

# Sähkömoottorin valinta ja mitoitus CNC- koneen suunnittelussa

LAB-ammattikorkeakoulu  
Insinööri (AMK), Konetekniikan koulutus  
2024  
Otto Liikanen

## Tiivistelmä

Tekijä Otto Liikanen	Julkaisun laji Opinnäytetyö, AMK	Valmistumisaika 2024
	Sivumäärä 34	
Työn nimi <b>Sähkömoottorin valinta ja mitoitus CNC-koneen suunnittelussa</b>		
Tutkinto ja koulutusala Insinööri (AMK), Konetekniikan koulutus		
Toimeksiantajaorganisaatio Mecatrolan Oy		
Tiivistelmä <p>Tämän opinnäytetyön tavoitteena oli tutkia ja vertailla askelmoottoreiden ja servomootoreiden valintaa ja mitoitusta CNC-koneen suunnittelussa. Tutkimuksessa keskityttiin erityisesti siihen, miten moottoreiden tekniset ominaisuudet vaikuttavat CNC-koneen suorituskykyyn, tarkkuuteen ja luotettavuuteen. Työ aloitettiin määrittelemällä tutkimuksen tausta ja tavoitteet, jonka jälkeen valittiin sopivat menetelmät moottoreiden ominaisuuksien analysoimiseksi ja vertailemiseksi. Analyysissä hyödynnettiin laajaa kirjallisuuskatsausta sekä teknisiä tietoja moottorivalmistajilta.</p> <p>Tutkimuksen tulokset osoittavat, että oikein valitut ja mitoitetut moottorit ovat avainasemassa CNC-koneen tehokkuuden ja toimintavarmuuden kannalta. Askelmoottorit soveltuvat parhaiten sovelluksiin, joissa vaaditaan korkeaa tarkkuutta ja toistettavuutta matalilla nopeuksilla, kun taas servomoottorit tarjoavat parempaa suorituskykyä korkeanopeuksisissa sovelluksissa sekä suuremmassa vääntömomentissa. Tutkimus tuo esille myös mikroaskelmoottorin käytön merkityksen askeltarkkuuden parantamisessa ja moottorin värinän vähentämisessä.</p> <p>Opinnäytetyö päättyi johtopäätöksiin, joissa korostetaan valittujen moottorityyppien soveltuvuutta erilaisiin CNC-koneen sovelluksiin sekä suositellaan jatkotutkimuksia uusien teknologioiden ja ohjausjärjestelmien parissa työskentelyn osalta. Työssä kehitettyjä tuloksia voidaan hyödyntää CNC-koneiden suunnittelussa ja optimoinnissa, tarjoten arvokkaita tietoja suunnittelijoille ja insinööreille koneenrakennusallalla.</p>		
Asiasanat askelmoottori, sähkömoottori, cnc-tekniikka, arduino, mikroaskellus, sähkömoottorin mitoitus, servomoottori		

## Abstract

Author Otto Liikanen	Type of Publication Thesis, UAS	Published 2024
	Number of Pages 34	
Title of Publication Selection and sizing of electric motor in CNC machine design		
Degree, Field of Study Engineer (UAS), Mechanical Engineering		
Organisation of the client Mecatroplan Oy		
Abstract <p>This thesis explores the selection and sizing of stepper and servo motors in CNC machine design, focusing on their impact on machine performance, accuracy, and reliability. After outlining the research background and objectives, a methodology involving a comprehensive literature review and analysis of technical data from manufacturers was applied.</p> <p>Results demonstrate that the choice and sizing of motors are vital for CNC machine efficiency and reliability. Stepper motors excel in applications demanding high precision at low speeds, whereas servo motors are superior for high-speed applications and higher torque needs. Microsteppings role in enhancing step accuracy and reducing vibration was also emphasized.</p> <p>Concluding, the thesis underscores the appropriateness of each motor type for different CNC applications and suggests future research into new technologies and control systems for advancing CNC machine design. This work offers insights for mechanical engineering design and optimization, laying groundwork for further innovation towards more efficient CNC machines.</p>		
Keywords CNC machine design, stepper motors, servo motors, motor selection, microstepping, arduino		

1	Johdanto.....	1
2	CNC-tekniikka.....	2
2.1	CNC-tekniikan perusteita.....	2
2.2	Askelmoottorit.....	2
2.2.1	Askelmoottorien käämintä .....	4
2.2.2	Askelmoottorin parametrit.....	4
2.2.3	Askelmoottoripiirit .....	8
2.3	Askelmoottoriohjain .....	9
2.4	Servomoottorit.....	10
3	Moottorien vertailu .....	12
4	Lineaariliikkeen toteutus .....	13
5	Työstöradan suunnittelu.....	15
6	Komponenttien mitoitus ja valinta .....	17
6.1	Askelmoottorit.....	17
6.1.1	Y-akselin askelmoottorin mitoitus .....	18
6.1.2	X-akselin vaatimukset.....	19
6.2	Askelmoottoriohjaimet .....	20
6.3	Ohjausyksikkö .....	21
6.4	Erillinen askelmoottoriohjainkortti .....	21
6.4.1	Arduino.....	21
6.4.2	TinyG v8.....	22
6.4.3	Vertailu .....	22
6.5	Virtalähde.....	23
7	Yhteenveto ja pohdinta .....	26
	Lähteet .....	27

## 1 Johdanto

Tämän opinnäytetyön tarkoituksena on kehittää yksityiskohtainen opas askelmoottorien mitoittamiseen Mecatroplan Oy:n tarpeisiin. Opinnäytetyö toteutetaan yhteistyössä Mecatroplan Oy:n kanssa. Tämä insinööritoimisto, joka keskittyy laite- ja mekaniikkasuunnitteluun, perustettiin vuonna 2006. Yrityksen päätoimipaikka sijaitsee Lahdessa, ja sillä on lisäksi toimistoja Joutsassa ja Mikkelissä. (Mecatroplan 2023.)

Teoriaosuudessa tutustutaan aiheen kirjallisuuteen, jonka avulla valitaan kaksi erityyppistä askelmoottoria toteutettavaan yritysprojektiin. Työssä keskitytään askelmoottorien ja niiden ohjaimien mitoittamiseen CNC-koneen suunnittelussa. Työn toteutusprosessiin kuuluu tiedon kerääminen alan komponenttivalmistajien ja asiantuntijoiden ohjeista sekä datalehdistä.

Tutkimuksen painopiste on sähkömoottorien ominaisuuksien ymmärtämisessä, tarvittavien mitoituskaavojen selvittämisessä sekä yleisimpien ongelmatilanteiden syiden ja ennaltaehkäisykeinojen tutkimisessa jo suunnitteluvaiheessa. Vaikka moottorien mitoitus ja valinta on osa laajempaa suunnittelukokonaisuutta, tämä opinnäytetyö keskittyy niihin erityisesti, koska koko suunnittelukokonaisuuden käsittely olisi liian laaja aihealue tässä yhteydessä.

## 2 CNC-tekniikka

### 2.1 CNC-tekniikan perusteita

CNC-tekniikka (Computer Numerical Control) on nykyaikaisen valmistuksen ja koneistuksen ytimessä, mahdollistaen koneiden automaattisen ohjauksen digitaalisten ohjeiden avulla. Nämä ohjeet määrittävät mekaanisia suureita, kuten paikkaa, kulmaa, nopeutta ja mekaanisen energian virtausta, mahdollistaen koneen leikkaustyökalujen ja työkappaleiden tarkan ja hallitun liikkumisen. Sopivan sähkömoottorin valinta on keskeinen osa CNC-koneen suunnittelua, koska moottorityyppi vaikuttaa CNC-koneen suorituskykyyn ja ominaisuuksiin. (CNC Rapid 2022.)

Lisäksi CNC-koneen erityisvaatimukset, kuten sen tarkoitetut sovellukset, koko ja monimutkaisuus, vaikuttavat merkittävästi moottorin valintaan. On tärkeää ottaa huomioon koneen käyttövaatimukset, mukaan lukien tarvittava vääntömomentti, nopeus ja paikkatarkkuus, moottoria valittaessa. Suunnittelu- ja valintaprosessi voi olla monimutkainen ja saattaa sisältää matemaattista mallinnusta varmistaakseen, että valittu moottori täyttää CNC-koneen suorituskykyvaatimukset. (Iqbal ym. 2022, 20–29.)

### 2.2 Askelmoottorit

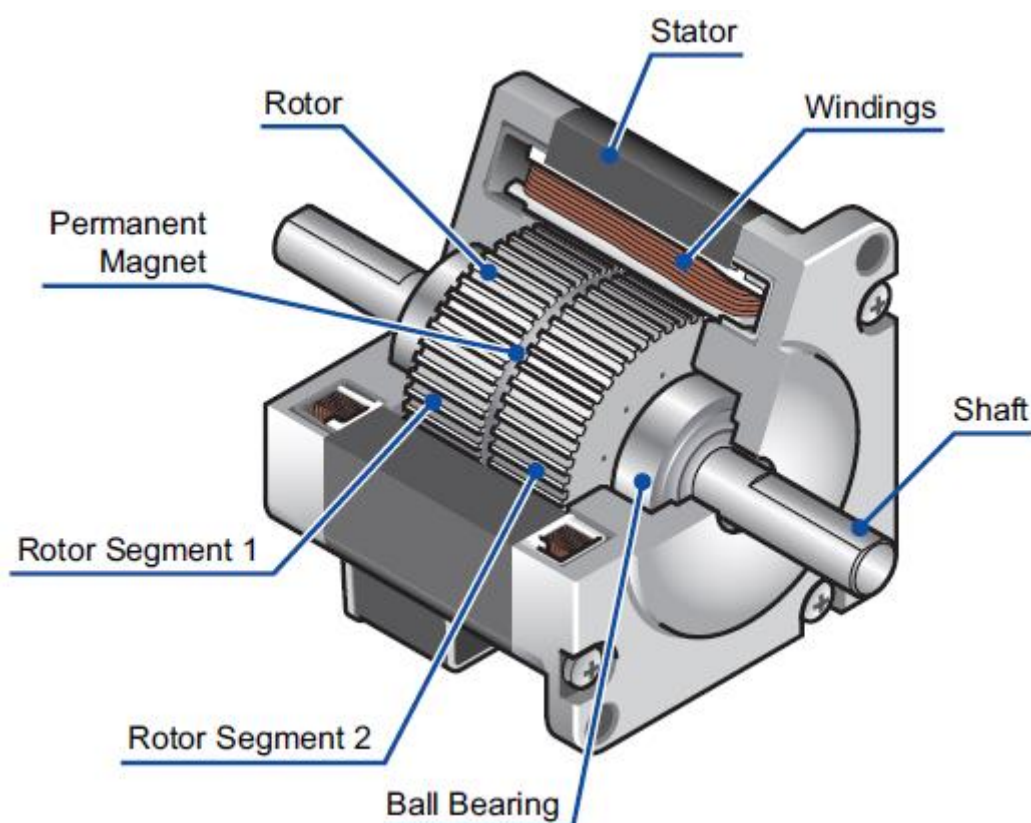
Askelmoottori (Kuva 1) on tasavirtamoottori, joka voidaan ohjata liikkumaan askelittain (Transfer Multisort Elektronik 2020). Tämä askelittainen liike saadaan aikaan muuttamalla moottorin staattorin käämeihin tulevan virran suuntaa. Askelmoottorin tarkkuus tekee siitä erityisen sopivan mittatarkkuutta vaativissa sovelluksissa. Sen ohjaamiseen tarvitaan erillinen ohjauspiiri. (Jones 2008.)

