

Jori Turja

Askelmoottorin testaaminen ja soveltuvuus xy-nosturiin

Metropolia Ammattikorkeakoulu

Kone- ja tuotantotekniikka

Insinöörityö

29.09.2017

Tekijä Otsikko	Jori Turja Askelmoottorin testaaminen ja soveltuvuus xy-nosturiin
Sivumäärä Aika	41 sivua + 5 liitettä 29.9.2017
Tutkinto	Insinööri (AMK)
Koulutusohjelma	Kone- ja tuotantotekniikka
Suuntautumisvaihtoehto	Koneautomaatio
Ohjaaja	Lehtori Antti Liljaniemi
<p>Tämän insinööryön tarkoitus oli testata askelmoottorin ja ohjauskortin kunto, sekä selvittää näiden sopivuus Metropolia Ammattikorkeakoulun xy-nosturiin. Työn tavoitteena oli myös löytää parhaat mahdolliset asetukset, sekä moottorille, että ohjauskortille xy-nosturin akselien liikuttamiseen.</p> <p>Insinööryössä laitteisto testattiin Siemensin S7-1200 PLC:llä. Testit suoritettiin Electro Craftin LH2322-P300A13-hybridi-askelmoottorin sarjaan ja rinnankytkennälle. Ohjauskortina moottorille käytettiin Electromenin EM-314 bipolar-ohjauskorttia, joka testien perusteella riittää tehoiltaan kyseiselle moottorille, etenkin mikroaskellusmoodissa. Moottorissa riittäisi kuitenkin enemmän potentiaalia, mikä saavutettaisiin tehokkaammalla ohjauskortilla. Askelmoottorin kytkennöistä xy-nosturiin sopivammaksi ilmeni rinnankytkentä, sen salliessa hieman nopeammat kiihtyvyydet ja nopeudet ilman resonanssia. Ohjauskortin askellusmoodiksi valikoitui parhaaksi mikrosteppaus resoluutiolla 3200 askelta per kierros.</p> <p>Opinnäytetyössä syvennytään eri askelmoottorityyppien toimintaperiaatteeseen ja niiden ominaisuuksiin, sekä erilaisiin askelmoottorien ohjauskortteihin. Lisäksi työssä käydään moottorien ja ohjauskorttien yksityiskohtainen kytkeminen ohjelmitavalle logiikalle, kuten PLC:lle ja Arduinolle. Työssä kerrotaan myös yksinkertaiset tavat ohjata moottoria niin PLC:llä, kuin myös Arduinolla.</p> <p>Työn tuloksena saatiin askelmoottoreista ja niiden toiminnasta, sekä ohjaamisesta kattava teoria, jonka pohjalta olemassa olevat moottorit voidaan kytkeä xy-nosturiin parhaan suorituskyvyn saavuttamiseksi. Työn pohjalta nosturiin voidaan myös suunnitella mahdollisia parannuksia ja laitteistouudistuksia.</p>	
Avainsanat	Askelmoottori, PLC, ohjauskortti, bipolar, unipolar

Author Title Number of Pages Date	Jori Turja Configuration and Compatibility of a Stepper Motor with an XY Crane 41 pages + 5 appendices 29 September 2017
Degree	Bachelor of Engineering
Degree Programme	Mechanical engineering
Specialisation option	Machine automation
Instructor	Antti Liljaniemi, Principal lecturer
<p>The objective of this Bachelor's thesis was to test the current state of a stepper motor and a driver as well as to find out whether they are compatible with the XY crane of Metropolia University of Applied Sciences. Another objective was to find out the best settings for both the motor and the driver to control the axles of the XY crane.</p> <p>In this thesis, the mentioned devices were tested with Siemens S7-1200 PLC. The tests were performed to Electro Crafts LH2322-P300A13 hybrid stepper motor for both series and parallel connections. The Electromens EM-314 bipolar driver was used to control the stepper motor. The driver was powerful enough to drive this stepper motor especially in microstepping mode. However, there was more available potential in this stepper motor that this driver could not achieve. The most efficient and suitable connection for the stepper motor was found out to be a parallel connection. For the driver, the microstepping mode with the resolution setting of 3200 steps per revolution reached this driver's peak performance.</p> <p>This thesis analyzes three separate stepper motor types by their functionality and features and how to control them with different drivers. In addition, this thesis examines how to connect different stepper motors and drivers to a programmable logic device like a PLC and Arduino. In addition, simple ways to control this stepper motor with both a PLC and Arduino are discussed.</p> <p>As a result of this thesis, inclusive information about stepper motors and their functionality to control an XY crane with a PLC or Arduino with peak performance were obtained. On the basis of this thesis, possible improvement solutions for XY cranes can also be designed.</p>	
Keywords	Stepper motor, PLC, driver, bipolar, unipolar

Sisällys

Lyhenteet

1	Johdanto	1
2	Askelmoottori	2
2.1	Rakenne ja toiminta	3
2.1.1	Kestomagneetti-askelmoottori (PM)	4
2.1.2	Reluktanssi-askelmoottori (VR)	7
2.1.3	Hybridi-askelmoottori (HB)	9
2.2	Bipolar- sekä unipolar-vaihtetyypit	11
2.3	Työssä käytetty askelmoottori	12
3	Askelmoottorin ohjaaminen	13
3.1	Työssä käytetty moottorin-ohjauskortti	16
3.2	Moottorin ohjauskortin konfigurointi, PC-sovellus	17
3.3	Moottorin kytkeminen ohjauskorttiin	18
4	Askelmoottorin käyttökoonpano	20
4.1	Yhteyden muodostaminen PLC:n ja PC:n välillä	20
4.2	Askelmoottorin konfigurointi PLC:lle	24
4.3	PLC:llä ohjaaminen	27
4.4	Arduinolla ohjaaminen	29
5	Moottorien ja ohjauskorttien testaaminen	32
6	Tulosten tarkastelu ja johtopäätökset	34
7	Kehitysideat ja yhteenveto	36
	Lähteet	38

Liitteet

Liite 1. NEMA-standardin mukaiset moottorikoot

Liite 2. PI-kaavio

Liite 3. Ohjauskortin tekniset tiedot

Liite 4. Askelmoottorin tekniset tiedot

Lyhenteet

CD	Compact disc. Optinen levy (CD-levy).
CNC	Computer numerical control. Tietokonenumeerinen ohjaus.
DC	Direct current. Tasavirta
DVD	Digital versatile disc. Digitaalinen videolevy (DVD-levy).
HB	Hybrid stepper motor. Hybridi-askelmoottori.
IP	Internet protocol. Internet-protokolla tiedon liikuttamiseen verkossa.
NEMA	National Electrical Manufacturers Association. Kansainvälinen standardi liitto. NEMA liitteen omaavat askelmoottorit sisältävät standardin vaatimat ominaisuudet sekä koon. Katso liite 1.
PLC	Programmable logic computer. Ohjelmoitava logiikka tietokone.
PM	Permanent magnet stepper motor. Kestomagneetti-askelmoottori.
RPM	Revolutions per minute. Kierrosta/minuutissa.
PTO	Pulse train output.
PTW	Pulse width modulation.
TTL	Transistor Transistor Logic. Transistoriohjattu logiikka.
USB	Universal serial bus. Yleinen sarjaväyläteknikkaa hyödyntävä liitäntästandardi.
VR	Variable reluctance stepper motor. Reluktanssi-askelmoottori.
3D	3 dimensional. Kolmiulotteinen.

1 Johdanto

Tässä insinööriyössä tutkitaan Electromenin bipolar-ohjauskortin EM-314, sekä Electro Craftin hybridi-askelmoottorin LH2322-P300A13 kunto ja pyritään selvittämään, kykeneekö kyseinen ohjauskortti ajamaan tätä moottoria moottorin täydellä potentiaalilla.

Aluksi työssä paneudutaan askelmoottorin rakenteeseen, kolmeen perus askelmoottoriin ja näiden toimintaperiaatteeseen, sekä erilaisiin ohjauskortteihin ja niiden toimintaan. Työssä tarkastellaan myös käytettyä laitteistoa yksityiskohtaisesti, sekä esitellään sen keskeisimmät ominaisuudet.

Seuraavaksi suoritetaan askelmoottorien testaus, jossa käytetään Siemensin S7-1200 PLC-logiikkaa. Testissä haetaan ohjauskortin maksimaalinen suorituskyky edellä mainitulle askelmoottorille, ja lopuksi esitellään parhaan suorituskyvyn tuottavat asetukset, sekä pohditaan mahdollisia parannusehdotuksia xy-nosturin mekaniikalle.

Tutkimuksessa pohditaan myös edellä mainitun laitteiston toimivuutta Metropolia Ammattikorkeakoulun xy-nosturissa, sekä sitä, millä ohjauskortin ja moottorin konfiguroinneilla ne toimisivat ihanteellisimmin xy-nosturin mekaniikassa, tuottaen tarkan askelluksen ja hiljaisen toiminnan kuitenkin pitäen xy-nosturin liikkeet nopeana ja sallien suuret kiihtyvyydet ilman resonointia ja värinöitä.

Xy-nosturi on koululla sijaitseva noin 50 cm x 50 cm x 50 cm suuruinen nosturin runko, joka pohjautuu vanhaan 3D-tulostimeen. Nosturissa on valmiudet kiinnittää kaksi moottoria, joilla voidaan liikuttaa kahta akselia xy-tasossa.

Työssä ohjeistetaan laitteiston käyttöönotto vaihe vaiheelta, sekä kytkeminen PLC-logiikalle, samoin kuin myös Arduinolle. Työssä esitellään myös yksinkertaiset tavat ohjata moottoreita kummallakin eri logiikalla.

2 Askelmoottori

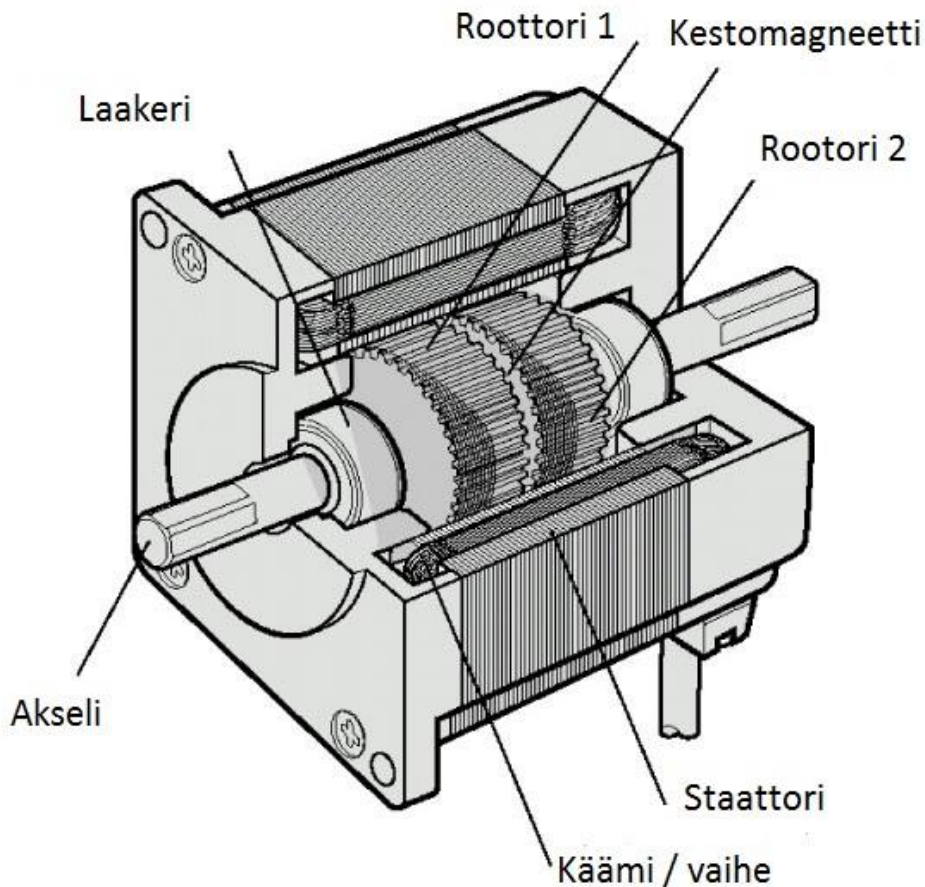
Askelmoottori on DC-moottori, joka soveltuu tarkkaan paikoitukseen, sekä täten mahdollistaa tarkan nopeuden säädön. Askelmoottori on suunniteltu maltillisille nopeuksille, yleensä alle 1500 rpm, poikkeuksia lukuun ottamatta. Moottorin yksi suurimmista eduista on, että sillä on maksimi vääntömomentti pysähdyksissä, kääntöpuolena kuitenkin nähtäköön nopeuden kasvaessa vääntömomentin pienentyminen. Koska askelmoottori liikkuu tarkan mittaisia askelia, voidaan sitä käyttää paikoitusta vaativissa sovelluksissa ilman takaisinkytkentää eli kulma-anturia. Tämä vähentää laiteinvestointeja, sekä yksinkertaistaa mahdollista kokoonpanorakennetta. Askelmoottoreita käytetään muun muassa CD/DVD-aseissa levyn laserlukijan paikoitukseen, CNC-koneissa karan kääntämiseen ja liikuttamiseen, sekä roboteissa että 3D-printtereissä. Moottoreita on monen kokoisia alkaen sormenpäänkokoisista aina NEMA-57-kokoisiin asti. Rakenteeltaan ja ominaisuuksiltaan moottoreita on useita riippuen käyttökohteesta ja sovelluksen asettamista rajoitteista. Askelmoottorin rakenteeseen ja ominaisuuksiin syvennyttään seuraavissa luvuissa. Ks. alla oleva kuva 1 testissä käytetystä hybridi-askelmoottorista.



Kuva 1. Hybridi-askelmoottori, NEMA-23.

2.1 Rakenne ja toiminta

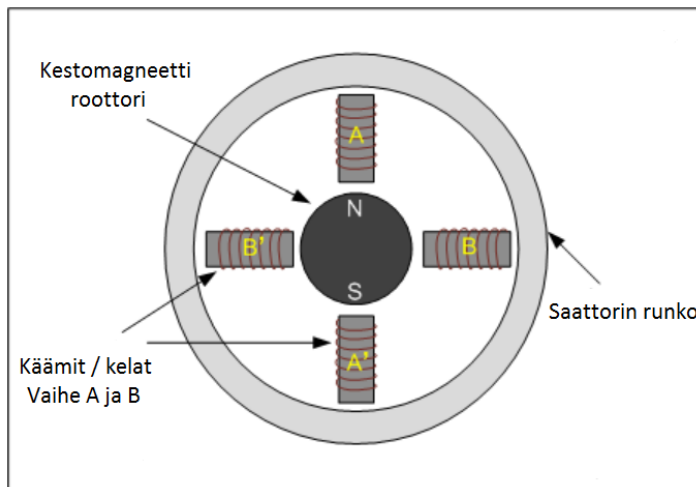
Askelmoottori ja perinteinen DC-moottori, muistuttavat toisiaan niin ulkonäöllisesti kuin myös rakenteellisesti. Kumpikin moottori omaa rungon, staattorin, roottorin, laakerit jne. Poikkeavuudet ilmenevät osatasolla, kun tarkastellaan osien rakennetta, joka johtaa hyvin erilaiseen toimintaan. Toisin kuin tavallinen DC-moottori, joka pyörii jatkuvasti, askelmoottori pyörii tietyn mittaisia pyörähdyksiä, joita kutsutaan "askeleiksi". Täten siis askelmoottorin täysi pyörähdys jakaantuu tietyksi askelmääräksi moottorin rakenteesta riippuen. Askelmäärä kertoo moottorin resoluution, eli tarkkuuden. Yleisimmät askelmoottorien resoluutiot ovat 12, 24, 72, 144, 180, 200 ja 400 askelta kierrosta kohti. Askelmoottori pyörähtää toisin sanoen 30, 15, 5, 2.5, 2, 1.8 tai 0.9 astetta per askel. Askelmoottorin pyörittäminen ei kuitenkaan ole yhtä yksinkertaista, kuin tavallisen tasavirtamoottorin. Siihen tarvitaan tietynlainen ohjauskortti, joka ohjaa tasavirtaa askelmoottorin käämeille eli vaiheille, tähän syvennyttään seuraavassa luvussa. Seuraavaksi tarkastellaan kolmen yleisimmän askelmoottorin rakennetta ja toimintaa. Kuva 2 havainnollistaa askelmoottorin rakennetta. [1.]



Kuva 2. Hybridi-askelmoottorin rakenne [2].

