

TALLINNA TEHNIKAÜLIKOOL

Infotehnoloogia teaduskond

Konstantin Ivanov 213436IACB

UNIVERSAALSE SISEND-VÄLJUND MOODULI TRÜKKPLAADI PROTOTÜÜP

Bakalaurusetöö

Juhendaja: Andres Rähni

MSc

Tallinn 2024

Autorideklaratsioon

Kinnitan, et olen koostanud antud lõputöö iseseisvalt ning seda ei ole kellegi teise poolt varem kaitsmisele esitatud. Kõik töö koostamisel kasutatud teiste autorite tööd, olulised seisukohad, kirjandusallikatest ja mujalt pärinevad andmed on töös viidatud.

Autor: Konstantin Ivanov

19.03.2024

Annotatsioon

Käesoleva lõputöö eesmärk on arendada trükkplaat, mis laiendaks mikrokontrollerite digitaalsete kahendloogika sisendite ning väljundite funktsionaalsust.

Töö eesmärk on lahendada probleem, mis seisneb mikrokontrollerite võimetuses opereerida otse tööstuslike süsteemidega, mis töötavad tööstusautomaatika kahendloogika pingeniivool. Selleks on vaja leida universaalne sisendite ja väljundite ühendamise mooduli lahendus.

Vastavalt püstitatud eesmärgile lisas autor kolm alamülesannet. Esimene alamülesanne on analüüsida võimalikke skeemitehnilisi lähenemisi trükkplaadil sisendite ning väljundite arendamiseks. Teine alamülesanne on teostada projekt, kasutades nii diskreetset kui ka integreeritud lähenemist. Kolmas alamülesanne on hinnata ja põhjendada ühe lähenemisviisi eelistatavust antud projekti raames.

Lõputöös analüüsitakse võimalikke lähenemisi trükkplaadil selliste sisendite ning väljundite arendamiseks. Seejärel kirjeldatakse kõiki trükkplaadi projekteerimise etappe nii diskreetse kui ka integreeritud lähenemisviisi puhul. Töös antakse ka ühe lähenemisviisi eelistamise põhjendus.

Lõputöö on kirjutatud eesti keeles ning sisaldab teksti 30 leheküljel, 3 peatükki, 23 joonist, 8 tabelit.

Abstract

Development of a Universal Input-Output Expansion Printed Circuit Board Design

The aim of this thesis is to develop a universal printed circuit board (PCB) that would expand the functionality of microcontroller digital binary logic inputs and outputs.

The work aims to solve the problem of microcontrollers inability to operate directly with industrial systems that operate using industrial automation binary logic voltage levels.

To achieve the set goal, the author has added three subtasks. The first subtask is to analyze possible schematic approaches to the development of PCB inputs and outputs. The second subtask is to implement the project using both discrete and integrated approaches. The third subtask is to evaluate and justify the preference of one approach over the other in the context of the given project.

The thesis analyzes possible approaches to the development of PCB inputs and outputs. Then, all stages of PCB design are described for both discrete and integrated approaches. The work also provides a justification for the preference of one approach over the other.

The thesis is in estonian and contains 30 pages of text, 3 chapters, 23 figures, 8 tables.

Lühendite ja mõistete sõnastik

<i>PCB</i>	<i>Printed Circuit Board</i>
<i>IoT</i>	<i>The Internet of Things</i>
<i>IP</i>	<i>Internet Protocol</i>
<i>PLC</i>	<i>Programmable Logic Controller</i>
<i>RC</i>	<i>Resistor-Capacitor circuit</i> ; Takistist ning kondensaatorist koosnev filter ahel
<i>FIT</i>	<i>Failure In Time</i> ; Üle miljardi töötunni jooksul esinenud rikked [7]
<i>CMOS</i>	<i>Complementary Metal-Oxide-Semiconductor</i> ; Pooljuhttehnoloogia liik
<i>VCC</i>	<i>Voltage Common Collector</i> ; Toitepinge vooluahelas
<i>SOT23</i>	<i>Small-Outline Transistor</i> ; Plastikust pindpaigaldusega korpuse tüüp
<i>TTL</i>	<i>Transistor-Transistor Logic</i> ; Pooljuhttehnoloogia liik
<i>FET</i>	<i>Field-Effect Transistor</i> ; Pooljuhttehnoloogia liik
<i>PWM</i>	<i>Pulse-Width Modulation</i>
<i>PPO</i>	<i>Parallel Push Output</i>
<i>AC</i>	<i>Alternating Current</i>
<i>SPST</i>	<i>Single-Pole, Single-Throw</i>
<i>SPDT</i>	<i>Single-Pole, Double-Throw</i>
<i>CRC</i>	<i>Cyclic Redundancy Check</i>
<i>SPI</i>	<i>Serial Peripheral Interface</i>
<i>SMT</i>	<i>Surface-Mount Technology</i>
<i>SMD</i>	<i>Surface Mount Device</i>

Sisukord

1 Sissejuhatus	10
2 Digitaalse kahendloogika sisend-väljund mooduli skeemitehniline disain	12
2.1 Tööstus 4.0.....	12
2.2 Digitaalse kahendloogika sisendi-väljundi skeemitehnilise disaini lähenemisviisid	12
2.2.1 Digitaalsed kahendloogika sisendid	12
2.2.2 Digitaalse kahendloogika sisendi lülituskarakteristikud	13
2.2.3 Diskreetne digitaalne sisend ühe kanaliga.....	15
2.2.4 Ühe kanaliga integreeritud digitaalne kahendloogika sisend	17
2.2.5 Digitaalsed kahendloogika väljundid	20
2.2.6 Diskreetne digitaalne kahendloogika väljund ühe kanaliga	20
2.2.7 Kaheksa kanaliga integreeritud digitaalne kahendloogika väljund	23
3 Sisend-väljund mooduli praktiline teostus	25
3.1 Trükkplaadi parameetrite seadistamine KiCad tarkvaras	25
3.1.1 Trükkplaadi kihid	25
3.1.2 Trükkplaadi seadistused	26
3.2 Digitaalse kahendloogika sisend-väljund mooduli diskreetne teostus	26
3.2.1 Skeemi väljatöötamine	26
3.2.2 Trükkplaadi väljatöötamine.....	29
3.3 Digitaalse kahendloogika sisend-väljund mooduli integreeritud teostus	31
3.3.1 Skeemi väljatöötamine	31
3.3.2 Trükkplaadi väljatöötamine.....	34
4 Testimine ning analüüs	35
4.1 Kahendloogika sisend-väljund mooduli diskreetse prototüübi testimine.....	35
4.2 Kahendloogika sisend-väljund mooduli integreeritud prototüübi testimine	36
4.3 Testimise tulemused ning analüüs	37
4.3.1 Esmase prototüübi testimise tulemused.....	37
4.3.2 Täiustatud prototüübi testimise tulemused	38
4.3.3 Järeldus	38

