I$  on juhti läbiv vool,  $R$  on juhi takistus

2,5 mm<sup>2</sup> vaskkaabli takistus ühe meetri kohta  $R = 6,5 * 10^{-3} \Omega$

Tüüpilise kasutamise juures on maksimaalne tarbimine ca  $I = 10$  A, sellisel juhul on pingelang

$$U = 10 * 6,5 * 10^{-3} = 0,065 \text{ V}$$

See on juhett läbivast 24 V pingest vaid

$$\frac{0,065}{24} = 0,0027, \text{ ehk } 0,27 \%$$

Tegemist on tähtsusetult väikese võimsuskaoga ja võib öelda, et 2,5 mm<sup>2</sup> ristlõikepindalaga kaabel on tavaliseks kasutamiseks piisav.

Signaalikaabliteks on soovituslik kasutada spetsiaalseid varjestusega kaableid, kuna mootorite nelinurksignaali juhtimisel tekib väga palju elektrilist müra, mis signaale mõjutama hakkavad. Tasub märkida, et varjestus maandatakse ühest otsast. Ühendamata varjestus töötab antennina ja kahest otsast ühendatud varjestus võib tekitada probleeme, kus erineva potentsiaaliga maandatud otste vahel hakkab liikuma vool, mis tekitab omakorda uue müraallika.

Liikuvate osade kaablid peaksid kindlasti olema paindkaablid, mis on loodud pidevas liikumises kasutamiseks. Töökindluse ja eluea parandamiseks tasub kaablid paigaldada kaabliketti või muusse vahendis, mis kaabli painutusraadiused kontrolli all hoiaks.

## 4 KASUTATAVAD TARKVARALAHENDUSED

Antud peatükis tuuakse välja vabavaralised tarkvaravõimalused trükkplaadi tootmiseks antud masinal, sealhulgas trükkplaadi disainimine, töötlusteekondade loomine ja ka tarkvara, mis on vajalik masina kontrollerile. Tarkvaralisi võimalusi on loodud sedavõrd palju, et neid kõiki analüüsida ei ole võimalik. Järgnevates alapeatükkides räägitakse lähemalt ühest tarkvarapaketest trükkplaatide disainimiseks, ühest tootmiseks, tarkvarast, mida kasutab mikrokontroller ja viimaks kasutajaliidestest, mida on tarvis kontrolleriga mugavaks juhtimiseks.

### 4.1 Kontrolleri tarkvara

Kontrolleri tarkvara on üks olulisemaid asju arvprogrammjuhtimis pingi juures. Vastavalt olemasolevatele tarkvaradele sai teostatud tegelikult ka kontrolleri enda valik ja omakorda ka mootori draiverite filtreerimine juhtimisalgoritmi alusel.

Valitud tarkvaraks on Grbl. Grbl on tasuta, avatud lähtekoodiga, võimekas tarkvara masinate liigutamiseks Arduino abil. Tegemist on sisuliselt nn isetegijate liikumise standard tarkvaraga. Enamik avatud tarkvaraga 3D pirntereid, laserlõikureid, CNC puurpinke, joonistusmasinaid ja loomulikult ka freespinke töötavad Grbl'i baasil. Hetkel on Grbl küll 3-teljelistele masinatele, kuid kuna tegemist on avatud tarkvaraga, on paljud juba loonud erinevaid võimalusi kasutada ka neljandat telge.

Grbl on kirjutatud C-keeles ja on väga optimiseeritud töötama Microchip'i Atmega328p mikrokontrolleritel, kasutades ära kõik mikrokontrolleri nutikad võimalused, et saavutada täpsed ajastused ja asünkroonne töö. Grbl'iga on võimalik hoida rohkem kui 30 kHz sammumise kiirust ilma segamata puhast, sujuvat signaalitöötlust. Grbl'it on kasutatud ka teiste endise Atmel'i mikrokontrollerite peal ja Atmega2560 toetus on saanud ametliku projekti Grbl-Mega.

Grbl'i võimaluste hulka kuulub ka hästi toimiv kiirenduste manageerimissüsteem, kus tarkvara vaatab kuni 18 g-koodi rida ette, et tagada optimaalne ja sujuv liikumine. Grbl'i G-koodi funktsioonide hulk on hoitud pigem lihtsana, et kontrolleri stabiilsus ja kiirus hoida võimalikult hea. Keerulisemad operatsioonid, arvutused, eelprogrammeeritud tsükliid – need on jäetud G-koodi saatmise tarkvara hooleks. Nagunii on arvuti, mis G-koodi saadab, oluliselt suurema arvutusvõimekusega.

Grbl'i tarkvara on võimalik alla laadida Grbl'i GitHub'i lehelt, arendusplaadile peale laadida ja kontroller on juba valmis G-koodi töötlemata mootorite signaalideks. Täpsemad juhised Grbl'i konfigureerimiseks ja kasutamiseks on samuti saadaval nende GitHub'i lehel. [24]

## 4.2 CAD

KiCad on juba 1992. aastal välja lastud tasuta, vaba lähtekoodiga elektroonika disainimise tarkvarapakett. KiCadis on võimalik luua elektroonikaskeem ja seejärel teisendada skeem trükkplaadiks. Praegu arendab programmi pidevalt edasi grupp vabatahtlike ja ka palgalisi arendajaid. Kicad arengusse on panustanud muuhulgas näiteks CERN, The Raspberry Pi Foundation, Arduino LLC, Digi-Key Electronics ja muud.

KiCad jaguneb viieks põhiprogrammiks: KiCad – projektihaldur, Eeschema – skeemi loomise keskkond, PcbNew – trükkplaadi loomise keskkond, GerbView – Gerber failide vaatur ja Bitmap2Component – tööriist, mille abil saab pildist luua trükkplaadi komponendi. Järgnevalt räägitakse lähemalt skeemide loomise ja trükkplaatide disainimise keskkondadest.

Eeschema on skeemide loomise tööriist, kus on olemas praktiliselt kõik võimalused, mida skeemi loomiseks vaja võiks minna. KiCadis on kaasas väga suur komponentide kogu, kus on sümbolid, pakendid ja ka vastavad 3d mudelid. Kuna tegemist on avatud tarkvaraga, on komponentide kogu ka pidevas uuenemises.

Ka skeemide keerukus ei ole piiratud, suured disainid on võimalik jagada hierarhiliselt alamlehtedele. Eeschemas on võimalik teostada elektrireeglite täitmise kontrolli, genereerida materjalide/komponentide nimekiri ja eksportida ahelaloend mitmetes erinevates formaatides.

PcbNew on modernne trükkplaatide kujundamise tarkvara. Enamik trükkplaatide kujundamise programme on suhteliselt sarnased, seega järgnevalt tuuakse välja kaks antud tarkvara natuke erilisemat funktsiooni.

