Tampereen yliopisto

Lassi Puolakka

KENTTÄVÄYLIEN SOVELTAMINEN HYDRAULIVENTTIILIN KONFIGUROINTIIN JA OHJAUKSEEN

Kandidaatintyö
Tekniikan ja luonnontieteiden tiedekunta
Tarkastaja: Pauli Mustalahti
Huhtikuu 2022

TIIVISTELMÄ

Lassi Puolakka: Kenttäväylien soveltaminen hydrauliventtiilin konfigurointiin ja ohjaukseen
Kandidaatintyö
Tampereen yliopisto
Teknisten tieteiden kandidaatin tutkinto-ohjelma
Huhtikuu 2022

Kenttäväylät mahdollistavat reaaliaikaisen ja kaksisuuntaisen tiedonsiirron automaatiojärjestelmän kahden laitteen välillä. Laitteiden kasvaneen laskentatehon ansiosta suurempi määrä tietoa voidaan käsitellä laitteissa, jolloin myös tiedonsiirron merkitys korostuu. Tässä työssä tarkastellaan automaatiojärjestelmien tiedonsiirtoa kenttäväylien välityksellä. Tämän jälkeen tutkitaan yleisimpien työkoneautomaatiossa ja hydrauliikassa käytettävien kenttäväylästandardien ominaispiirteitä, ja ohjausjärjestelmän laitteiden saatavuutta eri kenttäväylille. Lopuksi tarkastellaan esimerkkinä yhtä hajautetun automaatiojärjestelmän mahdollistavaa EtherCAT-kenttäväylää tukevaa hydrauliventtiiliä.

Työ koostuu kahdesta osasta, joista ensimmäisessä toteutetaan kirjallisuusselvitys eri kenttäväylistä. Tässä osassa esitetään taustatietoa tiedonsiirrosta automaatiojärjestelmissä, ja tutkitaan yleisimpiä hydrauliikassa käytettäviä kenttäväylästandardeja. Lisäksi tutkitaan laitteiden saatavuutta eri kenttäväylästandardeille, ja tiedonsiirron vaatimuksia ja luonnetta eri käytännön järjestelmissä. Käytäntöosassa tutkitaan hydraulisen servoventtiilin konfigurointia valmistajan tarjoaman konfigurointiohjelman avulla. Lisäksi työssä rakennetaan testijärjestelmä, jossa venttiilin avulla ohjataan hydraulisylinteriä. Tavoitteena on tutkia venttiilin ja sen konfigurointiohjelman tarjoamia eri käyttömahdollisuuksia, kun venttiili konfiguroidaan osaksi testijärjestelmää ja sillä ohjataan sylinteriä.

Kirjallisuusselvityksen perusteella havaittiin, että työssä esitellyt kenttäväylästandardit ovat ominaisuuksiltaan hyvin samankaltaisia. Eri standardit eroavat sisäiseltä toiminnallisuudeltaan hieman, mutta varsinkin Ethernet-pohjaiset kenttäväylästandardit näyttäytyvät käyttäjälle hyvin samanlaisina. Lisäksi eri laitevalmistajien laitteet tukevat osittain samoja, yleisimmin käytettäviä kenttäväylästandardeja, kuten EtherCAT ja Ethernet/IP. Eri valmistajien laitteista löytyy kuitenkin myös eroja, ja kun tiedonsiirron vaatimukset vaihtelevat järjestelmäkohtaisesti, on käytettävän kenttäväylästandardin valinta aina sovelluskohtaista. Valintaan vaikuttavia tekijöitä ovat mm. tiedonsiirron reaaliaikavaatimukset, tiedon rakenne, laitteiden määrä ja niiden sijainti. Käytäntöosassa havaittiin, että venttiilin konfiguroinnissa tärkeimmät vaiheet ovat oikean toimintatilan valinta ja antureiden mittaussignaalien konfigurointi. Konfiguroinnin jälkeen testijärjestelmää voidaan ohjata antamalla venttiilille asetusarvoja konfigurointiohjelmasta, josta voidaan myös seurata järjestelmän tilaa antureiden mittaustiedon avulla.

Avainsanat: Kenttäväylä, tiedonsiirto, venttiilin konfigurointi, EtherCAT, automaatiojärjestelmä, ohjausjärjestelmä

Tämän julkaisun alkuperäisyys on tarkastettu Turnitin OriginalityCheck –ohjelmalla.

SISÄLLYSLUETTELO

1. JOHDANTO 1
2. KENTTÄVÄYLÄT AUTOMAATIOSOVELLUSTEN TIEDONSSIIRROSSA 3
2.1 OSI-malli tiedonsiirron suunnittelussa 3
2.2 Tiedonsiirto kenttäväylien avulla 5
3. HYDRAULIIKASSA KÄYTETTÄVIEN KENTTÄVÄYLIEN VERTAILU 8
3.1 Kenttäväylästandardien esittely 9
3.1.1 EtherCAT 9
3.1.2 Sercos 10
3.1.3 Ethernet/IP 11
3.1.4 SAE J1939 12
3.2 Ohjausjärjestelmän komponentit eri valmistajilta 13
3.2.1 Hydrauliventtiilit sisäänrakennetuilla ohjausyksiköillä 13
3.2.2 Muut ohjausyksiköt 14
3.2.3 Anturit 15
3.3 Tiedonsiirto koneautomaatiosovelluksissa 16
3.4 Kenttäväylästandardien vertailun tulokset 16
4. VENTTIILIN SOVITTAMINEN OSAKSI TESTIJÄRJESTELMÄÄ 19
4.1 Venttiilin konfigurointi 20
4.2 Testijärjestelmä 21
4.3 Mittaustulokset testijärjestelmästä 23
5. YHTEENVETO 26
LÄHTEET 28

LYHENTEET JA MERKINNÄT

CAN	Controller Area Network
ETG	EtherCAT Technology Group
EtherCAT	Ethernet for Control Automation Technology
Ethernet/IP	Ethernet Industrial Protocol
IAC	Integrated Axis Controller, integroitu akseliohjain
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers
OSI-malli	Open Systems Interconnection Reference Model, malli tietoliikenne-järjestelmien suunnitteluun
PLC	Programmable Logic Controller, ohjelmoitava logiikkaohjain
SAE	Society of Automotive Engineers
Sercos	Serial real-time communication system

1. JOHDANTO

Tiedonsiirron merkitys nykypäivän automaatiosovelluksissa on suuri. Automaatiojärjestelmien laitteiden lisätyn laskentatehon ansiosta hajautettuja automaatiojärjestelmiä voidaan toteuttaa suuremmassa mittakaavassa. Tällöin tiedonsiirron täytyy olla reaaliaikaista ja luotettavaa eri laitteiden välillä. Kenttäväylien avulla keskitetyt ohjausjärjestelmät voidaan korvata hajautetuilla ohjausyksiköillä, jotka on kytketty suoraan toisiinsa [1, s. 81]. Näin ollen jokaisella ohjausjärjestelmän laitteella on omat vastuunsa tarvittavien toimintojen toteuttamisessa. Hajautetuissa järjestelmissä yksittäisen ohjausyksikön vioittuminen vaikuttaa vain kyseisen laitteen piirissä, eikä koko järjestelmään, kuten keskitetyissä ohjausjärjestelmissä [1, s. 83]. Hajautuksen avulla järjestelmän toimintojen tehokkuus kasvaa, vikasietoisuus lisääntyy ja häiriöaika vähenee.

Työkoneautomaatiolla tarkoitetaan työkoneiden toimintojen toteuttamista ohjausten, toimilaitteiden ja anturoinnin avulla. Toimintojen toteuttaminen perustuu yksittäisten toimilaitteiden ohjaukseen käyttäen mitattua tietoa antureilta ja käyttäjän antamaa asetusarvotietoa. Työkoneiden toimilaitteilta vaaditaan usein suuria voimia, mutta komponenttien ylimääräistä painoa ja tilantarvetta tulisi välttää. Toimintojen toteuttamiseen voidaan käyttää hydraulijärjestelmää, joka tarkoittaa tehonsiirtoa paineistetun nesteen avulla. Tämän avulla saavutetaan suuria voimia pienikokoisilla komponenteilla verrattuna esimerkiksi mekaanisiin ja sähköisiin toimilaitteisiin.

Tässä kandidaatintyössä tutkitaan yleisimpiä työkoneautomaatiossa ja hydrauliikassa käytettäviä kenttäväyliä ja niiden soveltamista hydraulisen servoventtiilin konfigurointiin ja ohjaukseen. Työn ensimmäisen osan tavoitteena on selvittää yleisesti hydrauliikassa käytettävien kenttäväylien eroja ja ominaispiirteitä sekä mahdollisia kenttäväylien valintaan vaikuttavia tekijöitä. Hydraulijärjestelmissä toimilaitteita ohjataan hydrauliventtiileillä. Näin ollen työssä tutkitaan hydrauliventtiiliä, jonka sisäänrakennettu ohjausyksikkö voidaan kytkeä osaksi hajautettua ohjausjärjestelmää käyttäen kenttäväylää. Työn toisessa osassa konfiguroidaan edellä mainittu venttiili ja rakennetaan testijärjestelmä, jossa venttiilillä ohjataan hydraulisylinteriä. Kaikki kyseisessä osassa tarvittavat laitteet sijaitsevat Tampereen yliopiston Hervannan kampuksella.

Työn toisessa luvussa esitetään yleistä tietoa tiedonsiirrosta automaatiosovelluksissa. Ensin esitellään OSI-malli, jota käytetään tiedonsiirtojärjestelmien suunnitteluun ja joka oli tärkeässä osassa kenttäväylien kehityksessä [2, s. 9]. Tämän jälkeen esitellään

yleistä tietoa kenttäväylistä ja niiden roolia osana isompaa automaatiosovelluskokonaisuutta, kuten kokonaista tehdasta. Lopuksi yleisistä kenttäväylien ominaisuuksista tarkastellaan tarkemmin tiedonsiirron reaaliaikaisuutta ja järjestelmän topologiavaihtoehtoja.

Seuraavaksi työssä esitellään muutama yleisemmin työkoneautomaatiossa ja hydrauliikan alalla käytössä olevista kenttäväylistä. Tässä luvussa tehdään myös selvitystä eri kenttäväyläratkaisuja tukevista laitteista, esimerkiksi antureista ja ohjausyksiköistä. Tämän jälkeen tarkastellaan kenttäväylille asetettavia vaatimuksia eri käytännön koneautomaatiosovelluksissa. Lopuksi esitellään kirjallisuusselvityksen tulokset eri kenttäväylästandardien eroista ja mahdollisia niiden valintaan vaikuttavia tekijöitä.

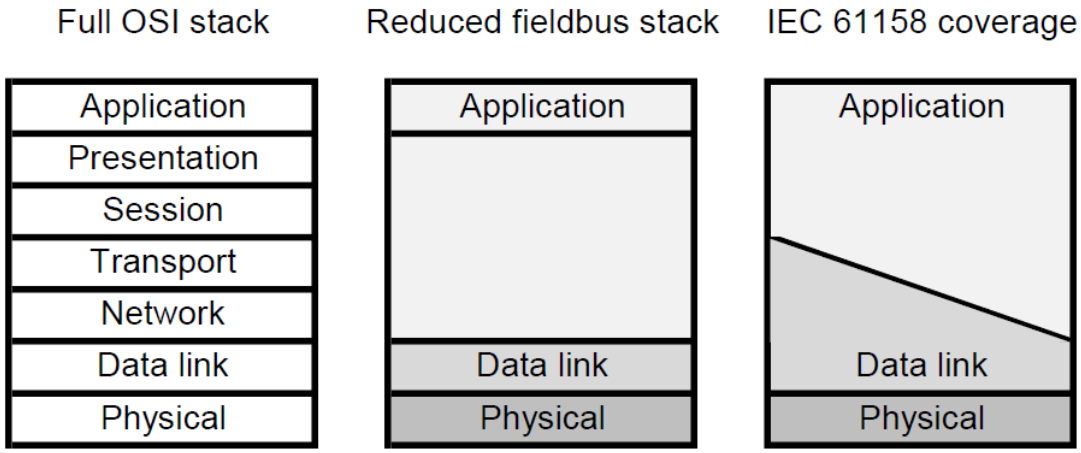
Tämän jälkeen työssä esitellään yksi hajautetun automaatiojärjestelmän mahdollistava hydrauliventtiili ja sen tarjoama rajapinta venttiilin konfigurointiin, sekä miten venttiili on konfiguroitu kyseistä testijärjestelmää varten. Lisäksi venttiilin fyysisiä ominaisuuksia ja sen sisäisen ohjausyksikön rakennetta käsitellään tarkemmin. Työssä rakennetusta testijärjestelmästä esitellään sen voimansiirron ja ohjausjärjestelmän rakenne. Lopuksi esitellään testisekvenssin aikana saadut käytännön mittaustulokset testijärjestelmästä. Viimeisessä luvussa on työn yhteenveto.