5 Kokkuvõte	39
Kasutatud kirjandus	40
Lisa 1 – Lihtlitsents lõputöö reprodutseerimiseks ja lõputöö üldsusele kättesaadavaks tegemiseks	43
Lisa 2 – Kaheksa kanaliga integreeritud digitaalne kahendloogika väljundi skeem.....	44
Lisa 3 – Trükkplaadi projekteerimisreeglite piirangud	45
Lisa 4 – BeagleBone® relee väljundi skeem.....	46
Lisa 5 – BeagleBone® kontrolleri toiteskeem	47
Lisa 6 – Esmase prototüübi täisskeemi	48
Lisa 7 – Esmase prototüübi trükkplaadi tagumiste kihtide kujutus.....	49
Lisa 8 – Esmase prototüübi komponentide nimekiri.....	50
Lisa 9 – Täiustatud prototüübi trükkplaadi tagumiste kihtide kujutus	51
Lisa 10 – Täiustatud prototüübi komponentide nimekiri	52
Lisa 11 – Täiustatud prototüübi täisskeem	53

Jooniste loetelu

Joonis 1 24 V alalisvooluga digitaalsete kahendloogika sisendite standardne tööpiirkond [4]	15
Joonis 2 Traditsiooniline digitaalse kahendloogika sisendi diskreetne skeemitehniline disain [3].....	16
Joonis 3 MAX22191 tüüpiline skeem [4]	18
Joonis 4 Ühe kanaliga integreeritud digitaalne kahendloogika sisend kasutades ISO1211 [8]	19
Joonis 5 Trükkplaatide temperatuuri võrdlus: Traditsiooniline lähenemine ISO1212 lähenemise vastu [8].....	20
Joonis 6 Optroniga eraldatud avatud kollektori väljund skeem [9].....	21
Joonis 7 Optroniga eraldatud väljund skeem [9].....	22
Joonis 8 Mitte-isoleeritud TTL avatud kollektori väljund skeem [9].....	22
Joonis 9 Optroniga eraldatud TTL-tasemega väljund skeem [9]	23
Joonis 10 Relee väljund skeem [9].....	23
Joonis 11 Pingetaseme lülitil põhinev esmase prototüübi ühe sisendi skeem.....	28
Joonis 12 Esmase prototüübi väljundi skeem.....	29
Joonis 13 Esmase prototüübi trükkplaadi esikihtide kujutus	30
Joonis 14 MAX22190PMB [13]	32
Joonis 15 Integreeritud digitaalse kahendloogika sisendi skeem	33
Joonis 16 Täiustatud prototüübi trükkplaadi esikihid	34
Joonis 17 Kaheksa kanaliga integreeritud digitaalne kahendloogika väljundi skeem [4]	44
Joonis 18 Trükkplaadi projekteerimisreeglite piirangud	45
Joonis 19 BeagleBone® relee väljundi skeem [12][19].....	46
Joonis 20 BeagleBone® kontrolleri toiteskeem [19][20].....	47
Joonis 21 Esmase prototüübi täisskeemi [19]	48
Joonis 22 Esmase prototüübi trükkplaadi tagumiste kihtide kujutus	49
Joonis 23 Täiustatud prototüübi trükkplaadi tagumiste kihtide kujutus.....	51

Tabelite loetelu

Tabel 1 Digitaalse kahendloogika sisendi parameetrid vastavalt standardile IEC 61131-2 [4]	14
Tabel 2 Diskreetloogikaga realiseeritud digitaalse kahendloogika sisendmooduli hinnanguline energiatarve [3]	17
Tabel 3 Hinnanguline energiasääst digitaalsetes kahendloogika sisendmoodulites integreeritud digitaalse kahendloogika sisendi kiibi kasutamisel [3]	17
Tabel 4 MAX22190 SPI liidese seadistamise võimalused [17]	36
Tabel 5 Sisendite voolu tarbimise mõõtmiste tulemused	37
Tabel 6 Väljundite voolu tarbimise mõõtmiste tulemused	37
Tabel 7 Relee skeemi voolu mõõtmised	38
Tabel 8 MAX22190 8 sisendi voolu mõõtmised	38

1 Sissejuhatus

Mikrokontrollerid on tänapäeva elektroonika olulised komponendid. Need on loodud töötama kaitsevääkepinge piiridest oluliselt madalamatel pingeniivoodel mitmel põhjusel. Esiteks tähendab madalam pinge madalamat energiatarvet, muutes mikrokontrollereid ideaalseks lahenduseks süsteemides, kus tähtis on tagada energiasäästlikkus. Madalam energiatarve vähendab ka soojuse teket, vähendades vajadust jahutussüsteemide järele ja parandades mikrokontrolleri üldist töökindlust. Lisaks tagatakse ühilduvus teiste elektrooniliste komponentidega, millest paljud töötavad sellise madala pingega. Ja mis veelgi olulisem, madal pingetaseme kasutamine parandab kasutajate ohutust, minimeerides ohtu seadmete rikke korral.

Kaitsevääkepinge piiridest oluliselt madalamatel pingeniivoodel töötamine võimaldab mikrokontrolleritel olla tõhusamad, töökindlamad ja ohutumad erinevates elektroonikarakendustes, kuid sellel on ka omad tagajärjed.

Selle töö autor seadis endale eesmärgi arendada universaalse mooduli trükkplaat, mis laiendaks mikrokontrollerite digitaalsete kahendloogika sisendite ning väljundite funktsionaalsust.

Töö eesmärk on lahendada probleem, mis seisneb mikrokontrollerite võimetuses opereerida otse tööstuslike süsteemidega, mis töötavad kõrgematel pingetasanditel.

Vastavalt püstitatud eesmärgile lisas autor kolm alamülesannet. Esimene alamülesanne on analüüsida võimalikke lähenemise trükkplaadi sisendite ning väljundite arendamiseks. Teine alamülesanne on teostada projekt, kasutades nii diskreetset kui ka integreeritud lähenemist. Kolmas alamülesanne on hinnata ja põhjendada ühe lähenemisviisi eelistatavust antud projekti raames.

Esimeses osas analüüsib autor võimalikke meetodeid järgmiste trükkplaadi komponentide realiseerimiseks:

- Pingenivoo muundur

- Lülitustoimelise juhtimisega seadmete liides

Teises osas kirjeldab autor trükkplaadi projekteerimise kõiki etappe, nii diskreetse kui ka integreeritud lähenemise korral. Kolmandas osas teeb autor järeldusi ühe meetodi eelistatavuse kohta, võttes arvesse energiatõhusust.

2 Digitaalse kahendloogika sisend-väljund mooduli skeemitehniline disain

Käesolevas peatükis vaadeldakse ja analüüsitakse teoreetiliselt mõningaid lähenemisviise tulevase trükkplaadi vajalike riistvarakomponentide realiseerimiseks ning tuuakse näiteid skeemitehniliste lahenduste kohta.

