

Ville Rautalahti

# ETHERCAT-KENTTÄVÄYLÄ

Kilpailukyky kenttäväylänä

Kandidaatintyö  
Automaatiotekniikka  
Tarkastaja: Mikko Salmenperä  
Syyskuu 2020

# TIIVISTELMÄ

Rautalahti Ville: EtherCAT-kenttäväylä  
Kandidaatintyö  
Tampereen yliopisto  
Automaatiotekniikan DI  
Toukokuu 2020

---

Tässä työssä tarkastellaan tavanomaisen Ethernet-väylän rajoitteita ja puutteita automaatiosovellusten kenttäväylänä sekä esitetään EtherCAT-kenttäväylää ratkaisuna Ethernet-pohjaiselle kenttäväylälle verraten sitä tavanomaiseen PROFIBUS-kenttäväylään. Työssä selvitetään EtherCAT-kenttäväylän ominaisuuksia ja piirteitä tarkastelemalla sen käyttämää protokollaa, tuettuja topologioita, diagnostiikan metodeja sekä synkronoinnin piirteitä. Työssä selvitetään myös EtherCAT-kenttäväylän kommunikaation periaatteita ja pyritään luomaan kokonaisvaltainen kuva EtherCAT-järjestelmän toiminnasta. Työssä käytetään EtherCAT-kenttäväylän ominaisuuksien aineistoina valmistajan sivuja ja alan artikkeleita.

Työssä selvitettiin EtherCAT-kenttäväylän kilpailukykyä tavanomaiseen kenttäväylään vertaamalla sitä laajasti käytettyyn PROFIBUS-kenttäväylään, joka ei ole Ethernet-pohjainen. PROFIBUS-kenttäväylän tietojen aineistona käytettiin valmistajan esitteitä ja kolmannen osapuolen ohjekirjoja. Vertailun aineistona käytettiin alan tieteellisiä julkaisuja.

Työssä tarkasteltiin Ethernet-pohjaisten kenttäväylien aikaansaamia kustannus-, kompleksisuus- ja suorituskykyetuja etenkin asennuksen ja huoltotyön näkökulmasta. Työssä tarkasteltiin myös yleisesti Ethernet-pohjaisten kenttäväylien käyttöönottoon ja yhteensopivuuteen liittyviä rajoitteita ja ongelmia sekä pyrittiin selvittämään mahdollisia ratkaisuja näihin tilanteisiin käyttäen aineistona alan artikkeleita.

Työn perusteella voidaan päätellä, että EtherCAT-kenttäväylällä on useita suorituskykyyn, topologian joustavuuteen, kustannuksiin sekä ylläpitoon liittyviä etuja verrattuna tavanomaisempaan PROFIBUS-kenttäväylään. Työn perusteella voidaan myös todeta, että Ethernet-pohjaiset kenttäväylät ovat yleistymässä kenttäväylänä kustannustehokkaana ratkaisuna, joka samalla vähentää tuotantolaitosten järjestelmien kompleksisuutta luoden etuja huollon sekä käytettävyyden näkökulmasta.

Avainsanat: EtherCAT, PROFIBUS, kenttäväylä

Tämän julkaisun alkuperäisyys on tarkastettu Turnitin OriginalityCheck –ohjelmalla.

# SISÄLLYSLUETTELO

1. JOHDANTO .....	1
2. ETHERNET-POHJAINEN ETHERCAT .....	2
2.1    Kommunikoinnin periaatteet .....	3
2.1.1 EtherCAT-sähke .....	3
2.1.2 Osoitus.....	4
2.2    Topologia .....	5
2.3    Diagnostiikka.....	6
2.4    Synkronointi .....	6
3. ETHERCAT VASTAAN PROFIBUS .....	8
3.1    Kommunikaatio .....	8
3.1.1 PROFIBUS DP -sähke .....	9
3.2    Protokolla .....	10
3.3    Topologia .....	11
3.4    Fyysinen kerros.....	11
3.5    Synkronointi ja sykli aika .....	12
3.6    Diagnostiikka ja virheiden hallinta .....	12
3.7    Käyttöönotto, kustannukset ja yhteensopivuus.....	14
YHTEENVETO .....	15
LÄHTEET .....	16

# LYHENTEET JA MERKINNÄT

DP	Decentralised Peripherals
ESC	EtherCAT Slave Controller
EtherCAT	Ethernet for Control Automation Technology
FMMU	Field Memory Management Unit
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers
IS	Intrinsically Safe
MBP	Manchester coded Bus Powered
PROFIBUS	Process Field Bus

# 1. JOHDANTO

Kenttäväylä on teollisuuden verkko, jonka tarkoitus on toimia teollisuuden ohjainten ja kentälle asennettujen antureiden ja toimilaitteiden välillä. Kenttäväyliä on olemassa useita erilaisia, usein keskenään sopimattomia, ja joista monet ovat määriteltynä kansainvälisiin standardeihin ja joita eri laitevalmistajat tukevat. Eri kenttäväylät eroavat usein ominaisuuksiltaan, jonka seurauksena eri käyttökohteissa käytetään usein kohteen vaatimusten perusteella eri kenttäväyliä. [1]

Yksi suosituimpia kenttäväyliä on PROFIBUS (Process Field Bus), joka on pitkään ollut kenttäväylien johtavassa asemassa saavuttaen jopa 50 miljoonaa laiteasennusta [yksi], samalla tavalla kuin Ethernet-pohjaiset väylät ovat johtaneet pitkään toimistotason väylänä.

Kysyntä tuotantolaitoksen yksinkertaistetummalle väyläratkaisulle on olemassa, ja tämän takia Ethernet-pohjaiset kenttäväyläratkaisut ovat yleistymässä konttoriväylistä myös automaatiokäyttöön. Yksi näistä kenttäväylistä on Beckhoff Automationin kehittämä EtherCAT (Ethernet for Control Automation Technology). [2]

Tässä työssä tutkitaan EtherCAT-kenttäväylän suorituskykyä ja verrataan sitä vastaavaan PROFIBUS DP (Decentralised Peripherals)-kenttäväylään. Työn alussa tarkastellaan EtherCAT-kenttäväylän ominaisuuksia ja suorituskykyä käytetyn protokollan, tuettujen topologioiden, synkronoinnin, vianhallinnan, käytettävyyden ja kustannusten perusteella. Teoreettisen pohjan luonnin jälkeen pyrimme vertaamaan EtherCAT-kenttäväyliä vastaavaan PROFIBUS DP-kenttäväylään työn alussa käytyjen aiheiden ympärillä. Lopuksi teemme johtopäätöksen EtherCAT-kenttäväylän kilpailukykyä käyttäen tukena tekemäämme vertailua ja teoreettista pohjaa.