Askelmoottorin useat ominaisuudet tekevät siitä erinomaisen valinnan CNC-koneeseen. Tavanomaisista moottoreista poiketen, askelmoottorissa ei ole harjoja, jotka ovat tyypillisesti alttiita vioille ja voivat aiheuttaa valokaaria. Valokaaret eivät ole toivottuja ja voivat olla vaarallisia tietyissä olosuhteissa. (Jones 2008.)

Askelmoottorit toimivat kuormasta riippumatta eli ne kykenevät pyörimään samalla nopeudella kuorman koosta huolimatta, mikäli kuorman kyky vastustaa liikkeen muutosta on pienempi kuin käämien aikaansaama magneettinen voima. Lisäksi askelmoottorit eivät välttämättä tarvitse palautetta akselin asennosta, sillä niiden liikkeet ovat aina samansuuruisia askeleita. Tämä mahdollistaa akselin asennon jatkuvan seurannan, kunhan moottorin vääntö pysyy asetetun maksimiarvon alapuolella. Akseli voidaan pitää paikallaan pidä-

tysmomentin avulla, ja moottorin reagoitukyky käynnistykselle, pysäytykselle ja suunnanmuutoksille on hyvä. Pidätysmomentilla tarkoitetaan (Jones 2008.)

Toisaalta askelmoottoreilla on myös heikkouksia, jotka tekevät niistä sopimattomia joissakin sovelluksissa. Moottorit kuluttavat saman määrän virtaa riippumatta kuormasta, ja niiden tarkkuus on alhaisempi verrattuna servomoottoreihin. Ne eivät luo suljettua piiriä, jolloin ne eivät pysty välittämään tietoa roottorin asennosta tai ohitetuista askeleista. Askelmoottorien suorituskyky on myös heikko suhteessa inertiaan, joten ne eivät kykene kiihdyttämään kuormaa nopeasti. Lisäksi moottorien aiheuttama kova ääni ja värinä voivat olla haitaksi. Askelmoottorien eri ominaisuuksien arviointi vahvuuksiksi tai heikkouksiksi on riippuvaista sovelluksen erityistarpeista ja -vaatimuksista. (Gastreich 2018; Mundrathi 2021.)



Kuva 1. Askelmoottorin osat (Tang 2021)

Staattori (*Stator*) on kokonaisuudessaan moottorin kiinteä osa, joka ei pyöri. Käämien (*Windings*) tehtävä on luoda magneettikenttiä, jotka ohjaavat moottorin toimintaa. Virran kulkusuunnalla pystytään vaihtamaan magneettisuuden polariteettia. Roottori (*Rotor*) on

moottorin sisällä pyörivä osa, jossa on yleensä hampaita. Pysyvä magneetti (*Permanent Magnet*) sijaitsee roottorissa ja sen magneettikentän polaarisuus ei muutu. Kuulalaakeri (*Ball Bearing*) vähentää kitkaa ja helpottaa pyörimisliikettä. (Nidec 2024a.)

### 2.2.1 Askelmoottorien käämintä

Unipolaarisissa askelmoottoreissa on neljä käämiä, joista jokaisen keskellä on yhteinen liitin. Käämit voidaan kytkeä joko suoraan virtalähteeseen tai virtalähteen ja yhteisen liittimen välisen diodin kautta. Tällä tavalla käämit voidaan käynnistää yksitellen, mikä tekee liikkeestä hitaamman ja vähemmän tarkemman kuin bipolaarisissa askelmoottoreissa. (Jones 2008.) Unipolaarinen askelmoottori tuottaa pienemmän vääntömomentin kuin bipolaarinen askelmoottori (Transfer Multisort Elektronik 2020).

Bipolaarisissa askelmoottoreissa on myös neljä käämiä, mutta niissä jokaisessa on kaksi liitintä. Tämä tarkoittaa, että käämiä voidaan kytkeä eri tavalla kuin unipolaarisissa askelmoottoreissa. Tämä mahdollistaa tarkan ohjauksen ja suuremman vääntömomentin, joten bipolaariset askelmoottorit ovat yleisesti käytössä CNC-koneissa ja muissa sovelluksissa, joissa tarvitaan tarkkaa liikkeenohjausta. Yhteenvetona voidaan todeta, että bipolaariset askelmoottorit ovat yleisesti parempia tarkkuudessa ja vääntömomentissa kuin unipolaariset askelmoottorit. (Jones 2008.) Askelmoottorin suurin mahdollinen vääntömomentti saavutetaan, kun moottori on paikallaan yhden käämin ollessa virroitettu. Tämä momentti voidaan esittää askelmoottorin datataulukossa pitomomenttina. (LinuxCNC 2023).

### 2.2.2 Askelmoottorin parametrit

**Askelkulma** ilmoitetaan askelia kierrosta kohden (*steps per revolution*) tai astetta askelta kohden (*degrees per step*). Esimerkiksi 200 askelta kierrosta kohden tarkoittaa samaa kuin  $1.8^\circ$  askelta kohden. (Transfer Multisort Elektronik 2020.)

Ilman kuormaa askelmoottorin askelkulman tarkkuus on noin  $\pm 0,05^\circ$ . Pieni virhe johtuu staattorin ja roottorin mekaanisen tarkkuuden erosta sekä staattorikäämin tasavirtavastuksen pienestä vaihtelusta. Yleensä askelmoottorin kulmatarkkuus ilmaistaan pysäytysasennon tarkkuutena. (Orientalmotor 2023b.)

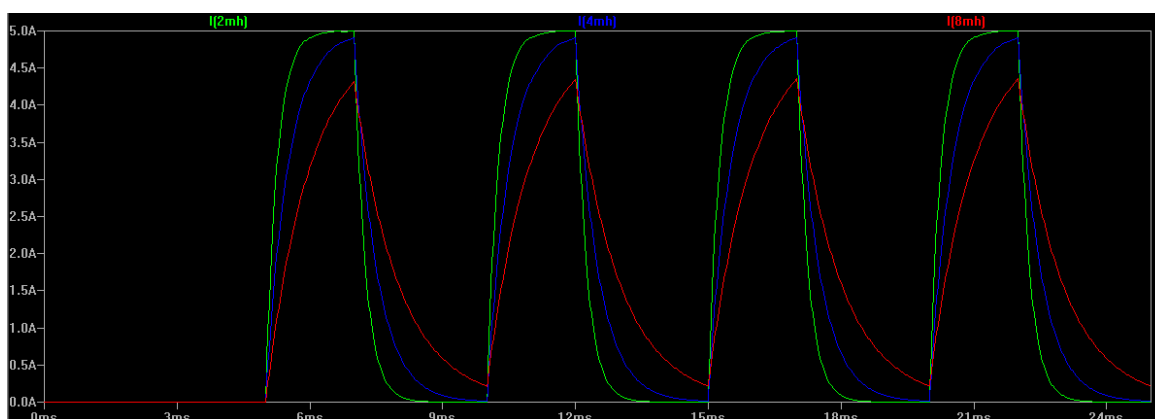
**Askelnopeus** on keskeinen tekijä, joka määrittää moottorin toimintakyvyn. Askelnopeus, joka ilmaistaan pulssina sekunnissa (PPS) tai askeleina sekunnissa, viittaa siihen, kuinka nopeasti moottori ottaa askeleita. Askelnopeus vaikuttaa suoraan moottorin pyörimisnopeuteen: korkeampi askelnopeus tarkoittaa nopeampaa pyörimistä. Askelnopeuden kasvattaminen pienentää moottorin momenttia. Tämä johtuu moottorin sähköisten ja mekaanisten ominaisuuksien yhdistelmästä, mukaan lukien induktanssi ja vastustava elektro-



magneettinen kenttä. Resonanssi, joka esiintyy tietyillä askelnopeuksilla, voi myös aiheuttaa askelten menettämistä ja moottorin värähtelyä. Tämän vuoksi on tärkeää optimoida askelmoottorin askelnopeus sovelluksen vaatimusten mukaan tasapainottaen nopeuden, momentin, tarkkuuden ja värähtelyn tarpeet. (Nidec 2024b.)

**Induktanssi** vaikuttaa askelmoottorin kykyyn toimia nopeasti (Kuva 2). Askelmoottorissa käämin läpi kulkeva virta synnyttää magneettikentän, mutta se vaatii aikaa tullakseen voimaan. Tämä johtuu käämin induktanssista, jolla on luontainen taipumus vastustaa nopeasti muuttuvan virran kulkua. Induktanssi ilmaistaan Henries-yksiköissä, jonka tunnus on H. Suurempi käämin induktanssi johtaa hitaampaan virranmuutosnopeuteen ja sen seurauksena hitaampaan magneettikentän laajenemis- ja supistumisnopeuteen. (Linuxcnc 2023.)

Käämien virroituksen nopeus kasvaa akselin pyörimisen aikaansaamiseksi, jokaisen käämin käytettävissä oleva aika täyden magneettisen vetovoimansa käyttämiseen vähenee, mikä vähentää kokonaisvääntömomenttia. Tämä nopeuden ja vääntömomentin suhde on suurelta osin kääntäen verrannollinen. (Linuxcnc 2023.) Moottori alkaa menettämään askeleita, jos sitä askelletaan ennen kuin se ehtii riittävästi kyllästyä kehittääkseen tarvittavan vääntömomentin. Korkeampi jännitteinen virtalähde auttaa, koska kelan kautta kulkeva virta kasvaa suhteellisesti jännitteen kanssa. (Atwell 2017.)

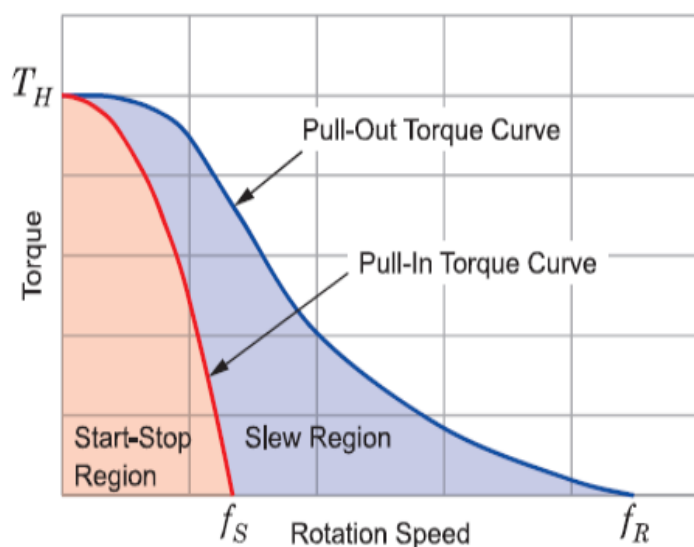


Kuva 2. Induktanssin vaikutus moottorin nopeuteen (Linuxcnc 2023)

### Nopeuden suhde vääntömomenttiin

Pitomomentti ( $T_H$ ) kertoo kuinka paljon vääntöä moottori luo ollessaan paikallaan, kun nimellisvirta kulkee käämin lävitse (Kuvio 1). Tunnus  $f_s$  on moottorin maksimi käynnistysnopeus ilman kuormaa, kun taas tunnus  $f_R$  kuvaa moottorin maksimi pyörimisnopeus

ilman kuormaa. *Start-Stop Region* viittaa pulssinopeusalueeseen, jolla moottori pystyy käynnistymään tai pysähtymään suoraan ilman, että sen tarvitsee käydä läpi kiihdytys- tai hidastusvaihetta. Tällä alueella moottori voi aloittaa ja pysähtyä suoraan. *Slew Region* viittaa nopeusalueeseen, jolla moottori pystyy toimimaan jatkuvasti, mutta ei enää pysty suoraan käynnistymään tai pysähtymään. Tällä alueella moottorin on ensin hidastettava tai kiihdytettävä *Start-Stop Region* -alueelle ennen kuin se voi vaihtaa suuntaa tai pysähtyä. (Orientalmotor 2023a.)