Täiendavalt mainib autor Tööstust 4.0, kuna skeemitehniline disain on mõjutatud Tööstus 4.0 arengute poolt, mis on muutmas trükkplaatide tootmist.

2.1 Tööstus 4.0

Neljas tööstusrevolutsioon, mida tuntakse ka kui Tööstus 4.0. See ajastu on määratud kasvava automatiseerimise, tarkade masinate ning tehaste kasutamisega. Andmevahetus omab olulist rolli tootmise efektiivsuse ja tootlikkuse tõstmisel kogu väärtusahela ulatuses [1].

Neljandat tööstusrevolutsiooni aluseks on tehnoloogiad, mida saab jagada järgmistesse kategooriatesse: asjade internet, nõudluspõhine andmetöötlus, kognitiivne andmetöötlus, küberfüüsikalised süsteemid ning andmeanalüütika [2].

2.2 Digitaalse kahendloogika sisendi-väljundi skeemitehnilise disaini lähenemisviisid

Käesolevas punktis võrreldakse kahte erinevat skeemitehnilist lähenemist ja selgitatakse mis vahe on nn. diskreetsel ja integreeritud lähenemisel.

2.2.1 Digitaalsed kahendloogika sisendid

Tööstusautomaatika sisend-väljund moodulis paiknevad digitaalsed kahendloogika sisendikaardid. Nende kaartide ülesanne on vastu võtta signaale binaarsetest anduritest või lülititest, mis on paigutatud üle kogu tootmispinna ja mille abil jälgitakse erinevaid parameetreid, näiteks vedelikutasemeid, objektide läheduse astet või seadmete sisse-

/väljalülitusnuppude olekut. Signaali vastuvõtmisel tõlgendab digitaalse kahendloogika sisendi kaart pinget 0 V loogiliseks väärtuseks "0" (või väljalülitatud olek) ja 24 V loogiliseks väärtuseks "1" (ehk sisselülitatud olek). Digitaalse kahendloogika sisendikaardi peamine ülesanne on vastu võtta anduritest või lülititest signaale, teisendada need madalama loogikataseme signaalideks ja sidestada need programmeeritava loogikakontrolleri (PLC) juhtalgoritmiga, käivitades vastavaid toiminguid, näiteks väljundsignaali genereerimise, sõltuvalt sisendsignaali olekust. Kuid galvaanilise isolatsiooni tagamine tootmispinnal esinevate kõrgemate loogikatasandite ja kontrolleri madalamate loogikatasemete vahel ning üha väiksemale pinnale mahtumise vajadus suurendavad keerukust selles, mis esmapilgul võib tunduda lihtsana ülesandena [4].

Järgnevalt on kirjeldatud tehnilisi takistusi, mis on seotud tihepaigutusega digitaalse kahendloogika sisendmoodulite projekteerimisega [3]: mõõtmed, soojuslikud aspektid, ühilduvus kõikide sisendtüüpidega (tüüp 1, 2 ja 3 sisendi toetus), usaldusväärsed tööparameetrid, juhtme katkemise tuvastamine.

2.2.2 Digitaalse kahendloogika sisendi lülituskarakteristikud

Digitaalsed kahendloogika sisendikaardid toetavad erinevaid sisendparameetreid, kuid kõige sagedamini on kasutatavad standardid IEC 61131-2 tüübid 1, 2 ja 3 [4].

Digitaalsete kahendloogika sisendite valik sõltub sisendite atribuutidest ja on oluline erinevate sensorite jaoks. IEC 61131-2 standard määratleb kolme tüüpi voolu neelavaid digitaalseid kahendloogika sisendeid. Allpool kirjeldatakse kolme digitaalsisendi tüüpi [5].

Digitaalsed kahendloogika sisendid tüüpi 1 on kavandatud signaalide teisendamiseks binaararvudeks (bittideks) elektromehaanilistest lülitusseadmetest, nagu releed ja vajutusnupud, mis omavad kahte olekut. Siiski ei sobi need sisendid pooljuhtmaterjalidest lülitite, nagu andurid ja läheduslülitid, kahe juhtmega ühendamiseks. Tüübi 1 klassifikatsioon standardis kehtestati ajal, mil mehaanilised kontaktid olid valdavalt kasutusel [5].

Tüübi 2 digitaalsed kahendloogika sisendid on kavandatud pooljuhtmaterjalidest lülitite signaalide teisendamiseks, millel on kaks võimalikku olekut, binaararvudeks (bittideks) [5].

Tüübi 2 sisendite omadused hõlmavad järgmist [5]:

- Suurem energiatarve, mistõttu sobivad need paremini moodulitele, millel on madalam kanalite tihedus.
- Ühilduvus kahejuhtmeline lähedusanduritega, kui need on ühendatud vastavalt IEC 60947-5-2 juhistele.

Sarnaselt Tüübi 2 digitaalsetele kahendloogika sisenditele teisendavad Tüübi 3 digitaalsed kahendloogika sisendid pooljuhtmaterjalidest lülite (2-juhtmeline läheduslüüti) kahe võimaliku oleku signaale binaararvuks (bittideks) [5].

Tüübi 3 sisendid omavad madalamat elektrienergia tarbimist kui Tüübi 2 sisendid ning on seetõttu väga sobilikud väikestele moodulitele, millel on suur sisendkanalite tihedus. Tüübi 3 sisendid omavad madalat soojuste hajumist, võimaldades seeläbi suuremat kanalite tihedust mooduli kohta ning pakuvad anduritele nullsignaali voolu. Tüübi 3 sisendeid saab kasutada Tüübi 2 ja Tüübi 1 sisendite jaoks ning nad on ühilduvad IEC-60947-5-2 seadmetega (madalama vooluga väljalülitusasendis) [5].

Tööstusautomaatika kasvavad nõudmised põhjustavad digitaalsete kahendloogika sisendite suuremat pakketihedust. Standardi tüüp 3 määratlus võimaldab ruumikasutuse optimeerimist automaatikakilbis ja loob nullsignaali voolu vajadusest loobumise võimaluse [5].