## 2. ETHERNET-POHJAINEN ETHERCAT

Ethernet on vakiinnuttanut asemansa johtavana väyläratkaisuna maailmalla, mutta teollisuudessa väyläratkaisuiden rooli ei ole niin yksinkertainen. Ethernet on käytössä toimistotasolla, mutta kenttäväyläratkaisuna sen suorituskyvyssä on puutteita:

- Ethernet ei ole optimoitu lähettämään toistuvia lyhyitä viestejä.
- Yleisesti käytetty tähtitopologia aiheuttaa liiallista kaapelointia ja monitasoinen sarjakytkentä aiheuttaa epäsuotuisia kommunikoinnin riippuvuuksia.
- Verkon jokainen solmukohta vaatii erillistä ohjelmaa suorittavan mikroprosessorin, joka hidastaa järjestelmää tehden siitä sopimattoman reaaliaikavaatimukseen. [1]

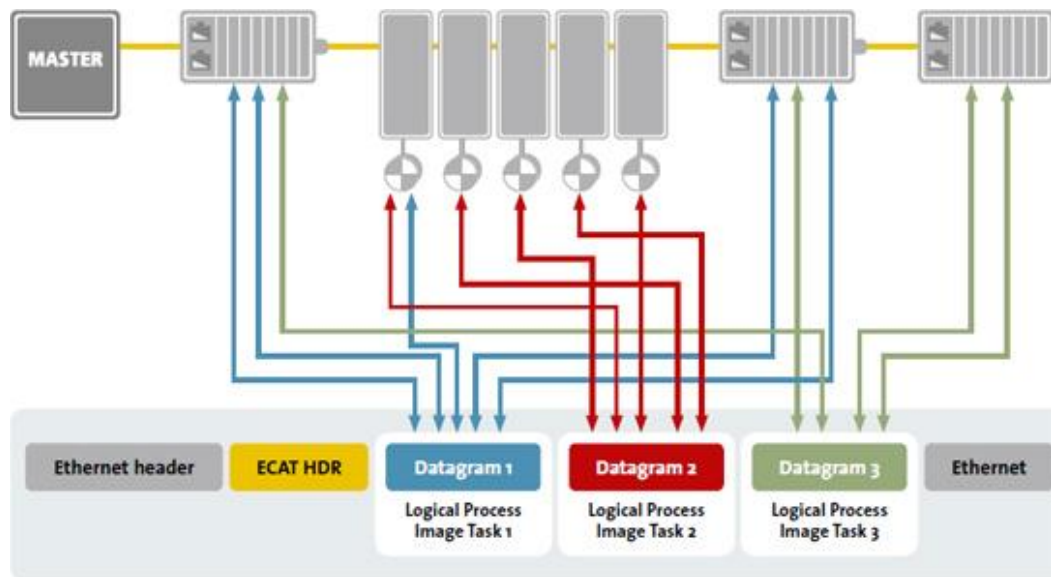
Ratkoakseen Ethernetin automaatiosoveltuvuuden ongelmia, Beckhoff Automation julkaisi EtherCAT-kenttäväylän vuonna 2003. EtherCATin kehityksen tavoitteena oli luoda Ethernet-pohjainen kenttäväylä tehdasautomaation sovellutuksiin. [3] Vaikka EtherCAT-protokollassa käytetään perinteistä Ethernet-kehystä, pystyy se ominaisuuksiltaan alle 1 millisekunnin sykliäikoihin. Useimmiten EtherCAT-järjestelmien sykliäika saadaan jopa 100 mikrosekuntiin, saavuttaen huomattavasti tarkemman automaation ohjattavuuden mitä tavanomaisimmilla kenttäväylillä. [3]

EtherCAT on kaksisuuntainen (full-duplex) järjestelmä. EtherCAT-järjestelmässä mikä tahansa Ethernet-portin omaava kontrolleri voi olla järjestelmän master-laite ja täten mikä tahansa tietokone voi olla järjestelmän kontrollisysteemi [2]. EtherCAT-järjestelmän master-laite lähettää telegrammin, joka kulkee järjestelmän jokaisen solmukohdan ja slave-laitteen läpi. Jokainen EtherCAT-järjestelmän slave-laite lukee ja mahdollisesti lisää telegrammin dataa samalla aikaa, kun telegrammi kulkee laitteen läpi. Tämä samanaikainen lukeminen ja kirjoittaminen vähentää järjestelmän viiveaikaa huomattavasti. Väylän viimeinen slave-laite lähettää sähkeen takaisin master-laitteelle. [4]

Ethernet-näkökulmasta EtherCAT-väylä on yksinkertaisesti yksi suuri Ethernet-laite, joka vastaanottaa ja lähettää Ethernet-sähkeitä [2]. EtherCAT-järjestelmässä master-laite on ainoa laite, joka pystyy lähettämään telegrammeja. Järjestelmän slave-laitteet ainoastaan lukevat, kirjoittavat ja välittävät eteenpäin telegrammeja. Tämä toimintaperiaate estää arvaamattomat viiveet ja takaa reaaliaikavaatimukset. [4]

## 2.1 Kommunikoinnin periaatteet

EtherCAT-järjestelmän kommunikointi perustuu master laitteen tarpeelle täyttää ja lähettää ainoastaan yksi EtherCAT sähkö kommunikoidakseen järjestelmän jokaisen osan kanssa. Järjestelmän laitteille kommunikointi yhden EtherCAT-sähkeen avulla on esitetty kuvassa 3. EtherCAT-järjestelmän tukee kahta slave-to-slave-kommunikointitapaa. Slave-laite voi kommunikoida suoraan toisen slave-laitteen kanssa, mikäli kohde-laite on tietoliikenteen jakelusuuntaan päin kytketty. Vapaamuotoisempikin kommunikointi on mahdollista, mutta tällöin viesti kulkeutuu master-laitteen lävitse. [4]

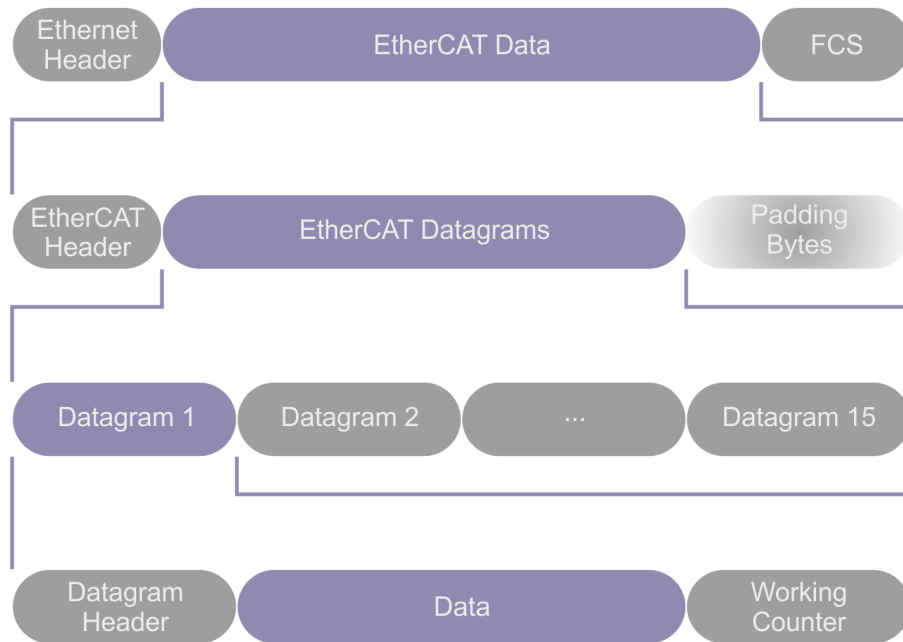


*Kuva 1. EtherCAT-sähkeen kulkeminen järjestelmässä [4].*

Jokainen järjestelmän slave-laite käyttää EtherCAT Slave Controlleria (ESC) kommunikoidakseen järjestelmän kanssa. Useammissa tapauksissa ESC sisältyy mikropiiriin tai on integroituna mikroprosessoriin. Slave-laitteen sisään- ja ulostulos voidaan kytkeä suoraan ESC:hen. [4]