Radade paigutamise tööriist on interaktiivne. Paigutades radasid, liigutab tööriist eelnevalt paigutatud radasid eest ära, kiirendades tööd. Kui radasid ei ole enam võimalik

eest ära liigutada, juhatakse rada ümber takistuste sihtkohani. Antud tööriist jälgib pidevalt, et kasutaja määratud disainireegleid ei rikuta. See annab ka hea võimaluse proovida erinevaid teekondasid rada paigutades, et näha, kas ja kus kohast on võimalik rada läbi vedada.

Kõrgetel sagedustel töötavate seadmete jaoks on loodud võimalus lihtsalt luua radasid diferentsiaalpaarina. Programm tunneb ahelate nimede järgi ära, millised ahelad peaksid olema diferentsiaalpaarid ja kasutades vastavat tööriista, on võimalik korruga tõmmata paralleelsed rajad. Loomulikult on võimalik rajad ka üksahaaval üle töötada. Ühtlasi on võimalik radade pikkuste võrdsustamiseks kasutada tööriista, millega saab radasid pikendada ja pidevalt jälgida muudetava raja pikkust.

KiCad'il on ka väga hea tugi ja suur kasutajaskond. KiCad'i kodulehel on olemas informatsioon alustajatele, erinevad õpetused, videod ja kõiksugu muid materjale. Samuti on KiCad'il foorum, kus kasutajad saavad üksteiselt küsimusi küsida ja üksteist aidata. [25]

### **4.3 CAM**

CAD tarkvara lõpptulemusena saadakse trükkplaadi töötlusfailid, KiCad'i, nagu ka paljude teiste elektroonika disaini tarkvarade puhul – Gerbel failid. Nüüd, et Gerbel failidest saada masina töörajad, tuleb kasutada CAM tarkvara.

FlatCam on samuti avatud lähtekoodiga, tasuta tarkvara, mis on kirjutatud Python'is ja töötab enamike platvormide peal. Tegemist on spetsiifiliselt trükkplaatide freesimiseks mõeldud tarkvaraga. FlatCam avab nii Gerberi ja Excelloni faile kui ka G-koodi ja loob võimaluse tekitada kasutaja masinale vastav G-kood.

FlatCami põhifunktsioonide hulka kuulub avatud failide kuvamine vaatlusaknas. Tarkvaras visualiseeritakse Gerberi failid, puurimisfailid ja ka G-koodis sisalduvad teekonnad. [26]

Tarkvaras on võimalik määrata erinevate operatsioonide käigus kasutatavad tööriistad ja lõikerežiimid. Lõiketrajektoride genereeritakse vastavalt valitud parameetritele trükkplaadi radade ümber, kui vaja, saab suuremad vahet tekitada mitme läbimisega, või

lausa vajalikud alad tühjaks freesida. Plaadi välja lõikamisel on võimalik määrata näiteks äramurtavate osade hulk ja pikkused. Kahepoolsete plaatide valmistamiseks on spetsiaalsed abivahendid, millega tekitada trükkplaadi kihtidest peegelpilte ja luua ümber pööramisele täpseks paigalduseks juhtavasid. Pärast lõiketeecondade genereerimist ongi võimalik nad salvestada G-koodi failidena.

#### **4.4 G-koodi saatja**

Viimase etapina on tarvis tarkvara, mis toimiks kasutajaliidesena arvuti ja kontrolleri vahel. Tarkvara peab olema võimeline saatma andmeid üle universaal-jadasiini Grbl'iga varustatud kontrolleri. Grbl'i GitHub'i lehel on ka pikk selgitus, milline kasutajaliides peab olema, kuidas kasutajaliidest ise luua, millised laused on võimalik Grbl'ile saata, ja mida oodata vastuseks. Selgitatud on tüüpilised probleemid ja nende lahendused.

Kui aga kasutajaliidest ise luua ei soovita, on võimalik kasutada valmislahendusi. Üks mitmetest lahendustest on ChiliPeppr. Tegemist on brauseripõhise kasutajaliidesega, kus on mitu erinevat tööruumi erinevate kontrolleritega liidestamiseks.

ChiliPeppr'i Grbl'i tööruumis on võimalik luua ühendus oma kontrolleri ja jälgida masina olekut, tööriista asukohta, sisendite-väljundite väärtusi ja loomulikult jadapordi kaudu liikuvaid andmeid. Seal on võimalik avada oma G-koodi failid, visualiseerida töörajad, simuleerida tööriista liikumist, liigutada masina telgesid käsitsi ja muidugi edastada ka G-kood masinale. ChiliPeppris on palju funktsioone töö hõlbustamiseks ja ka masina töö jälgimiseks. Töö käigus näidatakse tööriista asukohta tööradadel, arvutatakse lõikeradada pikkused ja järelejäänud töö aeg.

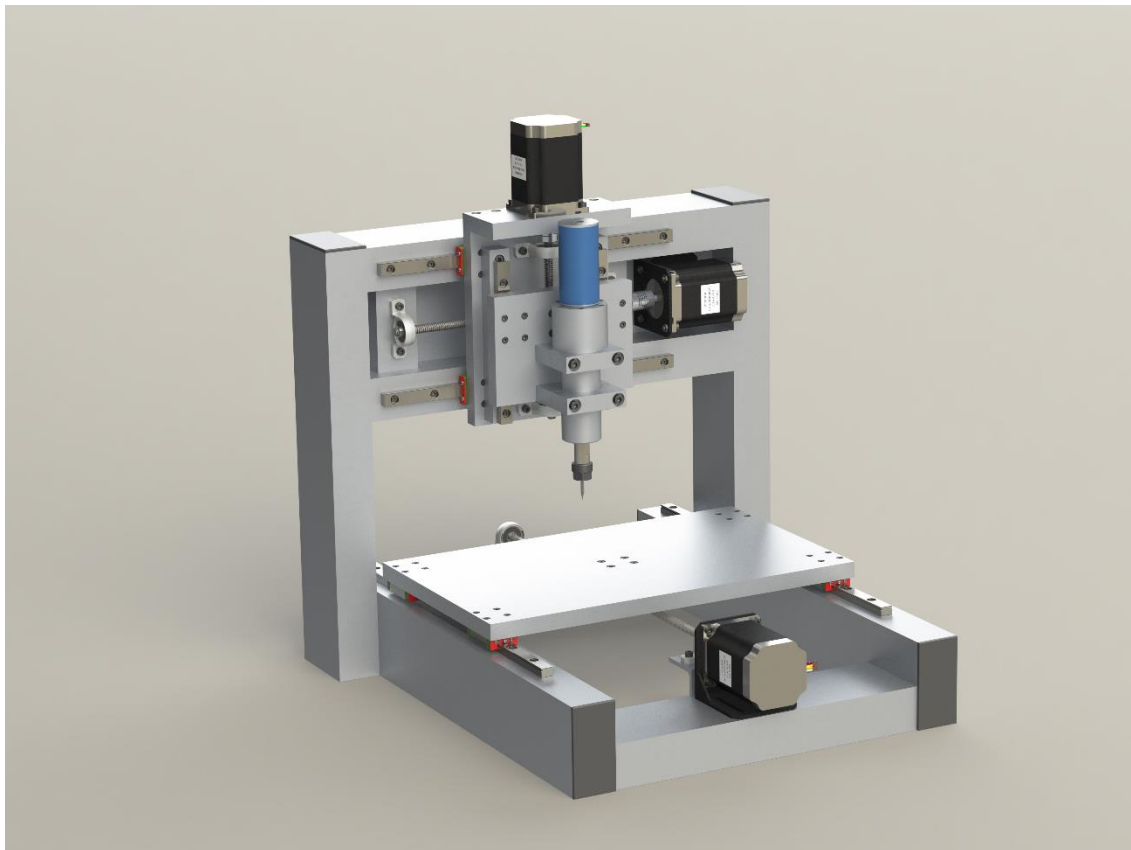
Muuhulgas kuulub ChiliPeppri funktsioonide hulka kuulub ka tasapinna mõõdistamine, kus tööriista külge ühendatud prooviku ja kontrolleri nulliga ühendatud trükkplaadi kontaktpunktide koordinaadid salvestatakse kogu plaadi ulatuses, et saada kätte plaadi profiil. Seejärel on võimalik leitud andmed kanda G-koodi, et reaalne lõikesügavus vastaks soovitud. See on eriti oluline kasutades koonilist tööriista, sest lõikesügavusest sõltub ka lõikava osa diameeter.