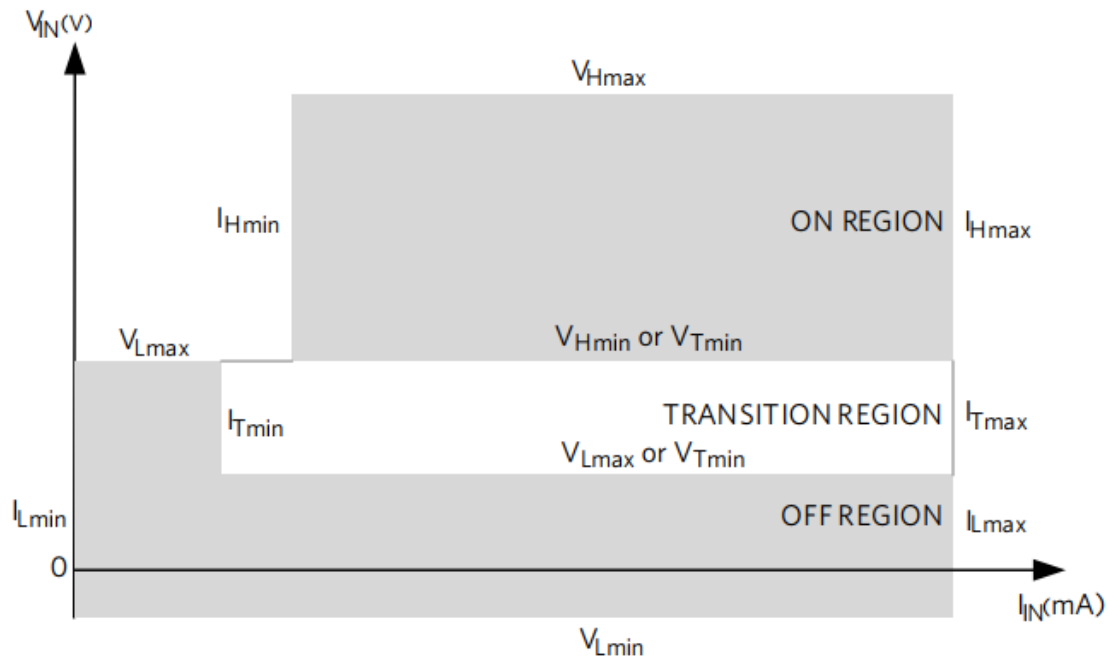
Allpool on toodud tabel digitaalsete kahendloogika sisendite omaduste kohta vastavalt standardile IEC 61131-2 (vt Tabel 1).

Tabel 1 Digitaalse kahendloogika sisendi parameetrid vastavalt standardile IEC 61131-2 [4]

Type of Limit	Type 1 Limits						Type 2 Limits						Type 3 Limits					
	Off Region		Transition		On Region		Off Region		Transition		On Region		Off Region		Transition		On Region	
	V _L (V)	I _L (mA)	V _T (V)	I _T (mA)	V _H (V)	I _H (mA)	V _L (V)	I _L (mA)	V _T (V)	I _T (mA)	V _H (V)	I _H (mA)	V _L (V)	I _L (mA)	V _T (V)	I _T (mA)	V _H (V)	I _H (mA)
Max	15/5	15	15	15	30	15	11/5	30	11	30	30	30	11/5	15	11	15	30	15
Min	-3	ND	5	0.5	15	2	-3	ND	5	2	11	6	-3	ND	5	1.5	11	2

ND = NOT DEFINED

Tabeli parameetrite mõistmiseks on Joonisel 1 esitatud standardne tööulatus 24 V DC digitaalsete kahendloogika sisendite jaoks vastavalt standardile IEC 61131-2 (vt Joonis 1).



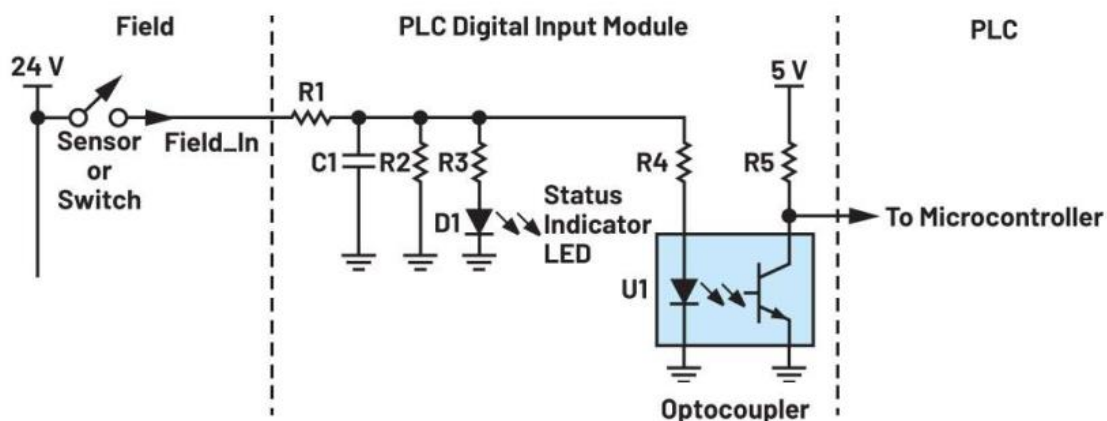
Joonis 1 24 V alalisvooluga digitaalsete kahendloogika sisendite standardne tööpiirkond [4]

2.2.3 Diskreetne digitaalne sisend ühe kanaliga

Ahelat loetakse diskreetseks, kui selle moodustamiseks on elementaarsed elektroonika komponendid omavahel ühendatud juhtmete abil või trükkplaadile joodeldatud. Sellises konfiguratsioonis on iga komponenti võimalik vajadusel hõlpsasti lahti ühendada või välja vahetada [10].

Ajalooliselt põhinesid digitaalsed kahendloogika sisendid eraldiseisvatel komponentidel ja nõudsid protsessori paralleelset liidest. Voolu piirangut juhiti suure võimsusega takistite ahelaga. Mehaaniliste lülitite kontakti värelemise leevendamiseks kasutati koos protsessori paralleelse liidesega ühendatud kanalipõhiseid optroneid koos takisti-kondensaatori (RC) filtritega. Sellegipoolest nõuab see lähenemisviis mahukat komponentide kasutamist, arvukalt isoleerimiskanaleid ja suurt kontrollerikiibi jalajälge paralleelsete sisendite majutamiseks. Lisaks põhjustab see märkimisväärset võimsuse hajumist [6].

Allpool on toodud abstraktne näidis ühe kanaliga PLC sisendmoduli skeemist (vt Joonis 2).



Joonis 2 Traditsiooniline digitaalse kahendloogika sisendi diskreetne skeemitehniline disain [3]

Ülaltoodud skeemitehniline disain sobib hästi väikese hulga digitaalsete kahendloogika sisendite, tavaliselt 4–8 sisendi plaadi kohta, käsitlemiseks. Selle hulga ületamisel väheneb aga praktilisus märkimisväärselt ja toob kaasa mitmeid väljakutseid, mis muudavad lahenduse kasutamise järjest vähem teostatavaks. Selle diskreetse lähenemisega seotud tähelepanuväärseteks puudusteks on muuhulgas [3]:

- Kõrge energiatarve ja sellega seotud temperatuuri tõusu punktid trükiplaadil
- Iga sisendi jaoks peab olema eraldatud üks optron
- Liiga palju komponente, mis põhjustavad kõrget tõrgete intensiivsust (FIT) ja nõuavad isegi suuremat kujutegurit

Eelmainitustest suurimaks puuduseks on kõrge energiatarve, mis võib ulatuda kuni 10mA-ni, sõltudes takistite väärtustest, ja vastavalt kõigub koos sisendpinge taseme muutustega. Ehkki diskreetse voolu piirava ahela konstrueerimine on teostatav, nõuab see protsess enam kui kümne komponendi lisamist, suurendades seeläbi nii kulusid kui ka ruuminõudeid. Pealegi kipub selline ahela toimima voolutasandil, mis ületab märkimisväärselt IEC61131-2 standardi spetsifikatsioonides määratud 2 mA ideaalset lävivoolu väärtust 3. tüüpi digitaalse kahendloogika sisendi jaoks [4].