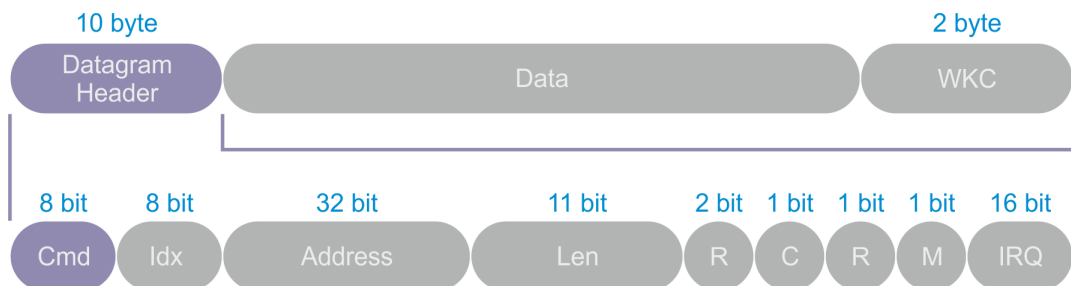
### 2.1.1 EtherCAT-sähke

EtherCAT sisällyttää viestinsä standardin IEEE (Institute of Electrical and Electronics Engineers) 802.3 mukaiseen Ethernet-kehykseen, joka on esitetty kuvassa 2. EtherCAT-sähke koostuu Ethernet-otsakkeesta, EtherCAT-datasta sekä Ethernet-kehykselle tyypillisestä FCS-summaluvusta. EtherCAT-data sisältää EtherCAT-otsakkeen ja yhden tai useamman tietosähkeen. EtherCAT-otsakkeessa ilmoitetaan EtherCAT-tietosähkeiden määrä sekä käytettävä protokolla.



**Kuva 2.** EtherCAT-sähke Ethernet-kehysten sisällä [5].

Tietosähkeen otsakkeessa, joka on esitetty kuvassa 3, kerrotaan tietosähkeen metatietoa, kuten järjestysnumero, slave-laitteelle haluttu operaatio, otsakkeen jälkeinen datan määrä ja halutun slave-laitteen osoite. Tietosähkeen lopussa on myös työläskuri, jolla varmistetaan, että tietosähke on käynyt määrättyssä osoitteessaan ja oikea operaatio on suoritettu. [5]



**Kuva 3.** EtherCAT-tietosähkeen otsake [5].

### 2.1.2 Osoitus

EtherCAT-sähkeen sisältämä osoitetieto voi olla joko fyysiseen sijaintiin, solmukohtaan, tai loogiseen sijaintiin perustuva. Toisaalta osoite voi olla yleislähetys, jota käytetään slave-laitteen alustuksen yhteydessä. [5]

Fyysistä osoitetietoa käytetään yleisesti järjestelmän käynnistyksen yhteydessä, jonka avulla kenttäväylä skannataan. Tämän jälkeen fyysistä osoitusta käytetään ainoastaan tilanteissa, jossa uusia slave-laitteita lisätään järjestelmään. [5]

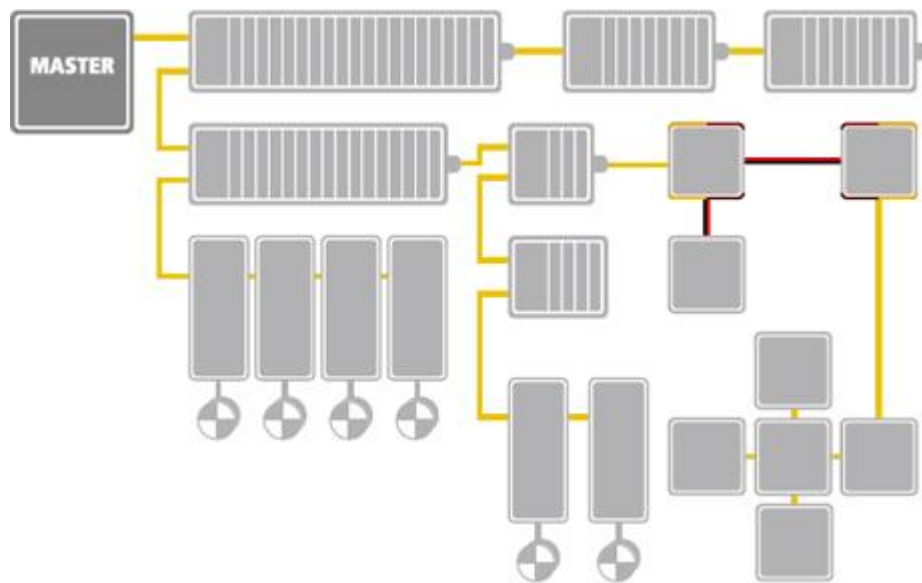


Osoitekentässä voidaan käyttää myös solmukohtaan viittaavaa osoitetta. Tällöin slave-laitte lukee viestin, mikäli slave-laitteen station address -osoite vastaa osoitekentässä viitattua osoitetta. Osoitekenttä voi sisältää myös slave-laitteen loogisen osoitteen, joka on esitetty usein binäärisessä muodossa ja käytössä syklisen datan vaihdossa. [5]

Jokaisella slave-laitteella on FMMU-keskus (Field Memory Management Unit), joka yhdistää prosessin datakehysten slave-laitteen lokaaleihin osoitteisiin ja muistipaikkoihin. FMMU alustetaan ja konfiguroidaan järjestelmän käynnistyessä master-laitteen toimesta. [5]

## 2.2 Topologia

Koska Ethernet-kaapeli on kaksisuuntainen, voidaan EtherCAT-järjestelmä kuvailla millä tahansa konfiguraatiolla rengastopologiaksi. Master-laite lähettää tietosähkeen slave-laitteelle, joka lähettää sen aina seuraavalle. Kun viesti on kulkenut jokaisen slave-laitteen lävitse, se palaa takaisin master-laitteelle samaa fysikaalista kaapelia pitkin. Käytännössä järjestelmä tukee siis niin väylä-, rengas- ja puutopologioita. [2] Kuvassa 4 on esitetty EtherCAT-järjestelmä, jossa käytössä useampi eri topologia.