Kuvio 1. Nopeus-vääntömomentti (Orientalmotor 2023a)

**Nimellisvirta** on maksimivirta, jonka moottorin käämit kestävät ylikuumenematta. Huippuarvot eivät päde askelmoottoreissa ja moottorin käämien läpi kulkevan virran ei tulisi koskaan ylittää nimellisvirtaa, koska se johtaa moottorin ylikuumenemiseen ja mahdollisesti hajoamiseen. (Earl 2022.)

**Nimellisjännite** ei ole maksimiarvo. Jos askelmoottoria ohjataan H-silloilla tai hyvin yksinkertaisilla ajureilla, moottorin jännitettä on rajoitettava, jotta se ei ylitä nimellisvirtaa, joka on maksimiarvo. Jos käytetään chopper-ajuria, nimellisjännitteen ylittäminen ei ole ongelma. Korkeampi jännite saa moottorin saavuttamaan magneettisen kyllästymisen nopeammin. Moottori on vahvimmillaan, kun se on täysin kyllästynyt. (MachineDesign 2017.)

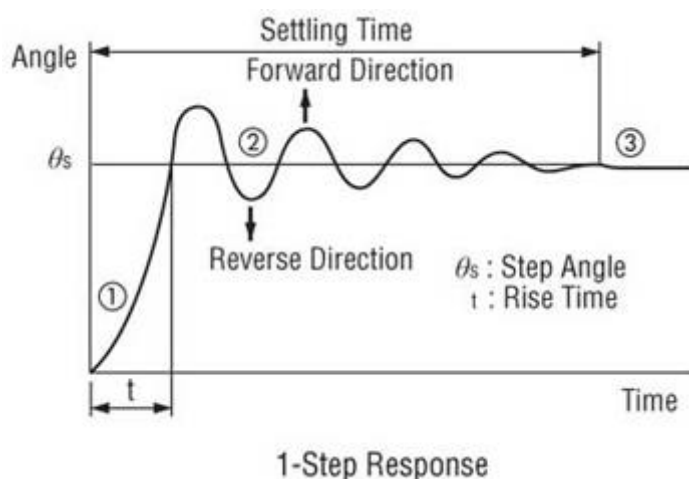
**Roottorin inertia**lla kuvataan kappaleen massan etäisyyttä pyörimisakselista. Kun puhutaan moottorin inertiaasta, puhutaan nimenomaan roottorin massan ja muodon aiheuttamasta inertiaasta. Tämä tarkoittaa sitä, kuinka paljon roottori vastustaa muutosta pyörimis-

nopeudessa. Suurella inertiaalla varustettu roottori vaatii enemmän voimaa tai aikaa nopeuden muutokseen kuin pienemmän inertian omaava roottori. Kuvassa 3 on viitearvot sopivalle inertiaan ja kuorman suhteelle. (Orientalmotor 2020.)

Motor Type	Frame Size (mm)	Frame Size (NEMA)	Inertia Ratio
Open-Loop Stepper Motors	20, 28, 35	8, 11, 14	5:1 or less
Open-Loop Stepper Motors	42, 50, 56.4, 60, 85	17, 20, 23, 24, 34	10:1 or less

Kuva 3. Suositukset moottorin ja kuorman inertia suhteille (Orientalmotor 2020)

**Resonanssi** on moottorin värähtelyä jokaisella askeleella, koska pyörivän roottorin ja mahdollisen kuorman inertia saa aikaan askeleen yliampumista (overshoot) tai aliampumista (undershoot). Tämä tarkoittaa sitä, että roottori jää heilahtelemaan askel position ympärillä, kunnes se lopulta tasaantuu. (Collins 2020.) Kuvassa 4 esitetään yhden askeleen aikaansaama värähtely.



Kuvio 2. Yhden askeleen värähtely (Orientalmotor 2023a)

Moottorin liikkuessa jatkuvasti, roottorin värähtelyyn liittyy taajuus. Kun taajuus vastaa moottorin luonnollista taajuutta, värähtely muuttuu resonanssiksi ja aiheuttaa melua. Kun

resonanssi voittaa staattorin ja roottorin välisen magneettikentän, moottori todennäköisesti menettää synkronoinnin. (Li 2019.)

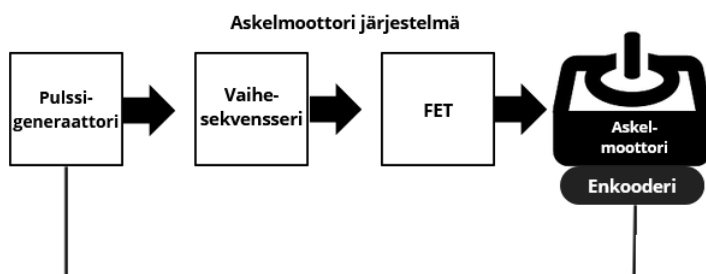
### 2.2.3 Askelmoottoripiirit

Perinteinen askelmoottori liikkuu määritellyn määrän askelia jokaista sille annettua ohjaussignaalia kohti. Askelmoottorin askeleet ovat tavallisesti hyvin pieniä, mikä mahdollistaa tarkat liikkeet. Askelmoottorit ovat avoimen piirin (Kuva 5) laitteita, jos ne eivät lähetä palautetietoa ohjausjärjestelmälle. Ne olettavat vain, että ne ovat liikkuneet määrätyn määrän askelia jokaista ohjaussignaalia kohti. Tämä tarkoittaa, että moottorin törmätessä esteeseen tai sen ylikuormituessa ohjausjärjestelmä ei saa tietää siitä.



Kuva 3. Avoin askelmoottorijärjestelmä (mukailtu Orientalmotor 2023a)

Suljetun piirin askelmoottori (Kuva 6) sisältää takaisinkytkennän elementin (yleensä rotaatioanturin) joka mittaa todellista moottorin asentoa ja vertaa sitä haluttuun asentoon. Jos näiden välillä on ero, ohjausjärjestelmä korjaa sen. Tämä parantaa suorituskykyä monissa sovelluksissa, koska se estää askelmoottoria menettämästä askeleitaan ja sen avulla moottori voi toimia suuremmalla teholla ilman ylikuormituksesta johtuvan synkronoinnin menetyksen riskiä. (Nanotec 2024.)



Kuva 4. Suljettu askelmoottorijärjestelmä (mukailtu Orientalmotor 2023a)

### 2.3 Askelmoottorihjain

Askelmoottorihjain on elektroninen laite, joka ohjaa askelmoottorin toimintaa. Se ottaa vastaan ohjaussignaaleja ja muuntaa ne moottorin askeleiksi, jolloin moottori liikkuu halutulla tavalla. Ohjaimella voidaan säädellä moottorin nopeutta, suuntaa ja askelten määrää, sekä parantaa moottorin tarkkuutta ja vähentää värinää.

Mikroaskellus (*microstepping*) on tekniikka, jota käytetään askelmoottorien ohjauksessa tarkemman ja tasaisemman liikkeen saavuttamiseksi. Mikroaskelluksessa askelmoottori ohjataan pienempiin askelväleihin kuin perinteisessä askelmoottorin ohjauksessa. Yksi mikroaskelluksen hyödyistä on värähtelyn vähentäminen, koska se sulavoittaa moottorin liikettä. (Dipankar 2021, 6.)

Kun moottorin momentti on pienempi kuin tarvittava momentti kuorman liikuttamiseksi, askelmoottori voi menettää askeleita, mikä tarkoittaa, että akseli ei pysty kääntymään toivotulla tavalla tai liikkumaan halutussa paikassa. Tämä voi tapahtua erityisesti, kun moottorin on aloitettava liikuttamaan suurta kuormaa tai kiihdytettävä sitä nopeasti. (Dipankar 2021, 6–7.)

Kun käytetään mikroaskellusta, askelmoottori tuottaa pienempiä askelkokoja, mikä tarkoittaa, että se pystyy tarjoamaan tarkempaa liikettä ja parempaa paikallistarkkuutta. Kuitenkin, kun kuorma on suuri tai momenttivaatimukset ovat korkeat, mikroaskelluksen käyttäminen voi johtaa askelien menetyksiin, koska moottori ei pysty tuottamaan tarpeeksi momenttia pitämään askelia kiinni. Tässä tilanteessa moottorin on kiihdytettävä kuormaa tarpeeksi, jotta se saa askeleet kiinni ja pystyy jatkamaan liikettä normaalisti. (Dipankar 2021, 7.)

Kun käytetään yhtä mikroaskelta per täysi askel, pidättävä momentti on 100 %. Kun mikroaskeleiden määrä nousee neljään per täysi askel, pidättävän momentin prosentuaalinen arvo laskee 38,3 prosenttiin. Jos mikroaskeleita on 16 per täysi askel, momentti on enää 9,8 % alkuperäisestä. Mitä enemmän mikroaskeleita on täyden askeleen aikana, sitä pienempi pidättävä momentti on yhdellä mikroaskeleella. (Dipankar 2021.)

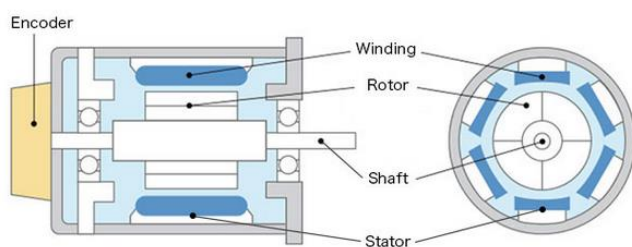
Pienemmillä askelilla virran kasvu ja lasku kussakin käämissä on hitaampaa, ja vääntövoiman vaihtelu askelten välillä on vähäisempää. Tämä tarkoittaa, että asennon ylittäminen ei ole niin voimakasta, vakiintumisaika on lyhyempi ja värähtelyt sekä melu vähenevät huomattavasti. (Collins 2020.)

Askelmoottorin virran rajoittaminen on tärkeää sen ylikuumentumisen estämiseksi ja sen käyttöiän pidentämiseksi. Useat askelmoottorihjaimet tarjoavat mahdollisuuden virran

rajoittamiseen. Virran rajoitus lasketaan sen perusteella, kuinka suuri virta moottorin keulaan voidaan syöttää ilman että se ylikuumenee. Tämä virta riippuu monista tekijöistä, kuten moottorin koosta ja käämien resistanssista. (Eitel 2016.)