2. KENTTÄVÄYLÄT AUTOMAATIOSOVELLUSTEN TIEDONSSIIRROSSA

Automaatiosovelluksissa tietoa siirretään mittavissa määrin eri osapuolten välillä. Näihin lukeutuvat esimerkiksi antureiden lähettämä mittaustieto, toimilaitteita ohjaavat ohjaussignaalit ja erillisten ohjausyksiköiden kommunikointi keskenään. Tiedonsiirron vaatimukset ja siirrettävän tiedon ominaispiirteet ovat erilaisia eri osissa sovellusta. Kokonaisen järjestelmän tiedonsiirron toteuttamiseen tarvitaan siis erilaisia ratkaisuja eri puolille järjestelmää. Tässä työssä keskitytään tiedon siirtämiseen kenttä- ja prosessitasoilla, joiden tiedonsiirrosta kenttäväylät ovat vastuussa.

2.1 OSI-malli tiedonsiirron suunnittelussa

OSI-mallin (Open Systems Interconnection Reference Model) määritteleminen oli tärkeä tekijä kenttäväylien kehitykselle. Syy mallin kehittämiselle oli tarve luoda viitemalli eri tietoliikenneverkkojen välille, jotka eivät aikaisemmin pystyneet kommunikoimaan keskenään. Näin standardoinnin avulla myös eri valmistajien järjestelmät oli mahdollista saada kommunikoimaan keskenään. [2, s. 9] OSI-mallin tarkoitus on luoda yhteiset säännöt tiedonsiirrolle eri järjestelmien välillä. Mallin kerroksinen rakenne on esitetty kuvassa 1.



Kuva 1: *OSI-malli ja sen soveltaminen kenttäväylissä [2, s. 19]*

Malli koostuu seitsemästä kerroksesta, joista jokaisella on omat vastuunsa tiedonsiirron toteutuksessa. Jokaisella kerroksella on myös oma protokollansa, joka vastaa tiedonsiirrosta vastaanottavan osapuolen samalle tasolle. Sauterin [2, s 10] mukaan aloite tiedonsiirtoon lähtee aina ylimmältä tasolta eli sovellustasolta (engl. application layer), joka

pyytää tason 6 eli esitystapakerroksen (engl. presentation layer) palveluita tiedon siirtämiseen. Tätä jatketaan hierarkiassa alaspäin, kunnes saavutaan alimmalle tasolle eli fyysiselle tasolle (engl. physical layer), joka vastaa konkreettisesti tiedon siirtämisestä toiselle osapuolelle. Vastaanottavan osapuolen kerrokset saavat käyttöönsä niille osoitetut tiedot purkamalla fyysisen kerroksen vastaanottaman datan. [2, s. 10] OSI-malli on hierarkkinen malli, jonka jokainen taso käyttää alemman kerroksen palveluja ja tarjoaa palveluja kerrosta ylemmäs. Sauterin [2, s.18] mukaan kenttäväyläprotokollat käyttävät yleensä vain tasoja 1, 2 ja 7, koska kaikkien seitsemän kerroksen toteuttaminen vaatii liikaa resursseja eikä ole tiedonsiirron kannalta tehokasta. Kenttäväylien toteuttamaa osuutta kuvaa keskimmäinen pino kuvassa 1.

Fyysinen kerros määrittelee nimensä mukaisesti kaikki tiedonsiirron mekaaniset, fyysiset ja sähköiset ominaisuudet. Nämä sisältävät esimerkiksi kaapelin ja liittimen tyypin, kaapelin impedanssin ja tiedonsiirtotaajuuden. Lisäksi fyysinen kerros määrittelee myös loogiset ominaisuudet, kuten yksittäisten bittien koodaamistavan. Käytännössä kerros esittää ylemmälle kerrokselle, mitä tarvitaan tietyn datakehyksen siirtämiseen. [2, s. 11]

Siirtokerros (engl. data link layer) vastaa siirrettävän datakehyksen muodostamisesta. Datakehys koostuu yleensä osoitteesta ja itse datasta. Siirtokerros vastaa myös datan koodaamisesta ja kehyksen tarkastamisesta, jotta mahdolliset virhetilanteet voidaan tunnistaa. [2, s. 11] Käytännössä kerros vastaa siis ylemmältä kerrokselta saatavan datan paketoinnista sopivaan muotoon, jotta se voidaan siirtää fyysisen kerroksen avulla.

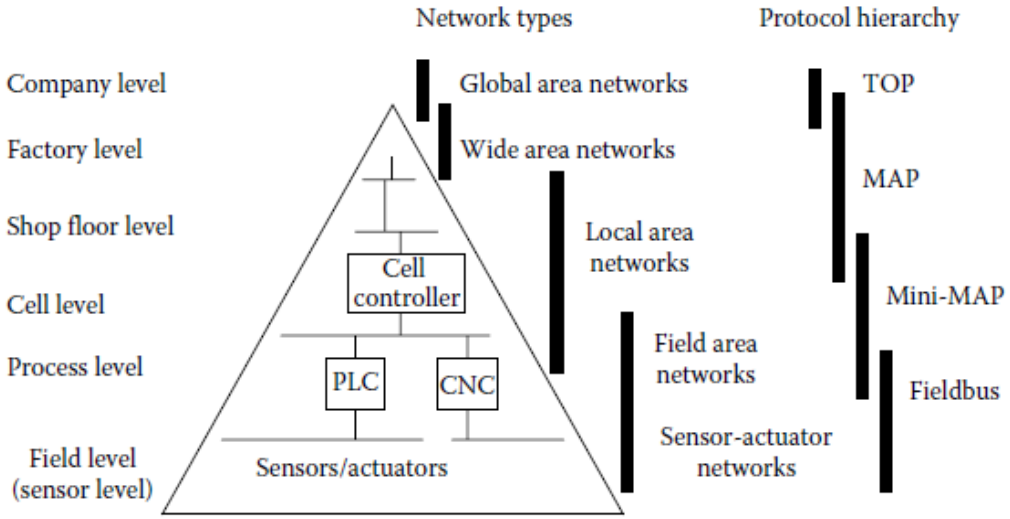
Mallin ylin kerros eli sovelluskerros on rajapinta itse sovelluksen ja tiedonsiirtoyksikön välillä. Kerroksen on tarkoitus antaa läpinäkyvä ja yksinkertainen kuva tiedonsiirrosta. Se täytyy suunnitella siten, ettei se tarvitse tietoa alempien kerroksien tehtävistä. [2, s. 12] Esimerkiksi järjestelmässä olevan älykkään kytkimen ei tarvitse tietää mitään itse tiedonsiirrosta alemmilla tasoilla, vain kohteen ja ne toiminnot, joita toteuttaa, kun kytkintä käytetään.

Sauterin [2, s. 18–19] mukaan syy sille, ettei muiden kerrosten palveluita tarvita, on kenttäväyläjärjestelmien yksinkertaisuus ja rajoitettu koko. Kuitenkin joitain muiden kerroksien palveluita saatetaan tarvita rajoitetusti, kuten normaalisti esitystapakerroksen tarjoamia sääntöjä datan koodaukselle [2, s. 19]. Kenttäväylästandardin IEC 61158 mukaan muiden kerroksien voidaan siis katsoa kuuluvan osaksi kerroksia 2 tai 7, kuten kuvan 1 oikeanpuolimmainen pino esittää. Tässä kerrokset 5 ja 6 ovat osa sovelluskerrosta ja kerrokset 3 ja 4 voidaan mieltää kuuluvan joko sovellus- tai siirtokerrokseen.

OSI-malli on malli tietoliikennejärjestelmien, kuten kenttäväyläprotokollien, suunnitteluun. Se mahdollistaa tiedonsiirron suunnittelun erikseen eri tasoilla ja antaa suunnitteluun tietyt raamit. Kenttäväylät toteuttavat perinteisen OSI-mallin tasoista vain osan, koska tiedonsiirron täytyy olla tehokasta eri kenttälaitteiden välillä.

2.2 Tiedonsiirto kenttäväylien avulla

Kenttäväylällä tarkoitetaan digitaalista, kaksisuuntaista ja sarjamuotoista tiedonsiirtoon tarkoitettua väylää automaatiojärjestelmän kenttälaitteiden välillä [3, s. 203]. Kaksisuuntaisuuden ansiosta kenttälaitteet voivat sekä vastaanottaa että lähettää tietoa saman kenttäväylän välityksellä. Kenttäväylien roolia suuremman kokonaisuuden, esimerkiksi kokonaisen tehtaan automaatiojärjestelmän, hierarkiassa voidaan kuvastaa kuvassa 2 esitetyn automaatiopyramidin avulla. Kenttäväylät vastaavat tiedonsiirrosta kahdella alimmalla tasolla eli kenttä- (engl. field level) ja prosessitasoilla (engl. process level).



Kuva 2: *Tiedonsiirron hierarkkinen malli automaatiosovelluksissa [2, s. 4]*

Tiedon rakenne ja tiedonsiirron vaatimukset ovat erilaisia eri järjestelmän tasoilla. Kenttätasolla, jossa toimilaitteet ja sensorit ovat, siirretään yleensä prosessitietoa, joka koostuu pienistä datapaketeista, mutta tiedonsiirron täytyy olla reaaliaikaista [2, s. 5]. Tietoa voidaan siirtää myös eri tasojen välillä, jolloin kyseessä on yleensä alemman tason tiedon jalostaminen ja sen siirtäminen raportin muodossa ylemmälle tasolle. Sauterin [2, s. 5] mukaan ylemmillä tasoilla siirretään paljon tietoa suurissa paketeissa. Lähiverkossa (engl. local area network) eniten käytetty teknologia tiedonsiirtoon on Ethernet. Tulevaisuudessa Ethernetin reaaliaikaisuuden parantaminen voisi johtaa sen käyttöön myös alemman tason ohjauksien toteuttamiseen. [2, s. 5] Kuvan 2 mukaan kenttäväylät vastaavat siis tiedonsiirrosta hierarkian alimmilla tasoilla, joissa tietoa siirretään yksittäisten

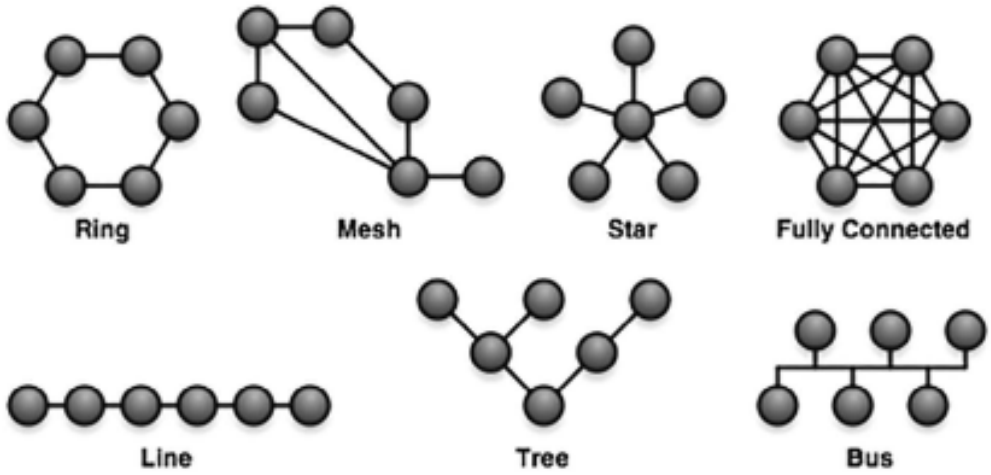
kenttälaitteiden välillä. Kenttäväylillä tietoa voidaan myös siirtää hierarkiassa ylöspäin prosessitasolle. Kuvan 2 mukaan prosessitasolla tietoa vastaanottaa esimerkiksi ohjelmoitava logiikkaohjain (PLC).

Tiedon siirtämiseen kenttätasolla liittyy yleensä reaaliaikavaatimuksia, sillä laitteet saattavat tarvita tietoa toisilta laitteilta ennen kuin voivat toteuttaa tietyn toiminnon. Siewertin [4] mukaan tiedonsiirron reaaliaikavaatimukset voidaan jakaa neljään kategoriaan sen perusteella, kuinka hyödyllistä tiedon vastaanottaminen on kuluneen ajan suhteen. Kategorioita ovat siirto parhaan kykynsä mukaan (engl. best effort) sekä kova, pehmeä ja isokrooninen reaaliaikaisuus. Best effort tarkoittaa, ettei tiedon siirtämisellä ole kiinteää aikarajaa, vaan se siirretään laitteiston parhaan kyvyn mukaan. Kovassa reaaliaikaisuudessa on tarkka aikaraja tiedonsiirrolle, eikä tämän ajan kuluttua tiedon vastaanottamisesta ole kohteessa enää hyötyä. Lisäksi aikarajan ylittäminen voi johtaa mittaviin vahinkoihin järjestelmässä. Myös pehmeässä reaaliaikaisuudessa tiedonsiirrolle on asetettu aikaraja, mutta siihen pääseminen ei ole välttämätöntä. Näin ollen myös myöhästynyt vaste on mahdollinen tai pyyntö voidaan mahdollisesti unohtaa kokonaan. Viimeinen kategoria on isokrooninen reaaliaikaisuus, jossa tiedonsiirron täytyy tapahtua tietyssä aikaikkunassa, jotta se on järjestelmälle hyödyllistä. Erona kovaan reaaliaikaisuuteen on se, ettei vastetta odoteta välittömästi pyynnön jälkeen vaan vasta tietyn ajanhetken kuluttua, mutta kuitenkin ennen asetettua takarajaa. [4]

Järjestelmän reaaliaikavaatimukset voidaan johtaa sen toiminnallisista vaatimuksista [4]. Esimerkkeinä toiminnoista, joissa tiedonsiirron reaaliaikavaatimukset ovat kovia tai isokroonisia ovat esimerkiksi anturitiedon välittäminen työkoneen toimilaitteiden ohjaimille, tai vika- ja vaaratilanteiden tunnistaminen ja niistä viestiminen. Toisaalta esimerkiksi raporttimuotoisen tiedon välittäminen ylemmän tason ohjausjärjestelmälle voidaan toteuttaa pehmeämmillä reaaliaikavaatimuksilla. Tämän perusteella voidaan sanoa, että reaaliaikavaatimukset vaihtelevat järjestelmän sisällä ja riippuvat toteutettavasta toiminnosta.