**Kuva 4.** EtherCAT-järjestelmä tukee väylä-, rengas- sekä puutopologioita. [4]

EtherCAT-järjestelmään voidaan kytkeä yhtäaikaisesti 65 535 laitetta. Järjestelmän topologiaa voidaan muuttaa järjestelmän ajon aikana, esimerkiksi vikatilanteissa. Kun järjestelmän slave-laite huomaa viereisen laitteen olevan irti, sulkee se yhteyden siihen suuntaan. [4]

Järjestelmän käynnistyessä master-laite konfiguroi ja selvittää prosessin datakehysten slave-laitteille. Käynnistyksen yhteydessä jokaiselle slave-laitteelle jaetaan looginen

osoite. Kun verkosto on tiedossa, voidaan järjestelmän jokaiselle solmukohtalle antaa oma kiinteä osoitteensa. Tällöin solmukohtaan voidaan osoittaa, mikäli järjestelmän topologia vaihtuisikin kesken käynnissäolon. [4]

## 2.3 Diagnostiikka

EtherCAT-järjestelmä voi verrata järjestelmän suunnitellun topologian toteutuneeseen topologiaan käynnistyessään. Tämä tarkistus tehdään saamaan aikaa, kun slave-laitteiden loogiset positiot linkitetään niiden positioihin topologiassa. [3]

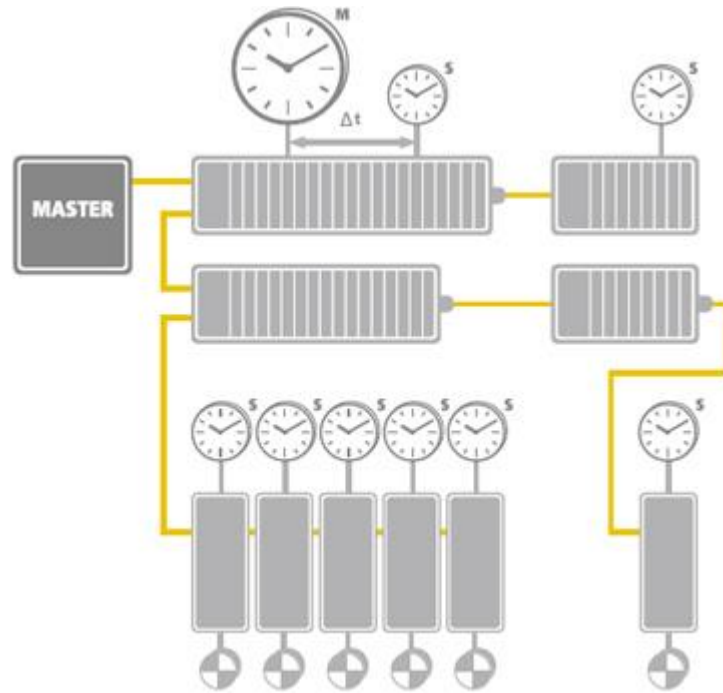
Varmistaakseen, että tietosähke kulkeutuu oikeisiin osoitteisiin ja prosessoidaan suunnitellulla tavalla, lasketaan standardin mukaisen Ethernet-kehysten loppuun tarkistussumma. Slave-laitteen ESC laskee tarkistussumman uudelleen jokaisen laitteen kohdalla. [2]

Tietoa luovutetaan slave-laitteelle vain, jos kehys on vastaanotettu onnistuneesti. Mikäli summassa ilmenee virheitä, syöttää virheen havainnut slave-laite virhelaskuriin askeleen. Virheellisen kehysten kulkiessa muiden slave-laitteiden lävitse lisäävät ne virhelaskuriin askeleen. Kehysten saapuessa master-laitteelle osaa master-laite hylätä viestin sekä paikallistaa virheen ilmenemispaikan kehysten mukana saapuvan virhelaskurin numeerisen arvon perusteella. Järjestelmän rakenteen mukaan virheet voidaan paikallistaa ja estää ennen niiden vaikutusta järjestelmän toimintaan. [4]

Vaikka virheitä ei olisi, slave-laitteet lisäävät EtherCAT-vestin lopussa sijaitsevaan työ-laskuriin askeleen. Näin master-laite saa varmistuksen siitä, että järjestelmän kaikki slave-laitteet ovat saaneet viestin. [2] Mikäli lukumäärät eivät täsmää, ei takaisin lähetettyä kontrollidataa lähetetä ohjaukseen [4].

## 2.4 Synkronointi

EtherCAT-järjestelmän synkronointi perustuu hajautettuihin kelloihin. Tällöin järjestelmän ensimmäisen slave-laitteen aikatieto välitetään muille slave-laitteille, jotka asettavat omat kellonsa vastaamaan ensimmäisen laitteen kelloa kuvan 5 mukaan. Ajoitusvärinä saadaan hajautetulla kellolla alle yhteen mikrosekuntiin. Järjestelmän laitteiden välinen viive mitataan järjestelmän käynnistyessä ja viiveen perusteella laitteiden ajoitukseen voidaan tehdä kompensointeja. Synkronoinnin mittauksia ja kompensointia voidaan tehdä myös järjestelmän ajon aikana, jotta ajoitusvärinä saadaan pidettyä halutuissa rajoissa. [4]



**Kuva 5.** Järjestelmän ensimmäisen slave-laitteen kelloa käytetään master-kellona.  
[4]

## 3. ETHERCAT VASTAAN PROFIBUS

Kenttäväyliä sisääntulo automaation markkinoille 1980-luvulla loi kysyntää standardoidulle kenttäväyläratkaisulle. Tämän takia 21 yritystä ja instituutiota alkoivat kehittää avointa kenttäväylä-standardia vuonna 1987, josta PROFIBUS-kenttäväylä sai alkunsa. Kehitystyön loputtua 1989 luotiin PROFIBUSin käyttäjäorganisaatio, joka ajan saatossa on kasvanut yli 1400 käyttäjään, tehden PROFIBUSista markkinoiden johtavan kommunikointijärjestelmän. PROFIBUS-järjestelmän keskiössä on PROFIBUS-DP kommunikointiprotokolla, jota käytetään keskitettyjen automaatiolaitteiden ja hajautettujen kenttälaitteiden väliseen kommunikointiin. [6, s.1]