Tarkvara toimimiseks on vaja alla laadida ja tööle rakendada ka jadapordi JSON'i server, vajalik programm ja kasutusjuhend on kätte saadavad ChiliPeppri kodulehelt. [28]

## 5 VALMINUD LAHENDUS JA SELLE ANALÜÜS

### 5.1 Masina projekteerimine CAD-keskkonnas

Masina mehaaniline pool projekteeriti Dassault Systemes SolidWorks tarkvaraga. Valminud projekti suuremad arvutigraafilised joonised on nähtavad töö graafilises osas, väiksemas formaadis on valminud lahendus näha seel 5.1.

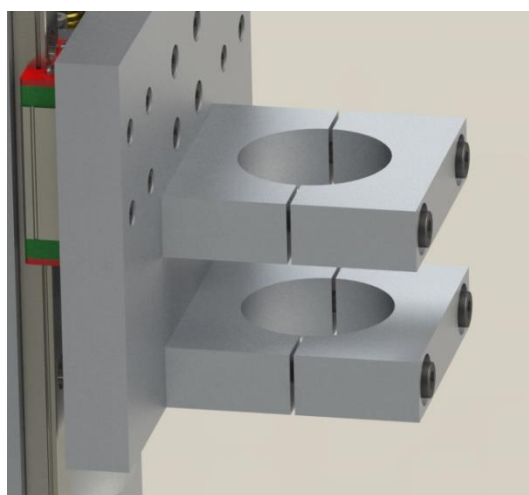


Sele 5.1 Masina arvutigraafiline kujutis

Masina raami ja erinevate detailide projekteerimisel lähtuti suuresti kahest põhimõttest – võimalikult vähe erinevaid toormaterjale ja võimalikult vähe spetsiaalset töötlust. Näiteks on kasutatud raami ehitusel ainult ühte sorti alumiiniumprofiili. Selle sama profiili diagonaalis läbi lõigates, saadakse kasutatud L-profiilid, mida kasutatakse X-telje trapetskruvi laagripukkide kinnitamiseks. Profiili pooleks lõikamisel risti profiili lühema küljega, saadakse kaks U-profiili, mida kasutatakse Y-telje trapetskruvi laagripukkide kinnitamiseks. Masina töötalusel, Y- ja Z-telje alused, Z-telje samm-mootori kinnitus ja

tööriistahoidja on kõik 15 mm paksusest alumiiniumplaadist. Seda tehti selleks, et masin oleks võimalikult praktiline ja ökonoomne.

Masina mõlemad spindlilahendused ja jootepasta dosaator projekteeriti nii, et neid on võimalik kasutada ühes ja samas tööriistahoidjas. Tööriistahoidja (selel 5.2) koosneb kahest ruudukujulisest 15 mm paksusest plaadist, millele on lõigatud tööriistade korpuse diameetri suurune ava (36 mm) ja seejärel on plaadid lõigatud keskelt pooleks, nii, et kahe pooliku plaadi vahele jääb teatav vahe, näiteks 1 mm. Kahe poole koostamisel poltidega on võimalik tööriist kinnitada nii, et võimalikult suur osa tööriista korpusest on tööriistahoidjaga kontaktis, vältides muljumist. Kiiremaks tööriistavahetuseks on võimalik kasutada ka eksentriku põhimõttel toimivaid kiirkinnituspolte (tüüpilised näiteks jalgrataste sadulaklambritel), kuid töö autor ei pidanud selle projekteerimist oluliseks.



Sele 5.2 Tööriistahoidja

Nii X- kui Y-telje lineaarlaagrite kinnituspunktide valimine telgede alustele sai tehtud arvestades teljel tekkivat vaba liikumisruumi ja tekkivaid jõudude süsteeme. Häid reegleid tekkiva koormusskeemi korral lineaarlaagrite paigutamiseks ei ole. Mida suuremad distantsid on laagrite vahel, seda jäigem on süsteem väändemomentide suhtes. Kuna trükkplaadi freesimisel on löikejõud antud süsteemi jaoks olematult väikesed, siis põhiline otsus lineaarlaagrite vahelise distantsi määramiseks tehti tööala põhjal. Ülejäänud mõõtmed valiti juba nii, et komponendid kõik kokku sobiksid.

## 5.2 Majanduslik analüüs

Järgnevalt kantakse kõikide komponentide ja materjalide maksumused tabelisse 5.1. Tabelisse lisatakse võimalusel ka ostukoht, kuid kuna AliExpress'i poodide lingid muutuvad suhteliselt tihti, ei ole otseseid veebiaadresse juurde lisatud. Lihtsam on tooteid leida kasutades otsingut toote mudeli järgi.

