

Ville Kärjä

Erään kenttäväyläratkaisun sovittaminen pienitehoisen taajuusmuuttajan ohjausosaan

Tekniikka ja liikenne



Alkulause

Tämä insinööri työ tehtiin osana erästä ABB Oy Drives Low Power AC –tuotekehitysosaston tutkimusprojektia. Suurimmat kiitokseni työni ohjaamisesta menevät dipl.ins. Kalle Suomelalle ABB Oy:stä ja tekn. lis. Esa Häkkiselle Metropolia Ammattikorkeakoulusta.

Haluan kiittää myös kaikkia niitä muita henkilöitä, jotka auttoivat minua tämän opinnäytetyön tekemisessä.

Helsingissä 11.5.2011

Ville Kärjä

Tekijä(t)	Ville Kärjä
Otsikko	Erään kenttäväyläratkaisun sovittaminen pienitehoisen taajuusmuuttajan ohjausosaan
Sivumäärä	90 sivua + 8 liitettä
Aika	11.5.2011
Tutkinto	Insinööri (AMK) 240 op
Koulutusohjelma	Sähkötekniikka
Suuntautumisvaihtoehto	Elektroniikka ja automaatio
Ohjaaja(t)	tekn. lis. Esa Häkkinen, Yliopettaja dipl.ins. Kalle Suomela, Projektipäällikkö
<p>Tässä insinööriyössä on tutkittu erään kenttäväyläratkaisun sovittamista pienitehoisen taajuusmuuttajan ohjausosaan. Insinööriyö tehtiin ABB Oy Drives Low Power AC -tuotekehitysosastolle. Tutkimusaihe on ajankohtainen, koska pienitehoisten taajuusmuuttajien teholuokassa (0,37–22 kW) vaaditaan enemmän tietoliikennepuolen toiminnallisuutta – varsinkin kenttäväyliä – sisäänrakennettuna kuin koskaan aikaisemmin.</p> <p>Työssä on tutkittu Modbusin (RTU ja TCP/IP), CANopenin, Profibusin ja Ethernet/IP:n osalta sitä, kuinka helposti ne saataisiin integroiduksi taajuusmuuttajan ohjauskortille. Työssä on esitetty sulautetun kenttäväyläratkaisun reunaehdot ja sivuttu myös taajuusmuuttajan perinteistä tietoliikenneosaa, joka käsittää muun muassa analogia- ja digitaalipuolen liittynät. Häiriöiden kytkeytymistapoja ja niiltä välttymistä kenttäväyläympäristöissä on myös tarkasteltu tässä työssä. Lisäksi on pyritty integroimaan mahdollisimman monta liittyntää yhden liittimen taakse tila- ja kustannussäästöihin liittyvistä syistä.</p> <p>Työn tuloksena on saatu piirikaavioista alustavat ratkaisut mainittujen kenttäväylien osalta ja yhdistetty ne osaksi nykyisen pienitehoisen taajuusmuuttajan ohjauskortin toiminnallisuutta. Piirikaaviototeutus on viety vielä kahdeksankerroksiselle piirilevyille osasijoittelun ollessa pääpainona. Piirilevyille oli annettu tietynlainen spesifikaatio tuotekehitysosaston puolelta. Piirilevyn osasijoittelun kannalta on tarkasteltu liittimien viemää tilaa ohjauskortilta, jonka pinta-ala on rajallinen.</p> <p>Tutkimustyö jatkuu kenttäväylien osalta siten, että seuraavan sukupolven pienitehoisiin taajuusmuuttajiin pyritään integroimaan asiakkaiden eniten toivomat kenttäväylät mahdollisimman hyvin ja kustannustehokkaasti.</p>	
Avainsanat	kenttäväylä, RS-485, CAN, Ethernet, häiriöiden kytkeytyminen, turvaerotus

Author(s)	Ville Kärjä
Title	Implementing Embedded Field Bus Solution into Low Power AC Drive's Control Board
Number of Pages	90 pages + 8 appendices
Date	May 11, 2011
Degree	Bachelor of Engineering
Degree Programme	Electrical Engineering
Specialisation option	Electronics and Automation
Instructor(s)	Esa Häkkinen, Lic.Sc. (Tech.), Principal Lecturer Kalle Suomela, M.Sc., Project Manager
<p>This Bachelor's thesis examines ways to implement different field bus protocols into a low power AC drive's control board. The study was carried out for ABB Oy Drives' Low Power AC product development department. This study is of high importance as the customer needs drive demands for I/O side improvements in the category of low power AC drives, e.g. 0.37-22 kilowatt AC drives.</p> <p>The work was carried out by first learning about a few legacy and current field bus protocols, which are Modbus (RTU and TCP/IP), CANopen, Profibus and Ethernet/IP and finding out how to integrate them into the control board along with the traditional I/O which comprises analogue and digital interfaces. Electromagnetic interference was also explored since it plays an important role when designing field bus solutions correctly. It was also in the scope of this study to integrate as many interfaces behind one connector as possible to save money and space.</p> <p>Based on the findings, a preliminary schematic of field bus implementation was produced and combined with the current I/O board's functionality. On the basis of this schematic and in-house specification an eight layer printed circuit board (PCB) was also designed paying close attention to component placement. Space requirements for the connectors were also studied.</p> <p>This work will continue alongside with a project which focuses on replacing the traditional I/O with a richer one for the next generation AC micro drives as efficiently as possible. That means at least a few integrated field buses on the I/O board.</p>	
Keywords	field bus, RS-485, CAN, Ethernet, electromagnetic interference, reinforced insulation

Sisällys

Alkulause

Tiivistelmä

Abstract

Sisällys

Tärkeimmät lyhenteet ja määritelmät

1	Johdanto	1
2	ABB:n yritysesittely	2
3	Taajuusmuuttaja	2
3.1	Taajuusmuuttajan päätyypit	2
3.2	Välipiiritaajuusmuuttajan toimintaperiaate	3
3.2.1	Välipiiri	3
3.2.2	Tasasuuntaaja	4
3.2.3	Vaihtosuuntaaja	6
3.2.4	Ohjaus ja säätö	8
3.3	Taajuusmuuttajan turvaerotusvaatimukset	11
3.3.1	Turvallisuusmääräykset säädettäviä sähkökäyttöjä varten	11
3.3.2	Ryömintävälin ja ilmapälin määritelmä	12
3.3.3	Optoerottimesta ja sen nopeuteen vaikuttavista tekijöistä	14
3.4	Nykyisen pienitehoisen taajuusmuuttajan tietoliikennekatsaus	16
3.5	Taajuusmuuttajan käyttöeduista ja sovelluskohteista	18
4	Kenttäväylät	18
4.1	Kenttäväylän määritelmä	18
4.2	Käsiteltyjen kenttäväylien fyysiset rajapinnat	22
4.2.1	RS-485-väylä	22
4.2.2	CAN-väylä	28
4.2.3	Ethernet-väylä	31
4.3	Käsiteltyjen kenttäväylien protokollat	37
4.3.1	Modbus RTU/ASCII -protokolla	37

4.3.2	Modbus/TCP-protokolla	40
4.3.3	Profibus DP -protokolla	42
4.3.4	CANopen-protokolla	45
4.3.5	DeviceNet-protokolla	45
4.3.6	<i>Ethernet</i> /IP-protokolla	46
5	Häiriöiden kytkeytymistavoista kenttäväyläympäristössä	46
5.1.1	Kapasitiivinen kytkeytyminen	47
5.1.2	Induktiivinen kytkeytyminen	49
5.1.3	Galvaaninen kytkeytyminen	50
5.2	Piirikorttien häiriösäteilystä suunnittelun kannalta	52
6	Tulosten esittely kenttäväyläratkaisujen näkökulmasta	54
6.1	Ethernetiin pohjautumattoman kenttäväyläkytkennän ehdot	54
6.2	Ethernetiin pohjautuvan ratkaisun ehdot	57
6.3	Malli 1: Yksi yhteinen mikrokontrolleri taajuusmuuttajan ohjauskortilla	60
6.4	Malli 2: Erillinen ohjausosaan liittyvä kenttäväyläadapteri	63
6.5	Malli 3: Ohjausosan ja pääpiirin mikrokontrollerit erikseen	64
6.6	Valitun ratkaisun perustelut ja tarkemmat vaatimukset	67
6.7	Suunnittelutyö kenttäväyliä osalta ja piirilevyn osasijoittelu	68
6.7.1	Modbus RTU (RS-485) -protokollan toteutus	68
6.7.2	Profibus DP (RS-485) -protokollan toteutus	70
6.7.3	CANopen-protokollan toteutus	71
6.7.4	Paneeliliitynnän hyödyntäminen Modbus RTU:n ketjuttamisessa	72
6.7.5	Ethernet-liitynnän toteutus	75
6.7.6	Kytkenä komponenttien sijoittelu määrätulle pinta-alalle	75
7	Pohdintaa kenttäväyläratkaisuista	79
7.1	Ratkaisumallien hyvistä ja huonoista puolista	79
7.1.1	Mallin 1 hyvien ja huonojen puolien puntarointia	79
7.1.2	Mallin 2 hyvien ja huonojen puolien puntarointia	80
7.1.3	Mallin 3 hyvien ja huonojen puolien puntarointia	80
7.2	Häiriöimmunitetin tärkeys kenttäväyläratkaisuissa	81
7.3	Kenttäväyläkomponenttien valintakriteereistä	82
7.4	Tulevan ratkaisun pohdintaa	83
8	Johtopäätökset	85
	Lähteet	87

Liitteet

Liite 1. Eristysvälien suuruuteen vaikuttavat taulukot

Liite 2. Modbus RTU RS-485 -toteutus

Liite 3. Profibus DP RS-485 -toteutus

Liite 4. CANopenin toteutus

Liite 5. Ensimmäinen vaihtoehto Modbus RTU:n ketjuttamisesta paneeliliitännän läpi

Liite 6. Toinen vaihtoehto Modbus RTU:n ketjuttamisesta paneeliliitännän läpi

Liite 7. Ethernet-liitynnän toteutus

Liite 8. Piirikortin pintasijoittelu ylhäältä ja alhaalta

Tärkeimmät lyhenteet ja määritelmät

ABB	<i>Asea Brown Boveri</i> ; maailman johtava sähkö- ja automaatioteknologiayhtymä
A/D-muunnin	<i>Analogia-/Digitaalimuunnin</i> ; laite, joka muuttaa analogisen signaalin digitaaliseksi
ASCII	<i>American Standard Code for Information Exchange</i> ; 7-bittinen tietokoneiden merkistö
ASIC	<i>Application-specific integrated circuit</i> ; tiettyä sovellusta varten räätälöity integroitu mikropiiri
CAN	<i>Controller Area Network</i> ; hyvin yleinen autoteollisuuden käyttämä väyläjärjestelmä
CIP	<i>Common Industrial Protocol</i> ; ODVA:n hallinnoima teollisuusautomaatioprotokolla
CMV	<i>Common Mode Voltage</i> ; yhteismuotoinen jännite
CMRR	<i>Common Mode Rejection Ratio</i> ; laitteen kyky sietää yhteismuotoista jännitettä.
CPF	<i>Communication Profile Families</i> ; kenttäväyläprotokollista muodostuvat kommunikaatioperheet
CRC	<i>Cyclic Redundancy Check</i> ; tarkisteavaimen luontiin tarkoitettu tiivistealgoritmi
CRLF	<i>Carriage Return Line Feed</i> ; rivinvaihto
CTI	<i>Comparative Tracking Index</i> ; numeerinen eristysmateriaalille ominainen arvo, joka ilmoittaa sen pintavirran suuruuden
dB	<i>Desibeli</i> ; dimensioton yksikkö, joka vertailee tehosuureiden suhteita logaritmisella asteikolla
Differentiaalinen jännite	<i>Erojännite</i> ; jännite-ero laitteen tulonastojen välillä ilman maatasoa
DRAM	<i>Dynamic Random Access Memory</i> ; luku- ja kirjoitustyyppinen muisti, jossa bitit tallennetaan kondensaattoriin

Driver	<i>Ohjainaste</i> ; laite, joka lähettää kenttäväyläprotokollan spesifikaation mukaisesti väylälle tietoa
DTC	<i>Direct Torque Control</i> ; suora vääntömomenttisäätö
ESD	<i>Electrostatic Discharge</i> ; äkillinen virran purkautuminen eri potentiaalien välillä
Ethernet/IP	<i>Ethernet Industrial Protocol</i> ; teollisuusautomaation tiedonsiirtoprotokolla
Flash-muisti	<i>Puolijohdemuisti</i> ; sähköisesti tyhjennettävä ja uudelleenohjelmoitava haihtumaton muistityyppi
FPGA	<i>Field-Programmable Gate Array</i> ; logiikkaelementeistä koostuva mikropiiri, jonka elementtien väliset kytkennät ovat uudelleenohjelmoitavissa
Full-duplex	<i>Kaksisuuntainen</i> ; tiedonsiirtoperiaate, jossa kommunikointi molempiin suuntiin on mahdollista samanaikaisesti
Half-Duplex	<i>Vuorosuuntainen</i> ; tiedonsiirtoperiaate, jossa yhtä signaaliparia käytetään kerrallaan ja lähetys ja vastaanotto tapahtuvat vuorollaan omissa johtimissaan
IEC	<i>International Electrotechnical Commission</i> ; kansainvälinen sähköalan standardointiorganisaatio
IGBT	<i>Insulated Gate Bipolar Transistor</i> ; eristehilatransistori
ISO	<i>International Organization for Standardization</i> ; kansainvälinen standardointijärjestö
JFET	<i>Junction Field Effect Transistor</i> ; liitoshila-FET eli yksinkertaisin kanavatransistori
LCD	<i>Liquid Crystal Display</i> ; nestekidenäyttö, joka on sähköisesti ohjattu ja koostuu valoa polarisoivasta nesteestä
LED	<i>Light Emitting Diode</i> ; loistediodi, joka säteilee valoa, kun sen läpi johdetaan sähkövirta
LLC	<i>Logical Link Control</i> ; hoitaa IEEE 802 -verkoissa lähiverkoille yhteiset toiminnot

LSB	<i>Least significant bit</i> ; vähiten merkitsevä bitti
MAC	<i>Media Access Control</i> ; verkon varaamisen ja liikennöinnin hoitava osajärjestelmä IEEE 802 -verkoissa
MII	<i>Media Independent Interface</i> ; rinnakkaisväylä, joka yhdistää MAC-lohkon PHY-piiriin
Modbus	<i>Modicon Communication Bus</i> ; Modiconin vuonna 1979 kehittämä avoin sovelluspohjainen viestiprotkolla
MOSFET	<i>Metal-oxide-semiconductor field effect transistor</i> ; N- tai P-tyypin puolijohdekanavasta muodostuva kaikkein yleisin kanavatransistori
MPE	<i>Manchester Phase Encoding</i> ; Manchester-tyyppinen vaihekooodaus
MSB	<i>Most significant bit</i> ; eniten merkitsevä bitti
Multimaster system	<i>Moni-isäntäjärjestelmä</i> ; järjestelmä, jossa voi olla useampia isäntiä, mutta vain yksi voi olla kerrallaan aktiivinen
Multipoint network	<i>Monipisteverkko</i> ; monen toimipisteen välinen itsenäinen data-siirtoverkko, jossa on taattu siirtokapasiteetti kaikkien pisteiden välillä
NC	<i>Normally Closed</i> ; vaihtokosketinreleen nasta, joka on oletusarvoisesti yhdistetty yhteiseen maatasoon
NIC	<i>Network Interface Card</i> ; laitteen osa, joka yhdistää sen verkkoon
NO	<i>Normally Open</i> ; vaihtokosketinreleen nasta, joka on oletusarvoisesti ilmassa
NRZI	<i>Non-Return-to-Zero-Inverted</i> ; linjakoodaustapa, jossa ykkösbittiä esittää signaalin polariteetin vaihtuminen ja nollaa pysyvä polariteetti
NRZ	<i>Non Return to Zero</i> ; linjakoodaustapa, jossa ykkösbitti esittää yhtä merkitsevää tilaa ja nollabitti toista merkitsevää tilaa

ODVA	<i>Open DeviceNet Vendor Association, Inc;</i> kansainvälinen organisaatio, joka tukee CIP:tä
OSI	<i>Open Systems Interconnection;</i> verkottumisen standardointiin keskittynyt hanke
PDO	<i>Process Data Objects;</i> tiedonsiirrossa käytettäviä prosessitietoyksiköitä
PHY	<i>Physical layer transceiver;</i> fyysisen tiedonsiirtokerroksen lähettinvastaanotin
Profibus	<i>Process Field Bus;</i> yleinen teollisuuden kenttäväylästandardi
PDU	<i>Protocol Data Unit;</i> Modbus-protokollan ydin
PWD	<i>Pulse Width Distortion;</i> pulssinleveyden säröytyminen
PWM	<i>Pulse Width Modulation;</i> pulssinleveysmodulaatio
RAM	<i>Random Access Memory;</i> luku- ja kirjoitustyyppinen työmuisti
RFC	<i>Request for Comments;</i> Internet Engineering Task Forcen (IETF) julkaisemia Internetiä koskevia standardeja
RMII	<i>Reduced Media Independent Interface;</i> MII:n kutistettu versio
RMS-arvo (jännite)	<i>Root Mean Square -arvo;</i> tehollisarvo jännitteestä eli $U_{RMS} = \frac{U_{huippuarvo}}{\sqrt{2}}$
RS-485	<i>EIA-485;</i> differentiaalinen sarjaväylä, johon voi liittyä useita väylälaitteita samanaikaisesti
RTU	<i>Remote Terminal Unit;</i> suorituskykyinen Modbus binääriprotokolla
SPI	<i>Serial Peripheral Interface;</i> Motorolan kehittämä kaksisuuntainen synkroninen sarjaväylä
STP	<i>Shielded Twisted Pair;</i> suojattu parikierretty kaapeli
SRAM	<i>Static Random Access Memory;</i> staattinen RAM-muisti
STO	<i>Safe Torque Off;</i> oikosulkumoottorin turvapysäytysmekanismi.
TCP/IP	<i>Transmission Control Protocol/Internet Protocol;</i> Ethernet-verkon päällä toimiva protokollakokonaisuus

TTL	<i>Transistor-transistor logic</i> ; logiikkaperhe, jonka käyttöjännite on +5V
U_{AC}	<i>Alternating Current Voltage</i> ; vaihtojännite
U_{DC}	<i>Direct Current Voltage</i> ; tasajännite
UART	<i>Universal Asynchronous Receive Transmit</i> ; asynkronisen sarjamuotoisen tietoliikenteen mahdollistava tekniikka
UL	<i>Underwriters Laboratories</i> ; riippumaton amerikkalainen tuoteturvallisuuden keskittynyt varmennuskeskus
UTP	<i>Unshielded Twisted Pair</i> ; suojaamaton parikierretty kaapeli

1 Johdanto

Pienitehoisten eli tässä tapauksessa teholuokkaan 0,37–22 kW kuuluvien taajuusmuuttajien kehitys on suuntautumassa tietoliikenneosan parantamiseen. Nykyisessä kilpailutilanteessa vahvoilla ovat sellaiset tuotteet, joista löytyy monipuolisimmat liitäntämahdollisuudet erilaisia kenttäväyliä ja perinteistä tietoliikennettä eli analogia- ja digitaali-puolen tuloja ja lähtöjä varten. Tämä asettaa suuria haasteita suunnittelulle, koska piirilevyn pinta-ala on erittäin rajallinen, ja uudet liitännät vievät merkittävästi lisää tilaa. Vaihtoehdoksi jää käytännössä nostaa kytkentöjen integrointiastetta ja sulauttaa mahdollisimman monta toimintoa yhden liittimen taakse.

Tässä työssä tarkastellaan muutamaa hyvin suosittua ja perinteistä kenttäväylää eli Modbus RTU:ta, Modbus/TCP:tä, CANopenia, Profibus DP:tä ja Ethernet/IP:tä siltä osin, että ne saataisiin integroiduksi taajuusmuuttajan ohjausosaan mahdollisimman hyvin. Lähtökohtainen ongelma on se, että laajentaakseen taajuusmuuttajan kenttäväylätukea asiakkaan pitää nykyisin investoida laajennuskorttiin, joka on kohtalaisen kallis verrattuna peruslaitteen hintaan. Kenttäväylien integrointi vie toisaalta lisää tilaa taajuusmuuttajan ohjauskortilta, jonka komponenttitiheys on perinteisesti ollut jo suuri. Käytännössä, mitä yksinkertaisempi väylä on, sitä helpompi se on sulauttaa, koska nykyisistä mikrokontrollereista löytyy jo osalle tällaisista yksinkertaisemmista väylistä valmis ohjain sisäänrakennettuna.

Perinteistä tietoliikennettä tarkastellaan tässä työssä siten, että valittuun ratkaisuun vaihdetaan analogiatulojen tyyppiä differentiaalinen jännite- ja virtaviestiä tukeva tulo, kun perinteisesti halvemmän luokan laitteissa ovat analogiapuolen ottoliitännät olleet epäsymmetrisiä (*single-ended*). Työssä suunnitellaan sellaiset sähköiset kytkennät, joita voitaisiin käyttää edellä mainittujen kenttäväylien tuomiseksi taajuusmuuttajan ohjausosaan ja jotka voitaisiin helposti sulauttaa tulevan taajuusmuuttajaperheen ohjauskorteille. Työssä määritellään myös reunaehdot kenttäväyläratkaisun suunnittelun tueksi, jotka sovellettiin nykyisistä ratkaisuista ja komponenttien datalehdiltä. Tätä ennen tarkastellaan muutamaa potentiaalista ratkaisuvaihtoehtoa edellä mainittujen kenttäväylien integroimiseksi ja valitaan niistä sopivin.

2 ABB:n yritysesittely

ABB on yksi maailman johtavista sähkövoima- ja automaatioteknologiayhtymistä, jonka ydinosaamisaluetta ovat sähkövoimatuotteet, sähkövoimajärjestelmät, sähkökäytöt, kappaletavara-automaatio, pienjännitustuotteet ja prosessiautomaatio. Filosofiana koko liiketoiminnan takana on ympäristöystävällisten ja kilpailukykyisten tuotteiden, järjestelmien ja palveluiden tarjoaminen teollisuus- ja energiayhtiöasiakkaille laadusta tinkimättä. Maailmanlaajuisesti ABB:n palveluksessa työskentelee yli 100 000 henkilöä.

Sähkövoimatuotteet käsittävät muuntajat, suur- ja keskijännitekojeistot, katkaisijat, releet, kaapelit ja näihin liittyvät komponentit. Sähkövoimajärjestelmät-divisioonan palveluihin kuuluvat voimansiirtoon ja sähkönjakeluun liittyvät turnkey-järjestelmät ja palvelut. Sähkökäytöt ja kappaletavara-automaatio käsittää moottorit, generaattorit, taajuusmuuttajat, ohjelmoitavat logiikat, muita tehoelektroniikkatuotteita ja robotit. Pienjännitustuotteet-divisioonaan kuuluu ihmisiä ja sähkölaitteistoja suojaavien pienjännitteisten katkaisijoiden, kytkimien, ohjaus- ja valvontakojeiden, asennustarvikkeiden sekä kotelo- ja kaapelijärjestelmien valmistaminen. Prosessiautomaatio-divisioona tarjoaa taas puolestaan ratkaisuja tuotantoprosessin energiatehokkuuden ja tuottavuuden parantaviin ongelmiin erilaisten järjestelmien kautta. [1.]

3 Taajuusmuuttaja

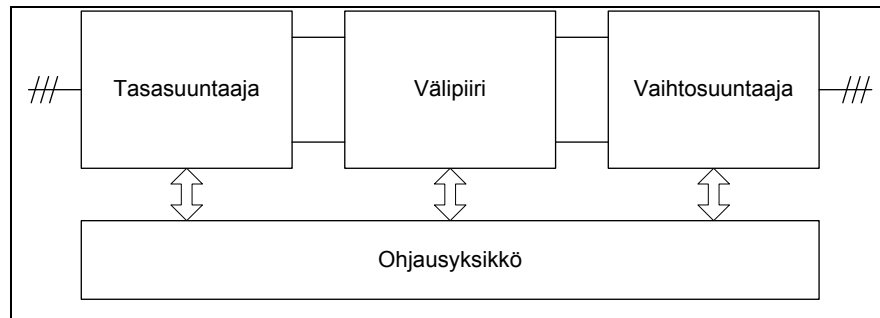
3.1 Taajuusmuuttajan päätyypit

Taajuusmuuttajia on olemassa käytännössä kahta päätyyppiä: välipiirillisiä ja suoria. Välipiirillinen taajuusmuuttaja muuttaa verkkotaajuuden vaihtojännitteen ensin tasajännitteeksi ja sitten taas takaisin halutun taajuiseksi vaihtojännitteeksi. Suorissa taajuusmuuttajissa vaihtosähköverkon signaali pätkitään taas puolestaan puolijohdekytkimillä halutun taajuiseksi ja jännitteiseksi vaihtosähköksi. [2, s. 48.]

Välipiirillä varustettuja taajuusmuuttajia käytetään taajuusohjatuissa oikosulkumoottorikäytöissä [3, s. 17]. Tässä työssä taajuusmuuttajalla viitataan nimenomaan tällaiseen ratkaisuun.

3.2 Välipiiritaajuusmuuttajan toimintaperiaate

Välipiirillinen taajuusmuuttaja koostuu kolmesta osasta: tasasuuntaajasta, välipiiristä ja vaihtosuuntaajasta (ks. kuva 1). Ohjausyksikkö yhdistyy näihin kolmeen pääkomponenttiin ja varmistaa sen, että koko laite toimii tarkoituksenmukaisesti. [3, s. 17.]



Kuva 1. Taajuusmuuttajan toiminnalliset osat [3, s. 17]

Ohjausyksikkö muodostuu piirilevyllä sellaisesta mikrokontrollerista, jossa on sisäänrakennettu mikroprosessori ja sen yhteydessä liityntälohko, joka kykenee tuottamaan pulssinleveysmodulointua signaalia eli niin sanottua PWM (*Pulse Width Modulation*) -signaalia.

3.2.1 Välipiiri

Taajuusmuuttajia voi olla joko tasavirtavälipiirillisiä tai tasajännitevälipiirillisiä. Tasavirtavälipiirillisiä taajuusmuuttajia käytetään vain yksittäismoottorikäytöissä, joissa moottorin nimellistehon tulee kuulua taajuusmuuttajan tehoalueelle, ja niiden välipiirissä on käytännössä pelkkä tasoituskuristin. Taajuusmuuttaja toimii tällöin virtalähteenä syöttäen moottoriin sellaisen virran, joka saa siihen aikaan halutun jännitteen. [3, s. 17.]

Tasajännitevälipiirillisen taajuusmuuttajan välipiirissä on LC-alipäästösuodatin, jolla tasoitetaan verkosta vaihtosuunnattua sykkivää tasajännitettä. Välipiirin tasajännite tuotetaan tavallisimmin diodisillan avulla. Vaihtosuuntaajan lähtöjännitteen amplitudia voidaan säätää joko välipiirin jännitettä säätämällä tai pulssinleveysmodulaatiota hyväksi käyttäen, joista jälkimmäinen on yleisempi ratkaisu. [2, s. 50; 3, s. 18.]

Moottorin jännitettä säädetään pulssinleveysmodulaatiota käyttäen, koska välipiirin tasajännitteen tuottavaa diodisiltaa ei voi ohjata (kuva 2a, ks. seur. s.). PWM-taajuusmuuttaja ottaa syöttöverkosta oikeastaan vain pätötehoa. Lisäksi syöttöverkoon kytketty diodisilta estää jarrutustehon vaihtosuuntauksen sinne.

PWM-ohjaus mahdollistaa myös säädön hyvän dynamiikan ja lähes sinimuotoisen vaihevirran, koska lähtöjännitteen keskiarvoa voidaan muuttaa käytännössä viiveettä pulssien pituuksia muuttamalla. Jos välipiirijännitettä muutetaan tyristorisiltaa tai tasasähkökatkojaa käyttäen, välipiirin kondensaattorien aiheuttaman suurehkon kapasitanssin takia jännitteenmuutokseen kuluu paljon enemmän aikaa kuin PWM-ohjausta käyttäen eli säätönopeus jää suhteellisen huonoksi. Tasajännitevälipiiritajuusmuuttajilla voidaan syöttää sekä tahti- että oikosulkukoneita, koska niiden puoli-johdetehokytkimien virran katkaisu ei riipu kuorman tehokertoimesta. [2, s. 50; 3, s. 18.]

3.2.2 Tasasuuntaaja

Tasasuuntaajia käytetään muuttamaan sähköverkon kolmivaiheinen vaihtosähkö tasasähköksi. Kolmipulssitasasuuntaajaksi kutsutaan kytkentää, jossa tasajännite muodostuu kolmesta pulssista yhden verkkojakson aikana. Huonona puolena on vaihevirroissa esiintyvä tasakomponentti ja nollajohtimen tarve, jonka vuoksi sitä ei enää juuri käytetä. Yleisemmin käytössä onkin kuusipulssitasasuuntaaja, jonka vaihevirrassa näitä ei esiinny. Kuusipulssitasasuuntaajan ulostulon tasajännite on esitetty kaavan (1) avulla.

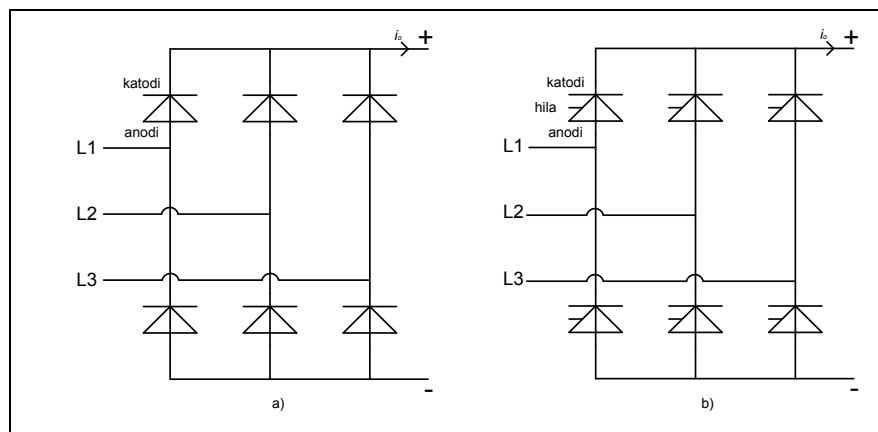
$$U_{DC} = \frac{3 * \sqrt{2} U_{RMS}}{\pi} * \cos\alpha \quad (1)$$

jossa U_{RMS} = pääjännitteen tehollisarvo,

α = ohjauskulma.

[2, s. 41, 43.]

Kuusipulssitasasuuntaajan toteuttaminen on mahdollista joko kuuden diodin tai tyristorin avulla, jossa yhden kolmiasentoisen kytkimen toteuttamiseen tarvitaan kolme diodia tai tyristoria. Kytkimet kääntyvät, eli virta siirtyy diodilta tai tyristorilta toiselle kolmivaiheisen virran määräämässä tahdissa, jota kutsutaan verkkokommutoinniksi. Yläpuolen diodeista ja tyristoreista johtaa kunakin hetkenä aina se, jonka vaihejännite on kaikkein positiivisin ja alapuolen vastaavista se, jonka vaihejännite on negatiivisin kaikista (ks. kuva 2).



Kuva 2. Kuusipulssitasasuuntaaja a) diodisillan ja b) tyristorisillan avulla toteutettuna [2, s. 42]

Diodi- ja tyristorisillat päästävät tasavirtaa vain yhteen suuntaan. Tyristorin virrankulua myötasuuntaan voidaan ohjata sen hilan avulla. Jos hilalle ei anneta sytytysvirtapulsseja, estää tyristori virran kulun. Syttyessään tyristori pysyy johtavana, kunnes sen läpi kulkeva virta pienenee nolleen ja vaihtaa suuntaansa. Tyristori siirtyy tämän jälkeen estotilaan ja katkaisee virran kulun. Tyristorin pitää antaa olla toipumisajan verran rauhassa, jotta se pysyisi estotilassa. Tyristorin ohjattavuudesta johtuen kommutoinnin, eli kytkimen käännön alkua voidaan viivästyttää määrätyn ohjauskulman α verran.

Tyristorisilta ohjaa siis kuormituksen saamaa tasajännitettä kaavan (1) mukaisesti. Vastarinnankytketyn tyristorisillan avulla voidaan tasavirran suunta valita sen mukaan, kumpi silloista johtaa. Tyristorien toipumisaika on noin millisekunnin luokkaa, mikä täytyy ottaa huomioon tasavirran suuntaa vaihdettaessa, jottei niitä ohjata johtaviksi liian aikaisin ja aiheuteta näin oikosulkuja. Toipumisaika voidaan jättää huomiotta lisäämällä kummankin sillan tasasähkölähtöihin kuristin, joka vastustaa virran muutosta induktanssin ansiosta.

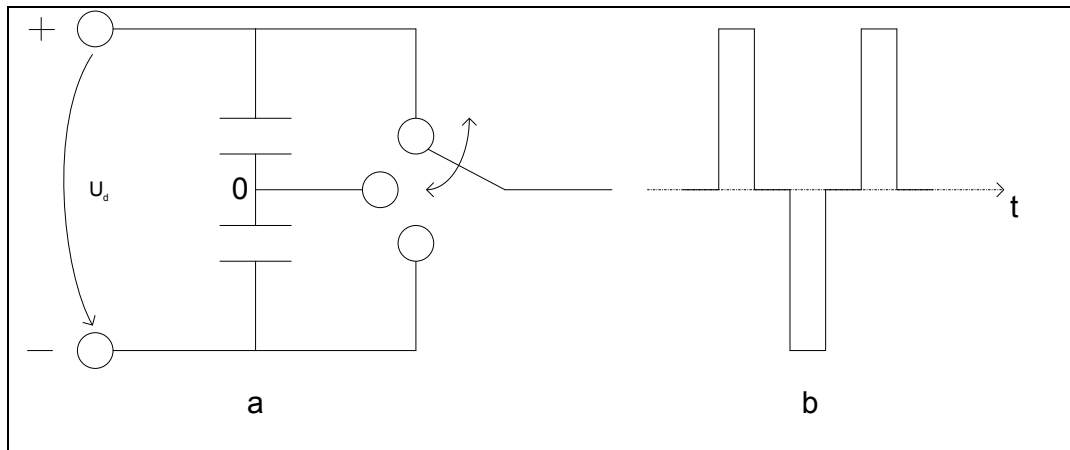
Diodisillan hyviin puoliin kuuluu automaattinen toiminta ja hyvä tehokerroin, mutta haittapuolina ovat virran kulku vain yhteen suuntaan sekä ohjausmahdollisuuden puute. Tyristorisillan eduksi voidaan lukea kohtuullisen hyvä säätödynamiikka, mutta haitaksi huono tehokerroin lähtöjännitteen ollessa lähellä nollaa, jolloin pienillä nopeuksilla ei saada suurta vääntömomenttia tasasähkömoottorille. Tyristorisillan säätöä vaivaa kuitenkin kosiniriippuvuus, joka on selvä epälineaarisuustekijä ja havaittavissa kaavassa (1).

Kyseinen kaava ei ole myöskään voimassa pienillä virroilla, jolloin tyristorisillan tasavirta koostuu pulseista, eli se aukottuu. Tämä johtuu siitä, että tyristorisillan lähtöjännite ei seuraa verkon pääjännitettä virran ollessa nolla, vaan on kuorman jännitteen määräämä. Tyristorisillan ohjauskulma vaikuttaa tässä vain tasavirran suuruuteen. [2, s. 42–44.]

3.2.3 Vaihtosuuntaaja

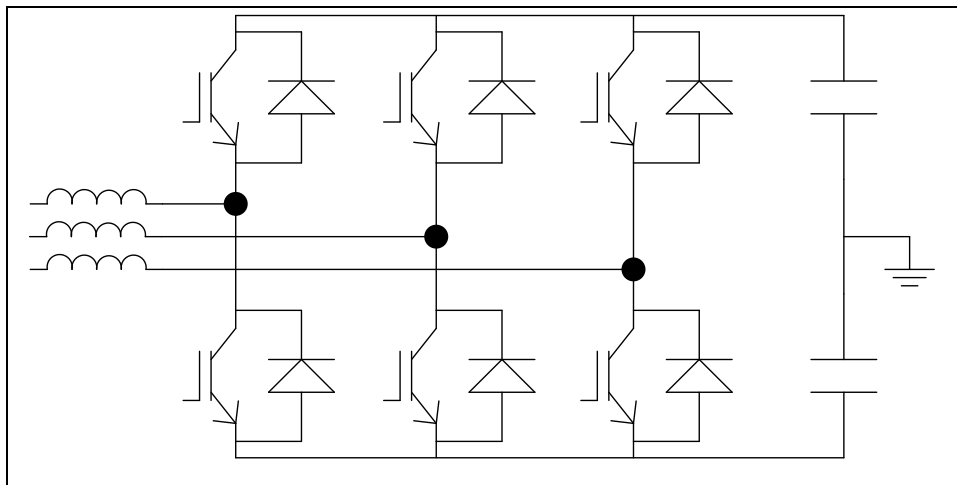
Invertterin eli vaihtosuuntaajan avulla tasajännite saadaan muutetuksi sellaiseksi vaihtojännitteeksi, jonka amplitudi ja taajuus ovat määriteltävissä ohjauksen avulla. Vaihtosuuntaajan taajuutta ja jännitettä on muutettava yleensä toisistaan riippuen, koska vaihtosähköpiirin reaktanssit ovat riippuvaisia taajuudesta. Koska PWM-invertterin lähtöjännitteen puoliallot muodostuvat monesta eri pulssista, joiden leveys on täysin muokattavissa, voidaan samalla tehoasteella ohjata sekä jännitettä että taajuutta.