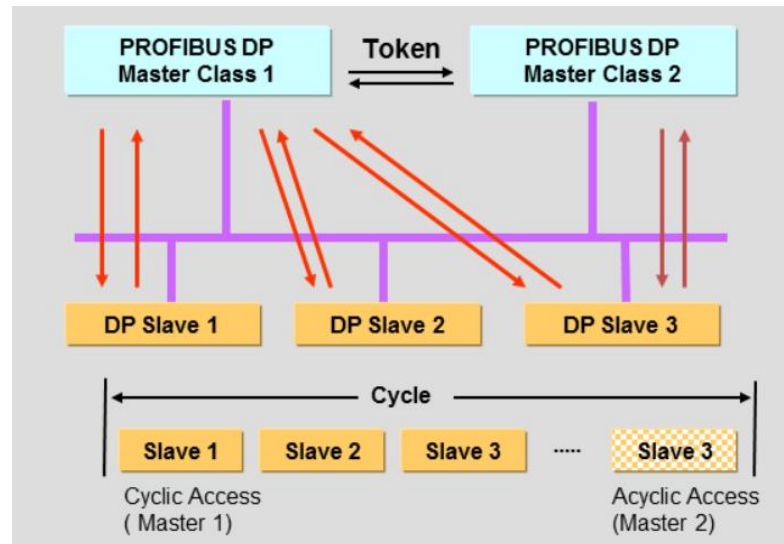
Kuitenkin Ethernetin yleistyessä, ja sen kustannusten laskettaessa, monet kenttäväylä-tarjoajat ovat kehittäneet Ethernet-pohjaisia kenttäväyliä tavanomaisten kenttäväyliä rinnalle. Ethernet-pohjaiset kenttäväylät tarjoavat usein parempaa suorituskykyä pienemmillä kustannuksilla hyödyntäen Ethernetin suurtuotannon etuja. [7]

### 3.1 Kommunikaatio

Molempien EtherCATin ja PROFIBUSin kommunikoinnin perustana on master-slave metodi.

Toisin kuin EtherCAT-järjestelmässä, missä yksi sähke kulkee jokaisen slave-laitteen lävitse, PROFIBUS-järjestelmän master-laite lähettää yksittäiselle slave-laitteelle yksilökohtaisen pyynnön mitatusta arvosta, jolloin slave-laite vastaa master-laitteelle pyydetyn arvon. Kun PROFIBUS-järjestelmän jokainen slave-laite on käynyt kyselyn läpi, on sykli päättynyt. Tällöin kommunikointi PROFIBUS-järjestelmässä voi helposti olla joko syklisiä tai yksittäiseen tarpeeseen perustuvaa kyselyä. [6, s.9–10]

EtherCAT-järjestelmän tukiessa vain yhtä master-laitetta PROFIBUS-järjestelmä tukee useampaa master-laitetta. Tällaisessa järjestelmässä master-laitteet luokitellaan luokkiin 1, 2 ja 3 [8]. Luokan 1 master-laite kommunikoi pääosin syklisesti slave-laitteille. Luokan 2 master-laite on tarkoitettu asynkroniseen kommunikointiin slave-laitteiden kanssa. Useamman master-laitteen järjestelmässä eri master-laitteet välittävät toisilleen tunnisteiden, joka mahdollistaa pääsyoikeuden järjestelmän slave-laitteelle. Esimerkiksi kuvassa 6 kuvatussa järjestelmässä luokan 1 master-laitteen käytyä sykli läpi se antaa tunnisteiden luokan 2 master-laitteelle, joka kommunikoi halutun slave-laitteen kanssa. Tämän jälkeen järjestelmän sisäinen sykli on päättynyt.

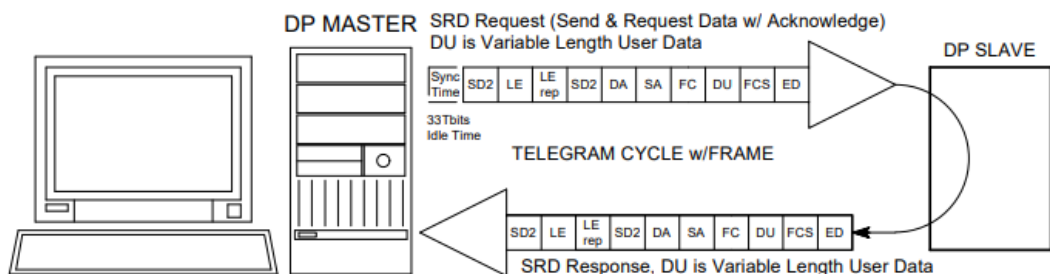


**Kuva 6.** PROFIBUS DP-sähkeen kulkeminen järjestelmässä. [6, s.11]

Luokan 3 master-laitetta tuetaan versiossa DP-V2. Luokan 3 master-laitteen kelloa käytetään muun järjestelmän synkronointiin hyvin samanlaiseen tapaan mitä EtherCAT-järjestelmässä master-aikaa käytetään. [8]

### 3.1.1 PROFIBUS DP -sähke

PROFIBUS DP-sähke, joka on esitetty kuvassa 7, on rakenteeltaan melko samanlainen kuin yksittäinen EtherCAT-tietosähke. PROFIBUS DP-sähke sisältää tiedon muun muassa viestin pituudesta, osoitteesta, toiminnasta sekä tarvittavan datan [8 s.16]. Ethernet-kehysten tapaan PROFIBUS-sähkeen lopussa on FCS-summaluku, jolla tarkastetaan sähkeen sisällön oikeellisuus. Kun EtherCAT-sähkeessä tiedotetaan sähkeen slave-laitteen osoitetta, PROFIBUS DP-sähke sisältää osoitteen sekä lähettäjistä ja vastaanottajasta [8 s.16].

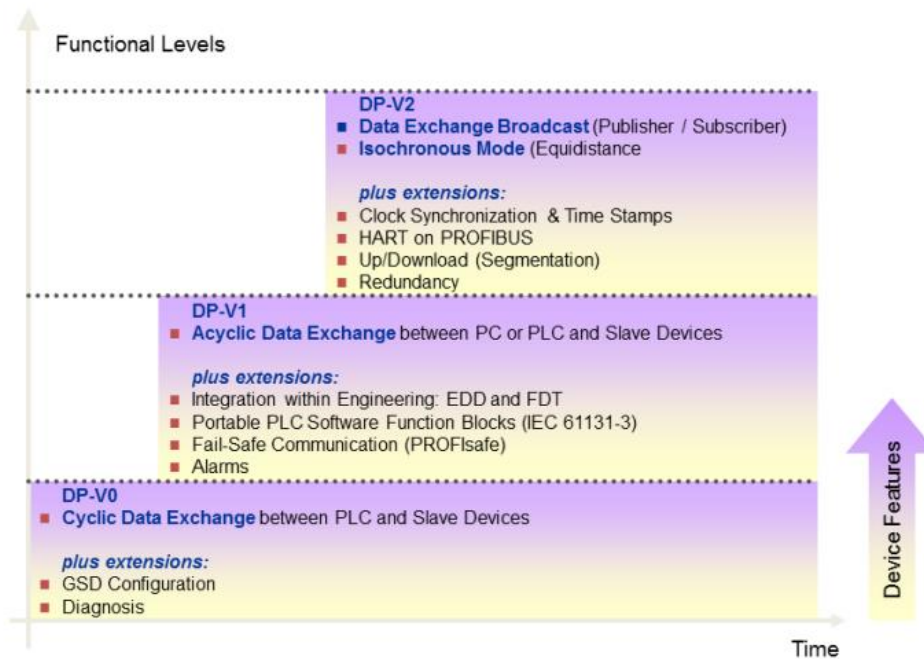


**Kuva 7.** PROFIBUS DP-sähkeen kulkeminen järjestelmässä. [8]

PROFIBUS DP-sähkeen osoitekenttä on arvo välillä 0–127, tosin osoitetta 127 käytetään yleisviestien lähettämiseksi. Kun slave-laite saa viestin, se vaihtaa lähettäjän osoitteeksi oman osoitteensa ja lähetettävän osoitteeksi juuri saamansa viestin master-laitteen osoitteen. Vastatessa master-laitteen pyyntöön slave-laite lähettää uuden viestin master-laitteelle, jonka tyyppi on vastaus. [10]