Järgmises tabelis (vt. Tabel 2) on esitatud näide, mis demonstreerib kirjeldatud energiatarbe probleemi.

Kui meil on 2,2 kΩ sisendtakistus ja sisend on seatud väärtusele 1, mis tähendab, et see on 24 V, on voolutarve 11 mA, mis toob kaasa 264 mW võimsustarbimise. Kui nüüd

vaadata 8-kanalilist moodulit, siis energiatarve kasvab üle 2 W ja 32-kanalise mooduli puhul ületab see 8 W (vt Tabel 2) [3].

Tabel 2 Diskreetloogikaga realiseeritud digitaalse kahendloogika sisendmooduli hinnanguline energiatarve [3]

Digitaalsisendi kanalite arv	Hinnanguline energiatarve (W)
8	2.1
16	4.2
32	8.4
64	16.9

Enamik praegu pakutavatest integreeritud lahendustest (vt. p. 2.2.4) võimaldab seadistada iga digitaalse kahendloogika sisendi tarbitava vooluhulka, leevendades seeläbi diskreetse lähenemise puudusi. Allpool on näide, mis seda selgelt demonstreerib.

Voolu piirangu seadistamisel 2,6 mA-le väheneb võimsustarve märkimisväärselt, ulatudes ligikaudu 60 mW kanali kohta. Seega saab 8-kanalise digitaalse kahendloogika sisendmooduli võimsust hinnata nüüd vähem kui poole vatti peale, mis parandab oluliselt selle efektiivsust ja vähendab energiatarvet (vt Tabel 3) [3].

Tabel 3 Hinnanguline energiasääst digitaalsetes kahendloogika sisendmoodulites integreeritud digitaalse kahendloogika sisendi kiibi kasutamisel [3]

Digitaalsisendi kanalite arv	Hinnanguline energiatarve (Diskreetne lähenemine) (W)	Hinnanguline energiatarve (Integreeritud lähenemine) (W)
8	2.1	0.48
16	4.2	0.96
32	8.4	1.92
64	16.9	3.84

2.2.4 Ühe kanaliga integreeritud digitaalne kahendloogika sisend

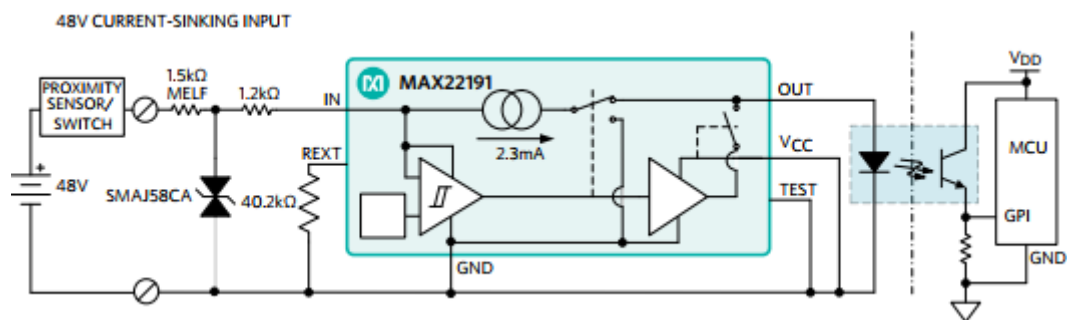
Integreeritud lahenduseks on mikrokiip, mis mahutab endasse tuhandeid aktiivseid ja passiivseid miniatuurkomponente koos nende omavaheliste ühendustega, moodustades seega tervikliku skeemi [10].

Erinevate tootjate lahendusi on turul kättesaadavad. Siin punktis tuuakse Maxim Integrated Products Inc (Analog Devices Inc. tütarettevõte) ja Texas Instrument Inc. poolt toodetud kiipide kasutamise näited integreeritud lahenduse kohta.

Diskreetsele lähenemisviisile alternatiivseks lahenduseks on ühe kanaliga integreeritud lahendus, näiteks kiip MAX22191. See tööstuslikele rakendustele mõeldud seade toimib voolu piirava ning parasiihtoitega digitaalsisendina, mis vastab IEC61131-2 standarditele. Seade teisendab efektiivselt 24 V digitaalse kahendloogika tööstusliku sisendi 2,4 mA (tüüpilise) vooluks, mis sobib ideaalselt optronide juhtimiseks. Pinge künnisväärtused ja voolutasemed vastavad nii 1. kui ka 3. tüüpi sisendi spetsifikatsioonidele, mis teeb seadme sobivaks nii voolu neelu kui ka vooluallika rakendustega. Lisaks saab seda väliste takistite lisamise teel kohandada 48 V sisenditele vastavaks [4].

Energiat toiteks saab hankida kas välisest toiteallikast või sisendsignaalist endast, mis välistab vajaduse välise toiteallika järele ja seega lihtsustab plaadi juhtmestikku. Maksimaalne kiire reageerimisaeg 250 ns teeb seadmest suurepärase valiku kiirete sisendite käsitlemiseks. Lisaks pakub seade CMOS-iga ühilduvat testsisendit ohutusdiagnostika eesmärgil. Integreeritud termiline väljalülitus tagab seadme kaitse VCC toitepinge olemasolul, suurendades veelgi seadme töökindlust [4].

Kompaktne 6-juhtmega SOT23 pakend sobib eraldiseisvate kanalitega isoleeritud moodulite ehitamiseks. Alltoodud joonis (vt Joonis 3) illustreerib tüüpilist rakendusahelat, kus MAX22191 on konfigureeritud 48 V voolu neelavaks sisendiks [4].

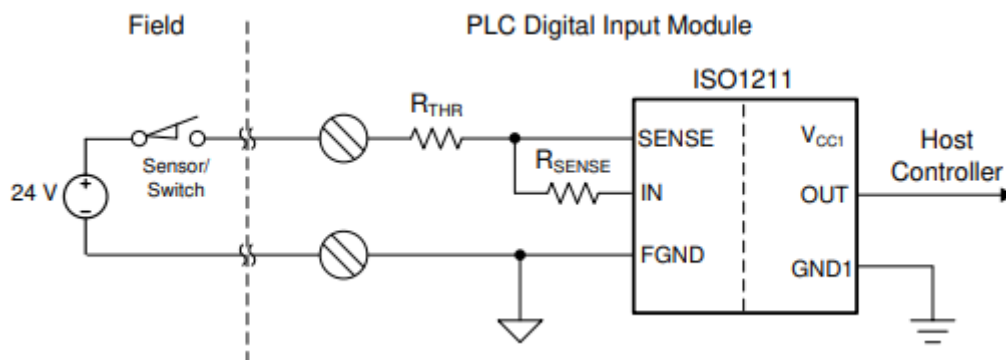


Joonis 3 MAX22191 tüüpiline skeem [4]

MAX22191 kasutamine 24 V digitaalse kahendloogika sisendsignaali jaoks traditsioonilise diskreetse digitaalse kahendloogika sisendi ahela asemel vähendab märkimisväärselt soojuseraldust. Näiteks allika poolt toodud töökatses küündis diskreetse lahenduse temperatuur 51 kraadini, kui samal ajal jäi MAX22191 kiibi osa 35 kraadi juurde [4].