Tabel 5.1 Komponentide ja materjalide maksumus

Toode	Kogus	Rea hind (EUR)	Ostukoht
23HS8430 samm-mootor	3	72,76	AliExpress
MGN15 L=400 mm + MGN15H laagriplakk	2	44,58	AliExpress
MGN15 L=300 mm + MGN15H laagriplakk	2	40,40	AliExpress
MGN15 L=150 mm + MGN15H laagriplakk	2	28,20	AliExpress
MGN15H Laagriplakk	4	29,27	AliExpress
6.35 -> 8 mm painduv sidur võllile	3	5,02	AliExpress
Nema23 mootorikinnitus	2	5,5	AliExpress
Trapetskrugi mutri plakk	3	6,59	AliExpress
Laagriplakk KP08	6	8,32	AliExpress
TB6600 samm-mootori draiver	3	20,16	AliExpress
LJ12A3-4-Z/BX induktiivandur	6	13,03	AliExpress
Arduino Nano V3 (koopia)	1	2,10	AliExpress



GoolRC 3674 harjadeta alalisvoolumootor	1	24,09	AliExpress
EMAX BLHeli 80A BLDC draiver	1	17,79	AliExpress
Trapetskrugi T8 300mm + mutter	1	6,67	AliExpress
Trapetskrugi T8 400mm + mutter	1	8,91	AliExpress
Trapetskrugi T8 200mm + mutter	1	3,05	AliExpress
Signaalkaabel 3x0,14 mm <sup>2</sup>	10 m	2,90	Serigo Elektroonika OÜ
Peenkiudjuhe 2,5 mm <sup>2</sup>	25 m	8,25	AS Harju elekter
Tööstuslik alumiiniumi liim	50 mL	22	
Nelikanttoru 80x40x4 AW6060-T6	3.6 m	27	
Al. Leht 15mm AW5083	0,16 m <sup>2</sup>	25	
Al. Ümartoru 38 mm x 4 mm	0,1 m	0,50	
Al. Ümartoorik diameeter 50mm	0,12 m	2,50	
Radiaalkuullaager SKF 608	1	2,40	Alas-kuul AS
Radiaaltugilaager 708A	2	30	Aliexpress
C8 ER11A 100L spindli völli	1	8,97	Aliexpress
Kinnitusvahendid (poldid,seibid,mutterid)	~200	15	OÜ Baltic Bolt
17HS4401 (dosaatori samm-mootor)	1	7,54	Aliexpress

Masina komponentide ja materjalide hind on seega:

Lihtsa spindlilahendusega 450 eurot

Keerukama spindlilahendusega 488 eurot

Mõlemal juhul on hoitud kinni esialgsest hinnapiirist. Arvestada tuleb, et tegemist on vaid põhikomponentide hinnaga, töö hinda antud seadme korral on raske hinnata, kuna sõltub palju töö teostajast ja meetoditest.

Võrreldes professionaalsete lahendustega, on töös loodud masina puudusteks, näiteks esteetilise välimuse andev korpuse puudumine ja võib-olla ka osade komponentide kvaliteet ja eluiga on madalamad, kuid need probleemid on lahendatavad ja kõik detailid on hooldatavad, ja kui millegi eluiga osutub lühikseks, on võimalik komponent vahetada välja mõne alternatiivi vastu.

Masina tasuvuse üle arutleti ka esimeses peatükis, kuid siinkohal tuleb veel kord välja tuua, et masin on kiiresti tasuv juhul, kui masina koostamine on võimalik suhteliselt odavalt (näiteks keegi teeb masinat iseendale enda vabast ajast) ja trükkplaate tuleb valmistada tihti, st rohkem kui kord-kaks kuus.

### **5.3 Valminud masina tehnilised parameetrid**

Antud alapealtükis tuuakse välja mõned masina teoreetilised tehnilised näitajad, kirjeldatakse nende leidmist ja tuuakse nad kokku tabelis 5.2. Mõned näitajad on leitud ka praktiliste katsete abil.

Masina tööala määrati projekteerimise käigus ja on kontrollitav SolidWorksi mudelil. Tööala on ümardatult 200 mm x 160 mm x 100 mm. Kui masin koostada vaid tööks trükkplaatidega, võib vähendada masina kõrgust ja ühtlasi ka Z-telje ulatust. Antud töös jäeti ruumi ka kõiksuguste muude freesimistöde sooritamiseks.

Maksimaalne liikumiskiirus antakse tavaliselt mõlema horisontaalse telje kiiruste koosmõjuna. Maksimaalse kiiruse leidmiseks sooritati praktiline katse. Koostati X-telje prototüüp ja leiti katseliselt erinevate koormuste korral kiirus, mille ületamisel hakkas mootor samme vahele jätma. Telje liikuvate osade mass on SolidWorksi mudeli alusel 3.3 kg, sarnase koormuse korral hakkas mootor samme vahele jätma kiirusel ca 4400

sammu sekundis e. 1320 pööret minutis. Lubatavaks maksimaalseks kiiruseks võib lugeda seega 1000 pööret minutis, mis 2 mm sammuga trapetskraviga tähendab liikumiskiirust 2000 mm minutis. Nii X-telg kui Y-telg on sarnaselt koormatud, seega on nende maksimaalsed kiirused ka võrdsed. Maksimaalne kiirus on leitav järgnevalt:

$$V_{max} = \sqrt{V_x^2 + V_y^2} \quad (5.1)$$

$V_x$  ja  $V_y$  on vastavalt X-telje ja Y-telje suunaline maksimaalne liikumiskiirus.

$$V_{max} = \sqrt{2000^2 + 2000^2} = 2800 \text{ mm/min}$$

Suuremad kiirused oleksid saavutatavad, kui kasutaks ka samm-mootoritel kõrgema pingega toiteallikat, näiteks 24 V nagu on kasutusel spindlimootoril. Antud töös ei peetud seda esialgu oluliseks, kuna saavutatav kiirus on niigi piisav.

Mehaaniline resolutsioon on suhe kruvi samm ja mootori ühe täispöörde sammude arvu suhe. Seega näitab see sisuliselt mootori ühe sammuga kaasneva liikumise ulatust. Kruvi samm on 2 mm, mootori sammude arv täispöördele on 200, mehaaniline resolutsioon on seega 0,01 mm.

Maksimaalne teoreetiline resolutsioon näitab väikseimat liikumisvahemikku kasutades mikrosammumist. Töös kasutatavate draiverite kõige väiksem mikrosammumine on 1/32 sammudega. See tähendab, et maksimaalne teoreetiline resolutsioon on 32 korda väiksem mehaanilisest resolutsioonist ja on seega ca 0,3  $\mu\text{m}$ .

Spindli maksimaalne pöörlemissagedus määrati katseliselt, kasutades lihtsamat spindlilahendust ja optilist tahhomeetrit. Tegemist ei ole küll kõige täpsema meetodiga, kuid kuna tulemus oli võrreldav arvutusliku maksimaalse pöörlemissagedusega, siis peeti seda reaalseks. Maksimaalne pöörlemissagedus arvutati 2.4.2 ja tulemuseks saadi ca 50 000 pööret minutis, katse tulemusena saadi maksimaalseks pöörlemissageduseks 45 000 kuni 46 000 pööret, sõltuvalt mootori asendist.