### 3.2 Protokolla

PROFIBUS-järjestelmän protokolla on jaettu kolmeen tasoon: DP-V0, DP-V1 ja DP-V2. Näitä suorituskykyä indikoivia tasoja käytetään hyväksi järjestelmää suunniteltaessa ja esimerkiksi järjestelmän slave-laitteet ovat luokiteltu näiden tasojen mukaan. Järjestelmän aikavaatimusten noustessa voidaan PROFIBUS-järjestelmän tasoa nostaa vaaditulle tasolle. Eri tasojen suorituskykyjä on kuvattu kuvassa 8. [6, s.10]



**Kuva 8.** PROFIBUS-järjestelmän aikavaatimusten kasvaessa suorituskyvyn tasoa nostetaan asteittain V0-, V1- tai V2-tasolle. [6, s.10]

DP-V0 taso pitää sisällään perustason syklisen kommunikaation ja järjestelmän diagnosointiin vaadittavat toiminnallisuudet. DP-V1 taso mahdollistaa asyklisen tiedonvaihdon, joka mahdollistaa Luokan 2 master-laitteen käytön järjestelmässä. Kenttälaitteisto prosessiautomaatiossa on yleisesti tason DP-V1 laitteistoa, jolloin asyklistä kommunikointia tuetaan parametrien asettamiseen. [6, s.11].

### 3.3 Topologia

PROFIBUS-järjestelmän topologia on riippuvainen väylässä käytetystä kaapelista. Mikäli RS485-kaapelia käytetään, suurin tuettu solmukohtien lukumäärä on 32. RS485-kaapelia käytettäessä solmukohtien päätöskohdissa on käytettävä väylän lopetuskohtiin tarkoitettuja lisälaitteita, jotka vaativat oman virtalähteensä. Mikäli järjestelmään halutaan kytkeä yli 32 laitetta, on käytettävä toistimia vahvistamaan signaalin vahvuutta. Käytettäessä RS485-kaapelia PROFIBUS-järjestelmä tukee vain väylätopologiaa. Mikäli MBP-kaapeli on käytössä, on topologiavaihtoehdot paljon suuremmat. Tällöin mikä tahansa topologia on käytännössä mahdollinen. [6 s.7]

PROFIBUS-järjestelmässä on mahdollista käyttää RS485- ja MBP-kaapeleita samanaikaisesti. Tällöin topologian mukaan osajärjestelmien väliin on kytkettävä erillinen kytkin tai linkki, joka huolehtii erilaisista yhteensopivuusiin liittyvistä ongelmakohdista. [6 s.7]

EtherCAT-järjestelmään verratessa topologiamahdollisuudet ovat hyvin samansuuruiset. Toisaalta EtherCAT-järjestelmän topologia ei ole riippuvainen järjestelmän osan käytössä olevasta kaapelityypistä. EtherCAT-järjestelmään on mahdollista kytkeä 65535 laitetta [4], joka on monin kerroin suurempi laitemäärä mitä PROFIBUS-järjestelmässä.

### 3.4 Fyysinen kerros

Toisin kuin EtherCAT, joka käyttää tavanomaista Ethernet-kaapelia, PROFIBUS käyttää useimmissa sovelluksissa kuparijohtollista RS485 kaksoiskaapelia fyysisenä kerroksena. Kaapelista on olemassa myös RS485-IS (Intrinsically Safe) versio, jota voidaan käyttää räjähdysalttiissa tiloissa poistetun sytyttämisoron takia. [6]

PROFIBUS-järjestelmän tiedonsiirtonopeus riippuu käytettävästä kaapelista. Toisinaan sovelluksissa voidaan käyttää MBP (Manchester coded Bus Powered) -kaapelia, jonka ansiosta järjestelmään kytketyille laitteille saadaan virta saman kaapelin avulla. Myös MBP-kaapelista on olemassa RS485-IS tapainen IS-versio. [6] MBP-kaapelia toiminnallisuutta vastaa EtherCAT-järjestelmässä EtherCAT P, jossa informaation ja virta saadaan toimitettua kenttälaitteelle saman kaapelin avulla. EtherCAT P ei vaadi käyttöönottaessa erillistä fyysistä tasoa, vaan hyödyntää tavanomaisen Ethernet-väylän sisäistä kaapelointia [4].

Verrattaessa PROFIBUS- ja EtherCAT-järjestelmiä tiedonsiirtonopeuksissa on merkittäviä eroja. PROFIBUS-järjestelmässä suurin tiedonsiirtonopeus on 15Mbit/s, jossa edellytyksenä on RS485-kaapelin käyttö [6 s. 4]. EtherCAT G mahdollistaa EtherCAT-järjestelmissä jopa 10Gbit/s siirtonopeuden [4].

PROFIBUS-järjestelmän fyysinen kerros määrittää järjestelmän solmukohtien tuetun määrän. Mikäli tavanomainen RS485-kaapeli on käytössä, suurin solmukohtien lukumäärä on 32. Tätä lukua voidaan kasvattaa aina 126 laitteeseen asti, mutta tällöin PROFIBUS-järjestelmään tarvitsee kytkeä toistimia parantamaan signaalin laatua. [6 s.7]

### 3.5 Synkronointi ja sykli aika

PROFIBUS DP-V2 taso antaa mahdollisuuden synkronoida järjestelmän sisäiset kellot [8]. Synkronointi toteutetaan samankaltaisella tavalla kuin EtherCAT-järjestelmässä, jossa slave-laitteille lähetetään viitteellinen aika. Toisin kuin EtherCAT-järjestelmässä, jossa master-aika voidaan määrittellä slave-laitteen kellon avulla, PROFIBUS-järjestelmässä master-kellon alkuperä täytyy olla luokan 3 master-laite [8].