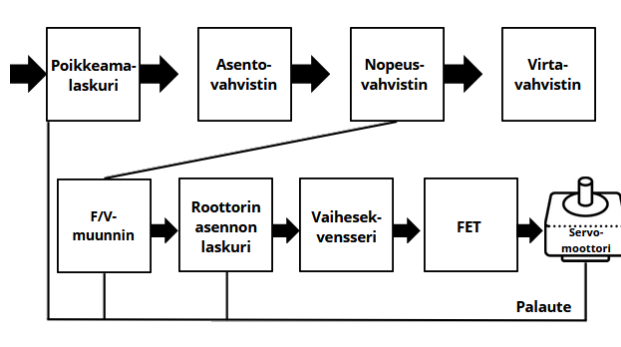
## 2.4 Servomoottorit

Servomoottorin toimintaperiaate on sama kuin suljetun piirin askelmoottorilla, koska staattoriin on kiinnitetty erillinen rotaatioanturi (*Encoder*) (Kuva 7). Servomoottori käyttää radiaalisesti magneettista roottoria sen sijaan, että siinä olisi hampaita, mikä on pääasiainen syy siihen, miksi servomoottoreissa on merkittävästi vähemmän napoja. Servomoottorit tunnetaan yleisesti siitä, että ne pyörivät korkeammilla nopeuksilla kuin askelmoottorit. Tämä ero vääntömomentin suorituskyvyssä johtuu servomoottorin ja askelmoottorin suunnitteluissa olevasta napaluvun ja käämityksen induktanssin erosta. Napalukumäärä vaikuttaa myös siihen, kuinka monta kertaa moottorin käämintä on virroitettava täyden moottorikierroksen saavuttamiseksi. Servomoottoreissa yksittäisen käämin virroittamiseen jää enemmän aikaa kuin askelmoottoreissa, joissa on enemmän napoja. Pienillä nopeuksilla tämä ero ei ole merkittävä. Kuitenkin suurilla nopeuksilla askelmoottorihajain ei kerkeä täysin virroittaa askelmoottorin käämejä toisin kuin servomoottori. Koska virta on verrannollinen vääntömomenttiin, vääntömomentti pienenee suurilla nopeuksilla. (Tang 2021.)



Kuva 5. Servomoottorin osat (Fuji Electric 2021)

Askelemoottorit toimivat ilman palautetta, joten niiden käyttöön tarvitaan vähemmän komponentteja. Tämä on syy siihen, miksi ne ovat kustannustehokkaampia. Servomoottorit puolestaan tarvitsevat palautetta ja toimivat silmukassa (Kuva 8), joten niihin tarvitaan enemmän komponentteja, joka lisää kustannuksia.



Kuva 6. Servomoottorijärjestelmä (mukailtu Orientalmotor 2023a)

Kaaviossa kuvataan signaalinkäsittelyketjua ja mekaanista palautetta, joka mahdollistaa servomoottorin tarkan ohjauksen. **Poikkeamalaskuri** vastaanottaa ulkoisen ohjaussignaalin usein PWM-muodossa (Pulse Width Modulation) ja vertaa sitä moottorin nykyiseen asentoon. Tässä moduulissa lasketaan ero halutun ja todellisen asennon välillä, jota kutsutaan poikkeamaksi. **Asentovahvistin** vastaa poikkeaman signaalin muuntamisesta asetetuksi virheeksi, jota käytetään moottorin ohjaamiseen. Tämä virhesignaali ohjaa nopeusvahvistinta korjaamaan moottorin asentoa. **Nopeusvahvistin** ottaa asentovahvistimen tuottaman virhesignaalin ja muuntaa sen nopeuden säätösignaaliksi. Tämä signaali ohjaa, kuinka nopeasti moottorin pitäisi liikkua haluttuun asentoon. **Virtovahvistin**, usein toteutettu käyttäen FET-kytkimiä (Field-Effect Transistor), skaalaa nopeusvahvistimen tuottaman signaalin riittävän suureksi moottorin käyttämiseksi. Se ohjaa tarvittavaa virtaa moottorille. **Taajuus-jännitemuunnin** (F/V-muunnin) muuntaa roottorin asennon laskurista tulevan taajuussignaalin jännitesignaaliksi. **Roottorin asennon laskuri** mittaa moottorin akselin pyörimiskierrokset tai -kulmat ja muuttaa ne sähköiseksi signaaliksi (yleensä taajuussignaaliksi), joka ilmoittaa moottorin nykyisen asennon. **Vaihesekvensserin** tehtävä servomoottorissa on luoda oikea järjestys sähkövaiheille moottorin ohjaamiseksi, ja tämä prosessi voi olla oleellinen osa servomoottorin tarkan asennon ja nopeuden hallintaa. Vaihesekvensseri voi olla ohjelmoitu osa servon ohjainpiiriä tai erillinen komponentti, joka toimii yhdessä muiden ohjauspiirien kanssa moottorin pyörimissuunnan ja vääntömomentin tarkan säätelyn varmistamiseksi. **FET** viittaa kenttävaikutustransistoriin, jota käytetään virtavahvistimessa sähkövirran ohjaamiseen servomoottoriin. Kuvassa oleva palauteviiva, joka palaa takaisin poikkeamalaskuriin, kuvaa sitä, että järjestelmä käyttää moottorin nykyisen asennon tietoa korjatakseen toimintaansa reaaliajassa. Tämä takaisinkytkentä mahdollistaa tarkan ohjauksen. sitä todelliseen asentoon, ja käyttää tätä tietoa säätääkseen nopeutta ja voimaa, jolla se pyrkii haluttuun asentoon. (Tang 2021.)

### 3 Moottorien vertailu

Sovelluksen vaatimusten mukaan valitaan, käytetäänkö askel- vai servomoottoria. Jokaisen sovelluksen vaatimukset ovat erilaiset ja niissä eri ominaisuuksille asetetaan erilaiset painoarvot. Taulukossa 1 vertaillaan servomoottorin ja askelmoottorin ominaisuuksia. Vertailun mukaan servomoottori on parempi valinta, kun tarvitaan korkeampia nopeuksia ja suurempia vääntömomenteja. Hitaammissa nopeuksissa ja korkeamman tarkkuuden paikannuksessa askelmoottori on puolestaan parempi valinta. (Dietrich 2022.)

	Servomoottori	Askelmoottori
Pito	Sähköinen lukko	Magneettihammas pidetään asennossaan virran avulla.
Käyttöjärjestelmä	Suljettu piiri Luotettavampi	Avoin piiri Ei pysty korjaamaan virhettä, joka tekee järjestelmästä epäluotettavamman.
Tarkkuus	+ - 0.02	+ - 0.005 + - 0.02
Nopeus-Vääntö	Korkea vääntö korkeilla nopeuksilla. Parempi pitkille liikkeille.	Korkea vääntö matalilla nopeuksilla. Parempi lyhyille liikkeille.
Reaktio	Viive ennen liikettä. Odotettava tasaantumista ennen seuraavaa liikettä.	Nopea reagointikyky.
Virrankulutus	Matala	Korkea
Koko	Suurempi	Pieni
Hinta	Korkea	Matala

Taulukko 1. Servomoottorin ja askelmoottorin eroavaisuudet (mukailtu Tang 2021)



#### 4 Lineaariliikkeen toteutus

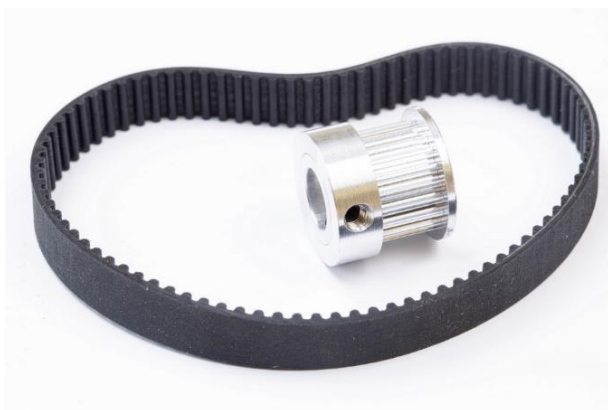
Askelmoottorit ja servomoottorit kykenevät tuottamaan tarkan ja kontrolloidun pyörimisliikkeen, mutta monissa sovelluksissa tarvitaan lineaarista liikettä. Tämän muunnoksen suorittamiseksi käytetään tyypillisesti mekaanista järjestelmää, joka sisältää esimerkiksi liikuvan mäntä- tai ruuvijärjestelmän.

Yksi yleisimmistä tavoista muuttaa pyörimisliike lineaariseksi on käyttää **johtoruuvia** (Kuva 9). Tässä järjestelmässä askelmoottorin akseliin on kiinnitetty johtoruuvi, ja ruuviin on sovitettu mutteri, joka kiinnityksen jälkeen ei pyöri, mutta voi liikkua aksiaalisesti pitkin ruuvia. Kun askelmoottori pyörittää ruuvia, mutteri liikkuu pitkin ruuvia ja tuottaa näin lineaarista liikettä. Johtoruuvijärjestelmän etuna on sen kyky tuottaa suurta voimaa ja tarkkaa liikettä, minkä ansiosta se soveltuu moniin teollisuussovelluksiin.



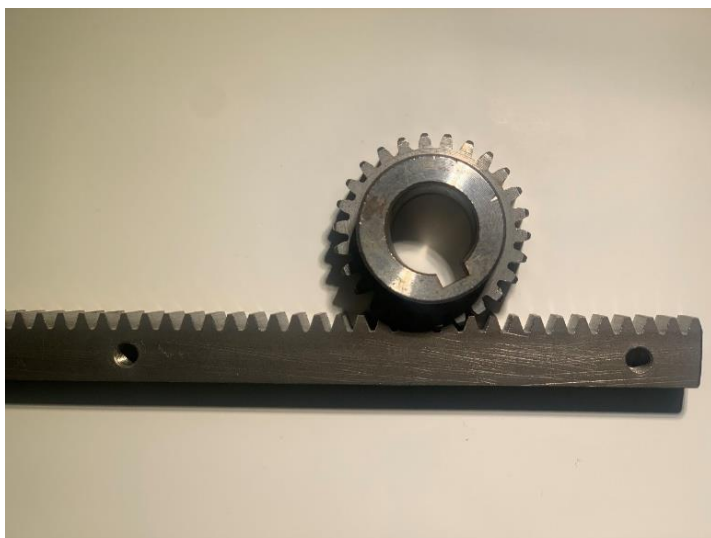
Kuva 7. Askelmoottori ja johtoruuvi

**Hihnapyörä** (Kuva 10) on pyörä tai rulla, joka tukee hihnaa tai vaijeria ja ohjaa sen liikettä. Yksinkertainen esimerkki tästä on liukuva hihna, jossa moottori pyörittää hihnapyörää, joka puolestaan pyörittää hihnaa. Hihnaan voi kiinnittää objektin, joka liikkuu hihnan mukana, tuottaen lineaarista liikettä. Tämä on periaate, jota käytetään monissa sovelluksissa, kuten kuljettimissa tai 3D-tulostimissa.