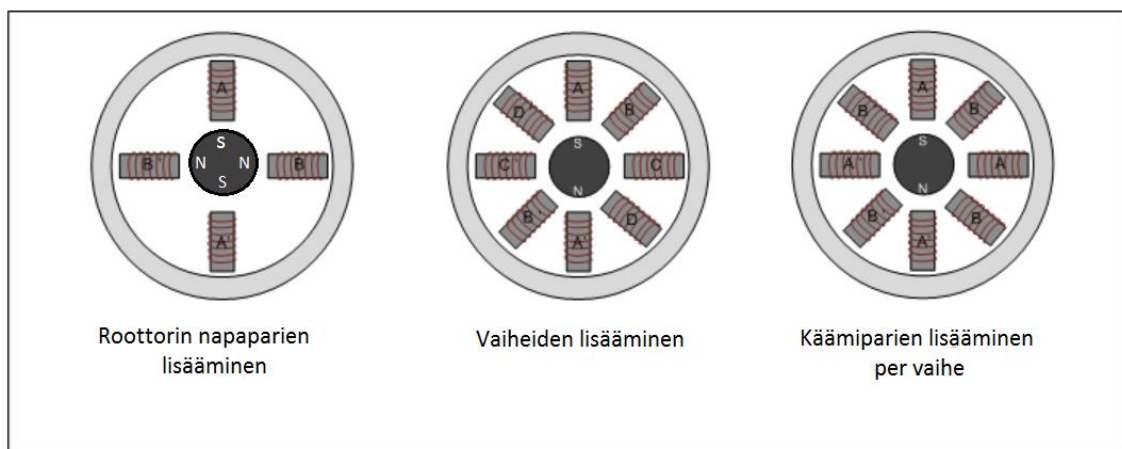
2.1.1 Kestomagneetti-askelmoottori (PM)

Kestomagneetti-askelmoottori, eli toisilta nimiltään ”tin can” tai ”canstock” on edullinen matalaresoluutioinen askelmoottori. PM-moottorien resoluutio rajoittuu yleensä 12 – 48 askeleeseen per kierros, rakenteellisista rajoituksista johtuen. Moottorin etuja ovat hyvin matala roottorin inertia ja suuri pitovääntömomenti verrattane muihin tyypeihin. Moottorin rakenteeseen nimensä mukaisesti on lisätty kestomagneetti. Kestomagneetti sijaitsee roottorissa, joka on magnetoitu vuoroittain pohjois- ja etelänavoilla suoraan linjaan rinnakkain roottorin akselille. [4; 5; 6.]



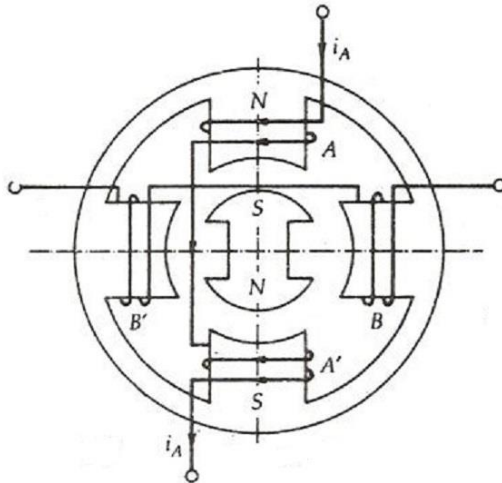
Kuva 3 Kestomagneetti-askelmoottorin staattori ja roottori [3].

Kestomagneetti-askelmoottorin resoluutiota voidaan kasvattaa, joko lisäämällä vaiheita staattorille, lisäämällä roottorille enemmän napapareja tai lisäämällä käämipareja vaihetta kohti. Edellä mainittuja tapoja voidaan käyttää myös rinnakkain samassa moottorissa lisäämään resoluutiota. [4; 5; 6.]



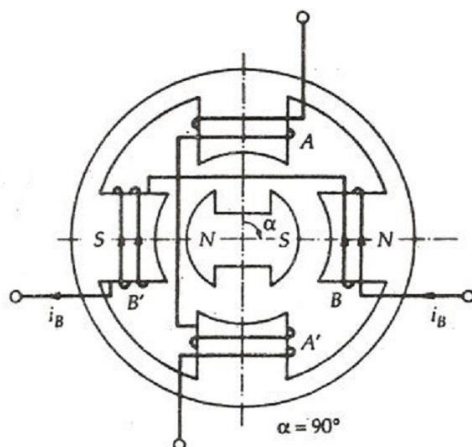
Kuva 4. Kestomagneetti-askelmoottorin resoluutioon vaikuttavat tekijät [3].

Tarkastellaan seuraavaksi 2-vaiheisen PM-moottorin toimintaperiaatetta. Kumpikin vaihe sisältää yhden napaparin. Napaparit sijaitsevat vastakkaisilla puolilla staattorin rungolla ja parit on käämitty sarjaan siten, että kun vaihe energisoidaan, toinen käämeistä muodostaa elektromagneettisen pohjoisnavan ja toinen etelänavan. [4; 5; 6.]



Kuva 5. A-vaiheen energisointi [4].

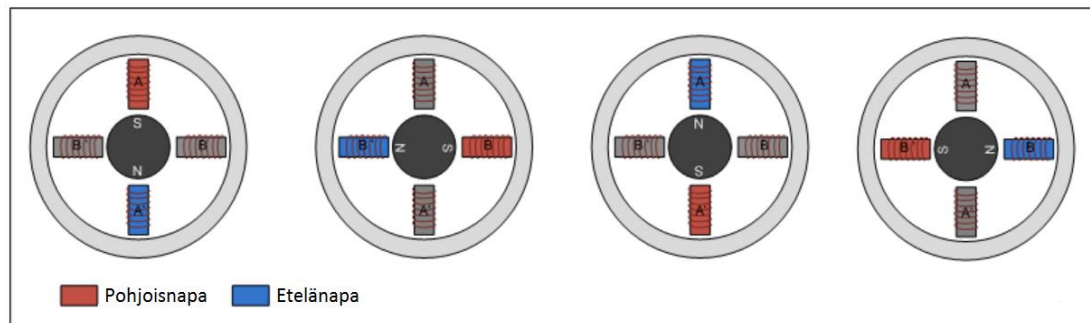
Kuten kuvasta 5 nähdään vaiheelle A tuleva virta i_A muodostaa ylemmälle käämille pohjoisnavan ja alemmalle käämille etelänavan. Tämä vetää puoleensa roottorin vastakkaisesti magnetisoituja napoja. Vaiheen A ollessa energisoituna roottori pysyy paikallaan. Tässä tilanteessa askelmoottorin vääntömomentti on suurimmillaan (pitovääntömomentti). Kun roottoria halutaan kääntää siten, että roottorin etelänapa kääntyy 90° oikealle, on vaihe A sammutettava ja vaihe B energisoitava, kuvan 6 mukaisesti. [4; 5; 6.]



Kuva 6. B-vaiheen energisointi [4].

Nyt roottori on kääntynyt 90° oikealle ja pysyy taas paikoillaan. Tätä äskeistä liikettä kutsutaan askeleeksi ja tässä tapauksessa moottorin resoluutio 4 askelta eli 90° per askel. Kun roottoria halutaan kääntää samaan suuntaan jälleen 90° on vaihe B sammutettava ja vaihe A energisoitava, sillä erotuksella ensimmäiseen vaiheeseen, siten että virran suuntaa vaiheessa A on muutettava päinvastaiseksi, jolloin ylemmälle käämille muodostuu etelänapa ja alemmalle käämille pohjoisnapa. [4; 5; 6.]

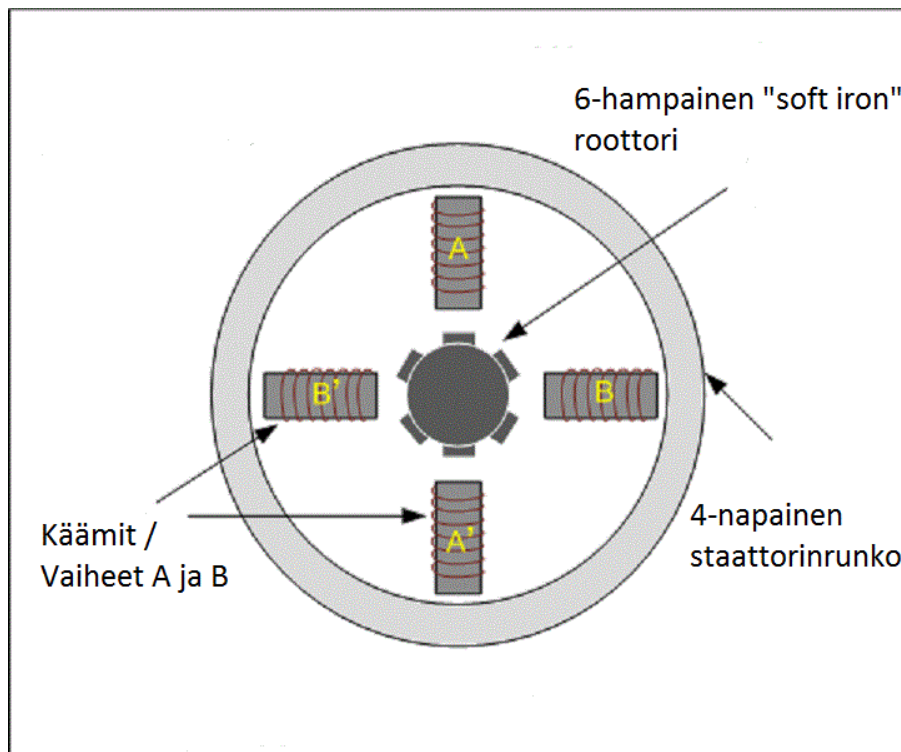
Edelleen pyörinnän jatkamiseksi on vaihe A sammutettava ja vaihe B energisoitava kääntäen virta päinvastaiseksi vaiheessa B. Täyteen kierrokseen pääsemiseksi on ensimmäinen vaihe suoritettava uudestaan. Näitä neljää vaihetta toistamalla voidaan pyörittää roottoria myötäpäivään tai vastaavasti vastapäivään tekemällä vaiheet samassa järjestyksessä, mutta kääntäen virran suunnan päinvastaiseksi jokaisessa vaiheessa. [4; 5; 6.]



Kuva 7. Kestomagneetti-askelmoottorin 270° :n käännös [3].

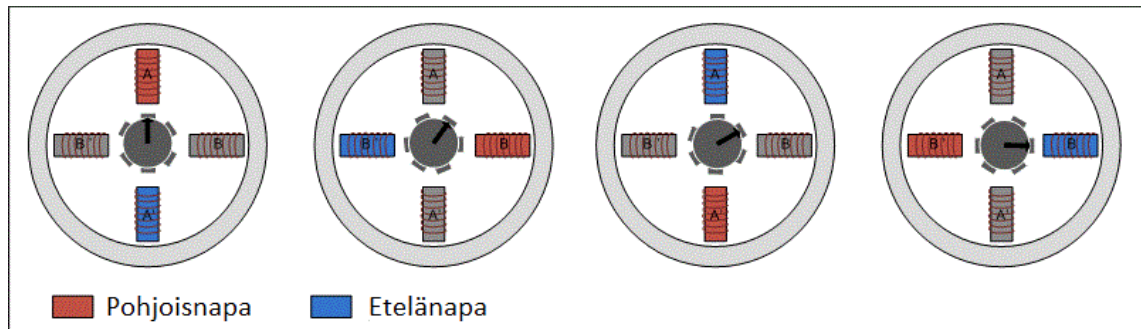
2.1.2 Reluktanssi-askelmoottori (VR)

Reluktanssi-askelmoottori on rakenteellisesti yksinkertaisin ymmärrettävä askelmoottorityyppi. Toisin kuin edellisessä moottorityypissä roottoria ei ole magnetisoitu, vaan se on materiaaliltaan meltorautaa (soft iron). Meltorauta on matalahiilipitoista helposti magnetisoituvaa rautaa. Toisena erona PM-moottoriin on hammastettu roottori, sekä mahdollisesti hammastetut staattorin navat. Ks. kuva 8 VR-askelmoottorin rakenteesta.



Kuva 8. 2-vaihe reluktanssi-askelmoottorin roottori ja staattori [7].

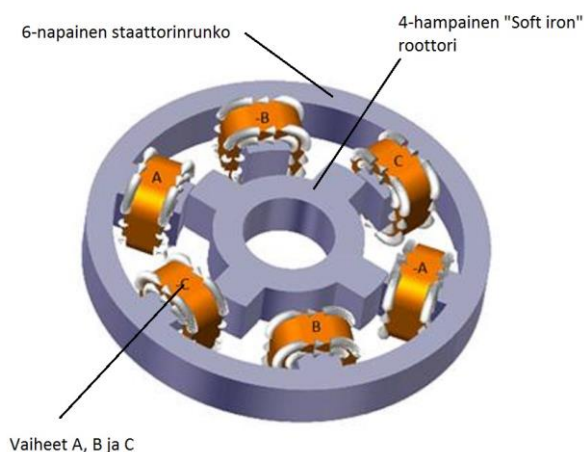
VR-moottorin toiminta perustuu magneettivirran pyrkimykseen kulkea pienireluktantti-sinta polkua pitkin, aivan kuten sähkövirta pyrkii kulkemaan pieniresistanssisinta reittiä pitkin, pyrkii magneettivirta samaan. Kun Vaihe A energisoidaan kuvan 5 mukaisesti, luo se käämille A elektromagneettisen pohjoisnavan ja käämille A' elektromagneettisen etelänavan aivan kuten PM-moottorissa. Koska roottori on helposti magnetisoituva, pyrkii roottori kääntymään siten, että hampaat ovat suorassa linjassa energisoitujen staattorinapojen kanssa. Tällöin magneettivirralla on lyhin mahdollinen matka ilmassa, ja koska ilma on reluktanttisuudeltaan huomattavasti suurempaa kuin meltorauta, kulkee magneettivirta näin ollen helpointa mahdollista reittiä. Kuvassa 9 havainnollistetaan VR-moottorin pyörimistä. [7; 8.]



Kuva 9. 2-vaihe VR-moottorin työkierto (kolme askelta oikealle) [8].

VR-moottorissa on aina eri määrä roottorin hampaita kuin staattorin napapareja, joista jälkimmäisiä yleensä kolme tai viisi. Roottori on suunniteltu siten, että vain yksi roottorin hammas, sekä sen vastakkainen hammas ovat linjassa staattorin napoihin kerrallaan. Vaiheet on kytketty yhteiseen maahan, tällöin 2-napaisesta VR-moottorista tulee ulos kolme johdinta, toisin kuin PM-moottorissa, jossa vaiheet ovat kokonaan erillisiä ja samaisessa tapauksessa tulisi moottorista ulos neljä johdinta. [7; 8.]

VR-moottorin pyöriminen perustuu samaan ideaan kuin PM-moottori, kuitenkin erona näillä kahdella on roottorin erilainen rakenne. Tästä johtuen VR-moottorin resoluutiota on helpompi kasvattaa PM-moottoria suuremmaksi, mutta vääntömomentin ollessa PM-moottoria pienempi. Yllä olevan kuvan moottori on resoluutioltaan 12 askelta. VR-moottorin resoluutiota on helppo kasvattaa roottorin hammastuksella ja toisena keinona voidaan käyttää vaiheiden lisäämistä staattorille. Yleinen resoluutio on 144 – 400 askelta per kierros. [7; 8.]



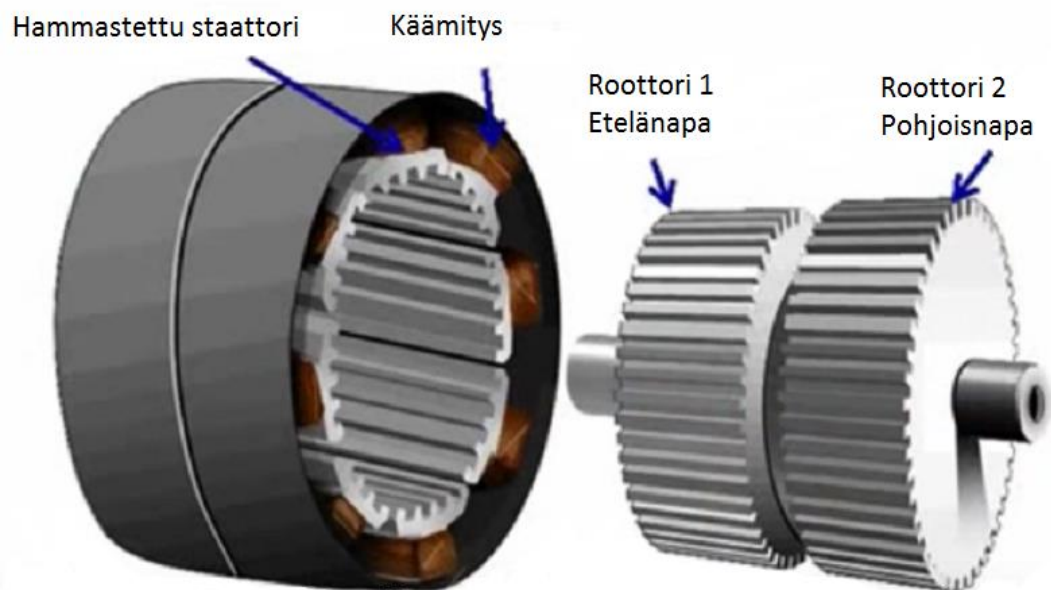
Kuva 10. Reluktanssi-askelmoottorin staattori ja roottori [8].

Kuvasta voidaan huomata, että roottorin ja staattorin napojen lukumäärät ovat keskenään erisuuret pyörinnän mahdollistamiseksi.