Koska PROFIBUS-järjestelmä lähettää viestejä deterministisesti yksitellen eri slave-laitteille, järjestelmän sykli aika riippuu slave-laitteiden määrästä. Felserin kirjoittamassa PROFIBUS oppaassa [8] Felser on pyrkinyt arvioimaan PROFIBUS DP -järjestelmän sykli aikaa seuraavalla yhtälöllä:

$$T_{BCycle} = \frac{380 + lkm_{slave} * 300 + lkm_{tavut} * 11}{bittinopeus} + 75 \mu s, \quad (1)$$

missä  $lkm_{slave}$  on järjestelmän slave-laitteiden lukumäärä,  $lkm_{tavut}$  lähetettyjen tavujen lukumäärä. Felser esittää esimerkin järjestelmästä, jossa 80 tavua tietoa lähetetään 20 slave-laitteelle yhden master-laitteen järjestelmässä käyttäen 1500kbit/s siirtonopeutta. Käyttäen kaavaa (1), saamme väylän sykli ajaksi noin 5 millisekuntia.

Tarkastellessa EtherCAT-järjestelmän suorituskykyä järjestelmässä, jossa 100 tavua lähetetään 100Mbit/s siirtonopeudella 20 slave-laitteelle, saatiin väylän sykli ajaksi noin 0,25 millisekuntia. Slave-laitteiden tuplaaminen tämän siirtonopeuden järjestelmässä aiheutti kaksinkertaisen sykli ajan. Käytettäessä nopeampaa 1Gbit/s siirtonopeutta, järjestelmän sykli ajaksi saatiin 40 slave-laitteelle 0.1ms. [9 Kuva 13 s.756].

### 3.6 Diagnostiikka ja virheiden hallinta

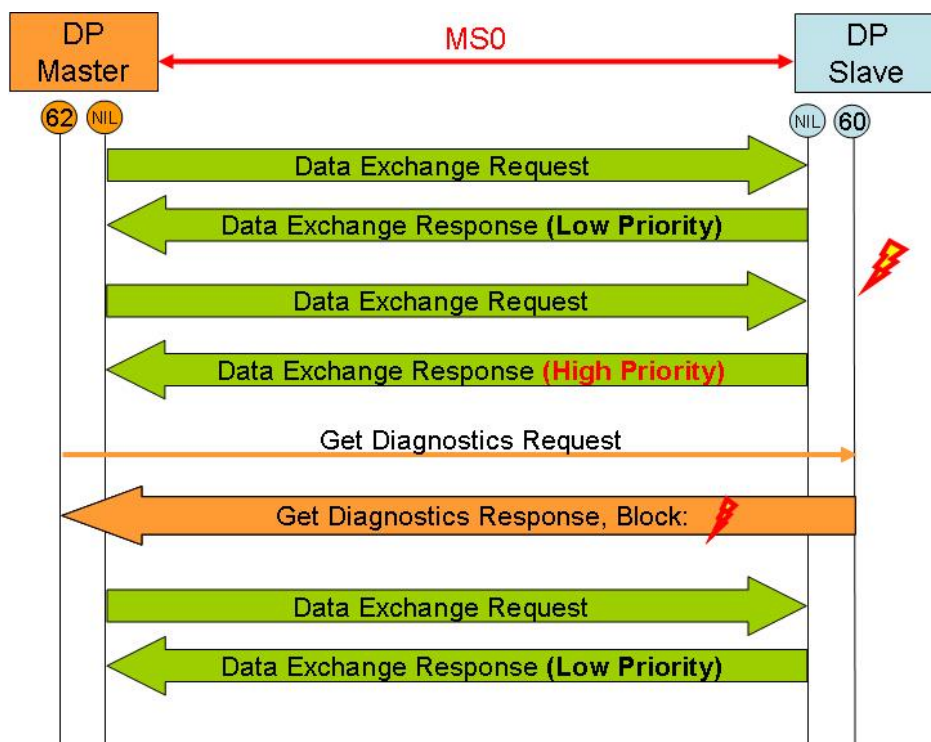
Kuten EtherCAT-järjestelmässä, myös PROFIBUS-järjestelmässä käytetään sähkeiden lopussa tarkistussummaa [8], jonka poiketessa oikeasta arvosta järjestelmän laite tulkitsee sähkeen virheelliseksi eikä noudata sen sisältöä.

PROFIBUS-järjestelmän laitteen havaitessa virheellisen sähkeen, riippuu sen reagointi lähetetyn sähkeen tyypistä. Mikäli dataa lähetetään vaatimatta vastausta, ei virhettä saada korjattua. Voidaan kuitenkin olettaa, että datan lähetys ilman vastausvaatimusta



on syklistä, ja virheellinen sähkö saadaan korvattua seuraavan syklin aikana. Mikäli master-laite vaatii lähetetyille datalle vastauksen, voidaan vastauksen puuttuessa sähkö lähettää uudelleen. [8]

Normaalissa syklisen datan lähetyksessä slave-laite vastaa master-laitteelle lähettämällä tälle matalan prioriteetin vastauksen. Mikäli tapahtuma vaatii slave-laitteelle diagnostiikan, lähettää slave-laite seuraavan syklin vastauksen korkean prioriteetin luokassa. Tällöin master-laite lähettää slave-laitteelle diagnostiikkaviestin, johon slave-laite vastaa sen tilaa vastaavilla tiedoilla. Tilannetta, jossa syklisen tiedonvaihdon aikana slave-laite pyytää diagnostiikkatarkastusta on kuvattu kuvassa 9. [8]



**Kuva 9.** PROFIBUS DP-sähkeen kulkeminen järjestelmässä. [8]

Diagnostiikkaviestejä lähetetään slave-laitteille ennen ja jälkeen slave-laitteen alustuksen. Diagnostiikkaviesti on tyypiltään tyhjä dataviesti, jolle master-laite vaatii vastauksen slave-laitteelta. [8]

Diagnostiikkaviestin sisältöön ei ole PROFIBUS-järjestelmässä erillistä tarvetta sisällyttää osoitetietoa, koska PROFIBUS-järjestelmän kommunikaatiotapa ei tarvitse sitä. EtherCAT-järjestelmässä, missä yksi viesti kulkee usean slave-laitteen lävitse ennen palaamista master-laitteelle, tarvitaan virheen paikallistamiseen sijaintitietoja.

### 3.7 Käyttöönotto, kustannukset ja yhteensopivuus

Verrattaessa tavanomaisempiin kenttäväyliin, Ethernet-pohjaisten kenttäväylien suurin etu on suuri suorituskyky pienemmillä kustannuksilla. Tavanomaisten kenttäväylien valmistajat muistuttavat usein laitteidensa laajasta käytöstä, mutta ne eivät silti ylety niihin määriin, mitä Ethernet-pohjaiset laitteet. [7]

Ethernetin laajan levinneisyyden seurauksena asennus ja huoltotyöt ovat helpompia kuin tavanomaisilla kenttäväylillä. Ethernet-osaamista omaavaa henkilöstöä on yleisesti paljon helpompi löytää. Laitteisto ja ohjelmisto asennuksen ja ongelmanratkaisun tueksi on myös hyvin saatavilla matalilla kustannuksilla. [7]

McIntyre [7] myös väittää, että yksi merkittävä Ethernetin kustannusetu on se, että tuotantolaitoksen tai yrityksen oma IT-henkilöstö on usein tarpeeksi osaavia Ethernet-protokollan kanssa, jotta heihin voidaan tukeutua tuki- ja huoltotehtävissä. Yhdistämällä korkean tason yrityksen verkosto tuotannon kenttäverkkoon saadaan kokonaisvaltaista verkoston kompleksisuutta yksinkertaistettua huomattavasti [7]. Tavanomaisten kenttäväylien valmistajat ovat siirtyneet myös valmistamaan Ethernet-pohjaisia ratkaisuja niiden yleistyessä ja kustannusetujen realisoituessa [10].