Kolmitasoisen invertterin jokaista vaihetta voidaan kuvata vaihtokytkinmallin avulla (kuva 3, ks. seur. s.), jolla vaiheen lähtö voidaan kytkeä joko tasajännitelähteen plusnapaan, keskipisteeseen tai miinusnapaan. Ulostulon potentiaali määräytyy yksinomaan kytkimen asennosta, koska tasajännitelähde on erittäin pieni-impedanssinen. Vaihtokytkinmallissa vaihtokytkintä käännetään suureholla taajuudella edestakaisin, mikä kuvaa invertterin toimintaa päähkinänkuoressa. Lähdön potentiaalinvaihtelu kytkimen tasaisessa askelluksessa on myös havaittavissa. Sinimuotoinen lähtöjännite saadaan moduloimalla kanttiaaltoa.



Kuva 3. Kohdassa a) kolmitasoisin invertterin yhden vaiheen kytkinmalli ja b) lähdön potentiaali pulssisuhteella 1:1:1 [4, s. 17]

Kolmitasoisia vaihtosuuntaajia voidaan toteuttaa hilalta sammutettavilla tehpuolijoh-teilla. Siksi nykyään käytetään vaihtosuuntaajan kytkiminä IGB (*Insulated Gate Bipolar Transistor*) -transistoreja, joista muodostetaan niin kutsuttu IGBT-siltakytkentä (ks. kuva 4).



Kuva 4. Vaihtosuuntaaja toteutettuna IGBT-sillan avulla [5]

IGBT:n hyväksi puoliksi voidaan lukea kohtalaisen pieni ohjaustehon tarve, hyvä jännitekestoisuus sekä kohtalaisen korkea kytkentätaajuus. IGBT asetetaan johtavaan tilaan hilalle syötettävän ohjausjännitteen turvin ja on ohjattavissa erittäin pienellä ohjauste-holla, koska sen hila vastaa pientä kondensaattoria, jonka suuruus on tyypillisesti muu-taman nanofaradin luokkaa. Ohjausasteen on kuitenkin pystyttävä syöttämään hetkelli-sesti suuri virta, jotta hilakapasitanssi latautuisi nopeasti. [2, s. 45; 4, s. 14, 16–17; 6.]

3.2.4 Ohjaus ja säätö

Ohjaus pohjautuu ohjearvoihin ja laitteesta muodostettuun malliin. Näiden seikkojen perusteella tarvittavat ohjaussignaalit muodostetaan halutun ilmiön saavuttamiseksi. Säädöllä tarkoitetaan laitteen lähtösuureiden vertaamista ohjearvoihin. Säätöpoikkeaman eli lähtösuureiden ja ohjearvojen erotuksen perusteella muutetaan laitteen ohjaussignaaleja jonkin säätöalgoritmien mukaisesti siten, että säätöpoikkeama pienenee. [2, s. 67.]

Skalaariohjauksesta on kyse, kun moottorin pyörimisnopeutta ohjataan muuttamalla vaihtosuuntaajan lähtötaajuutta, jolloin kuormitusväntömomentti ja taajuus määräävät uuden pyörimisnopeuden. Lähtöjännitteen riippuvuus lähtötaajuudesta näkyy siten, että jännite kasvaa lineaarisesti moottorin nimellisjännitteeseen asti, jonka jälkeen se pysyy vakiona.

Skalaariohjaus perustuu yhtälöön (2), jossa moottorin väntömomentti $U_M * I_p$ on suoraan verrannollinen moottorin jännitteen ja pätövirran tuloon $U_M * I * \cos\varphi$. Skalaarisäädön avulla säädetään joko moottorin pyörimisnopeutta tai väntömomenttia erikseen tai vuorotellen. [3, s. 23.]

$$U_M * I_p = U_M * I * \cos\varphi \quad (2)$$

Yhtälön (3) mukaan väntömomentin ohjaus perustuu väntömomentin ja jättämän väliseen riippuvuuteen, jossa $\omega_r = 2\pi(f_s - pn)$ on roottorivirtojen kulmataajuus eli jättämäkulmataajuus, Ψ_r on roottorin käämivuon itseisarvo ja R_r on roottorikäämin resistanssi. Jos Ψ_r ja R_r ovat vakioita, väntömomentti on suoraan verrannollinen jättämäkulmataajuuteen, jota voidaan varioida moottorin syöttötaajuutta f_s muuttamalla.

$$T = \frac{3}{2} p \frac{\omega_r * \Psi_r^2}{R_r} \quad (3)$$

[2, s. 84.]

Vektorisäätö perustuu siihen, että oikosulkumoottorin magneettivuota ja vääntömomenttia voidaan ohjata erikseen. Tämä tapahtuu siten, että aluksi staattorivirta jaetaan kahteen eri virtakomponenttiin d ja q , jotka ovat kohtisuoraan toisiaan vasten.

Sitten kyseiset komponentit siirretään synkroniseen viitekehukseen, jossa niistä tulee jatkuvia DC-suureita. D -komponentti asetetaan magneettivuon suuntaan, ja q -komponenttia ohjataan kohtisuoraan magneettivuota vasten ja suhteessa vääntömomenttiin. Molempien komponenttien kulma pidetään jatkuvasti 90 asteessa erillisohjauksen mahdollistamiseksi. D -komponenttiin kiinnitetystä magneettivuosta riippuen ohjaus on joko staattorivuo- tai roottorivuo-orientoitua.

Nopean vääntömomentin ohjaus taataan pitämällä magneettivuo vakiona dynaamisissa tilanteissa. Staattori- ja roottorivuo pyörivät staattorin kulmataajuudella ω_{sr} ja tieto niiden asennosta tarvitaan kenttäorientaatiota varten. Magneettivuon asento voidaan selvittää suoraan mittaamalla ilmavälivuota moottorissa olevilla erityisillä antureilla. Toinen vaihtoehto on anturiton säätö, jossa staattorin sähköisiä ominaisuuksia mitataan ja käytetään moottorimallin parametreja, jolloin saadaan arvio magneettivuon suunnasta.

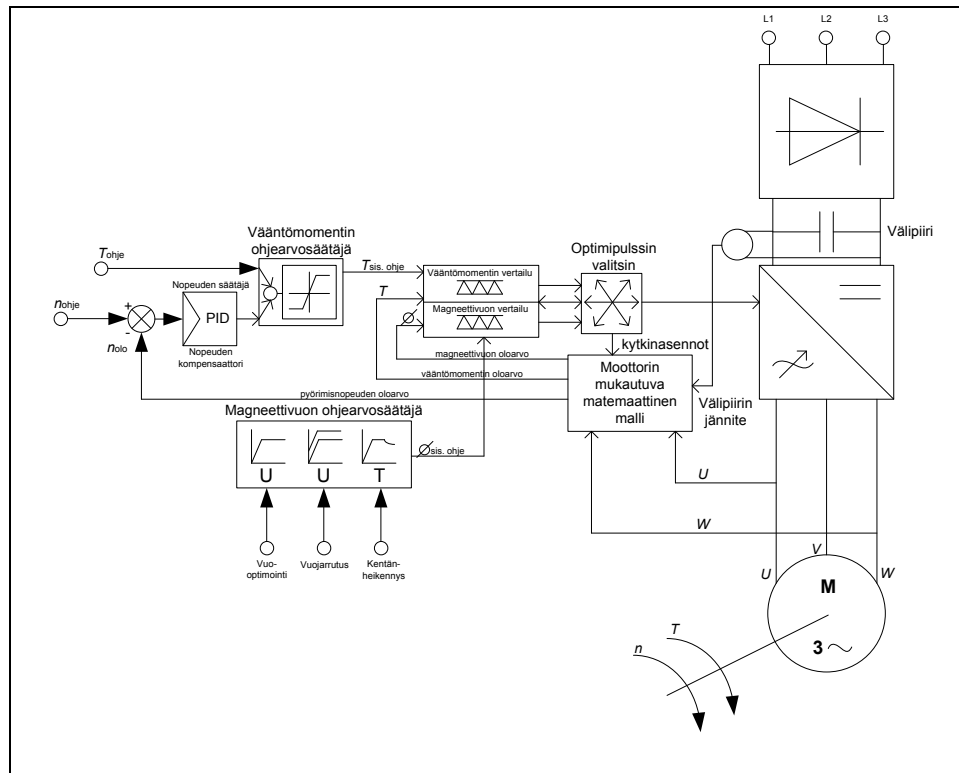
Näille vuon asennonmittaustavoille käytetään nimityksinä suoraa kenttäorientaatiota (*direct field orientation*) ja suoraa vektorisäätöä (*direct vector control*). Epäsuorassa vektorisäädössä (*indirect vector control*) ja epäsuorassa kenttäorientaatiossa (*indirect field orientation*) vuon asento määritetään roottorin pyörimisnopeusmittauksen ja laskun jättämällä avulla. Jättämällä laskemisessa käytetään apuna vuon referenssiarvoa. Anturittomassa toiminnassa roottorin pyörimisnopeutta on arvioitava mittaamisen sijasta. [7, s. 21.]

DTC (*Direct Torque Control*) -säätö perustuu pohjimmiltaan kaavaan (4), jossa on integroimalla ajan suhteen mahdollista estimoida staattorin käämivuon vektori $\alpha\beta$ -staattorikoordinaatistossa. Tällöin on tunnettava staattorijännite u_{sr} , staattorivirta i_s ja staattoriresistanssi R_{sr} , joka saadaan syöttämällä tasavirtaa staattoriin ja mittaamalla jännitehäviö.

$$\overline{\psi}_s^{\alpha\beta} = \int (\overline{u}_s^{\alpha\beta} - R_s \overline{i}_s^{\alpha\beta}) dt \quad (4)$$

[2, s. 96.]

Käytännössä DTC:ssä moottorin virta ja vaihtosuuntaajan tasajännitevälipiirin jännite mitataan ja syötetään adaptiiviseen moottorin matemaattiseen malliin. DTC vaikuttaa siis välittömästi moottorin perussuureisiin eli vääntömomenttiin ja pyörimisnopeuteen. Komparaattorikytkennöillä vertaillaan sekä vääntömomentin että vuon oloarvoja ohjearvoihin, jotka saadaan momentin ja vuon ohjearvosäätiäjiltä. Matemaattinen malli laskee vuon ja vääntömomentin oloarvot muutaman μ s:n sykleissä.



Kuva 5. DTC-säädön lohkokkaavio [3, s. 26]

Optimipulssin valitsin (ks. kuva 5) tekee vaihtosuuntaajaan kytkentämuutoksia komparaattoreiden antamien tietojen perusteella. Moottoria syöttävä jännite ei ole sinimuotoinen muutettaessa sen pyörimisnopeutta ja vääntömomenttia, mutta jatkuvuustiloisssa syöttöjännite muuntautuu sinimuotoiseksi. Tämä takaa paremman säätödynamiikan kuin perinteisellä PWM-ohjatulla taajuusmuuttajalla. [3, s. 25.]

3.3 Taajuusmuuttajan turvaerotusvaatimukset

3.3.1 Turvallisuusmääräykset säädettäviä sähkökäyttöjä varten

IEC:n (*International Electrotechnical Commission*) standardi 61800-5-1 [8, s. 18] määrittelee turvallisuusmääräykset säädettäviä sähkökäyttöjä varten. Siinä jaotellaan neljään eri eristysvaatimusluokkaan A, B, C ja D laitteet käyttöjännitteen mukaan. Taulukossa 1 kerrotaan maksimiarvot sekä vaihtojännitteen tehollisarvolle että tasajännitteen keskiarvolle kussakin luokassa.

Taulukko 1. IEC 61800-5-1 mukaiset jänniteluokat säädettäviä sähkökäyttöjä varten [8, s. 18]

Jänniteluokka	U_{AC} (RMS) / V	U_{DC} (keskiarvo) / V
A	25	60
B	40	120
C	1 000	1 500
D	>1 000	>1 500

Pienitehoisen jännitevälipiiritaajuusmuuttajan toiminnalliset osat voidaan karkeasti luokitella eri eristysvaatimuksille ja käyttää tätä suunnittelun kulmakivenä optimaalisimman lopputuloksen aikaansaamiseksi. Oleellisin suunnittelukysymys on se, mihin väliin turvaerotus laitetaan, sillä tämä vaikuttaa tarvittavien komponenttien määrään ja laatuvaatimuksiin, sekä mahdollisesti muiden osien toimivuuteen.

Taajuusmuuttajan tietoliikenneosa kuuluu usein jänniteluokkaan A, koska ollaan niin kutsutussa käyttäjäpotentiaalissa, jossa jännitteet eivät saa nousta merkittävän suuriksi. Nimensä mukaisesti siis ihmisellä on kosketusyhteys kyseessä olevan potentiaalialueelle. Tasasuuntaajasta, välipiiristä ja vaihtosuuntaajasta koostuva pääpiiri kuuluu taas puolestaan jänniteluokkaan C, koska esimerkiksi tasajännitevälipiirin ylemmän potentiaalijännite voi nousta tehollisarvoltaan jopa $\frac{U_P}{\sqrt{2}}$ suuruisiksi.

IEC 61800-5-1 standardissa kerrotaan, että tällaisessa tilanteessa piirit on erotettava toisistaan vahvennetun erotuksen periaatteen mukaisesti [1 s. 19]. Tämä tarkoittaa käytännössä tietyn erotusvälivaatimuksen täyttävää galvaanista erotusta, joka voidaan toteuttaa esimerkiksi optoerottimilla tai muuntajilla, joissa ilmavälien ja ryömintävälien arvot ovat sopivat.

ABB:n asiantuntijoiden mukaan taajuusmuuttajan suunnittelussa yksi merkittävimmistä päätöksistä on se, mihin potentiaaliin ohjausosan suoritin laitetaan. Tämä nimittäin vaikuttaa ratkaisevasti siihen, mihin kohtaan vahvennettu erotus tulee, ja kuinka paljon kalliita ja kookkaita erotuskomponentteja siinä on käytettävä.

Jos suoritin kytketään välipiirin alempaan potentiaaliin, analogiatulot pitää esimerkiksi erottaa ja niiden tarkkuus laskee yleensä eristyskomponenttien (etenkin optoerottimien) huonojen toleranssien takia verrattuna siihen, että suoritin olisi kytketty käyttäjä-potentiaaliin. Tietoliikenneliitännöiden lisääntyessä ei ole siis kovinkaan mielekää erottaa vahvennetun erotuksen periaatteen mukaisesti jokaista kentältä sisään tulevaa signaalia.

Jos taas suoritin on käyttäjäpotentiaalissa, pääpiirille on vähintäänkin järkevää laittaa erillinen A/D (Analogia/Digitaali) -muunnin keräämään mittaustietoja, jottei kymmeniä mittaussignaaleja tarvitsisi tuoda useiden optoerottimien kautta vahvennetun erotusväylän ylitse suorittimelle. Tällöin riittäisi A/D-muuntimen liittäminen suorittimelle esimerkiksi SPI-väylän kautta, joka käsittää vain neljä signaalia, ja on vielä mahdollista tuoda järkevästi erotusrajan yli. Tällöin tietoliikenneosassa pelkkä toiminnallinen erotus riittää, joka vie kaiken lisäksi paljon vähemmän tilaa piirilevyiltä turvaerotukseen verrattuna johtuen pienemmistä ilma- ja ryömintävälivaatimuksista. [9.]

3.3.2 Ryömintävälin ja ilmavälin määrittely

Ryömintäväli (*creepage distance*) tarkoittaa piirilevyllä eristysvälin pintaa pitkin mitattuna lyhintä tietä kahden johtavan osan tai johtavan osan ja laitteiston ääri-rajojen välillä. Riittävä ryömintäväli minimoi pintavirtojen (*tracking*) vaikutuksen eristysmateriaalin päällä.

Merkittäviä pintavirtoja voi syntyä, kun eristysmateriaalin ominaisuudet huonontuvat paikallisesti, ja tämä voi aiheuttaa myös pieniä valokaaria eristysmateriaalin päällä tai sen läheisyydessä. Pintavirran suuruuden arviointiin vaikuttaa eristysmateriaalin CTI (*Comparative Tracking Index*) -arvo sekä ympäristön saastuneisuusaste.

CTI-arvo on jokaiselle eristysmateriaalille ominainen ja numeerinen arvo sellaisesta jännitteestä, jonka vallitessa pintavirta aiheuttaa toimintahäiriön standardinmukaisissa testeissä. Pintavirran eristysmateriaaliin aiheuttamat vauriot johtuvat usein seuraavista tekijöistä: ilmankosteudesta, saastumisesta, syövyttävistä kemikaaleista ja korkeudesta merenpinnasta, jossa laitetta käytetään.

Ilmaväli (*clearance distance*) tarkoittaa lyhintä matkaa kahden johtavan osan tai johtavan osan ja laitteiston äärirajojen välillä ilmaa pitkin mitattuna. Sopivan mittainen ilmaväli ehkäisee dielektristä hajoamista (*dielectric breakdown*) elektrodien välillä, mikä aiheutuu ilman ionisoitumisesta. Suhteellinen kosteus, lämpötila ja ympäristön saastuneisuusaste vaikuttavat myös siihen.

Normaaliolosuhteissa toimivan laitteen nimellinen käyttöjännite (*a working voltage*) on suurin eristysväliin vaikuttava jännite. Käyttöjännitettä mitattaessa on tärkeää mitata sekä jännitteen huippu- että RMS (*Root Mean Square*) -arvo. Jännitteen huippuarvoa käytetään ilmavälin määrittämiseen ja RMS-arvoa ryömintävälän laskemiseen.

Standardi EN 60950 määrittelee sopivat arvot sekä ryömintävälille että vapaalle välille. Sopivat arvot luetaan neljästä eri taulukosta (ks. liite 1), jotka on nimetty seuraavasti: 2H, 2J, 2K ja 2L. Taulukko 2H antaa pienimmät ilmavälien arvot millimetreissä ensiökämin sisälle ja ensiö- ja toisiökämin välille. Taulukko 2J antaa lisämäärittelyjä ilmavälille tilanteessa, jossa ensiökämin käyttöjännitteen huippuarvo ylittää vaihtojännitelähteen nimellijännitteen huippuarvon. Taulukko 2K antaa pienimmät ilmavälien arvot toisiökämeille. Taulukko 2L määrittelee taas puolestaan pienimmät ryömintävälän arvot. [10.] Näiden taulukoiden tietoja tarvitaan, kun mietitään sopivia eristysvälejä eri jännitteillä toimivien piirien välisiin kytkentöihin.

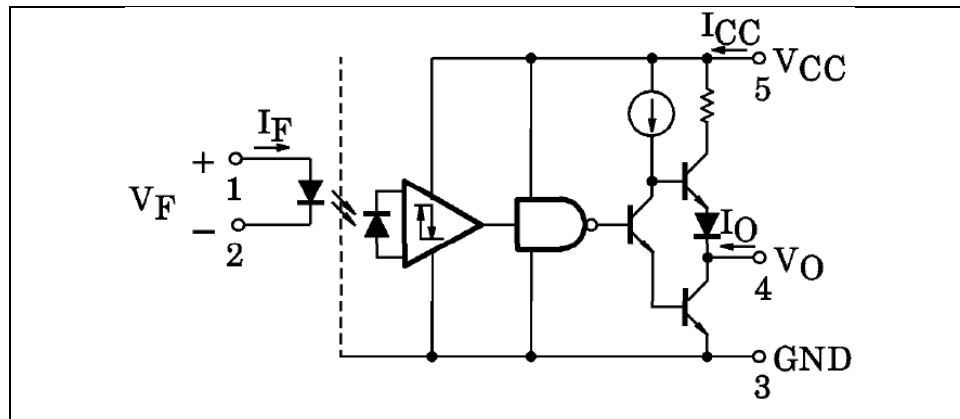
Sopivien arvojen valitsemisessa täytyy ottaa huomioon myös seuraavat tekijät: käyttöjännite, ympäristön saastuneisuusaste ja laitteiston teholähteen ylijänniteluokka. Sekä saastuneisuus- että ylijänniteluokkia on neljää erilaista, ja ne on määritelty standardissa IEC 60664. [10.]

ABB:n taajuusmuuttajat kuuluvat tyypillisesti ylijänniteluokkaan III, joka käsittää syöttöverkkoon kytketyt kiinteän asennuksen laitteet ja jossa transientit eivät nouse pääsyöttöverkon tasolle. Eristysvälien arvot ovat efektiivisiä aina 2 000 m:iin asti merenpinnan yläpuolella vallitsevassa ilmanpaineessa, ja 4 000 m:n korkeudessa merenpinnasta ilmapäliit kasvavat 1,29-kertaisiksi. UL (*Underwriters Laboratories*) -standardit tulisi myös täyttää Yhdysvaltojen markkinoita varten, jolloin noudatetaan sekä UL508C:n että UL840:n mukaisia määrittelyjä, joissa on eri käyttöjännitteille ilmapäli- ja ryömintävälivaatimukset eristämättömien osien välillä tai eristämättömien maajohdinten välillä sekä lyhin sallittu matka eristämättömästä osasta metallirunkoon.

IEC 61800-5-1 standardin määrittelemistä eristystyypeistä käytetään peruserotusta (*basic insulation*), toiminnallista erotusta (*functional insulation*) tai turvaerotusta (*reinforced insulation*) tilanteen mukaan. Järjestelmän jännite vastaa syöttöjännitteen nimellistä RMS-arvoa, ja maadoitustyyppi voi olla joko maadoitettu verkko (TN, TT) tai kelluva verkko (IT). [9.]

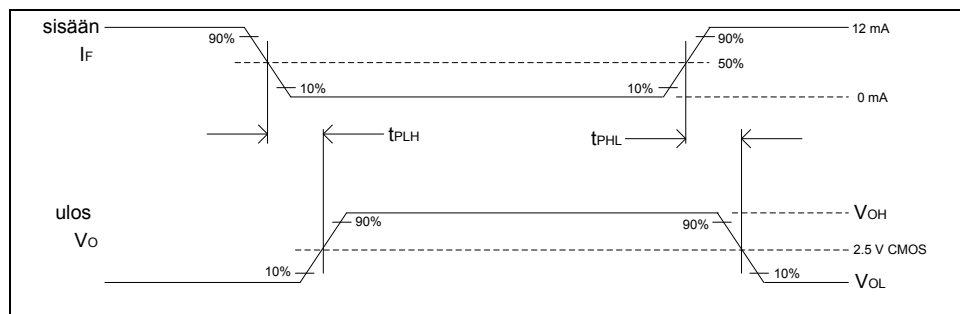
3.3.3 Optoerottimesta ja sen nopeuteen vaikuttavista tekijöistä

Optoerotin (kuva 6, ks. seur. s.) koostuu usein GaAsP-seoksesta muodostuvasta valodiodista ja korkean vahvistuskertoimen valovastaanottimesta, jotka on erotettu sähköisesti toisistaan valolla. Mukaan on integroitu usein myös signaalin muotoa parantavaa logiikkaa, joka on yleensä toteutettu Schmitt-liipaisinpiirillä. Lähtö voi olla toteutettu NPN-bipolaaritransistorilla ja olla avoin kollektori -tyyppinen, eli lähtö joko kelluu tai on yhdistetty maapotentiaaliin, kun transistorin kannalle tulee ohjaus. Lähtöä nopeutetaan myös Schottky-diodin avulla, jonka myötävirta katkeaa hyvin nopeasti, kun myötäjännite muuttuu estosuuntaiseksi ja sen estosuuntainen elpymisaika on erittäin lyhyt. Käytännössä tällainen diodi toimii nopeana kytkimenä.



Kuva 6. Kytentäkaavio Toshiba valmistamasta TLP582-optoerottimesta, jossa toisiopuolella on Schmitt-liipaisinpiiri [11, s. 1]

Etenemisviive (*propagation delay*) määritellään tulon ja lähdön muutosten puolen välin aikaerona (ks. kuva 7). Etenemisviive on määritelty lähdön nousulle ja laskulle erikseen (t_{PLH} , t_{PHL}). Portin etenemisviive saadaan näiden termien keskiarvona kaavan (5) avulla. Nousu- ja laskuaika (t_r , t_f) määritellään ajaksi, joka kuuluu signaalin muutokseen välillä 10–90 % nimellisten logiikkatasojen välillä. [12, s. 10–11.]



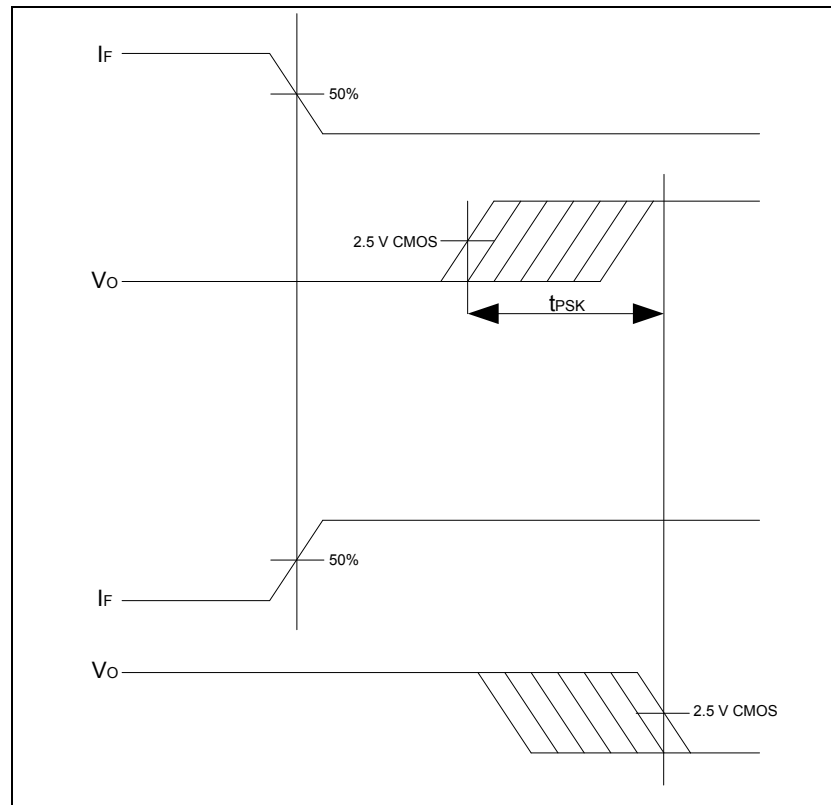
Kuva 7. Signaalin etenemisviive optoerottimen sisääntulosta ulostuloon [13, s. 10]

Pulssinleveyden säröytyminen (*Pulse Width Distortion*) kuvaa siirtojärjestelmän suurinta tiedonsiirtokykyä. Se kertoo absoluuttisen eron aikojen t_{PLH} ja t_{PHL} välillä. Se voidaan ilmaista prosenteissa jakamalla termi PWD minimipulssinleveydellä nanosekunnissa. Tämän tulisi olla vähintään luokkaa 20–30 % siedettävän tiedonsiirtotason aikaansaamiseksi.

$$t_p = \frac{1}{2}(t_{PLH} + t_{PHL}) \quad (5)$$

[13, s. 11.]

Etenemisviiveiden epäsymmetria (*propagation delay skew*) t_{PSK} on määritelty suurimman ja pienimmän etenemisviiveen erotukseksi ryhmälle optoerottimia, jotka toimivat samalla syöttöjännitteellä, ulostulon kuormalla ja samassa lämpötilassa, ja erotuslasku voi koskea joko termiä t_{PHL} tai t_{PLH} . Täten t_{PSK} määrittelee suurimman mahdollisen tiedonsiirtonopeuden rinnakkaisväylälle (ks. kuva 8), jonka johtimet on kytketty optoerotinryhmän lävitse. [13, s. 11.]



Kuva 8. Optoerotinryhmän aiheuttama etenemisviive rinnakkaisväylällä [13, s. 11]

3.4 Nykyisen pienitehoisen taajuusmuuttajan tietoliikennekatsaus

Digitaalituloja on pienitehoisessa taajuusmuuttajassa yleensä noin 5 kappaletta. Tuloliitännät käytetään tyypillisesti käynnistys- tai pysäytysviestin tuomiseen, esiasetetun nopeuden valitsemiseen, kiihdytys- tai jarrutusviestin tuomiseen ja esimerkiksi oikosulkumoottorin pyörimissuunnan valitsemiseen. Yhtä tuloista voi myös käyttää monesti taajuustulona digitaaliselle laskurille. Digitaalitulot erotetaan yleensä ohjauskortista optisella erottimella molemminpuolisten häiriöiden estämiseksi ja turvaerotusvaatimuksesta johtuen. [14, s. 7, 10.]

Digitaalilähtöjä on yleensä muutama kappale pienemmissä laitteissa. Usein niistä löytyy yksi PNP-tyyppinen transistorilähtö, joka on suunniteltu 30 V:n tasajännitteelle ja antaa ulos noin 100 mA virtaa. Tämän lisäksi taajuusmuuttajassa on lähes poikkeuksetta aina 230 V vaihtojännitettä kestävä relelähtö, joka konfiguroidaan ulkoiseen kytkentään tavallisesti auki (NO) tai tavallisesti kiinni (NC) olevana.

Analogiatuloja on useimmiten pienemmissä laitteissa 2 kappaletta, ja tyyppillinen sovel-luskohde on nopeusohje potentiometriltä. Sisääntulojännite voi olla yksipolaarista (0–10 V) tai bipolaarista (-10–10 V). Yksipolaarisen virtasignaalin tulisi olla välillä 4–20 mA ja bipolaarisen välillä -20–20 mA. Analogiatuloille luvataan tarkkuudeksi noin ± 2 %. Analogialähtöjä on pienemmissä laitteissa tyyppillisesti vain yksi kappale, josta saa ulos virtaviestin alueella 4–20 mA esimerkiksi oloarvon ilmaisemiseksi.

Käyttäjäpaneeli on tähän asti ollut tyyppillisesti yhteydessä taajuusmuuttajan ohjainkor-tille RS-232-sarjaväylän kautta. Siitä on olemassa perusmalli ja hieman kehittyneempi versio. Molemmista löytyy joko 7-segmenttityyppinen LED (*Light Emitting Diode*) - tai LCD (*Liquid Crystal Display*) -näyttö ja käyttöpainikkeet. Peruspaneelilla voi antaa oh-jauskäskyjä ja säätää taajuusmuuttajan parametreja sekä kopioida paneelin muistipiiril-le taajuusmuuttajan asetustiedot ja näin siirtää seuraavaan taajuusmuuttajaan samat asetukset. Kehittyneessä mallissa on perusmallin ominaisuuksien lisäksi monikielinen iso alfanumeerinen näyttö, käytönaikainen ohjeistus ja reaaliaikakello vikatietojen kir-jaamista varten.

Pienitehoisessa taajuusmuuttajassa on useimmiten tuki myös ulkoiselle sarjaväyläiselle kenttäväyläoptiolle, josta löytyy useita eri variaatioita teollisuuskäytöissä suosituimpia kenttäväyläprotokollia varten. Taajuusmuuttajan ja ulkoisen kenttäväyläoptioin välinen viive on määritetty olevan alle 10 ms. Kenttäväyläoptio on erotettava ainakin toiminnal-lisesti taajuusmuuttajan ohjausosasta, jotta kentältä tulevat häiriöt eivät vaikuttaisi heikentävästi sen toimintaan. [14, s. 7, 10, 12.]

3.5 Taajuusmuuttajan käyttöeduista ja sovelluskohteista

Koska taajuusmuuttajan avulla voidaan portaattomasti säätää vaihtosuuntaajan lähtöjännitteen amplitudia ja taajuutta, soveltuu se mainiosti tarkkaa pyörimisnopeuden säätöä vaativiin sovelluksiin. Sen sovelluskohteita ovat esimerkiksi ilmastoinnin puhaltimien pyörimisnopeuden ohjaus käyttöasteen ja ilmankosteuden perusteella, vesipumpun ohjaus, hissien nopeussäätö ja metallintyöstökoneiden nopeussäätö. Nykyään myös taajuusmuuttajilta vaaditaan laajaa tukea eri kenttäväylille, jotta ohjauskäskyjä voitaisiin antaa keskitetysti.

Taajuusmuuttajat voidaan käyttösovellutuksiansa puolesta jakaa kolmeen eri kategoriaan, jotka ovat erilliskäyttö, ryhmäkäyttö ja linjakäyttö. Erilliskäyttöksi luokitellaan sellainen taajuusmuuttajayhdistelmä, jossa on erillinen syöttöyksikkö ja yksi vaihtosuuntaaja, joka kykenee syöttämään yhtä tai useampaa oikosulkumoottoria kerrallaan. Ryhmäkäyttö on taas puolestaan yhdistelmä useita erilliskäyttöjä. Ryhmäkäyttö koostuu yhteisestä kontaktoriyksiköstä, verkkosuuntaajasta ja energiavarastosta. Linjakäytöt ovat yleisiä paperiteollisuudessa, jossa kullakin käyttöryhmällä on oma vaihtosuuntaajansa, mutta syöttöyksiköt ovat yhteisiä koko linjalle. Linjakäyttöä ohjataan erillisellä digitaalisella säätäjällä optisen kuidun välityksellä. [3, s. 28.]

4 Kenttäväylät

4.1 Kenttäväylän määritelmä

Kansainvälinen standardointijärjestö IEC määrittelee sekä teollisuuden kenttäväyläkonseptin että siihen liittyviä useita kenttäväyläprotokollia standardissa IEC 61158, joka kulkee nimellä *Industrial communication networks – fieldbus specifications*. Pohjimmiltaan kenttäväylä siis tarkoittaa kaksisuuntaista digitaalista sarjamoitoista monisäikeistä tiedonsiirtoväylää, jonka välityksellä siihen kytketyt teollisuuden ohjain- ja instrumenttilaitteet kuten anturit, toimilaitteet ja säätimet voivat kommunikoida keskenään. Jokainen kenttäväyläprotokolla on suunniteltu siten, että samaa fyysistä siirtomediaa käyttäen usea samalle kenttäväyläprotokollalle suunniteltu mittaus- ja hallintalaite voi toimia ja kommunikoida väylällä keskenään. [15, s. 9.]

IEC 61158:n mukaiset kenttäväyläprotokollat, joita nimitän tässä työssä kenttäväyliksi, kuvataan niin sanotun ISO/OSI (*International Organization for Standardization/Open Systems Interconnection*)-mallin avulla, joka perustuu standardiin ISO/IEC 7498. Kenttäväylästandardissa määritellyt kenttäväyläprotokollat rakentuvat toiminnallisuudeltaan sen mukaan OSI-kerroksista (ks. taulukko 2), joita on 7 yhteensä.

Taulukko 2. ISO/IEC 7498 -standardin mukainen OSI-malli

OSI-kerros	Toiminnan tarkoitus
(7) Sovelluskerros	autorisointi, dialogitavan valinta ja yhteisosapuolien tunnistus
(6) Esitystapakerros	syntaksin valinta, sekä sen ja tietorakenteen muuttaminen
(5) Istuntokerros	yhteyksien luominen ja purku, dialogin ohjaus ja kokousliitäntöjen synkronointi
(4) Kuljetuskerros	luotettavien siirtoliitäntöjen luominen
(3) Verkkokerros	verkkoliitäntöjen multipleksointi
(2) Siirtoyhteyshierros	tahdistus, järjestyksen ja virtauksen valvonta
(1) Fyysinen kerros	bittien siirto, koodaus ja tahdistus

Uusin vedos standardista IEC 61158 luokittelee kenttäväyläprotokollat 17 eri CPF (*Communication Profile Families*)-profiliin. Taulukko 3 (ks. seur. s.) havainnollistaa näitä kommunikointiperheitä. IEC 61158 jättää kuitenkin määrittämättä useita muita paljon käytössä olevia kenttäväyliä, joita ei virallisesti sellaisiksi nimitetäkään. Tällainen on esimerkiksi autoteollisuudessa paljon käytetty CAN (*Controller Area Network*)-väylä. IEC 61158 keskittyy siis vain prosessiteollisuuden tarvitsemiin kenttäväyliin.