Kenttäväyläteknologian suurimmat edut saavutetaan järjestelmän suunnittelussa, asennuksessa, huollossa sekä itse käytössä. Lisäksi kenttäväylien käyttö antaa hyvät mahdollisuudet järjestelmän laajentamiseen tulevaisuudessa. Johdotuksen määrää voidaan vähentää huomattavasti, mikä johtaa nopeampaan asennukseen ja helpottaa vikatilanteiden selvittämistä. [3, s. 210] Hyödyt saavutetaan hajauttamalla järjestelmä pienempiin osakokonaisuuksiin eli moduuleihin. Sauterin [2, s. 2] mukaan datan käsittelyyn ja laskentaan liittyviä tehtäviä voidaan siirtää ylemmän tason ohjaimilta pois alemman tason laitteille. Kenttäväylät myös yksinkertaistavat laitteiden parametrisointia ja konfigurointia, mikä tekee järjestelmän käyttöönotosta yksinkertaisempaa [2, s. 2].

Kenttälaitteiden kytkentätapaa toisiinsa voidaan kuvata topologialla. Käytetyn topologian valinta riippuu järjestelmän fyysisestä rakenteesta ja laitteiden sijainnista toisiinsa nähden. Erilaisia topologioita ovat mm. viiva-, väylä-, puu-, tähti- ja rengastopologia. Myös edellä mainittujen yhdisteleminen järjestelmässä on mahdollista. Erilaiset topologiat ovat esitetty kuvassa 3.



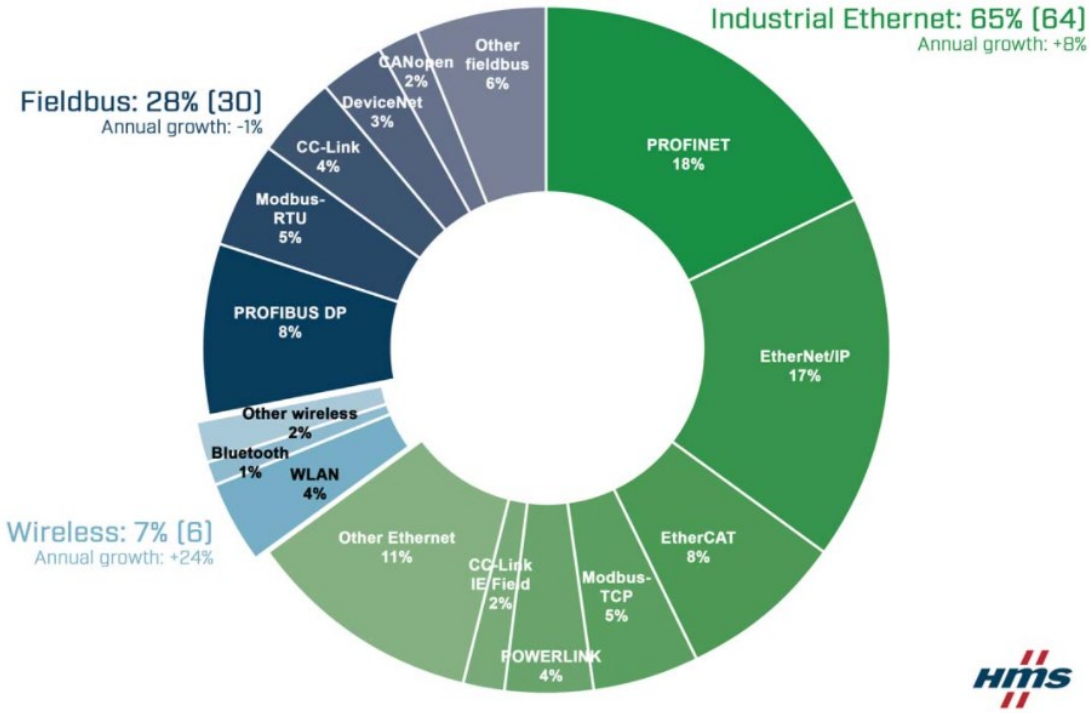
Kuva 3: *Kenttäväylätopologiat [3, s. 93]*

Kuvan ympyrät esittävät järjestelmän laitteita, ja niitä yhdistävät viivat tässä tapauksessa kenttäväyliä niiden välillä. Viivatopologiassa laitteet ovat yhdistetty ketjun tavoin suoraan peräkkäin. Väylätopologiassa laitteet on kytketty lyhyemmillä sivuhaaroilla pääkaapeliin, joka yhdistää laitteet tosiinsa [3, s. 208]. Puu- ja tähtitopologioissa on keskeinen solmu, johon useampi laite on yhdistetty. Tähtitopologiassa kaikki tieto kulkee tämän solmun läpi. Puutopologiassa taas rakenne on hierarkkinen ja se perustuu tiedon siirtämiseen eri tasojen välillä [3, s. 93–94]. Rengastopologialle ominaista on, että jokainen solmu on kytketty osaksi suljettua silmukkaa, jota pitkin tieto kulkee. Tässä topologiassa jokaisella solmulla on oltava osoite, jota käytetään tiedon osoittamiseksi tietylle solmulle [3, s. 93].

Kenttäväylien avulla siis yhdistetään kenttätason laitteita suoraan toisiinsa, eikä näin ollen kaikkia laitteita tarvitse erikseen kytkeä ylemmän tason ohjaimeen kuten keskitetyissä järjestelmissä. Näin ollen myös esimerkiksi vikatilanteet voidaan selvittää paikallisesti ilman että se vaikuttaa koko järjestelmän toimintaan. Kenttäväylien soveltaminen tarjoaa siis joustavuutta niin järjestelmän suunnittelussa kuin käytön aikana.

3. HYDRAULIIKASSA KÄYTETTÄVIEN KENTTÄVÄYLIEN VERTAILU

Tässä luvussa tarkastellaan yleisimpiä hydrauliikassa käytettäviä kenttäväyliä ja niiden välisiä eroja niin itse teknologian kuin ohjausjärjestelmän laitteiden saatavuuden ja eri sovellusten tiedonsiirron vaatimusten kannalta. Kenttäväylästandardeja on olemassa useita erilaisia, ja niitä tarjoavat useat eri organisaatiot. Manoj Kumarin ja Sathish Kumarin [5] mukaan sovellukseen sopivan kenttäväylästandardin valintaan vaikuttavia asioita ovat mm. suorituskyky, asennus- ja ylläpitokustannukset ja reaaliaikavaatimukset. Varsinkin Ethernet-pohjaiset ratkaisut kuten Ethernet/IP, Ethernet for Control Automation Technology (EtherCAT) ja serial real-time communication system (Sercos) ovat viime aikoina kasvattaneet suosiotaan [5]. On kuitenkin olemassa muitakin kuin Ethernet-pohjaisia ratkaisuja. Erilaisten teollisuuden tiedonsiirron vaihtoehtojen laaja valikoima ja niiden vastaava markkinaosuus on esitetty kuvassa 4.



Kuva 4: *Teollisuuden tiedonsiirtoratkaisujen markkinaosuus vuonna 2021 [6]*

Ethernet-pohjaisilla ratkaisuilla on siis muita kenttäväyläratkaisuja huomattavasti suurempi markkinaosuus. Kuvasta 4 voidaan myös huomata, että langattomien ratkaisujen

osuus on viimeisen vuoden aikana kasvanut merkittävästi. Alueittain Euroopassa suosituimmat kenttäväylästandardit ovat Ethernet/IP ja PROFINET, ja Yhdysvalloissa suositaan eniten Ethernet/IP:tä ja EtherCAT:iä [6].

3.1 Kenttäväylästandardien esittely

Tässä työssä tarkemmin tarkasteltaviksi kenttäväylästandardeiksi on valittu EtherCAT, Sercos, Ethernet/IP ja J1939. Työn käytäntöosassa käytetään EtherCAT:iä venttiilin yhdistämiseksi tietokoneeseen konfigurointia varten. Lisäksi EtherCAT:iä tarkastellaan tarkemmin etenkin sen Yhdysvalloissa saavuttaman suuren markkinaosuuden ansiosta. Sercos on valittu tarkasteltavaksi, koska työssä käytettävän venttiilin valmistaja Bosch Rexroth on mukana sitä kehittävässä organisaatiossa. Ethernet/IP:tä tarkastellaan sen suuren markkinaosuuden takia. Se on myös kenttäväylistä lähimpänä perineistä Ethernet-teknologiaa, ja tarjoaa tarkastelluista kenttäväylistä kaikkein monipuolisimmat palvelut eri OSI-mallin tasoilla. Controller Area Network (CAN) on ajoneuvoissa ja työkoneissa paljon käytetty kenttäväylä, jonka tarjoamaa toiminnallisuutta voidaan täydentää korkeamman tason protokollien avulla. Tästä esimerkkeinä ovat CANopen ja J1939-standardi, joista varsinkin jälkimmäinen on suosittu työkoneautomaatiosovelluksissa. CAN-pohjainen kenttäväyläratkaisu tarjoaa perspektiiviä verrattuna työssä tarkasteltaviin Ethernet-pohjaisiin ratkaisuihin. Lisäksi kaikkia edellä mainittuja kenttäväylästandardeja voidaan soveltaa työssä käytettävän venttiilin kanssa kommunikointiin.

3.1.1 EtherCAT

EtherCAT on Beckhoffin kehittämä Ethernet-pohjainen ja avoin kenttäväylästandardi, jota ylläpitää vuonna 2003 perustettu EtherCAT Technology Group (ETG). Sen toiminnallisuus perustuu datakehyksien tehokkaaseen käsittelyyn kohdelaitteissa. Jokainen laite lukee ja kirjoittaa datakehykseen tietoa samanaikaisesti, kun kehys siirtyy järjestelmässä eteenpäin, joka johtaa tehokkaaseen kaistan käyttöön. EtherCAT on lisäksi joustava teknologia, jonka avulla useat topologiat ovat järjestelmässä mahdollisia. Jopa 65 535 laitetta voidaan kytkeä samaan järjestelmään soveltamalla viiva-, väylä-, puu- tai tähtitopologiaa tai edellä mainittujen yhdistelmää. Yksittäisiä laitteita on mahdollista sijoittaa jopa 100 metrin päähän toisistaan. Järjestelmän teoreettinen tiedonsiirtonopeus voi olla jopa 100 Mb/s. EtherCATiä käytetään mm. koneenohjauksessa, ajoneuvoissa ja liikkuvissa koneissa. [7] Näistä kaikista on mahdollista löytää hydraulisia toimintoja, joten EtherCAT on yleinen kenttäväyläratkaisu hydrauliikassa.

EtherCAT käyttää suoraan Ethernet-standardissa IEEE 802.3 määriteltyä standardidatakehystä ja fyysistä kerrosta tiedonsiirtoon. Teollisuuden kovat reaaliaikavaatimukset,

suuri laitteiden määrä ja prosessidatan syklinen luonne kuitenkin tekevät standardin mukaisen Ethernetin käytöstä kenttätason tiedonsiirrossa mahdotonta. [7] EtherCAT toteuttaa siis OSI-mallin kaksi alinta kerrosta käytännössä suoraan Ethernet-standardin pohjalta. Se kuitenkin muun toteutuksensa avulla ratkaisee edellä mainitut ongelmat.

Järjestelmä voidaan laitteiden vastuun osalta jakaa isäntälaitteisiin (master) ja orjiin (slave). EGT:n [7] mukaan tiedonsiirto EtherCAT-järjestelmässä alkaa, kun isäntälaite lähettää tietosähkeen, joka kulkee kaikkien muiden laitteiden läpi. Jokainen orja voi siten sekä lukea että kirjoittaa tietoa datakehykseen. Kun tietosähke on kulkenut ketjun loppuun, viimeinen laite havaitsee tämän, ja lähettää sähkeen takaisin isännälle. Tämä onnistuu Ethernetin kaksisuuntaisuuden ansiosta. [7] Isäntälaite on siis ainoa, joka voi lähettää tietoa järjestelmää pitkin. Muut laitteet vain välittävät datakehyksiä eteenpäin järjestelmässä.