Reaalseid mõõtmisi masina täpsuse määramiseks ei ole võimalik sooritada enne kogu masina komplekteerimist, mis paraku ei ole töö kirjutamise hetkel veel teatud põhjustel võimalik olnud. Küll aga kontrolliti kellindikaatoriga eelmainitud X-telje prototüübi korratavust. Kasutatava kellindikaatori skaalajaotise väärtus oli 0,01 mm ja korratavus jäi ühe skaalajaotise piiresse, st korratavus on alla 0,01 mm isegi prototüübiga.

Teostatud praktilised katsed ei viidud küll läbi järgides korrektseid metrooloogilisi meetodeid, kuid sellegipoolest annavad aimduse lõpliku masina parameetritest. Praeguseni leitud andmed on kantud tabelisse 5.2.

Tabel 5.2 Masina teoreetilised parameetrid

Tööala (X x Y x Z)	200 mm x 160 mm x 100 mm
Maksimaalne liikumiskiirus (ettenihe)	2800 mm/min
Mehaaniline resolutsioon	0,01 mm
Teoreetiline resolutsioon	0,3 µm
Spindli maksimaalne pöörlemissagedus	45 000 1/min
Liikumise korratavus	< 0,01 mm

Masina reaalse parameetrite leidmiseks tuleb masin esiteks koostada, optimiseerida seadistused ja seejärel teostada korrektsed metrooloogilised katsed. Need jäävad tulevikus teostamiseks, hetkel on eeltöö tehtud selleks, et saavutada masin, mis suudab freesida vähemalt standartse 6 tuhandikku tolli ehk umbes 0,15 mm raja laiuse ja kahe raja vahega. Tegemist on tüüpilise täpsusega, mida suudavad saavutada enamik professionaalseid trükkplaatide tootjaid.

## KOKKUVÕTE

Kiirprototüüpimine on kiiresti arenev valdkond, mis võimaldab arvutis loodud mudeli võimalikult lihtsalt ja väikese ajakuluga üle viia reaalseks objektiks. Elektroonika valdkonnas võimaldab see trükkplaate valmistada isegi vähem, kui tunni ajaga, selle asemel, et oodata prototüüpimisega tegelevalt ettevõttelt oma plaati nädal aega või rohkemgi. Kiirprototüüpimine võimaldab oluliselt kiirendada katsetamiste ja vigade paranduse teostamist, sest alati on võimalik kiiresti valmistada uuendatud disainiga trükkplaat.

Olemasolevad kiirprototüüpimismasinaid on tihti liiga kallid, näiteks hobiharrastajatele, haridusasutustele ja isegi väikeettevõtetele. Odavamate lahenduste hinnad algavad umbes 3000 eurost, professionaalsete masinate hinnad algavad 7000-8000 euro ringis. Antud töö eesmärgiks oli kokku koguda vajalik informatsioon ja välja arendada kättesaadavama hinnaga seade, mis oleks võimeline saavutama tänapäevaste trükkplaatide täpsust.

Lõputöö käigus anti ülevaade CNC masinatest, trükkplaatide tootmisest üldiselt ja erinevatest olemasolevatest kiirprototüüpimislahendustest. Masina välja arendamisel toodi välja kõik masina olulisemad komponendid, nende tööülesanded ja valimise põhimõtetest. Erinevate seadme osade valimisel analüüsiti erinevaid alternatiive ja tehti argumenteeritud valikud.

Masina projekteerimisel võeti arvesse, kui suur roll on tarkvaral, ja kui suur töö on ära tehtud, kasutades valmis, avatud lähtekoodiga, tasuta tarkvara. Sellest lähtuvalt tehti ka mikrokontrolleri valik, milleks osutus Microchip'i Atmega 328p. Masina telgi liigutavad Nema 23 suuruses samm-mootorid, lineaarjuhikutena on kasutusel Hiwin MGN seeria koopiad ja spindli kõrge pöörlemissagedus ja suur võimsus tuleb harjadeta alalisvoolumootorilt.

Kiirprototüüpimismasin õnnestus projekteerida komponentide ja materjalide hinnaga alla 500 euro. Siiani teostatud mõõtmised, katsed ja teoreetilised arvutused annavad põhjust pidada valmivat masinat parameetritelt võrreldavaks professionaalsete prototüüpimisseadmetega. Võrreldes paljude teiste masinatega, on lisaväärtusena veel masinal jootepasta doseerimise võimalus. Soovi korral on võimalik tulevikus juurde projekteerida ka automatiseeritud komponentide paigutamise funktsioon, saavutades ühel masinal „ahjuvalmis“ trükkplaadi.

Masina praktilisus ja tasuvus sõltuvad väga palju kasutajast. Kui inimesel on soov valmistada vaid üks trükkplaat kuus, võib osutada antud masin suhteliselt ebapraktiliseks ja targem oleks teenus sisse osta. Tegemist on siiski kiireks prototüüpimiseks loodud masinaga, kus võib vahel olla tarvis mitu erinevat trükkplaadidisaini välja freesida ühe päeva jooksul. Samuti on masin väga praktiline näiteks haridusasutuses, kus masin võib ennast ära tasuda praktiliselt ühe aine projektiga, kus õpilastel tuleb luua oma trükkplaat. Masina puudumisel tuleks prototüüpimisteenus sisse osta kümnetele erinevatele disainidele ja vigade parandus oleks väga aeganõudev ja taaskord kulukas.

Praeguse seisuga on masina tööosad kõik projekteeritud SolidWorksis ja kõik masina komponendid on testitud ja vastavad ootustele. Tulevikus oleks tarvis veel teostada korrektsed mõõtmised, mis annaksid parema võimaluse masina võimete analüüsimiseks. Veel on võimalik projekteerida esinduslik korpus, lisada juurde ohutus- ja mugavuslisasid, näiteks tolmukatted juhikutele ja võib-olla ekraan, mis kuvaks masina koordinaate, sisendite olekuid ja veateateid. Samuti selgub masina töö käigus kindlasti palju erinevaid asju, mida võiks ehk teha teisiti. Õnneks on masinat alati võimalik edasi arendada ja ka avatud lähtekoodiga tarkvara võib igaüks ringi teha oma soovidele vastavaks.

## SUMMARY

Rapid prototyping is a quickly developing group of technologies, used to fabricate an object from a computer model with very little time and effort. In the field of electronics this provides a way to produce a printed circuit board (PCB) prototype in less than an hour, instead of having to wait for a week or more to have it delivered from a prototyping company. Rapid prototyping makes the testing and error-management of the PCB design a rapid process, as it is always possible to machine out the board with a renewed design.

Readily available rapid prototyping machines are often not affordable to an electronics hobbyist, an educational institution or even a small company. The entry level, hobbyist solutions start from around 3000 euros and professional machines start from about 7000-8000 euros. The aim of this thesis was to collect the information necessary and to develop a machine of more affordable cost, while maintaining the ability to machine with the accuracy necessary for modern PCB's.

The thesis covers the basics of CNC machines, PCB production and readily available rapid prototyping solutions. The operation of practically all of the machines components were explained and the principles on how to choose the right components were also brought out. While choosing the components for the machine, different alternatives were considered and analysed.