Kuva 8. Hihnapyörä ja hihna (Verch 2021)

**Hammastanko ja -pyörä** -mekanismi (Kuva 11) on suunniteltu muuntamaan pyörivä liike lineaariseksi liikkeeksi. Tässä mekaniisissa pyöreä hammasratas (pinioni) ottaa yhteyden lineaariseen hammastankoon. Kun pinioni pyörii, se ajaa hammastankoa lineaarisesti. Hammastangon liikuessa lineaarisesti, se saa pinionin pyörimään. Tämä mekanismi on erittäin hyödyllinen monissa sovelluksissa, jotka vaativat pyörivän liikkeen muuntamista lineaariseksi liikkeeksi ja päinvastoin. (Thomas 2024.)

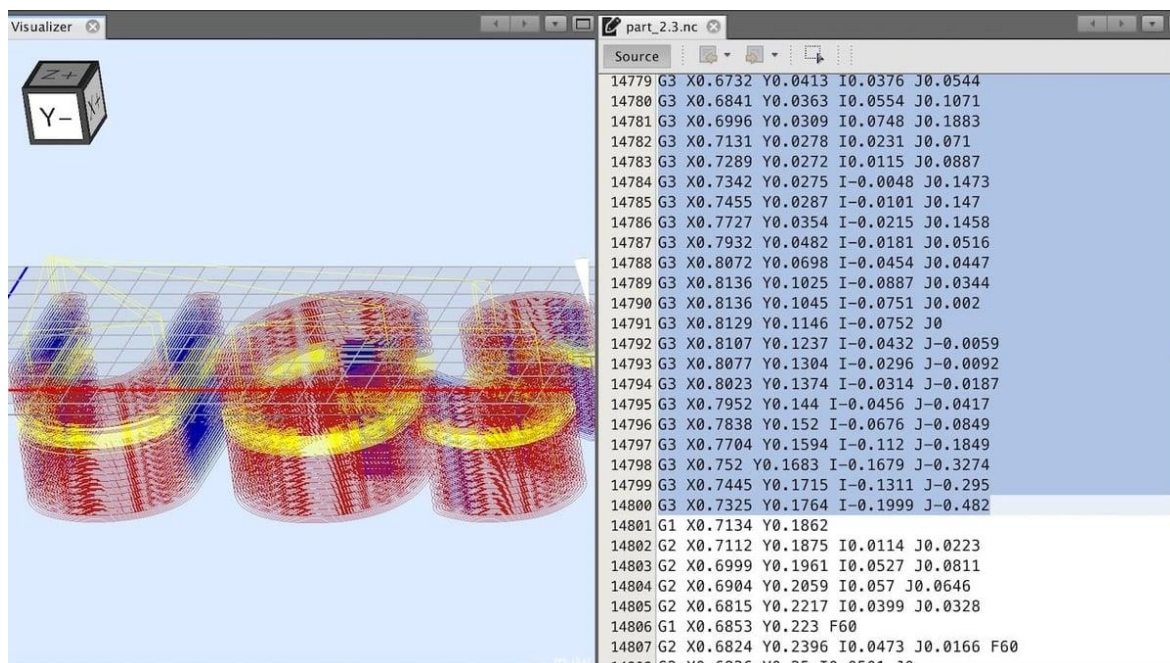


Kuva 9. Hammastanko- ja pyörä

## 5 Työstöradan suunnittelu

**CAM** (Computer-Aided Manufacturing) on prosessi, jossa käytetään tietokoneohjelmia suunnittelemaan ja ohjaamaan CNC-koneita. CAM-ohjelmistoilla käyttäjä voi luoda 3D-mallinnuksia ja määrittää niille työstöreittejä, jotka muunnetaan sitten G-koodiksi CNC-koneen käytettäväksi. Ohjelmistoilla on monia erilaisia toimintoja, kuten työkalun valinta, syöttönopeuden määrittäminen ja työstön syvyyden säätö. Nämä toiminnot voivat olla erittäin monimutkaisia ja vaativat tarkkaa suunnittelua, jotta voidaan varmistaa, että CNC-kone tekee halutun työstön oikein. CAM-ohjelmistot (Kuva 12) yleensä generoivat G-koodin automaattisesti työstöreittien perusteella, joita käyttäjä on määrittänyt. Generoitu G-koodi voidaan sitten tallentaa tai lähettää CNC-koneen ohjausjärjestelmään, jossa se käännetään liikkeiksi, jotka CNC-kone voi suorittaa.

**G-koodi** on CNC-koneiden käyttämä ohjauskieli, joka koostuu erilaisista komentosarjoista, jotka ohjaavat koneen liikkeitä ja toimintoja. Kullakin G-koodilla on tietty tarkoitus ja se voi vaikuttaa esimerkiksi koneen nopeuteen, työkalun liikkeeseen tai syöttönopeuteen. G-koodi on yleensä luotu tekstipohjaisena koodina ja tallennettu NC-tiedostoon, joka ladataan sitten CNC-koneeseen. Kun NC-tiedosto ladataan CNC-koneeseen, kone tulkkaa G-koodin ja suorittaa komentoja käyttäjän määrittämän toiminnan suorittamiseksi.



Kuva 10. G-koodi UGS-sovelluksessa (All3DP 2024)

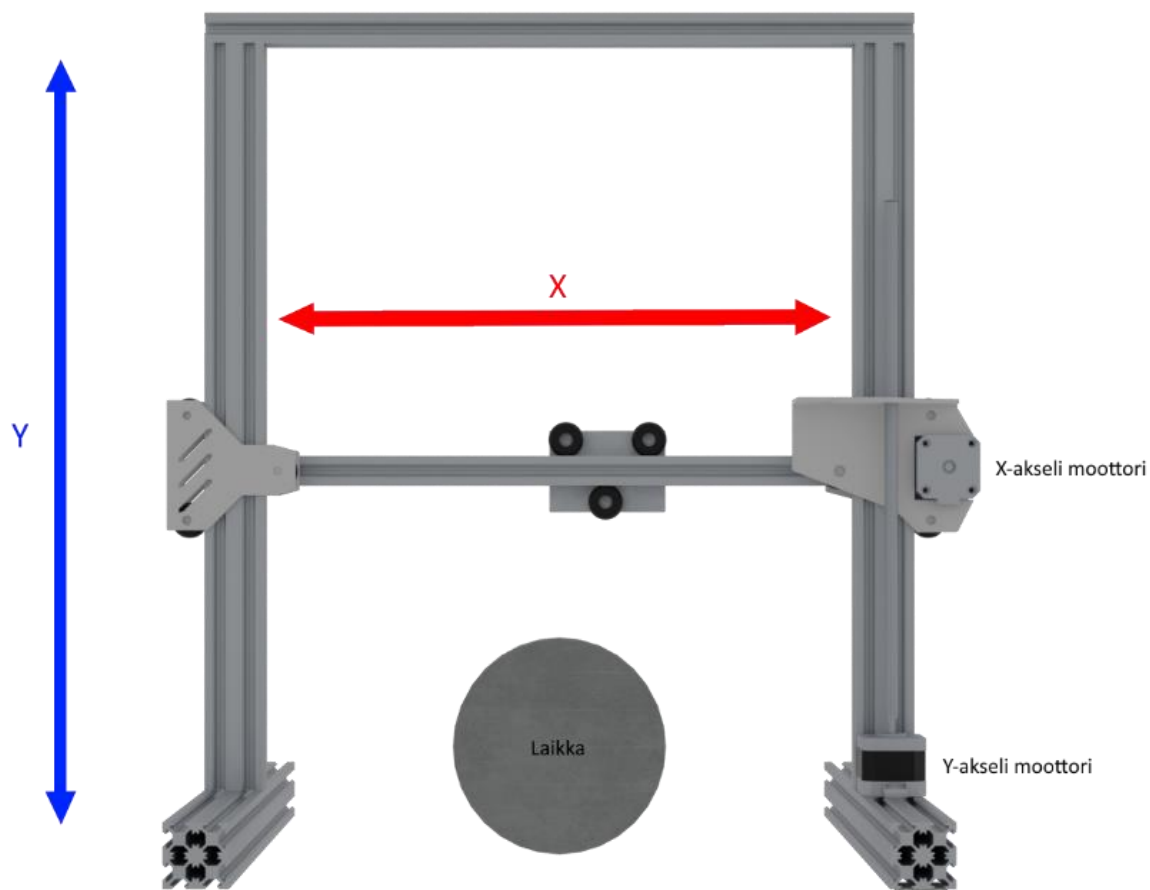
**Universal G-code Sender** (UGS) on avoimen lähdekoodin ohjelmisto, joka toimii CNC-ohjainten kanssa ja mahdollistaa G-koodin lähettämisen CNC-koneelle. UGS:n avulla käyttäjä voi lähettää G-koodia CNC-koneelle USB-liitännän kautta, jolloin kone ohjaa työkalua tarkasti ja toistettavasti. UGS:n käyttöliittymä on selkeä ja siinä on ominaisuuksia, kuten työkalun asettelu, tarkkailu, mittaus ja G-koodin tarkistus. Ohjelmisto tukee useita erilaisia CNC-ohjaimia, kuten grbl, TinyG ja Smoothieboard, joten se on yhteensopiva monenlaisten CNC-koneiden kanssa.

**GRBL** on avoimen lähdekoodin ohjelmisto, jota käytetään CNC-reitittimien ohjauksessa. Se on suunniteltu ajettavaksi erityisesti Arduino-mikrokontrollereissa. GRBL on yksinkertainen ja tehokkaasti optimoitu ohjelmisto, joka pystyy ohjaamaan koneiden akselien liikkeitä reaaliaikaisesti. GRBL tukee useita erilaisia komentoja ja kykenee ohjaamaan useita akselien liikkeitä samanaikaisesti. Se voi ohjata esimerkiksi jyrsintä, kaiverrusta ja muita työstöprosesseja. Kun GRBL saa G-koodikomennon, se tulkitsee tämän komennon ja muuttaa sen sarjaksi askel- ja suuntasignaaleja, jotka lähetetään koneen askelmoottoriohjaimelle. Askelmoottoriohjain ohjaa sitten koneen askelmoottoreita näiden signaalien mukaisesti.

## 6 Komponenttien mitoitus ja valinta

### 6.1 Askelmoottorit

Askelmoottorin mitoituksessa tulee ottaa huomioon useita tekijöitä. Huomioon otettavia asioita on tarvittava vääntömomentti, käämien kytkentä ja askelkulma. Vaatimukset on asettanut Mecatroplan Oy. Aiempien tutkimusten perusteella todetaan, että bipolaariset askelmoottorit ovat unipolaarisia parempia, joten käytämme niitä sovelluksessa. Vääntömomenttivaatimus on X- ja Y akselleille (Kuva 13) eri, joten molemmat moottorit tulee mitoitaa erikseen.



Kuva 13. X- ja Y-akselit

Moottori tulee valita sovelluksen vaatiman suurimman momentin ja nopeuden perusteella. Mitoituksessa on myös hyvä käyttää 30 % varmuusmarginaalia julkaistusta momentti vs. nopeuskäyrästä. (Faulhaber 2020.)