EtherCAT käyttää tiedonsiirtoon standardin mukaisia Ethernet-datakehyksiä, jotka sisältävät tunnuksen 0x88A4 jälkeen itse EtherCAT-kehyksen. Tämä taas koostuu tietosähkeistä, jotka sisältävät osoitetiedon, halutun operaation ja itse siirrettävän datan. Kehyksien rakenteen ansiosta saavutetaan myös etuja muistinhallinnassa. EtherCAT-teknologian avulla kehyksiä voidaan suoraan kopioida laitteiden muistiin. [7] EtherCAT siis pohjautuu hyvin vahvasti valmiisiin Ethernet-standardeihin, mutta toteuttaa tarvittavat toiminnallisuudet tiedonsiirrossa, jotta teollisuuden kenttätason vaatimukset saavutetaan.

3.1.2 Sercos

Myös Sercos on Ethernet-pohjainen ratkaisu, jota on muokattu täyttämään tarvittavat reaaliaikavaatimukset. Tällaisia ratkaisuja kutsutaan reaaliaikaiseksi Ethernetiksi. Tiedonsiirto Sercos-järjestelmissä perustuu sähkeiden sykliseen välittämiseen isäntä-orja periaatteella. Yhteen sykliin kuluva jaksonaika voi olla pienimmillään jopa 31,25 µs ja suurimmillaan 65 ms. Jokainen jakso on jaettu kahteen osaan, joista ensimmäisen kautta välitetään reaaliaikaisia sähkeitä. Nämä sähkeet pystytään tunnistamaan Ethernet-kehyksestä tunnuksella 0x88CD. Reaaliaikakanavassa välitetään kahdenlaisia sähkeitä. Master Data Telegramin (MGT) avulla isäntälaite lähettää orjille aikataulutietoa. Acknowledge Telegram (AT) taas mahdollistaa tilannetiedon lähettämisen orjalta isännälle tai toisille orjille. Jakson toista kanavaa pitkin voidaan lähettää tietoa käyttäen muunlaisia Ethernet-sähkeitä. Tämän ansiosta orjia on mahdollista konfiguroida ennen kuin reaaliaikaiset ominaisuudet kytketään päälle ja esimerkiksi kannettavan tietokoneen voi kytkeä suoraan Sercos-laitteeseen. [8]

Sercos käyttää fyysisen kerroksen toteutuksessa standardin IEEE 802.3 mukaista Ethernet-teknologiaa. Kaapelina voidaan käyttää mm. kierrettyä parijohtoa tai valokuitua.

Suurin sallittu yksittäisten laitteiden välinen etäisyys järjestelmässä on 100 metriä. Tiedonsiirtonopeus on maksimissaan 100 Mb/s. Fyysisesti Sercos-järjestelmä koostuu isännästä ja vähintään yhdestä mutta enintään 510 orjasta, jotka ovat liitetty toisiinsa käyttäen viiva- tai rengastopologiaa. Ethernetin kaksisuuntaisuuden ansiosta nämä molemmat topologiat voidaan kuitenkin mieltää rengastopologioiksi. Viivatopologiassa sähke kulkee isännältä viimeiselle laitteelle asti, joka lähettää sen takaisin. Laitteet voivat lukea tietoa sähkeestä molempiin suuntiin mentäessä. Rengastopologialla saadaan kasvatettua järjestelmän robustisuutta, sillä kaapelin katkeamisella tai vioittumisella yhdestä kohtaa ei ole merkitystä, vaan laite voidaan aina tavoittaa toisesta suunnasta. [8] EtherCATin tavoin Sercos totetuttaa OSI-mallin kaksi alinta kerrosta Ethernet-standardin mukaisesti, ja muokkaa teknologian täyttämään automaatiosovellusten kenttätason kovat reaaliaikavaatimukset. Sercos ei tarjoa samanlaista monipuolisuutta topologian valintaan kuin EtherCAT, ja laitteitakin voi yhteen järjestelmään kytkeä Sercoksen tapauksessa huomattavasti vähemmän.

3.1.3 Ethernet/IP

Ethernet/IP on vuonna 2001 esitelty kenttäväyläteknologia, jota ylläpitää Odva, Inc. Toisin kuin edellä mainitut teknologiat, Ethernet/IP toteuttaa OSI-mallin kaikki seitsemän kerrosta. Tämä johtuu siitä, että se toteuttaa Common Industrial Protocol -teollisuusprotokollan (CIP) mallin ylemmillä tasoilla. Tämän taustalla on tavoite tarjota toimivaksi todettua standardoitua Ethernet-teknologiaa myös tehtaan kenttätason laitteiden yhdistämiseen. Teknologian etuja ovat ohjausjärjestelmän laitteiden ohjaus, konfigurointi ja datankeruu yhden verkon välityksellä, ja yhden verkon käyttäminen usean hajautetun verkon selkärankana. [9]

Sekä viiva- että rengastopologiat ovat Ethernet/IP:n avulla mahdollisia, ja aktiivisen infrastruktuurinsa ansiosta järjestelmään liitettyjä laitteita voi teoriassa olla jopa ääretön määrä. Sallittuja topologioita ovat viiva, tähti ja rengas. Suurin sallittu tiedonsiirtonopeus on jopa 1 Gb/s. Myös tämän teknologian järjestelmissä suurin sallittu etäisyys yksittäisten laitteiden välillä on 100 metriä. Ethernet/IP tarjoaa yhden kytkennän, jota voidaan käyttää sekä ohjaukseen että konfigurointiin. Samaa väylää pitkin voidaan välittää reaaliaikaista ohjaustietoa ja vähemmän aikakriittistä tietoa, jota voidaan käyttää konfigurointiin tai datan keräämiseen. Laitteiden välillä voi vallita isäntä-orja suhteita tai ne voivat kommunikoida keskenään samanarvoisina. [9] Myös Ethernet/IP tarjoaa useita vaihtoehtoja topologialle, ja ei rajoita laitteiden määrää ollenkaan. Teknologia mahdollistaa myös selkeästi kahden laitteen kommunikoinnin samanarvoisina, joten on mahdollista toteuttaa järjestelmä kokonaan ilman isäntälaitetta.

Toisin kuin kaksi edellä esitettyä kenttäväyläteknologiaa, Ethernet/IP toteuttaa OSI-mallin kaikki kerrokset. Näin ollen verkon toiminnallisuus on määritelty kokonaisuudessaan. Ethernet/IP:n avulla on pyritty tuomaan ennestään toimivaksi todettu Ethernet-teknologia osaksi teollisuuden kenttätasoa, jossa pitää täyttää kovat reaaliaikavaatimukset. Erilaisten topologioiden mahdollisuudet ovat rajalliset verrattuna EtherCATiin. OSI-mallin kaksi ensimmäistä kerrosta, fyysinen kerros ja siirtokerros on kaikissa esitellyissä kenttäväyläratkaisussa toteutettu saman Ethernet-standardin perusteella, koska kaikki ovat teollisuuden Ethernet-pohjaisia ratkaisuja. Datakehyksen rakenteessa on pieniä eroavaisuuksia eri ratkaisujen välillä, mutta päällisin puolin kaikki kolme esiteltyä kenttäväylästandardia ovat hyvin samanlaisia.

3.1.4 SAE J1939

J1939 tarkoittaa tiedonsiirron standardeja, jotka on kehittänyt autoalan standardisointijärjestö Society of Automotive Engineers (SAE). Standardeja sovelletaan erityisesti raskaissa ajoneuvoissa kuten linja-autoissa, rekoissa ja liikkuvissa työkoneissa [10]. Eroten edellä esitellyistä Ethernet-pohjaisista ratkaisuista, J1939-standardi pohjautuu CAN-standardin mukaiseen kommunikointiin. Kvaser AB:n verkkosivun [10] mukaan J1939 on korkeamman tason protokolla, joka toteuttaa fyysisen kerroksen ja siirtokerroksen suoraan CAN-standardin mukaisesti. J1939 myös toteuttaa sovelluskerroksen, joka määrittää, mitä tietoa jokaisessa viestissä lähetetään [10].

CAN käyttää fyysisessä kerroksessa tiedonsiirtoon kierrettyä parijohtoa, ja laitteet saavat olla korkeintaan 40 metrin päässä toisistaan. Järjestelmän tiedonsiirtonopeus on yleensä 250 kb/s tai 500 kb/s riippuen toteutuksesta. Lisäksi teknologia sallii maksimissaan 30 laitetta kytketyksi yhteen järjestelmään. J1939 tukee topologiana ainoastaan linjatopologiaa, jossa johto kulkee suoraan laitteesta toiseen. Laitteet voidaan kuitenkin kytkeä väylään myös käyttämällä lyhyttä johtoa, jolloin kyseessä on väylätopologia. Tällöin kytkentä on joustavampi, koska saman johdon ei tarvitse kulkea suoraan jokaisen laitteen läpi. [10] Verrattuna Ethernet-pohjaisiin ratkaisuihin J1939 teknologialla on tiukemmat rajoitukset niin laitteiden määrälle kuin niiden etäisyydelle. Myös tiedonsiirron nopeus on pienempi, eikä laitteiden asettelu järjestelmään ole topologian puolesta yhtä joustavaa. Tämä kuitenkin takaa sen, että fyysisesti kytkennät ovat aina yksinkertaisia.

J1939 käyttää tiedonsiirrossa CAN 2.0B -protokollan mukaisia datakehyksiä 29-bittisellä tunnuksella. Tunnuksessa on mm. tieto siitä, onko viesti tarkoitus lähettää ilman osoitetta kaikkien laitteiden saataville vai osoitteen avulla jollekin tietylle laitteelle. CAN-kehyksen koko on kuitenkin vain kahdeksan tavua, joten tätä pidemmät viestit J1939 jakaa pienempiin seitsemän tavun paketteihin. Näin ollen myös suurempia datapaketteja voidaan

lähettää CAN-väylän välityksellä. [10] J1939-standardin avulla voidaan siis täydentää suositun CAN-teknologian toiminnallisuutta, ja väylän välityksellä voidaan myös välittää suurempia paketteja kuin perinteisellä teknologialla. Näin saadaan täydennettyä valmista ja toimivaksi todettua teknologiaa palvelemaan uusia tarkoituksia.

3.2 Ohjausjärjestelmän komponentit eri valmistajilta

Kuten eri kenttäväyläratkaisuja, myös hydraulijärjestelmissä ja niiden ohjauksessa käytettäviä laitteita ja niiden valmistajia on lukuisia. Eri valmistajien laitteet myös tukevat eri kenttäväyläratkaisuja, joten komponenttien ja käytetyn kenttäväyläratkaisun valinnassa täytyy ottaa valmistajakohtaiset erot huomioon. Hydrauliikassa kenttäväylien avulla linkitettyjä älykkäitä laitteita ovat esimerkiksi säädettävällä kierrostilavuudella varustetut hydraulipumput, venttiilien sisäänrakennetut ohjausyksiköt, älykkäät anturit ja toimilaitteet sekä ylemmän tason ohjausjärjestelmät.

Työssä tarkastellaan tarkemmin valmistajista Bosch Rexroth AG:tä (Rexroth), koska työssä käytettävä hydrauliventtiili on kyseiseltä valmistajalta. Vertailukohteiksi tarkasteluun on otettu Parker-Hannifin Corporation (Parker) ja Danfoss, jotka ovat myös merkittäviä laitevalmistajia hydrauliikan alalla. Tutkimus on tehty tarkastelemalla hydrauliikan ja ohjausjärjestelmien komponenttien tuotevalikoimaa valmistajien verkkosivuilta [11–13]. Tarkastelu on rajattu työssä käytettävän venttiilin kaltaisiin venttiileihin sisäänrakennetuilla ohjausyksiköillä, muihin ohjausyksiköihin ja antureihin. Nämä ovat työn kannalta olennaisia komponentteja, ja komponenttien hakeminen hakusanoilla EtherCAT, Sercos, Ethernet/IP, CANopen ja J1939 tuottavat tuloksia, joista kaikki komponentit voidaan luokitella edellä mainittuihin kolmeen kategoriaan. Työssä tarkastellaan komponenttien valmistajakohtaisia eroja, valikoiman monipuolisuutta ja komponenttien saatavuutta eri kenttäväyläratkaisuille.

3.2.1 Hydrauliventtiilit sisäänrakennetuilla ohjausyksiköillä

Ensimmäisenä tarkastellaan työssä tarkasteltavan venttiilin mukaisia proportionaalisuuntaventtiileitä sisäänrakennetulla ohjausyksiköllä. Rexrothin valikoimasta [11] löytyy työssä käytettävä 4WRPDH-tyypin venttiili, joka voidaan yhdistää ohjausjärjestelmän toisiin laitteisiin käyttämällä EtherCAT:iä, Ethernet/IP:tä tai Sercosta. Venttiili löytyy sekä nimelliskoossa NG6 että NG10 [11]. Tämä venttiili toimii hyvin vertailukohtana muiden valmistajien tarjoamille venttiileille, sillä vaihtoehdot kenttäväylän valintaan ovat venttiilillä monipuoliset.