2.1.3 Hybridi-askelmoottori (HB)

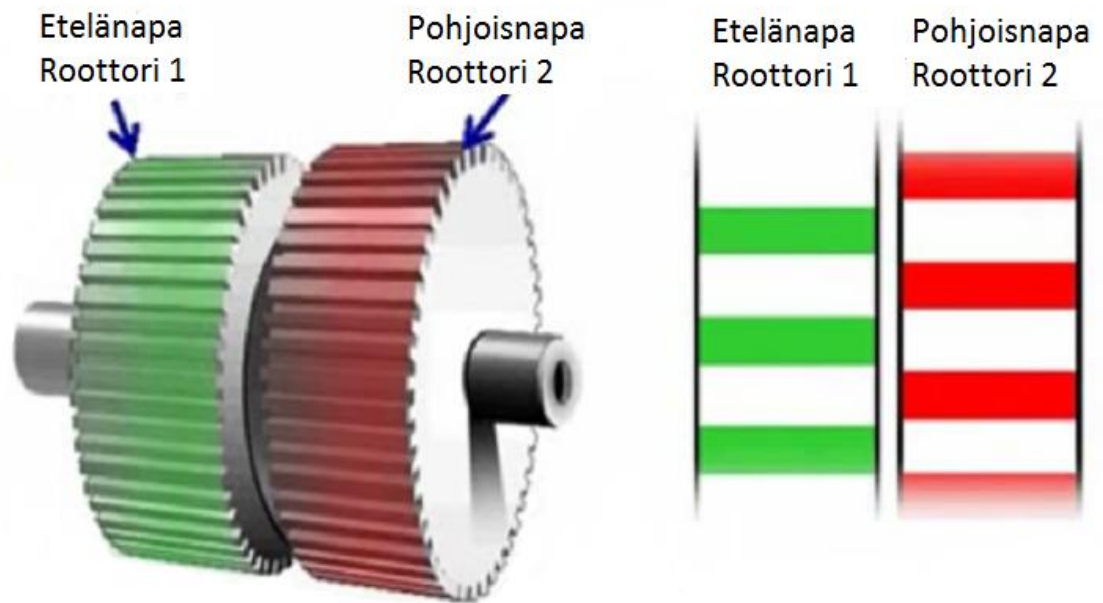
Kuten niminkin viittaa, on hybridi-askelmoottori yhdistelmä PM- ja VR-askelmoottoreista. Se yhdistää molempien edellä mainittujen tyyppien parhaat ominaisuudet, kuten PM-moottorin suuren vääntömomentin, sekä VR-moottorin korkean resoluution ja nopeuden. Tyypillinen resoluutio HB-moottoreille on 100 – 400 askeleeseen eli 3.6° – 0.9° . HB-moottori on arvokkaampi kuin PM- tai VR-moottori, mutta se on huomattavasti joustavampi erilaisissa käyttökohteissa suuren resoluutionsa, sekä suuren vääntömomenttinsa ansiosta. [9; 10.]

HB-moottorin roottori on hammastettu kuten VR-moottori ja roottoriin on lisätty PM-moottorin tavoin kestmagneetti. Kestomagneetti ei kuitenkaan ole kohtisuorassa akselia vasten vaan akselin pituus suuntaisesti. Myös staattori on HB-moottoreissa hammastettu (kuva 11). Hammastuksen ja kestmagnetisoidun roottorin ansiosta päästään suureen resoluutioon sekä suorituskyyn, eli vääntömomenttiin. [9; 10.]



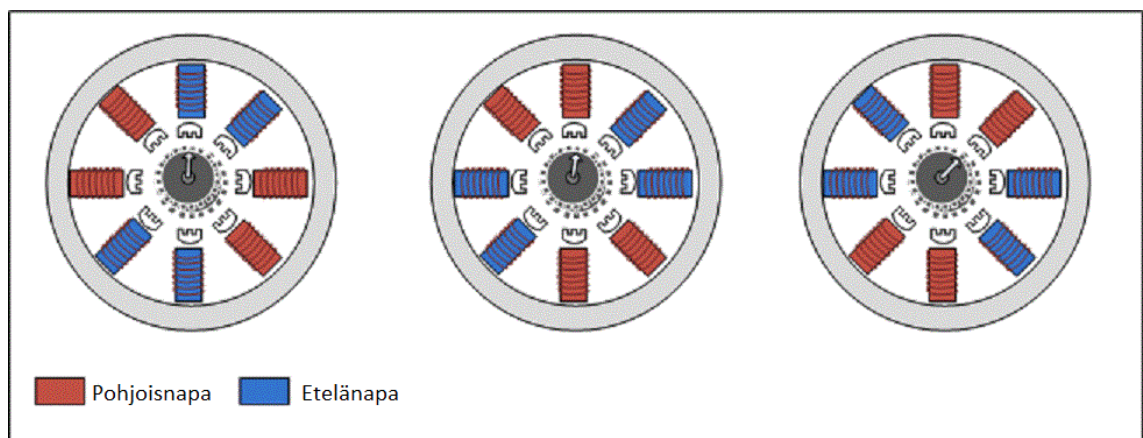
Kuva 11. Hybridi-askelmoottorin rakenne [9].

Roottori 1 ja 2 ovat hammastettu siten, että ne hammastukset ovat keskenään limittäin (kuva 12).



Kuva 12. HB-moottorin roottori(t) [9].

HB-moottori toimii aivan kuten kaksi edellistä tyyppiä, vaiheita energisoimalla tietyssä sekvenssissä. Kun akselia halutaan kääntää myötäpäivään, suoritetaan seuraavaa sekvenssiä (kuva 13).

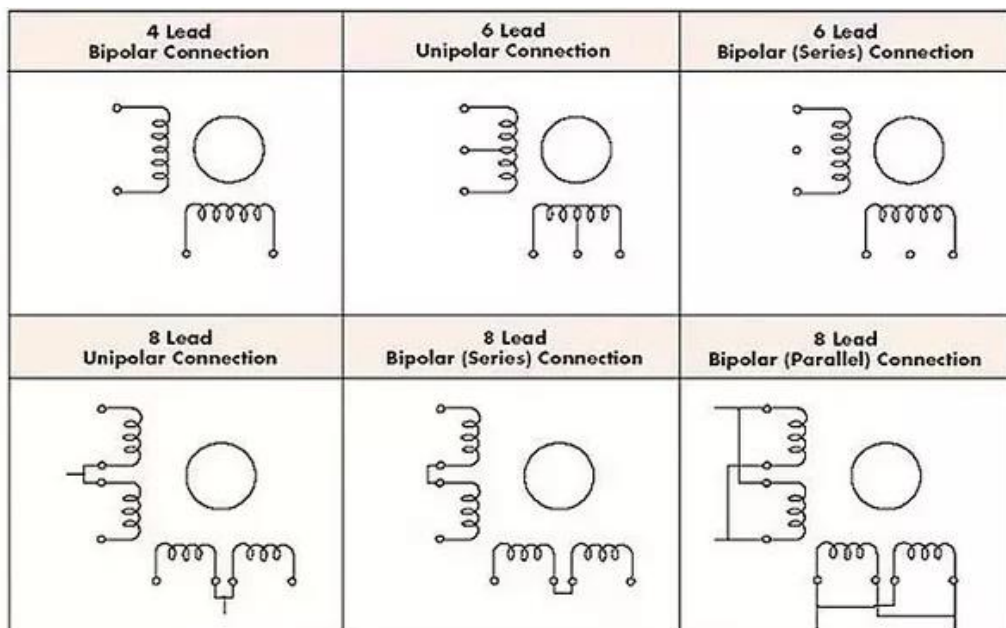


Kuva 13. HB-askelmoottorin toiminta [10].

2.2 Bipolar- sekä unipolar-vaihetyytit

Askelmoottorit voidaan kategorioida paitsi roottorityyppien, myös vaihetyyppien mukaan. Kaksi yleisesti käytettyä ovat unipolar- sekä bipolar-vaihetyytit. Bipolar-kytkennässä on yksi käämintä per vaihe, kun taas unipolar-kytkennässä vaiheella on kaksi käämintä. Kummassakin kääminnässä on omat vahvuutensa ja heikkoutensa.

Unipolar-moottoria on helppo ohjata kahden käämintänsä per vaihe ansiosta, koska käämissä kulkevaa virtaa ei tarvitse kääntää vastakkaiseksi muuttaakseen navan polaarisuutta. Bipolar-moottorissa taas virran suuntaa on muutettava navan polaarisuuden vaihtamiseksi. Tämä ei onnistu enää ilman siihen soveltuvaa ohjaukorkorttia. Bipolar-moottori omaa kuitenkin suuremman vääntömomentin, kun verrataan samankokoiseen unipolar-moottoriin. Tämä johtuu siitä, että unipolar-moottorissa vain puolet käämin pituudesta on käytössä, kun taas bipolar-moottorissa koko käämi on energisoituna. Monipuolisimmat moottorit ovat 6-johtiminen unipolar- tai 8-johtiminen bipolar-moottori. Näistä ensimmäinen voidaan kytkeä kaksi vaiheiseksi bipolar-moottoriksi tai kaksi vaiheiseksi unipolar-moottoriksi. 8-johtiminen eli 4-vaiheinen bipolar-moottori voidaan kytkeä monella tapaa. Moottori voidaan kytkeä 6-johtimiseksi unipolar-moottoriksi tai 4-johtimiseksi bipolar-moottoriksi, jossa vaiheet on kytketty sarjaan tai rinnan, näissä kytkennöissä moottorin vääntömomentti on suurimmillaan. Ks. kuva 14 kytkennöistä. [13; 14.]



Kuva 14. Kytkentä diagrammi [13].

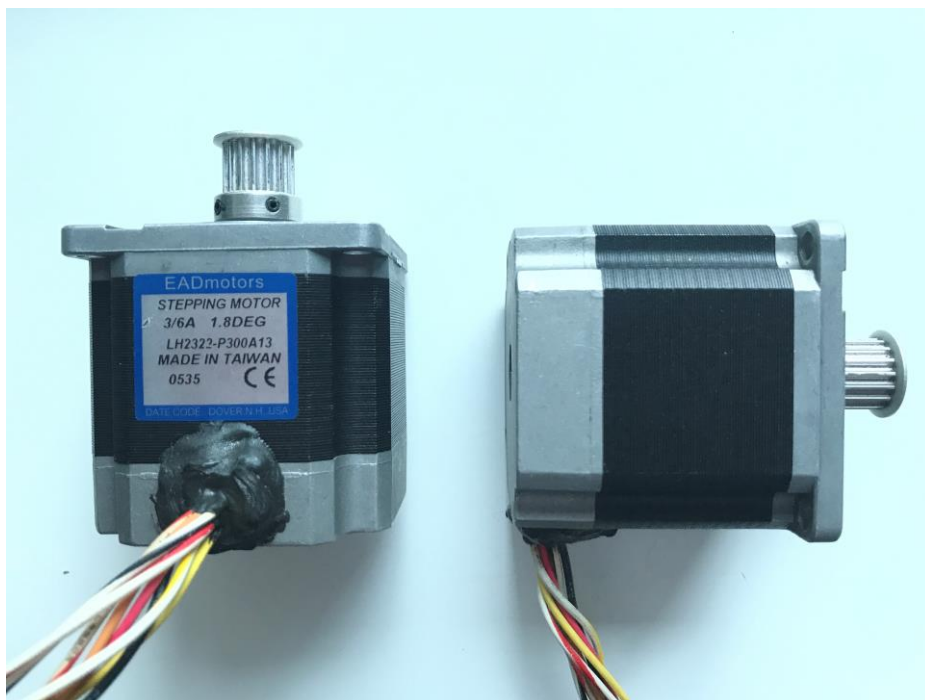
2.3 Työssä käytetty askelmoottori

Testattava askelmoottori on EAD motorsin (nykyään Electro Craft) valmistama 4-vaiheinen bipolar-hybridi-askelmoottori. Moottori on valmistettu v. 2005 ja sen tyyppikoodi on LH2322-P300A13. Moottorin ilmoitetut tekniset tiedot näkyvät taulukossa 1.

Taulukko 1. LH2322-P300A13 tekniset tiedot [11]

Bipolar tekniset tiedot	Sarja	Rinnan
Nimellis jännite (Vm) DC	2,28	1,14
Virta (A) / vaihe	3	6
Resistanssi R_m (Ω) / vaihe	0,86	0,22
Min pitovääntö (Nm)	1,06	
Askel kulma (aste)	1,8	
Askel tarkkuus (%)	3	
Roottorin inertia ($\text{Kg} \cdot \text{cm}^2$)	0,247	
Paino (Kg)	0,68	
Käämien lkm.	16	

Moottorin laippa on NEMA-23 standardin mukainen ks. liite 1. Muut moottorin päämitat ja tekniset tiedot löytyvät liitteestä 4. Full step eli nimellisresoluutio on 200 askelta per kierros. Moottorin neljä vaihetta voidaan kytkeä pareittain, joko sarjaan tai rinnan. [11.]




Kuva 15. LH2322-P300A13.

3 Askelmoottorin ohjaaminen

Askelmoottorin pyörittäminen tarvitsee muutakin kuin virtalähteen. Moottorin toiminta vaatii juuri tähän tarkoitukseen suunnitellun ohjauskortin, jotka jakaantuvat karkeasti kahteen luokkaan, unipolar- ja bipolar-moottorin-ohjauskortit. Jako johtuu moottorin kytkennästä, bipolar-moottorin ollessa hieman monimutkaisempi ohjata kuin unipolar-moottori. Askelmoottoria voidaan ohjata digitaalisilla pulsseilla eli moottoria voidaan ohjata avoimessa silmukassa, jolloin takaisinkytkentää sijaintitiedolle ei tarvita. Tämä tekee askelmoottorista erinomaisen ratkaisun yksinkertaiseen sovellukseen, jossa tarvitaan tarkkaa paikoitusta.

Kuten todettua askelmoottorin pyöriminen perustuu vaiheiden energisoimiseen tietyssä sekvenssissä ja yksinkertaisimmillaan unipolar-moottorin ohjaaminen voidaan toteuttaa virtalähteellä ja muutamalla transistorilla, jotka toimivat kytkiminä vaiheiden energisoimiseen. Bipolar-moottorin ohjaaminen on kuitenkin monimutkaisempaa, koska pyörimisen saavuttamiseksi on vaiheessa kulkevaa virtaa käännettävä, staattorin napojen magneettisuuden vaihtamiseksi, tähän tarkoitukseen käytetään yleensä H-bridge kytkentää. Kuvasta 16 voidaan todeta testauksessa käytetyn moottorin pyörintäsekvenssi myötäpäivään full step -moodissa neljän askeleen verran, vaiheiden ollessa kytkettynä sarjaan tai rinnan.

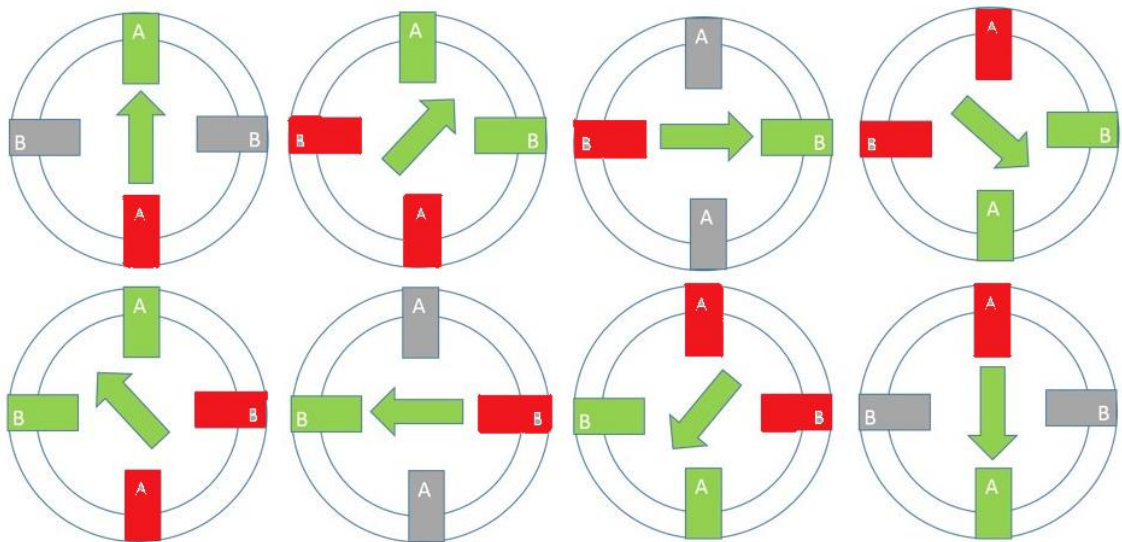


STEP	A	A'	B	B'
1	+	-	+	-
2	+	-	-	+
3	-	+	-	+
4	-	+	+	-

Kuva 16. Full step -sekvenssi.

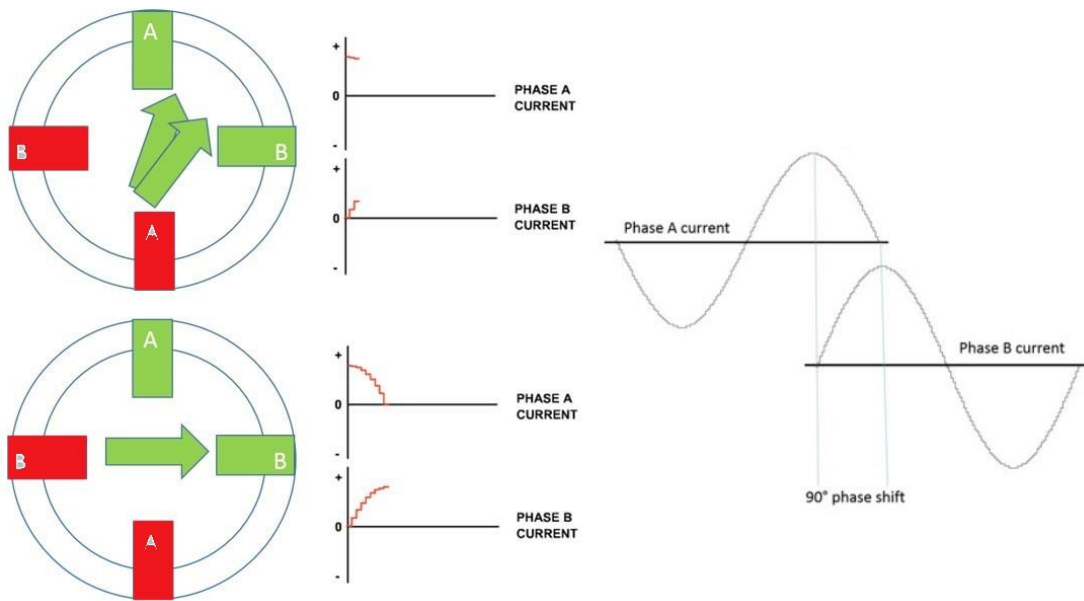
Askelmoottorin resoluutiota voidaan kuitenkin kasvattaa modernin ohjauk kortin avulla. Kolme yleisesti käytettyä moodia ovat edellä mainittu full step -moodi, sekä tämän lisäksi half step- ja microstepping-moodi. Näistä kahdella jälkimmäisestä voidaan kasvattaa askelmoottorin resoluutiota, vääntömomentin pienentymisen kustannuksella. Momentin pienentyminen on moottorikohtaista, mutta keskimäärin half step -moodissa noin 15 %. [12.]