Texas Instruments pakub isoleeritud digitaalse kahendloogika sisendi vastuvõtjat ISO1211, millel on integreeritud voolu piiraja, mis vastab standardile IEC 61131-2, tüüp 1, 2 ja 3. Antud seade lihtsustab süsteemi projekteerimist, kuna see integreerib täpse voolu piirangu, hüstereesiga pingelülitise, vastupingestamise kaitse ja isolatsiooni, ilma väljalaspolse toiteallika vajaduseta. Vastavalt 3. tüüpi spetsifikatsioonidele piirab ISO121x sisendvoolu tarbimist vähem kui 2,5 mA-ni, mis on traditsioonilistest meetoditest umbes viis korda väiksem [8].

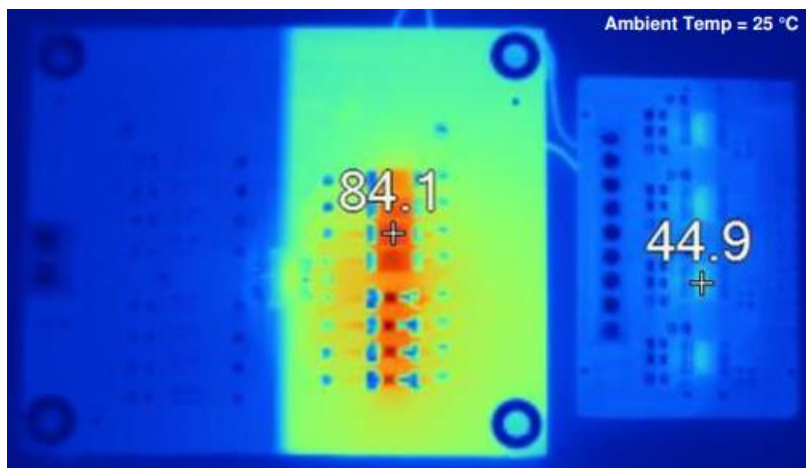
Alltoodud joonisel (vt Joonis 4) on esitatud ISO1211 tüüpiline rakendusahel.



Joonis 4 Ühe kanaliga integreeritud digitaalne kahendloogika sisend kasutades ISO1211 [8]

Võrreldes traditsiooniliste optronide kasutamisega pakub ISO121x-ga projekteerimine järgmisi eeliseid [8]:

- ISO121x täpne voolu piiramisvõime võib vähendada soojuseraldust ja alandades plaadi temperatuuri. Traditsiooniline lahendus võib toatemperatuuril testimisel saavutada temperatuuri 84°C, samas kui ISO121x-põhine lahendus püsib märgatavalt jahedamana temperatuuril 45°C (vt Joonis 5).
- ISO121x-põhised lahendused vähendavad komponentide arvu, mille tulemuseks on väiksemad trükkplaadid. Lisaks võimaldab vähenenud soojuseraldus tihedamat paigutust.
- ISO121x tagab vastavuse IEC 61131-2 sisendspetsifikatsioonidele, voolu piirangule ja isolatsioonile, mis on kirjeldatud tooteandmelehtedel, kõrvaldades vajaduse täiendavate Schmitti trigeri puhvrite järele.
- ISO121x pakub 4 Mbps andmeedastuskiirust ja 150 ns viivitust, võimaldades märkimisväärselt kiiremaid liideseid võrreldes üldotstarbeliste optronitega.



Joonis 5 Trükkplaatide temperatuuri võrdlus: Traditsiooniline lähenemine ISO1212 lähenemise vastu [8]

2.2.5 Digitaalsed kahendloogika väljundid

Kontrollereid (PLC) kasutatakse tööstuslike seadmete juhtimiseks, kusjuures konkreetsete funktsioonide teostamiseks kasutatakse lülitustoimelisi signaale, mida nimetatakse digitaalseteks kahendloogika väljunditeks. Need juhivad releesid, mootorikäitlusseadmeid, sisse-/väljalülitusventiile, solenoide, indikaatoreid jms. Tööstuslike kahendloogika sisend-väljund signaalide pinge on tavaliselt vahemikus 0 V (näitab "väljas") kuni 60 V (näitab "sees"), kuid tavaliselt jääb see vahemikku 0–24 V. Need pingeniivood on tahtlikult kõrgemad, et tagada vastuvõtja poolt seisundi täpse tõlgendamise, eriti kui signaal läbib pikki vahemaid elektriliste häirete suhtes tundlikes keskkondades. Digitaalsete kahendloogika väljundkaartide puhul kasutatakse tavaliselt diskreetseid konstruktsioone, kusjuures kasutatakse erinevaid lähenemisviise, sealhulgas kohaliku mikrokontrolleri viikudest paralleelset juhtimist või deserialisaatori kasutamist koos üksikute või mitmekanaliliste FET-draiveritega [4].

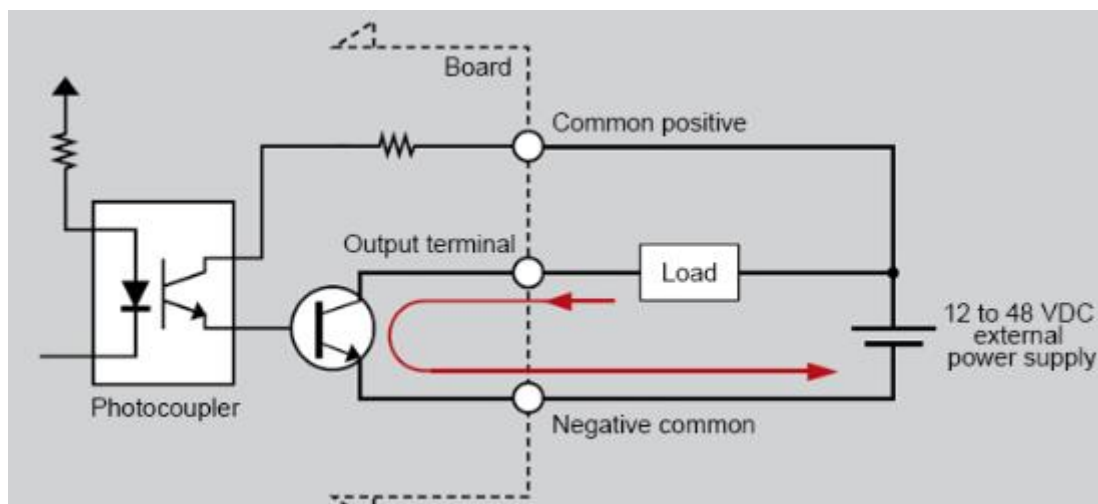
2.2.6 Diskreetne digitaalne kahendloogika väljund ühe kanaliga

Kasutades transistori kujul olevat pooljuhtseadet, suudab väljundahel tõhusalt aktiveerida ja juhtida alalisvoolu koormusi, võimaldades nende avamist ja sulgemist. Sellist tüüpi väljundit nimetatakse kontaktivabaks, kuna see toimib ilma tegeliku füüsilise kontaktita, erinevalt kontaktväljunditest [9].