Myös Parkerin valikoimasta löytyy samantyyppisiä venttiileitä. Valikoimassa on kahta eri tyyppiä suoraohjattuja venttiileitä nimelliskoolla NG6 ja NG10, mutta lisäksi myös kaksi

eri esiohjattua proportionaaliventtiiliä aina nimelliskokoon NG32 asti [12]. Parker tarjoaa siis myös suurempikokoisia sisäänrakennetuilla ohjausyksiköillä varustettuja venttiileitä. Käytettävän kenttäväyläteknologian mahdollisuus on kuitenkin rajatumpi. Venttiilit tarjoavat rajapinnan vain EtherCATin käyttämiseen, joka sopii hyvin kohteisiin, joissa tieto täytyy siirtää nopeasti ja lyhyillä jaksonajoilla [12].

Danfoss [13] tarjoaa myös venttiileitä sisäänrakennetuilla ohjausyksiköillä nimelliskoosta NG10 kokoon NG32 asti. Danfossin venttiilit tukevat vain CAN-pohjaista kommunikointia, kuten CANopenia [13]. Venttiilit eivät siis tue Ethernet-pohjaisia kenttäväyliä ollenkaan, mutta kuten Parkerilla, venttiilin koossa on enemmän valinnanvaraa kuin Rexrothin valikoimassa.

Kaikkein monipuolisimmat mahdollisuudet kenttäväyläteknologian valinnalle antavat siis Rexrothin venttiilit. Kuitenkin, jos järjestelmässä tarvitaan suurempikokoisia venttiileitä tilavuusvirran kasvaessa, täytyy tarkastelluista vaihtoehdoista valita joko Parkerin tai Danfossin valmistama venttiili. Tällöin kuitenkin myös kenttäväyläteknologian valitsemisessa on vähemmän vaihtoehtoja.

3.2.2 Muut ohjausyksiköt

Laitevalmistajat tarjoavat myös muunlaisia ohjausyksiköitä eri tarkoituksiin. Rexrothin valikoimassa on venttiilien lisäksi myös hydraulipumppuja sisäänrakennetuilla ohjausyksiköillä. Venttiilien tavoin myös pumput tukevat laitteen yhdistämistä kaikkien työssä tarkasteltavien kenttäväylien eli Sercosin, EtherCATin ja Ethernet/IP:n välityksellä [11]. Muilta valmistajilta vastaavia komponentteja ei löydy, joten Rexroth tarjoaa parhaan valikoiman hydraulijärjestelmien komponenteille, joissa on sisäänrakennettu ohjausyksikkö. Nämä komponentit jättävät myös vaihtoehtoja kenttäväyläratkaisun valinnalle. Tällaisten komponenttien avulla on yksinkertaista toteuttaa hajautettu ohjausjärjestelmä, koska järjestelmän asennus ja käyttöönotto helpottuu älykkäiden laitteiden ansiosta.

Kaikki työssä tarkasteltavat valmistajat tarjoavat erillisiä ohjausyksiköitä hydraulijärjestelmien ohjaukseen. Rexrothilla on oma ohjausyksikkö yhden tai kahden akselin sekä pumpun ohjaukseen. Valmistajan [11] mukaan hydraulisen akselin liikeohjaukseen tarkoitetulla yksiköllä voi ohjata akselin paikkaa, nopeutta, painetta, voimaa tai näiden yhdistelmää, aivan kuten työn venttiilin ohjausyksiköllä. Kaikki edellä mainitut erilliset ohjausyksiköt voidaan yhdistää työssä esiteltyjen Ethernet-pohjaisten kenttäväylästandardien avulla [11].

Danfoss [13] tarjoaa oman PLUS+1 säädinvalikoimansa liikkuvan kaluston hydrauliikkaan. Tähän tuoteperheeseen kuuluvat säätimet, anturit ja käyttöliittymät, joiden avulla pystytään tekemään monipuolisia säätöratkaisuja eri tarkoituksiin, kuten toimilaitteiden

tai pumppujen ohjaukseen. Säätimet tukevat CAN-pohjaista kommunikointia, ja niiden avulla voidaan toteuttaa hajautettuja ohjausjärjestelmiä, mutta ne voivat myös toimia itsenäisinä ohjausyksikköinä pienemmän mittakaavan sovelluksissa. [13]

Myös Parker [12] tarjoaa ohjausyksiköitä hydraulisten prosessien ja liikkeiden ohjaukseen. Näiden ohjausyksiköiden tukemat kenttäväylästandardit ovat EtherCAT ja Ethernet/IP. Parkerin ohjausyksiköt tarjoavat mahdollisuuden ohjata jopa 40:tä hydraulista akselia samalla ohjausyksiköllä. Valikoimasta löytyy myös erillinen ohjausyksikkö hydraulipumppujen ohjaukseen. Näistä etenkin työkoneisiin tarkoitetut ohjaimet tukevat CAN-pohjaista kommunikointia, kuten J1939. [12]

Kaikilta työssä tarkastelluilta valmistajilta löytyy ohjausyksiköitä hydraulijärjestelmien ohjaukseen. Valikoimat ovat hyvin samanlaisia, ja eri käyttötarkoituksiin löytyy samankaltaisia komponentteja. Parkerin valmistamat PLC-ohjaimet liikkeen säätöön eroavat muiden valmistajien vastaavista komponenteista siten, että ne mahdollistavat paljon suurikokoisemman järjestelmän toteuttamisen yhdellä, keskitetyllä ohjausyksiköllä. Rexrothin ja Danfossin komponentit ovat tarkoitettu enimmäkseen hajautettujen ja modulaaristen järjestelmien toteuttamiseen, koska yksittäisellä ohjausyksiköllä ohjattavien akselien maksimimäärä on huomattavasti pienempi. Kenttäväyläratkaisun vaihtoehdot ovat Rexrothin laitteilla kaikkein monipuolisimmat, kun taas Danfossin laitteet tukevat vain CAN-pohjaista kommunikointia.

3.2.3 Anturit

Danfoss on työssä tarkasteltavista valmistajista ainut, joka tarjoaa antureita kenttäväyläkytkennällä. Valmistajalta [13] löytyy sekä paine- että kääntymiskulma-antureita, jotka tukevat CAN-pohjaista kommunikointia. Näiden antureiden ulostulosignaali on suoraan standardin CANopen tai J1939 mukainen, ja anturi voidaan näin kytkeä CAN-väylällä osaksi järjestelmää. Anturit kuuluvat samaan PLUS+1 tuoteperheeseen kuin aiemmin mainitut ohjausyksiköt, ja näillä laitteilla voidaan siis toteuttaa kokonaisia ohjausjärjestelmiä työkoneisiin. [13]

Myös muut valmistajat tarjoavat hydraulijärjestelmissä yleisesti käytettäviä antureita, kuten paineantureita, mutta näiden ulostulona käytetään analogista virta- tai jännitesignaalia. Analogisen signaalin käyttäminen antureissa ei kuitenkaan lisää johdotuksen määrää, sillä vain yksi johto anturilta riittää. Tämä kuitenkin vaatii lisättyä toiminnallisuutta ohjausyksiköltä, joka hyödyntää anturitietoa, koska tämä analoginen signaali täytyy erikseen ohjausyksikössä skaalata halutuksi suureeksi, kuten paineeksi. Tarkastelluista laitevalmistajista Danfoss on ainoa, jonka komponentit käyttävät jokaisessa järjestelmän

osassa kenttäväyläpohjaista kommunikointia. Yksinkertaisuuden vuoksi muut valmistajat suosivat analogisia signaaleja antureissa, ja mahdollistavat kenttäväylien käytön vain ohjausyksiköiden kytkemisessä toisiinsa tai ylemmän tason ohjausyksikköön.

3.3 Tiedonsiirto koneautomaatiosovelluksissa

Kuten kaikissa nykypäivän ajoneuvoissa, myös liikkuvissa työkoneissa tietoa siirretään moottorin ja sen ohjausyksikön välillä. Moottorinohjausyksikkö on kytketty moottoriin ja se säätelee moottorin polttoaineen kulutusta, pakokaasuja, voimantuottoa ja moottorin kierroslukua [14, s. 771]. Työkoneissa on yleensä ajamisen lisäksi paljon muitakin toimintoja, joiden ohjauksia täytyy toteuttaa. Koneautomaatiosovelluksissa ohjaukset perustuvat yleensä nykyisen toimintapisteen muuttamiseen, esimerkiksi jonkin koneen osan liikuttamiseen. Voimalähteenä kaikissa työkoneiden toiminnoissa on kuitenkin moottori, jota ohjataan moottorinohjausyksiköllä.

Työkoneiden toimintojen toteuttamiseen tarvitaan anturitietoa toimilaitteelta, jotta tiedetään missä tilassa toiminnon suorittaminen on kyseisellä ajanhetkellä. Ruggerin et. al. [15] mukaan työkoneiden ohjausjärjestelmät ovat nykyään enemmän modulaarisia, ja niiden kommunikointi keskenään on tärkeää mm. polttoaineenkulutuksen minimoimiseksi. Toimilaitteen ohjausyksiköt lähettävät siis moottorin ohjausyksikölle tietoa tehontarpeesta. Toimintojen toteuttamiseen tarvittavan tiedonsiirron täytyy olla reaaliaikaista, jotta niistä saadaan tarkkoja ja turvallisia [15].

Edellä mainitun perusteella koneautomaatiosovelluksissa kenttäväyliä pitkin siirretään tietoa, jota tarvitaan haluttujen toimintojen ohjauksiin. Hydraulisella voimansiirrolla varustetuissa työkoneissa tällaista tietoa ovat esimerkiksi toimilaitteiden asema ja paine, joita mitataan myös työn testijärjestelmässä. Kenttäväylien avulla välitetään myös eri hajautetuille ohjausyksiköille asetusarvotietoa toteutettavasta toiminnosta. Työkoneissa siirrettävä tieto on siis yksinkertaista, mutta reaaliaikaisuus korostuu. Siirrettävä tieto liikkuu siis yleensä ylemmältä tasolta, esimerkiksi käyttäjältä alemmalle tasolle toimilaitteiden ohjaimille.

3.4 Kenttäväylästandardien vertailun tulokset

Työn ensimmäisessä osassa vertailtiin yleisimpien hydrauliikassa käytettävien kenttäväylien ominaisuuksia ja eroja sekä ohjausjärjestelmän laitteiden saatavuutta eri kenttäväylästandardeille. Työssä tarkasteltaviksi kenttäväylästandardeiksi valittiin Ethernet-pohjaiset EtherCAT, Sercos ja Ethernet/IP sekä CAN-pohjainen SAE J1939 -standardi. Kenttäväylästandardien vertailun tulokset ovat esitetty taulukossa 1.

Taulukko 1: Kenttäväylästandardien vertailun tulokset

Ominaisuus	**EtherCAT**	**Sercos**	**Ethernet/IP**	**SAE J1939**
Suurin sallittu laitteiden määrä (kpl)	65 535	511	teoriassa ei rajaa	30
Suurin sallittu yksittäisten laitteiden välinen etäisyys	100 m	100 m	100 m	40 m
Sallitut topologiat	viiva, väylä, puu, tähti tai yhdistelmä	viiva ja rengas	viiva, tähti ja rengas	viiva ja väylä
Suurin tiedonsiirtonopeus	100 Mb/s	100 Mb/s	1 Gb/s	500 kb/s
Toteutetut OSI-mallin tasot	1, 2 ja 7	1, 2 ja 7	1–7	1, 2 ja 7

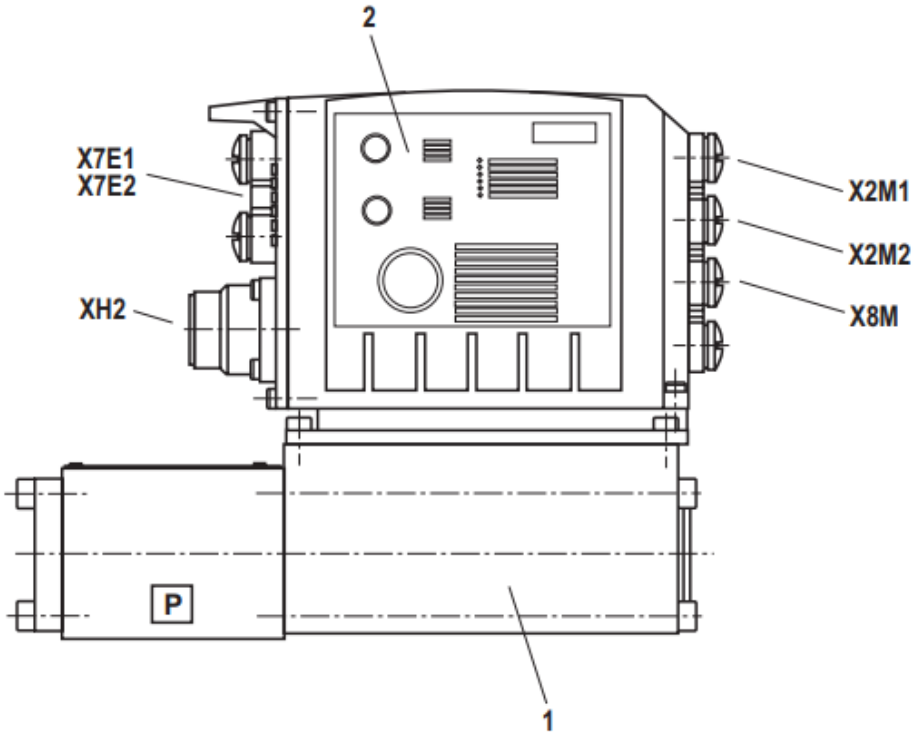
Vertailukohteiksi on valittu tiedonsiirtojärjestelmän toteutusta rajoittavia ominaisuuksia, joita ovat suurin sallittu laitteiden määrä ja yksittäisten laitteiden välinen etäisyys yhdessä järjestelmässä, suurin teknologialla saavutettava tiedonsiirtonopeus, teknologian sallimat topologiat ja toteutetut OSI-mallin tasot. Työssä havaittiin, että kaikista suurin määrä laitteita sallitaan Ethernet/IP-teknologian järjestelmissä, joissa rajaa ei teoriassa ole. Myös EtherCAT-järjestelmissä laitteita sallitaan huomattavan paljon, jopa 65 635 kappaletta. Tutkituista kenttäväylästandardeista kaikista eniten laitteiden määrää rajoitetaan SAE J1939 -teknologian järjestelmissä, joissa yhteen järjestelmään voi kytkeä vain 30 laitetta. Myös yksittäisten laitteiden suurin sallittu etäisyys on pienin J1939-standardin järjestelmissä, jossa se on vain 30 metriä. Muut työssä tarkastellut teknologiat sallivat jopa 100 metrin etäisyyden. Topologioista eniten vaihtoehtoja tarjoaa EtherCAT. Sercos ja Ethernet/IP tukevat molemmat viiva- ja rengastopologioita ja Ethernet/IP mahdollistaa myös tähtitopologian. J1939 taas tukee vain viivatopologiaa, joka voidaan tarvittaessa laajentaa väylätopologiaksi.