Half step eli puoliaskellus-moodissa moottorin resoluutio kaksinkertaistuu. Resoluution lisäys saavutetaan 2-vaiheisessa moottorissa energisoimalla vuoroittain kahta vaihetta yhtäaikaaisesti, sekä vaihteita yksittäin tietyssä sekvenssissä. Ks. puoliaskellusta havainnollistava kuva 17.



Kuva 17. Puoliaskellus-moodi [12].

Kuvassa 17 moottorin full step -resoluutio olisi 4, kun puoliaskelluksessa se on 8. Suosituin tapa ohjata moottoria on microstepping-moodi eli mikroaskellus. Tässä moodissa ohjauk kortista riippuen voidaan moottorin ominaisresoluutiota kasvattaa jopa 256-kertaiseksi. Mikroaskelluksessa syötetään kumpaakin vaiheeseen (A ja B) siniaaltoa, jotka ovat keskenään 90°-vaihesiirrossa. Edelleen muokkaamalla siniaaltojen suuntaa ja virran amplitudia saadaan aikaan huomattavasti kontrolloidumpi pyöriminen, sekä vähennettyä moottorin askelluksesta johtuvaa värinämistä. Mikroaskelluksen hyötyjä resoluution kasvun, sekä värinän pienentymisen lisäksi on jatkuvasti ylläpidetty vääntömomentti, sillä kun siniaallot ovat keskenään 90°:n vaihesiirrossa toisen vaiheen virran pienentyessä toisen vaiheen virta kasvaa. Ks. havainnollistava kuva 18 mikroaskelluksesta. [12.]



Kuva 18. Mikroaskellus-moodi [12].

Sopivaa ohjauk korttia valittaessa tulee ainakin seuraavat asiat ottaa huomioon:

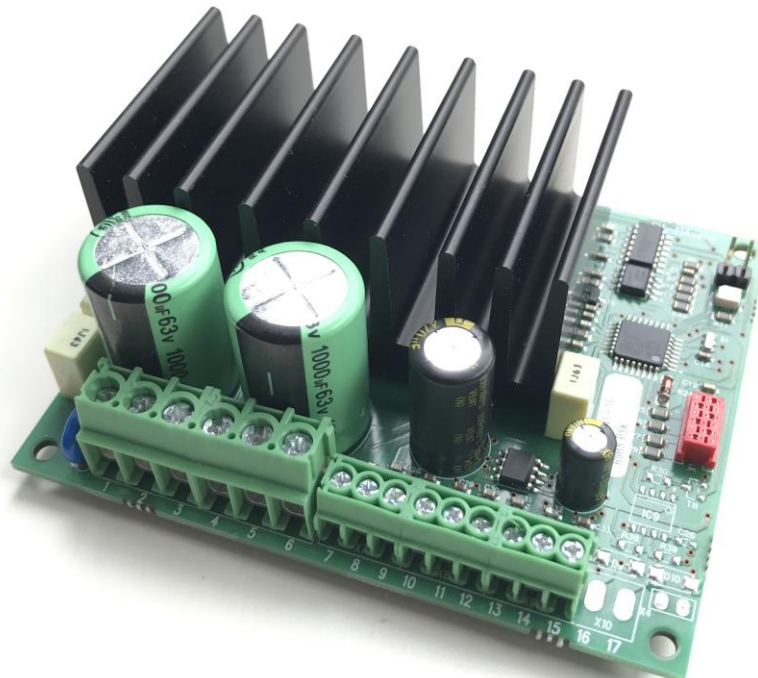
1. Onko kyseessä bipolar- vai unipolar-vaihtetypin moottori
2. Moottorin käyttöjännite ja vaiheelle syötettävä virta
3. Vaadittavat askellusmoodit sekä nopeus- ja vääntöominaisuudet.



Kuva 19. Electro Craft bipolar-ohjauk kortti [13].

3.1 Työssä käytetty moottorin-ohjauskortti

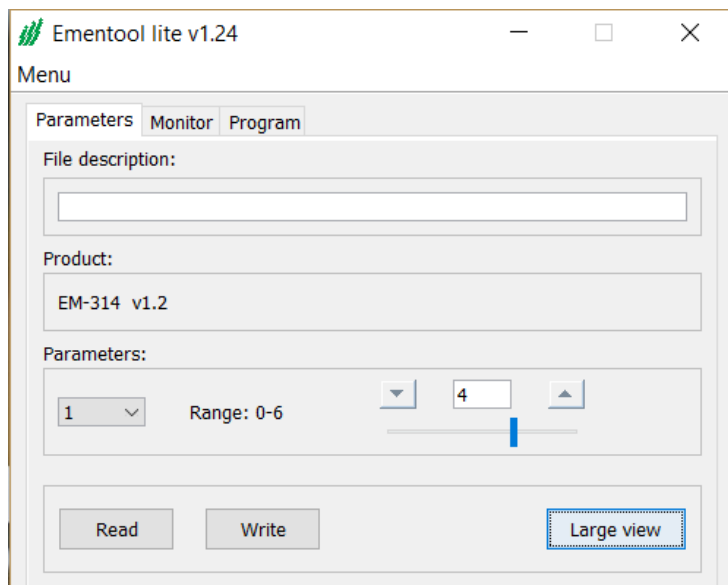
Työssä käytetty moottorin-ohjauskortti EM-314 on suunniteltu keskikokoisille bipolar-HB-askelmootoreille. EM-314 tarjoaa hyvän vääntömomentin pienillä kierroksilla. Kortista löytyy seuraavat askelmoodit: fullstep-, halfstep- ja microstepping-moodi alkaen $\frac{1}{4}$ -osa-askeleesta aina $\frac{1}{64}$ -osa-askeleeseen saakka. Eri moodeilla saadaan aikaan useita vaihtoehtoja eri nopeutta ja tarkkuutta vaativiin käyttöihin. Kortista löytyy myös oma oskillaattori, jonka avulla voidaan askelmootoria käyttää ilman erillistä logiikkaa. Tämä mahdollistaa neljän ennalta asetetun funktion kuten nopeuden, suunnan, matkan (askelissa) ja kiihtyvyyden käytön. Funktiot ovat määritettävissä EmentoolLite-ohjelmistossa, ja niitä voidaan käyttää kortin sisääntulojen avulla. Sisääntuloja voidaan ohjata PLC- tai TTL-signaaleilla. Käskyt tulevat käyttöön, kun kortin sisääntuloon ohjataan positiivinen jännite (4 – 30 V). Kaikki ohjainkortin asetukset ovat määritettävissä edellä mainitussa ohjelmistossa. Seuraavassa kappaleessa käydään yksityiskohtaisesti EmentoolLiten käyttö ja asetusten sisältö. EM-314:n tekniset tiedot ks. liite 3.



Kuva 20. EM-314-moottorin-ohjauskortti.

3.2 Moottorin ohjaukseen konfigurointi, PC-sovellus

Korttia ohjelmoidaan PC:n avulla. Ohjelmointi tapahtuu EmentoolLite-ohjelmistolla, joka on ladattavissa ilmaiseksi osoitteesta <http://electromen.com/en/products/item/download> kirjoitushetkellä (29.7.2017)



Kuva 21. EmentoolLite v1.24.

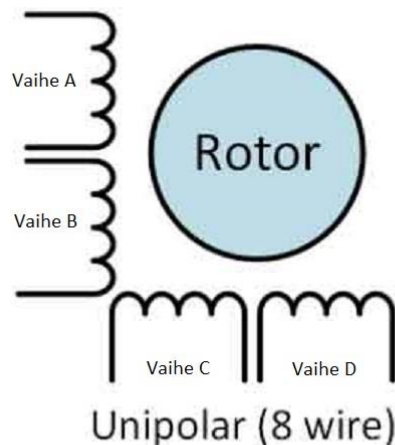
Kun ohjelmisto on asennettu, voidaan kortti kytkeä mukana toimitettavalla usb-johdolla tietokoneeseen. Usb-johto tarjoaa virran myös kortin logiikalle, eli korttia voidaan ohjelmoida kortin päävirran ollessa pois kytkettynä. Käynnistettäessä Ementooliin avautuu pikanäkymä, josta voidaan nopeasti muuttaa yksittäisiä asetuksia. Kaikkiin asetuksiin päästään painamalla "large view"-painiketta. Asetuksia on kaikkiaan 23, joista ensimmäiset neljä on suunnattu mm. resoluution ja virran hallintaan. Loput 17 asetusta liittyvät kortin ennalta määritettäviin funktioihin. Tässä työssä käytetään erillistä logiikkaa (PLC, Arduino), joten nämä asetukset voidaan sivuuttaa. Asetusten sisältö löytyy liitteestä 3. Seuraavaksi tarkastellaan neljän ensimmäisen asetuksen sisältö.

1. Askelmoodi eli resoluutio. Valinta välillä 0 – 6, jossa 0 = fullstep (200) ja 6 = microstepping (6400) -resoluutio. Työssä testataan jokainen resoluutio.
2. Kiihdytyksen ja hidastuksen rampitus. Käytössä vain ennalta määritettävien funktioiden kanssa. Valinta välillä 1 – 50, jossa 1 = 0,1 s ja 50 = 5 s. Ei käytetä työssä.

3. Virta 1 s jälkeen moottorin pysähdyksestä. Valinta välillä 1 – 4, jossa 1 = 0 % (virta pois päältä) ja 4 = 100 % (normaali virta). Työssä käytetty asetus [4] parhaan pitovääntömomentin aikaansaamiseksi.
4. Moottorin vaiheelle tuotettava virta. Valinta välillä 1 – 60, jossa 1 = 0,1 A ja 60 = 6 A. Työssä käytetty asetus [30]. Parhaaseen suorituskykyyn pääsemiseksi moottorille tuotava virta/vaihe on oltava 3 A sarjakytkenässä. Rinnankytketyssä käytetään myös 3 A:n virtaa korkeiden lämpötilojen välttämiseksi, sekä kortin suorituskyky rajojen vuoksi. Suurin sallittu virta rinnankytkennässä on 6 A, jolla saavutetaan paras suorituskyky. Virran rajoittamisen vaikutus testauksessa on pieni, johtuen pienestä moottorin kuormasta testauksessa.

3.3 Moottorin kytkeminen ohjauskorttiin

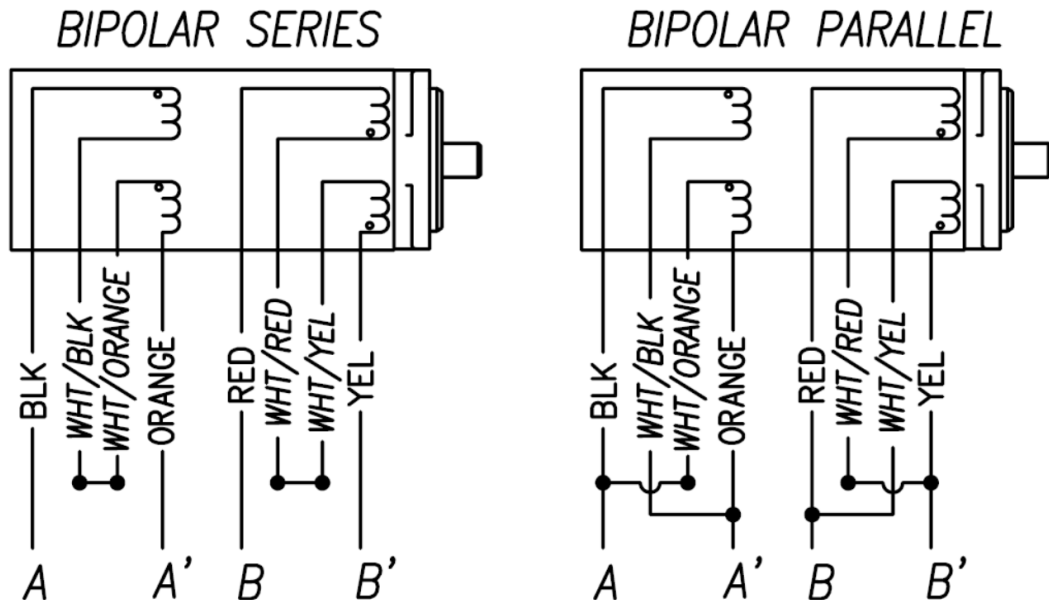
EM-314-ohjauskortti kykenee ohjaamaan yhtä, 2-vaiheista bipolar askelmoottoria. Työssä käytetyt moottorit ovat 4-vaiheisia bipolar moottoreita, jolloin moottorista tulee kahdeksan johdinta ulos, ks. kuva 22.



Kuva 22. 8-johtiminen bipolar-askelmoottori.

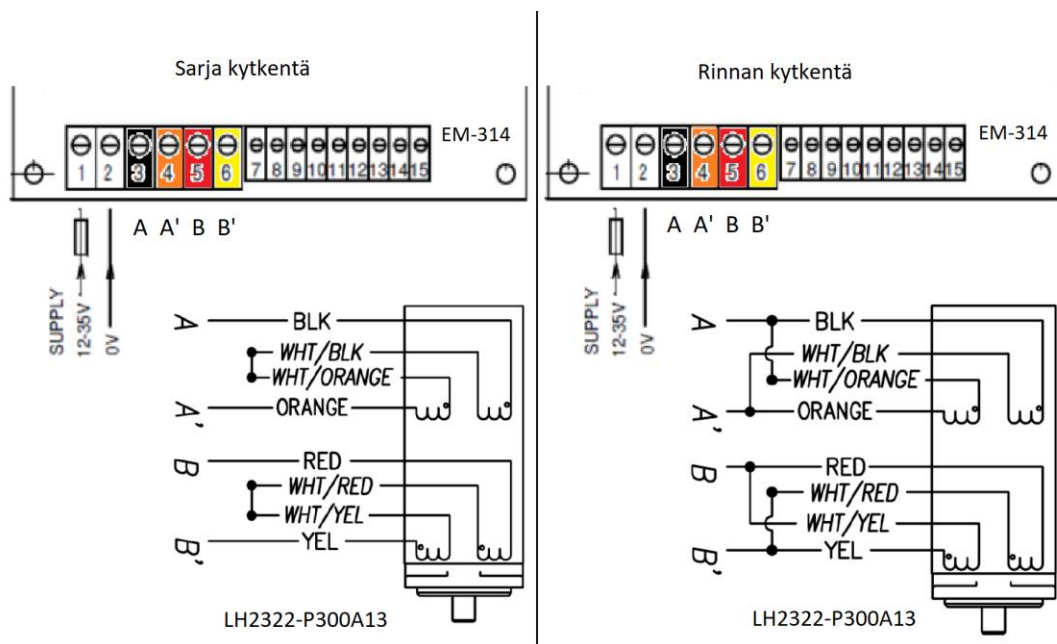
Kytkenän mahdollistamiseksi ohjauskorttiin on kaksi vaihetta kytkettävä yhteen, joko sarjaan tai rinnan, näin saadaan aikaiseksi kaksi vaihetta eli neljä johdinta. Sarja tai rinnankytkentä valitaan tarvittavien ominaisuuksien perusteella.

Sarjaan ja rinnankytkennät tehdään moottorikohtaisesti tiettyjen vaiheiden kesken. Virheellisissä kytkennöissä moottori voi vaurioitua. Työssä käytetty moottori LH2322-P300A13 kytketään kuvan 23 mukaisesti.



Kuva 23. Sarjaan- ja rinnankytkentä.

Seuraavaksi 4 johdinta kytketään ohjaukorktiin merkintöjen mukaisesti, ks. kuva 24. Kytkettäessä moottoria tulee varmistua siitä, että ohjaukorkin päävirta on kytkettynä pois oikosulkujen välttämiseksi.



Kuva 24. Moottorin kytkeminen ohjaukorktiin.

4 Askelmoottorin käyttökokoontapano

Insinööriyössä käytetty laitekokoontapano:

- 2 kpl LH2322-P300A13 HB-askelmoottoria
- 2 kpl EM-314-moottorin-ohjauskorttia
- 1 kpl Siemens S7-1200 DC/DC/DC (6ES7 214-1AG40-0XB0) PLC
- 1 kpl Mascot power supply type 9522 (24 V / 5 A)
- 1 kpl reititin ja 1 kpl PC.

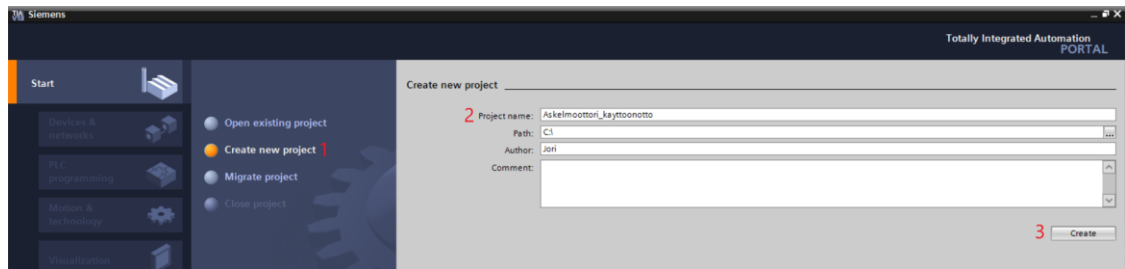
Laitteiston kytkeminen tapahtuu liitteen 2 mukaisesti. Kytettäessä laitteistoa tulee varmistua siitä, että virtalähdettä ei ole kytketty ennen kuin kaikki kytkennät ovat valmiit.