Teollisuuden Ethernetin suurin heikkous on olemassa olevien järjestelmien migraatio uuteen protokollaan ja sen tuomat yhteensopivuusongelmat [10]. Kokonaisvaltainen yhden kenttäväylän käyttäminen läpi tuotannon on usein haasteellista tai jopa mahdotonta, sillä jotkut erikoistuneet kenttälaitteet on suunniteltu vai tietyille kenttäväylille [7]. Tämä ongelma saadaan ratkaistua käyttämällä erillisiä porttilaitteita, jotka mahdollistavat protokollien konvertoimisen toiseen. Tämä ratkaisu kuitenkin kasvattaa järjestelmän kompleksisuutta ja hankaloittaa huoltotoimenpiteitä. Porttilaitteiden käyttö kasvattaa myös kenttäväyläkokonaisuuden kustannuksia. [7]

## YHTEENVETO

Työssä verrattiin vanhempaa teknologiaa edustavaa PROFIBUS-kenttäväylää Ethernet-pohjaiseen EtherCAT-kenttäväylään suorituskyvyn, käyttöönotettavuuden, käytettävyyden ja virheidenhallinnan perusteella automaatiojärjestelmässä. Työssä keskityttiin fyysiseen tiedonsiirtoon ja jätettiin tarkoituksella huomiotta langattoman tiedonsiirron teknologiat ja ratkaisut.

Työn onnistumisen kannalta puhuu se, kuinka molempien kenttäväylien erilaiset kilpailutekijät onnistuttiin asettelemaan vastakkain. Vaikka tällä metodilla saadaankin hyvin raastasti eriteltyä teoreettiset voittajat häviäjistä, todellisen maailman automaatiojärjestelmän kenttäväyläratkaisut voivat riippua myös monista kenttäväylän ulkopuolisista ja usein monimutkaisista asioista.

Työn perusteella voidaan todeta, että Ethernet-pohjaiset kenttäväylät tarjoavat merkittäviä suorituskyvylisiä, kustannuksellisia ja käyttöönotollisia etuja automaatiotasolla. EtherCATin 10Gbit/s tiedonsiirtonopeus on monin kerroin suurempi mitä PROFIBUSin 15Mbit/s, ja EtherCAT saavuttaa hyvin samanlaisissa järjestelmissä monin kerroin pienemmän sykliajan. Molemmat teknologiat tukevat useita eri topologioita, mutta laitemäärän lisääntyessä PROFIBUS-järjestelmään on kytkettävä erillisiä vahvistimia. Vaikka PROFIBUS omaa samankaltaisia tarkistussummia mitä EtherCAT, voi järjestelmässä silti käydä huomaamattomia virheitä, mikäli viestin vastausvaatimusta ei ole. Molempien järjestelmien synkronointi toteutetaan käyttämällä sisäisiä kelloja.

Suurtuotannon edut tuovat Ethernet-pohjaiselle järjestelmälle jatkuvia kustannussäästöjä, jonka lisäksi erikoistunutta osaamista kenttäväyliin ei välttämättä tarvita IT-osaston ollessa osaava Ethernet-pohjaisten järjestelmien toteutuksen kanssa.

Ethernet-pohjaisten kenttäväylien puolesta puhuu myös se, että monet tavanomaiset kenttäväyläkehittäjät ovat siirtyneet tarjoamaan Ethernet-pohjaisia ratkaisuja. Ethernet-pohjaisten kenttäväylien ainoa heikkous ei ole luonnostaan itse teknologian heikkous, vaan nykyisten järjestelmien päivittämisen kankeuteen liittyvä ongelma. Vaikka automaatiojärjestelmien päivitykseen liittyy monia haasteita, on turvallista olettaa, että useat automaatiojärjestelmät tullaan päivittämään Ethernet-pohjaiseen ratkaisuun.

# LÄHTEET

- [1] Verwer Training and Consultancy Ltd, verkkosivu. Saatavissa (viitattu 25.8.2020): <http://verwertraining.com/tutorials/tutorial-introduction-to-fieldbus-and-profibus/>
- [2] Jansen D, Buttner H, Jansen D. Real-time Ethernet: the EtherCAT solution. *Computing & Control Engineering Journal*, Feb 2004,15(1):16–21. Saatavissa (viitattu 5.5.2020): <http://search.proquest.com/docview/28337085>
- [3] Cena G, Bertolotti IC, Scanzio S, Valenzano A, Zunino C. On the accuracy of the distributed clock mechanism in EtherCAT. In: 2010 IEEE International Workshop on Factory Communication Systems Proceedings. IEEE, May 2010. p. 43–52.
- [4] EtherCAT Technology Group, verkkosivu. Saatavissa (viitattu 5.5.2020): <https://www.ethercat.org/en/technology.html>
- [5] Beckhoff Information System, verkkosivu. Saatavissa (viitattu 5.5.2020): <https://infosys.beckhoff.com>
- [6] PROFIBUS, PROFIBUS System Description, Saatavissa (viitattu 5.5.2020): <https://www.profibus.com/index.php?eID=dumpFile&t=f&f=52380&token=4868812e468cd5e71d2a07c7b3da955b47a8e10d>
- [7] C. McIntyre, "Ethernet empowers fieldbus," *Intech*, vol. 57, (2), pp. 34-37, 2010. Saatavissa (viitattu 5.5.2020): <https://lib-proxy.tuni.fi/login?url=https://search-proquest-com.lib-proxy.tuni.fi/docview/208821306?accountid=14242>
- [8] Acromag Incorporated, Introduction to PROFIBUS DP. Saatavissa (viitattu 5.5.2020): <http://www.diit.unict.it/users/scava/dispense/II/Profibus.pdf>
- [9] Robert J, Georges J-P, Rondeau E, Divoux T, Robert J. Minimum cycle time analysis of Ethernet-based real-time protocols. *International Journal of Computers, Communications and Control [Internet]*. 2012 Aug 25;7(4):743–57. Saatavissa (viitattu 5.5.2020): <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-00714560>
- [10] Hunt, J. (2008). Ethernet cuts fieldbus costs in industrial automation. *Assembly Automation*, 28(1), 18–26. Saatavissa (viitattu 5.5.2020): <https://doi.org/10.1108/01445150810848975>