In the process of developing the machine, the important role of software and the amount of work already done by using free open-source software was taken into note. Actually the choice of controller was based on available software Grbl, which required a Microchip Atmega 328p to be used. The machines axes are moved by Nema 23 size stepper motors with Hiwin MGN series replica linear rails. The high spindle speed and power are provided by a brushless dc motor.

The rapid prototyping machine was developed so, that the price of the components and materials were kept under 500 euros. The tests, measurements and calculations so far give reason to believe, that the completed machine would be comparable to professional prototyping solutions. As a bonus, the developed machine has a solder paste dispensing function, which a lot of the other solutions lack. Also there is a possibility to develop an automated pick-and-place system for the machine, to produce a PCB that's ready for the oven with one machine.

The practicality and profitability of the machine are very dependant on the end user. If the user will only produce a board or two in a month, the machine might be impractical and it would be wiser to have the PCBs produced in a prototyping company. The machine is intended for quick prototyping, where it might be necessary to produce several different PCB designs in a single day. The machine would also be quite profitable in an educational environment, where the machine might turn out to be profitable even in a single course project, where the student would have to produce a PCB. Without a PCB production machine, tens of different PCBs would have to be ordered from a PCB manufacturer which would probably cost a fortune and correcting mistakes would be a time consuming and costly procedure.

At this moment the machine has been modelled in SolidWorks and all of the machines components have been tested and they all meet the expectations. In the future, the performance and accuracy of the assembled machine should be measured with precise methods and proper instruments to better analyse the machines abilities and compare them to professional machines. It would also be possible to model in a aesthetic housing for the machine, which would also provide more safety. Maybe add in dust protection for the linear rails and a screen to show the machine coordinates and the input states and other various data. With time and use of the machine a lot more information will be unveiled and there might be things that should have been done differently. But everything on the machine is servicable and upgradeable, even all of the software is open-source, so anyone can make changes to the software to make it their own.



## KASUTATUD KIRJANDUS

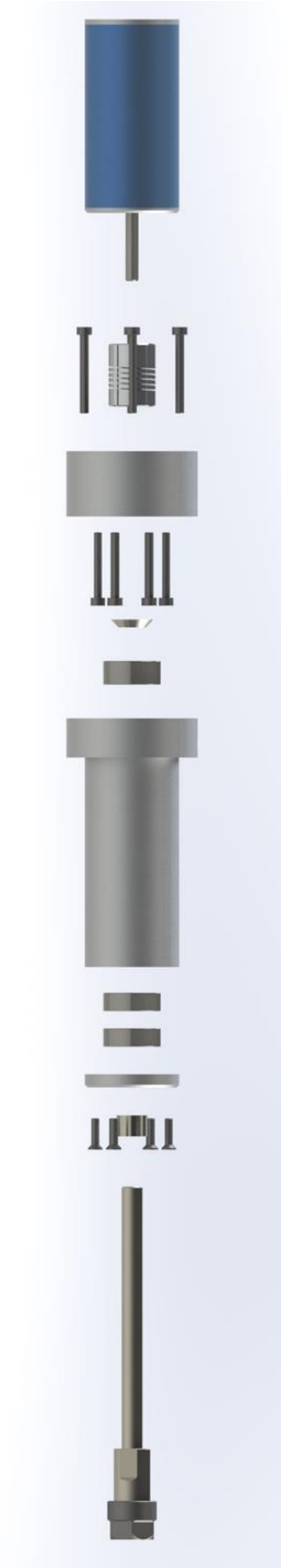
1. Tartu Ülikooli Viljandi kultuuriakadeemia kodulehekül, Mis on kiirprototüüpimine? [WWW] <http://www.kultuur.ut.ee/et/node/2187896> (24.04.2017)
2. Vikipeedia, Arvprogrammjuhtimine [WWW] <https://et.wikipedia.org/wiki/Arvprogrammjuhtimine> (9.05.2017)
3. Vikipeedia, Trükkplaat [WWW] <https://et.wikipedia.org/wiki/Tr%C3%BCkkplaat> (14.03.2017)
4. LPKF, Protomat E34/E44 [WWW] <http://www.lpkf.com/products/rapid-pcb-prototyping/circuit-board-plotter/protomat-e44.htm> (19.04.2017)
5. AccurateCNC, A421 andmeleht [WWW] <http://www.accuratecnc.com/Specs/A421.pdf> (5.03.2017)
6. Cirqoid koduleht [WWW] <https://cirqoid.com/> (5.03.2017)
7. Othermill, Othermill Pro [WWW] <https://othermachine.co/othermill-pro/> (6.03.2017)
8. Kamitra OÜ, Trükkplaadid harrastuselektroonikule [WWW] <http://www.kamitra.ee/harrastuselektroonikule/> (12.03.2017)
9. Brandner PCB, Harrastuselektroonikule [WWW] <https://www.brandner.ee/est/33/61> (12.03.2017)
10. PCBWay koduleht, prototüüpimise tingimused ja hinnad [WWW] <https://www.pcbway.com/> (13.03.2017)
11. Voltera, Voltera V-One andmed [WWW] <https://voltera.io/#specs> (5.03.2017)
12. Voltera, Korduma kippuvad küsimused [WWW] <https://support.voltera.io/hc/en-us/sections/115001732948-F-A-Q-> (5.03.2017)
13. MatWeb, Plywood [WWW] <http://www.matweb.com/search/datasheet.aspx?matguid=bd6620450973496ea2578c283e9fb807> (15.03.2017)

14. SteelSS, S235 [WWW] <http://www.steelss.com/Carbon-steel/s235.html>  
(15.03.2017)
15. Aluminco, Aluminium Alloy EN-AW 6060 [WWW]  
[http://www.aluminco.com/media/155961/ALUMINIUM-ALLOY-EN-AW-6060\\_MATERIAL-DATA-SHEET\\_ALUMINCO.pdf](http://www.aluminco.com/media/155961/ALUMINIUM-ALLOY-EN-AW-6060_MATERIAL-DATA-SHEET_ALUMINCO.pdf) (15.03.2017)
16. Slocum, A., Fundamentals of design, Power transmission elements II [WWW]  
<http://web.mit.edu/2.75/fundamentals/FUNdaMENTALs%20Book%20pdf/FUNdaMENTALs%20Topic%206.PDF> (21.03.2017)
17. SDP/SI, Ball & Acme lead screw technical information [WWW] <https://www.sdp-si.com/D810/PDFS/Ball%20And%20Acme%20Lead%20Screw%20Technical%20Info.pdf>  
(21.03.2017)
18. HelixLinear, How to evaluate Acme screw assembly loads [WWW]  
<http://blog.helixlinear.com/bid/257621/How-to-Evaluate-Acme-Screw-Assembly-Loads>  
(05.05.2017)
19. Machine Design, Round or square? [WWW]  
<http://www.machinedesign.com/archive/round-or-square> (21.03.2017)
20. William Popoli , High Speed Spindle Design and Construction [WWW]  
<http://www.mmsonline.com/articles/high-speed-spindle-design-and-construction>  
(17.04.2017)
21. ST Microelectronics, Stepper-Motor performance; constant-current chopper drive ups [WWW]  
[http://www.st.com/content/ccc/resource/technical/document/application\\_note/94/58/6b/a2/35/20/41/ff/CD00003754.pdf/files/CD00003754.pdf/jcr:content/translations/en.CD00003754.pdf](http://www.st.com/content/ccc/resource/technical/document/application_note/94/58/6b/a2/35/20/41/ff/CD00003754.pdf/files/CD00003754.pdf/jcr:content/translations/en.CD00003754.pdf) (1.04.2017)
22. Texas Instruments, Sensorless trapezoidal control of BLDC motors [WWW]  
<http://www.ti.com/lit/an/sprabq7a/sprabq7a.pdf> (23.04.2017)