4.1 Yhteyden muodostaminen PLC:n ja PC:n välillä

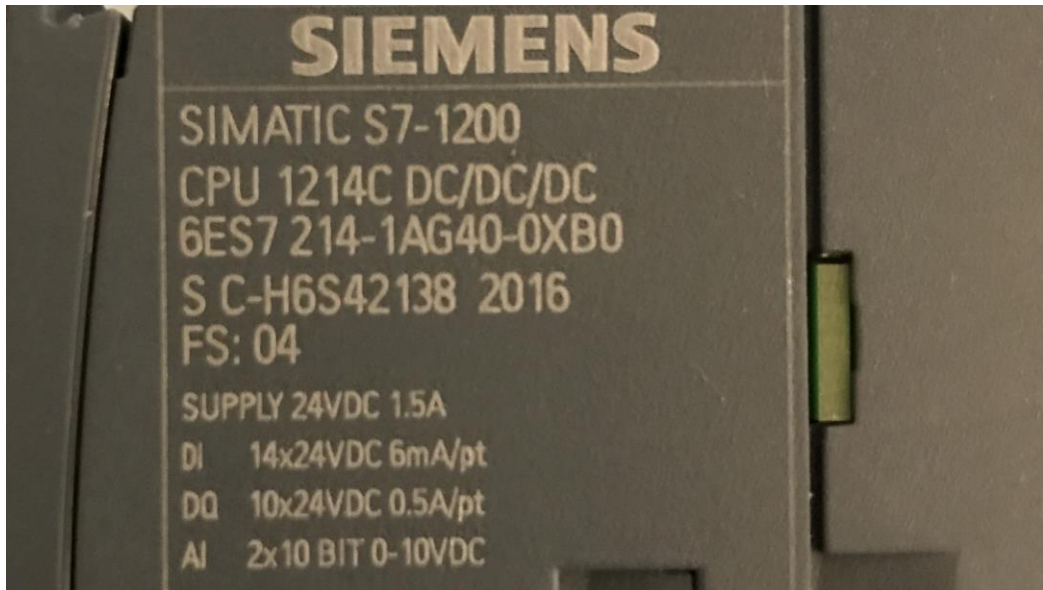
PLC eli ohjelmoitava logiikka-tietokone on korvannut aikoinaan sadoilla ohjaus- ja aika-releillä toteutettuja mekaanista ohjausta vaativia laitteita niin teollisuudessa kuin yksityisessä käytössä. Tässä työssä käytetään Siemens-tuoteperheen keskisarjaan kuuluvaa S7-1200-logiikkaa. Sen etuihin lukeutuu mm. helppo ohjelmoitavuus, laaja liitettävyyys ja hyvä suorituskyky. Laitteen ohjelmointiin ja konfiguroimiseen käytetään Siemensin TIA-Portal-ohjelmistoa ja logiikka keskustelelee tietokoneen kanssa RJ45-kaapelin välityksellä. [16.]

Seuraavaksi käydään läpi yhteyden muodostaminen logiikan ja PC:n välille. Mekaanisen kytkennän voi tarkistaa liitteen 2 (PI-kaavio) mukaisesti.

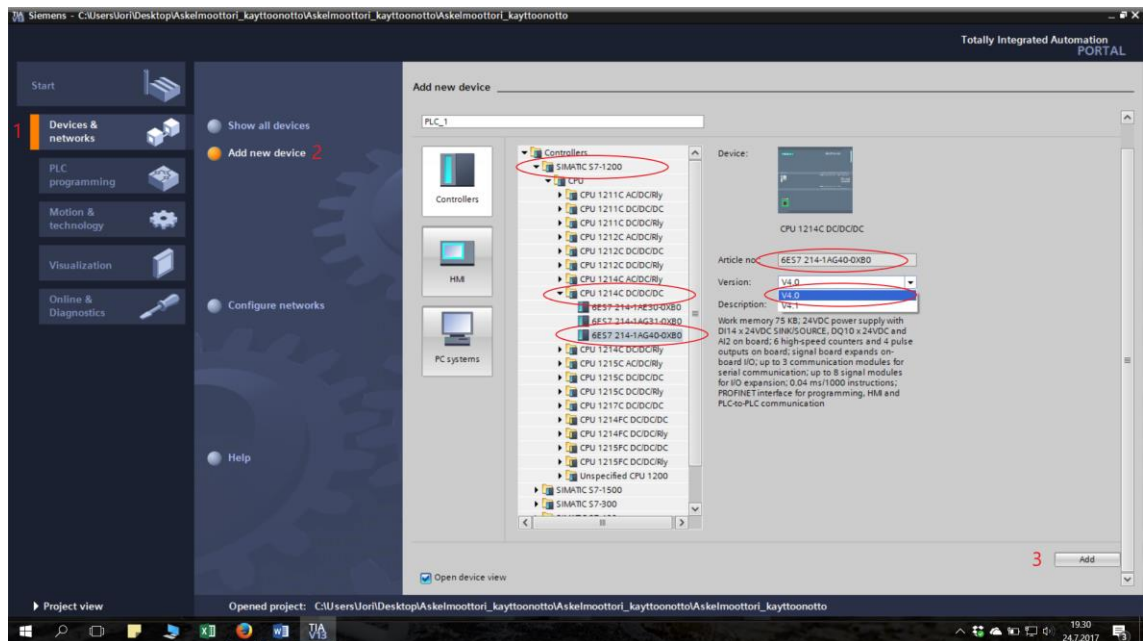
Ensimmäiseksi avataan TIA-Portal-ohjelmisto ja annetaan projektille sopiva nimitys, kuva 25. Seuraavaksi tarkastetaan PLC:n sivulta kortin laitetiedot ja ohjelmistoversio (kuva 26), minkä jälkeen etsitään ohjelmistosta laitteen tietoja vastaava PLC, kuva 27.



Kuva 25. TIA-projektin luominen.

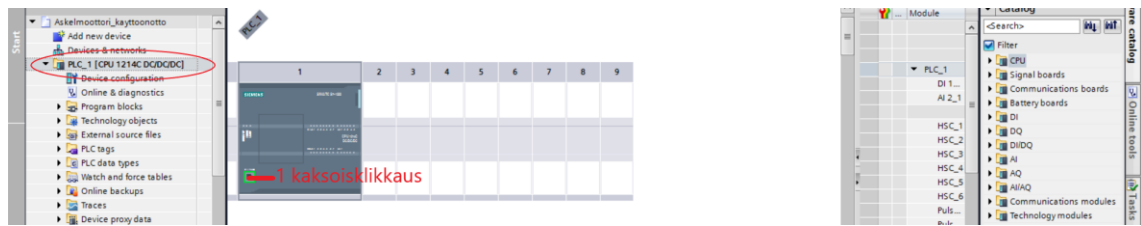


Kuva 26. PLC:n laitetiedot löytyvät laitteen sivulta.



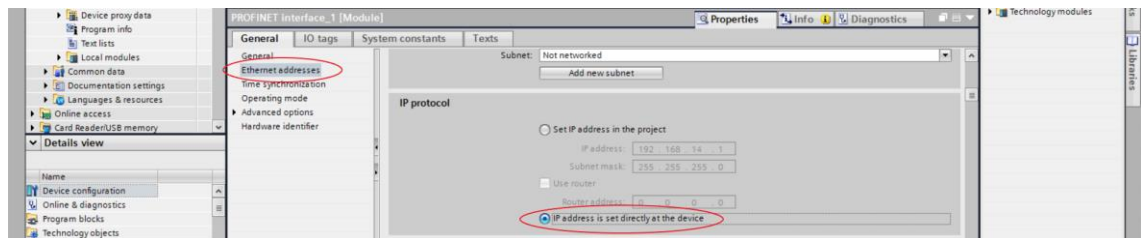
Kuva 27. PLC:n lisääminen TIA-Portaaliin.

Tämän jälkeen päästään kuvan 28 mukaiseen näkymään ja edelleen kuvan mukaisesti kaksoispainamalla ikonia päästään asettamaan PLC:lle perusasetukset.



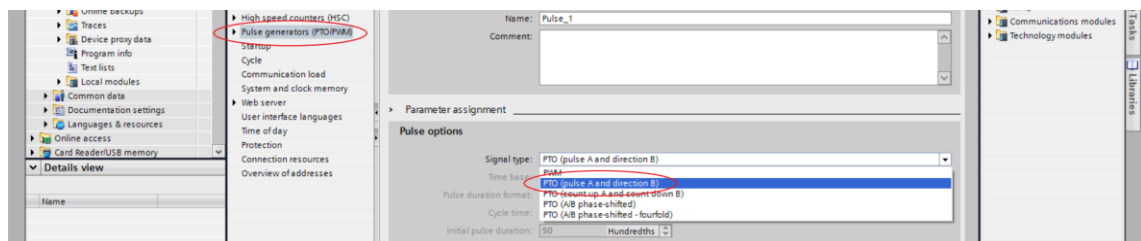
Kuva 28. Eteneminen PLC:n perusasetuksiin.

Koska testaaminen suoritettiin kotiverkossa ja reitittimenä käytettiin yksityistä reititintä, oli helpoin vaihtoehto yhteyden luomiseksi käyttää asetusta, jossa laite hakee automaattisesti itselleen IP-osoitteen ks. kuva 29.



Kuva 29. PLC:n IP-osoitteen asettaminen.

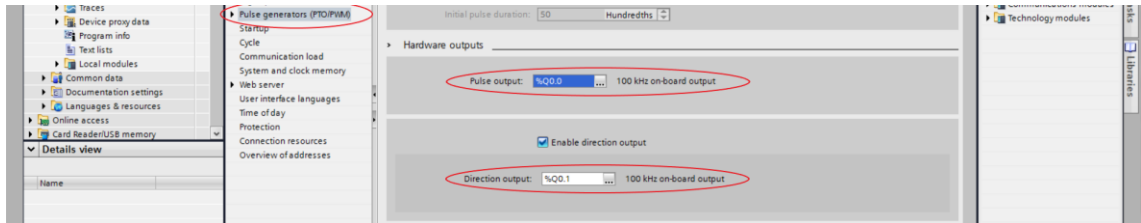
Seuraavaksi konfiguroidaan askelmoottoria varten ”pulse generator”. Generaattori-tyyppejä on kaksi erilaista: PTO ja PWM eli ”pulse train output” ja ”pulse width modulation”. Näistä valitaan ensimmäinen ja PTO-tyyppiksi A- ja B-signaali, jossa A-signaali määrittää askelmoottorille askelluksen eli pulssin ja B-signaali askelmoottorin pyörimissuunnan.



Kuva 30. Signaali-generaattorin valinta.

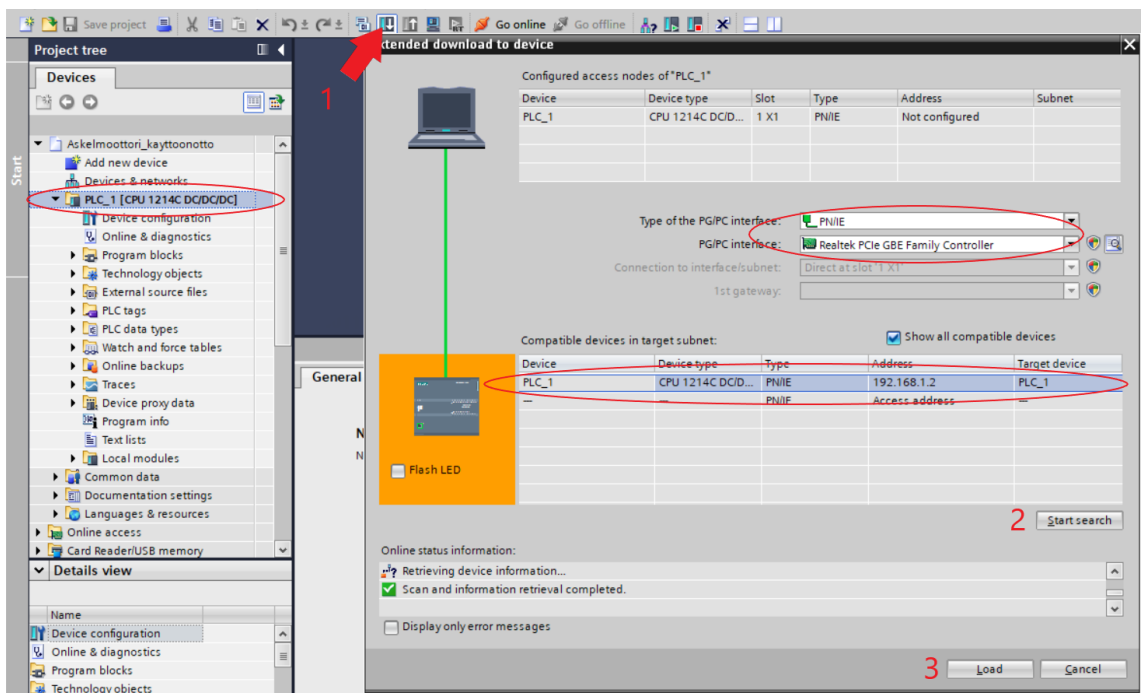
Logiikalle on mahdollista luoda neljä eri signaali-generaattoria, joista kaksi toimii aina 100 kHz:iin asti ja kaksi 30 kHz:iin asti. Eli kyseisellä logiikalla on mahdollista ohjata

neljää akselia/moottoria. Neljän signaali-generaattorin käyttäminen yhtäaikaaisesti on kuitenkin logiikalle erittäin raskasta, joten parhaaseen suorituskykyyn päästään, kun ohjataan yhtä akselia/moottoria kerrallaan. Generaattori-typin jälkeen määritetään sille fyysiset ulostulot ks. kuva 31. Pulssille A valitaan ulostulo Q0.0 ja pulssille B Q0.1.



Kuva 31. Signaali-generaattorin fyysisten ulostulojen määrittäminen.

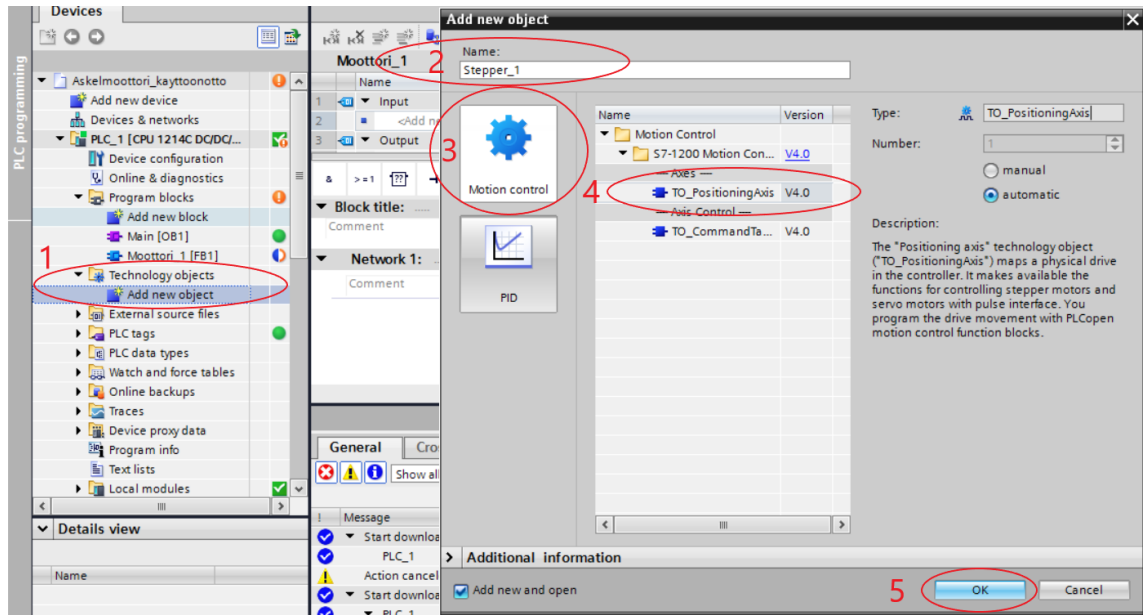
Asetusten jälkeen voidaan itse PLC etsiä verkosta ja ladata projekti ja asetukset PLC:lle, ks. kuva 32.



Kuva 32. PLC:n etsiminen verkosta ja asetusten lataaminen PLC:lle.

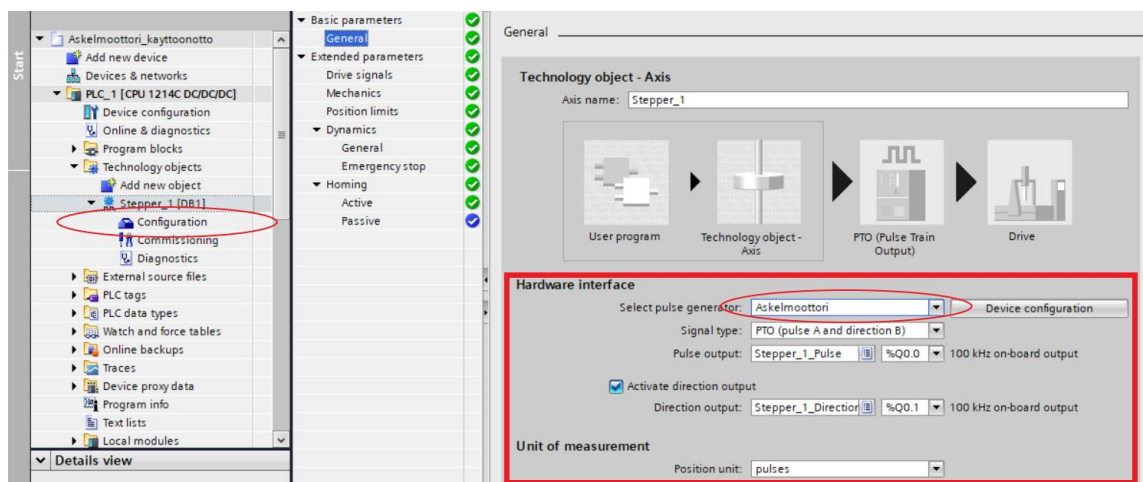
4.2 Askelmoottorin konfigurointi PLC:lle

Perusasetusten jälkeen luodaan ”technology object”, jossa määritellään askelmoottorin perusasetukset, sekä linkitetään aikaisemmin luotu signaali-generaattori technology objectille eli akselille/moottorille. Yksi technology object vastaa yhtä moottoria (kuva 33).