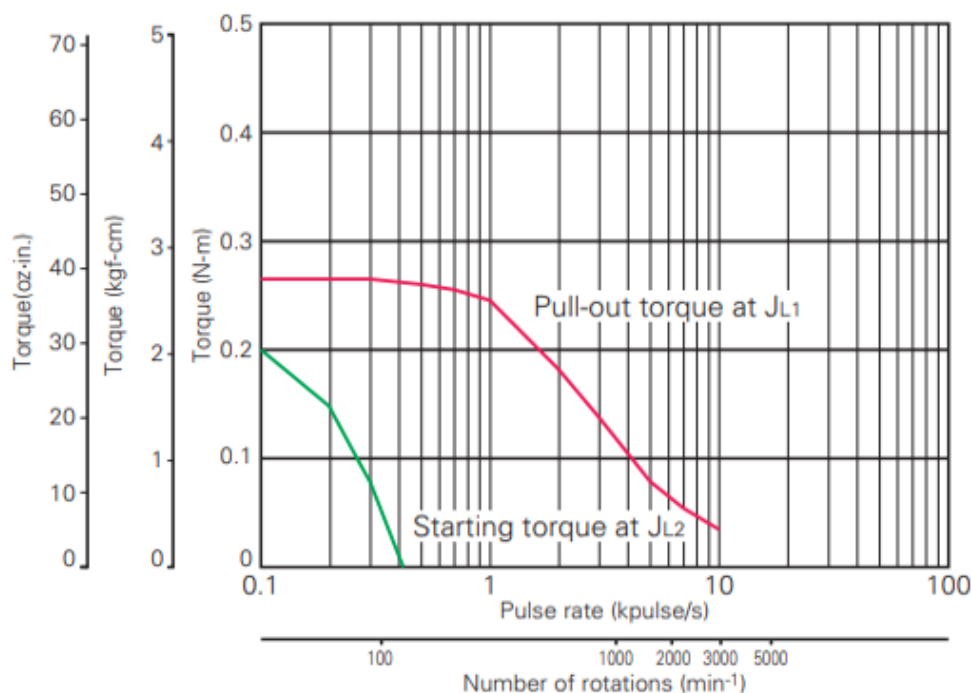
### 6.1.1 Y-akselin askelmoottorin mitoitus

Bipolaariselle askelmoottorille asetettu vääntövaatimus on 0.15Nm, jotta se pystyy liikuttamaan laitteeseen kiinnitettävän kappaleen massaa. Y-akselin tarkkuudeksi on vaativuutena 1/100 mm. Nopeusvaatimus lineaariliikkeelle on 5 mm/s. Lineaariliike toteutetaan kuularuvilla, jonka nousuksi valitaan 2 mm/kierros. Yleisin askelmoottorin askelkulma on 1.8 astetta. Tämä voidaan esittää kaavalla 1.

$$\frac{\text{täysi kierros}}{\text{askelkulma}} = \frac{360^\circ}{1.8} = 200 \quad (1)$$

2 mm lineaariliikkeeseen tarvitaan 200 askelta, kun huomioidaan kuularuvin nousu. Suupistamalla saadaan vaadittu 1/100 mm askeltarkkuus. Tarkkuus ei kuitenkaan ole absoluuttinen, koska tavallisesti askelmoottorin askeleen sijainnin toleranssi on  $\pm 5\%$ .

(Geckodrive 2023.) Etsitään väännöltään ja askelkulmaltaan sopiva askelmoottori ja tutkitaan sen datalehddestä löytyvää käyrää (Kuvio 1), jotta voidaan todeta sen nopeus- ja vääntöominaisuudet riittäviksi.



#### Sanyo constant current circuit

Source voltage: DC24V Operating current : 1A/phase, 2-phase energization (full-step)

$J_{L1} = [0.94 \times 10^{-4} \text{kg} \cdot \text{m}^2 \text{ (5.14 oz} \cdot \text{in}^2 \text{)}]$  Use the rubber coupling]

$J_{L2} = [0.8 \times 10^{-4} \text{kg} \cdot \text{m}^2 \text{ (4.37 oz} \cdot \text{in}^2 \text{)}]$  Use the direct coupling]

Kuvio 3. Y- akselin askelmoottorin vääntönopeuskäyrä (Elfa Distrelec 2023)

Kuviosta 1 nähdään, että askelmoottorin vaadittu 0.15Nm vääntömomentti täyttyy vielä  $2400 \frac{p}{s}$  alueella. Nopeuden laskeminen alhaisemmalla  $1000 \frac{p}{s}$  nopeudella on järkevää, jotta vääntömomentti on ylimitoitettu vähintään 30 %. Lineaariliikkeen nopeus lasketaan kaavalla 2.

*pulssitiheys*  $\times$  *askeltarkkuus* = *lineaariliikkeen nopeus*

$$1000 \frac{p}{s} \times 0.01 \frac{mm}{p} = 10 \frac{mm}{s} \quad (2)$$

Laskutoimituksen mukaan nopeus ja vääntömomentti täyttää vaatimukset.

### 6.1.2 X-akselin vaatimukset

X-akselin tarkkuudeksi on vaatimuksena 1/10 mm. Moottorin askelkulmaksi valitaan 1.8 astetta. Nopeusvaatimus lineaariliikkeelle on 50 mm/s. Lineaariliike toteutetaan hihnapyörällä, jonka halkaisija on 20 mm. Hihnapyörällä on kyettävä tuottamaan sovelluksen vaatima 1Nm vääntö. Selvitetään yhden askeleen tarkkuus laskemalla hihnapyörän ympärysmitta ja jakamalla se askelten määrällä, jota moottori ottaa yhden kierroksen aikana:

$$C = \pi d \quad (3)$$

$$C = \pi \times 20mm = 62.832mm$$

$$askeltarkkuus = \frac{62.813 \text{ mm}}{200 \text{ askelta}} = 0.314 \frac{mm}{askel}$$

Laskukaavasta voidaan huomata, että tarkkuus ei riitä kokonaisilla askeleilla ja valitulla hihnapyörällä. Tarkkuutta voi lisätä pienentämällä hihnapyörän halkaisijaa tai käyttämällä mikroaskellusta. Päädytään mikroaskelluksen toteuttamiseen, koska hihnapyörää ei haluta pienentää. Lasketaan tarkkuus 1/4 mikroaskelluksella.

$$\frac{1}{4} \times 0.314 \frac{mm}{askel} = 0.0785 \frac{mm}{askel} \quad (6)$$

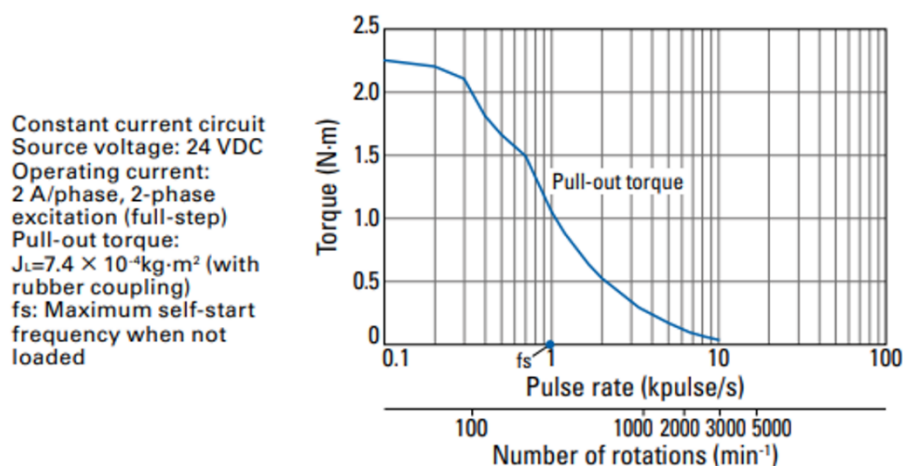
Laskelman perusteella käytetään 1/4 mikroaskellusta, koska se ylittää tarkkuuden vaatimuksen. Mikroaskellusta käytettäessä pulssitiheyden vaatimus kasvaa. Selvitetään tarvittava askelnopeus.

$$\frac{p}{s} = \frac{50 \frac{mm}{s}}{0.0785 \frac{mm}{p}} = 636.943 \frac{p}{s} \quad (7)$$

Tarvittavan askelnopeuden ollessa tiedossa voidaan valita moottori, jonka vääntö täyttää vaatimuksen kyseisellä pulssinopeudella. Lisätään ensin vääntömomenttiin aiemmin mainittu 30 % varmuusmarginaali.

$$1Nm + 1Nm \times 30\% = 1.3Nm \quad (8)$$

Seuraavaksi etsitään moottori, joka täyttää tarvittavat nopeus ja vääntövaatimukset. Kuvion 2, moottori osoittautuu riittäväksi väännön ja nopeuden osalta.



Kuvio 4. X - akselin askelmoottorin vääntönopeuskäyrä (Sanyo Denki 2023)

## 6.2 Askelmoottorihjaimet

Askelmoottorihjain valitaan moottorin jännitteen ja nimellisvirran mukaan. Aiemmissa kuvioissa on käytetty 24VDC jännitettä, jonka perusteella moottorin valinta on tehty. As-



kelmoottoriohjaimen tulee siis tukea 24V jännitettä. Moottoriohjaimet voivat olla erilaisia, koska ne ohjaavat nimellisvirraltaan ja vaatimuksiltaan erilaisia moottoreita, mutta samanlainen ohjain toimii molemmissa, kun valinta tehdään isomman moottorin mukaan.

Moottoriohjaimen on kyettävä tuottamaan 2A virtaa per vaihe ilman ylikuumentumista. Sen on oltava yhteensopiva CNC-Shield V3:n kanssa ja siinä on oltava vähintään  $\frac{1}{4}$  mikroaskeellisuusominaisuus. Moottoriohjain DRV8825 täyttää kaikki vaatimukset, mutta on otettava huomioon sen tarve jäähdytysalustalle, kun virta ylittää yhtäjaksoisesti 1.5A. Virtaa pitää rajoittaa molemmille moottoreille kääntämällä ohjaimen potentiometriä ja mittaamalla jännitettä potentiometrin ja maan välillä. Tätä jännitettä kutsutaan nimellä  $V_{REF}$ . Virran rajoituksen voi tehdä seuraavilla laskukaavoilla (kun moottoriohjaimessa oleva sense-resistori on  $0.100\Omega$ ):

$$I_{MAX} = V_{REF} \times 2 \quad (9)$$

$$V_{REF} = \frac{I_{MAX}}{2} \quad (10)$$

### 6.3 Ohjausyksikkö

Raspberry Pi on suosittu valinta CNC-koneiden ohjausyksikkönä sen joustavuuden, helppokäyttöisyyden ja edullisuuden vuoksi. Se on yhden piirilevyn minitietokone. Raspberry Pi:n GPIO-pinnit mahdollistavat suoran yhteyden ulkoisiin laitteisiin, kuten askelmoottoriohjaimiin. Tämä lähestymistapa on yksinkertainen ja edullinen, mutta se voi aiheuttaa ongelmia, kuten heikkoa signaalinlaatua, virranrajoitusta ja suojaamattomuutta ylikuormitukselta (Johnson, 2021). Tästä syystä suora GPIO-pinnien käyttö ei ole suositeltavaa askelmoottorien ohjauksessa ja tarvitaan erillinen askelmoottoriohjainkortti.