Laitteiden etäisyyksien ja määrien rajoitteiden lisäksi Ethernet-pohjaiset teknologiat mahdollistavat suuremman tiedonsiirtonopeuden kuin CAN-pohjainen J1939. EtherCAT:in ja Sercosin mahdollistama 100 Mb/s ja Ethernet/IP:n 1 Gb/s ovat huomattavasti suurempia kuin J1939-standardin mahdollistama 500 kb/s. Kenttäväylästandardien toteuttamat OSI-mallin tasot ovat muuten identtiset, mutta Ethernet/IP toteuttaa myös tasot 3–6. Näin ollen teknologia toteuttaa verkon toiminnallisuuden kokonaan. Ethernet/IP mahdollistaa näin ollen tarkastelluista standardeista topologiavaihtoehtoja lukuun ottamatta kaikkein monipuolisimmat ominaisuudet tiedonsiirtojärjestelmälle. J1939-standardi asettaa järjestelmälle kaikista tiukimmat rajoitukset. Kenttäväylästandardin valinta on kuitenkin aina sovelluskohtaista, mutta suurempikokoisissa järjestelmissä on suosittava Ethernet-pohjaisia kenttäväyläratkaisuja.

Työssä tarkasteltiin ohjausjärjestelmien laitteiden, kuten venttiilien sisäänrakennettujen ohjausyksiköiden, muiden ohjausyksiköiden ja antureiden, saatavuutta tarkastelluille kenttäväylästandardeille. Työssä tarkasteltiin Bosch Rexroth AG:n, Parker Hannifin Corporationin ja Danfossin valmistamien hydraulikomponenttien valikoimaa. Työssä käytettävän kaltaisia venttiileitä sisäänrakennetuilla ohjausyksiköillä löytyy jokaisen valmistajan valikoimasta, ja ne tukevat osittain samoja kenttäväylästandardeja. Työssä havaittiin, että ohjausyksiköitä yleensä on eniten saatavilla EtherCAT ja Ethernet/IP-teknologioille, joita tukevat sekä Rexrothin että Parkerin laitteet. Rexrothin laitteet tukevat myös Sercos-teknologiaa. Danfossin valmistamat komponentit, ohjausyksiköt ja anturit, tukevat ainoastaan CAN-pohjaista kommunikointia. Työssä havaittiin, että laitteiden tukemat kenttäväylästandardit vaihtelevat valmistajan mukaan, mutta yleisempiä Ethernet-pohjaisia kenttäväylästandardeja, kuten EtherCATiä ja Ethernet/IP:tä, tukee useampi valmistaja.

4. VENTTIILIN SOVITTAMINEN OSAKSI TESTI-JÄRJESTELMÄÄ

Työssä tarkastellaan Bosch Rexrothin valmistamaa hydraulista suoraohjattua servoventtiiliä. Venttiilin malli on 4WRPDH, nominaalikoko NG6 ja suurin sallittu tilavuusvirta venttiilin läpi 40 l/min. Venttiili koostuu sekä suoraohjatusta suuntaventtiilistä, että sitä ohjaavasta sisäänrakennetusta ohjausyksiköstä. Ohjausyksikön integroitu akseliohjain (IAC) mahdollistaa toimilaitteen ohjauksen hajautetusti erillään muusta järjestelmästä ja Multi-Ethernet-rajapinta mahdollistaa yleisimpien Ethernet-pohjaisten kenttäväylien käyttämisen venttiilin yhdistämiseen [16]. Venttiilin datalehden [17] mukaan ohjausyksikön akseliohjaimella voidaan suoraan säätää mm. toimilaitteen asemaa, voimaa tai nopeutta. Venttiili mahdollistaa myös useamman edellä mainitun suureen säätämisen samanaikaisesti [17]. Jotta näitä suureita voitaisiin säätää, tarjoaa venttiilin ohjausyksikkö useita liitäntöjä eri tarkoituksiin. Venttiilin rakenne on esitetty kuvassa 5.



Kuva 5: *Bosch Rexroth 4WRPDH venttiili [17]*

Kuvassa 4 itse suuntaventtiili on osoitettu numerolla 1 ja ohjausyksikkö numerolla 2. Datalehden [17] mukaan venttiilin ohjausyksikössä on kaksi Multi-Ethernet-liitäntää, X7E1 ja X7E2, joiden kautta venttiili voi vastaanottaa asetusarvotietoa, ja vastaavasti lähettää

tarvittavaa tietoa ylemmän tason ohjausjärjestelmälle. Liitännät tukevat yleisimpiä Ethernet-pohjaisia kenttäväyliä, kuten EtherCAT, Sercos ja Ethernet/IP. Tiedon lähettäminen onnistuu myös digitaalisen ja analogisen rajapinnan, XH2:n kautta. Venttiilin konfigurointi ja parametrien asettaminen tapahtuu kuitenkin Ethernet-liitännän kautta. [17] Venttiili voi siis sekä vastaanottaa että lähettää tietoa kenttäväylän avulla, ja näin ollen kommunikoida ylemmän tason ohjausjärjestelmän kanssa.

Lisäksi venttiili tarjoaa kolme liitäntää suoraan anturitiedon vastaanottamiselle. Liitäntöihin X2M1 ja X2M2 voidaan liittää analogista signaalia lähettävä anturi, ja liitäntään X8M vastaavasti digitaalinen anturi. [17] Näihin liitäntöihin lähetettävä tieto voidaan konfiguroida haluttuun muuttujiin ja näin käyttää suoraan halutun säätötoimenpiteen toteuttamiseen venttiilin sisäänrakennetussa ohjausyksikössä.

4.1 Venttiilin konfigurointi

Konfiguroinnin avulla venttiili saadaan toimimaan järjestelmässä halutulla tavalla. Konfiguroinnissa tärkeitä asioita ovat oikean toimintatilan ja säätötoiminnon valinta, sekä antureilta saatavan mittaustiedon asettaminen oikeisiin muuttujiin ja mittaussignaalin skaalaaminen oikein. Venttiilin konfiguroinnissa käytetään venttiilin valmistajan Bosch Rexrothin tarjoamaa IndraWorks Ds -konfigurointiohjelmaa, joka tarjoaa valmiin käyttöliittymän venttiilin konfigurointiparametrien muokkaamiseksi. Konfigurointia varten täytyy ohjelmalla muodostaa yhteys venttiiliin, jolloin laitekohtaiset oletusparametrit voidaan ladata. Tämän jälkeen parametreja voidaan muokata haluamalla tavalla.

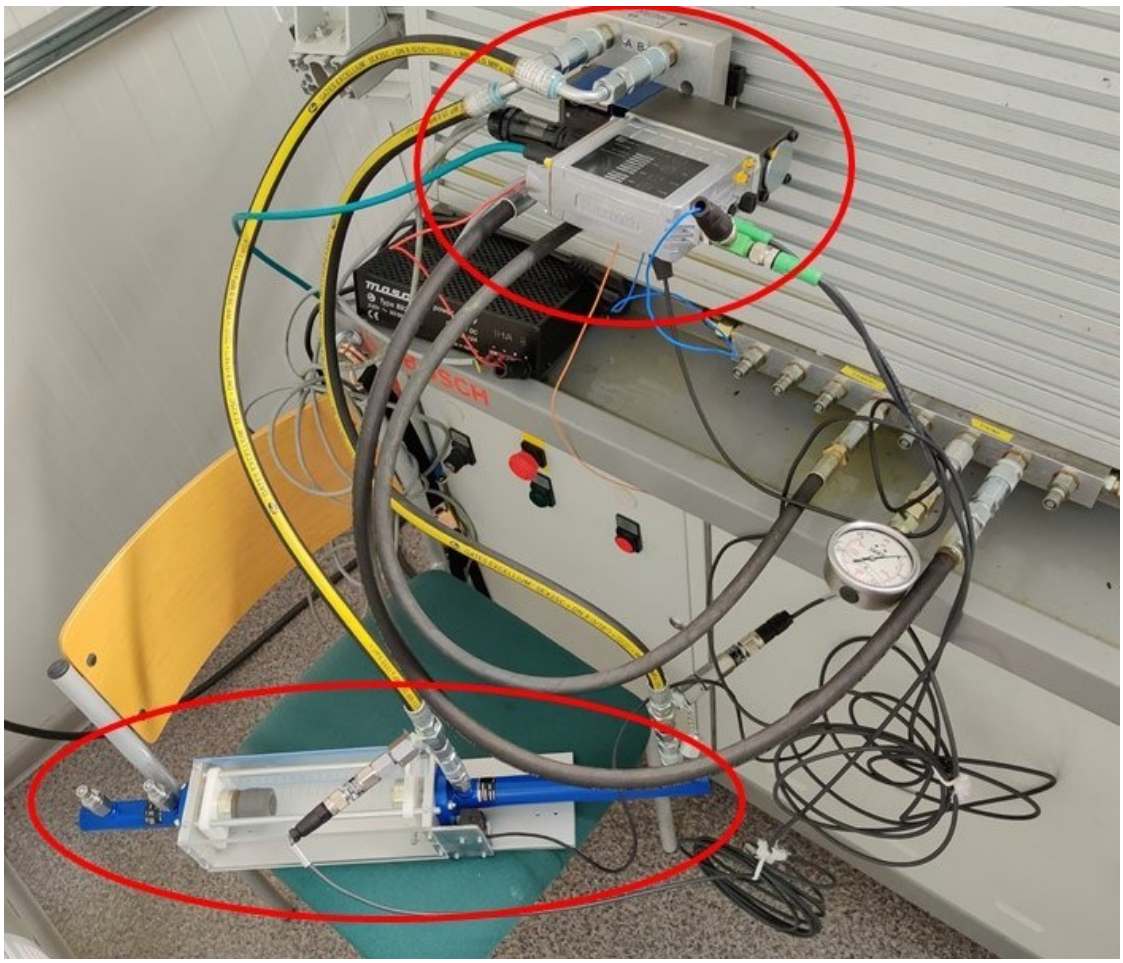
Tärkeimmät venttiilin konfiguroinnissa tehtävät toimenpiteet ovat oikean toimintatilan valinta ja antureiden sisääntulojen määrittäminen. Toimintatila voidaan valita Operation mode selection -välilehdeltä, joka löytyy konfigurointiohjelman Operation modes -kansiosta. Työn testijärjestelmää varten toimitilaksi valitaan toimilaitteen asemasäätö, jossa tarvittava aseman mittaussignaali mitataan asema-anturilla. Anturitiedon konfigurointiin tarvittavat toiminnot löytyvät ohjelman Mechanical drive system / scaling -kansiosta. Asema-anturi konfiguroidaan Poisition setting -välilehdellä, jossa täytyy valita Interface-valikosta ”Analog encoder”, ja tämän jälkeen skaalata anturilta saatava 0–10 V:n jännitesignaali asemaksi, jonka yksikkö on millimetri (mm). Lisäksi signaalin lähteeksi asetetaan analoginen tulo 1, koska asema-anturin signaali välitetään venttiilille analogisena liitännän XH2 pinniin numero 4.