Kuva 33. Technology objectin luominen.

Tämän jälkeen konfiguroidaan askelmoottorin asetukset technology objectilla. Ensimmäiseksi valitaan aikaisemmin luotu pulssi-generaattori pulse_1, jonka nimeksi valittiin ”askelmoottori”. Tämän yhteydessä vielä tarkistetaan, että ulostulot ovat oikein, sekä valitaan mittayksiköksi pulssit.



Kuva 34. Pulssi-generaattorin linkittäminen akselille/moottorille.

Jotta akselia/moottoria voidaan myöhemmin käyttää ohjelmassa on siltä saatava tieto valmiudesta toimia. Tätä varten luodaan virtuaalinen muuttuja bEnable_M_1 muistipaikkaan %M0.0. Tällöin bEnablen ollessa "True" on akseli/moottori käytettävissä ohjelmassa. Asetuksissa on myös vaihtoehto mahdolliselle ohjauskortin "valmis signaalille", mutta kyseissä kortissa tätä ei ole, joten asetetaan signaali manuaalisesti True-tilaan, jolloin kortti on ohjelmallisesti koko ajan käytössä ks. kuva 35.


Mekaanisissa asetuksissa määritellään moottorin resoluutio, jonka tulee olla yhdenmukainen ohjauskorttiin asetetun resoluution kanssa. Moottorin testausvaiheessa tätä joudutaan muuttamaan aina, kun ohjauskortin resoluutiota vaihdetaan. Koska valitsimme aluksi mittayksiköksi pulssit, on pulssien myös vastattava asetettua resoluutioita ohjauskortin kanssa, ks. kuva 35.

Maksimi nopeus rajoittuu teoreettisesti 15 kHz ohjauskortin maksimi taajuuden myötä, mutta käytännössä käytämme 12.8 kHz, saadaksemme luotettavan maksimi nopeuden. Aloitus- ja lopetusnopeudeksi valitaan 100 pulssia/s. Jos käytössä on huomattava kuorma, tulee nopeus miettiä sovellus kohtaisesti. Moottorin maksimi kiihtyvyydeksi asetetaan 0.1 sekuntia ilman rampitusta. Rampituksen pois jättämisellä saavutetaan nopeammin reagoiva sovellus, mutta rampien käyttöön ottoa tulee miettiä uudestaan, jos käytettävä kuorma on huomattava suhteessa moottoriin. Suuri kuorma suurilla kiihtyvyyksillä voi aiheuttaa askeljättöä eli moottorilta jää askeleita välistä, jolloin paikoitus katoaa ja järjestelmästä tulee epäluotettava. Kiihtyvyys lasketaan resoluutio kohtaisesti esim. resoluution ollessa 3600 pulssia per kierros laitetaan maksimi kiihtyvyydeksi 36000 pulssia/s². Häätäpysäytyksessä käytetään samoja nopeuksia ja kiihtyvyyksiä.

Drive signals

<p>CPU</p> <p>Select enable output: <input type="text" value="bEnable_M_1"/> <input type="text" value="%M0.0"/></p> <p>Select ready input: <input type="text" value="TRUE"/> <input type="text"/></p>	<p>→</p> <p>←</p>	<p>Drive</p> <p>Drive enable</p> <p>Drive ready</p>
--	-------------------	--

Mechanics

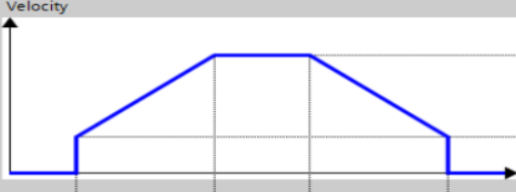


Pulses per motor revolution:
 Load movement per motor revolution: pulses
 Permitted direction of rotation:
 Invert direction signal

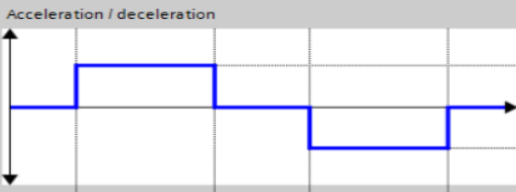
> **General**

Note: Changes in the velocity limits affect acceleration and deceleration; the ramp-up time and ramp-down time stay the same.

Velocity



Acceleration / deceleration



Ramp-up time: s Ramp-down time: s

Enable jerk limit
Smoothing time:

Unit of velocity limits:

Maximum velocity:
 pulses/s
 pulses/s

Start/stop velocity:
 pulses/s
 pulses/s

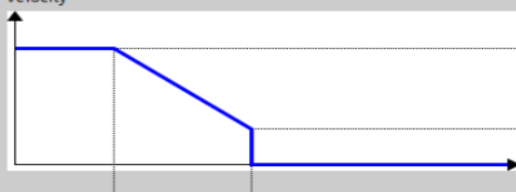
Acceleration:
 pulses/s²

Deceleration:
 pulses/s²

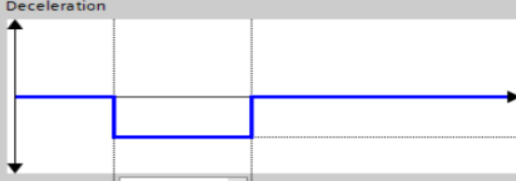
Jerk:

> **Emergency stop**

Velocity



Deceleration



Emergency stop ramp-down time: s

Maximum velocity:
 pulses/s
 pulses/s

Start/stop velocity:
 pulses/s
 pulses/s

Emergency deceleration:
 pulses/s²

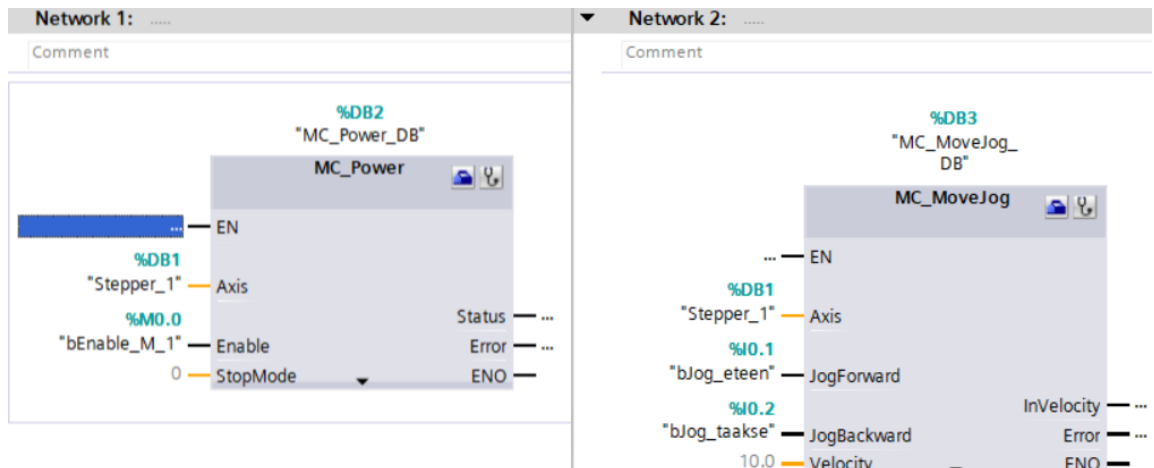
Kuva 35. Askelmoottorin konfigurointi.

4.3 PLC:llä ohjaaminen

Varsinainen moottorin ohjaaminen tehdään TIA-portaalissa moottori-lohkoilla. Lohkoihin voidaan liittää fyysisiä kytkimiä, joiden avulla moottoria voidaan vihdoin liikuttaa. Blokkeja voidaan komentaa myös ohjelmallisesti ”koodilla”, haluttaessa yhä monimutkaisempia liikeratoja tai komentoja. Jokainen akseli/moottori tarvitsee yksilölliset moottori-lohkot. Lohkoja on erilaisia lähes jokaiseen tarkoitukseen, alla lyhyt kuvaus erilaisista moottori-lohkoista ja niiden toiminnoista.

1. MC_Power. Tämä on sovelluksen sisäinen moottorin on/off-kytkin.
2. MC_Reset. Tällä blokilla voidaan kuitata mahdolliset virhe ilmoitukset, joita on ilmennyt muista lohkoista.
3. MC_Home. Lohkolla voidaan kotiuttaa akseli.
4. MC_MoveRelative. Moottoria voidaan liikuttaa suhteellisesti ennalta määrätty matka ilman tarkkaa paikkatietoa.
5. MC_MoveAbsolute. Moottoria voidaan liikuttaa absoluuttiseen sijaintiin. Tähän tarvitaan paikkatieto moottorista. Moottori tulee kotiuttaa ennen tämän lohkon käyttöä.
6. MC_MoveJog. Moottoria voidaan ohjata manuaalisesti, joko ohjelmallisesti tai fyysisillä kytkimillä.

Jokaiselle akselille/moottorille tulee tehdä oma aliohjelma, jonne moottori-lohkot sijoitetaan, siten että jokainen lohko on omassa ”networkissä”. Kuvassa 36 esitellään yksinkertainen ohjelma, jonka avulla moottoria voidaan ohjata manuaalisesti kytkimillä.



Kuva 36. Yksinkertainen moottorinohjaus.

MC_Power-lohkolla annetaan moottorille lupa toimia. Lohkon "Axis"-tuloon lisätään haluttu moottori ja "enable"-tuloon kyseisen akselin technology objectissa määritetty "drive enable"-ulostulo. Tässä tapauksessa b_Enable_M_1, joka on kytketty muistipaikkaan %M0.0. Tämän ollessa True moottori on valmiudessa liikkua.

MC_MoveJog-lohkolla ohjataan moottoria manuaalisesti haluttuun pyörimissuuntaan ennalta määrätyllä nopeudella. Kuten edellisen blokin kanssa "Axis"-tuloon lisätään haluttu moottori ja tämän jälkeen luodaan kaksi fyysistä sisääntuloa, joilla ohjataan moottoria myötä- tai vastapäivään. Velocity-tuloon laitetaan haluttu liike nopeus. Nopeus voi minimissään olla technology objectilla moottorille määritetty minimi nopeus.

4.4 Arduinolla ohjaaminen

Askelmoottorin ohjaaminen PLC:llä tai ohjaukseen omalla logiikalla ei ole suinkaan ainut vaihtoehto. Erittäin suosittu etenkin harrastelijoiden keskuudessa on Arduino. Arduino on pieni, mutta kokoisekseen se on liikettä vaativiin tehtäviin erittäin suorituskykyinen avoimeen lähdekoodiin perustuva logiikkakortti. Arduinoa käytetään etenkin 3D-tulostinprojekteissa, sekä pienissä teollisuuden sulautetuissa järjestelmissä ohjaamaan pienempiä askelmoottoreita.

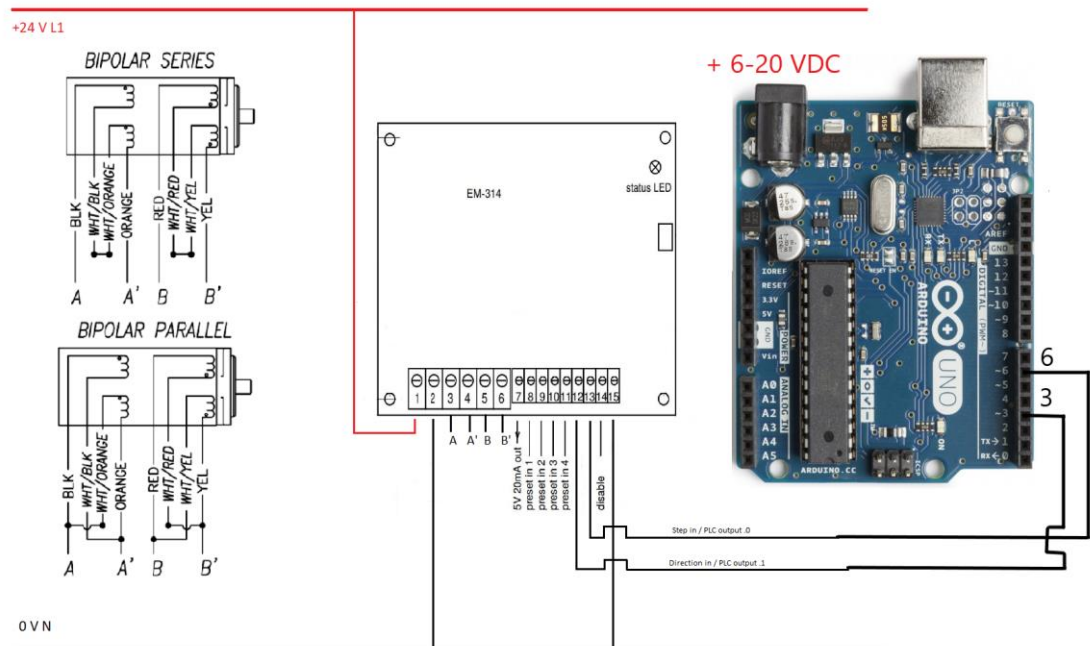


Kuva 37. Arduino Uno.

Lyhyesti Arduino Unon liitännöistä [17]:

- | | |
|---------------------------------|-----------------------------|
| 1. Mikrokontrolleri | ATmega328P |
| 2. Logiikan jännite kynnys | 3,3 V tai 5 V |
| 3. Kortin käyttö jännite | 6 - 20 V |
| 4. Digitaaliset I/O pinnit | 14, joista 6 PWM ulostuloja |
| 5. Analogiset sisääntulo pinnit | 6. |

Arduinon liittäminen ohjauskorttiin EM-314 tapahtuu kuvan 38 mukaisesti.



Kuva 38. PI-kaavio (Arduino).

Arduinoa ohjelmoidaan C-kieleen pohjautuvalla ohjelmointikielellä. Se liitetään tietokoneeseen USB-johdolla ja ohjelmoiminen tapahtuu Arduinon omassa ohjelmointi ympäristössä, joka on ladattavissa kirjoitushetkellä ilmaiseksi osoitteesta <https://www.arduino.cc/en/Main/Software>. Kuvassa 39 on esitetty yksinkertainen tapa pyörittää moottoria tietyllä nopeudella. Huomaa, että moottorin resoluutio riippuu vain ohjauskortin askellus-moodista.

```
int dirPin = 3;
int stepperPin = 6;

void setup() {
  pinMode(dirPin, OUTPUT);
  pinMode(stepperPin, OUTPUT);
  digitalWrite(stepperPin, LOW);
  digitalWrite(dirPin, HIGH);
}

void loop()
{
  tone(6, 100);
}
```

Kuva 39. Esimerkki koodi.

Koodissa ensin nimetään pinnit 3 ja 6, joista ensimmäinen edustaa suuntapinniä ja jälkimmäinen pulssipinniä. Vastaavasti PLC:ssä pinnit olivat pulssi %Q0.0 ja suunta %Q0.1. Tämän jälkeen alustetaan pinnit 3 ja 6 ulostuloiksi ja kirjoitetaan pulssipinni "LOW"-tilaan ja suuntapinni "HIGH"-tilaan, joka määrittää moottorin pyörimään myötäpäivään.

Alustus kirjoitetaan "void setup"-ohjelmaan, joka suoritetaan ainoastaan kerran Arduinon käynnistyttyä. Seuraavaksi void loop-ohjelmaan kirjoitetaan varsinainen jatkuvasti suoritettava koodi.