Taulukko 3. IEC 61158:n mukaiset kommunikaatioperheet [15, s. 55-56]

CPF	Kenttäväyläprotokollan nimi
1	Foundation Fieldbus
2	CIP
3	PROFIBUS & PROFINET
4	P-NET
5	WorldFIP
6	INTERBUS
8	CC-Link
9	HART
10	Vnet/IP
11	Tcnet
12	EtherCAT
13	Ethernet Powerlink
14	EPA
15	MODBUS-RTPS
16	SERCOS
17	RAPIEnet
18	SafetyNET

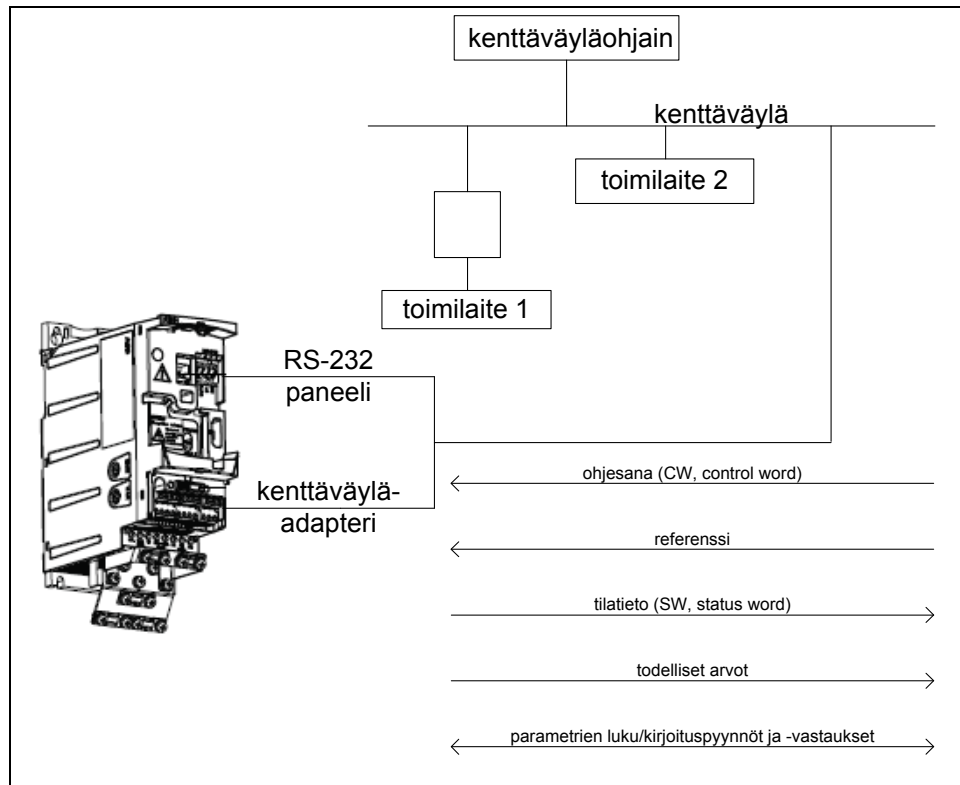
IEC 61158 määrittelee OSI-mallin pohjalta kenttäväylän referenssimallin, jota voidaan kuitenkin myös soveltaa tietyin osin kyseessä olevan standardin ulkopuolelle jääviin väyliin. Kenttäväylän toiminnalliseen kuvaamiseen riittää usein OSI-mallin kerrokset 1, 2 ja 7 (kuva 9, ks. seur. s.).



Kuva 9. OSI-mallista sovellettu kenttäväylän referenssimalli [15, s. 16]

Kenttäväylä mahdollistaa tiedonsiirron kentällä olevien laitteiden ja automaatiojärjestelmän välillä. Se ei suinkaan ole pelkkä tietoliikenneprotokolla vaan toiminnallinen kokonaisuus, joka pyrkii tarjoamaan ratkaisun erilaisten kenttälaitteiden yhdistämisessä automaatiojärjestelmäkokonaisuudeksi. Sen tärkein tavoite on mahdollistaa prosessituksen mittausta ja säätöä. Kenttäväylästandardi toimii vain ohjenuorana olemassa oleville kaupallisille tuotteille. Lopputuotteissa voidaan erottaa täyden palvelun kenttäväylät anturi- ja toimilaitetasolle tarkoitettuista yksinkertaisemmista versioista. [16, s. 3.]

Kuva 10 (ks. seur. s.) esittää ABB Oy:n valmistaman ACS355-taajuusmuuttajan liittymistä kenttäväylälle. Liittyminen voi tapahtua joko paneeliliittynnän kautta tai erillisen kenttäväyläadapterin välityksellä, joita on olemassa usealle eli kenttäväyläprotokollalle. Prosessitieto on syklistä, ja se sisältää ohjesanan, referenssiarvot, tilatiedon ja todelliset arvot. Palveluviestit ovat taas puolestaan asyklisiä ja sisältävät parametrien luku- ja kirjoituspyynnöt.



Kuva 10. ABB:n ACS355-taajuusmuuttajan liittyminen kenttäväylään [17, s. 302]

4.2 Käsiteltujen kenttäväylien fyysiset rajapinnat

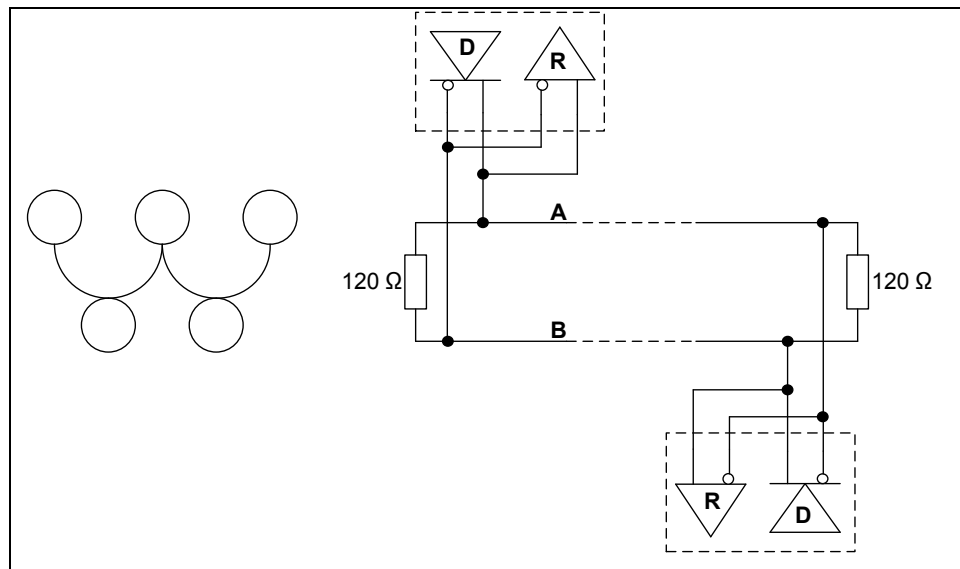
4.2.1 RS-485-väylä

RS-485-standardi määrittelee ohjainasteiden ja vastaanottimien sähköiset ominaisuudet balansoidussa monipisteverkossa. Se on differentiaalinen tiedonsiirtoväylä, jossa laitteet voidaan kytkeä toisiinsa joko peräkkäin (*daisy-chain*) tai yhteisen väylän varrelle, joka päätetään molemmista päistään 120 Ω :n vastuksilla. Laitteet liittyvät väylän varrelle mahdollisimman lyhyiden haarakaapeleiden (*stub cables*) välityksellä.

Differentiaalisessa järjestelmässä kahta johdinta pitkin kulkevat periaatteessa signaalit, jotka ovat toistensa komplementteja (peilikuvia) ja niiden summa on 0. Häiriöimmuniiteetin kannalta hyvänä puolena on tietysti se, että kohinaa summautuu samalla pois. Differentiaalisen operaatiovahvistimen ei-invertoivaan (+) tuloon tuodaan toinen johtimista ja toinen kytketään invertoivaan (-) nastaan. Toinen signaaleista tulee siis invertoida, jotta differentiaalinen tulo toimisi tarkoituksenmukaisella tavalla.

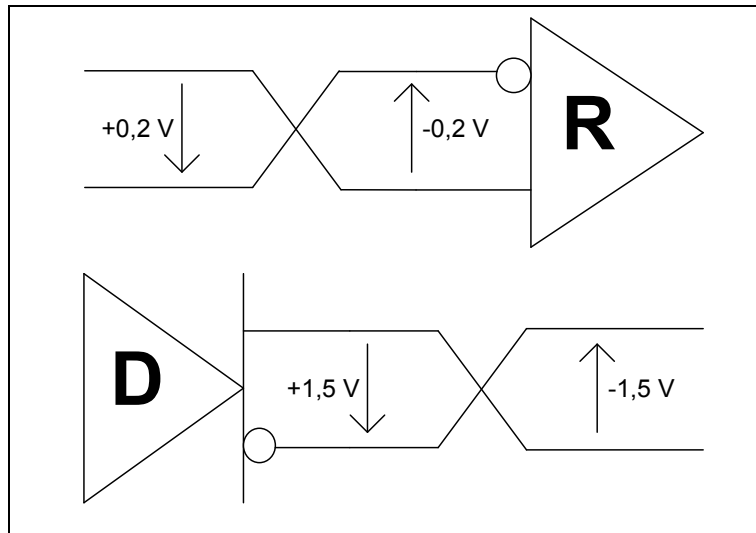
Otetaan esimerkkitilanne differentiaalisesta jännitetulosta ja nimetään toista signaalitaisoa U_1 :ksi ja toista U_2 :ksi. Signaali dekodataan summaamalla invertoitu ja ei-invertoitu tulo siten, että toinen invertoidaan ensiksi. Aktiivisessa tilassa jännite-ero nastojen välillä on U_1-U_2 ja lepotilassa jännite-ero on U_2-U_1 . Aktiivisen tilan ja lepotilan erotus antaa $(U_1-U_2)-(U_2-U_1) = 2(U_1-U_2)$. Tämän perusteella siis hyötysignaalin mukaan eksynyt jännite- tai virtakohina ei aiheuta yhtä herkästi häiriötä differentiaali-tuloisessa laitteessa kuin epäsymmetrisessä ottojärjestelmässä, jossa jännite- tai virtatuloa verrataan suoraan referenssimajaan.

Tiedonsiirto väylällä (ks. kuva 11) on vuorosuuntaista. Väylän toimintaa ohjataan kytkemällä ohjainasteita ja vastaanottimia päälle tai pois ohjaussignaalien avulla. Siirto-ongelmien välttämiseksi vain yksi ohjainaste kerrallaan saa olla aktiivisena väylällä.



Kuva 11. Laitteet voidaan RS-485-standardin mukaan kytkeä joko peräkkäin (daisy-chain, kuvassa vasemmalla) tai väylätopologiaan (bus topology, kuvassa oikealla) [18, s. 1]

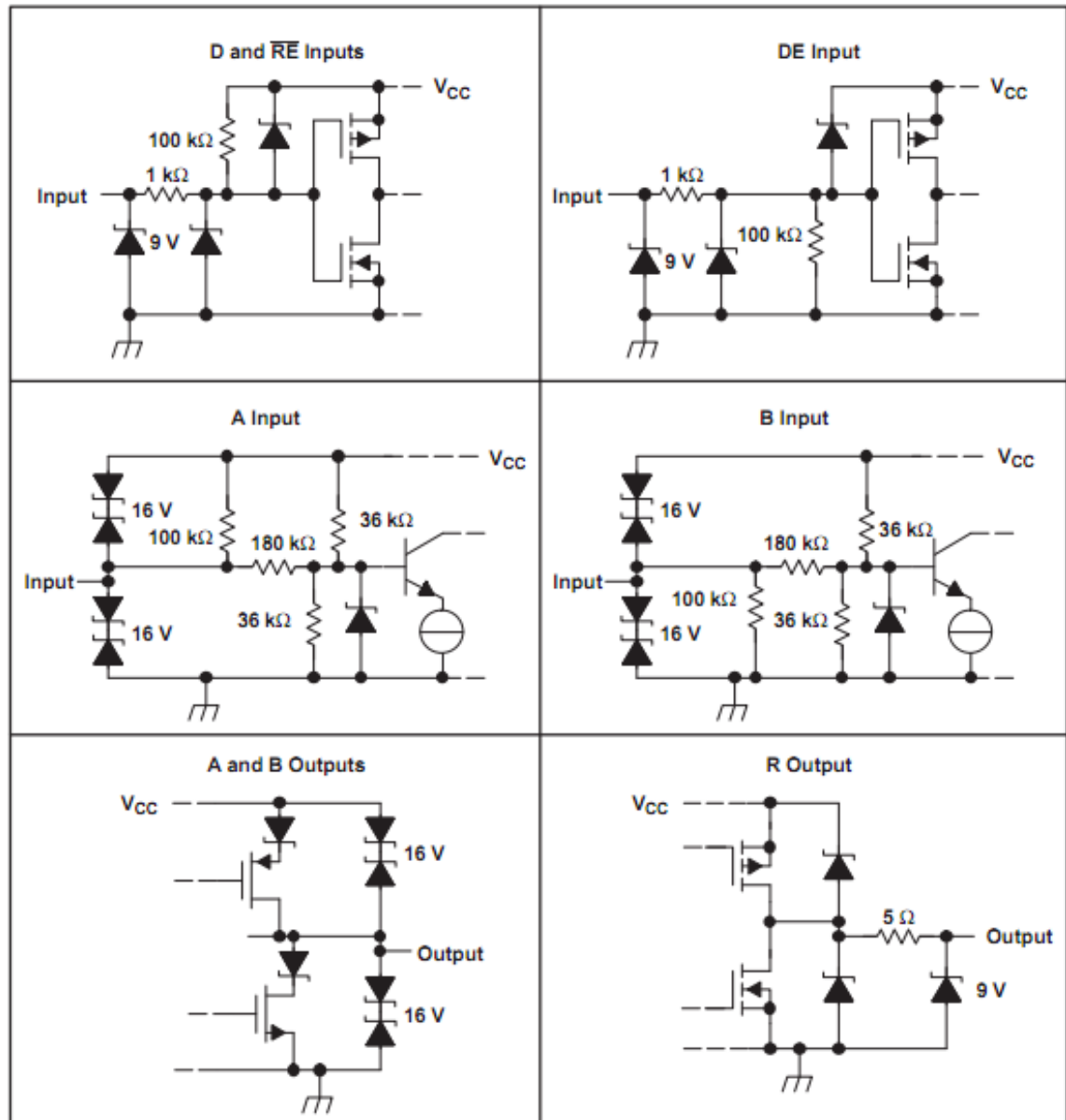
RS-485-väylän ohjainasteiden ulostulossa pitää näkyä 54Ω :n kuorman yli vähintään $1,5 \text{ V}$:n jännite-ero ulostulonastojen välillä (ks. kuva 12). RS-485-väylän vastaanottimien tulee kyetä tunnistamaan vähintään 200 mV :n jännite-ero sisääntulonastojen välillä (ks. kuva 12). Näiden arvojen noudattaminen tarjoaa riittävät edellytykset luotettavalle tiedonsiirrolle RS-485-väylän yli signaalin vaimentumisesta kaapeleissa ja liittimissä huolimatta. [18, s. 1.]



Kuva 12. RS-485-väylän vastaanottimen (R, receiver) ja ohjainasteen (D, driver) differentiaaliset jännitetasot [18, s. 1]

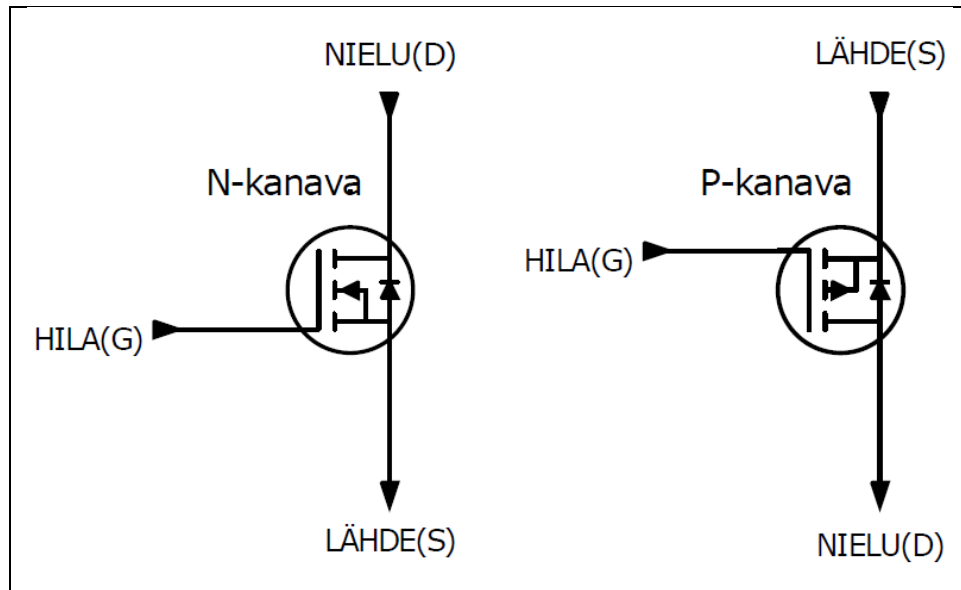
Lähetinvastaanottimen toimintaa voi kuvailla hyvin Texas Instrumentsin SN65HVD08-tyyppisen RS-485-lähetinvastaanottimen datalehden avulla (kuva 13, ks. seur. s.), jossa sen toiminnalliset osat on esitetty ekvivalentein sijaiskytkennöin. Ohjainasteen lähtöjä A ja B (kuva 13 vasen alanurkka, ks. seur. s.) ohjataan vuoron perään P- ja N-kanavan JFET:illä (*Junction gate Field-Effect Transistor*) siten, että ulostulossa näkyy joko korkeampi tai matalampi potentiaali. Tämän kuvan kumpikin ulostulo on kytketty omaan vastaanottimeen joko A tai B (kuva 13 keskiosa, ks. seur. s.).

EQUIVALENT INPUT AND OUTPUT SCHEMATIC DIAGRAMS



Kuva 13. RS-485-lähetinvastaanottimen toiminnallisten osien sijaiskytkennät [19, s. 8]

NPN-tyyppisen bipolaaritransistorin kannalle tuodaan puolet käyttöjännitteestä jännitteenjaon avulla. A- ja B-kanavien sisääntulot ovat toisistaan peilikuvat vastuskytkentöjensä puolesta. B-kanavan kuuluu siis olla invertoiva RS-485-spesifikaation mukaan (ks. kuva 11 edellä). Kanavien A ja B sisääntuloissa NPN-transistorin kannan ja 0-potentiaalin välillä oleva *flyback*-diodi auttaa transistorin kapasitanssin purkautua nopeasti. Kytkennöistä löytyvät myös jänniteleikkurit jännitepiikkien varalta. Vastaanottimen lähtö (R output) on toteutettu N- ja P-kanavan MOSFET:n (*Metal-Oxide-Semiconductor Field-Effect Transistor*) avulla, koska ne ovat nopeita kanavatransistoreja (kuva 14, ks. seur. s.).



Kuva 14. P- ja N-kanavan MOSFETin piirrosmerkki ja nastojen selitykset

Näistä ylempi eli P-kanavan MOSFET alkaa johtaa, kun sen hilalla oleva jännite V_G on vähintään kynnysjännitteen V_{th} verran pienempi lähteen jännitteeseen V_S nähden. Lisäksi nielun jännitteen pitää olla lähteen jännitettä pienempi, jotta virta pääsee kulkemaan korkeammasta potentiaalista matalampaan (lähteeltä nielulle). Alempi eli N-kanavan MOSFET alkaa johtaa, kun sen hilan jännite V_G on vähintään kynnysjännitteen V_{th} suuruinen ja lähteen jännite on pienempi kuin nielun jännite. Olkoon $V_{th} = 1,5V$, jolloin P-kanavan MOSFET johtaa, kun sen hilalla on vähintään $V_G \leq V_S - V_{th}$ ja $V_S > V_D$. Alempi eli N-kanavan MOSFET johtaa, kun $V_G \geq V_{th}$, ja $V_D > V_S$.

RS-485-väylällä käytetään tiedonsiirtoon lähes poikkeuksetta parikierrettyä kaapelia. Differentiaalinen tiedonsiirto hyötyy parikierrosta, koska ulkopuoliset häiriöt indusoituvat molempiin signaalijohtimiin samanlaisina ja näkyvät yhteismuotoisena häiriönä (*common mode noise*) vastaanottimen sisääntuloissa, jonka se osaa jättää huomiotta yhteismuotoisen jännitteensietoalueen rajoissa CMRR (*Common Mode Rejection Ratio*) -kertoimensa ansiosta. Tällöin vielä todellinen hyötysignaali pääsee läpi.

Piirilevysuunnittelussa täytyy varmistaa se, että signaalijohtimet A ja B kulkevat mahdollisimman lähellä toisiaan ja aina saman etäisyyden päässä toisistaan, jotta väylän sähköiset ominaisuudet eivät huonone. Väylällä tulisi käyttää ominaisimpedanssiltaan 120Ω :n kaapelia, koska väylä päätetään vastaavankokoisilla vastuksilla.

Häiriön kannalta vaikeissa ympäristöissä 120 Ω:n päätevastus voidaan jakaa kahteen 60 Ω:n vastukseen ja kytkeä niiden välistä noin 10 pF:n suodatinkondensaattori 0-potentiaaliin eli kytkennän maatasoon. Haarakaapelin pituus tulisi pitää mahdollisimman lyhyenä, jottei sovitus mene pilalle. Kaavasta (6) nähdään sallitun haaran maksimipituus. Laskussa hyödynnetään ohjainasteen nousuaikaa.

$$L_{stub} \leq \frac{t_r}{10} * v * c \quad (6)$$

jossa L_{stub} = haarakaapelin maksimipituus (m),

t_r = ohjainasteen nousuaika 10/90 (ns),

v = etenemiskerroin eli signaalinopeus kaapelissa c :n suhteen,

c = valonnopeus (m/s).

Moderneissa vastaanottimissa on sisäänrakennetut esijännitepiirit (*biasing circuits*) avoimen piirin (*open-circuit*), oikosulun (*short-circuit*) ja lepotilan (*idle-bus*) tunnistamisen varalta, kun vastaanottimen sisääntulo menee noltaan. Tällä tavalla vastaanotin saadaan aina asetettua tunnettuun tilaan sisääntulon vaihdeltaessa satunnaisesti. Lähe-tinvastaanottimien heikon kohinamarginaalin takia ulkoiselle esijännitepiirille on usein tarvetta. Se tehdään kytkemällä samankokoiset vastukset päätevastuksen molempiin päihin, joista toinen siis kytketään käyttöjännitteeseen ja toinen kytkennän maatasoon. Niiden arvot lasketaan kaavan (7) avulla.

$$R_B = \frac{V_{Bus-min}}{V_{AB} * \left(\frac{1}{375} + \frac{4}{Z_0}\right)} \quad (7)$$

jossa V_{AB} = vastaanottimen sisääntulon kynnysjännite
(200mV),

V_{NOISE} = suurin differentiaalisen kohinajännitteen summa,

$V_{Bus-min}$ = pienin väyläjännite (4,75–5V ±5%),

Z_0 = kaapelin ominaisimpedanssi 120 Ω.

[18, s. 2-3.]

Yhdessä väyläsegmentissä voi olla kytkettynä enintään 32 laitetta ja yhteismuotoisen jännitteen kestoalue on $-7-12$ V. Väylävastaanottimien sisääntuloresistanssi on luokkaa $12\text{ k}\Omega$. Väylän ohjainasteen aiheuttama kuorma on luokkaa $60\ \Omega$ ja ulostulon oikosulkuraja on 250 mA . Teoreettinen signaalin siirtonopeus voi olla parhaimmillaan 50 Mbit/s ja kaapelin pituus enintään $1\ 200\text{ m}$. [20, s. 1–2.]

4.2.2 CAN-väylä

CAN (*Controller Area Network*) on autoteollisuuden laajalti käyttämä väyläjärjestelmä, joka on määritelty kansainvälisessä standardissa ISO 11898 (*International Organization for Standardization*). ISO 11898:n määrittelyssä käytetään OSI-mallin siirtoyhteyskerrosta ja osaa fyysisestä kerroksesta, joka käsittää muun muassa signaalitasot sekä bittien koodaus- ja dekodaustekniikat.

CAN on viestipohjainen tiedonsiirtoprotokolla, jossa viestin sisältö määrittelee valtaosan toiminnasta, eikä yksittäisellä väylälaitteella ole osoitetta. Jokainen viesti sisältää yksilöidyn tunnusteen, joka määrittelee sen sisällön ja prioriteetin. CAN-väylällä usea laite lähettää viestejä kilpavarauksen periaatteen mukaisesti eli suurimman prioriteetin viesti lähetetään ensimmäisenä.

CAN on siis eräänlainen moni-isäntäjärjestelmä (*multi-master system*). Jos väylä on vapaa, mikä tahansa laite voi lähettää tietoa väylälle. Jos kaksi laitetta päättää lähettää väylälle tietoa samanaikaisesti, tutkitaan sanomien prioriteetti sovittelukentän avulla siten, että lähettävät laitteet tarkkailevat väylän tilanmuutoksia. Jos laite lähettää saman bitin kuin on väylällä, se saa jatkaa lähettämistä. Jos väylällä on taas puolestaan käänteinen bitti verrattuna lähetettävään bittiin, kyseinen lähetys lopetetaan ja aloitetaan alusta, kunnes väylä vapautuu. Koska nollabitti ohjaa koko väylän aktiiviseksi, suurin prioriteetti määräytyy sen lähetettävän viestin sovitteluosasta, jossa niitä on eniten.

Bittien koodaus tapahtuu CAN-väylällä NRZ (*Non Return to Zero*) -linjakoodausta käyttäen, jossa ykkösbitti esittää yhtä merkitsevää tilaa ja nollabitti toista merkitsevää tilaa. Bitit siirtyvät OSI-mallin fyysisessä kerroksessa synkronisesti, mikä parantaa lähetyskapasiteettia.

CAN-protokollan sanomarakenne on esitetty seuraavaksi (ks. taulukko 4). Niin sanottu peruskehys tukee 11 bitin pituista tunnistetta ja laajennettu kehys 29 bitin pituista tunnistetta. Vain peruskehysiä tukevat CAN-ohjaimet eivät tulkitse laajennettuja kehyksiä oikein, mutta laajennettuja kehyksiä tukevat CAN-ohjaimet tulkitsevat kylläkin peruskehysiä. Osa yksinkertaisista CAN-ohjaimista sisältää sellaisen tunnistuslogiikan, joka pitää huolen siitä, ettei laajennettuja kehyksiä oteta vastaan, jos niitä ei tueta.

Taulukko 4. CAN-väylän yleinen sanomarakenne [22, s. 10–14]

Sanomman osa	Kehyksen alkuperä (SOF, Start of Frame)	Sovittelukenttä (Arbitration Field)	Ohjauskenttä (Control Field)	Tietokenttä (Data Field)	Virheetarkistuskenttä (CRC Field)	Kuittauskenttä (ACK Field)	Kehyksen loppu (End of Frame)
Osan pituus	1 bittiä	Vaihtelee	6 bittiä	0-8 kpl 8 bitin tietokenttiä	15 bittiä CRC-tietoa ja 1 bitti CRC-lopetusmerkille	1 bitti ACK-tietoa ja 1 bitti ACK-loppu-merkille	7 bittiä
Osan selite	Tieto kehyksen aloituksesta	Koostuu tunnistuksesta (11-29 bittiä) ja etälähteyksen pyyntöbitistä	Sisältää tietokentän pituustiedon (4 bittiä) ja 2 varabittiä	Siirrettävä tieto	Sisältää toimintakoodin	Tarpeellinen määrä data-tietoa komentoina tai vastauksina	Tieto kehyksen loppumisesta

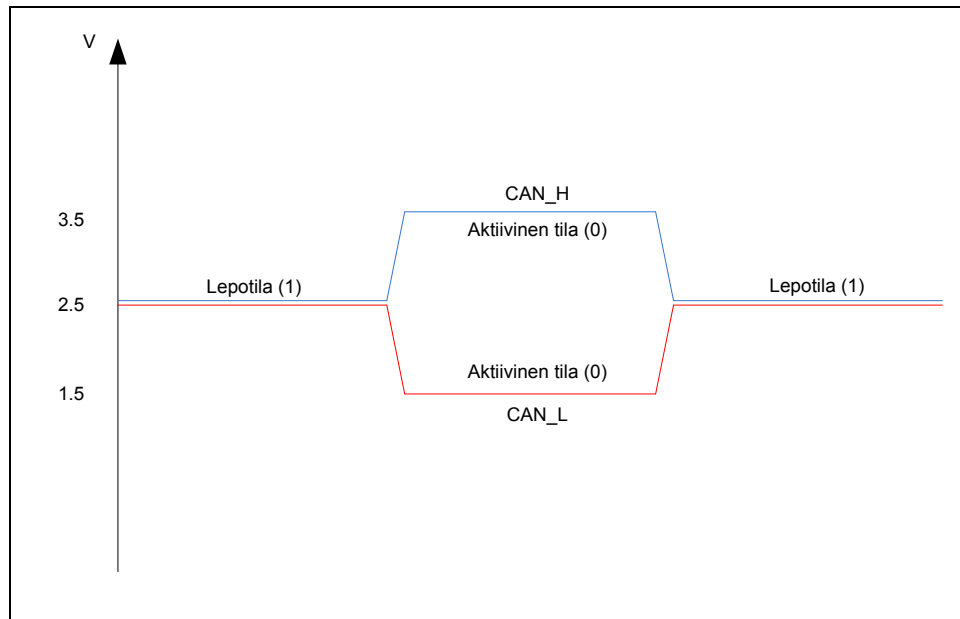
Virheetarkistuksesta on käytössä OSI-mallin siirtoyhteyserroksen tasolla periaatteessa kolme eri tekniikkaa. Tiedonsiirron virheettömyys varmistetaan 15-bittisellä CRC (*Cyclic Redundancy Check*) -algoritilla. Kehystarkistuksessa siirretyn kehyksen rakennetta verrataan ohjearvoihin siten, että siirrettyjen bittien määrää eri kehyksen kentissä verrataan CAN-protokollan mukaiseen kehysrakenteeseen. Kehystarkistuksen epäonnistuminen johtaa muotovirheeseen. Kuittausvirhe syntyy, jos vastaanottaja ei kuittaa vastaanotettua kehystä lähettäjälle.

Bittien siirtotasolla eli OSI-mallin fyysisessä kerroksessa määritellään kaksi erilaista virheenhavaitsemistekniikkaa, jotka ovat väylän tason tarkkailu ja bittitasaus (*bit stuffing*). Ensimmäiseksi mainitussa jokainen lähetävä laite tutkii väylän tasoa havaiten näin mahdolliset erot lähetetyn ja vastaanotetun bitin välillä. Bittitasaustekniikassa taas puolestaan viiden peräkkäisen bitin jälkeen lähettäjä syöttää väylälle yhden tasausbitin (*stuff bit*), joka on edellisen lähetetyn bitin komplementti. Bittitasaustekniikalla havaitaan väylän jumittuminen kumpaan tahansa tilaan.

Jos yksikin laite havaitsee yllä mainittujen tekniikoiden avulla virheen CAN-väylällä, senhetkinen lähetys lopetetaan ja lähetetään sen sijaan väylälle virhekehys. Tämä estää muita laitteita vastaanottamasta virheellistä tietoa ja varmistaa tiedon eheyden säilymisen koko väylällä. Virheenkäsittelyn jälkeen lähettäjä yrittää lähettää viestinsä uudelleen automaattisesti kilpavarausmenettelyn sääntöjen mukaisesti.

Kuva 15 (ks. seur. s.) esittää CAN-väylän signaalien CAN_H (*CAN High*) ja CAN_L (*CAN Low*) idealisoituja jännitetasoja ja niitä vastaavia loogisia tiloja 0 tai 1. CAN-väylä määrittelee differentiaalisen jännitteen, joka esittää resessiivisiä ja dominoivia tiloja. Resessiivisessä tilassa (looginen 1) CAN-vastaanottimen sisäänmenossa differentiaalinen jännite CAN_H:n ja CAN_L:n välillä on alle kynnsjännitteen eli 0,5 V. CAN-lähettimen ulostulossa taas puolestaan resessiivisessä tilassa differentiaalinen jännite CAN_H:n ja CAN_L:n välillä on alle kynnsjännitteen eli 1,5 V. Dominoivassa tilassa (looginen 0) differentiaalinen jännite CAN_H:n ja CAN_L:n välillä on yli kynnsjännitteen.

CAN-väylällä käytetään parikierrettyä kaapelia ja tiedonsiirto on differentiaalista. 120 Ω :n päätevastuksia käytetään jokaisen kaapelin päättämiseen. ISO 11898-2 määrittelee väylän tiedonsiirrolle teoreettisen maksiminopeuden 1 Mbit/s, jolloin kaapelin pituus voi olla korkeintaan 40 m. Signaalin nimellinen kulku-aika on tuolloin 5 ns/m. Laitteiden enimmäismäärä väylällä riippuu tällöin väylän sähköisestä kuormitustasosta.



Kuva 15. ISO 11898 mukaiset ideaaliset väylän jännitetasot [23, s. 3]

ISO 11898-3 määrittelee erikseen virhesietoisen CAN-väylän, jossa maksimi tiedonsiirtonopeus voi olla 125 kbit/s. Tällöin kaapelin maksimipituus riippuu tiedonsiirtonopeuden lisäksi väylän kuormituksesta. Jopa 32 laitetta voi olla kytkettynä virhesietoisessa CAN-väylässä. Maksimissaan CAN-väylän kaapeli voi olla 1 km:n pituinen. Yhteismuotoisen jännitteen sietokykyalue on aina -2 V:sta (CAN_L) +7 V:iin (CAN_H) asti. [21; 23.]

4.2.3 Ethernet-väylä

Perinteisessä Ethernetissä jokaisella laitteella on yhtäläiset oikeudet, eli jokainen niistä voi vaihtaa keskenään minä tahansa ajanhetkenä mielivaltaisen määrän tietoa. Lähetävää laitetta kuuntelee jokainen Ethernet-verkkoon kytketty laite, ja tieto kulkee pake-teissa. Jokainen verkkoon kytketty laite suodattaa saapuvista paketeista vain niille osoi-tetut ja sivuuttaa muut. Laitteet jakavat saman tiedonsiirtomedian ja yhdistyvät keske-nään niin sanotussa törmäysalueessa, jossa liikennöidään CSMA/CD (*Carrier Sense Mul-tiple Access with Collision Detection*) -periaatteen sääntöjen mukaisesti. Jos laite halu-aa lähettää tietoa, se tarkistaa aluksi, onko väylä vapaa (*carrier sense*). Jos näin on, lähetyt voidaan aloittaa. Jos kuitenkin muutkin laitteet samassa verkossa ovat aloitta-neet lähettämään, tämä huomataan ja tapahtuu törmäys (*collision detection*).

Tällöin kaikki laitteet lopettavat lähetyksen ja odottavat ennen uutta lähetysohitystä satunnaisesti generoidun odotusajan verran. CSMA/CD-periaatetta käyttäen pakettien siirtoaika riippuu siis pitkälti verkon kuormituksesta. Verkko hidastuu merkittävästi, kun törmäysten määrä kasvaa. Teollisuuden tarpeisiin käytetäänkin usein kytkentäteknikoita, jotka hyödyntävät segmentointia eli erillisistä törmäysalueista koostuvaa divisioona, mikä tiputtaa kuormitusta. Suuremman kaistanleveyden tarjoavat *Fast Ethernet* ja *Gigabit Ethernet* hyödyntävät segmentointia.

NIC:n (*Network Interface Card*) sisältämä laite voidaan mieltää yhdeksi verkon päätepisteeksi. Verkkoon liitettäviä komponentteja kuten esimerkiksi solmupisteitä (*hub*), kytkimiä ja reitittäjiä tarvitaan siirtämään tietoa näiden päätepisteiden välillä. Kierrettyjä kuparijohtimia, joissa tieto voi kulkea maksimissaan 100 Mbit/s tiedonsiirtonopeudella, käytetään teollisuudessa hyvin pitkälti verkkokomponenttien ja laitteiden kytkemiseen toisiinsa. Nykyään erillisen lähetyksen- ja vastaanottolinjan ansiosta laitteet pystyvät kommunikoimaan keskenään ilman törmäyksiä. Tätä kutsutaan myös kaksisuuntaiseksi Ethernetiksi. Kaksisuuntainen Ethernet perustuu tähtitopologiaan (*star topology*), jossa on useita suoria yhteyksiä aina kahden verkkolaitteen välillä. Laitteet löytävät toisensa tällaisessa järjestelmässä kytkimen avulla, joka ohjaa eri verkon päätepisteet toistensa luo kaksipisteyhteyden (*point-to-point*) mahdollistamiseksi.

Ethernet on siis niin sanottu pakettikytkentäinen verkko. Käytännössä tämä tarkoittaa sitä, että siirrettävä tieto pilkotaan pienemmiksi yksiköiksi, joita nimitetään joko paketeiksi tai kehyksiksi. Jokainen näistä paketeista sisältää esimerkiksi vastaanottajan ja lähettäjän osoitteet, siirrettävän tiedon ja virheentarkistusosan. Paketti lähetetään siis yksikkönä, joka voi olla kooltaan 64–1526 tavua. Ethernet-kehyksiä on määritelty kahdessa eri standardissa. Alkuperäinen määritelmä on DIX-ryhmän käsialaa ja tunnetaan myös nimillä Ethernet II ja *BlueBook*. Paljon yleisempi määritelmä tästä kehyksestä on kuitenkin IEEE 802.3 (*Institute of Electrical and Electronics Engineers*)-standardin mukainen (taulukko 5, ks. seur. s.).