Työssä tarvitaan lisäksi kaksi paineanturia, jotka mittaavat sylinterin kammioiden painetta. Näin voidaan laskea sylinterin kammioiden yli vallitseva paine-ero, ja näin ollen

mäntään vaikuttava kokonaisvoima. Paineanturi konfiguroidaan Pressure/force acquisition -välilehdellä, jossa Force determination -kohtaan asetetaan ”Differential pressure A-B”. Paineanturien signaalin lähteeksi valitaan analogiset tulot 3 ja 4, koska paineanturit kytketään venttiilin liitäntöihin X2M1 ja X2M2. Kammion paine luetaan virtasignaalista, joka on standardin mukainen 4–20 mA. Nämäkin signaalit täytyy skaalata oikein, jotta ohjausyksikkö osaa muuttaa virtasignaalin paineeksi yksikössä bar. Tämän jälkeen Assignment analog inputs -välilehdeltä voi tarkastaa, että tiedot ovat päivittyneet oikein ja kaikki aikaisemmin asetetut tulosignaalit on konfiguroitu oikein.

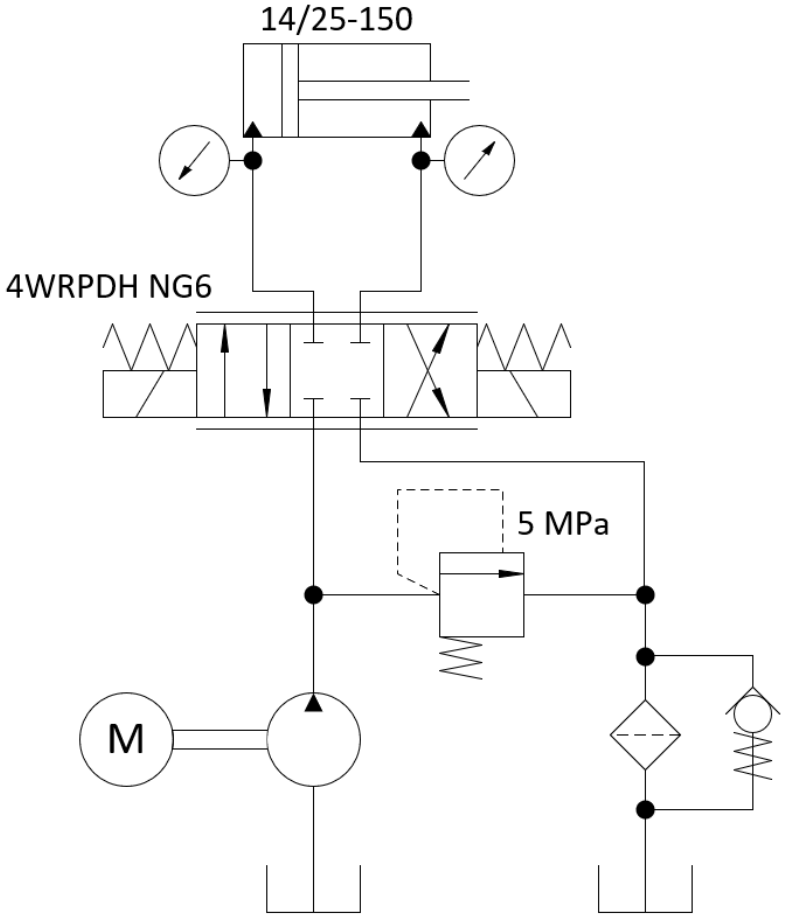
4.2 Testijärjestelmä

Työn testijärjestelmän pääkomponentit ovat hydraulikoneikko, -sylinteri ja -venttiili, joiden lisäksi järjestelmä sisältää tarvittavat anturoinnit ja liitännät. Testijärjestelmällä on tarkoitus tutkia sylinterin aseman ohjaamista edellä esitellyn venttiilin sisäisen ohjausyksikön avulla. Aseman säätämiseksi tarvitaan mittaustieto itse sylinterin asemasta. Testijärjestelmä sisältää myös paineanturit sylinterin kummankin kammion paineen mittaamiseksi. Testijärjestelmän fyysinen rakenne on esitetty kuvassa 6.



Kuva 6: *Työn testijärjestelmä*

Kuvassa on punaisella työn kannalta oleelliset laitteet. Kuvan yläreunassa on työssä käytetty venttiili ja alareunassa sylinteri, jonka oikeanpuoleista sylinteriä ajetaan testijärjestelmässä. Venttiiliin on tehty kaikki edellä mainitut kytkennät ja se on yhdistetty konfigurointia ja ajoa varten tietokoneeseen Ethernet-kaapelilla. Paineistettu hydraulineste kulkee koneikosta venttiilille, josta se venttiilin asemaa muutettaessa virtaa letkuja pitkin toiseen sylinterin kammioon ja tämän jälkeen takaisin venttiilin toisen kanavan kautta koneikon tankkiin. Paineanturit mittaavat sylinterin kammioiden painetta ja ovat kytketty edellä mainittuihin venttiilin tuloportteihin. Sylinterin asema-anturi on kytketty toimintajännitteen kanssa venttiilin analogiseen rajapintaan XH2. Seuraavaksi kuvassa 7 on esitetty testijärjestelmän hydraulikaavio.

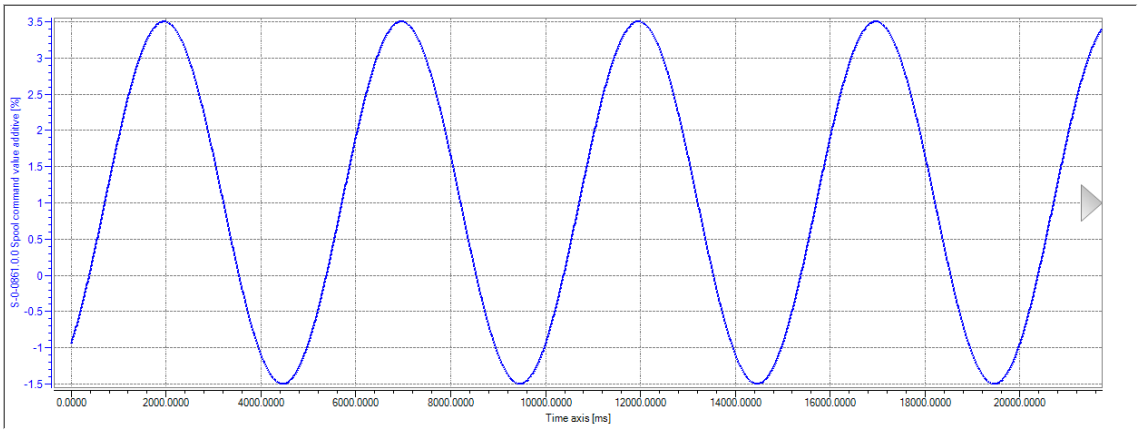


Kuva 7: *Testijärjestelmän hydraulikaavio*

Kuten kaaviosta nähdään, testijärjestelmän voimansiirto koostuu hydraulikoneikosta, sylinteristä ja sitä ohjaavasta venttiilistä. Hydraulikoneikko vastaa testijärjestelmän voimantuotosta ja sen paineenrajoitusventtiilin avautumispaine on 50 bar. Järjestelmässä on käytössä kaksi Trafag NAH 8253 -paineanturia, joiden maksimipaine on 250 bar. Sylinterin asema-anturin malli on SIKO-0012 600-MWU. Testijärjestelmän avulla saatavat mittaustulokset esitetään seuraavassa luvussa.

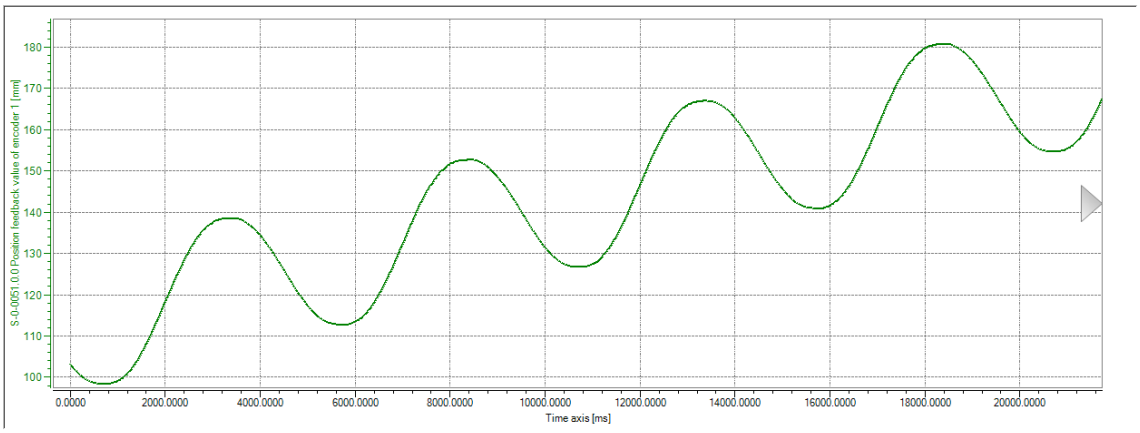
4.3 Mittaustulokset testijärjestelmästä

Työn toisen osan tuloksina esitellään käytännön mittaustulokset testijärjestelmästä, kun hydraulisylinteriä ohjataan venttiilillä. Työssä oli tarkoitus ohjata sylinteriä suoraan antamalla sen asemalle asetusarvoja, mutta tätä yritettäessä venttiilin sisäinen ohjausyksikkö laski sylinterin nopeudelle ohjearvoja, jotka ylittivät sallitut rajat. Aseman mittaussignaaliin yritettiin lisätä suodatusta, jotta kohina ei vaikuttaisi nopeuden laskentaan, mutta tämä ei onnistunut halutulla tavalla. Lopulta työssä päädyttiin ohjaamaan suoraan venttiilin karaa ja seuraamaan sylinterin liikettä ohjauksen aikana. Konfigurointiohjelman avulla voidaan halutuista antureiden mittaussuureista piirtää kuvaajat ajon aikana. Tuloksina esitellään venttiilin karan asetusarvosignaali, sylinterin asema ja kammioiden paineet kyseisen testisekvenssin aikana. Venttiiliä ajettiin asetusarvosignaalilla, joka on esitetty kuvassa 8.



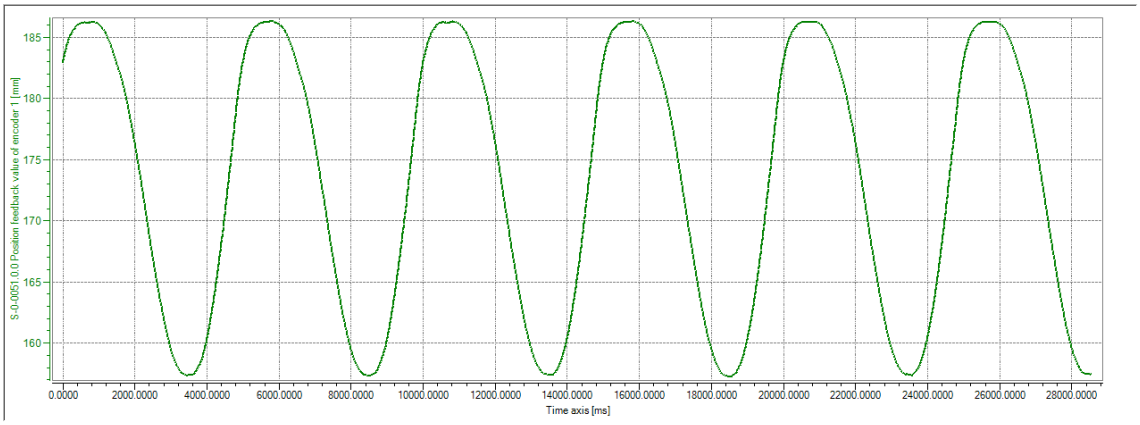
Kuva 8: *Venttiilin ohjaussignaali*

Venttiiliä ohjataan sinisignaalilla, jonka huipusta-huippuun amplitudi on 5 %:a venttiilin karan maksimisiirtymästä ja poikkeama (engl. bias) 1 %. Poikkeama tarvitaan ohjaussignaaliin sylinterin kammioiden epäsymmetrian takia. Männänvarren puolella on pienempi pinta-ala, joten sylinteri siirtyy saman matkan miinussuuntaan pienemmällä nestetilavuudella kuin plussuuntaan. Sylinterin liike tällä venttiilin ohjauksella on esitetty kuvassa 9.