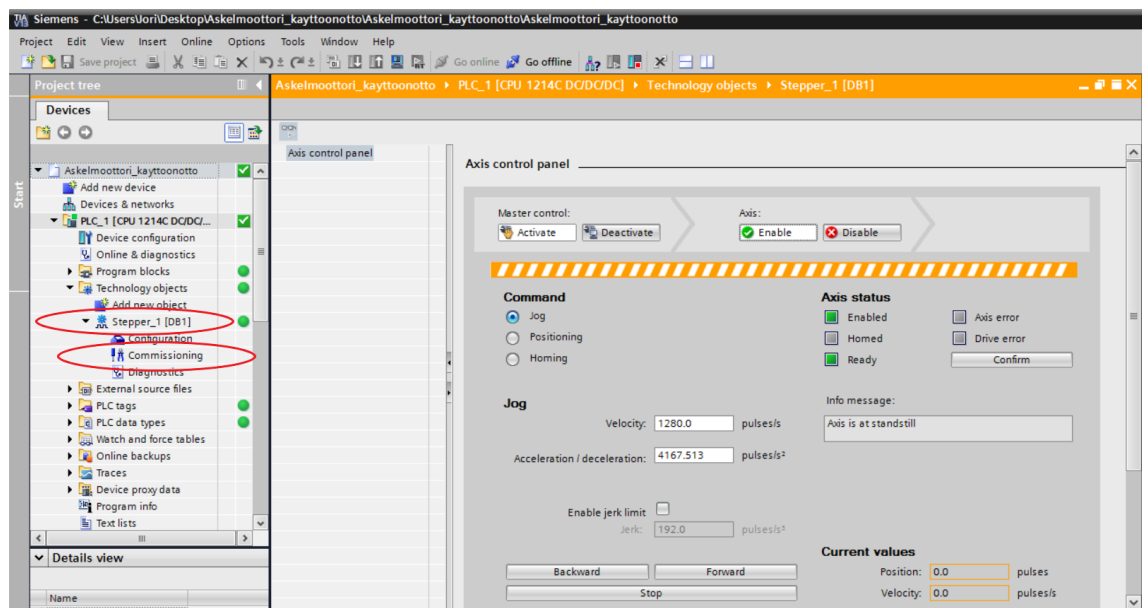
Tone-funktiolla voidaan kirjoittaa haluttuun PWM-pinniin kanttiaaltoa välillä 31-65535 Hz. Tone-funktiossa ensin kerrotaan pinni, johon kanttiaaltoa halutaan syöttää ja tämän jälkeen haluttu taajuus (Hz). Esimerkiksi kun ohjauskorttiin on askellus-moodiksi laitettu full step eli 200 pulssia per kierros, niin 100 Hz taajuudella moottori pyörii seuraavalla nopeudella. [18]

$$\frac{100 \text{ Hz}}{200 \frac{\text{Hz}}{r}} = 0,5 \frac{r}{s} \rightarrow 30 \text{ rpm}.$$

5 Moottorien ja ohjauskorttien testaaminen

Varsinainen moottorien testaaminen tapahtuu PLC:llä, sen ollessa Arduinoa suorituskykyisempi ja helpommin ohjattavissa käyttöliittymänsä ansiosta. Testaus suoritetaan TIA-portaalista löytyvällä moottorin commissioning-työkalulla. Työkalulla voidaan helposti muuttaa ominaisuuksia, kuten nopeutta ja kiihtyvyyttä. Testaus suoritetaan jokaiselle ohjauskortista löytyvälle resoluutiolle, muutoin ohjauskortin asetusten ollessa määritetty kappaleessa 3.2 esitettyjen arvojen mukaisesti. Testauksen aikana moottoria kuormitetaan pienellä puristimella, jotta moottorille saadaan pieni kuorma askeljätkön välttämiseksi suurilla kiihtyvyyksillä. Moottorista tutkitaan seuraavia asioita jokaisen resoluution kohdalla, sekä sarjaan että rinnan kytkennässä.

1. askellustarkkuus
2. Teoreettinen ja käytännön maksiminopeus
3. maksimikiihtyvyys
4. rajoittavat tekijät
5. moottorin resonanssitaajuus ja yleinen värinä.



Kuva 40. Commissioning-työkalu TIA-portaalissa.

Nopeutta ja kiihtyvyyttä voidaan vaihtaa asettamalla haluttu arvo sille varattuun kohtaan, ks. kuva 40. Moottoria voidaan testauksessa ajaa myötä- tai vastapäivään ja koska moottoria ei ole kytketty mekaniikkaan ei mekaanisesta törmäyksestä ole vaaraa. Maksimi nopeus ja kiihtyvyys on ennalta määritetty moottorin perus konfiguroinnissa ja resoluutiota vaihdettaessa ohjauskortissa on myös muistettava vaihtaa resoluutio moottorin perusasetuksista vastaamaan ohjauskortin resoluutiota.

Perusasetuksista tulee myös tarkastaa, että resoluutio kohtaisesti maksimi kiihtyvyys ei kasva suuremmaksi kuin 20 kierrosta/s^2 . Esimerkiksi resoluutio ollessa 6400 pulssia/kierros on maksimi kiihtyvyydeksi asetettava $128000 \text{ pulssia/s}^2$. Jos moottoria pystytään testattaessa kiihdyttämään asetetulla kiihtyvyydellä jää se tuloksiin maksimi kiihtyvyydeksi, muutoin arvoa lasketaan ja etsitään sopiva maksimi kiihtyvyys. Teoreettinen maksimi nopeus muodostuu ohjauskortin rajoittavasta tekijästä resoluutio kohtaisesti, maksimi pulssitaajuuden ollessa 12800 Hz.

Maksimi nopeudet on mitattu siten, että kun moottorin akselille kytketty pieni vastus ylittää moottorin vääntömomentin eli toisin sanoen moottori pysähtyy, miinustetaan sen hetkisestä nopeudesta 50 r/min, jotta saadaan luotettava maksimi nopeus ja jolla moottoria voidaan vielä käytännössä käyttää sovelluksissa. Kuitenkin jos moottoria voidaan ajaa 12800 pulssia per sekunti merkitään siitä saatu nopeus maksimi nopeudeksi ja merkitään taulukkoon maksimi nopeuden rajoittavaksi tekijäksi taajuus ja muutoin ohjainkortti.

Testauksen aikana moottori on asetettu pöydälle akseli ylöspäin moottoria muutoin kiinnittämättä mekaanisesti mihinkään. Tällä saadaan selvitettyä moottorin resonanssi taajuuDET ja värinät. Moottorin resonanssi taajuuden mittaUS perustuu nopeuden (pulssia/s) ja kuulohavainnon perusteella laskettuun taajuuteen tai taajuus alueeseen.

6 Tulosten tarkastelu ja johtopäätökset

Testin tulokset ovat listattuna alla olevaan taulukkoon.

Taulukko 2. Tulokset.

Ohjaukortti RM-314	Askelmoodi	Full step	Half step	Microstepping				
	Resoluutio askelia/rev	200	400	800	1600	3200	6400	12800
	Resoluutio deg°/askel	1,8	0,9	0,45	0,225	0,113	0,056	0,028
	Teor. Max nopeus r/min	4500	2250	1125	562,5	281,25	140,63	70,31
Rinnan kytkentä	Testattu Max nopeus r/min	600	750	960	480	240	120	60
	Max nopeuden rajoittava tekijä	Ohjainkortti	Ohjainkortti	Ohjainkortti	Taajuus	Taajuus	Taajuus	Taajuus
	Max kiihtyvyys r/s ²	40	40	20	10	10	10	10
	Moottori resonoi r/min	Ei	Ei	300-450	375->	Ei	Ei	Ei
	Moottorin yleinen värinä	Erit.suuri	Erit.suuri	Suuri	Keskisuuri	Keskisuuri	Pieni	Pieni
Sarja kytkentä	Testattu Max nopeus r/min	450	450	525	480	240	120	60
	Max nopeuden rajoittava tekijä	Ohjainkortti	Ohjainkortti	Ohjainkortti	Taajuus	Taajuus	Taajuus	Taajuus
	Max kiihtyvyys r/s ²	20	20	10	10	10	10	10
	Moottori resonoi r/min	225-330	65-90	60-105	60-150	45-85	55->	50->
	Moottorin yleinen värinä	Suuri	Suuri	Keskisuuri	Keskisuuri	Pieni	Pieni	Pieni

Yllä olevaa taulukkoa tarkasteltaessa vihreällä pohjalla on kerrottu EM-314-ohjaukortin saatavilla olevat askellus-moodit ja ilmoitettu askellus-resoluutio. Siihen on myös laskettu kunkin askellus-moodin teoreettinen maksimi nopeus käytettäessä LH2322-P300A13 moottoria, jonka natiivi resoluutio on 200 askelta per kierros.

Taulukon siniseltä pohjalta löytyvät rinnankytketyn moottorin ja keltaiselta pohjalta sarjaan kytketyn moottorin tulokset. Tuloksia tarkasteltaessa voidaan havaita, että ohjaukortilla EM-314 voidaan rinnankytkettyä moottoria ajaa hieman suuremmilla nopeuksilla, sekä ilman selviä moottorin resonanssitaajuuksia tai taajuusalueita. Huomioiden kuitenkin, että rinnankytketty moottori aiheuttaa voimakkaampaa värinää yleisellä tasolla enemmän verrattaessa sarjaan kytkettyyn moottoriin.

Tuloksista ilmenee myös, että kyseinen ohjaukortti on suunniteltu maltillisille moottorin kierrosnopeuksille. Tämä ilmenee etenkin full step- ja half step-moodissa, joissa ei lähimainkaan päästy teoreettisiin maksimi nopeuksiin. Kortti oli kuitenkin erittäin suorituskykyinen mikroaskelluksessa, jossa nopeudet pysyvät maltillisina, sekä moottorien suorituskyky pysyi voimakkaana aina maksimi nopeuksille asti.

Resonanssiajajuuksilta vältyttiin, etenkin rinnankytketyssä moottorissa. Mikroaskelluksen muita etuja olivat myös erittäin korkea resoluutio sekä askellustarkkuus.

Testauksessa käytettiin pientä kuormaa, jolloin suuret kiihtyvyydet eivät aiheuttaneet ongelmia. Kytkettäessä moottorit mekaniikkaan on kuitenkin lähdettävä maltillisesti liikkeelle, jotta laitevaurioilta vältyttäisiin.

Tuloksien perusteella xy-nosturin akselien liikuttamiseen tällä laitteisto kokoonpanolla tulisi valita seuraavat asetukset ja kytkennät parhaan suorituskyvyn saavuttamiseksi.

- Rinnankytketty LH2322-P300A13-askelmoottori
- Ohjaukortin EM-314 askellus-moodi mikrosteppaus (3200)
- Ohjaukortin muut asetukset kappaleen 3.2 mukaan.

Edellä mainituilla saavutetaan värinätön, suorituskykyinen ja tarkka akselin liikuttaminen. Moottorin vääntömomentin pysyessä suurena aina maksimi nopeuksille asti, voidaan akselin nopeutta kasvattaa entisestään vaihtamalla välityksiä.

Koska moottorit omaavat suurimman vääntömomenttinsa paikallaan ollessaan, lämpenivät ne jo muutaman minuutin aikana erittäin kuumaksi n. (60 – 70 °C). Moottorit on suunniteltu kestävämmän korkeita lämpötiloja, mutta tämä on seikka, joka tulee ottaa huomioon sovelluksessa. Suureen lämpötilaan vaikuttaa osin moottorien kytkemättömyys mekaniikkaan, jolloin lämpö ei pääse johtumaan pois moottorista muutoin kuin ilman välityksellä. Ohjaukortin konfiguroinnista (asetus 3) tulee valita sopiva virranrajoitus moottorin ollessa paikallaan, turhan moottorin lämmittämisen vuoksi, mutta kuitenkin huomioiden virran pienentyessä myös moottorin pitovääntömomentti pienentyy.

7 Kehitysideat ja yhteenveto

Electro Craftin LH2322-P300A13 on erittäin suorituskykyinen hybridi askelmoottori. Se on sopiva tarkkoihin ja suurta vääntömomenttia vaativiin sovelluksiin NEMA-23 kokoluokassa. Moottori on myös erittäin laajasti kytkettävissä ja sitä voidaan ajaa suurilakin nopeuksilla. Kiinnittäessä moottoria tulee huomioida jäykkä kiinnitys resonanssien ja värähtelyjen minimoimiseksi. Huomioon tulee myös ottaa moottorin jäähdyttäminen.

Electromenin EM-314 on kokoluokassaan edullinen ohjauskortti. Se on suunniteltu mallilliselle kierroksille ja virroille. Kortin positiivisia puolia on sen liitettävyyden ja helppo ohjelmoitavuus. Negatiivisia puolia ovat kortin rakenteen avoimuus, eli sovelluksessa se tulisi koteloida, sekä myös johdin liitännöiden heikko rakenne. Missä EM-314-kortin rajat tulevat vastaan ovat suuret nopeudet, ja vaikka kortti on teknisiltä tiedoiltaan ilmoitettu kykeneväksi antamaan 6 A per vaihe, ei se tähän aivan kykene. Kyseiselle moottorille ohjauskortti mikroaskellus-moodissa on kuitenkin varsin riittävä ja hoitaa työnsä PLC:n ollessa kaverina. Ohjauskortti toimii paremmin PLC:n kuin Arduinon kanssa. Työssä käytetty virtalähde Mascot type 9522 (24 V / 5 A) riittää teholtaan yhdelle ohjauskortille ja PLC:lle, mutta kahden akselin yhtäaikaisten ajaminen tällä virtalähteellä ei onnistu.

Lopputuloksena sanottakoon, että moottori ja ohjauskortti xy-nosturi sovellusta varten ovat toimiva kokonaisuus edellä huomioituin ehdoin. Ne ovat helposti käyttöön otettavia ja omaavat monipuoliset liitännät mahdollisuudet. Kaikki testattavat moottorit sekä ohjauskortit olivat toimivia ja ehjiä.

Insinööriyden tavoitteena oli testata ja löytää parhaat konfiguroinnit niin askelmoottorille kuin ohjauskortille parhaan suorituskyvyn saavuttamiseksi, sekä miettiä niiden sopivuutta Metropolia Ammattikorkeakoulun xy-nosturiin. Työssä onnistuttiin löytämään sopivat kongruennit laitteistolle ja lopuksi niitä testattiin xy-nosturissa. Testauksen perusteella voitiin työtä pitää onnistuneena, sillä työssä valitut asetukset tuottivat huomattavan parannuksen akselien liikkeeseen, sekä vähensivät akselien resonansseja.

Työn ohella tulivat askelmoottorien rakenne ja niiden kytkeminen tutuksi. Työn aikana opin myös paljon askelmoottorien ohjaamisesta, sekä ohjauskorteista. Tutuksi tulivat myös Siemensin PLC logiikka ja sen ohjelmoiminen. Haasteena työssä oli tiedonkeruu, sekä ohjauskortin rajoitteisuus. Insinööriyden työ oli kuitenkin opettavainen, ja laajensi omaa

tietämystäni niin askelmootoreista kuin niiden ohjaamisesta PLC:llä tai muulla logiikalla.

Lopuksi vielä listattu alle mahdollisia parannusehdotuksia xy-nosturin akseleiden liikuttamiseen, sekä mekaniikkaan.

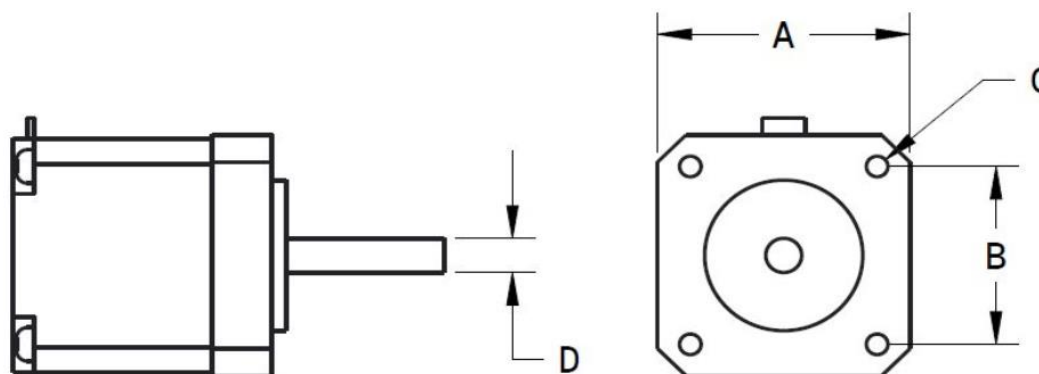
1. Tehokkaampi virtalähde ohjauskorteille
2. Ohjauskortin vaihto suorituskykyisempään esim. Electro Craftin bipolar-ohjauskorttiin
3. Moottorin kiinnityksen, akseliston ja rakenteen jäykistäminen
4. Siirtyminen Siemens PLC S7-1500-sarjaan monen akselin yhtäaikaiseen luotettavaan ajamiseen.

Lähteet

- 1 Engineers garage. Nikhil Agnihotri. Stepper Motors or Step Motors. Permanent magnet. Verkkodokumentti.
<https://www.engineersgarage.com/articles/stepper-motors?page=1>
Luettu 9.7.2017.
- 2 Oriental motor. Structure of Stepper Motors. Verkkodokumentti
<http://www.orientalmotor.com/stepper-motors/technology/stepper-motor-over-view.html> Luettu 1.7.2017.
- 3 Wireless Communication. Rakesh Kumar Jha. What is a stepper motor. Verkkodokumentti.
<http://jharakeshnetworks.blogspot.fi/2011/03/what-is-stepper-motor.html>
Luettu 10.7.2017.
- 4 Circuit globe. Permanent Magnet Stepper Motor. Verkkodokumentti.
<http://circuitglobe.com/permanent-magnet-stepper-motor.html>
Luettu 10.7.2017.
- 5 Solarbotics. Industrial Circuits Application Note. Stepper Motor Basics. Verkkodokumentti.
<http://solarbotics.net/library/pdf/lib/pdf/motorbas.pdf>
Luettu 10.7.2017.
- 6 Circuit globe. Variable Reluctance Stepper Motor. Verkkodokumentti.
<http://circuitglobe.com/variable-reluctance-stepper-motor.html>
Luettu 10.7.2017.
- 7 Engineers garage. Nikhil Agnihotri. Stepper Motors or Step Motors. Variable Reluctance. Verkkodokumentti.
<https://www.engineersgarage.com/articles/stepper-motors?page=3>
Luettu 11.7.2017.
- 8 Elprocus. Tarun Agarwal. Stepper Motor – Types, Advantages & Applications. Verkkodokumentti.
<https://www.elprocus.com/stepper-motor-types-advantages-applications/>
Luettu 11.7.2017.
- 9 Microchip Technology. What is a Stepper Motor. Verkkoseminaari.
<https://www.youtube.com/watch?v=u12dt1RqLW0>
Katsottu 15.7.2017.
- 10 Engineers garage. Nikhil Agnihotri. Stepper Motors or Step Motors. Hybrid. Verkkodokumentti.
<https://www.engineersgarage.com/articles/stepper-motors?page=4>
Luettu 15.7.2017.