Järgnevalt on toodud digitaalsete kahendloogika väljundlülituste näited, mis on liigitatud vastavalt nende rakendusele ja elektrilistele eristustele [9].

2.2.6.1 Optroniga eraldatud avatud kollektori väljund

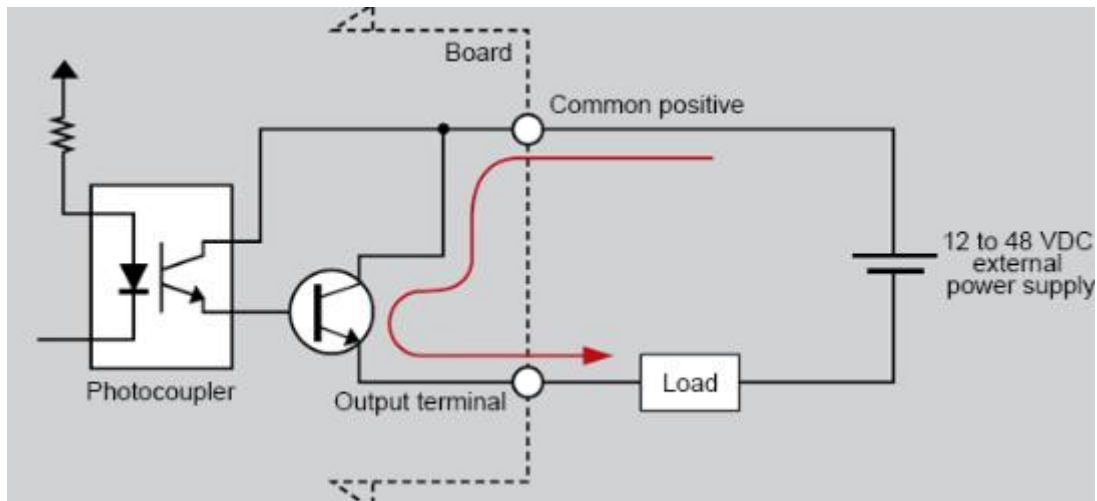
Selles konfiguratsioonis on väljundklemm ühendatud väljundtransistori kollektori külge, mille tagajärjel on see avatud olekus. Sellise vooluallika tüübi puhul, kui väljundtransistor lülitub sisse (koormuse sisselülitamisel), liigub vool koormusest (Load) väljundklemmi (Output terminal) (vt. Joonis 6 punane nool). See seadistus sobib signaalide edastamiseks standardsete väikese võimsusega elektriseadmetele, mis tavaliselt töötavad vahemikus 12–48 V [9].



Joonis 6 Optroniga eraldatud avatud kollektori väljund skeem [9]

2.2.6.2 Optroniga eraldatud väljund

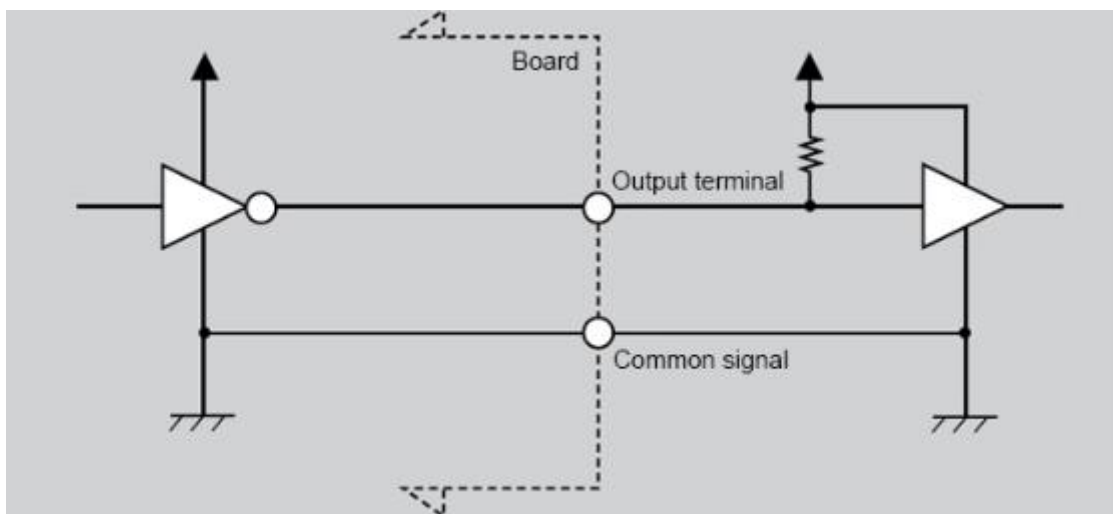
Selles seadistuses on väljundklemm ühendatud väljundtransistori emitteriga. Sellise vooluallika tüüpi konfiguratsioonis voolab vool väljundtransistorist aktiveerimisel väljundklemmist koormusele (vt. Joonis 7 punane nool). Seda seadistust kasutatakse tavaliselt signaalide edastamiseks väikese võimsusega elektriseadmetele, mis tööpingega vahemikus 12–48 V. Euroopa riikides on see seadistus eriti eelistatud tänu oma suurepärasele ohutusfunktsioonidele maandus vigade korral [9].