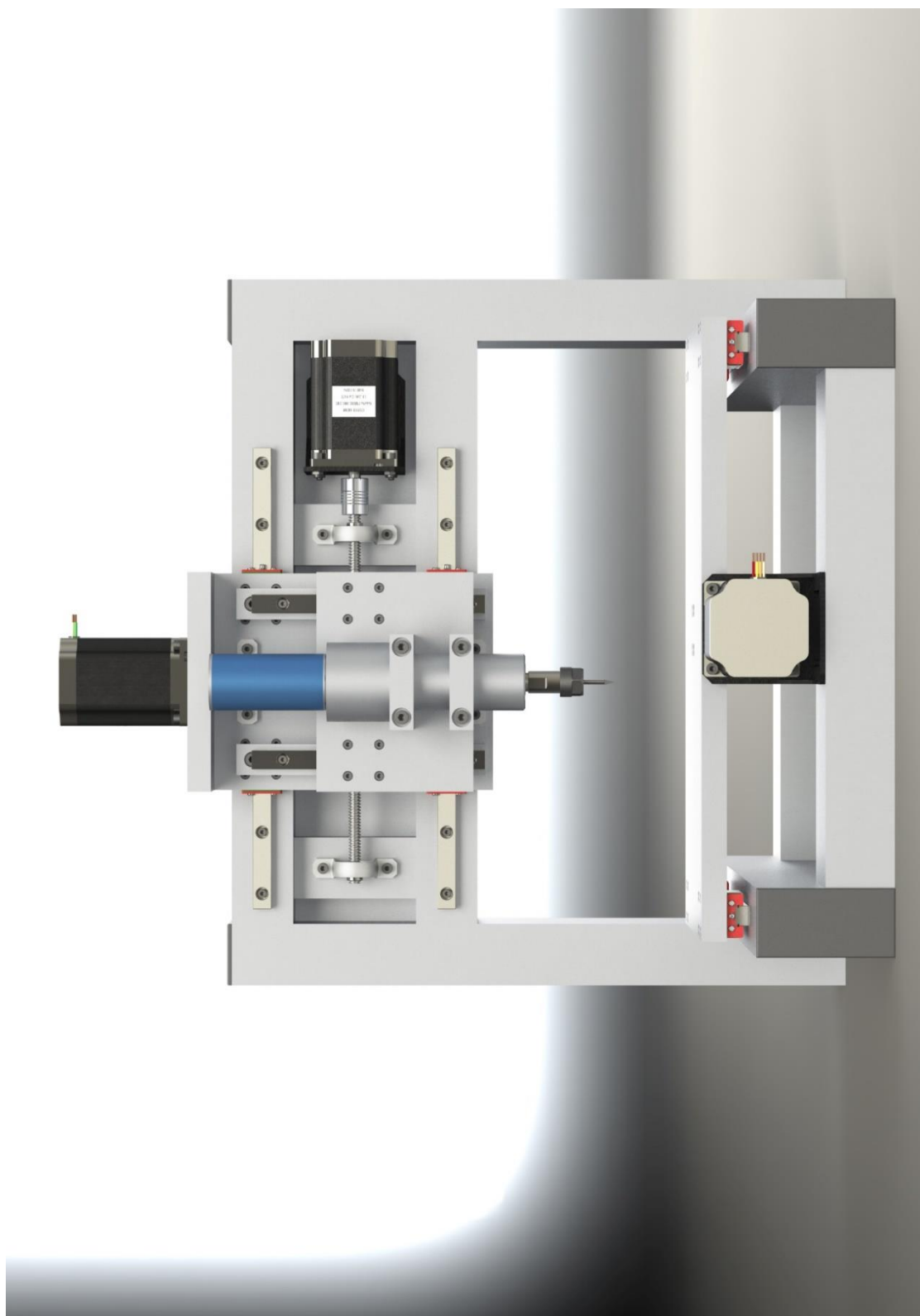
23. Texas Instruments, Instaspın overview [WWW]  
<http://www.ti.com/ww/en/mcu/instaspın/index.shtml?DCMP=ep-mcu-c2x-instaspın&HQS=ep-mcu-c2x-instaspın-bti-lp-overview-en> (23.04.2017)
24. GitHub, Grbl [WWW] <https://github.com/grbl/grbl> (01.05.2017)
25. KiCad koduleht [WWW] <http://kicad-pcb.org/> (1.05.2017)
26. FlatCam koduleht [WWW] <http://flatcam.org/> (1.05.2017)
27. ChiliPepr koduleht [WWW] <http://chilipepr.com/> (1.05.2017)