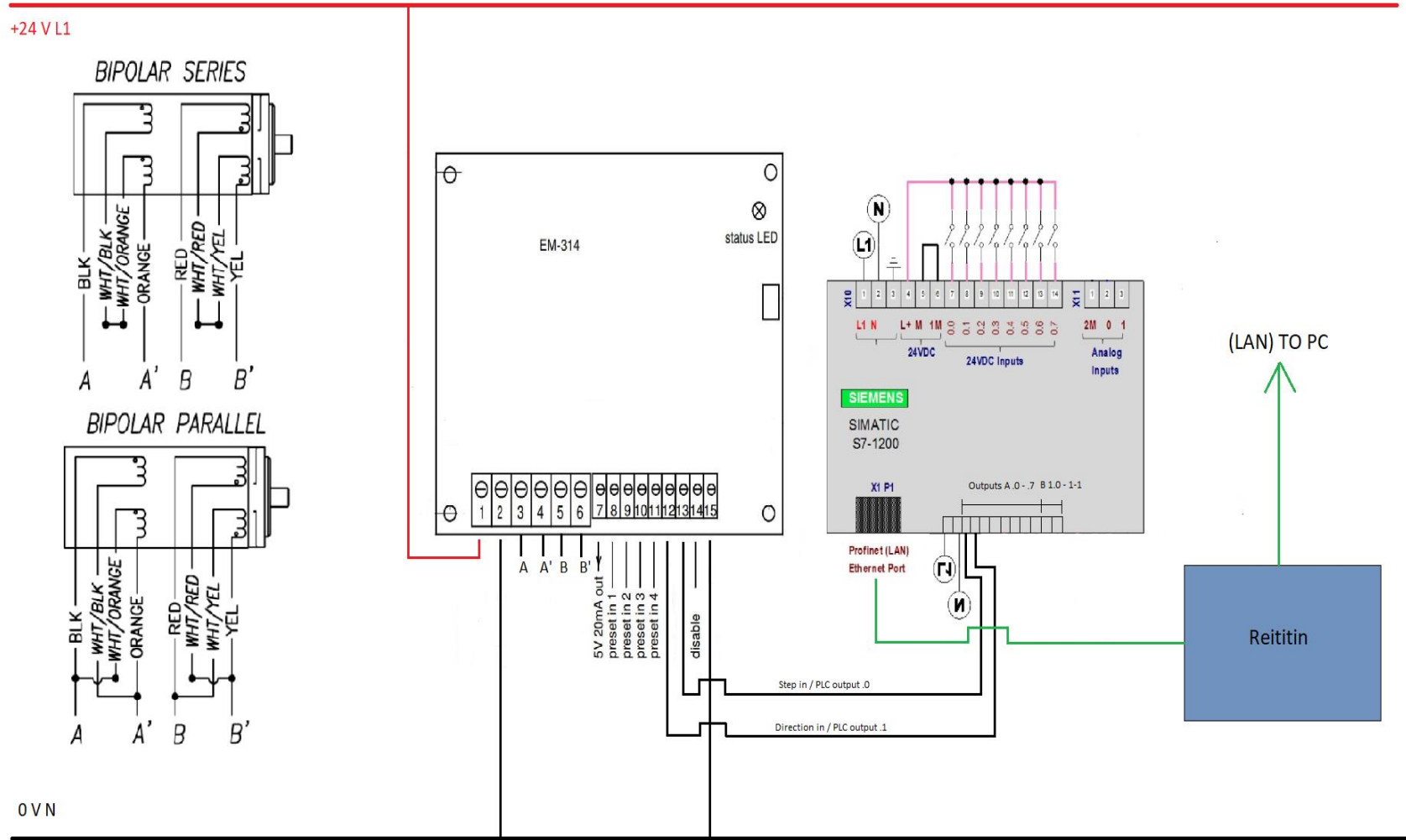
- 11 Moottorin tekniset tiedot kysytty valmistajalta sähköpostite 17.05.2017.
sales@electrocrafter.com
- 12 Desing spark. GraigRS. Stepper motors and drives, what is full step, half step and microstepping. Verkkodokumentti.
<https://www.rs-online.com/designspark/stepper-motors-and-drives-what-is-full-step-half-step-and-microstepping> Luettu 2.8.2017.
- 13 Quora. Dasrath Khatik. What is the difference between – bipolar & unipolar stepper motor. Verkkodokumentti.
<https://www.quora.com/What-is-the-difference-between-bipolar-unipolar-stepper-motor> Luettu 3.8.2017.
- 14 Circuit specialist. Simply Smarter Circuitry Bolg. Unipolar Stepper Motor vs Bipolar Stepper Motors. Verkkodokumentti.
<https://www.circuitspecialists.com/blog/unipolar-stepper-motor-vs-bipolar-stepper-motors/> Luettu 4.8.2017.
- 15 Adafruit. Bill Earl. All About Stepper Motors. Verkkodokumentti.
<https://learn.adafruit.com/all-about-stepper-motors/driving-a-stepper>
Luettu 15.7.2017.
- 16 Siemens. Helppoa automaatio-ohjelmointia S7-1200-logiikalla. Verkkodokumentti.
http://www.siemens.fi/fi/industry/teollisuuden_tuotteet_ja_ratkaisut/tuotesivut/automaatiotekniikka/ohjelmoitavat_logiikat_simatic/s7_1200.htm
Luettu 19.8.2017.
- 17 Arduino. tuoteluettelo Arduino uno rev3. Verkkodokumentti.
<https://store.arduino.cc/arduino-uno-rev3>
Luettu 20.8.2017.
- 18 Arduino. Referenssit. Verkkodokumentti.
<https://www.arduino.cc/en/Reference/Tone>
Luettu 20.8.2017.

NEMA-standardin mukaiset moottorikoot

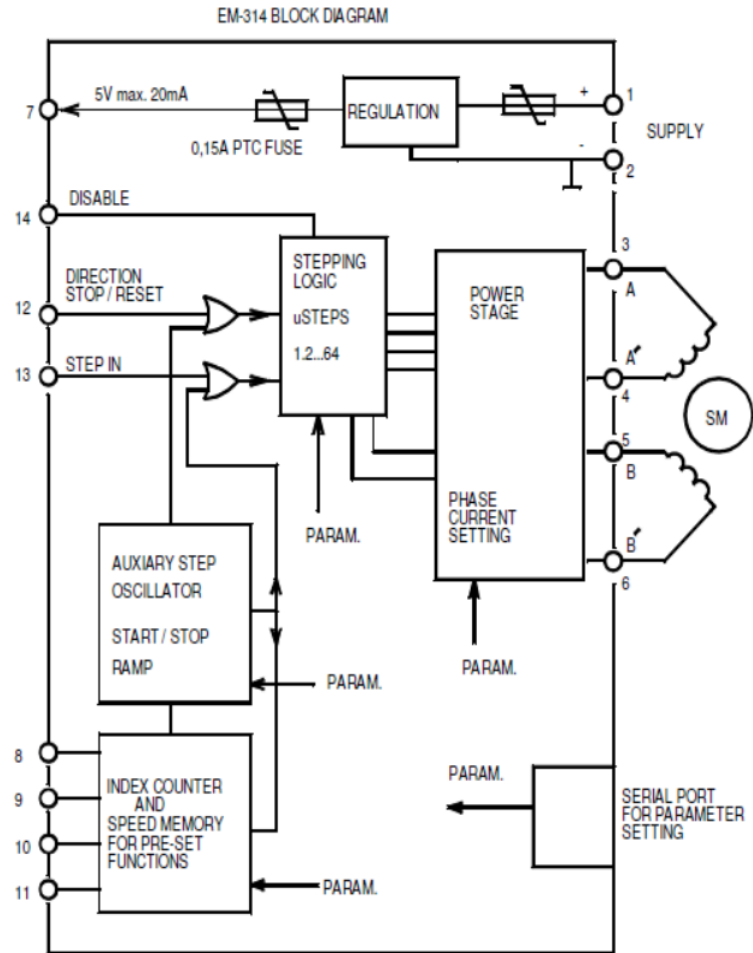
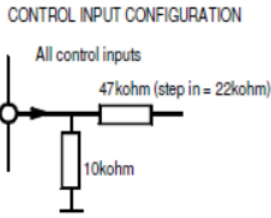


SIZE	A	B	C	D (Dia)
NEMA 11	28.2	23	M2.5 Thread	5
NEMA 14	35.2	26	M3 Thread	5
NEMA 17	42.3	31	M3 Thread	5
NEMA 23	56.4	47.1	5.5 Dia	6.35
NEMA 34	86	69.6	5.5 Dia.	14
NEMA 42	110	89	8.5	19

PI-kaavio

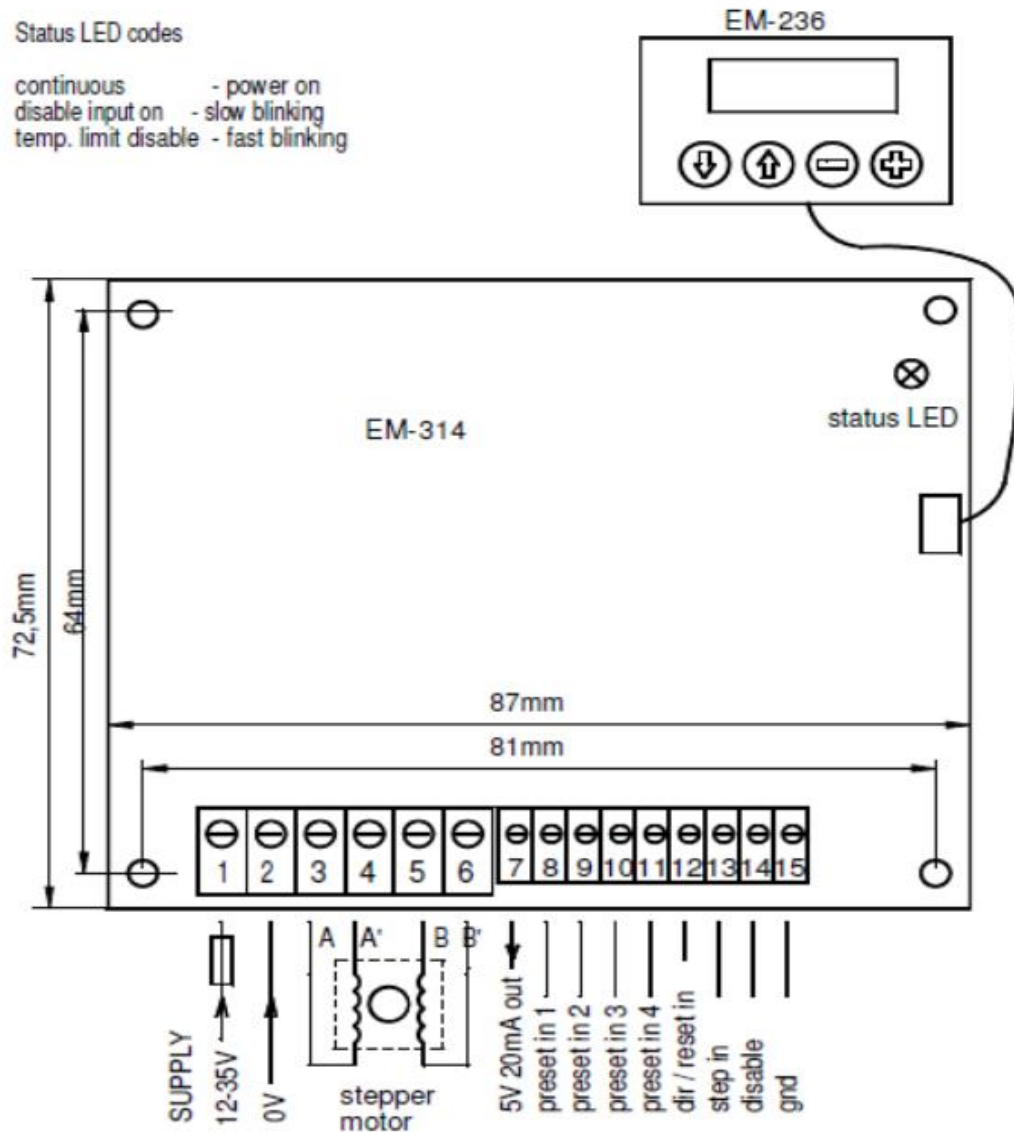


Operating voltage	12-35Vdc
Idle current	n. 20mA
Current settings	0.1 -6A (step 0.1A)
Auxiliary oscillator	50-10000Hz
Frequency accuracy	typ. 0.5%
Ramp adjust	0.1-5s (0 to 10000Hz)
Control level	"on" when Uin 4 -30V "off" when Uin 0-1V or open
Max. step freq.	15kHz
Operating temp.	0-50°C
Dimensions	87x72.5x25mm
Weight	100g



Status LED codes

continuous - power on
disable input on - slow blinking
temp. limit disable - fast blinking



- 1. Stepping mode (0-6) [2]
 - 0 = full step
 - 1 = half step
 - 2 = quarter step
 - 3 = 1/8 step
 - 4 = 1/16 step
 - 5 = 1/32 step
 - 6 = 1/64 step
- 2. Ramp time 0.1-5s (1-50) [10]
- 3. Current 1s after stop (1-4) [4]
 - 1. 100% (= normal)
 - 2. 50% (reduced)
 - 3. 25% (reduced)
 - 4. 0% (current disabled)
- 4. Phase current 0.1-6A (1-60) [10]
- 5. not in use (0-1)
- 6. not in use (0-1)

Preset run directions

- 7. preset 1. 0=fwd 1=rev [0]
- 8. preset 2. 0=fwd 1=rev [1]
- 9. preset 3. 0=fwd 1=rev [0]
- 10. preset 4. 0=fwd 1=rev [1]

Preset run frequencies

- 11. preset 1. 50-10000Hz (5-1000) [30]
- 12. preset 2. 50-10000Hz (5-1000) [30]
- 13. preset 3. 50-10000Hz (5-1000) [100]
- 14. preset 4. 50-10000Hz (5-1000) [100]

Index run counting values 0-1000000 step

- Setting 0= continuous run
- 15. preset 1. 0-999 (0-999) [0]
 - 16. preset 1. 0-1000 x 10³ (0-1000) [0]
 - 17. preset 2. 0-999 (0-999) [0]
 - 18. preset 2. 0-1000 x 10³ (0-1000) [0]
 - 19. preset 3. 0-999 (0-999) [0]
 - 20. preset 3. 0-1000 x 10³ (0-1000) [0]
 - 21. preset 4. 0-999 (0-999) [0]
 - 22. preset 4. 0-1000 x 10³ (0-1000) [0]

- 23. min start freq. 50-10000Hz (5-1000) [10]

Askelmoottorin tekniset tiedot

LH2322-P300A13 #
CAD CONTROLLED

LEAD EXIT AND GROMMET SEALED WITH RTV (BLACK)

CONNECTOR PINOUT CHART

PIN NO.	LEAD COLOR
1	ORANGE
2	WHT/ORN
3	RED
4	WHT/RED
5	BLACK
6	WHT/BLK
7	YELLOW
8	WHT/YEL

NOTES:

- C1 DIAMETER RUNOUT TO BE .001 MAX.
- C2 DIAMETER TO BE CONCENTRIC TO C1 DIAMETER WITHIN .002 T.I.R.
- X SURFACE TO BE PERPENDICULAR TO C1 DIAMETER WITHIN .004.
- SECURE PULLEY TO SHAFT USING LOCTITE 680 OR 603. CLEAN AND PRIME PARTS PER LOCTITE SPECIFICATIONS.
- TORQUE PULLEY SET SCREW(S) TO 10 IN-LBS.
- TIMING PULLEY MUST BE PINNED WITH A \varnothing 2mm SPRING PIN IN ADDITION TO NOTES 4 & 5.
- LABEL INFORMATION (EAD CUSTOMER PART#) "201921-0002 REV F".
- RoHS COMPLIANT

BIPOLAR SERIES

BIPOLAR PARALLEL

NAMEPLATE INFORMATION

FULL STEP SEQUENCE 2 PHASE ON

STEP	A	A'	B	B'
1	+	-	+	-
2	+	-	-	+
3	-	+	-	+
4	-	+	+	-

CW ROTN (LEAD END)

				BIPOLAR SPECIFICATIONS		SERIES	PARALLEL
				RATED VOLTAGE (Vm) DC		2.28	1.14
				AMPS/PHASE		3.0	6.0
				RESISTANCE/PHASE Rm (OHMS)		0.86 ±10%	0.22 ±10%
				INDUCT/PHASE (MH @ 1000Hz)		3.36 ±20%	0.84 ±20%
				HOLDING TORQUE (OZ-IN) MIN		150	
				STEP ANGLE (DEGREES)		1.8	
				STEP ACCURACY (NON-ACCUM)%		3	
				ROTOR INERTIA (OZ-IN-SEC ²)		0.0035	
				WEIGHT (OZ)		24	
				TURNS/COIL (N)		16	

15	REVISED	1028156	WH	6-21-12	MATERIAL	2 PL = ±.02 3 PL = ±.005 ANGLES = ±.30'	SIGNATURE	DATE	TITLE	
14	REVISED	1026626	JH	11-23-09	FINISH		DRN MG	4/21/03	HI-TORQUE OUTLINE	
M	CHG MOLEX#		MG	7-10-08	THIS DRAWING AND/OR SPECIFICATION IS THE PROPERTY OF ElectroCraft OH IS ISSUED IN STRICT CONFIDENCE AND SHALL NOT BE REPRODUCED, COPIED OR USED AS THE BASIS FOR THE MANUFACTURE OR SALE OF APPARATUS, WITHOUT PRIOR WRITTEN PERMISSION.					
SYM	DESCRIPTION	ECN	DR	DATE						APVD DC
							DS102	ElectroCraft OH		