Taulukko 5. IEEE 802.3 mukaisen *Ethernet*-paketin rakenne [24, s. 24]

Kehyksen osa	Johdanto (Preamble)	Aloituserkki (SD, Start Delimiter)	Vastaanottajan osoite (Destination Address)	Lähettäjän osoite (Source address)	Pituustieto (Length)	Tietolohko (Data block)	Virheetarkistussumma (Checksum)
Osan pituus	7 tavua	1 tavu	6 tavua	6 tavua	2 tavua	46-1500 tavua	4 tavua
Osan selite	Laitteiden synkronointia varten (101010...101010)	Synkronoinnin lopetus ja kehyksen alkuosan ilmaiseminen (10101011)	Vastaanottajan tunnistaminen MAC-osoitteen perusteella	Vastaanottajan vastaanottaman tiedon alkuperän tunnistaminen MAC-osoitteen perusteella	2 tavun pituinen tietolohko	Sisältää ylemmän kerroksen siirtämän tiedon ja tunnisteiden (DSAP, SSAP, Info, Data)	4 tavun virheetarkistussumma, joka lasketaan kehykselle ja varmistetaan siirron eheys

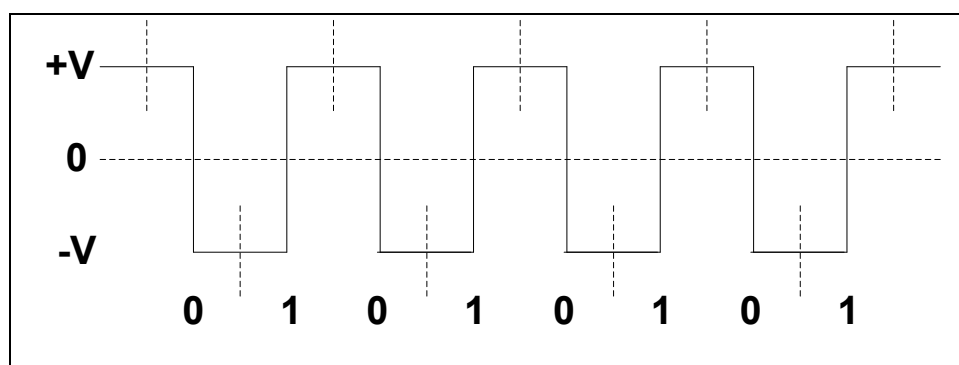
Ethernet-kehys alkaa tahdistusosalla, jonka perusteella laitteet huomaavat tulevan kehyksen. Aloitusmerkki lopettaa tahdistuksen ja kertoo vastaanottavalle laitteelle, että itse kehys alkaa. Vastaanottaja ja lähettäjä tunnistetaan 48-bittisen MAC (*Media Access Control*) -osoitteen perusteella, joka on jokaiselle laitteelle yksilöllinen ja jossa kolme ensimmäistä tavua kertovat laitteen valmistajan, ja loput ovat valmistajan päätettävissä. Valmistajat ovat sopineet maailmanlaajuisesti keskenään, että jokaisen laitteen MAC-osoite on yksilöity ja lukittu. Tietolohko sisältää ylempien kerrosten siirtämän tiedon ja tunnisteiden ja on jaettu lähde- (DSAP) ja kohdeosoitteeseen (SSAP), hallintalohkoon (*intro*) ja käyttäjän määrittelemään muuttuvapituiseen tieto-osaan (*data*). IEEE 802.3 -kehyksessä tiedon eheys tarkistetaan laskemalla neljän tavun suuruinen tarkistussumma, joten ylempien kerrosten ei siitä tarvitse huolehtia.

Moderni Ethernet-verkko tukee automaattikättelyä (*autonegotiation*), jossa vastapuolen yhteysasetukset tunnistetaan automaattisesti. Laitteet saavat toistensa parametriarvot ja voivat säätää omiaan siten, että tiedonvaihto olisi mahdollisimman mutkatonta. Automaattikättely parantaa siis Ethernet-verkon yhteentoimivuutta.

Toinen moderni ominaisuus verkkoon kytketyille laitteille on tiedonsiirtonopeuden automaattinen tunnistus (*autosensing*) ja asettuminen siihen, jos mahdollista. Kolmas ominaisuus on keskenään ristiin kytkettyjen laitteiden ja suoraan tietokoneen ja verkkolaitteen välille kytkettyjen laitteiden automaattinen tunnistus (*MDI/MDI-X Autocrossover*).

Ethernetiä on saatavilla ainakin 10 Mbit/s, 100 Mbit/s ja 1 000 Mbit/s tiedonsiirtonopeuksille, mutta seuraavaksi käydään läpi vain kahden ensimmäisenä luetellun tapauksen tiedonsiirtotavat, koska ne koskevat taajuusmuuttajatuotteita. Niitä kutsutaan myös 10Base-T ja 100Base-TX Etherneteiksi, joissa T viittaa parikierrettyyn kaapeliin. 10BaseT *Ethernet* käyttää tiedon esitysmuotona Manchester-koodausta ja 100BaseTX *Ethernet* käyttää 4B/5B-koodausta.

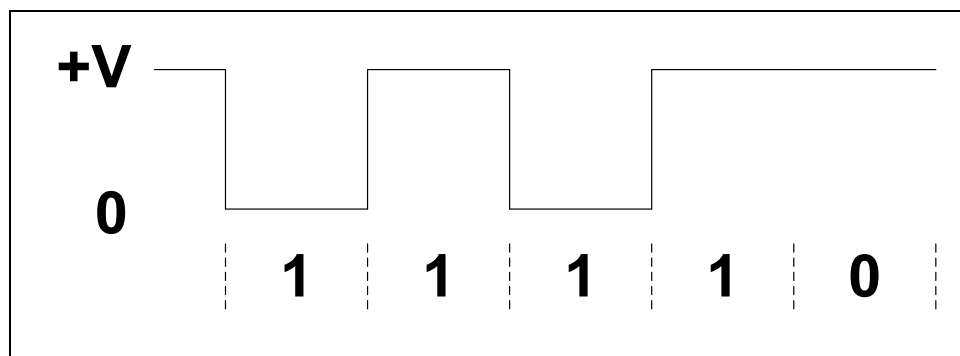
Tarkemmin ottaen 10BaseT *Ethernet* käyttää IEEE 802.3 -standardin mukaisesti MPE (*Manchester Phase Encoding*) -koodausta bittien esittämiseen (ks. kuva 16). Linjakoodatun signaalin ykkösbittiä vastaa pääkellopulssin (*master clock*) nouseva reuna, joka vastaa vaihekoodatun signaalin muutosta nollassa ykköseksi eli muutosta invertoidusta (-V) jännitetasosta ei-invertoituun (+V). Linjakoodatun signaalin nollabittiä vastaa pääkellopulssin (*master clock*) laskeva reuna, joka vastaa vaihekoodatun signaalin muutosta ykkösestä nollassa eli muutosta ei-invertoidusta (+V) jännitetasosta invertoituun (-V). Nollabittiä vastaa jännitetaso -850 mV, ykkösbittiä 850 mV ja niiden välistä lepotilaa 0 V. Manchester-koodauksen pääkellopulssin nopeus (Mbit/s) on suoraan verrannollinen 10BaseT *Ethernetin* tiedonsiirtonopeuteen (MHz).



Kuva 16. Manchester-vaihekoodauksen periaate [25, s. 4]

100Base-TX Ethernetin myötä bittien koodaustapa muuttui Manchester-koodauksesta NRZI (*Non Return to Zero Inverted*) -koodaukseksi (ks. kuva 17). NRZI:ssä loogista ykköstä esittää signaalin polariteetin vaihtuminen peräkkäin.

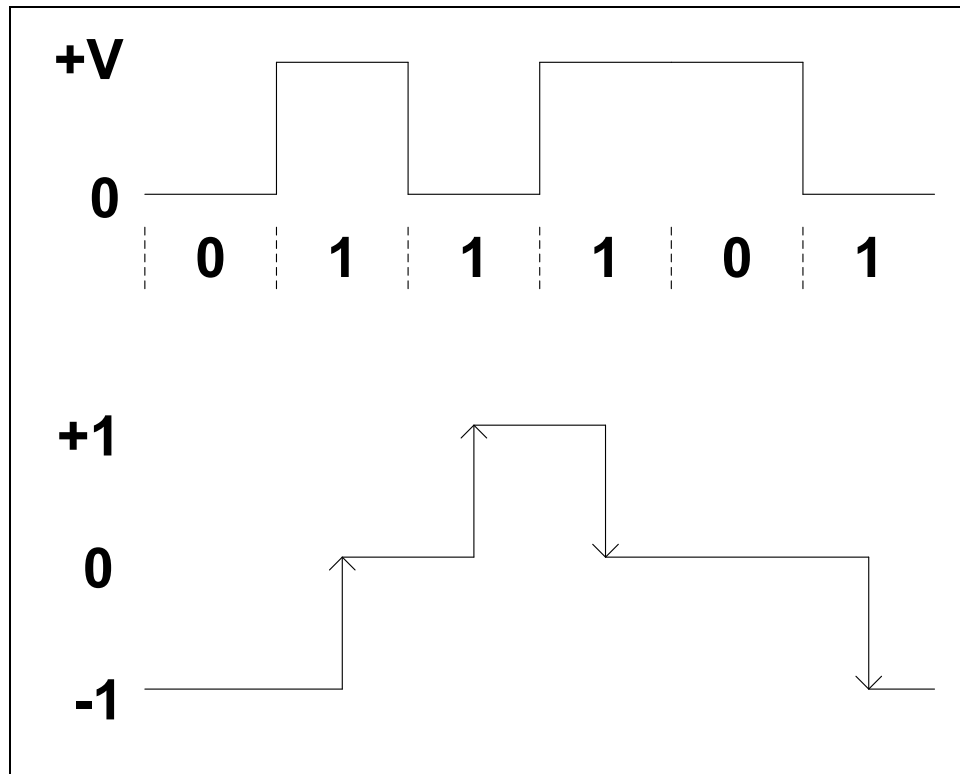
Loogista nollaa vastaa tilanne, jossa signaalin polariteetti ei muutu, vaan se pysyy samana. Jännitetasolla kuvattuna ykkösbittiiä vastaa joko 0 voltia tai +V voltia riippuen edellisestä jännitetasosta. Jos edellinen jännite oli 0 voltia, niin seuraavan täytyy olla +V voltia ykkösbitin esittämiseksi. Logiikka toimii myös toiste päin eli +V voltia ensiksi ja sitten 0 voltia. Nollabitin esittämiseksi jännitetaso ei tule muuttua edellisestä.



Kuva 17. NRZI-koodauksen periaate [25, s. 4-5]

NRZI-koodaus aiheuttaa vähemmän nousevia ja laskevia reunoja signaalissa kuin Manchester-koodaus, mikä on hyvä asia, kun signaalinopeudet kymmenkertaistuvat. Ongelmaksi muodostuu vastaanottopään kellon synkronointi, koska nollatilaa ei merkata signaalin polariteetin muutoksilla. Korjauksena tähän on niin kutsuttu 4B/5B-koodaus, jossa jokainen 4-bittinen yhdistelmä muutetaan 5-bittiseksi sanaksi ja joka tapahtuu ennen NRZI-koodausta. Tämä nostaa erilaisten bittiyhdistelmien määrän 16:sta 32:een. Sellaisia bittiyhdistelmiä, joissa esiintyy alle kaksi ykköstä, ei käytetä ollenkaan. Tämä menettely takaa vähintään kaksi muutosreunaa signaaliin yhden 5-bittisen sanan aikana, jolloin vastaanottopään kello pysyy vielä synkronoituna. 4B/5B-koodauksen jälkeen väylän kellotaajuus muuttuu 125 MHz:iin. Tuloksen muuntaminen NRZI-koodaukseen sopivaksi tiputtaa väylän kellotaajuuden 62,5 MHz:iin.

100Base-TX Ethernetissä tieto siirtyy linjaa pitkin *Multilevel Threshold-3* -mekanismia hyväksi käyttäen. NRZI-signaalista erotellaan kolme tasoa: +1, 0 ja -1. Toisin sanoen MLT3-koodauksessa siirrytään aina seuraavalle tasolle, jos halutaan siirtää ykkösbitti ja jäädään samalle tasolle, jos siirretään nollabitti. MLT3:n etuna on se, että NRZI-signaalin kellotaajuus saadaan vielä puolitettua 31,25 MHz:iin ennen siirtolinjalle siirtämistä (kuva 18, ks. seur. s.).



Kuva 18. NRZI- ja MLT3-koodaukset yhdistettynä alhaalla ja pelkkä NRZI-koodaus yllä [25, s. 7]

MLT3-linjakoodaus on vaihtoehdon paras linjalle, koska se käyttää vähiten kaistaa kaikista esitetyistä koodaustavoista ja siirtää saman verran bittejä samassa ajassa. Signaali sekoitetaan (*scrambling*) ennen lähettämistä ja puretaan (*descrambling*) sekoitus vastaanottopäässä, jotta linja ei säteilisi sähkömagneettista säteilyä liikaa ympäristöön.

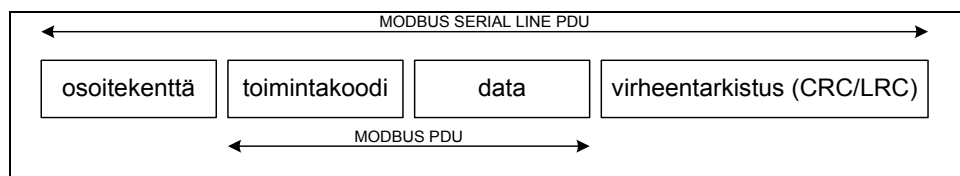
10BaseT- ja 100BaseTX-Ethernet:n kanssa käytetään fyysisenä tiedonsiirtolinkkinä joko STP (*Shielded Twisted Pair*) -kaapelia tai UTP (*Unshielded Twisted Pair*) -kaapelia asennuskohteen mukaan. Kaapeleiden ominaisimpedanssit ovat 100 Ω :n luokkaa. Kaapeli voi olla enintään 100 m pitkä. 10BaseT-luokan Ethernet käyttää kategorian 3 (CAT3) kaapelointia ja 100BaseTX-luokan Ethernet taas puolestaan kategorian 5 (CAT5) kaapelointia. 100 Base-TX:ssä yhtä johdinparia käytetään tiedonsiirtoon ja toista paria törmäyksen havaitsemiseen (*collision detection*). [24, s. 23–26; 25, s. 3, 5–7; 26.]

4.3 Käsiteltyjen kenttäväylien protokollat

4.3.1 Modbus RTU/ASCII -protokolla

Modbus-standardi määrittelee erityisen protokollan sarjaväylään, jossa isäntälaitte voi kommunikoida yhden tai useamman orjalaitteen kanssa. Sarjaväylään tarkoitettu Modbus-protokolla toimii seurantaperiaatteella (*master-slave*) ja määrittellään OSI-mallin siirtoyhteyserroksen avulla. Fyysisen kerroksen toteuttaa tyypillisesti RS-485-standardiin pohjautuva 2-johdinjärjestelmä. [27, s. 4–5.]

Modbus-standardiin kuuluu oleellisena osana niin sanottu sovelluspohjainen viestiprotokolla, joka määrittelee kommunikoinnin lähtökohdat yksinkertaisen PDU:n (*Protocol Data Unit*) avulla, joka on riippumaton siihen liittyvistä muista kommunikointikerroksista. PDU:n ympärille määritellään lisäehtoja, jotta Modbus-protokolla saadaan sovitettua tiettyyn väylään tai verkkoon. Sarjaväyläversiossa PDU:n (ks. kuva 19) ympärille tulee osoitekenttä ja virheentarkistus kenttä, ja tämä kokonaisuus kuvaa referenssimallia Modbus-kehyselle sarjaväylässä.



Kuva 19. MODBUS-kehys sarjaväylässä [28, s. 8]

Seurantaperiaate tarkoittaa sitä, että väylään kiinnitetty isäntä, joita on siis yksi/väylä, voi johtaa keskusteluja lähettämällä orjille viestejä. Orjat voivat saada yksilöidyn osoitteen väliltä 1–247, eli niitä voi enintään olla 247 kappaletta yhdellä väylällä. Orjalaitteet eivät kommunikoi keskenään ja lähettävät dataa vain isännän luvalla. Vain yksi transaktio kerrallaan on sallittua sarjaliikenteisessä Modbus-väylässä. Isäntä voi osoittaa kyselyjä joko yhdelle vastaanottajalle tai kaikille vastaanottajille yleislähetystenä (*broadcast*), jolloin osoite on 0.

Sarjaliikennepohjaisessa Modbus-verkossa viestikehys muodostuu siis osoitekentästä, toimintakoodista, 8 bitin tavuista koostuvasta datakentästä ja virheentarkistus kentästä. Osoitekenttä sisältää vain orjalaitteen osoitteen. Sarjaliikenteinen Modbus-transaktio muodostuu aina kyselystä ja vastauksesta.

Isäntä osoittaa kyselyn tietylle orjalle asettamalla sen osoitteen osoitekenttään, tai kaikille orjille asettamalla osoitteen arvoksi 0 (yleislähetys). Toimintakoodi kertoo, millainen toiminto orjan tulee suorittaa, ja sitä seuraa useimmiten datakenttä, joka sisältää lisätietoa isännän antamasta tehtävästä. Tehtävä voi esimerkiksi olla parametriarvojen lukeminen laitteen muistista. Orjan vastausviestissä osoitekentässä on sen oma osoite, jotta isäntä tietää, keneltä viesti tulee. Normaalitytilanteessa vastauksessa näkyy sama toimintakoodi kuin isännän kyselyssä vahvistuksena suoritettusta tehtävästä, ja vastauksen data sisältää yleensä palautusarvoja. Sekä isäntä että orja laskevat viestin virheentarkistus kentän erikseen. Jos tapahtuu virhe, vastauksen toimintakoodilla muutetaan viesti virheviestiksi ja datakenttään sisällytetään virhekoodin tarkemmat tiedot. [28, s. 7–8; 29, s. 2–5.]

Sarjaliikenteisessä Modbus-verkossa laitteiden välillä tietoa voidaan siirtää periaatteessa kahdella eri tavalla: ASCII:na (*American Standard Code for Information Interchange*) ja RTU:na (*Remote Terminal Unit*). Nämä kaksi tilaa määräävät tiedon esitysmuodon, sekä pakkaus- ja dekoodaustavan. Jokaisen laitteen pitää käyttää samassa Modbus-verkossa samaa tiedonsiirtomuotoa, siirtonopeutta ja pariteettiasetuksia. [27, s. 12, 16.]

Modbus RTU:ssa tieto lähetetään kahdeksan bitin binäärikoodina ja etuna ASCII-tilaan verrattuna on se, että tieto pakkautuu tehokkaammin samalla lähetyksnopeudella. Jokainen RTU-tavu muodostuu yhteensä 11 bitistä eli aloitusbitistä, kahdeksasta tietobitistä, yhdestä pariteettibitistä ja lopetusbitistä. Modbus ASCII:ssa tieto siirtyy taas puolestaan heksadesimaalisten merkkien avulla (0–9, A–F). Jokainen ASCII-tavu muodostuu yhteensä 10 bitistä eli aloitusbitistä, seitsemästä tietobitistä, yhdestä pariteettibitistä ja lopetusbitistä. Protokollamanuaalissa painotetaan pariteettibitin käyttöä ja sitä, että pariteetin tulisi olla ensisijaisesti parillinen, mutta yhteensopivuuden takaamiseksi olisi oltava tuki tiedonsiirrolle myös ilman pariteettitarkistusta.

Taulukko 6. Modbus RTU:n ja ASCII:n sanoman sisältö [27, s. 13, 17]

Tila	Aloitus	Osoite	Toimintakoodi	Data	Virheetarkistus	Lopetus
RTU	3.5 merkin mittainen lepotilassa	8 bittiä	8 bittiä	n*8 bittiä	16-bittinen CRC	3.5 merkin mittainen lepotilassa
ASCII	1 merkki (:)	2 merkkiä	2 merkkiä	n merkkiä	2 merkin pituinen LRC-tarkistus	2 merkkiä (CR, LF)

Taulukko 6 esittää RTU- ja ASCII-viestikehyksen sisällön ja lähetyksjärjestyksen. RTU-tilassa jokaista viestikehystä edeltää 3,5 merkin mittainen lepoaika. ASCII-tilassa viestikehys on aloitettava ":"-merkillä ja lopetettava rivinvaihdolla (*Carriage Return Line Feed*). Myös tavut siirtyvät ASCII- ja RTU-tilassa hieman eri tavalla. Molemmissa tapauksissa vähiten merkitsevä bitti (*Least Significant Bit*) lähetetään ensin ja eniten merkitsevä (*Most Significant Bit*) lopuksi. RTU-tilassa on kuitenkin aloitusbitin jälkeen kahdeksan tietobittiä, kun ASCII-tilassa niitä on vain seitsemän.

Jos pariteettitarkistus on käytössä, molempien tapauksessa viimeisen tietobitin jälkeen on pariteettibitti ja lopetusbitti peräkkäin. Jos pariteettitarkistus ei ole käytössä, molempien tapauksessa viimeisen tietobitin jälkeen on kaksi lopetusbittiä peräkkäin. RTU-tilassa käytetään 16-bittistä CRC-virheentarkistusta ja ASCII-tilassa 2 merkin pituista LRC (*Longitudial Redundancy Check*) -tarkistusta virheiden havaitsemiseen. [27, s. 12–13, 16–17.]

4.3.2 Modbus/TCP-protokolla

Modbus/TCP perustuu TCP/IP-protokollaan (*Transmission Control Protocol/Internet Protocol*) ja siirtää Modbus PDU:n eli toimintakoodin ja tieto-osan TCP-protokollan avulla, joka huolehtii OSI-mallin neljännessä kerroksesta [2 s. 7]. IP-protokolla kuuluu verkkokerrokseen OSI-mallissa ja huolehtii päätelaitteiden osoitteistamisesta ja pakettien reitittämisestä verkossa. TCP-protokolla toimii IP-protokollan päällä.

TCP/IP on Ethernet-verkon päällä toimiva protokollakokonaisuus, joka jakautuu kahteen osaan: TCP ja IP. TCP ohjaa tiedonsiirtoa ja IP tarvitaan kertomaan tietokoneen osoite yksiselitteisesti verkossa. Jokainen verkossa oleva laite saa IP-osoitteen, jolla se tunnistetaan siellä yksiselitteisesti ja jonka kautta siihen voidaan olla yhteydessä. IP:n tämänhetkinen versio IPv4 mahdollistaa tietopakettien osoitteistuksen ja reitityksen lähettäjältä vastaanottajalle useiden eri verkkojen yli. Tiedonsiirtoreitti on siis merkityksellinen IP:lle ja se voi Ethernetin ohella olla myös valtuudenvälitysverkko (*token ring*).

IP:n tietopaketteja kutsutaan tietosähkeiksi (*datagram*). Tiedonsiirto on varmistamaton ja näin ollen epäluotettavaa pelkän IP:n yli. IP-tietosähke koostuu ylätunnisteesta, jota seuraa tietolohko, joka voidaan taas puolestaan paketoita esimerkiksi IEEE 802.3 -mukaiseen Ethernet-kehykseen. Ylätunniste sisältää tiedon koko tietosähkeen koosta ja voi olla suuruudeltaan 576–65535 tavua. Ylätunnisteeseen kuuluu lisäksi oleellisena osana lähettäjän ja vastaanottajan yksilöidyt IP-osoitteet. Ylätunnistetta seuraa vaihtuvanpituinen tietolohko, jossa itse siirrettävä informaatio sijaitsee. [24, s. 26–27.]

TCP on määritelty RFC 793 (*Request for Comments*) -spesifikaatiossa vuonna 1981 ja on yhteyspainotteinen tiedonsiirtoprotokolla. Tämä tarkoittaa sitä, että tiedon vastaanottaja kiittää sen lähettäjälle vastaanottamansa tiedon. Tietokoneen muodostaessa yhteyttä TCP varaa siltä yhden portin tätä tarkoitusta varten. Tietyt hyvin tunnetut palvelut kuten esimerkiksi HTTP (80), SMTP (25) ja FTP (20/21) varaavat aina saman portin jonkin IP-osoitteen taakse. Käyttäjä ottaa siis yhteyden näissä porteissa oleviin palveluihin TCP:n määräämän portin kautta. TCP-paketti muodostuu 20 tavun mittaisesta ylätunnisteesta, joka perustuu täysin IP:n ylätunnisteeseen sekä tieto-osasta.

Jokainen TCP-paketti sisältää siis lähettäjän ja vastaanottajan portin, virheentarkistussumman, kiittauskentän, parametriarvoja, järjestysnumeron ja siirrettävän tietolohkon. TCP sisältää myös hyvän ruuhkanhallintamekanismin, mikä on tärkeää yhteysmäärien kasvaessa. [24, s. 30–31.]

Kaikki Modbus/TCP-pyyntöjä lähetetään TCP:n yli varatun portin 502 läpi ja pyynnöt noudattavat vuorosuuntaista kommunikointia, jossa voi olla vain yksi lähettäjä kerrallaan, mutta lähettäjä voi vaihtua. Orjalaitteen osoitekenttä korvataan yhden tavun mittaisella yksikkötunnisteella, jota voidaan käyttää kommunikoitaessa siltojen ja yhdyskäytävien läpi.

Yhdyskäytävät mahdollistavat useamman päätepisteen yhden IP-osoitteen kautta. Modbus/TCP-kehiksen rakenteesta (taulukko 7, ks. seur. s.) voidaan huomata, ettei virheenkorojaukselle ole tarvetta erikseen, sillä TCP/IP-protokollan alempiin kerroksiin kuuluu myös tarkka CRC-32-virheentarkistusalgoritmi.

Taulukko 7. Modbus TCP/IP:n sanoman sisältö [30, s. 8]

Modbus TCP/IP	Tapahtuman tunnistus	Protokollan tunnistus	Pituustietue	Yksikkötunnus	Toimintakoodi	Datatietue
Pituus	2 tavua	2 tavua	2 tavua	1 tavu	1 tavu	n tavua
Selite	toimeksiantajan ja palvelimen välisten viestien synkronointi	MODBUS/TCP saa arvon 0	kehyksessä jäljellä olevien tavujen määrä	orjan osoite	sisältää toimintakoodin	tarpeellinen määrä datatietoa kommentoina tai vastuksina

Pituustietuetta tarvitaan kertomaan vastaanottajalle, missä viestin rajat menevät, vaikka viesti olisi pilkottu useampaan pakettiin. TCP/IP-protokollan tarjoaman virheentarkistusalgoritmin ansiosta pituustietue takaa äärimmäisen korkean todennäköisyyden tunnistaa siirtovirheet. Modbus/TCP:ssä yhteys voidaan tunnistaa helposti protokollatasolla ja yhden yhteyden aikana voi olla useita toisistaan riippumattomia tapahtumia.

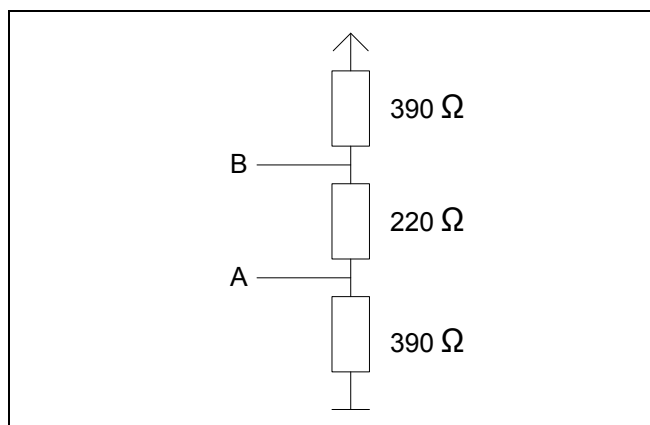
TCP-protokolla sallii myös useamman yhtäaikaisen yhteyden, joten lähettäjällä on valittavissaan monipuolisesti eri siirtoreittejä. TCP-protokollan suosio perustuu siihen, että pystytään pitämään kirjaa yksittäisistä tapahtumista liittämällä ne yhteyden sisään, joka voidaan helposti tunnistaa ja sulkea, ja jota voidaan myös valvoa vaivattomasti. [30, s. 4–5, 8.]

4.3.3 Profibus DP -protokolla

Profibus (*Process Field Bus*) on alun perin vuonna 1987 Saksassa Profibus Cooperative Project -työryhmän alulle panema teollisuuden kenttäväylästandardi, ja se on siellä määritelty standardissa DIN E 19 245. Vuonna 1996 tästä kansallisesta standardista tehtiin kansainvälinen EN 50170 standardi. Nykyään Profibus on määritelty IEC 61158 -kenttäväylästandardissa.

Profibus-protokolla perustuu OSI-malliin muiden kenttäväylien tapaan. Kaikki Profibus-variaatiot määrittelevät toimintansa OSI-mallin kahden alemman kerroksen eli fyysisen ja siirtoyhteyskerroksen sekä tarvittaessa ylimmän eli sovelluskerroksen avulla. Eräitä Profibusin variaatioita ovat Profibus DP (*Decentralized Processing*), Profibus FMS (*Fieldbus Message Specification*) ja Profibus PA (*Process Automation*).

Useimmiten tieto liikkuu Profibus-laitteiden välillä RS-485-standardin mukaisen differentiaalisignaalin lailla kierrettyä parikaapelia pitkin. Liittimeksi suositellaan D-SUB9 urosta. Maksimi tiedonsiirtonopeus on 12 000 kbit/s, jolloin väyläkaapelin pituus voi olla enintään 100 metriä. Pisimmillään kaapeli voi olla 1 km:n pituinen, mutta tällöin on tyydyttävä 9,6–187,5 kbit/s nopeuksiin. Väylä on päätettävä spesifikaatioiden mukaiseen vastuskytkentään (ks. kuva 20), joka löytyy useimmiten valmiina jo hyväksytyistä Profibus-liittimistä ja voidaan aktivoida kytkimen avulla. Ylös- ja alasvetovastukset pitävät laitteiden impedanssitason väylällä oikeana myös lepotilassa.



Kuva 20. Profibus-kaapelin päättäminen [31, s. 16]

Väyläliittimiin syötetään ylösvetovastuksen kautta positiivinen käyttöjännite (useimmiten +5 V DC) nastan 6 kautta. Suuremmilla siirtonopeuksilla (yli 1 500 kbit/s) kaapeli-liittimessä tulisi olla integroituna 110 nH:n induktanssit signaalijohtimien molemmiin puolin heijastusten välttämiseksi ja linjalle kytkettyjen laitteiden kapasitiivisen kuorman takia. Kaapeleita on useampaa eri tyyppiä, mutta vain kaapelityyppi A on sallittu suuremmille nopeuksille. Kaapelille A on määritelty impedanssiksi 135–165 Ω , kapasitanssiksi alle 30 pF/m, resistanssiksi alle 110 Ω /km ja minimipinta-alaksi 0,34 mm². Yhdessä RS-485-väyläsegmentissä voi olla enintään 32 laitetta. Toistimien eli linjavahvistimien avulla väyläsegmenttejä voidaan kytkeä peräkkäin ja ylittää näin 32 laitteen rajoitus.

Laitteet voivat saada osoitteen 0–126 ja ne voivat olla joko isäntä- tai orjatyypisiä. Tiedonsiirtoa voi tapahtua joko isäntälaitteiden välillä (*token passing*) tai isäntä- ja orjalaitteiden välillä. Isäntä- ja orjalaitteiden välillä vain isäntä ohjaa kommunikointia väylällä, eli orjat voivat vastaanottaa viestejä isännältä tai isäntä hakea viestejä niiltä. Isäntälaitteiden välinen kommunikointi tapahtuu väyläosoitteiden perusteella nousevas- sa järjestyksessä, kunnes suurimman väyläosoitteen omaava siirtää vuoron pienimmän väyläosoitteen omaavalle.

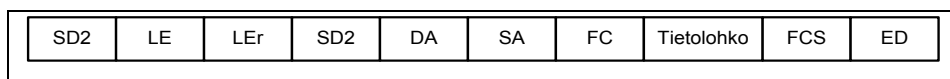
Tieto liikkuu vuorosuuntaisesti ja asynkronisesti 11-bittisinä UART-merkkeinä RS-485:n päällä toimivassa Profibusissa. Linjakoodauksena käytetään NRZ-koodia, jossa ykkös- bitti esittää yhtä merkitsevää tilaa ja nollabitti toista merkitsevää tilaa. Tiedonsiirtolinjo- ja on kaksi: A (RxD/TxD-N) ja B (RxD/TxD-P). Taulukko 8 (ks. seur. s.) esittää Profi- bus-kehyksen rakenteen.

Taulukko 8. Profibus-kehyksen rakenne [31, s. 17]

Tila	Aloitusbitti	Tietobitit	Pariteettibitti	Loppubitti
Pituus	1 bitti	8 bittiä	1 bitti	1 bitti
Profibus RS-485 UART	alkubitti lähe- tetään 0- tilassa	eniten merkit- sevin bitti (MSB) ensin, vähiten mer- kitsevin (LSB) lopuksi	pariteettibitti lähetetään joko 0-tilassa tai 1-tilassa	loppubitti lähe- tetään 1- tilassa

Profibus-sanomassa jopa kolme samanaikaisesti vääristynyttä bittiä voidaan tunnistaa tehokkaiden virheentarkistusalgoritmien ansiosta. Yleislähetyksessä (*broadcasting*) kul- loinkin aktiivinen laite lähettää väylän kaikille laitteille sanoman, eikä sitä tarvitse kuitata. Ryhmälähetyksessä (*multicast*) aktiivinen laite lähettää tietyn ryhmän kaikille laitteil- le sanoman, eikä sitä tarvitse kuitata.

Esitellään vaihtuvapituinen versio Profibus-sanomasta (kuva 21, ks. seur. s.). Siinä lä- hetetään aluksi alkutavu SD2, jonka numero määrää sanoman tyyppin. Tätä seuraa tois- tensa kanssa identtiset tavut LE/LEr, jotka kertovat sanoman pituuden. Tämän jälkeen lähetetään toinen aloitustavu SD2. Toista aloitustavua seuraa sanoman osoitetiedot eli vastaanottajan tavu DA ja lähettäjän tavu SA.



Kuva 21. Vaihtuvapituinen Profibus-sanoma [31, s. 24]

Seuraavaksi tulee ohjaustavu (FC), joka kertoo sanoman prioriteetin ja käskykoodit. Ohjaustavua seuraa tietolohko (*Data Unit*), joka sisältää kaiken käyttäjätiedon. Toiseksi viimeinen sanoman osa on virheentarkistustavu (FCS), jota seuraa lopetustavu (ED). Tietoalue vastaanottajan tavusta (DA) virheentarkistustavuun (FCS) voi olla 4–249 merkkiä pitkä. [31, s. 13–17, 24, 27, 31–33.]

4.3.4 CANopen-protokolla

CANopen on CAN in Automation e.V.:n kehittämä sovellustaso CAN-väylän päälle, mikä on määritelty OSI-mallin sovelluskerroksen avulla. Täten se mahdollistaa CAN-väylän täysmittaisen käytön kenttäväylänä, koska protokolla on täten lopullisesti määritelty.

CANopen pohjautuu ISO 11898 -standardiin, jossa määritellään fyysisten siirtoominaisuuksien lisäksi muun muassa nopea 1 Mbit/s tiedonsiirto CAN-väylässä. CANopen-väylässä voi olla yhteensä 128 laitetta kytkettynä. CAN_H- ja CAN_L-signaalien enimmäisjännite saa olla 16 V. Väylälaitteiden välinen galvaaninen isolointi on vapaaehtoista, mutta erittäin suositeltavaa. [32, s. 20–22.]

Tiedonsiirto tapahtuu PDO-yksiköiden avulla. Niitä voi olla kullakin laitteella 512 lähetettävää ja vastaanotettavaa. Datakentän pituus voi olla maksimissaan 8 tavua. [33.]

4.3.5 DeviceNet-protokolla

DeviceNet on ODVA:n (*Open DeviceNet Vendor Association, Inc*) ylläpitämä avoin standardi, jota käytetään sovellustasona CAN-väylän päällä. DeviceNetin yhteen väyläsegmenttiin voidaan kytkeä maksimissaan 64 laitetta, mikä on enemmän kuin CANopenilla. Toisaalta DeviceNetin nopeus on rajoitettu maksimissaan nopeuteen 500 kbit/s ja kaapeli pituuteen 500 m. DeviceNet-laitteille tulee kentän puolelta tehonsyöttö 24 V, ja se etenee samassa kaapelissa datasiignaalien kanssa. [34; 35.]

Tiedonsiirto tapahtuu I/O-sanomien avulla. Niitä voi olla kullakin laitteella 27 kpl I/O-lähetys- ja vastaanottosanomaa ja 1 701 kpl I/O-vastaanottosanomaa. Datakentän pituus voi olla maksimissaan 8 tavua. [33.]

4.3.6 *Ethernet/IP*-protokolla

Ethernet/IP on ODVA:n ylläpitämä tiedonsiirtoprotokolla teollisuusautomaation tarpeisiin ja seuraa OSI-mallia kokonaisuudessaan. Sen fyysinen kerros ja siirtoyhteyskerros noudattavat IEEE 802.3 -standardin mukaista tiedonsiirtoa, eli pohjimmiltaan se perustuu *Ethernetiin*.

Ethernet/IP:n verkko- ja kuljetuskerros käyttävät TCP/IP-protokollakokonaisuutta hyväkseen. Istunto-, esitystapa- ja sovelluskerros eli niin sanotut ylemmät kerrokset on määritelty erityisen CIP (*Common Industrial Protocol*)-teknologian avulla, joka on täysin oliopohjainen protokolla.

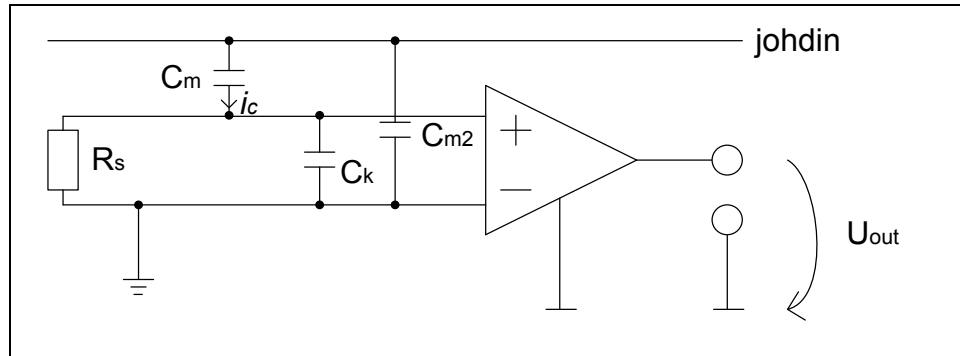
CIP perustuu tuottaja-kuluttaja-ajatteluun, jossa sovellusinformaatiota voidaan yhdellä kertaa jakaa lähettäjän (*producer*) ja monen vastaanottajan (*consumer*) välillä erittäin tehokkaasti verkon resursseja säästäen. Tuottaja-kuluttaja-verkossa tuotetuilla viesteillä on siis pelkästään erityinen tunniste, joten ne eivät tarvitse vastaanottajan osoitetta lainkaan. Jos jokin laite haluaa vastaanottaa tietyn viestin, sen tarvitsee vain tietää sen tunniste ja muodostaa sitä vastaan kysely. Kysely tarvitsee tehdä vain kerran yhden tuottosyklin aikana, jotta yksi laite voisi vastaanottaa tuotettua tietoa. Samanaikaisia tunnistekyselyjä voi olla rinnakkain useita. *Ethernet/IP* määrittelee verkossa olevat laitteet ja niiden ominaisuudet CIP-objektien perusteella. Tästä on suuri etu varsinkin silloin, jos jokin vaativampi sovellus vaatii erityisominaisuuksia laitteilta, sillä ne voidaan määrittellä uusien objektien avulla. [36, s. 1–7.]