### 6.4 Erillinen askelmoottoriohjainkortti

#### 6.4.1 Arduino

Arduino-pohjaiset ratkaisut, kuten CNC-shield V3, ovat toinen suosittu vaihtoehto askelmoottorien ohjaukseen CNC-koneissa. Ne ovat edullisempia kuin monet erilliset moottoriohjainkortit ja tarjoavat hyvän tasapainon suorituskyvyn, tarkkuuden ja suojaustoiminto-

jen välillä (Davis, 2021). Arduino-pohjaiset ratkaisut ovat erityisen sopivia pienemmille CNC-koneille, jotka käyttävät vain kahta askelmootoria.

#### 6.4.2 TinyG v8

TinyG v8 on erillinen askelmoottoriohjainkortti, joka on suunniteltu erityisesti CNC-koneiden ohjaukseen. TinyG v8:ssa on erityisesti liikkeenohjaukseen tarkoitettu prosessoriyksikkö (motion control processor), joka on optimoitu askelmoottoreiden ohjaamiseen ja sujuvan liikkeen saavuttamiseen. Tämä erikoistunut liikkeenohjausprosessori tarjoaa lisätehokkuutta ja tarkkuutta verrattuna yleisempiin mikrokontrollereihin, kuten Arduinoon. Se tarjoaa korkean tarkkuuden, tehokkaan mikroaskelmoottoriohjauksen ja useita suojaustoimintoja (Chilipeppr, 2020). TinyG v8 on kuitenkin kalliimpi ja saattaa olla liioiteltu kahden akselin CNC-koneelle.

#### 6.4.3 Vertailu

TinyG v8 tarjoaa korkeimman tarkkuuden ja tehokkuuden, mutta sen kustannukset saattavat olla liian korkeat kahden akselin CNC-koneelle. Arduino-pohjaiset ratkaisut, kuten CNC-Shield v3, tarjoavat hyvän tasapainon suorituskyvyn, tarkkuuden ja kustannusten välillä, mikä tekee niistä sopivan valinnan kahden akselin CNC-koneelle.

Taulukossa 3 vertaillaan näitä kahta vaihtoehtoa kahden akselin CNC-koneen ohjauksessa. Vihreällä on merkattu voittaja. Oranssilla on merkattu tasatulos.

	TinyG v8	Arduino + CNC-Shield v3
Tarkkuus	5	3
Muokattavuus (1–5)	2	4
Askelmoottoriohjaimet	TI DRV8811 (kiinteä)	Hankittava erikseen
Mikroaskellus	1/8	1/256
Edullisuus (1–5)	3	5
Kellotaajuus	50Khz	16 MHz

Taulukko 3. TinyG v8 ja Arduino + CNC-Shield v3 vertailu

## 6.5 Virtalähde

Virtalähde valitaan komponenttien virrankulutuksen mukaan. Y-akselia liikuttavan moottorin nimellisvirta on 1A (24V), joka on ilmoitettu myös muodossa 1A/vaihe. Nimellisvirta ja yksittäisen vaiheen virta tarkoittaa käytännössä samaa asiaa, koska vaiheet toimivat vuorotellen. Y-akselin 1A:n (24V) nimellisvirta ja X-akselin 2A:n (24V) nimellisvirta tarkoittaa yhteensä 3A:n (24V) virrankulutusta. Sähkömoottorit voivat suuren kuorman alla viedä enemmän virtaa kuin nimellisvirta, mutta sovelluksessamme askelmoottorimoottoriohjaimet rajoittavat virtaa. Raspberry Pi 3B+:n virtalähde, joka on 2.5A (5V) on riittävä myös kosketusnäytölle ja Arduinolle. Arduino saa virran Raspberryn USB-portista ja kosketusnäyttö Raspberryn GPIO pinneistä. Tarvitaan kaksi eri virtalähdettä, koska CNC-Shield V3 tarvitsee erikseen 24V jännitteen ja Raspberry Pi 5V:n jännitteen. Valitaan 24V virtalähde ja muuntaja, joka muuttaa 24V jännitteen 5V jännitteeksi. Otetaan huomioon, että 2,5A (5V) ei tarkoita 2,5A virrankulutusta 24V virtalähteelle. Virrankulutus 5 voltin laitteelle 24 virtalähteellä voidaan laskea kaavalla 11.

$$P = U \times I \quad (11)$$

$$2,5A \times 5V = 12.5W$$

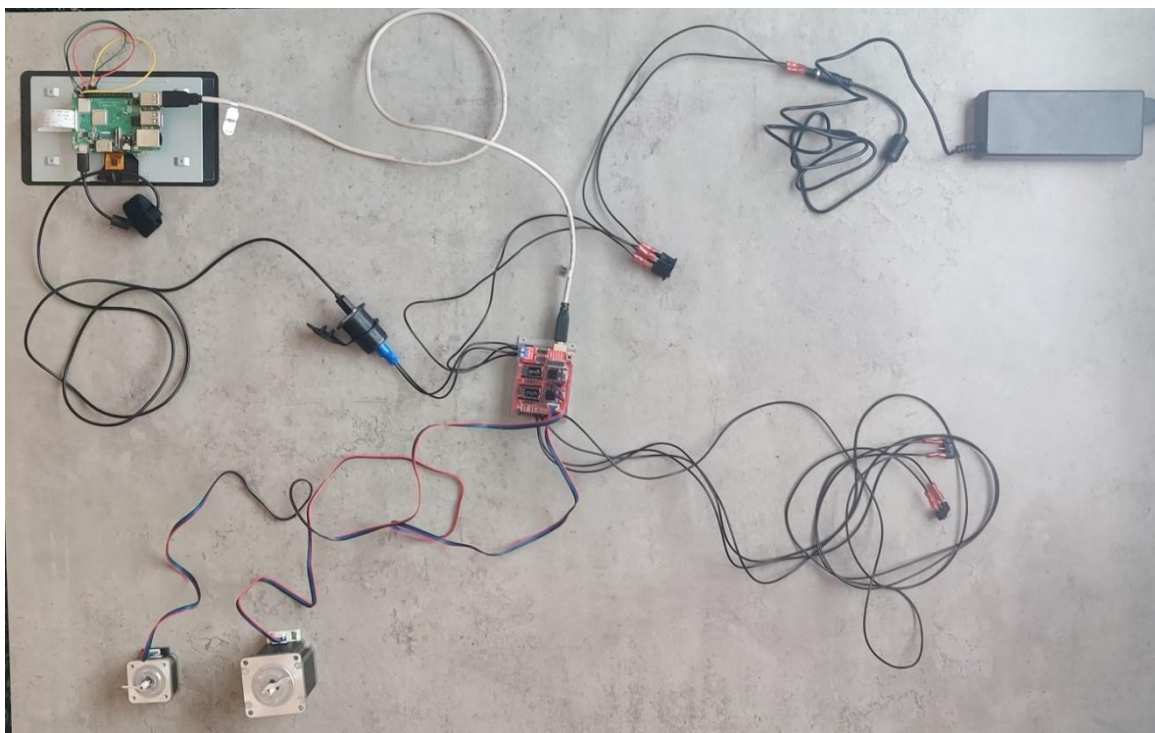
$$I = P \div U$$

$$12.5W \div 24V = 0.52A$$

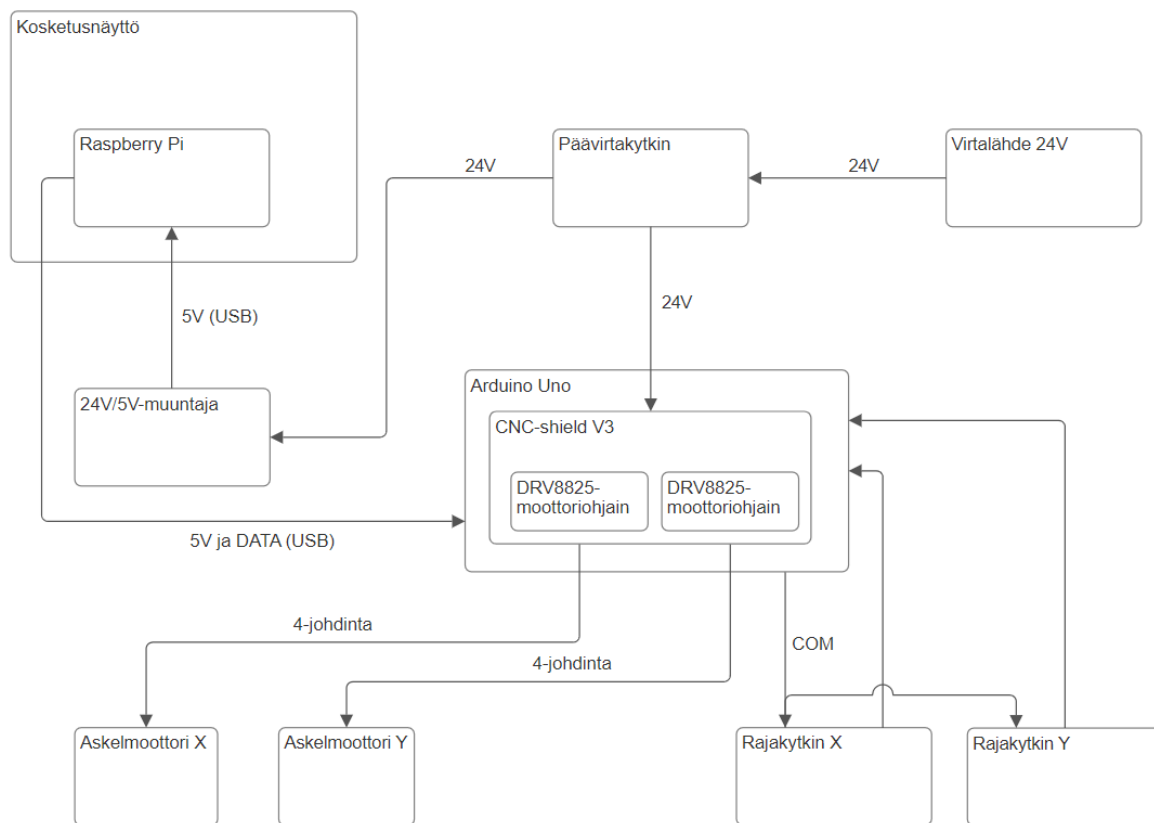
Muuntajan hyötysuhteeksi voidaan laskussa valita arvo 70 %, jotta muuntaja ei ole ainaakaan alimitoitettu. Hyötysuhde tällaisella muuntajalla on yleensä 80–95%. Voimme laskea hyötysuhteen aiheuttaman lisävirran tarpeen seuraavasti:

$$0.52A \times \frac{100}{70} \% = 0.74A \quad (12)$$

Kun osien 24V virrankulutukset 3A ja 0,74A lasketaan yhteen, saadaan tulokseksi 3.74A. Voimme valita sovellukseen 5A:n virtalähteen, jolloin laitteeseen on mahdollista vielä lisätä ominaisuuksia eikä virrankulutus ylitä virtalähteen kapasiteettia. Valituista elektroniikan komponenteista rakennettiin prototyyppi (Kuva 14 ja 15), jonka toimivuus pystyttiin todistamaan käyttämällä UGS-ohjelmaa ja syöttämällä G-koodia Arduinoon. Moottorit liikkuvat ohjelman ohjeiden mukaisesti.