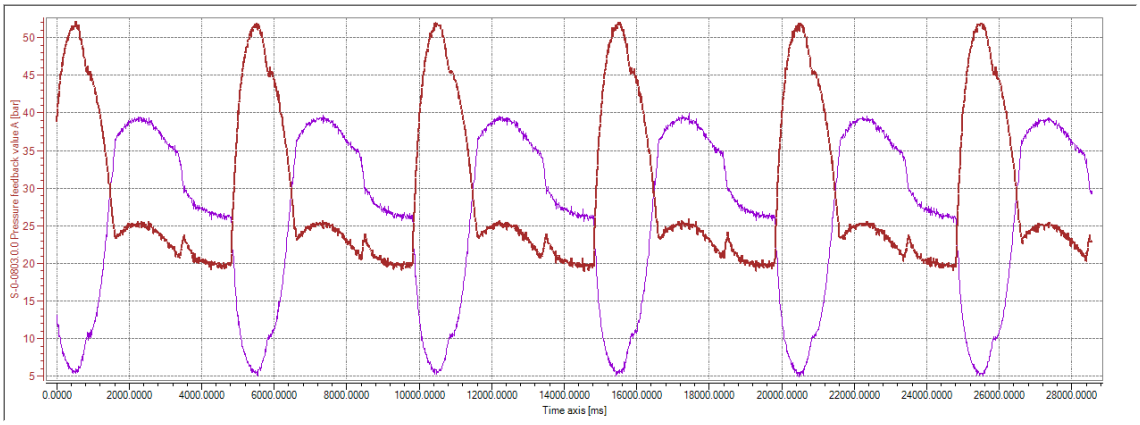
Kuva 9: *Sylinterin asema testisekvenssin aikana*

Testisekvenssin alussa sylinterin asema on noin 103 mm. Tämän jälkeen sylinteri liikkuu venttiilin ohjaussignaalin mukaisesti vuorotellen kumpaankin suuntaan. Tässä tapauksessa venttiilin ohjaama tilavuusvirta liikuttaa sylinteriä enemmän plussuuntaan, kuin mitä se ehtii palata takaisin miinussuuntaan. Sylinteri liikkuu ensin plussuuntaan noin 40 mm ja palaa takaisin miinussuuntaan vain noin 25 mm. Kuvista 8 ja 9 havaitaan myös, että sylinterin nopeus on kaikista suurin, kun venttiilin aukeama on maksimiarvossaan, esimerkiksi ajanhetkellä 2000 ms (2 s). Lopuksi sylinteri ajautuu maksimiasemaansa ja jää värähtelemään vakioetäisyydellä päädystä edestakaisin. Sylinterin asema päätyyn osuttuaan on esitetty kuvassa 10.



Kuva 10: *Sylinterin asema päätyyn osumisen jälkeen*

Kun ohjaussignaali on edelleen kuvassa 8 esitetty sinisignaali, päätyyn osumisen jälkeen sylinteri jää liikkumaan vakioetäisyydelle maksimiasemastaan, joka on noin 186 mm. Sylinteri liikkuu päädystä noin 28 mm miinussuuntaan, jonka jälkeen se palaa takaisin päätyyn. Päätyyn osuessaan myös kammioiden paineissa havaitaan muutoksia. Kuvassa 10 esitetyn sylinterin liikkeen aikaiset kammioiden paineet on esitetty kuvassa 11.



Kuva 11: *Sylinterin kammioiden paine*

Sylinterin männän puoleisen kammion paine on esitetty kuvassa punaisella ja männänvarren puoleisen kammion paine violetilla. Paineen kuvaajasta nähdään, että männän puoleinen paine sylinterin osuessa päätyyn on noin 50 bar, joka on myös asetettu hydraulikoneikon paineenrajoitusventtiilin avautumispaineeksi. Samalla hetkellä männänvarren puoleinen paine on vain 5 bar sylinterin nojatessa päätyyn. Sylinterin liikkuessa miinussuuntaan männänvarren puoleisen kammion paine nousee riittävän suureksi verrattuna männän puoleiseen paineeseen, jolloin sylinteri lähtee liikkeelle. Huomionarvoista on myös, ettei sylinterin ollessa liikkeessä männänpuoleinen paine nouse missään vaiheessa suuremmaksi kuin männänvarren puoleinen. Kuormittamattomassa sylinterissä tämä johtuu sylinterin kammioiden pinta-alasuhteesta.

5. YHTEENVETO

Työn tavoitteena oli tutkia yleisimpiä hydrauliikassa käytettäviä kenttäväyliä, ja esimerkkinä hajautetun automaatiojärjestelmän mahdollistavaa hydrauliventtiiliä, jonka kanssa voidaan kommunikoida kenttäväylien välityksellä. Ensimmäisessä osassa toteutettiin kirjallisuusselvitys tiedonsiirrosta automaatiosovelluksissa yleisesti, eri kenttäväylästandardien ominaispiirteistä ja niille saatavilla olevista ohjausjärjestelmän laitteista. Lisäksi työssä tutkittiin hydraulista servoventtiiliä, jonka konfigurointi ja ohjaus toteutettiin EtherCAT-kenttäväylän välityksellä. Työssä tutkittiin venttiilin konfigurointia sen tarjoaman valmiin rajapinnan avulla ja venttiilin ohjaamista testijärjestelmässä.

Venttiilin sovittaminen osaksi testijärjestelmää osoittautui lopulta haasteelliseksi, eikä testijärjestelmässä päästy loppujen lopulta ohjaamaan suoraan sylinterin asemaa, mikä oli aluksi tarkoitus. Kaikki tarvittavat anturit saatiin kuitenkin integroitua testijärjestelmään, mikä mahdollisti järjestelmän käyttäytymisen tarkastelun mitattujen suureiden avulla testisekvenssin aikana. Myös tarvittavien antureiden mittaustietojen konfigurointi oikeisiin venttiilin ohjausyksikön muuttujiin onnistui, mikä mahdollisti järjestelmän tilan seuraamisen ja dokumentoinnin ajon aikana. Työssä päädyttiin ohjaamaan suoraan venttiilin karan liikettä, jolloin haluttuja suureita, kuten sylinterin asemaa ja kammioiden paineita, pystyttiin tutkimaan ajon aikana.

Työssä havaittiin, että Ethernet-pohjaiset kenttäväyläratkaisut ovat suosittuja automaatiojärjestelmien tiedonsiirrossa. Työssä tarkastellut samanlaista teknologiaa soveltavat kenttäväyläratkaisut, kuten EtherCAT, Ethernet/IP ja Sercos, sisältävät samankaltaisia ominaisuuksia. Niiden tiedonsiirron fyysiset ominaisuudet ovat lähes identtiset, ja tiedonsiirtoon käytetään standardin mukaisia Ethernet-kehyksiä. Työssä tarkasteltiin lisäksi yhtä yksinkertaisempaa kenttäväylästandardia, SAE J1939. Työssä havaittiin, että tämä CAN-pohjainen standardi asettaa tiedonsiirtojärjestelmälle enemmän rajoituksia, eikä yhtä suurien järjestelmien toteuttaminen ole mahdollista kuin Ethernet-pohjaisilla kenttäväylillä. Ohjausjärjestelmien laitteiden saatavuus eri kenttäväylille vaihtelee valmistajakohtaisesti, mutta huomioitavaa on, että yleisimpien kenttäväylästandardien, kuten EtherCATin ja Ethernet/IP:n käyttöä tukee useamman valmistajan laitteet.

Työn toisessa osassa testijärjestelmästä saatiin käytännön mittaustuloksia, kun venttiilin karan asemaa ohjattiin. Venttiilin ja antureiden konfiguroinnin ansiosta järjestelmän tilaa, kuten sylinterin asemaa ja paineita, pystyttiin tutkimaan suoraan konfigurointiohjelman

avulla. Työn tuloksissa esitettiin sylinterin asema ja paine, kun venttiilin karaa ohjattiin sinisignaalilla.

Työhön jäi myös jatkokehitysmahdollisuuksia. Työssä ei pystytty ohjaamaan suoraan sylinterin asemaa, koska säätimen laskema sylinterin nopeus ylitti sille asetetut rajat. Tätä ongelmaa voisi yrittää ratkaista korvaamalla työssä käytetty analoginen asema-anturi digitaalisella anturilla, jolloin kohinaa olisi mittauksessa vähemmän. Analogisen asema-anturin mittaussignaalin suodatusta yritettiin työssä lisätä, mutta tämä ei korjannut ongelmaa. Mahdollisesti aseman mittaukseen voisi yrittää suunnitella kunnon suodatuksen, jotta nopeuden laskenta onnistuisi venttiilin ohjausyksikössä paremmin. Lisäksi työssä ei muokattu venttiilin ohjausyksikön sisäisiä asema- ja painesäätimien parametreja tai virityksiä ollenkaan. Suunnittelemalla säätimen parametrit tapauskohtaisesti voisi parantaa järjestelmän vastetta. Kaiken kaikkiaan venttiilin valmistajan konfigurointiohjelma tarjoaa monipuolisen rajapinnan venttiilin konfigurointiin ja sen toiminnan optimointiin.

LÄHTEET

[1] S.K. Sen, Fieldbus and Networking in Process Automation, First Edition, CRC Press, Boca Raton, 2014, 439 p. Saatavissa (viitattu 24.2.2022): https://www-taylorfrancis-com.libproxy.tuni.fi/books/mono/10.1201/b16891/fieldbus-networking-process-automation-sunit-kumar-sen

[2] T. Sauter, Fieldbus System Fundamentals. In R. Zurawski, Industrial Communication Technology Handbook, Second Edition CRC Press, Boca Raton, 2015, chapter 1, pp. 1–50. Saatavissa (viitattu 22.2.2022): https://www-taylorfrancis-com.libproxy.tuni.fi/books/edit/10.1201/b17365/industrial-communication-technology-handbook-richard-zurawski?refId=5891fa20-6702-4921-a2cb-7e67dbb548ae&context=ubx

[3] C. Dey, S.K. Sen, Industrial Automation Technologies, First Edition, CRC Press, Boca Raton and London, 2020, 376 p. Saatavissa (viitattu 22.2.2022): https://www-taylorfrancis-com.libproxy.tuni.fi/books/mono/10.1201/9780429299346/industrial-automation-technologies-chanchal-dey-sunit-kumar-sen

[4] S. Siewert, SoC drawer: Real-time resource management, 2006. Saatavissa (viitattu 16.3.2022): http://mercury.pr.erau.edu/~siewerts/extra/papers/IBM-out-of-print/soc-4.pdf

[5] P. A. Manoj Kumar, B. Sathish Kumar, A Study on the Suitability of Ethernet/IP and EtherCAT for Industrial Time Critical Applications. In International Journal of Future Computer and Communication, Vol. 2, No. 2, April 2013, pp. 76–79. Saatavissa (viitattu 1.3.2022): http://www.ijfcc.org/papers/125-IT0013.pdf

[6] Continued growth for industrial networks despite pandemic, HMS Networks, 2022, verkkosivu. Saatavissa (viitattu 1.3.2022): https://www.hms-networks.com/news-and-insights/news-from-hms/2021/03/31/continued-growth-for-industrial-networks-despite-pandemic

[7] EtherCAT — The Ethernet Fieldbus, EtherCAT Technology Group, 2020. Saatavissa (viitattu 7.3.2022): https://www.beckhoff.com/media/downloads/informationsmedien/etg_brochure_en.pdf

[8] Sercos technology: Proven, easy, fast, open, Sercos International e. V., 2022, verkkosivu. Saatavissa (viitattu 8.3.2022): https://www.sercos.org/technology

[9] Technology Overview Series: Ethernet/IP, Odva, Inc, 2021. Saatavissa (viitattu 8.3.2022): https://www.odva.org/wp-content/uploads/2021/05/PUB00138R7_Tech-Series-EtherNetIP.pdf

[10] SAE J1939 Introduction, Kvaser AB, 2022, verkkosivu. Saatavissa (viitattu 30.3.2022): https://www.kvaser.com/about-can/higher-layer-protocols/j1939-introduction/

[11] Hydraulics, Bosch Rexroth Store, 2022, verkkosivu. Saatavissa (viitattu 31.3.2022): https://store.boschrexroth.com/Hydraulics?cclcl=fi_FI

[12] Tuotteet, Parker, 2022, verkkosivu. Saatavissa (viitattu 31.3.2022): https://ph.parker.com/fi/fi/products

[13] Power Solutions, Danfoss, 2022, verkkosivu. Saatavissa (viitattu 31.3.2022): https://www.danfoss.com/fi-fi/products/dps/

[14] P. Mariño, M. Á. Domínguez, F. Poza, F. Vázquez, Using LOTOS in the specification of industrial bus communication protocols. In Computer Networks, Vol. 45, No. 6, 2004, pp. 767–799. Saatavissa (viitattu 6.4.2022): https://www-sciencedirect-com.libproxy.tuni.fi/science/article/pii/S1389128604000969#BIB3

[15] M. Ruggeri, G. Malaguti, M. Dian, SAE J 1939 Over Real Time Ethernet: The Future of Heavy Duty Vehicle Networks, 2012. Saatavissa (viitattu 6.4.2022): https://saemobilus-sae-org.libproxy.tuni.fi/content/2012-01-1988/

[16] T. Kiiso, Multi-Ethernet-akseliohjaimet hydrauliikkasovelluksiin - Uusi venttiilisukupolvi, jossa on integroitu akseliohjaus: Avoin, skaalautuva ja yksinkertainen, 2013. Saatavissa (viitattu 24.4.2022): https://dc-fi.resource.bosch.com/media/fi/press_release_6/2013_9/october_4/documents_91/Multi-Ethernet-akseliohjaimet_hydrauliikkasovelluksiin.pdf

[17] Bosch Rexroth, Directional control valve, direct operated, with integrated digital axis controller (IAC-Multi-Ethernet), 2021, päivitetty 05.2021. Saatavissa (viitattu 2.3.2022): https://www.boschrexroth.com/documents/12605/25201105/RE+29391_2022-03.pdf/