5 Häiriöiden kytketymistavoista kenttäväyläympäristössä

Häiriöiden kytketymistä kenttäväylään voi ajatella kapasitiivisten, induktiivisten ja galvanisen kytketymisen kautta. Seuraavaksi käydään edellä mainituista muutama esimerkki läpi, koska näiden ilmiöiden hallitseminen auttaa luotettavan kenttäväyläratkaisun suunnittelussa.

5.1.1 Kapasitiivinen kytkeytyminen

Kapasitiivisessa kytkeytymisessä on kyse siitä, että jostain lähellä olevasta johtimesta on kapasitiivinen yhteys toiseen johtimeen eli johtimien välille syntyy signaaliyhteys (kuva 22, ks. seur. s.).



Kuva 22. Esimerkki kapasitiivisesta kytkeytymisestä, jossa lähellä olevasta johtimesta kytkeytyy häiriövirtaa C_m :n läpi pääasiassa vastukseen R_s . Tarkassa mallinnuksessa kaapelin kapasitanssi C_k ja keskinäiskapasitanssi pitää ottaa huomioon [37]

Kapasitiivista kytkeytymistä operaatiovahvistimen ei-invertoivan navan puolelle voidaan kuvata sen ulostulojännitteen kautta kaavan (8) avulla, kun sisääntulonastoihin on kytketty lähdejännitteetön epäsymmetrinen anturi, ja kytkennän vierellä kulkee jännitteinen potentiaalisesti häiritsevä johdin (ks. kuva 22). Siinä häiriötekijät muodostuvat termeistä $A_d * i_c * R_s$.

$$U_{out} = U_s * A_d * i_c * R_s \quad (8)$$

jossa U_{out} = operaatiovahvistimen ulostulojännite,

U_s = epäsymmetrisen anturin yli syntyvä häiriöjännite,

R_s = kytkennässä anturin sisäinen resistanssi,

A_d = operaatiovahvistimen differentiaalinen vahvistus,

i_c = kapasitiivinen virta.

Kapasitiivista virtaa voidaan kuvata sinimuodossa kaavan (9) avulla.

$$i_c = \frac{U_c}{\frac{1}{j\omega C_m} + R_s} \quad (9)$$

jossa U_c = kytkennän ulkopuolisen johtimen jännite,
 $\frac{1}{j\omega C_m}$ = hajakapasitanssin impedanssi kulmataajuudella ω .

Toisesta johtimesta kytkentään aiheutuvaa häiriöjännitettä voidaan kuvata anturin yli vaikuttavalla häiriöjännitteellä kaavan (10) avulla (ks. seur. s.). Tässä oletetaan, että toisessa johtimessa siirtyy vaihtojännitettä taajuudella f .

$$|U_i| \approx 2\pi f * R_s * C_m * U_c \quad (10)$$

jossa U_i = toisesta johtimesta kytkentään vaikuttava häiriöjännite,

U_c = kytkennän ulkopuolisen johtimen jännite,

$2\pi f$ = kytkennän ulkopuolisen johtimen jännitteen kulmataajuus,

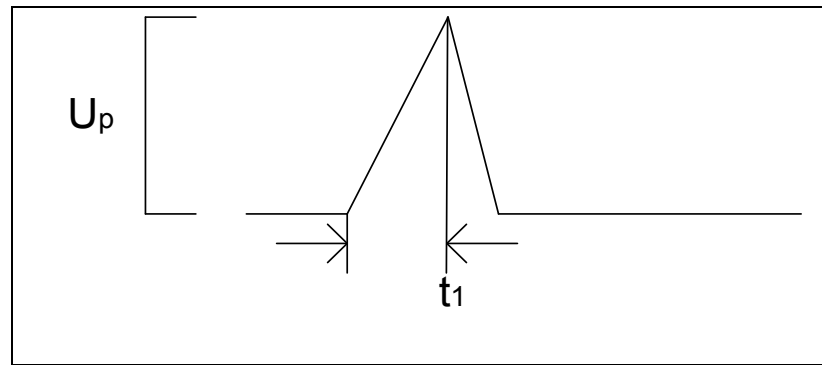
C_m = hajakapasitanssi.

Johtimeen indusoituvat jännitepiikit eli transientit (kuva 23, ks. seur. s.) ovat myös merkittävä tekijä ja niitä voidaan kuvata kaavan (11) avulla.

$$U_i \approx C_m * \frac{\Delta U}{\Delta t} * R_s = C_m * \frac{\Delta U_p}{\Delta t_1} * R_s \quad (11)$$

jossa U_p = transientin huippu.

Kaavan (11) perusteella sisäisen resistanssin R_s pienentäminen on tehokas tapa vaikuttaa transienttien suuruuteen.



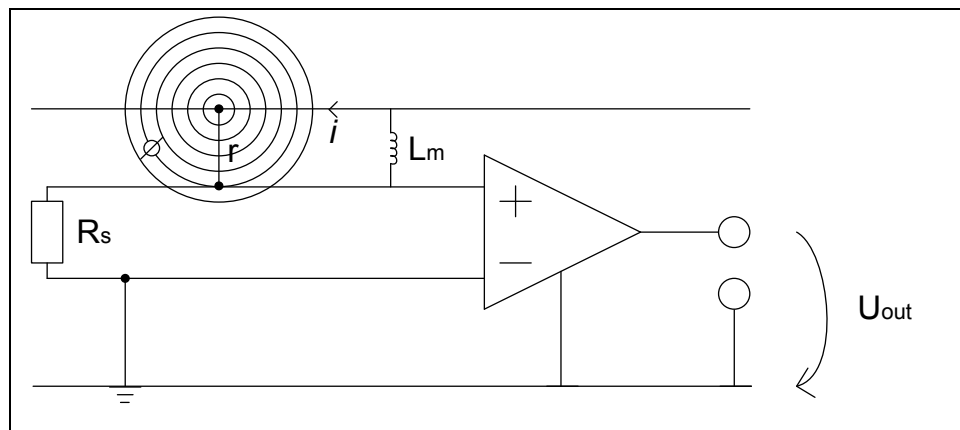
Kuva 23. Esimerkki transientin kytkeytymisestä johtimeen [37]

Hajakapasitanssia C_M voidaan vähentää seuraavin keinoin:

- muuttamalla johtimien etäisyyttä toisiinsa
- käyttämällä kaapeleita, joilla on erillinen suojavaippa
- laittamalla kytkentä metallikotelon sisälle
- käyttämällä maadoitettuja sähköstaattisia suoja
- laittamalla liittimet mahdollisimman lähelle maadoituspistettä. [37.]

5.1.2 Induktiivinen kytkeytyminen

Induktiivisessa kytkeytymisessä on kyse siitä, että lähellä olevassa johtimessa kulkeva sähkövirta muodostaa ympärilleen magneettikentän, jonka kautta tapahtuu induktiivista kytkeytymistä myös muihin johtimiin (ks. kuva 24).



Kuva 24. Esimerkki induktiivisesta kytkeytymisestä [37]

Esitetään, kuinka indusoitunutta jännitettä voidaan kuvata kaavan (12) avulla.

$$\begin{aligned}
 u &= -\frac{d\phi}{dt} = -\frac{d(BA)}{dt} = -\frac{d(\mu HA)}{dt} = -\mu A \frac{dH}{dt} \\
 H &= \frac{i}{2\pi r} \rightarrow \frac{dH}{dt} = \frac{di}{dt * 2\pi r} \\
 \rightarrow u &= -\frac{\mu A}{2\pi r} \frac{di}{dt} = -L_m \frac{di}{dt}
 \end{aligned}
 \tag{12}$$

jossa u = indusoitunut jännite ja ϕ = magneettivuoto,

H = magneettikentän voimakkuus,

B = magneettikentän tiheys,

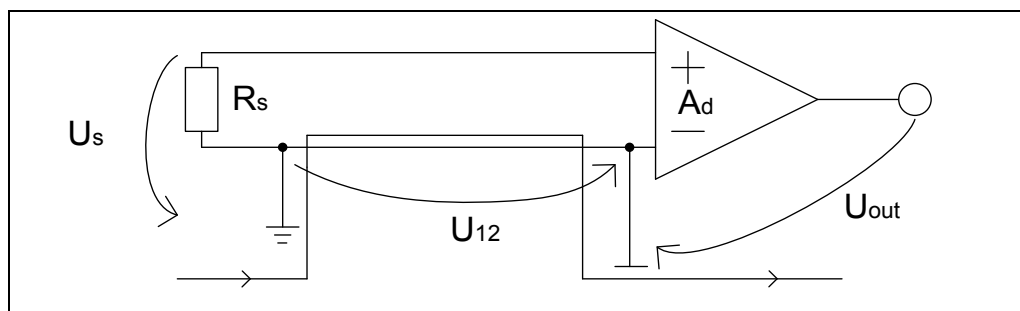
L_m = hajainduktanssi ja r = etäisyys kaapelista kaapeliin.

Induktiivista kytkeytymistä voi tehokkaasti estää seuraavin keinoin:

- kasvattamalla etäisyyttä r
- välttämällä kaksoisjohtoja
- pitämällä myötä- ja vastavirran etäisyys toisistaan mahdollisimman pienenä, jolloin magneettikentän voimakkuus (H) pienenee
- tiukan metallikoteloinnin avulla
- käyttämällä parikierrettyä kaapelia, jossa vastakkaissuuntaiset virrat kumoavat toisensa. [37.]

5.1.3 Galvaaninen kytkeytyminen

Galvaanisessa kytkeytymisessä kahden maapisteen välillä on sähköinen yhteys ja potentiaaliero, joka aiheuttaa häiriötä esimerkiksi laitteiston ulostulojännitteeseen (ks. kuva 25; kuva 26, ks. seur. s.). Tätä potentiaalieroa kutsutaan myös yhteismuotoiseksi jännitteeksi (*common mode voltage*).



Kuva 25. Yhteismuotoisen jännitteen vaikutus kytkennän ulostulojännitteeseen [37]

Epäsymmetrisen anturin tapauksessa signaalin jännite U_s vaikuttaa välittömästi potentiaalieron U_{12} kanssa operaatiovahvistimen ulostulojännitteeseen U_{out} . Potentiaaliero aiheuttaa operaatiovahvistimen ulostuloon häiriötä kaavan (13) mukaisesti.

$$U_{out} = A_d * (U_s * U_{12}) = A_d * U_s + A_d * U_{12} \quad (13)$$

jossa U_{out} . = operaatiovahvistimen ulostulojännite,

A_d . = operaatiovahvistimen vahvistus,

$A_d * U_{12}$ = häiriöjännitettä.

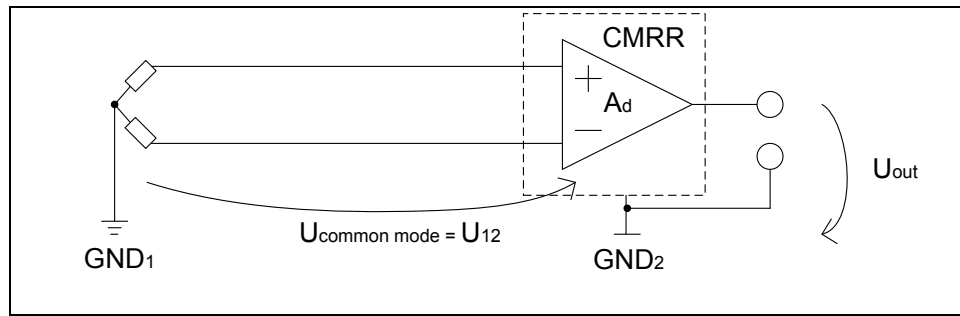
Nykyään esimerkiksi operaatiovahvistimista löytyy yhteismuotoisen jännitteen sietoa varten ominaisuus, jonka hyvyys ilmaistaan CMRR-kertoimen avulla. Käytännössä tämä tarkoittaa sitä, että yhteismuotoinen jännite pienenee CMRR-kertoimen suuruuden mukaisesti operaatiovahvistimen ulostulojännitteestä. CMRR on määritelty kaavassa (14) avulla.

$$CMRR = \left| \frac{A_{differential}}{A_{commonmode}} \right| = \frac{A_d}{A_c} \rightarrow A_c = \frac{A_d}{CMRR} \quad (14)$$

jossa A_d . = operaatiovahvistimen differentiaalinen vahvistus,

A_c = yhteismuotoisen jännitteen vahvistus.

Tilanteessa, jossa symmetrinen anturi on kytketty differentiaalisen operaatiovahvistimen sisääntulonastojen välille (ks. kuva 26), CMRR-kerroin vaikuttaa ulostulojännitteeseen parantaen sen tarkkuutta. Tällöin operaatiovahvistin voidaan ajatella sellaiseksi, ettei se ota juurikaan huomioon yhteismuotoista jännitettä vahvistaessaan hyötysignaalia, ja tulos on näin ollen tarkempi kuin edellä esitetyissä tapauksissa.



Kuva 26. Yhteismuotoisen jännitteen vaikutus kytkennän ulostulojännitteeseen, jossa operaatiovahvistimella on yhteismuotoisen jännitteen sietokyky (CMRR) [37]

Differentiaalisen operaatiovahvistimen ulostulojännite voidaan esittää kaavan (15) mukaisesti ottamalla CMRR-kerroin huomioon.

$$U_{out} = U_s * A_d + U_{12} * A_c = U_s * A_d + \frac{U_{12}}{CMRR} * A_d \quad (15)$$

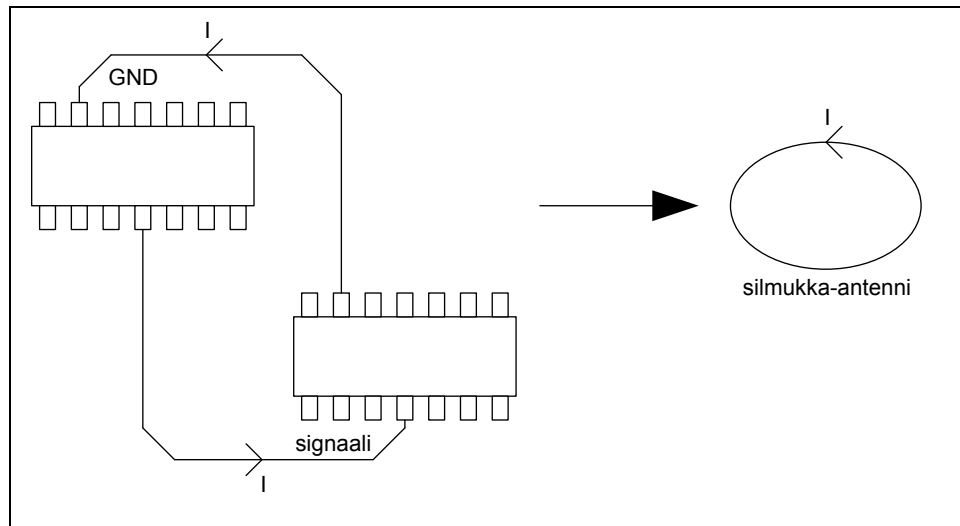
jossa U_{out} = differentiaalisen operaatiovahvistimen ulostulojännite,

$$\frac{U_{12}}{CMRR} * A_d = \text{kytkentään vaikuttava häiriö.}$$

CMRR-kerroin on tavallisimmin luokkaa $10^4 - 10^6$, eli se vähentää merkittävästi häiriön vaikutusta ulostulojännitteeseen. Se ilmaistaan usein desibeileissä, joten se on muutettava kymmenpotenssimuotoon jatkokäsittelyä varten. [37.]

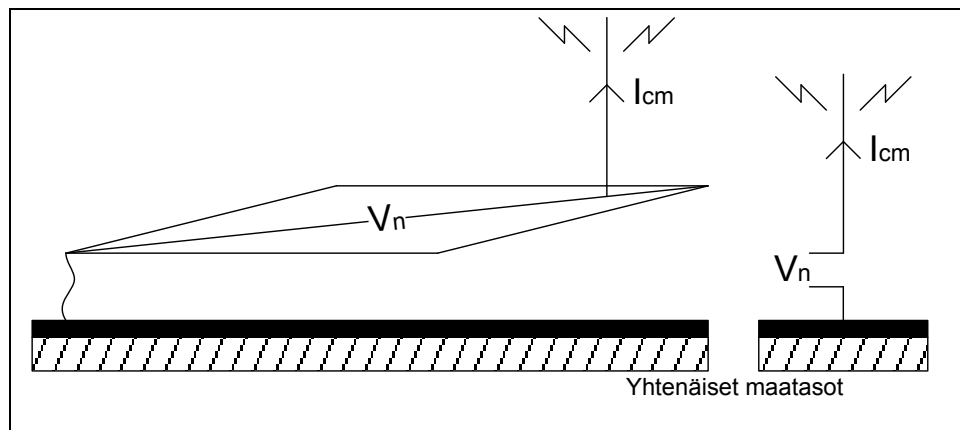
5.2 Piirikorttien häiriösäteilystä suunnittelun kannalta

Piirikortissa esiintyy sekä eromuotoista (*differential-mode*) että yhteismuotoista (*common-mode*) häiriösäteilyä. Eromuotoista häiriösäteilyä pääsee muodostumaan, kun virta pääsee kiertämään johdinsilmukassa, joka vastaa pieni-impedanssista silmukka-antennia, jonka virta on suuri ja magneettikenttä sen lähellä hallitseva (ks. kuva 27).



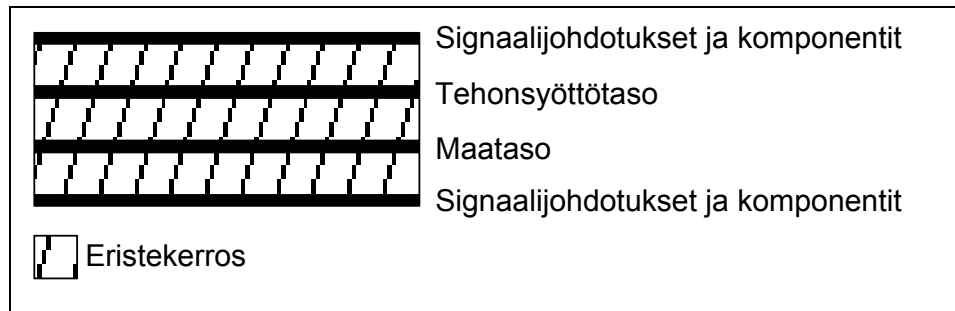
Kuva 27. Eromuotoinen häiriölähde ja sitä vastaava antennityyppi [37]

Yhteismuotoinen häiriölähde syntyy potentiaalierosta V_N maatasojen välillä, joka aiheuttaa maatasoon häiriöjännitteen ja impedanssin mukaisen häiriövirran I_{CM} . Häiriölliseen maatasoon kytketty johdin vastaa suuri-impedanssista antennia, jossa kulkee pieni virta, ja sähkökenttä on hallitseva (kuva 28, ks. seur. s.).



Kuva 28. Yhteismuotoinen häiriölähde ja sitä vastaava antennityyppi [37]

Monikerrospiirilevy on paljon käytetty piirilevytyyppi, koska se on häiriösuojauksen kannalta paras ratkaisu (kuva 29, ks. seur. s.). Siinä jaetaan tehonsyöttö, maataso ja signaalitiet omiin kerroksiinsa.



Kuva 29. Esimerkki hyvästä nelikerrospiirilevyn rakenteesta [37]

Monikerrospiirilevy parantaa johtimien sovituksia ja takaa tasaimpedanssisen signaalitien. Yhtenäiset maatasot antavat suojaa sähkömagneettista säteilyä vastaan. Johdotukset jäävät kaiken lisäksi lyhyiksi, eivätkä ne pääse muodostamaan suuria silmukoita. [37.]

6 Tulosten esittely kenttäväyläratkaisujen näkökulmasta

Seuraavien kenttäväyläratkaisujen perustelut on koottu yksitellen eri valmistajien komponenttien sovellusesimerkeistä. Sopivia ratkaisuideoita löytyy hyvin usein tiettyjen väylien ohjainpiirien ja lähetinvastaanottimien (*transceivers*) datalehdiltä. Ne ovat kuitenkin sovellettavissa kaikkiin väyliin, koska peruseriaatteeltaan suunnittelun lähtökohdat ovat samat. Ethernetin osalta on tarkasteltu tiedonsiirtonopeuteen 100 Mbit/s kykeneviä komponentteja, koska se on nykyään yleisin käytettävissä oleva nopeus pienitehoisten taajuusmuuttajien Ethernet-liitynnöissä. [38; 39; 40; 42.]

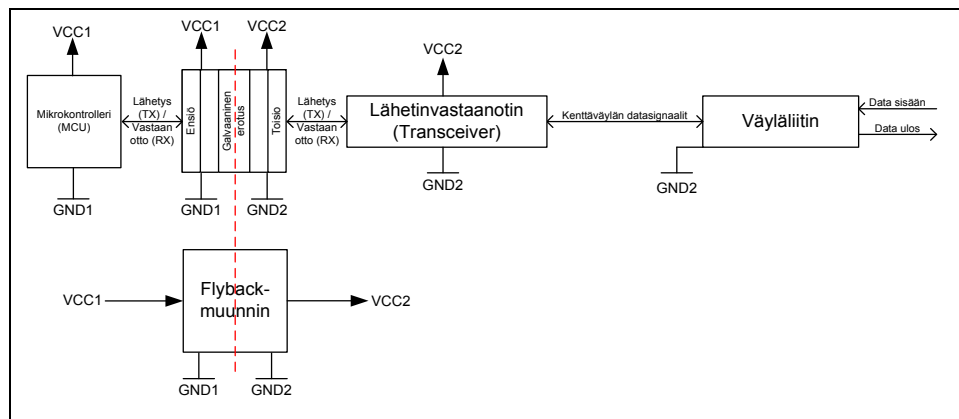
6.1 Ethernetiin pohjautumattoman kenttäväyläkytkennän ehdot

Ethernetiin pohjautumaton kenttäväyläkytkentä piirilevyllä muodostuu neljästä pääkomponentista: väyläliittimestä, lähetinvastaanottimesta, erotuksesta ja väyläohjaimesta, joka voi olla mikroprosessorin sisällä tai oma erillinen piirinsä (kuva 30, ks. seur. s.). Liitin on kenttäväyläkohtainen, ja jokaisen kenttäväylän spesifikaatiossa on usein määritelty eri määrä hyväksytyjä liittimiä. Lähetinvastaanottimen sisällä oleva väylä vastaanotin (*receiver*) muuttaa kentältä tulevan linjatasoisen jännitesignaalin sarjamuotoon. Lähetinvastaanottimen ohjainaste (*driver*) muuttaa väyläohjaimelta tulevan sarjamuotoisen tiedon takaisin linjatasoiseksi. Useat eri valmistajat tuottavat lukuisille väylien fyysisille rajapinnoille sopivia lähetinvastaanottimia.

Lähetinvastaanottimen ohjainasteen ulostulot ja vastaanottimen sisääntulot kytketään toisiinsa ja kenttäväyläliittimen nastoihin spesifikaatioiden mukaisesti. Lähetinvastaanottimen ohjainasteen sisääntulo (D) kytketään taas puolestaan mahdollisen erotuskomponentin kautta sopivaan ulostulonastaan mikrokontrollerilla (TX) ja vastaanottimen ulostulo (R) taas sopivaan sisääntulonastaan mikrokontrollerilla (RX) – sekin erotuskomponentin läpi. Galvaaninen erotus on suositeltavaa häiriöimmunitettiin maksimoimiseksi.

Väyläohjainten osalta esimerkiksi Modbus on toteutettavissa UART-ohjaimen avulla, CANopen vaatii jo erityisen CAN-ohjaimen ja Profibus DP täytyy tehdä edelleen erillisellä ASIC-piirillä, koska sen vaatimaa logiikkaa ei ole tai on todella vähän integroituna tämän päivän yleiskäyttöisissä mikrokontrollereissa.

Erillisiipi on valitettavasti suhteettoman kallis peruslaitteen kustannukseen nähden. Mikrokontrollerin datalehdeltä tulee tarkistaa, mitä väyläohjaimia siinä on integroituna, ja missä sen nastoista kunkin ohjaimen ominaisuudet ovat käytettävissä ennen kuin voidaan miettiä sen mahdollisuuksia kenttäväylien ohjainpiirinä.



Kuva 30. Ethernetiin pohjautumattoman kenttäväyläratkaisun oleelliset elementit

Erotuskomponenttien soveltuminen tiettyyn tiedonsiirtonopeuteen pitää myös selvittää ja signaalin etenemisviive on tällöin avainkysymyksenä. Erotuskomponentin kykyä tulkitta ulostulossaan logiikan ykkös- ja nollatasoja oikein myös häiriöllisessä ympäristössä kuvataan sille suurimman sallitun yhteismuotoisen jännitteen (V_{CM}) ja yhteismuotoisen jännitteen muutosnopeuden dV/dt avulla. Muutosnopeus saa olla esimerkiksi Avagon valmistamissa nopeissa HCPL-0601-optoerottimissa luokkaa $10 \text{ kV}/\mu\text{s}$.

Erotin on myös TTL-yhteensopiva, eli sen käyttöjännitetasot ovat laajalti yhteensopivia logiikkapiirien kesken, ja se kestää tehollista eristysjännitettä vähintään 2,5 kV minuutin ajan.

Ensiö- ja toisiopuolet tarvitsevat lisäksi toisistaan erilliset käyttöjännitteet. Toision käyttöjännite kannattaa tehdä flyback-muuntimen avulla (ks. kuva 30) piirillä olevasta käyttöjännitteestä.

Muita mahdollisia erotusratkaisuja olisi käyttää joko muuntajaa, joka siirtää signaalit sähkömagneettisen induktion välityksellä tai magneettisia erottimia, joissa kotelon sisään ulkopuolisilta magneettikentiltä suojattuna on rakennettu ilmasydäminen muuntaja oheispiireineen. Edellä mainittu oheispiiri varmistaa signaalin läpikulun muuttumattomana muuntajan käämien yli. Muuntajat ovat kuitenkin usein raskaita, kalliita ja vievät noin pari neliösenttimetriä piirilevyn pinta-alasta.

Ethernetin toteutuksessa muuntajaa on kuitenkin pakko käyttää. Magneettisista erottimista on hyvänä esimerkkinä Analog Devicesin iCoupler-tuoteperhe. Niiden huonona puolena on kallis hinta verrattuna optoerottimiin.

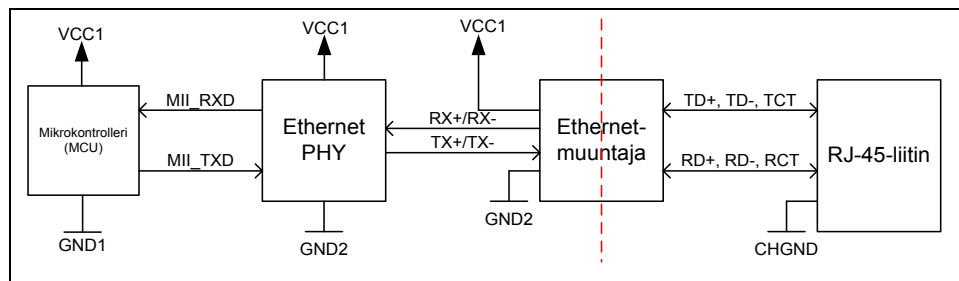
Kenttäväylän protokollapinon muistin tarve tulee tarkistaa, ennen kuin kenttäväyläratkaisun kokonaisuistin tarve voidaan määrittää. Esimerkiksi Modbusin osalta ohjelmakoodin koko vaihtelee hieman prosessoriarkkitehtuureittain, ja vähimmäismuistin tarve eri toimintalohkoille tiedetään (taulukko 9, ks. seur. s.). Luvut ovat suuntaa antavia, mutta käyttökelpoisia, kun mietitään tarvittavaa muistin määrää. Vastaavanlaisia taulukoita kannattaa kerätä muistakin kenttäväylistä suunnitteluprosessin selkeyttämiseksi.

Taulukko 9. Modbus-koodin koko käännettynä eri prosessorialustoille (ARM ja AVR) ja arvioitu vähimmäismuistin määrä. [1] = todellinen koko riippuu siitä, kuinka paljon funktioita käytetään ja [2] = riippuu prosessoriarkkitehtuurista [41]

Toimintalohko	Koodin koko (ARM) / tavua	SRAM:n tarve (ARM) / tavua	Koodin koko (AVR) /tavua	SRAM:n tarve (AVR) /tavua
Modbus RTU (Pakollinen)	1132	272	1456	266
Modbus ASCII (Vaihtoehtoinen)	1612	28	1222	16
Modbus-funktiot [1]	1180	34	1602	34
Modbus-ydin (Pakollinen)	924	180	608	75
Sovituskerros (Pakollinen [2])	1756	16	704	7
Yhteensä / tavua	7304	530	5592	398

6.2 Ethernetiin pohjautuvan ratkaisun ehdot

Ethernet-pohjainen kenttäväyläratkaisu (ks. kuva 31) muodostuu neljästä eri pääkomponentista, jotka ovat RJ45-liitin (mieluiten metallikoteloitu), 1:1 erotusmuuntaja, PHY-piiri ja mikrokontrolleri, jossa on Ethernet MAC -ohjain. Lisäksi tarvitaan riittävä määrä flash-muistia, jonne voidaan tallentaa käytettävissä oleva TCP/IP-sovelluspino ja jokaisen tuetun kenttäväyläprotokollan sovellusparametrit.



Kuva 31. Ethernetiin pohjautuvan ratkaisun pääelementit

PHY-piiri on nimensä mukaisesti Ethernetin fyysisen kerroksen lähetin vastaanotin, joka muuttaa linjatasoisen signaalin rinnakkaismuotoon Ethernet-ohjaimelle. Se huolehtii OSI-mallin mukaisesta fyysisestä kerroksesta ja mahdollistaa mikrokontrollerin lähettää ja vastaanottaa tietoa MII (*Media Independent Interface*) - tai RMII (*Reduced Media Independent Interface*) –rinnakkaisväylän kautta. Siinä on usein sisällä lähetys- ja vastaanottolohkot erikseen, jotka ovat nimeltään 100Base-TX Transmit- ja 100Base-TX Receive-lohkoja.

Piiri yhdistää käytännössä mikrokontrollerin MAC-lohkon itseensä. MAC on järjestelmä, joka huolehtii IEEE 802.3 -pohjaisissa verkoissa verkon varaamisesta ja liikennöinnistä. Se huolehtii myös MAC-osoitteesta, joka yksilöi jokaisen laitteen verkossa. MAC- ja LLC (*Logical Link Control*) -kerros yhdessä muodostavat IEEE 802.3 -verkon siirtoyhteyserroksen. Esimerkki tällaisesta tuotteesta on Micrelin valmistama KSZ8041NL, joka tukee muun muassa automaattikäyttelyä helpottaen kaapelointia. [42; 25, s. 4.]

Eri valmistajien datalehdiltä nähdään, että IEEE 802.3 -mukaisen Ethernet-ohjaimen perustoiminnoille on osoitettu mikrokontrollerin sisäisestä muistista sen tarvitsema osuus. Teoriassa siis Ethernet-liityntä voidaan toteuttaa ilman lisämuistia, jos mikrokontrollerilta löytyy MAC-lohko.

Lisäksi mikrokontrollerissa pitäisi olla ulkoisen muistiväylän ohjaukseen tarkoitettu DRAM (*Dynamic Random Access Memory*) -ohjain, jos muistin tarve kasvaa merkittävästi, koska se on huomattavasti halvempaa ja nopeampaa muistia kuin esimerkiksi SRAM (*Static Random Access Memory*).

RJ-45-liittimessä on 8 nastaa, joista osalla on IEEE 802.3 -spesifikaation mukainen tehtävä (taulukko 10, ks. seur. s.). Metallikotelointi liittimen ympärillä mahdollistaa suoja-vaipalla varustetun parikierretyn kaapelin käyttämisen, jolloin kaapeliin ei indusoidu häiriöitä niin helposti. Metallikoteloidussa liittimessä ylijäämänastat kannattaa viedä laitteen runkoon RC-suodatuspiirin kautta.

Taulukko 10. IEEE 802.3 -mukainen nastajärjestys RJ-45-liittimessä 10/100-nopeuksiselle Ethernetille [24, s. 264]

Nastan numero	Signaalin lyhenne	Signaalin funktio
1	TD+	Lähtevä data
2	TD-	Invertoitu lähtevä data
3	RD+	Vastaanotettava data
4	-	-
5	-	-
6	RD-	Invertoitu vastaanotettava data
7	-	-
8	-	-

Ethernet-muuntajan vaatimukset tulevat suoraan IEEE 802.3:n spesifikaatiosta ja tällä hetkellä kenttäväyläkäytössä riittää 10/100Base-TX-määritykset täyttävä tyyppi. Esimerkiksi Halo Electronicsin valmistama 1:1 TG110-erotusmuuntajaperhe on tällainen ja luokiteltu kestävään 1,5 kV RMS-jännitettää. Koska RJ-45-liitimen nastat yhdistyvät muuntajan ensiökäämin puolelle, se kelluu omassa potentiaalissaan, eikä erillistä erotusratkaisua tämän lisäksi tarvita. Eristyskyky ei todennäköisesti riitä vahvennetun erotuksen vaatimuksiin, eli Ethernet-ratkaisu tulisi toteuttaa aina käyttäjäpotentiaalissa.

Ethernet-ratkaisun integrointiaste piirilevyllä voidaan maksimoida käyttämällä metallikoteloitua RJ45-liitintä, johon on integroituna Ethernet-käyttöön soveltuva muuntaja, sekä piiriä, jossa on sekä MAC-lohko että lähetinvastaanotin tai mikrokontrolleria, jossa on molemmat sisäänrakennettuna. Esimerkkinä voisi olla SMSC:n valmistama LAN91C111 10/100 Ethernet MAC:n ja PHY:n yhdistävä piiri, sekä PulseJackin valmistama J1011F-sarjan liitin, jossa on integroituna tilaledit ja 1:1 erotusmuuntaja.

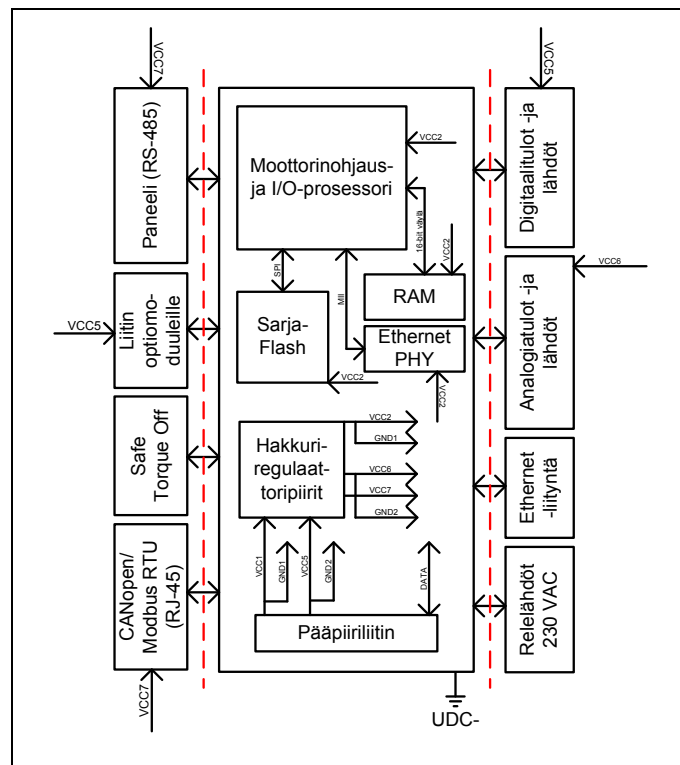
6.3 Malli 1: Yksi yhteinen mikrokontrolleri taajuusmuuttajan ohjauskortilla

Ensimmäisen mallin (kuva 32, ks. seur. s.) idea on ABB:n nykyisten markkinoilla olevien pienitehoisten taajuusmuuttajien mukainen ja perustuu siihen, että oikosulkumootorin ohjauksesta ja taajuusmuuttajan tietoliikenteestä huolehtii yksi yhteinen signaalinkäsittelyyn (*Digital Signal Processing*) suunniteltu prosessori. Prosessori, muistit ja muut oheislaitteet sijaitsevat välipiirin alemmassa potentiaalissa, joten IGB-transistorien ohjaussignaaleja tai muita mittaussignaaleja ei tarvitse siirtää ohjauskortille turvaerotuksen periaatteiden mukaisesti. Näin säästetään erotuskomponenttien kustannuksissa pääpiirin ja ohjauskortin välillä, eivätkä signaalin kulkuaikeviiveet tule ongelmaksi siellä.