Kuva 14. Prototyyppi



Kuva 15. Prototyyppi piirustus

## 7 Yhteenveto ja pohdinta

Tämä opinnäytetyö on syvälinen tutkimus askelmoottoreiden ja servomoottoreiden, valinnasta ja mitoituksesta CNC-koneiden suunnittelussa. Tutkimuksen aikana analysoitiin molempien, erityisesti askelmoottorin teknisiä ominaisuuksia, soveltuvuutta eri sovelluksiin, ja tehtiin vertailu moottoreiden suorituskyvystä. Työssä korostettiin, miten oikein valittu ja mitoitettu moottori parantaa CNC-koneen tarkkuutta, nopeutta ja luotettavuutta. Tutkimustulokset tarjoavat konkreettisia suosituksia moottoreiden valintaan, tarjoten hyödyllistä tietoa suunnittelijoille ja insinööreille CNC-teollisuudessa.

Opinnäytetyön aihetta rajattiin opinnäytetyöprosessin aikana, koska kokonaisuudesta olisi tullut liian laaja yhden opinnäytetyön aiheeksi. Prosessin eteenpäin viemiseksi täytyy jatkossa selvittää järjestelmän kokoonpano, G-koodin luominen, ohjelmointi, käyttöliittymän rakentaminen ja kalibrointi. Laitteen sähköisistä osista kasattiin prototyyppi, joka toimi odotetusti. Moottoreita pystyttiin liikuttamaan G-koodin avulla ja prototyypin toiminta antaa edellytykset laitteen toimivuudelle ja projektin jatkamiselle. Kuitenkaan moottorien kykyä liikuttaa kuormaa ei voitu vielä testata lopullisessa sovelluksessa, koska mekaanisia osia ei opinnäytetyöprosessin aikana ehditty saamaan.

Jatkokehitysideana on käyttää laitteen ohjauksessa Raspberry Pi Compute Module 4 (CM4) laskentayksikkömoduulia. Se tarjoaa Raspberry Pi 4:n suorituskyvyn ja ominaisuudet kompaktissa muodossa ja se pystytään liittämään suoraan joihinkin askelmoottoriohjainkortteihin. Tällöin tarvittaisiin vähemmän johtoja, laite mahtuisi pienempään tilaan ja säästettäisiin asennus- ja hankintakustannuksissa. Työskentely laitteen parissa jatkuu opinnäytetyön jälkeen ja laitetta pyritään parantamaan entisestään.

Opinnäytetyöni prosessi on valaissut sähkömoottoreiden valinnan ja mitoituksen monitulkaisuutta CNC-koneen suunnittelussa. Työn aikana ymmärsin, että teknisten parametrien huolellinen harkinta ja vertailu eri moottorityyppien välillä on kriittisen tärkeää koneen lopullisen suorituskyvyn kannalta. Servomoottorien tutkimus on osoittanut, kuinka niiden kyky toimia suljetun piirin ohjauksessa voi tarjota merkittäviä etuja tarkkuudessa ja tehokkuudessa verrattuna askelmoottoreihin. Tulevaisuudessa näen mahdollisuuden tutkia lisää uusia teknologioita ja ohjausjärjestelmiä, jotka voivat edelleen parantaa CNC-koneiden suorituskykyä. Tämän opinnäytetyön tulokset antavat vankan perustan jatkokehitykselle ja innovaatioille koneenrakennuksen alalla.

## Lähteet

All3DP. 2024. Viitattu 19.1.2024. Saatavissa <https://all3dp.com/2/3d-printer-g-code-commands-list-tutorial/>

Atwell, C. 2017. Misconceptions about Stepper Motors Explained. MachineDesing. Viitattu 19.9.2023. Saatavissa. <https://www.machinedesign.com/motors-drives/article/21835161/misconceptions-about-stepper-motors-explained>

CNC Rapid. 2022. What is CNC Machining Technology? Viitattu 12.10.2023. Saatavissa. <https://cncrapid.com/what-is-cnc-machining-technology.html#:~:text=1,related%20to%20the%20switch%20quantity>

Collins, D. 2020. What is stepper motor resonance and how can it be avoided? Viitattu 14.5.2023. Saatavissa <https://www.linearmotiontips.com/what-is-stepper-motor-resonance-and-how-can-it-be-avoided/>

Desertcart. 2023. Viitattu 25.5.2023. Saatavissa <https://en-finland.desertcart.com/products/228069915-raspberry-pi-4-model-b-8gb>

Dietrich, S. 2022. Servo Motor vs Stepper Motor: Understanding the Differences. Viitattu 10.1.2024. Saatavissa <https://control.com/technical-articles/servo-motor-vs-stepper-motor-understanding-the-differences/>

Dipankar, M. 2021. How to Improve Motion Smoothness and Accuracy of Stepper Motors. Texas Instruments. Viitattu 21.5.2023. Saatavissa [How to Improve Motion Smoothness and Accuracy of Stepper Motors \(Rev. A\)](https://www.ti.com/lit/what-u-need-to-know-about-how-to-improve-motion-smoothness-and-accuracy-of-stepper-motors-rev-a)

Earl, B. 2022. All About Stepper Motors. Adafruit. Viitattu 11.11.2023. Saatavissa <https://learn.adafruit.com/all-about-stepper-motors>

Eitel, L. 2016. How to set a stepper motor's current limit and why is it important? Motion-ControlTips. Viitattu 10.1.2024. Saatavissa <https://www.motioncontroltips.com/faq-set-stepper-motors-current-limit-important/>

Elfa Distrelec, 2023. 2-phase Stepping Motor. Viitattu 11.2.2024. Saatavissa [https://media.distrelec.com/Web/Downloads/\\_t/ds/103H5205-4240\\_eng\\_tds.pdf](https://media.distrelec.com/Web/Downloads/_t/ds/103H5205-4240_eng_tds.pdf)

Farnell. 2023. SANYO DENKI 103H5205-4240. Viitattu 10.1.2024 Saatavissa <https://fi.farnell.com/en-FI/sanyo-denki/103h5205-4240/stepper-motor-2ph-bipolar-1a-0/dp/3515139>

- Faulhaber, F. 2020. How to prevent step losses with Stepper Motors. Viitattu 20.11.2023. Saatavissa <https://www.faulhaber.com/en/know-how/tutorials/stepper-motor-tutorial-how-to-prevent-step-losses-with-stepper-motors/>
- Gastreich, W. 2018. Stepper Motors Advantages and Disadvantages. Viitattu 20.11.2023. Saatavissa <https://realpars.com/stepper-motors-advantages/>
- Geckodrive. 2023. Accuracy and resolution. Viitattu 26.9.2023. Saatavissa <https://www.geckodrive.com/support/accuracy-and-resolution/>
- Iqbal, H., Khan, MMA., Ahmed, I., Yousuf, H., Khan, H & Uddin, R. 2022. Design Procedure for Motor Selection in Custom-Made Multi-Axis CNC Machines. Engineering Proceedings. Viitattu 15.1.2024. Saatavissa <https://www.mdpi.com/2673-4591/20/1/29>
- Jones, D. 2004. Stepping Motors Fundamentals. Microchip Technology Inc. Viitattu 1.5.2023. Saatavissa <http://www.t-es-t.hu/download/microchip/an907a.pdf>
- Li, Z. 2019. Solutions to Reduce Stepper Motor Resonance. Automate. Viitattu 11.4.2023. Saatavissa <https://www.automate.org/tech-papers/solutions-to-reduce-stepper-motor-resonance>
- Linuxcnc. 2023. Stepper Information. Viitattu 9.1.2024. Saatavissa <https://linuxcnc.org/docs/html/integrator/steppers.html>
- Nanotec. 2024. Closed-loop technology. Viitattu 4.1.2024. Saatavissa <https://en.nanotec.com/knowledge-base-article/closed-loop-technology>
- Nidec. 2024a. Components of a Motor. Viitattu 4.1.2024. Saatavissa <https://www.nidec.com/en/technology/motor/basic/00002/#:~:text=Motor%20components%20are%20classified%20into,5%29%20Lead%20wire>
- Nidec. 2024b. Characteristics of Stepping Motors. Viitattu 4.1.2024. Saatavissa <https://www.nidec.com/en/technology/motor/basic/00032/#:~:text=The%20torque%20of%20stepping%20motors,excitation%20method%20and%20drive%20circuit>
- Stepper Information. LinuxCNC. Viitattu 28.9.2023. Saatavissa. <https://linuxcnc.org/docs/html/integrator/steppers.html>
- MachineDesign. 2017. Misconceptions about Stepper Motors Explained. Viitattu 15.5.2023. Saatavissa <https://www.machinedesign.com/motors-drives/article/21835161/misconceptions-about-stepper-motors-explained>
- Mecatroplan. 2023. Viitattu 26.5.2023 Saatavissa <https://www.mecatroplan.com/fi/>



Orientalmotor. 2020. Motor Sizing Basics Part 2: How to Calculate Load Inertia. Viitattu 24.4.2023. Saatavissa <https://blog.orientalmotor.com/motor-sizing-basics-part-2-load-inertia>

Orientalmotor. 2023a. Basics of Stepper Motors. Viitattu 20.5.2023. Saatavissa <https://www.orientalmotor.com/stepper-motors/technology/stepper-motor-basics.html>

Orientalmotor. 2023b. Structure of Stepper Motors. Viitattu 11.3.2023. Saatavissa <https://www.orientalmotor.com/stepper-motors/technology/stepper-motor-overview.html>

Sanyo Denki. 2023. 2-Phase Stepping Systems F2. Viitattu 22.5.2023. Saatavissa [https://publish.sanyodenki.com/SANMOTION\\_F2\\_E/book/index.html#target/page\\_no=24](https://publish.sanyodenki.com/SANMOTION_F2_E/book/index.html#target/page_no=24)

Mundrathi, R. 2021. Stepper Motor, Advantages, Disadvantages, Applications, Working. Viitattu 10.1.2024. Saatavissa <https://cselectricalandelectronics.com/stepper-motor-advantages-disadvantages-applications-working/>

Tang, J. 2021. The Choice Between Servo Motors and Stepper Motors. Viitattu 20.5.2023. Saatavissa <https://blog.orientalmotor.com/the-choice-between-servo-motors-and-stepper-motors>

Thomas. 2024. All About Rack and Pinion Gears - What They Are and How They Work. Viitattu 10.1.2024. Saatavissa <https://www.thomasnet.com/articles/machinery-tools-supplies/rack-and-pinion-gears/#:~:text=Racks%20and%20pinions%20are%20power,its%20the%20only%20cylindrical%20gear>

Transfer Multisort Elektronik. 2020. Askelmoottori: askelmoottorien tyyppi ja käyttökohteet. Viitattu 26.05.2023 Saatavissa <https://www.tme.eu/fi/news/library-articles/page/41861/askelmoottori-askelmoottorien-tyypit-ja-kayttokohteet/>

Verch, M. 2021. 2021. Flickr. Viitattu 10.1.2024. Saatavissa <https://www.flickr.com/photos/30478819@N08/51004994357>