# LISAD

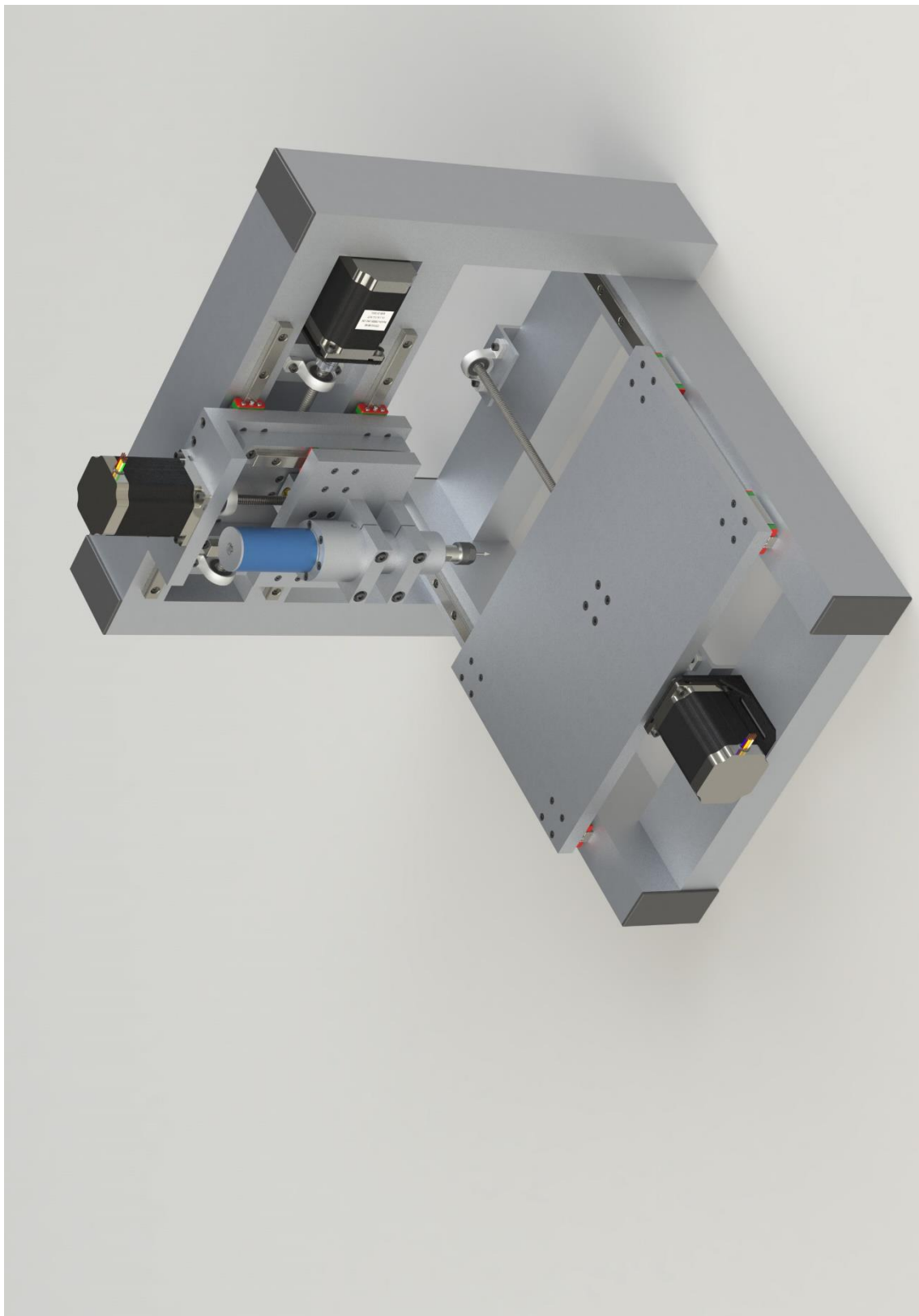
**Lisa 1. Spindli 3D-mudeli detailvaade**



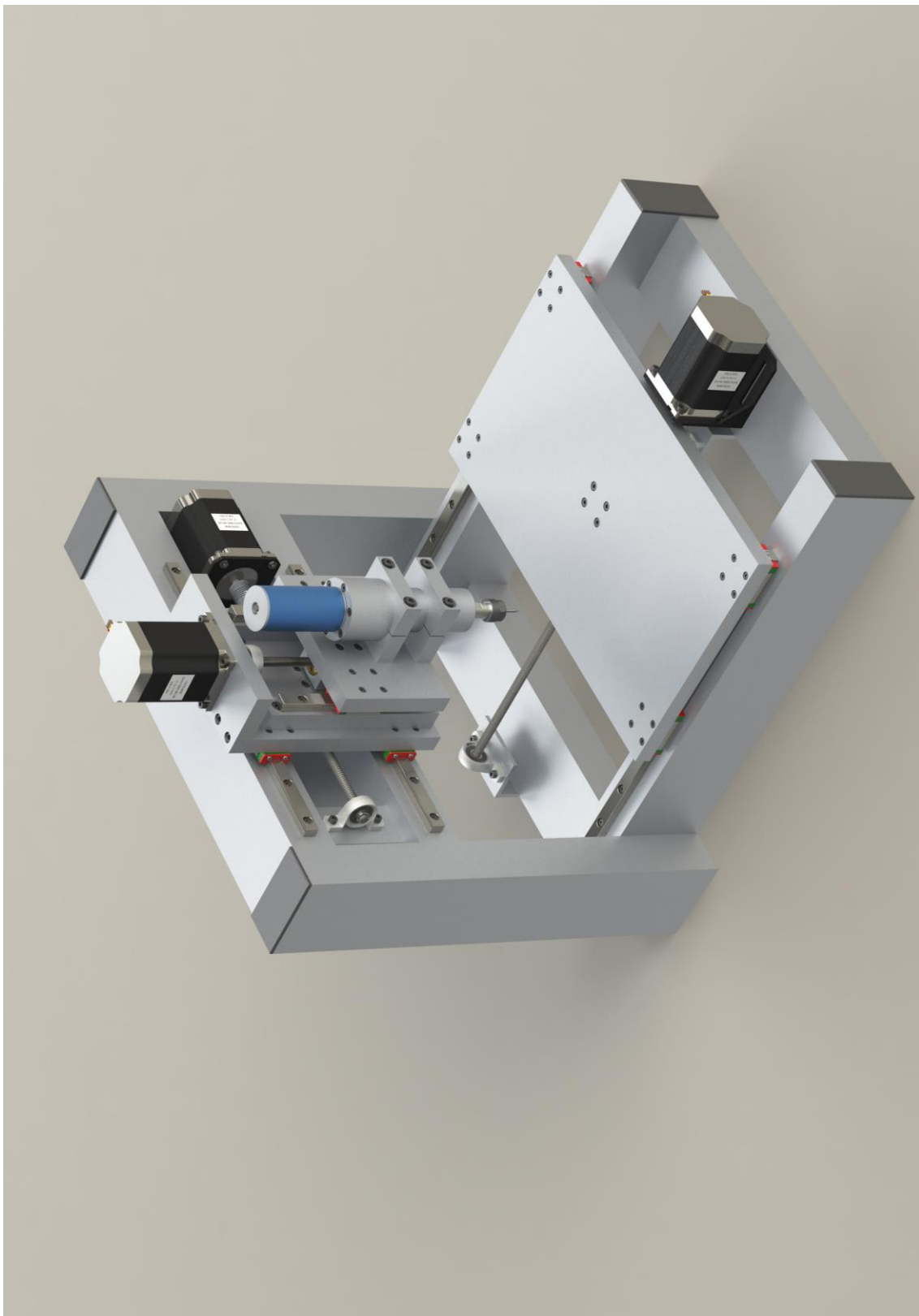
## Lisa 2. Masina 3D-mudeli eestvaade



### Lisa 3. Masina 3D-mudeli isomeetriline vaade



## Lisa 4. Masina 3D-mudeli isomeetiline vaade 2



## Lisa 5. Masina 3D-mudeli külgvaade