Turvaerotuksen rajat menevät ohjauskortin ja tietoliikenneliitännöiden välillä. Tämä erotusraja pitää suunnitella noin 8 mm leveäksi, koska pienitehoisissa taajuusmuuttajissa syöttöjännitteen tehollisarvo voi olla jopa 690 V, jolloin välipiirin korkeampaan potentiaaliin syntyy lähemmäs kilovoltin huippujännite. Erotusrajan leveys määräytyy edellä esitettyjen standardien mukaisesti taulukoista (ks. liite 1 ja sen määräykset). Erotusrajan leveyteen vaikuttaa muun muassa laitteen syöttöjännitteen tehollis- ja huippuarvo, ylijänniteluokka, käyttökorkeus merenpinnasta sekä ympäristön saastuneisuusaste. On valittava sellaisia erotuskomponentteja isolaatioväylälle, joiden ryömintä- ja ilmavälit täyttävät nämä vaatimukset. Osaan signaaleista voidaan käyttää hitaampia erottimia, mutta osa taas vaatii luonnollisesti nopeammat. Hyvä esimerkki nopean erottimen tarvitsemasta väylästä on Profibus, jossa siirtonopeudet voivat olla jopa 12 Mbit/s.

Proessoriksi kannattaa valita sellainen, jolla on yksi käyttöjännite ja joka osaa nollata itsensä tarvittaessa käyttöjännitteen alentuessa liikaa. Tällöin ei tarvita ulkoista käyttöjännitteen tarkkailukytkentää.

Tässä mallissa ohjauskortti saa pääpiirin flyback-muuntimelta sopivat käyttöjännitteet sekä välipiirin potentiaalia että käyttäjäpotentiaalia vasten. Käyttöjännitteet kannattaa tuoda mahdollisimman suurina pääpiiriltä ohjauskortille, jotta pitkät piirilevyvedot ja liitinten ylimenoresistanssit eivät olisi esteenä riittävän käyttöjännitteen saannille. Myös käyttöjännitteiden johdinliuskat kannattaa määrittää riittävän leveiksi, jotta virta pääsee niitä pitkin helposti kulkemaan. Suurimmat käyttöjännitteet reguloidaan tarvittaessa ohjauskortilla sopivalle tasolle jänniteregulaattorin avulla, jonka jäähdytystä varten on varattava pieni alue kuparipinnalta.



Kuva 32. Malli 1: Yhden prosessorin järjestelmä taajuusmuuttajan ohjauskortilla

Tietoliikenneosan tulot ja lähdöt on kytketty käyttäjäpotentiaaliin, jossa ei saa olla enää tappavia jännitteitä. Digitaalitulosten vierelle tarvitaan 24 V:n tasajännitesyöttö kentälle päin, jotta taajuusmuuttaja voi toimia tehollisena tarvittaessa kentän laitteille. Analogipuolen lähtöjen ja tulojen tulisi olla erotettuina muusta tietoliikenteestä, koska ne ovat herkkiä häiriöille. Välipiirin ja lähtövaiheiden virrat ja jännitteet tuodaan pääpiiriiliitimen kautta prosessorin A/D-muuntimelle. Prosessori ohjaa 6 PWM-signaalilla samassa potentiaalissa olevia IGB-transistoreja.

Ohjauskortille on integroituina kenttäväylinä CANopen ja Modbus RTU. Mikrokontrolleerissa pitää olla näitä varten CAN- ja UART-ohjaimet. Kenttäväyläosio toteutetaan edellä esitettyjen periaatteiden mukaisesti. Digitaalitulot on toteutettu AC-optoerottimilla, jolloin digitaalitulon voi kytkeä kummin päin tahansa. Digitaalilähtö on toteutettu optoerottimella ja P-kanavan FET:llä. Analogiatulo on epäsymmetrinen virta- tai jännitetulo ja analogialähtö on virtalähtö. Relelähtö kestää 230 V:n vaihtojännitekuormaan kytkemistä, ja sen ilmvälivaatimus pitää ottaa myös piirilevyllä huomioon siihen suurimman vaikuttavan jännitteen mukaan.

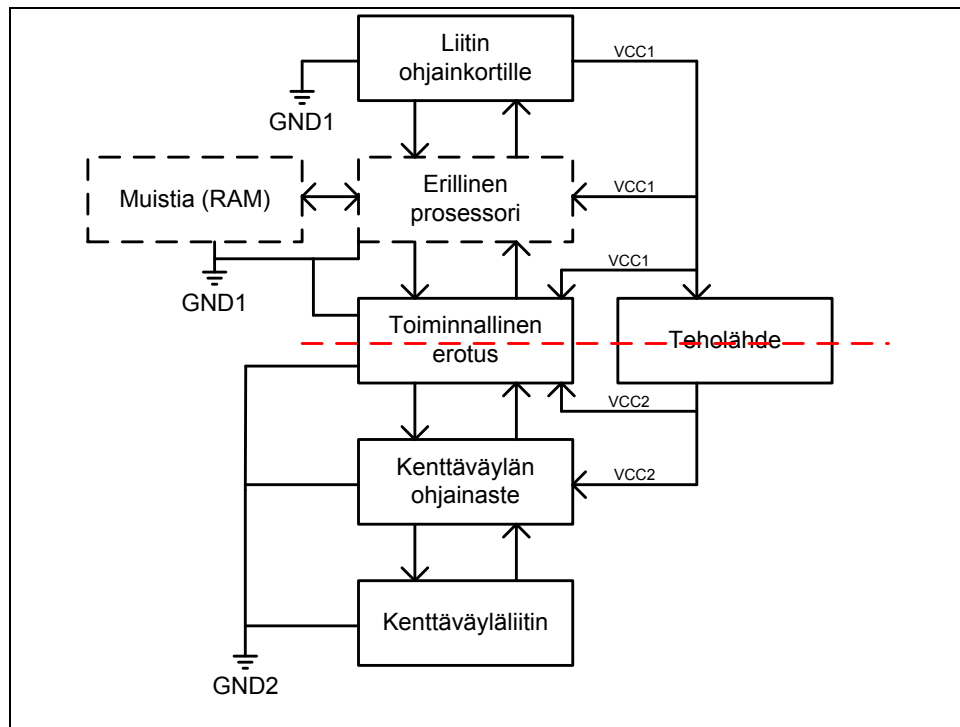
Sarja-flashilta ladataan sovellusparametrit taajuusmuuttajan käynnistyessä. Ajonaikaisia ohjelmamuistia saatetaan tarvita runsaasti tiedon puskurointia varten varsinkin, jos vasteaikavaatimukset ovat tiukat esimerkiksi Ethernet-liittynälle. Paneeliliityntä perustuu RS-485-standardiin, ja optiomoduuliliitin siirtää tietoa asynkronisen sarjaväylän kautta. Molemmat pitää myös erottaa turvaerotusvaatimusten mukaisesti.

Tästä mallista löytyy myös STO (*Safe Torque Off*) -liityntä eli IEC 62061:2005 -standardin (SILCL 3) vaatimukset täyttävä oikosulkumoottorin turvapysäytysmekanismi. Käytännössä STO-toiminto aktivoituessaan estää IGB-transistoreja saamasta apujännitettä. Tällöin taajuusmuuttajan vaihtosuuntaaja ei saa tuotetuksi sellaista lähtöjännitettä, jolla oikosulkumoottorin ohjaus onnistuisi.

Toiminta perustuu kahteen tulosignaaliin, joiden tilaa tarkkaillaan. Kun molemmissa on jännitesyöttö, STO-toiminto on lepotilassa ja taajuusmuuttaja voi toimia ilman keskeytyksiä. Jos STO-tuloista häviää jännite, STO-toiminto aktivoituu ja vie apujännitteen taajuusmuuttajan vaihtosuuntaajalta. Moottorin käynnistäminen on mahdollista vasta sitten, kun STO-tulosignaalit saavat taas jännitettä ja mahdolliset ongelmat on kuitattu ja taajuusmuuttaja nollattu. Käytännössä hätä seis -painike voisi olla jännitesyötön ja STO-tulojen välillä. [3] STO-signaalit tulee myös erottaa käyttäjäpotentialista, koska ne viedään suoraan ohjaamaan taajuusmuuttajan vaihtosuuntaajan ylä- ja alahaaran IGB-transistorien apujännitesyöttöä.

6.4 Malli 2: Erillinen ohjausosaan liittyvä kenttäväyläadapteri

Toisen mallin (ks. kuva 33) ajatus perustuu ABB:n olemassa oleviin F-sarjan kenttäväyläadaptereihin, joilla voi laajentaa nykyisten pienitehoisten taajuusmuuttajien tietoliikenneominaisuuksia. Ideana on, että suunnitellaan suosituimmille kenttäväyläprotokollille mahdollisimman kustannustehokkaasti ja joustavasti mukautuva alusta, jota olisi helppo muokata sekä sähköisesti että ohjelmallisesti eri protokollia varten.



Kuva 33. Malli 2: Erillinen ohjausosaan liittyvä kenttäväyläadapteri

Kytkeä saa käyttöjännitteensä ohjaukselta. DC/DC-muuntajalla erotetaan kentän puolelle jäävät komponentit ohjausosan käyttöjännitteestä ja potentiaalista, jotta toiminnallisen erotuksen ehdot toteutuisivat. Toiminnallinen erotus tarvitaan, jotta kentällä olevat suuret maavirrat ja muut häiriöt eivät kytkeytyisi taajuusmuuttajan ohjausosaan ja näin ollen rikkoisi laitetta tai vaikuttaisi sen toimintaan ei-toivotulla tavalla. Sama pätee signaalijohtoja pitkin tuleviin transientteihin, joita pyritään välttämään erotuskomponenttien avulla. Liittimen juureen on hyvä kytkeä maata vasten myös jänniteleikkureita estämään hetkellisten ylijännitteiden pääsyä piiriin.

Kortille saatetaan tarvita oma erillinen mikrokontrollerinsa ja ohjelmamuistia, jos ohjauskortin mikrokontrolleri ei tue jotain tiettyä kenttäväyläprotokollaa sisäisesti, eikä kykene käsittelemään kenttäväylän aiheuttamaa kuormitusrasitetta. Kenttäväyläliityntä on toteutettu edellä esitettyjen periaatteiden mukaisesti. Paras valinta tällaisen ratkaisun mikrokontrolleriksi olisi todennäköisesti FPGA eli mikropiiri, jonka sisältämä logiikka voidaan helposti ohjelmoida uudelleen. FPGA koostuu logiikkaelementeistä, jotka toteuttavat kombinatorista logiikkaa. Elementtien väliset kytkennät ovat ohjelmoitavissa. FPGA-piirin nastojen funktiot ovat täysin ohjelmoijan päätettävissä.

Myös kaupallisia logiikkaelementtejä voi ostaa eri tarkoituksiin. Esimerkiksi valtaosaan suosituimmista kenttäväyläprotokollista löytyy valmiita logiikkaelementtejä, joita voisi helposti käyttää tällaisen piirin kanssa. Se toisi ehdotonta joustavuutta suhteessa muihin ratkaisuihin.

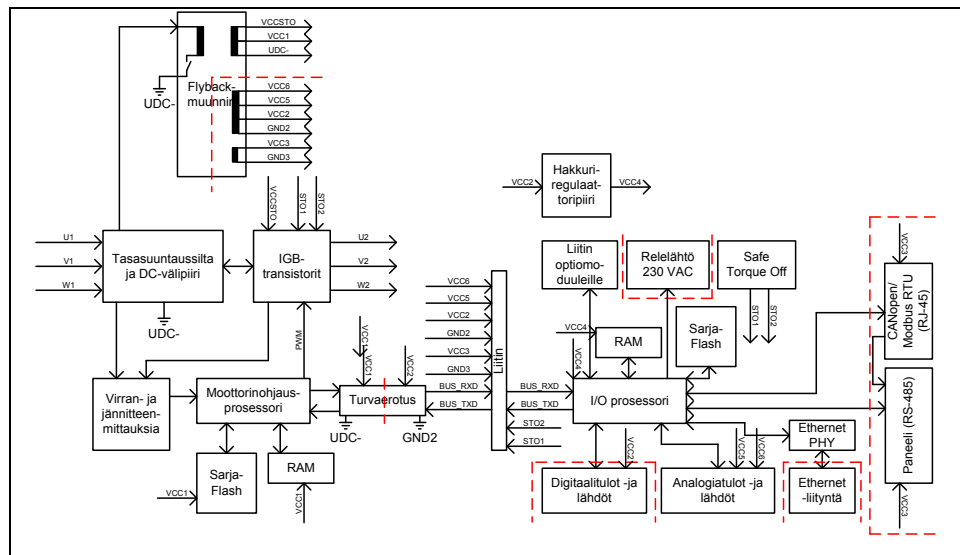
Jos adapterikortilla on oma prosessorinsa, se voi keskustella ohjauskortin prosessorin kanssa jonkin asynkronisen sarjaväylän välityksellä, jottei signaalin viiveistä tarvitse välittää. Jos taas prosessoria ei ole erikseen adapterikortilla, signaalien reititys pitää miettiä etukäteen eri kenttäväylille ja varata ohjauskortilta tietyt nastat optioliitännäisiä varten. Tämä rajoittaa tietyllä tapaa mahdollisten kenttäväylien määrää.

Käyttöjännite kannattaa tuoda mahdollisimman suurena pääpiiriltä adapterikortille ja vasta sitten reguloida sopivalle tasolle, jottei liittimien ylimenoresistansseista ja pitkistä piirilevyvedoista aiheudu jännitteen alenemaa. Sovelluskehittäjät joutuvat miettimään sarjaväylän päälle jonkin sopivan tiedonsiirtoprotokollan. Tämä linkki on erotettava vahvennetun erotuksen vaatimusten mukaisesti, jos korttia halutaan käyttää sekä käyttäjäpotentiaalin että välipiirin potentiaalin rajapinnassa (liite 1, ks. määräykset).

6.5 Malli 3: Ohjausosan ja pääpiirin mikrokontrollerit erikseen

Kolmannen mallin (kuva 34, ks. seur. s.) idea on kolmikon mielenkiintoisin, koska tässä on erikseen mikrokontrollerit moottorinohjaukselle ja tietoliikenneosalle. Tehtävien eriyttäminen kahdelle eli laitteelle jakaa rasitetta ja antaa kumpaankin tehtävään enemmän resursseja. Tilakysymys on ratkaistavissa, jos taajuusmuuttajan mitat saavat kasvaa syvyysuunnassa, koska piirikortteja voi pinota mekaanisesti päällekkäin.

Kentän liittynöille saadaan enemmän tilaa tietoliikenneosaan, koska erotusväliavaatimukset ovat huomattavasti turvaerotusvaatimuksia pienemmät (luokkaa muutaman mm:n ryömintäväli riittää) toisen mikrokontrollerin ollessa kytkettynä käyttäjäpotentiaaliin. Perusideana onkin se, että moottorinohjauksesta huolehtiva mikrokontrolleri on taajuusmuuttajan pääpiirillä välipiirin potentiaalissa ja tietoliikenneosan mikrokontrolleri taas puolestaan käyttäjäpotentiaalissa.



Kuva 34. Malli 3: Ohjausosan ja pääpiirin prosessorit erikseen

Proessorit keskustelevat keskenään jonkin asynkronisen sarjaväylän yli, joka on erotettu turvaerotusvaatimusten mukaisesti taajuusmuuttajan nimellisen käyttöjännitteen perusteella (ks. liite 1). Tällä tavalla pidemmän ryömintävälän erotuskomponentteja tarvitaan huomattavasti vähemmän (n. 2 kpl:tta) kuin esimerkiksi ensimmäisessä mallissa.

Suunnittelija joutuu päättämään, erotetaanko tietoliikennepuolella kaikkia tulo- ja lähtöliitäntöjä edes toiminnallisesti vai annetaanko kytkennän olla samassa potentiaalissa kentän kanssa. Galvaaninen erotus on erittäin suositeltavaa, jotta yhteismuotoiset häiriöt tai suuret maavirrat eivät kytkeytyisi tietoliikennepuolen prosessoriin ja vaikuttaisi näin ei-toivotulla tavalla taajuusmuuttajan toimintaan.

Taajuusmuuttajan pääpiirillä sijaitseva flyback-muunnin suunnitellaan siten, että se kykenee tuottamaan tasajännitevälipiirin ylähaaran jännitteestä riittävän määrän käyttöjännitteitä jokaiseen potentiaaliin. Kuitenkin matkat, joita osan jännitteistä pitää kulkea, voivat olla kohtalaisen pitkiä. Tietoliikenneosaan on järkevää tuoda riittävän suurena (n. 10 V) käyttöjännitteet jokaista siellä olevaa potentiaalia kohti ja vasta sitten reguloida niitä sopivan suuruisiksi, jotta eivät liittimien ylimenoresistanssit tai pitkät piirilevyvedot alentaisi niitä merkittävästi. Tämä on eriarvoisen tärkeää, koska tietoliikenneosaan tulee paljon toiminnallisuutta ja jännitesyöttöjen tulee olla vakaita. Ratkaisun huonona puolena lienee se, että hakkuriregulaattoriipiirit, joilla suurempia käyttöjännitteitä pienennetään vievät kohtalaisen paljon tilaa, koska ne tarvitsevat kohtalaisen paljon jäähdytyspinta-alaa kuparipinnalta.

Mekaanisen suunnittelun kannalta on järkevää, että pääpiirin ja tietoliikenneosan välillä on yksi iso liitin, jota pitkin sekä tarvittavat käyttöjännitteet, 0-potentiaalit ja sarjalinkki tuodaan. Tarpeeksi pitkästä liitinrimasta jätetään osa nastoista käyttämättä, jolloin erotusrajapintaa eri potentiaalien välillä ei tarvitse rikkoa, ja näin eri osiin on helppo tuoda omat käyttöjännitteensä ja 0-potentiaalinsa saman liittimen kautta. Ratkaisu on myös mekaanisesti tukeva. Optiomoduuliliittimeen voi kaiken lisäksi kytkeä mallin 2 kaltaisen lisäkortin, jos tietoliikennepuolen tarjoamat liitännät eivät riitä.

Molempien korttien parametrit ladataan käynnistyksen yhteydessä sarja-flashilta, ja ulkoista ohjelmamuistia saatetaan tarvita toimintojen sulavaa suorittamista varten, vaikka tämän päivän prosessoreissa on integroituna sitä jo kohtalaisen paljon. Tietoliikennekortille on integroitu myös muutama kenttäväylä, mikä tuo lisäarvoa asiakkaalle. Toisen kenttäväylistä eli Modbus RTU:n voi myös halutessaan ketjuttaa paneeliliitännän kautta, jos paneelille ei ole käyttöä.

Ethernet-liityntä kelluu muuntajansa ansiosta omassa potentiaalissaan ja digitaalipuoli on myös erotettu bipolaarisilla AC-optoerottimilla, koska digitaalipuolella hyötysignaaliin sisältyy myös paljon häiriötaajuuksia. AC-optoerottimia käytettäessä ei ole väliä, miten päin tuloliitännät kytkee, koska vastakkaissuuntiin kytketyt diodit antavat virran kulkea molempiin suuntiin (kuva 34, ks. ed. s.). Relelähtö on 230 V:n vaihtojännitekuorman kestävä, joten se on erotettava turvaerotusvaatimusten mukaisesti käyttäjäpotentiaalisista.

Käytännössä vaihtokosketinrele täyttää sopivalla ilmavälillä (noin 5,5 mm) nämä vaatimukset. Turvapysäytysmekanismiksi on myös tähän malliin integroitu STO, josta kerrottiin enemmän edellä. Lisäksi STO-signaalit tulee erottaa, koska ne viedään pääpiirille ohjaamaan taajuusmuuttajan vaihtosuuntaajan IGB-transistorien apujännitesyöttöä.

6.6 Valitun ratkaisun perustelut ja tarkemmat vaatimukset

Tässä työssä pääpaino oli sulautetulla kenttäväyläratkaisulla. Ei myöskään keskitytty taajuusmuuttajan pääpiiriin tai moottorinohjaukseen, vaan pyrittiin miettimään koko tietoliikennepuolen ratkaisua muutaman vuoden päähän (ks. taulukko 11), jolloin kenttäväylät olisivat hallitsevassa asemassa taajuusmuuttajan tietoliikennepuolen liitynnöissä.

Taulukko 11. Erään tietoliikennekortin vaatimuksia

Tulevalta kortilta haluttiin seuraavia ominaisuuksia	
Toiminto	Vaatus
Analogiatulo	1 kpl, jännite- ja virtatulon yhdistävä
Analogialähtö	0
Digitaalitulo	2 kpl
Digitaalilähtö	0
Relelähtö	1 kpl, 230 V AC kestävä
Optiomoduuliliitin	1 kpl, taaksepäin yhteensopivuus
Sulautetut kenttäväylät	CANopen, Modbus RTU
Safe Torque Off	Kyllä
Jännitesyöttö	24 VDC ulos
Piirilevyn enimmäiskoko (L x K)	60 mm x 130 mm

Valittiin kolmas malli, koska haluttiin kokeilla uutta ratkaisua. Myös kysymys turvaerotusrajojen paikoista haluttiin laittaa uudestaan vireille, koska nykyisellä ratkaisulla rajat tulevat vastaan piirilevyn pinta-alan loppuessa ja tietoliikenneliitännöiden kysynnän samalla kasvaessa. Lisäksi kolmannessa mallissa saadaan tehdyksi vielä kohtalaisen hyvät piirilevykohtaiset kytkentämaat, jotta kytkennät toimisivat mahdollisimman hyvin. Myös asynkroninen sarjaväylälinkki kahden prosessorin välillä vaikutti mielenkiintoiselta ratkaisulta, koska silloin taajuusmuuttajasta saadaan entistä modulaarisempi.

6.7 Suunnittelutyö kenttäväylien osalta ja piirilevyn osasijoittelu

Seuraavissa osioissa käydään vain kenttäväyläpuolen kytkentöjä läpi ja sivutaan muuta tietoliikenneosaa lyhyesti. Lopussa esitellään vielä piirilevyluonnos osasijoittelun näkökulmasta, jossa myös yllä olevan taulukon muuta toiminnallisuutta on integroituna.

6.7.1 Modbus RTU (RS-485) -protokollan toteutus

Differentiaaliseen tiedonsiirtoon perustuva Modbus RTU on tässä toteutettu edellä esittämieni ehtojen perusteella (ks. liite 2). Kytkentäkuvasta puuttuu liitin ja maadoituksesta liittimeltä, mutta ne ovat helposti kuviteltavissa oikealle signaalien A ja B eteen ennen RS-485-lähetinvastaanotinta (D4). Lähetinvastaanottimen sisällä on siis kenttäväylän ohjainaste, joka puskee kentälle päin differentiaalista jännitettä. Sisältä löytyy lisäksi väylävastaanotin, joka vastaanottaa toisen piirin ohjainasteen lähettämää differentiaalista jännitettä. Lähetinvastaanottimen toinen puoli muodostuu ohjainasteen sisääntulosta (D) ja väylävastaanottimen ulostulosta (R), jotka ovat mainituksa järjestyksessä lähetys- ja vastaanotonastat mikrokontrollerin näkökulmasta.

Lisäksi samalta puolelta löytyy DE (*Driver Enable*) - ja \overline{RE} (*Receiver Enable*, alhaalla aktiivinen) -ohjaussignaali, joista ensimmäisellä käynnistetään tai mykistetään ohjainaste ja jälkimmäisellä taas väylävastaanotin. Tieto on tässä vaiheessa sarjamuotoista ja ohjattavissa esimerkiksi kuvassa näkyvillä optoerottimilla (V23 ja V25), kun halutaan galvaaninen erotus ohjausosan ja kentän välille.

Lähetinvastaanottimeksi (D4) valitsin Texas Instrumentsin SN65HVD08:n, joka ylittää 10 Mbit/s signaalinopeuksille ja toimii käyttöjännitealueella 3,3–5 V. Kentän potentiaaliin (GNDBUS) valitsin käyttöjännitteeksi 5 V paremman yhteismuotoisen jännitesiedon toivossa.

Optoerottimia on kolme kappaletta tässä kytkennässä, joista ylemmässä löytyy kaksi erillistä erotinta saman kotelon sisältä. Molemmat erottimet toimivat siten, että valodiodin johtaessa toisella puolella näkyy invertoitu tila. Valodiodit eivät johda, kun PNP-transistorien (V27, V26 ja V24) kannoilla on suurempi jännite kuin emittereillä. Tällöin kannoille yhdistetyt mikrokontrollerin yleiskäyttöiset ulos- tai sisääntulonastat ovat kytkettyinä mikrokontrollerin käyttöjännitteeseen.

Optoerottimen ulostulossa näkyy myös tällöin ylösvetovastuksen kautta looginen 1. Kun mikrokontrollerin tai lähetinvastaanottimen ulostulonasta viedään ohjelmallisesti kytkimiä kääntämällä maihin, PNP-transistorit alkavat johtaa ja virta alkaa kulkea valodiodien kautta, koska kannan jännite on matalampi suhteessa emitteriin. Tällöin optoerottimet kytkvät ulostulot maihin, ja ulostulon tila muuttuu optoerottimilla loogiseksi 0:ksi.

PNP-transistorien kannan ja emitterin välille kannattaa kytkeä kapasitanssia purkamaan sopiva vastus. Optoerottimiksi valitsin Fairchildin HCPL-sarjasta HCPL-0601:n ja HCPL-0631:n, joista jälkimmäinen sisältää tuplaerottimet. Molemmat kykenevät 10 Mbit/s nopeuksiin, joten ne riittävät Modbusille mainiosti. Optoerottimien toisiota syötetään 5 V:n jännitteellä ja ensiötä 3,3 V:n jännitteellä.

Tässä kytkennässä vain lähetinvastaanottimen ohjainasteen ulostulot A ja B voidaan ajaa korkeaimpedanssiseen tilaan ohjaamalla DE-signaalia. Tämä on RS-485-spesifikaation vaatima ominaisuus eli vain yksi ohjainaste voi olla kerrallaan aktiivisena kentällä. Mikroprosessorin sarjaväyläohjaimen (UART-ohjaimen) lähettävä nasta (TX) kytketään väylän lähetinvastaanottimen ohjainasteen sisääntuloon (D) ja vastaanottava nasta (RX) väylävastaanottimen ulostuloon (R).

6.7.2 Profibus DP (RS-485) -protokollan toteutus

Profibus DP voidaan periaatteessa toteuttaa täsmälleen samalla tavalla kuin edellä on esitetty, koska molemmat pohjautuvat samaan fyysiseen rajapintaan (ks. liite 3). Opterottimet täytyy kuitenkin vaihtaa sellaisiin, jotka kykenevät vähintään 12 Mbit/s nopeuksiin, koska Profibus-signaali voi nopeimmillaan edetä tätä vauhtia. Tällaiseen soveltuvia erottimia ovat esimerkiksi Analog Devicesin digitaaliset iCoupler-erottimet, jotka sisältävät ilmasydämisen muuntajan, Schmitt-liipaisinpiirin ulostulossa signaalimuotoa parantamassa ja kykenevät jopa 100 Mbit/s signaalinopeuksille. Profibus-protokolla on lisäksi monimutkaisempi kuin Modbus-protokolla ja kaiken lisäksi lisenssin alainen. Tähän mennessä on tullut vastaan vain yksi mikroprosessori, josta löytyy sisäänrakennettuna Profibus-ohjain, ja se on Texas Instrumentsin valmistama AM1810-mikroprosessori, joka perustuu ARM9-ytimeen. Toinen vaihtoehto on hankkia varsin kallis ulkoinen ASIC-piiri, joka hoitaa samat temput ja on esitetty tämän ratkaisun kytkentäkuvassa (ks. liite 3).

Kytkenän ASIC-piiri on Profichipin valmistama Profibus DP-protokollaan kykenevä VPC3+S, joka voidaan liittää varsinaiseen mikroprosessoriin monella eri tavalla. Tässä ASIC-piiri liittyisi mikroprosessorille SPI-väylän yli (ks. taulukko 12), joka on synkroninen sarjaväylä, eli se tarvitsee erillisen kellopulssin toimiakseen oikein. SPI-väylä toimii hyvin, kun sen johtimet pidetään mahdollisimman lyhyinä ja ASCII-piiri on samassa potentiaalissa mikroprosessorin kanssa, jolloin ei tarvitse kompensoida signaalin kulkuaikeveitä erotuskomponenttien etenemisviiveiden takia.

Taulukko 12. SPI-väylän signaalien toiminnallinen kuvaus [44, s. 3]

SPI-signaalin nimi	Signaalin kuvaus
MISO	Master-In-Slave-Out, josta isäntälaitte vastaanottaa orjalaitteen lähettämät bitit
MOSI	Master-Out-Slave-In, josta isäntälaitte lähettää bitit renkilaitteelle
SCLK	Serial Clock, sarjaväylän kello
SS	Slave Select, jos renkilaitteita on useita, voidaan valita niistä se, jonka kanssa isäntälaitte milloinkin kommunikoi

Galvaaninen erotus tehtiin Analog Devicesin iCoupler-sarjaan kuuluvilla nopeilla digitaalisilla erottimilla, jotka ovat malliltaan ADUM1100. Ne toimivat käyttöjännitteillä 3,3 V ja 5 V. Ne kestävät tehollista eristysjännitettä 2,5 kV:n verran yhden minuutin ajan, joten ne kelpaavat toiminnalliseen erotukseen hyvin. Lähetinvastaanottimeksi valikoitui Profibusille optimoitu Texas Instrumentsin SN65HVD1176, joka kykenee 40 Mbit/s signaalinopeuteen.

6.7.3 CANopen-protokollan toteutus

CAN-väylän erotus toteutettiin samanlaisilla nopeilla digitaalisilla erottimilla, joita käytettiin edellä Profibus DP:n signaalien viemisessä erotusrajan yli (ks. liite 4). Kytkenässä käytetyt digitaaliset erottimet yltyvät helposti CAN-väylän 40 ns:n ajoitusvaatimukseen erottimille [4]. Perusteena oli kytkennän yksinkertaistuminen huomattavasti ja tilan säästö, koska ei tarvita erillisiä transistoreja ajamaan sisään ja ulostuloja. Lisäksi kytkennän yksinkertaisuutta lisää se, että käytetään mikroprosessorin sisäistä CAN-ohjainta, joihin TX- ja RX-nastat kytketään.

CAN-väyläkaapelin suojamaa vietiin RC-suodatinpiiriin kautta kotelon runkomaahan. Kentän puoleisia komponentteja ajetaan 5 V:n käyttöjännitteellä, jotta yhteismuotoisten jännitteen sieto olisi hyvä. Mikroprosessorin potentiaalipuolella komponentteja ajetaan taas puolestaan 3,3 V:n käyttöjännitteellä. Lähetinvastaanottimeksi soveltuu esimerkiksi Texas Instrumentsin SN65HVD251.

Integrointiastetta nostettiin sulauttamalla CANopen mahdollisimman tiiviisti Modbus RTU:n yhteyteen, koska molempien protokollien spesifikaatioista havaittiin, että niiden liittinnastat eivät mene päällekkäin käytettäessä tiettyjä liittintyypejä. Liittimeksi valittiin pintaliitosversio RJ-45:sta. Olen listannut molempien protokollien viemän toiminnon nastakohtaisesti ja tämä perustuu täysin asianomaisiin spesifikaatioihin (taulukko 13, ks. seur. s.).

Taulukko 13. Modbus RTU:n ja CANopenin signaalien sijoittuminen RJ-45-liittimen nastoihin [27, s. 29; 46, s. 1]

RJ-45-liittimen nasta	Nastan funktio CANopenin kannalta	Nastan funktio Modbus RTU:n (RS-485) kannalta
1	CAN_H	-
2	CAN_L	-
3	CAN_GND	-
4	Ei yhdistetty	B-kanava, pakollinen
5	Ei yhdistetty	A-kanava, pakollinen
6	CAN_SHLD	-
7	CAN_GND	-
8	(CAN_V+), vain DeviceNET	GND, pakollinen

Yllä olevaa taulukkoa katsottaessa täytyy ottaa huomioon se, että nyt on vain kyse Modbus RTU:n RS-485-pohjaisesta toteutuksesta 2-johdinversiona ja CANopenista, jolloin nastalla 8 ei ole merkitystä CAN-väylän kannalta. Ulkoinen jännitteensyöttöhän oli CAN-väylässä vain DeviceNET:llä, jota ei tässä työssä sen tarkemmin huomioitu.

6.7.4 Paneeliliittymän hyödyntäminen Modbus RTU:n ketjuttamisessa

ABB:n uuden sukupolven käyttäjäpaneeli taajuusmuuttajakäyttöön perustuu fyysiseltä tiedonsiirtorajapinnaltaan RS-485:een ja käyttää fyysisenä liittimenään RJ-45:sta. Perheytymättä sen tarkemmin paneeliin itseensä ohessa on pari kytkentäesimerkkiä siitä, kuinka Modbus RTU saataisiin ketjutetuksi paneeliliittimen läpi, jos asiakas ei erillisen paneelin tuomia lisäominaisuuksia kaipaa. Perusideana on se, että yhdellä tai korkeintaan kahdella ohjaussignaalilla prosessorilta voidaan kytkeä liittimen nastoihin joko paneelin tai Modbus RTU:n edellyttämä toiminnallisuus. ABB:n paneeli ei ota pienitehoisissa taajuusmuuttajissa kantaa RJ-45-liittimen nastoihin 3, 4 tai 5, mutta 8. nastan kautta on tarkoitus syöttää paneelille 15–24 V DC-jännitettä ja noin 70 mA virtaa.

RS-485-standardiin pohjautuva Modbus RTU:n kaksijohdinversio otti kantaa RJ-45:n nastoihin 4, 5 ja 8. Suunnitteluongelmaksi muodostuu siis lähinnä se, kuinka nastassa 8 vuorotellaan 0-potentiaalia ja tarvittavaa jännitesyöttöä siten, että saadaan paneelin tarvitsema virta myös läpi. Tämän kyseisen nastan tilaa on kyettävä valvomaan siltä varalta, että sähköt häviävät, asetukset palautuvat oletusarvoihinsa, mutta kytkentöjä ei ole vielä ehditty muuttaa. Tällöin esimerkiksi Modbus RTU:n 0-potentiaaliin saattaisi pahimmassa tapauksessa kytkeytyä suurehko syöttöjännite. Niinpä molempiin ratkaisuihin on rakennettu komparaattori valvomaan nastan 8 tilaa ja antamaan näin tieto ulostulostaan mikrokontrollerin yleiskäyttöiselle sisääntulonastalle, josta voidaan ohjelmallisesti lukea nastan 8 tila.

Molemmissa esimerkeissä on käytetty paneelin lähetinvastaanottimena Texas Instrumentsin RS-485-lähetinvastaanotina, jonka malli on SN65HVD08. Lähetinvastaanottimen ohjainasteen lähdöt A ja B (RJ-45-liittimen nastat 1 ja 2) asetetaan korkeaimpedanssiseksi silloin, kun paneeliliitintä halutaan käyttää kenttäväylän ketjutukseen. Ohjaussignaali (ENABLE_TRCVR) annetaan NPN-bipolaaritransistorin kannalle kytketyn vastuksen kautta virtaa siten, että sen jännite nousee vähintään 0,7 V suhteessa sen emitteriin (ks. liite 5 ja liite 6). Tällöin optoerottimen valodiodi alkaa johtaa, jolloin sen ulostulossa näkyy 5 V:n jännite, joka kytkeytyy lähetinvastaanottimen DE-nastan nostan sen aktiiviseksi (ks. liite 5 ja liite 6). Tällöin ohjainaste toimii. Ohjaussignaali (ENABLE_TRCVR) antaa vastuksen yli alle 0,7 V NPN-transistorin kannalle, kun paneeliliitintä halutaan käyttää ketjutukseen.

NPN-transistorin kannan ja emitterin välille on asetettu monessa kohdassa kapasitanssin purkausta varten vastus, koska tällöin virta pääsee kulkemaan sen yli kannalta emitterille. Kannalle on asetettu myös virranrajoitusvastus, joka muodostaa samalla kanta-emitterivastuksen kanssa jännitteenjaon. Jännitteenjaolla saadaan asetelluksi mikrokontrollerin ulostulosta tulevaa loogisen 0:n jännitetasoa niin pieneksi, että transistori varmasti lakkaa johtamasta, koska voi syntyä tilanne, jossa tämä jännitetaso ilman mitään kytkentöjä olisi luokkaa 1 V.

Ensimmäisessä vaihtoehdossa (ks. liite 5) ohjauksignaali (ENABLE_DS) mikroprosessorin yleiskäyttöiseltä ulostulonastalta antaa NPN-bipolaaritransistorin (V4) kannalle sopivankokoisen vastuksen yli riittävästi kantavirtaa, jotta kannalla olisi vähintään kynnyksjännitteen verran enemmän jännitettä kuin emitterillä, jolloin optoerottimen (V3-A) valodiodi alkaa johtaa transistorin läpi ja saa toisen puolensa johtamaan ulostuloon 5 V. Tällöin analoginen kytkinkomponentti (A2) saa positiivisen herätteen kahdelle kytkimien ohjauksnastoistaan. Tällöin Modbusin signaalit A ja B pääsevät etenemään vuoroosuuntaisesti nastojen 4 ja 5 kautta, koska kytkinkomponentti tukee kaksisuuntaista liikennettä. Samaan aikaan alempana NPN-bipolaaritransistori (V2) menee johtavaan tilaan saatuaan kannalleen riittävästi kantavirtaa. Tämä saa vaihtokosketinreleen (K2) muuttamaan tilaansa siten, että nastassa 8 näkyy 24 V:n jännitesyötön sijasta kytkennän 0-potentiaali.

Kytkenän ehdottomina haittapuolina ovat analogisen kytkimen ja varsinkin vaihtokosketinreleen hitaus. Vaihtokosketinrele vie myös merkittävästi tilaa piirilevyiltä. Vaihtokosketinreleen hyviin puoliin kuuluu korkea jännitekestoisuus ja käytännössä olematon resistanssi kosketinnapojen välillä. Komparaattori (A5) valvoo, onko nastassa 8 jännitettä vai 0-potentiaali. Jos komparaattorin ei-invertoivan (+) tulon jännite nousee vähintään invertoivan (-) nastan jännitteen eli referenssijännitteen verran ylöspäin, komparaattori antaa käyttöjännitteensä eli 5 V ulostuloon. Jos taas ei-invertoivan nastan jännite laskee vähintään referenssijännitteen verran alaspäin, komparaattori antaa ulos 0 V.

Toisessa vaihtoehdossa (ks. liite 6) on käytetty ensimmäiseen vaihtoehtoon verrattuna nastan 8 ohjauksessa NPN-bipolaaritransistorin (V22) ja teho-operaatiovahvistimen (A1-A) yhdistelmää. Kun alemman optoerottimen (V21-A) ulostulossa näkyy 5 V, NPN-bipolaaritransistori menee johtavaan tilaan ja sen kollektorilla näkyy maataso. Tässä vaiheessa teho-operaatiovahvistimen tulee sallia virran kulku ulostulostaan eli nastalta 8 piirilevyn nollaan. Samaan aikaan analoginen CMOS-kytkin (A2) saa positiivisen herätteen ohjauksuloihinsa ja kytkee signaalit A ja B nastoihin 4 ja 5. Kun NPN-bipolaaritransistorin (V22) kannalla on alle 0,7 V:n ohjauksjännite, 24 V:n syöttö pääsee kellumaan sen kollektorille.

Siitä se pääsee edelleen teho-operaatiovahvistimen läpi, josta on tehty jänniteseuraaja, koska tarvitaan sovitus korkea-impedanssisesta piiristä matala-impedanssiseen. Teho-operaatiovahvistin pystyy antamaan ulos jopa 1 ampeeria virtaa ja sellaiseksi on valittu Texas Instrumentsin OPA541. Komparaattori (A5) valvoo tässäkin nastan 8 tilaa.

6.7.5 Ethernet-liitynnän toteutus

Ethernet-liityntä (ks. liite 7) on toteutettu aiemmin esitettyjen reunaehtojen mukaisesti. Kyt kenttään on valittu sellainen liitin, jossa on sisäänrakennettu muuntaja ja ledit, jotta tilaa säästyisi mahdollisimman paljon. Ethernetin differentiaaliset lähetys- ja vastaanot-tosignaalit (TX+/-, RX+/-) on kytketty erilliseen PHY-piiriin, joka toimii fyysisen kerrok-sen lähetinvastaanottimena. Erotuksesta ei tässä kytkennässä tarvitse erikseen kantaa huolta, koska integroitu muuntaja tekee sen itse. PHY tarvitsee tavallisen käyttöjännit-teen lisäksi suodatetun jännitesyötön, joten käyttöjännitettä suodatettiin hieman pie-nen kelan kautta, jotta suurimmat transientit saataisiin kuriin. PHY tarvitsee myös ul-kaisen kellosignaalin ja keskustelee mikroprosessorin kanssa MII-rinnakkaisväylän väli-tyksellä.

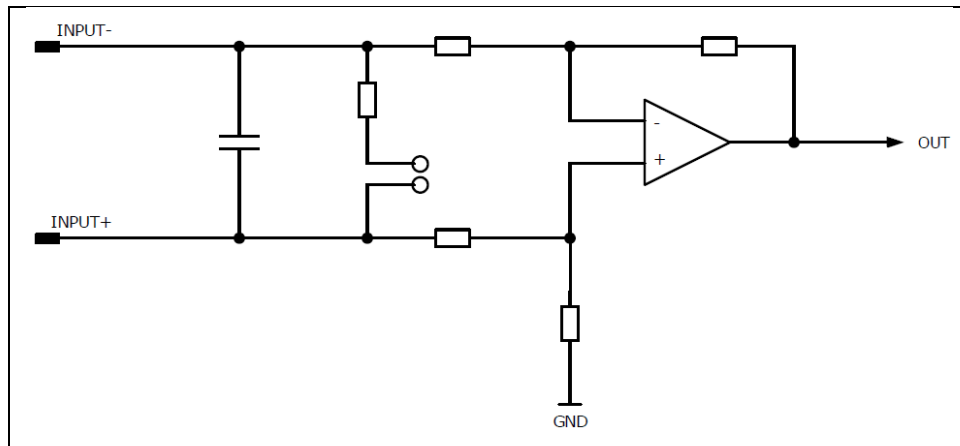
Ethernet-liittimeksi kävi PulseJackin valmistama J1-sarjan liitin, jossa on tilaledien lisäk-si sisäänrakennettu muuntaja. Tämä muuntaja on suunniteltu kestämään 1,5 kV tehol-lista eristysjännitettä minuutin ajan. PHY:ksi valikoitui Micrelin valmistama KZS8041NL, joka on 10/100 Mbit/s-nopeuksiin kykenevä lähetinvastaanotin ja toimii 3,3 V:n käyttö-jännitteellä.

Piirissä on sisäänrakennettu jänniteregulaattori ytimen käyttöjännitettä varten, joten yksi ulkoinen käyttöjännite riittää. Micrel lupaa 6 kV:n ESD-kestoa piirilleen. Mikropro-processoriksi kelpaa mikä tahansa MII-väylää tukeva laite, jolloin siinä on myös Ethernet MAC -ohjain.

6.7.6 Kytkennän komponenttien sijoittelu määrätylle pinta-alalle

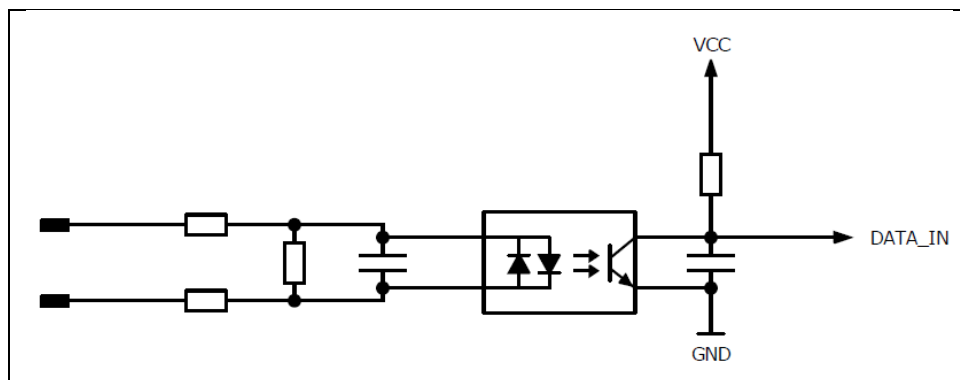
Esivaatimusten perusteella (taulukko 11, ks. ed. s.) suunniteltiin alustava kytkentäkaa-vio PADS Logic 9.2 -ohjelmalla. Kun kytkentä oli saatu valmiiksi, alettiin sen pohjalta suunnitella piirilevyä (ks. liite 8) PADS Layout 9.2 -ohjelmalla.

Analogiatulosta tehtiin differentiaalinen (ks. kuva 35) 200 k Ω :n sisäänmenokuormalle jännitealueelle -10–10 V ja virta-alueelle -20–20 mA 100 Ω :n sisääntulokuormalle. Tulopuolella on suodatuskondensaattori ja oikosulkupala jännite- tai virtatulon valitsemista varten. Oikosulkemalla väli A-B muuttuu differentiaalivahvistin virtaa vastaanottavaksi, kunhan R_s on paljon pienempi kuin syöttävän silmukan resistanssi.



Kuva 35. Periaatekytkentä differentiaalisesta analogiatulosta, joka tukee virta- ja jännitetuloa

Digitaalituloja (ks. kuva 36) suunniteltiin piirilevyllä 2 kpl:tta AC-optoerottimilla, joihin tulosignaalin voi kytkeä kummin päin tahansa. AC-optoerotin perustuu kahteen vastarinnan kytkettyyn LEDiin, joten se sietää tulosignaalin molemmat polariteetit. Tämä ehkäisee asennusvirheitä tehokkaasti. Sisääntulonastojen jälkeen on muutama virranrajoitusvastus ja suodatuskondensaattori ja ulostulopuolella ylösvetovastus ja suodatuskondensaattori.



Kuva 36. Digitaalitulo toteutettuna AC-optoerottimella

Relelähdtöjä suunniteltiin yksi kappale ja se asetettiin vaihtokosketinreleellä kestämään 230 V vaihtojännitettä. Lähtö muistuttaa hyvin pitkälti edellä esitettyä ensimmäistä ratkaisua Modbusin ketjuttamisesta (ks. liite 5), jossa ohjauksella NPN-transistorin kannalle ohjattiin releen koskettimia ja annettiin vuorotellen ulostulonastaan joko 24 V tai 0 V. Sitä soveltamalla saadaan hyvinkin toimiva relelähdtö rakennettua.

Optiomoduuliliittimeksi asetettiin 20-nastainen kaulustettu piikkirima, joka on taaksepäin yhteensopiva ABB:n F-sarjan kenttäväyläadapterien kanssa. Tämän liittimen nastojen kautta kuljetetaan sarjaväylää pitkin tieto ja syötetään 3,3 V käyttöjännitettä kortille. Kaulustus tukee hyvin piikkiriman mekaanista rakennetta.

24 V:n jännitesyöttö ulospäin toteutettiin siten, että otettiin taajuusmuuttajan pääpiirillä olevalta flyback-muuntimen yhdeltä toisiokäämiltä käyttäjäpotentiaalia vasten 24 V tasajännitettä. Jännitesyöttö tuotiin riittävän paksuista johdinta pitkin kortille ja kytkettiin digitaalitulojen liittimen yhteyteen vapaaseen nastaan. STO-signaalit kierrätettiin kortin pääpiiriliittimen kautta pääpiirille, ja sen kytkentälogiikkaan ei perehdytty sen kummemmin, koska sen toiminta tapahtuu välipiirin potentiaalissa toisella kortilla.

Kenttäväylistä Modbus RTU ja CANopen integroitiin kortille pintaliitostyyppisen RJ-45-liittimen taakse. Lisättiin myös tuki uuden sukupolven paneeliliitynnälle toiseen vastaavanlaiseen liittimeen ja mahdollisuus ketjuttaa Modbus RTU tämän kautta, jos paneelia ei haluta käyttää. Ethernet-liityntä toteutettiin lisäominaisuutena metallikoteloidulla RJ-45-liittimellä, jossa on sisäänrakennettu muuntaja. Suunnittelun pohjana käytettiin edellä läpikäytyjä kytkentäratkaisuja.

Liittimeksi digitaali- ja analogiatuloille, sekä 24 V:n jänniteulostulolle valittiin laadukkaat Phoenix Contactin MSTBVA2.5/5 -liittimet. Optiomoduuliliittimeksi valittiin kaulustettu 2x10-nastainen piikkirima, jonka nastaväli on 2 mm. STO-liitynnälle käytettiin modulaarista SMKDSN1P5/4-liitintä, jonka nastat ovat viistosti käyttäjään päin helpottamassa kaapeleiden kytkemistä. Kaikki yllä mainitut liittimet ovat myös pesäkkeestään irrotettavia, mikä on hyvä asia kiinnitettäessä kaapeleita liittimiin vaikeissa asennuskohteissa.

Pinta-alaa oli käytettävissä melko rajoitetusti eli vain noin 70 cm^2 (60 x 130 mm) kummallakin puolella. Valtaosa liittimistä oli valitettavasti läpiladottavia, joten niiden kohdalle kortin kääntöpuolelle sai mahtumaan vain rajoitetusti pienikokoisia pintaliitoskomponentteja. Kortille tehtiin galvaaninen erotus, joka on myös nähtävissä liitteenä löytyvistä kuvista (ks. liite 8). Se erottaa muun muassa kenttäväylät, kotelopuhaltimen ja digitaalitulot muusta tietoliikenneosasta. Analogiatulot ovat samassa potentiaalissa mikrokontrollerin kanssa. Ethernet-liityntä kelluu omassa potentiaalissaan muuntajansa ansiosta. Piirilevyn vastakkaisissa ylä- ja alanurkissa on runkomaalle läpiporatut maadoitusreiät. Liittimien tilantarpeesta tehtiin selvitys ja todettiin, kuinka merkittävästi komponenttivalinnat niiden osalta vaikuttavat lopputuloksen onnistumiseen (ks. taulukko 14).

Taulukko 14. Merkittävimpien liittimien viemä pinta-ala piirilevyn kokonaisalasta

Liittimen tarkoitus	Pinta-ala (L x K) / mm^2	%-osuus kokonaispinta-alasta yhdellä puolella
Analogiatulo	243	3,12
Digitaalitulo	243	3,12
Mikroprosessorin testausliitin	240	3,08
Relelähtö	144,5	1,85
Optiomoduuliliitin	146,25	1,88
Paneeli	317,75	4,07
Safe Torque Off	252	3,23
Kenttäväylät	317,75	4,07
Ethernet-liitin ja muuntaja	408	5,23

Voimme hyvin nähdä, että Ethernet-liitin muuntajalla, STO-liitin, kenttäväylä- ja paneeliliitin sekä analogia- ja digitaalipuolen liitin vievät piirilevyltä eniten pinta-alaa kaikista. Mikrokontrollerin testausliitin todennäköisesti saadaan poistaa valmiista tuotteesta, jolloin sen viemä tila vapautuu, ja sitä voidaan hyödyntää esimerkiksi jänniteregulaattorin jäähdyttämisesä.

7 Pohdintaa kenttäväyläratkaisusta

7.1 Ratkaisumallien hyvistä ja huonoista puolista

7.1.1 Mallin 1 hyvien ja huonojen puolien puntarointia

Yhdelle mikrokontrollerille on helpompaa kehittää sovellus kuin useammalle ja yksi sellainen monipuolinen hallitsee kätevästi useita toimintoja ja yksinkertaistaa tiettyjä kenttäväylä- ja tietoliikenne ratkaisuja merkittävästi. Tiedon liikutteluun eri toiminnallisten osien välillä voidaan käyttää sen sisäisiä muistiväyliä, jotka ovat huomattavasti nopeampia kuin jokin sarjaväylä. Olemassa olevia optiomoduuleja voidaan kytkeä ohjauskorttiin tuomaan lisätoiminnallisuutta tarvittaessa. Ethernet-liityntää voidaan käyttää kenttäväylälinkkinä. Paneeliliityntää voidaan käyttää myös työkalulinkkinä.

CANopen ja Modbus RTU toimivat saman RJ-45-liittimen kautta, mikä säästää tilaa. Mittaussignaalit voidaan tuoda suoraan prosessorin A/D-muuntimelle käsiteltäväksi, jolloin niiden tarkkuus ei heikkene erotuskomponenttien takia, ja PWM-ohjaussignaalit voidaan kytkeä suoraan IGB-transistorien hiloille – kaikki tämä siitä syystä, että ollaan välipiirin potentiaalissa.

Toisaalta halvempien mikrokontrollerien prosessoreissa saattavat kylläkin ominaisuudet riittää, mutta ei kapasiteetti kaikkien palveluiden samanaikaiseen suorittamiseen, jos vasteaikavaatimukset ovat liian tiukat. Kentän signaalien tuominen turvaerotusrajan yli rikkoo tietoliikenneosan tiedonsiirron tarkkuutta. Lisäksi turvaerotusrajapinta vie melkoisesti pinta-alaa ohjauskortilta ja tuhoaa samalla hyvät maatasot. Jännitteet kasvavat kohtalaisen suuriksi myös välipiirin negatiivisessa potentiaalissa, mikä saattaa aiheuttaa ongelmia prosessorin toimintaan.

Ethernet-muuntajan eristysjännitekestävyys ei ole välttämättä riittävä turvaerotusrajapinnassa, sillä se on aika lähellä välipiirin ylähaaran huippujännitteitä verrattuna optoerottimien eristysjännitekestävyyteen (vertaa Fairchild:n optoerotinta HCPL-0601 Halo Electronics:n muuntajaan TG110). Pahimmassa tapauksessa se voidaan joutua ottamaan pois ohjauskortilta ja Ethernet-pohjaisten kenttäväylien integrointi ei ole enää mielekästä tässä mallissa.

7.1.2 Mallin 2 hyvien ja huonojen puolien puntarointia

FPGA-piirillä toteutettuna levy kykenee moneen eri sovellukseen kohtalaisen pienin muutoksin. Kenttäväyläadapteri antaa valinnanvapautta käyttäjälle, eikä peruslaitteeseen tarvitse integroida sellaista, mitä kaikki eivät välttämättä tarvitse. Adapterin hintaa saadaan alaspäin, jos toiminnallinen erotus tehdään jo ohjauskortilla. Jonkin muun tietoliikenneosan liittintä voidaan käyttää myös adapterikortin liittimenä, jos ne käyttävät samaa fyysistä rajapintaa (esim. RS-485). Tilaa säästyy ohjauskortilta, kun toiminnallisuutta siirretään adapterikortille. Kustannusrasitetta voidaan jakaa myymällä kenttäväyläratkaisuja optioina, jotka muuten nostaisivat peruslaitteen hintaa. Toiminnallinen erotus vaatii kortin ominaisuuksista riippuen 2-3 kpl:tta lyhyen ryömintä- ja ilmavälin erotuskomponentteja ja turvaerotukseen soveltuvia tarvitaan vain 2 kpl:tta.

FPGA-piirit ovat isokokoisia ja suhteellisen kalliita, sekä logiikkaelementit vievät kehitysaikaa ja rahaa. FPGA-piirille täytyy usein tuoda muutamia eri käyttöjännitteitä, jolloin flyback-muuntimen vaatimukset kasvavat. Tehonsyötön virranantokyky on rajallinen optiomoduuleille ja tämä rajoittaa kortin monipuolisuutta. Lisäksi tehonsyöttö pitää järjestää niin, etteivät liittimien ylimenoresistanssit tai pitkät piirilevyvedot aiheuta jännitteen alenemaa maksimi kuormavirralla. Erillisen adapterin pakkoasentaminen on aina oma vaivansa ja vaikuttaa käyttökokemukseen ja hinta-ominaisuussuhteeseen asiakkaan silmissä.

7.1.3 Mallin 3 hyvien ja huonojen puolien puntarointia

Kahden prosessorin järjestelmässä saadaan kohtalaisen hyvät maatasot sekä moottorinohjaukseen että tietoliikennekortille, koska erotusväleille ja liittimille jää enemmän tilaa kuin mallissa 1. Yhden mikrokontrollerin prosessorin kuorma jakautuu nyt kahdelle prosessorille ja toimintoja saadaan ainakin näennäisesti tehostetuksi.

Sarjaväyläinen optioliitin monipuolistaa liitännämahdollisuuksia, ja optiokorteista saadaan mahdollisesti yksinkertaisempia, koska tietoliikenneprosessori on erikseen – käytännössä malli 2 yhdistyy malliin 3 tarvittaessa. Voidaan mahdollisesti käyttää entistä parempia moottorinsäätöalgoritmeja, koska moottorinohjaukselle on nyt oma prosessorinsa.

Asynkronisen sarjaväylän ansiosta kelloviiveitä ei tarvitse ottaa huomioon siirrettäessä tietoa turvaerotusvälin yli. Kahden erillisen osan tuoma modulaarisuus on valmistajalle etu, koska pelkällä pääpiirillä ja yksinkertaisella sarjaväyläoptiolla voidaan mahdollisesti toteuttaa myös yksinkertainen taajuusmuuttaja. Asynkronisen sarjaväylän yli toimiva tiedonsiirtoprotokolla määrää pitkälti sen, kuinka hyvin tai huonosti työnjako kahden prosessorin välillä onnistuu.

Sovelluskehitys todennäköisesti vaikeutuu, koska pitää miettiä taajuusmuuttajalla suoritettavaa ohjelmistoa kahden prosessorin kannalta. Esimerkiksi soljuvan tiedonsiirron järjestäminen kahden eri ohjelmamuistin välillä sarjaväylän yli voi olla vaikea tehtävä. Lisäksi kysymys siitä, miten sama käyttöjärjestelmä ladataan molemmille prosessoreille, on haastava. Prosessorit saattavat myös nostaa peruslaitteen valmistuskustannuksia verrattuna yhden prosessorin järjestelmään. Asynkroninen sarjaväylä voi olla myös pullonkaula, jos vasteaikavaatimukset ovat liian suuria tai tiedonsiirron ajoituksia ei onnistuta tekemään kunnolla.

7.2 Häiriöimmunitietin tärkeys kenttäväyläratkaisuissa

On eriarvoisen tärkeää, että kentän puoli erotetaan galvaanisesti mikrokontrollerista, koska välimatkat kentällä voivat olla hyvinkin pitkiä ja tästä johtuen maadoituspisteiden välille saattaa jäädä korkeita potentiaalieroja, joka näkyy lähettimien ulostulossa yhteismuotoisena häiriösignaalina (common mode noise). Toisistaan etäisten pisteiden maajohtojen yhdistäminen ei myöskään ole järkevä idea, koska tämä saattaa saada suuret maavirrat kiertämään maadoituspisteiden ja asennusmaan välille.

Nämä häiriövirrat voivat hyvinkin indusoida signaalijohtimiin ja aiheuttaa jälleen yhteismuotoista kohinasignaalia. Esimerkiksi RS-485-spesifikaatiossa suositellaan maadoituspisteiden yhdistämistä ja jokaisen pisteen kytkemistä 0-potentiaaliin vastusten kautta, mikä rajoittaisi kiertävää silmukavirtaa kytkennässä.

Maasilmukka (ground loop) ei kuitenkaan häviä mihinkään, vaan aiheuttaa edelleen ongelmia muualla kytkennässä altistaen johtimia yhteismuotoiselle kohinasignaalille. Varmin tapa päästä eroon yllä mainituista ongelmista on käyttää galvaanista erotusta. Tällöin signaalit erotetaan toisistaan optoerottimilla ja esimerkiksi DC/DC-muuntimella tehdään toisistaan erilliset käyttöjännitteet ensiö- ja toisiopuolelle (kuva 30, ks. ed. s.).

Käyttöjännite kannattaa pitää kentänpuolisille komponenteille mahdollisimman korkeana (tyypillisesti 5 V:ssa) – kuitenkin sallituissa rajoissa – kohtalaisen hyvän yhteismuotoisen häiriöjännitteen siedon takaamiseksi. Tällöin hyötysignaali erottuu paremmin kohinasta.

7.3 Kenttäväyläkomponenttien valintakriteereistä

Kenttäväyläkomponenteiksi voidaan lukea lähetinvastaanottimet, spesifioidut liittimet, erotuskomponentit ja mikrokontrolleri, jossa on kunkin kenttäväyläprotokollan taitava ohjainlohko. Kenttäväyläprotokollan fyysinen tiedonsiirtorajapinta määrää yksinomaan vaadittavan lähetinvastaanottimen tyyppin. Tämä tarkoittaa siis sitä, että esimerkiksi RS-485-väylän hyödyntämistä varten valitaan lähetinvastaanotin, joka on tälle spesifioitu.

Haluttu liitin voidaan triviaalisti valita kunkin kenttäväylän spesifikaatioiden antamista vaihtoehdoista. Suunnittelijan puntaroitavaksi jää liittimen yksikkökustannus, mekaaninen paremmuus muihin nähden ja fyysinen koko. Kenttäväyläprotokollan tarvitsemat nastat kannattaa myös tarkistaa spesifikaatioista, sillä voi olla, että käyttämättä jääneiden nastojen kautta myös jonkin toisen kenttäväylän saa tuoduksi saman liittimen läpi.

Galvaaninen erotus on tehtävä maksimaalisen häiriöimmunitetin aikaansaamiseksi, jolloin erotusrajapinnan yli liikennöivien komponenttien laatu on kenttäväyläratkaisun toimivuuden kannalta erittäin tärkeä asia. Optoerottimet ovat yleisesti ottaen hitaita ja heikentävät tarpeettomasti signaalimuotoja, mutta ovat riittävän nopeita useisiin soveluksiin ja kustannustehokkaita. Niiden käyttökelpoisuus eri sovelluksiin selviää kulkuai-kaviiveestä ja väylän vaatimasta minimiviiveestä.

Sotkuista signaalia voidaan vielä siivota Schmitt-liipaisinpiirin avulla. Kenttäväylät, joissa signaalinopeus on suuri (yli 10 Mbit/s) tulee harkita muuntajiin perustuvia erottimia, joissa erotus ei juuri rajoita signaalin kulkuaikaa tai vääristä sen muotoja.

Mikrokontrolleriksi kannattaa valita sellainen, jonka prosessorin kellotaajuus on ainakin luokkaa 100–150 MHz, jotta teollisuudessa käytettyjen kenttäväylin – etenkin Profibus:n eri variaatioiden – suorittaminen tiukempien vasteaika vaatimusten (luokkaa 1 ms) mukaisesti olisi mahdollista. Mikrokontrollerin datalehdeltä tulee lisäksi varmistaa, että halutut protokollalohkot löytyvät sen oheislaiteluettelosta.

7.4 Tulevan ratkaisun pohdintaa

Tähän asti on kustannussyistä päädytty kerta toisensa jälkeen ratkaisuun, jossa taajuusmuuttajan ohjauksesta huolehtivan mikrokontrollerin prosessori on kytketty välipiiriin potentiaaliin, koska tietoliikenneliitännöjen määrä ei ole ollut vielä niin suuri painoarvotekijä. Lisäksi erotusratkaisu on tullut tällä tavalla laskennallisesti halvemmaksi verrattuna siihen, että suoritin olisi käyttäjäpotentiaalissa. Kysymys erotusratkaisusta on kuitenkin vireillä jatkuvasti ja on mietittävä vaihtoehtoisia ratkaisuvaihtoehtoja, koska tietoliikenneliitännöjen määrä kasvaa ja piirikortilla käytettävissä oleva pinta-ala on hyvin rajallinen.

Käyttäjäpotentiaaliin kytketty tietoliikenneosasta huolehtiva mikrokontrolleri on siten vähintäänkin perusteltu vaihtoehto tulevissa ratkaisuissa. Erotuskomponenttien ei todellakaan haluta vievän tilaa tai hajottaa signaalitarkkuutta siellä, missä uudet liittimet ja kenttäväylät valtaavat alaa.

Kahden prosessorin järjestelmä, jonka tietoliikenneosassa dominoivat kenttäväylät on kaikkein järkevin tulevaisuuden ratkaisu pienitehoiseen taajuusmuuttajaan, koska tällöin tietoliikenneosan liitännöjen määrää voidaan kasvattaa varauksettomammin kuin järjestelmässä, jossa sekä moottorinohjaus että tietoliikennepuoli olisivat samalla piirilevyllä. Ratkaisun järkevyyttä vastaan sotii lähinnä tietämättömyys siitä, kuinka hyvin sovellusalusta saadaan sovitettua tällaiseen järjestelmään.

Elektroniikan näkökulmasta ratkaisu on sikäli hyvä, koska kytkennän nolatasoille saadaan riittävän hyvä pinta-ala myös pienillä ohjauksorteilla, kun toiminnallisuutta on hajautettu. Tulee pyrkiä myös siihen, että mikrokontrolleri ei tarvitse haluttujen toimintojen toteuttamiseen ulkoista ohjelmamuistia, sillä ulkoiset muistipiirit mahtuvat huonosti ahtaisiin paikkoihin ja rinnakkaisväylien vedot ovat hankalia tehdä ahtaassa tilassa.

Tietoliikenneosan mikrokontrollerin tulee olla riittävän suorituskykyinen ja sisältää tarpeeksi muistia, jotta kentälle voidaan vastata kohtuullisessa ajassa. Sovellusparametrit, kuten esimerkiksi käytettävä kenttäväyläprotokolla ladataan ulkoiselta sarja-flashmuistilta, joka on tyypillisesti 2 Mt:n kokoinen. Eri toiminnoille on osoitettu mikrokontrollerin muistista ennalta määritellyt muistialueet, mutta lisäpuskurointia varten voidaan hyvinkin tarvita ulkoista RAM-muistia. Mikrokontrollerin käyttöasteen lisäksi valittu kenttäväyläprotokolla vaikuttaa ratkaisevasti muistin tarpeeseen. Esimerkiksi Freescalen tuleva ARM Cortex M4 -yttimeen pohjautuva Kinetis-prosessoriperhe sisältää parhaimmillaan 512 kt sisäistä flash-muistia ja 128 kt RAM-muistia, minkä pitäisi vastata ainakin CANopenin ja Modbus RTU:n muistitarpeisiin.

Muistin tarve selkiytyy kehitysprosessin edetessä, mutta lähtökohdaksi on hyvä ottaa se, että vain valitun prosessorin ohjelmamuistia käytetään kaikkien toimintojen mahdollistamiseksi. Näin helpotetaan piirilevyn reititysprosessia ja osasijoittelua, kun osia tulee vähemmän, eikä ulkoisen muistipiirin rinnakkaisväylien pituuksia ja ajoituksia tarvitse huomioida. Kaiken lisäksi säästetään piirilevytilaa ja rahaa, sillä riittävän suuren kapasiteetin ulkoiset muistipiirit ovat yllättävän kookkaita komponentteja ja melko kalliita. Toisin sanoen tulisi valita eniten sisäänrakennettua muistia sisältävä malli mikrokontrollerista jo suunnitteluvaiheessa, jos mahdollista.

Ohjelmamuistin tarpeen määrää Ethernet-pohjaisessa kenttäväyläratkaisussa pitkälti se, kuinka monta protokollaa on käytettävissä. Yksi Ethernet-kehys voi olla pituudeltaan jopa 1 500 tavua, kehykset on pystyttävä käsittelemään tietyssä ajassa ja kentälle pitää vastata tietyin aikaväleihin. ABB:n koneenrakentajille tarkoitetun markkinasektorin puolelta vasteaikavaatimukset Ethernet-liitynnälle ovat 1 ms:n luokkaa.

Hetkellistä tallennustilaa tarvitaan siis kehyksen kerrannaisille, jos vasteaikavaatimukseen ei keritä. Ohjelmamuistin puskuria voidaan myös säätää, mutta jos se asetetaan liian pieneksi voi tapahtua ajonaikaisia ylivuotoja, jolloin sanomia valuu pahimmassa tapauksessa hukkaan.

Paneeliliitännän käyttämistä Modbus RTU:n ketjuttamiseen kannattaa miettiä tarkasti, koska ABB Oy:n tulevien tuotteiden tapauksessa RJ-45-liittimen kahdeksannessa nastassa on paneelin tehonsyöttö. Modbus RTU:n kaksijohdinversiolle tämä on taas kytkennän nollapotentialiaali. Ei välttämättä voida löytää sellaista kustannustehokasta ja turvallista ratkaisua, jossa asennusvirheistä tai tehonsyötön äkillisestä katkeamisesta aiheutuva parametrien nollautuminen ei rikkoisi joko kentänpuoleisia laitteita tai itse taajuusmuuttajaa – kytkentöjä sähköjen katkeaminen ei kuitenkaan irroita.

Edellä esitetyt kytkentäratkaisut ja uudet mikrokontrollerit kuitenkin osoittavat sen, että pienitehoiseen taajuusmuuttajaan kannattaa nyt integroida vähintään kaksi yleistä kenttäväylää eli CANopen ja Modbus RTU. Tarpeeksi suurilla volyyymeilla kenttäväyläkomponenttien kustannuksiakin saadaan vähennettyä.

8 Johtopäätökset

Kaikki haluttu toiminnallisuus saatiin monen reititys- ja sijoitteluyrityksen jälkeen mahdumaan annetulle alueelle ja työtä voidaan siinä mielessä pitää onnistuneena. Kortista ei voida vielä kuitenkaan tuottaa testikappaletta, koska kriittisin komponentti eli siihen valittu mikrokontrolleri ei vielä ole tuotantoon asti ehtinyt.

Sijoittelun ongelmallisimpina komponentteina ovat ehdottomasti tietoliikenneliittimet, koska ne vievät melkoisesti pinta-alaa piirilevyiltä ja niitä on paikoitellen hankalaa saada sopimaan tiettyyn väliin. Ne ovat isompia kuin nykyisissä pienitehoisissa taajuusmuuttajissa, koska asiakkaat ovat toivoneet vähintään 2,5-neliömillimetrisiä liittimiä. Pienelle laitteelle tämä on kiperä suunnitteluhaaste.

Parhaimmaksi sijoittelustrategiaksi osoittautui se, että eri toiminnalliset osat kannatti niputtaa aluksi omiksi ryhmikseen ennen koko kytkennän asettamista piirilevyrajojen sisälle. Tällä tavalla silmä tottuu eri kokonaisuuksiin ja optimointia voidaan tehdä vielä pitkään ennen osakokonaisuuksien yhdistämistä keskenään. Vastus- ja kondensaattori-kokoja kannattaa myös tosissaan miettiä, koska piirilevyllä ne vievät merkittävästi tilaa.

Oman lukunsa tekevät toiminnallisen erotuksen mukanaan tuomat vaatimukset. Toteutetulla piirilevyllä on käytetty sellaisia optoerottimia, joiden ryömintäväli on luokkaa 4,4 mm. Tämä on ainakin riittävä erotusväli toiminnallisen erotuksen näkökulmasta, mutta se vie paljon pinta-alaa piirilevyiltä ja vaikeuttaa muuta komponenttisijoittelua. Varaa on tässä siis kutistaa, mutta sitä ei saa kuitenkaan missään nimessä unohtaa.

Komponenttien kohtalaisen lukumäärän vuoksi kortti päätettiin tehdä kahdeksankerroksiselle levyille, jottei reitityksessä tulisi ongelmia ja signaalit pääsisivät kulkemaan suhteellisen järkeviä reittejä. Reititys oli pitkälti diagonaalista (nurkasta nurkkaan vinosti) ja jokaisessa kerroksessa reititettiin signaalit aina kohtisuoraan ylempään ja alempaan kerrokseen nähden EMC-immuniteetin parantamiseksi. Mikrokontrolleri ja siihen liitetyt ulkoiset muistit sijoitettiin mahdollisimman keskelle piirilevyä silmukoiden välttämiseksi. Analogiatulot pidettiin poissa häiriöllisemmästä kentän puolesta. Myös käyttämätön pinta-ala ylimmässä ja alimmassa kerroksessa valjastettiin kytkennän maatasoiksi paremman EMC-immuniteetin toivossa. Yksi kerros valjastettiin jännitesyötöille ja toinen pelkille maatasoille edellä esitettyjen periaatteiden mukaisesti.

Useita vuosia on jo odotettu sitä, milloin kenttäväylät lopullisesti syrjäyttävät perinteiset tietoliikennetkaisu eli digitaali- ja analogiapuolen liittynät. Ethernetin yleistyttyä kuluttajien keskuudessa sitä aletaan pikku hiljaa edellyttää myös teollisuuden tarpeisiin tarkoitetuista laitteista. Voittajiksi selviytyvät ne, jotka onnistuvat sulauttamaan mahdollisimman paljon kenttäväyliä yhden liittimen taakse. Periaatteessa tämä ei ole ihan helppo tehtävä, jos väylät eivät toimi saman fyysisen rajapinnan päällä, koska signaalien multipleksaus aiheuttaa aina kulkuaikaviivettä ja pilaa pahimmassa tapauksessa tiedonsiirron edellytykset.

Lähteet

- 1 Ydinliiketoiminnat. 2011. Verkkodokumentti. ABB Oy.
<<http://www.abb.fi/cawp/fiabb251/5b3b47abc1e9e75dc2256b20003f96db.aspx>>
. Luettu 19.1.2011.
- 2 Niiranen, Jouko. 1999. Sähkömoottorikäyttöjen digitaalinen ohjaus. Helsinki: Otatieto.
- 3 ABB Oy. 2000. TTT-käsikirja luku 18: Sähkömoottorikäytöt.
- 4 ABB Oy. 2000. TTT-käsikirja luku 16: Tehoelektronikka.
- 5 Pulse width modulation technology for HVDC Light. 2010. Verkkodokumentti. ABB.
<<http://www.abb.com/industries/db0003db004333/b51c9a85f6ef1505c12574830027bb85.aspx>>. Luettu 11.11.2010.
- 6 SKIIP 12NAB126V1. 2005. Verkkodokumentti. SEMIKRON.
<<http://www.compel.ru/pdf /SMK/525.pdf>>. Luettu 5.4.2011.
- 7 Suomela, Kalle. 2001. Cost-effective sensorless vector control of induction motor at low speeds. Helsinki University of Technology. Diplomityö.
- 8 IEC 61800-5-1. 2007. Adjustable speed electrical power drive systems - Part 5-1: Safety requirements - Electrical, thermal and energy. Standardi.
- 9 Low Power AC –tuotekehitystiimi. 2010, 2011. ABB Oy, Helsinki. Keskustelut 3.9.2010-31.3.2011.
- 10 Calculating Creepage and Clearance Early Avoids Design Problems Later. 2001. Verkkodokumentti. Ahmadi, Homi. <<http://www.cemag.com/cemag.com/archive/01/03/ProductSafety.html>>. Luettu 8.3.2011.
- 11 TLP582 datasheet and Application Note. 2001. Verkkodokumentti. Toshiba.
<<http://www.datasheetarchive.com/pdf-datasheets/Datasheets-312/177704.html>>. Luettu 5.4.2011.
- 12 Elektronikka I luento 12: Digitaalipiirit. 2001. Verkkodokumentti. Lindfors, Saska.
<http://www.ecdl.tkk.fi/education/010/LKALVOT/ele1_12.pdf>. Luettu 6.4.2011.
- 13 HCPL-0708 - High Speed CMOS Optocoupler. 2008. Verkkodokumentti. Avago Technologies. <<http://www1.futureelectronics.com/doc/AVAGO%20TECHNOLOGIES/HCPL-0708-000E.pdf>>. Luettu 17.3.2011.

- 14 ABB Oy. 2009. ABB general machinery drives - ACS355 brochure. Esite.
- 15 IEC/TR 61158-1. 2010. Industrial communication networks - Fieldbus specifications Part 1: Overview and guidance for the IEC 61158 and IEC 61784 series. Standardi.
- 16 ABB Oy. 2000. TTT-käsikirja luku 5: Automaation tietoliikennetekniikka.
- 17 ABB Oy. 2010. ACS355 user's manual. Käyttöohjeet.
- 18 Kugelstadt, Thomas. 2008. The RS-485 Design Guide: A short compendium for robust data transmission design. Texas Instruments.
- 19 SN75HVD08, SN65HVD08 - Wide supply range RS-485 transceiver. 2006. Verkkodokumentti. Texas Instruments.
<<http://focus.ti.com/lit/ds/symlink/sn65hvd08.pdf>>. Luettu 5.4.2011.
- 20 Interface Circuits for TIA/EIA-485. 1998. Verkkodokumentti. Texas Instruments.
<<http://focus.ti.com/lit/an/slla036d/slla036d.pdf>>. Luettu 5.3.2011.
- 21 Controller Area Network (CAN). 2010. Verkkodokumentti. CAN in Automation (CiA). <<http://www.can-cia.de/index.php?id=46>>. Luettu 18.1.2011.
- 22 CAN Specification Version 2.0. 1991. Verkkodokumentti. Robert Bosch GmbH.
<<http://esd.cs.ucr.edu/webres/can20.pdf>>. Luettu 18.1.2011.
- 23 A CAN Physical Layer Discussion. Microchip Technology Inc. 2002. Verkkodokumentti. Microchip Technology Inc.
<<http://ww1.microchip.com/downloads/en/AppNotes/00228a.pdf>>. Luettu 18.1.2011.
- 24 Pigan, Raimond & Metter, Mark. 2006. Automating with PROFINET. Erlangen: Publicis Corporate Publishing.
- 25 A Beginner's Guide to Ethernet 802.3. 2005. Verkkodokumentti. Neuhaus, Ralf.
<http://www.analog.com/static/imported-files/application_notes/458197465EE269v01.pdf>. Luettu 8.3.2011.

- 26 Ethernet Bus - Ethernet Baseband Network Standard IEEE 802.3. 2011. Verkkodokumentti. Leroy, Davis. <http://www.interfacebus.com/Design_Connector_Ethernet.html>. Luettu 17.3.2011.
- 27 MODBUS over Serial Line - Specification and Implementation Guide V1.02. 2006. Verkkodokumentti. The Modbus Organization. <http://www.modbus.org/docs/Modbus_over_serial_line_V1_02.pdf>. Luettu 18.1.2011.
- 28 MODBUS over Serial Line - Specification & Implementation guide V1.0. 2002. Verkkodokumentti. The Modbus Organization. <www.modbus.org/docs/Modbus_over_serial_line_V1.pdf>. Luettu 20.1.2011.
- 29 Modicon Modbus Protocol Reference Guide. 1996. Verkkodokumentti. MODICON, Inc., Industrial Automation Systems. <http://www.modbustools.com/PI_MBUS_300.pdf>. Luettu 20.1.2011.
- 30 OPEN MODBUS/TCP SPECIFICATION. 1999. Verkkodokumentti. Swales, Andy & Schneider Electric. <http://www.rtaautomation.com/modbustcp/files/Open_ModbusTCP_Standard.pdf>. Luettu 20.1.2011.
- 31 Weigmann, Josef & Kilian Gerhard. 2003. Decentralization with PROFIBUS DP/DPV1. Erlangen: Publicis Corporate Publishing.
- 32 CANopen - Application Layer and Communication Profile - CiA Draft Standard 301 version 4.02. 2002. Verkkodokumentti. CAN in Automation (CiA). <<http://www.ece.unh.edu/biolab/hof/public/CiA%20Docs/DS301.pdf>>. Luettu 20.1.2011.
- 33 CAN-based Higher-Layer Protocols and Profiles. 2010. Verkkodokumentti. Etschberger, Ing. K. <http://www.ixxat.de/article_can_based_higher_layer_protocols_de.html>. Luettu 18.1.2011.
- 34 DeviceNet Technical Overview. 2001. Verkkodokumentti. Open DeviceNet Vendor Association, Inc. <<http://www.cse.dmu.ac.uk/~eg/tele/whatdev.pdf>>. Luettu 20.1.2011.
- 35 Field Buses. 2010. Verkkodokumentti. Leroy, Davis. <http://www.interfacebus.com/Design_Connector_Field_Buses.html#f>. Luettu 18.1.2011.

- 36 EtherNet/IP™ - CIP on Ethernet Technology. 2006. Verkkodokumentti. Open DeviceNet Vendor Association, Inc.
<http://www.odva.org/Portals/0/Library/Publications_Numbered/PUB00138R2_CIP_Adv_Tech_Series_EtherNetIP.pdf>. Luettu 20.1.2011.
- 37 Häkkinen, Esa. 2010. Luentomateriaali: Elektroniikan suunnittelu ja EMC Syksy 2010. Helsinki: Metropolia Ammattikorkeakoulu.
- 38 SN65HVD08. 2006. Verkkodokumentti. Texas Instruments.
<<http://focus.ti.com/lit/ds/symlink/sn65hvd08.pdf>>. Luettu 8.3.2011.
- 39 SN65HVD1176. 2008. Verkkodokumentti. Texas Instruments.
<<http://focus.ti.com/lit/ds/symlink/sn65hvd1176.pdf>>. Luettu 8.3.2011.
- 40 SN65HVD251. 2010. Verkkodokumentti. Texas Instruments.
<<http://focus.ti.com/lit/ds/symlink/sn65hvd251.pdf>>. Luettu 8.3.2011.
- 41 FreeMODBUS - A Modbus ASCII/RTU and TCP implementation. 2010. Verkkodokumentti. FreeMODBUS, Christian Walter.
<<http://www.freemodbus.org/index.php?idx=2>>. Luettu 8.3.2011.
- 42 KSZ8041NL 10Base-T/100Base-TX Physical Layer Transceiver. 2008. Verkkodokumentti. Micrel Inc.
<http://www.micrel.com/_PDF/Ethernet/datasheets/ksz8041nl.pdf>. Luettu 8.3.2011.
- 43 ACSM1 Application Guide - Safe Torque Off Function (STO). 2008. Verkkodokumentti. ABB Oy.
<[http://www05.abb.com/global/scot/scot201.nsf/veritydisplay/5f1754a9e7822624c12574f900384672/\\$File/EN_ACSM1_STO_Guide_C_scrres.pdf](http://www05.abb.com/global/scot/scot201.nsf/veritydisplay/5f1754a9e7822624c12574f900384672/$File/EN_ACSM1_STO_Guide_C_scrres.pdf)>. Luettu 14.3.2011.
- 44 Serial Peripheral Interface, SPI. 2010. Verkkodokumentti. Rensselaer Polytechnic Institute. <<http://www.rpi.edu/dept/ecse/mps/SPI.pdf>>. Luettu 14.3.2011.
- 45 CAN bus Signal Propagation. softing - your connection to excellence. 2011. Verkkodokumentti. softing. <<http://www.softing.com/home/en/industrial-automation/products/can-bus/more-can-bus/bit-timing/signal-propagation.php?navanchor=3010536>>. Luettu 14.3.2011.
- 46 CANopen Network CAN bus Cabling Guide. Copley Controls Corp. 2011. Verkkodokumentti. softing. <<http://www.copleycontrols.com/motion/pdf/CAN-Bus.pdf>>. Luettu 15.3.2011.

Liite 1: Eristysvälien suuruuteen vaikuttavat taulukot

Working Voltage (up to and including)		Nominal Ac Mains Supply Voltage <150V (Mains Transient Voltage 1500V)						Nominal Ac Mains Supply Voltage >150V <300V (Mains Transient Voltage 2500V)						Nominal Ac Mains Supply Voltage >300V <600V (Mains Transient Voltage 4000V)		
Peak or Dc	Rms (Sinu soidal)	Pollution Degree 1 and 2			Pollution Degree 3			Pollution Degree 1 and 2			Pollution Degree 3			Pollution Degree 1 and 2		
		F	B/S	R	F	B/S	R	F	B/S	R	F	B/S	R	F	B/S	R
71	50	0.4	1.0 (0.5)	2.0 (1.0)	0.8	40603 (0.8)	40757 (1.6)	1.0	2.0 (1.5)	4.0 (3.0)	40603	2.0 (1.5)	4.0 (3.0)	2.0	40577 (3.0)	40639 (8.0)
210	150	0.5	1.0 (0.5)	2.0 (1.0)	0.8	40603 (0.8)	40696 (1.8)	40634	2.0 (1.5)	4.0 (3.0)	40664	2.0 (1.5)	4.0 (3.0)	2.0	40577 (3.0)	40638 (6.0)
420	300	F 1.5 B/S 2.0 (1.5) R 4.0 (3.0)												40665	40577 (3.0)	40639 (6.0)
840	600	F 3.0 B/S 3.2 (3.0) R 6.4 (8.0)														
1400	1000	F/BS 4.2 R 6.4														
2800	2000	F/B/S/R 8.4														
7000	5000	F/B/S/R 17.5														
9800	7000	F/B/S/R 25														
14	10	F/B/S/R 37														
28	20	F/B/S/R 80														
42	30	F/B/S/R 130														
<p>1. The values in the table are applicable to functional (F), basic (B), supplementary (S), and reinforced (R) insulation.</p> <p>2. The values in parentheses are applicable to basic, supplementary, or reinforced insulation only if manufacturing is subjected to a quality control program that provides at least the same level of assurance as the example given in annex R.2. In particular, double and reinforced insulation shall be subjected to routine tests for electric strength.</p> <p>3. For working voltages between 2800 V peak or dc and 42,000 V peak or dc, linear interpolation is permitted between the nearest two points, the calculated spacing being rounded up to the next higher 0.1-mm increment.</p>																
<p><i>Table I. Table 2H of the standard provides minimum clearances for insulation in primary circuits and between primary and secondary circuits (clearances in millimeters).</i></p>																

Nominal Ac Mains Supply Voltage ≥ 150 V	Nominal Ac Mains Supply Voltage > 150 V ≥ 300 V		Additional Clearance (mm)		
	Pollution Degrees 1 and 2	Pollution Degrees 3			
Maximum Peak Working Voltage (V)	Maximum Peak Working Voltage (V)	Maximum Peak Working Voltage (V)	Functional, Basic, or Supplementary Insulation	Reinforced Insulation	
210 (210)	210 (210)	420 (420)	0	0	
298 (288)	294 (293)	493 (497)	0.1	0.2	
386 (366)	379 (376)	567 (575)	0.2	0.4	
474 (444)	463 (459)	840 (852)	0.3	0.6	
562 (522)	547 (541)	713 (729)	0.4	0.8	
65 (600)	632 (624)	787 (807)	0.5	1.0	
738 (678)	715 (707)	860 (884)	0.6	40575	
828 (756)	800 (790)	933 (961)	0.7	40634	
914 (839)		1006 (1039)	0.8	40695	
1002 (912)		1080 (1116)	0.9	40756	
1090 (990)		1153 (1193)	1.0	2.0	
		1226 (1271)	40544	40576	
		1300 (1348)	40575	40635	
		1425	40603	40696	

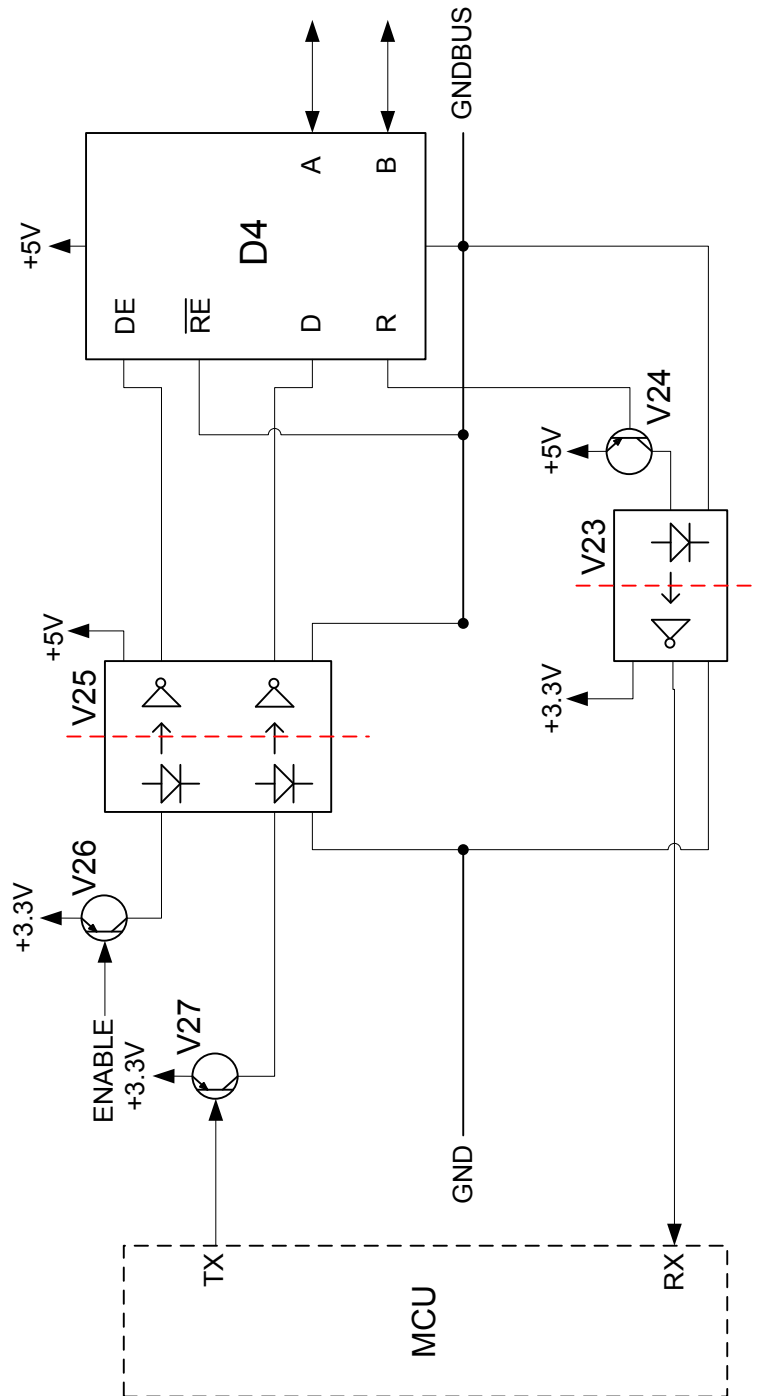
Note: The value in parentheses shall be used when the values in parentheses in Table 2H are used in accordance with item 2 of Table 2H and for functional insulation.

Table II. Table 2J of the standard provides additional clearances for insulation in primary circuits with peak working voltages exceeding the peak value of the nominal ac mains supply voltage.

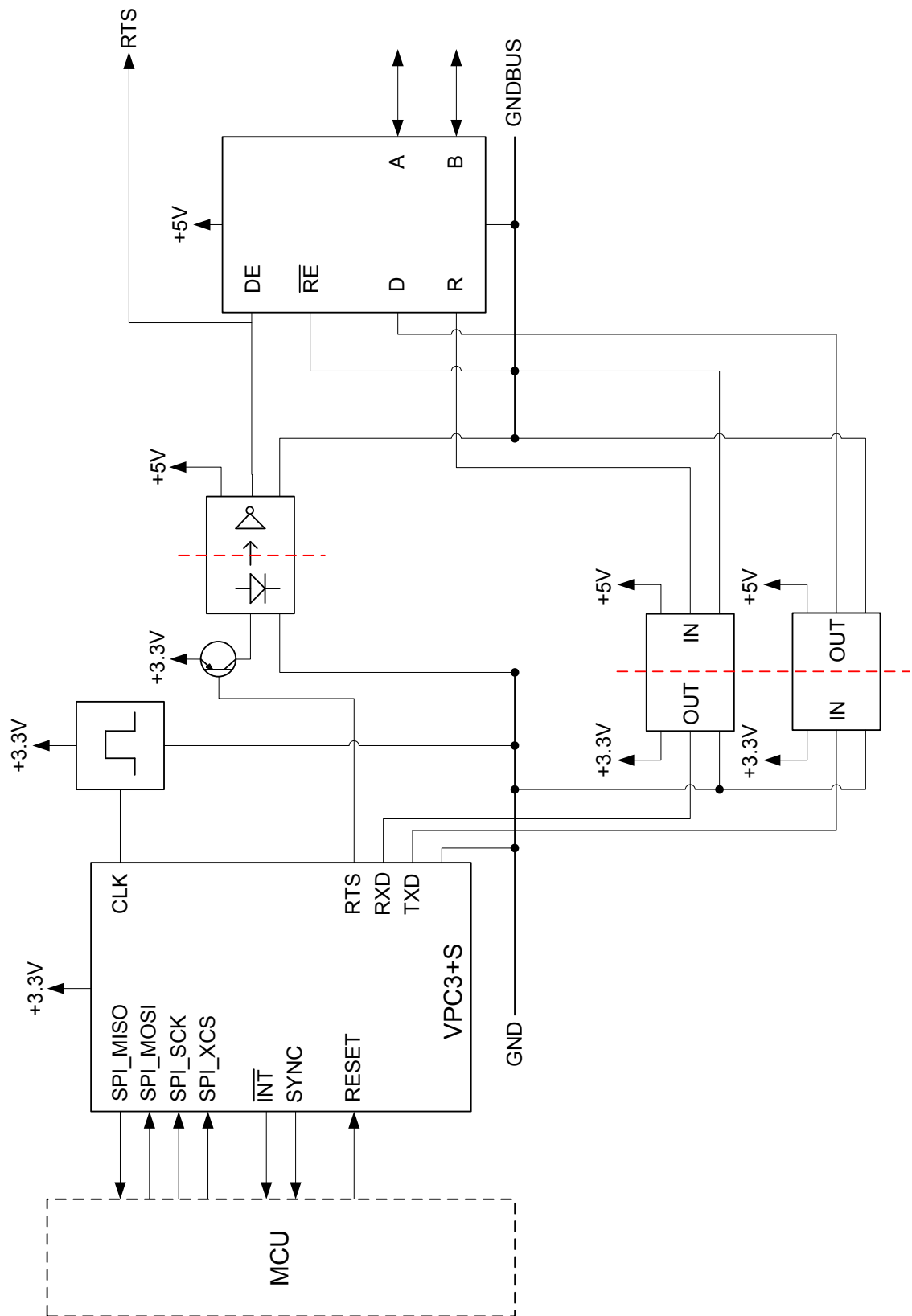
Working Voltage (up to and including)		Nominal Ac Mains Supply Voltage <150V (Transient Rating for Secondary Circuit 800 V) ¹						Nominal Ac Mains Supply Voltage >150V <300V (Transient Rating for Secondary Circuit 1500 V)						Nominal Ac Mains Supply Voltage >300V <600V (Transient Rating for Secondary Circuit 2500 V) ¹			Circuit Not Subject to Transient Overvoltage		
Voltage Peak or Dc	Voltage Rms (Sinusoidal)	Pollution Degrees 1 and 2			Pollution Degree 3			Pollution Degrees 1 and 2			Pollution Degree 3			Pollution Degrees 1, 2, and 3			Pollution Degrees 1 and 2 Only		
		F	B/S	R	F	B/S	R	F	B/S	R	F	B/S	R	F	B/S	R	F	B/S	R
71	50	0.4 (0.2)	0.7 (0.2)	40634 (0.4)	1.0 (0.8)	40603 (0.8)	40665 (1.6)	0.7 (0.5)	1.0 (0.5)	2.0 (1.0)	1.0 (0.8)	40603 (0.8)	40665 (1.6)	40725 (1.6)	2.0 (1.5)	4.0 (3.0)	0.4 (0.2)	0.4 (0.2)	0.8 (0.4)
140	100	0.8 (0.2)	0.7 (0.2)	40634 (0.4)	1.0 (0.8)	40603 (0.8)	40696 (1.6)	0.7 (0.5)	1.0 (0.5)	2.0 (1.0)	1.0 (0.8)	40603 (0.8)	40696 (1.6)	40725 (1.5)	2.0 (1.5)	4.0 (3.0)	0.6 (0.2)	0.7 (0.2)	40634 (0.4)
210	150	0.6 (0.2)	0.9 (0.2)	40756 (0.4)	1.0 (0.8)	40603 (0.8)	40757 (1.6)	0.7 (0.5)	1.0 (0.5)	2.0 (1.0)	1.0 (0.8)	40603 (0.8)	40696 (1.6)	40725 (1.6)	2.0 (1.5)	4.0 (3.0)	0.6 (0.2)	0.7 (0.2)	40634 (0.4)
280	200	F 1.1 (0.8) B/S 1.4 (0.8) R 2.8 (1.6)												40725 (1.5)	2.0 (1.5)	4.0 (3.0)	40544 (0.2)	40544 (0.2)	40576 (0.4)
420	300	F 1.6 (1.0) B/S 1.9 (1.0) R 3.8 (2.0)												40725 (1.5)	2.0 (1.5)	4.0 (3.0)	40634 (0.2)	40634 (0.2)	40757 (0.4)
700	500	F/B/S 2.5 R 5.0																	
840	600	F/B/S 3.2 R 5.0																	
1400	1000	F/B/S 4.2 R 5.0																	
2800	2000	F/B/S/R 8.4 See ²																	
7000	5000	F/B/S/R 17.5 See ²																	
9800	7000	F/B/S/R 25 See ²																	
14	10	F/B/S/R 37 See ²																	
28	20	F/B/S/R 80 See ²																	
42	30	F/B/S/R 130 See ²																	
<p>1. Where transients in the equipment exceed this value, the appropriate higher clearance shall be used.</p> <p>2. Compliance with a clearance value of 8.4 mm or greater is not required if the clearance path is:</p> <p style="text-align: center;">entirely through air, or</p> <p>wholly or partly along the surface of an insulating material of Material Group I; and the insulation involved passes an electric strength test according to 5.2.2 using:</p> <ul style="list-style-type: none"> • an ac test voltage whose rms value is equal to 1.06 times the peak working voltage, or • a dc test voltage equal to the peak value of the ac test voltage prescribed above. <p>If the clearance path is partly along the surface of a material that is not Material Group I, the electric strength test is conducted across the air gap only.</p>																			
Table III. Table 2K of the standard provides minimum clearances in secondary circuits (clearances in millimeters).																			

Functional, Basic, and Supplementary Insulation							
Working Voltage V Rms or Dc	Pollution Degree 1	Pollution Degree 2			Pollution Degree 3		
	Material Group	Material Group			Material Group		
	I, II, IIIa, or IIIb	I	II	IIIa, or IIIb	I	II	IIIa, or IIIb
	<50	Use the clearance from the appropriate tables	0.6	0.9	40575	40664	40725
100	0.7		1.0	40634	40756	2.0	40576
125	0.8		40544	40664	40787	40545	40635
150	0.8		40544	40695	2.0	40576	40665
200	1.0		40634	2.0	40665	40757	40577
250	40603		40756	40665	40577	40758	4.0
300	40695		40576	40577	4.0	40667	5.0
400	2.0		40696	4.0	5.0	40699	40608
600	40577		40667	40607	8.0	40672	10.0
800	4.0		40699	8.0	10.0	11.0	40675
1000	5.0		40550	10.0	40675	14.0	16.0
Linear interpolation is permitted between the nearest two points, the calculated spacing being rounded to the next higher 0.1-mm increment.							
<i>Table IV. Table 2L of the standard provides minimum creepage distances (creepage distances in millimeters).</i>							

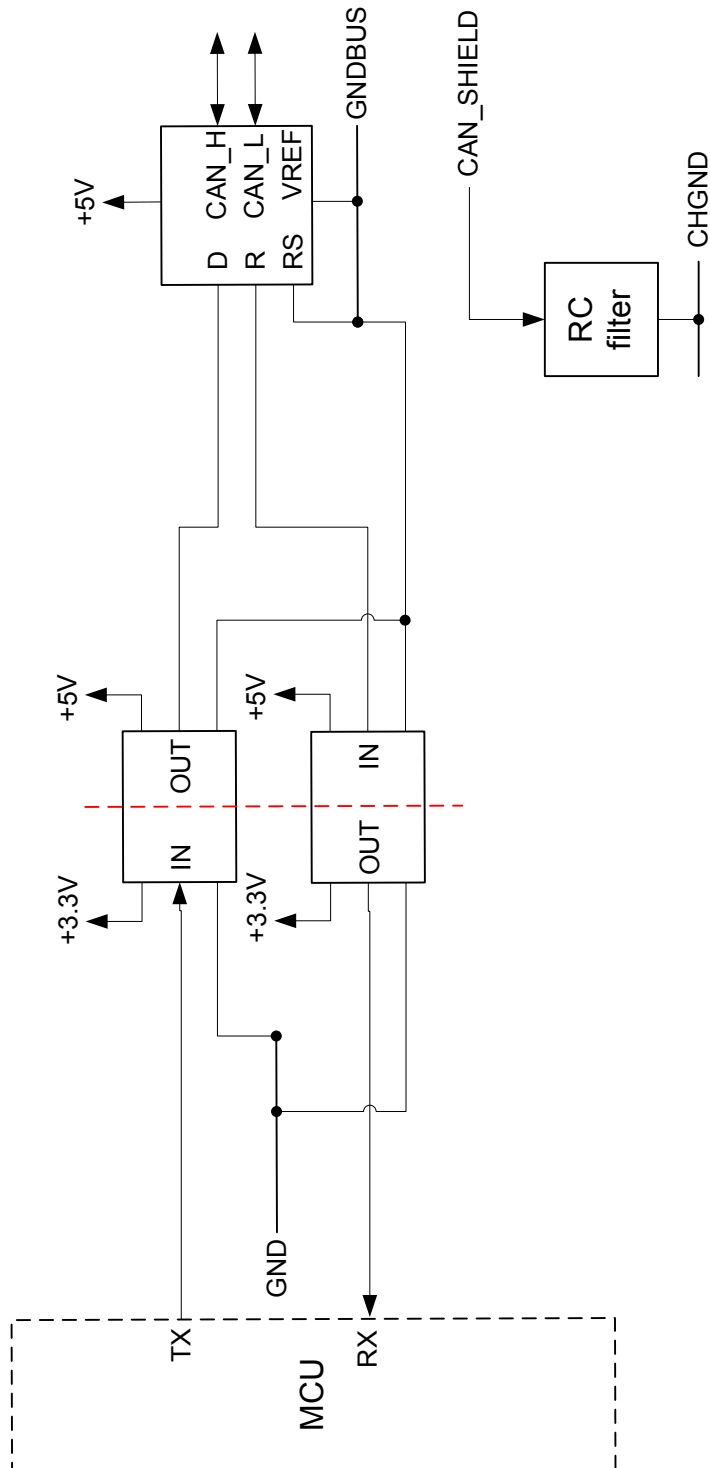
Liite 2: Modbus RTU RS-485 –toteutus



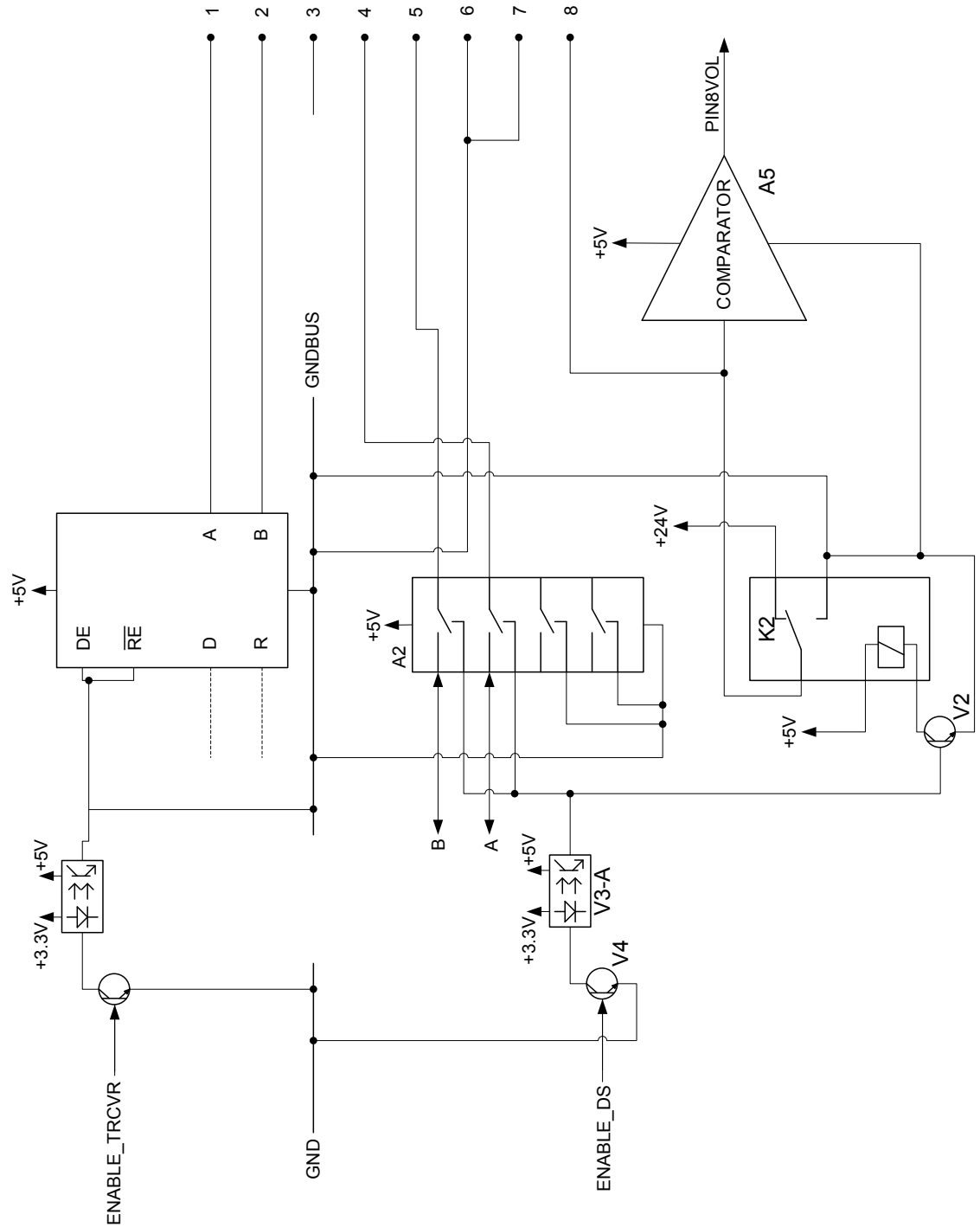
Liite 3: Profibus DP RS-485 –toteutus

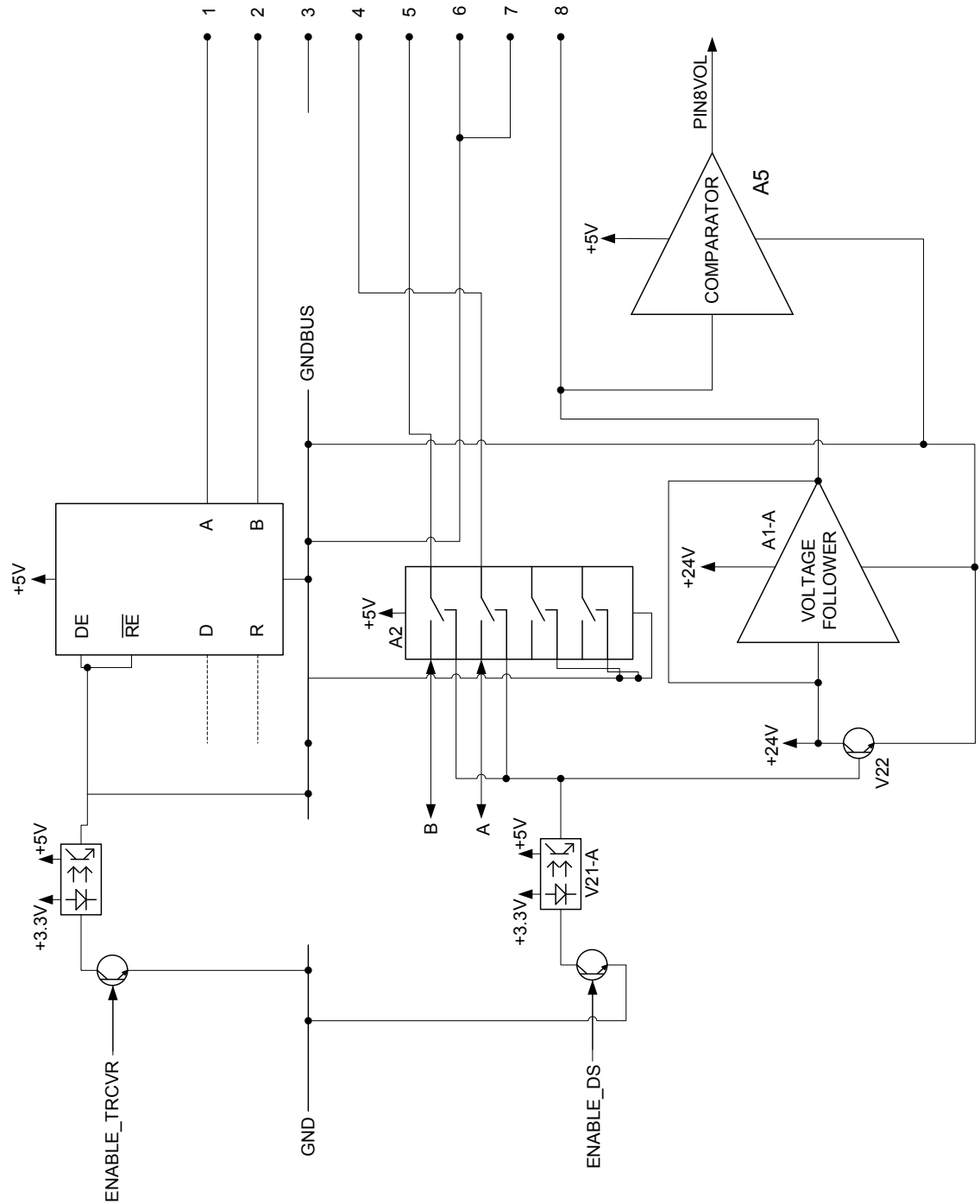


Liite 4: CANopenin toteutus

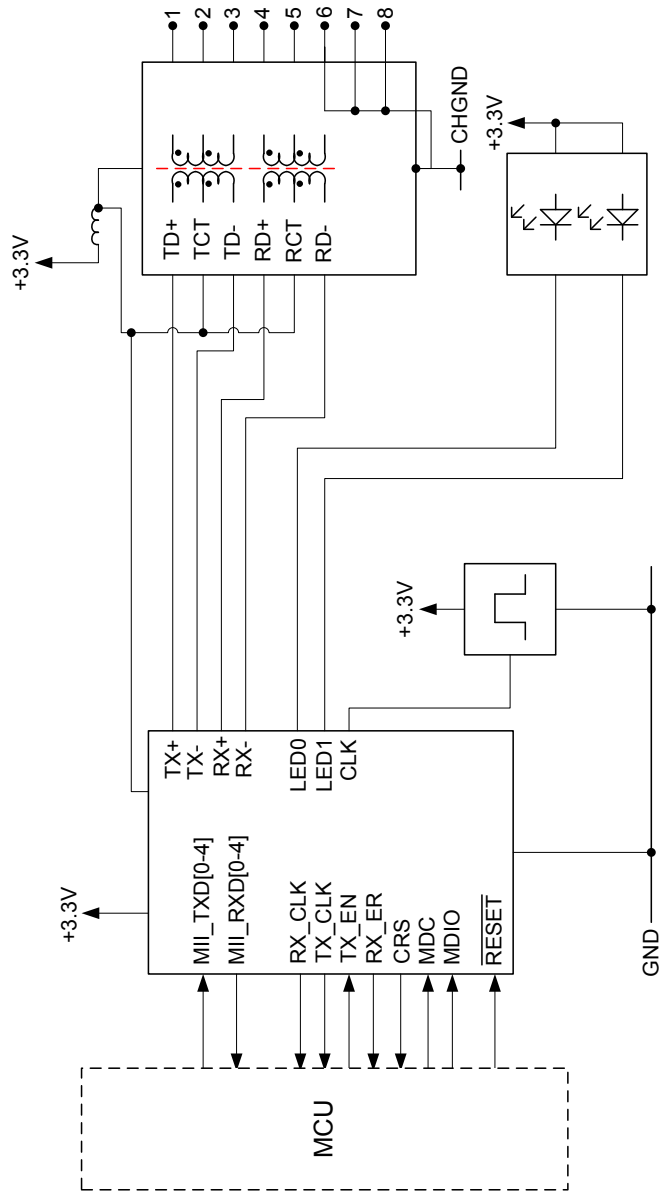


Liite 5: Ensimmäinen vaihtoehto Modbus RTU:n ketjuttamisesta paneeliliitännän läpi



Liite 6: Toinen vaihtoehto Modbus RTU:n ketjuttamisesta paneeliliitäntän läpi

Liite 7: Ethernet-liittynnän toteutus



Liite 8: Piirikortin pintasijoittelu ylhäältä ja alhaalta (ks. seur. s.)