Joonis 7 Optroniga eraldatud väljund skeem [9]

2.2.6.3 Mitte-isoleeritud TTL avatud kollektori väljund

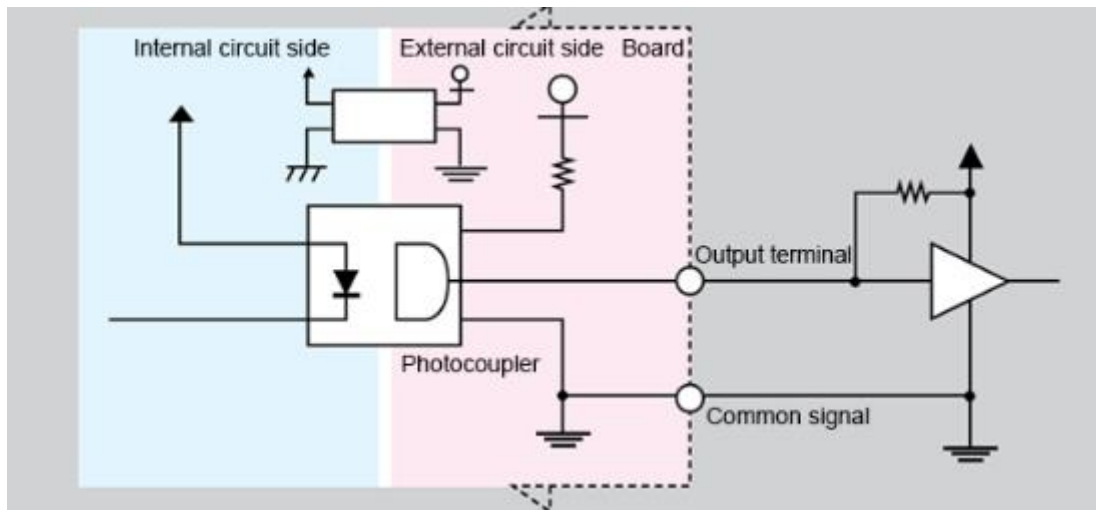
Antud lülituses on transistori kollektor väljundklemm, mis on avatud olekus. Sisendlülituse pool on üles tõmmatud. Sisemine loogika järgib negatiivset loogikat, kus "Madal (otseühendus): 1, Kõrge (avatud): 0." See väljund on mõeldud signaalide edastamiseks seadmetele, millel on TTL-sisend ja 5 V ühilduvus (vt Joonis 8) [9].



Joonis 8 Mitte-isoleeritud TTL avatud kollektori väljund skeem [9]

2.2.6.4 Optroniga eraldatud TTL-tasemega väljund

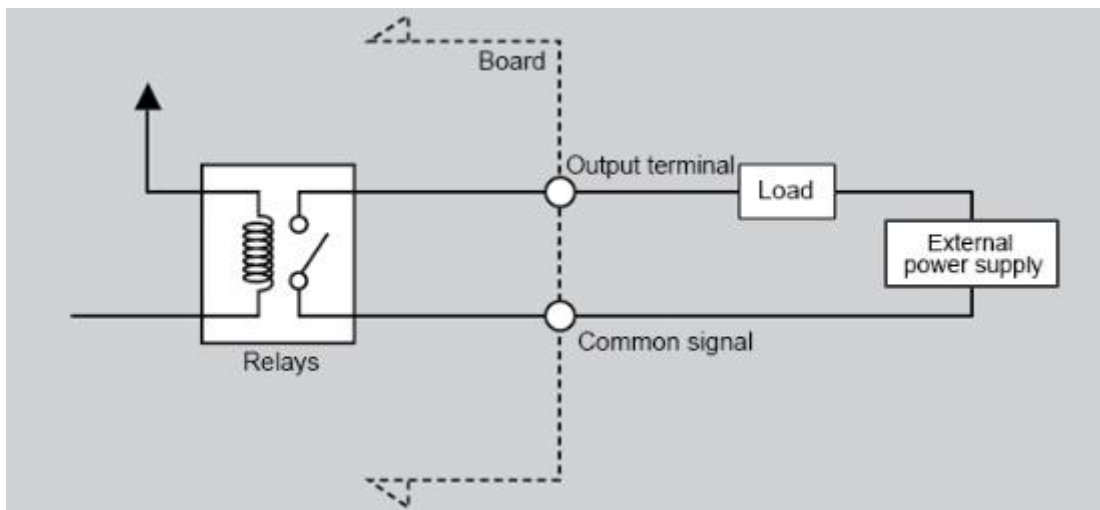
Selles lülituses toimib väljundtransistori kollektor väljundklemmina. Sisemine loogika kasutab negatiivset loogikat, kus 'Madal' vastab väärtusele 1 ja 'Kõrge' väärtusele 0. Seda väljundit kasutatakse olukordades, kus TTL-sisendi ja 5 V ühilduvusega seadmete tööahelate juhtmestik on liiga pikk või kui on vajalik selliste seadmete isoleerimine (vt Joonis 9) [9].



Joonis 9 Optroniga eraldatud TTL-tasemega väljund skeem [9]

2.2.6.5 Relee väljund

See väljundlülitus kasutab releed ning on seetõttu sisemisest loogikalülitusest isoleeritud. Relee väljund kasutab füüsilist kontakti koormuse juhtimiseks ja selle avamiseks/sulgemiseks. Samuti, kuna voolu voolusuunal pole piiranguid, saab ühendada nii vahelduvvoolu kui ka alalisvoolu koormusi. Seda väljundit kasutatakse vahelduvvoolu toite lülitamiseks või signaalide saatmiseks võimsatele elektriseadmetele, mis töötavad pingega üle 48 V (vt Joonis 10) [9].



Joonis 10 Relee väljund skeem [9]

2.2.7 Kaheksa kanaliga integreeritud digitaalne kahendloogika väljund

Integreeritud lahendused pakuvad ruumisäästlikke eeliseid. Lisaks sisaldavad turul saadaolevad väljund-draiverid temperatuuritundlikke väljalülitusrežiime, et kaitsta end

ebatavalise temperatuuritõusu või lühise või suure voolu eest. Digitaalsete kahendloogika väljundmoodulite projekteerijad peavad tagama, et draiver saaks tõhusalt hallata erinevaid koormusi, sealhulgas valdavalt induktiivseid ja takistuslikke koormusi, aga ka mõningaid mahtuvuslikke koormusi. Integreeritud mitmekanalilisi digitaalväljunddraivereid tunnustatakse tavaliselt tööstuslike lülitena, mis pakuvad laiaulatuslikke diagnostika- ja konfiguratsiooniseadeid erinevate jõudlusvalikute jaoks [4].

Ühe efektiivse lahenduse näiteks on MAX14900E, mis on loodud kaheksa kanaliga lülitena, võimaldades iga kanali eraldi konfigureerimist. Toetus suure kiirusega koormuse lülitamisele muudavad selle sobivaks tööstuslikeks süsteemideks, kus on nõutav kõrge töökiirus. Iga lüliti on võimeline andma pidevat voolu 850 mA. Seade võimaldab lülitussagedustega kuni 100 kHz pikkade kaablite kaudu juhtimist PWM/PPO juhtimise jaoks. Lisaks saab suuremate voolude saavutamiseks paralleelistada mitu lülitust. MAX14900E toitepingeseadmestik on laias vahemikus 10 V kuni 36 V (vt Lisa 2) [4].

3 Sisend-väljund mooduli praktiline teostus

Antud peatükis kirjeldab autor kõiki digitaalse kahendloogika sisend-väljund mooduli loomise etappe. Praktiline osa on jagatud kolmeks osaks, milleks on mooduli teostuse kirjeldus diskreetse lähenemise korral, mooduli teostuse kirjeldus integreeritud lähenemise korral ning nende lahenduste võrdlus testitulemuste ja muude tegurite põhjal, mida defineeritakse vastavas osas.

3.1 Trükkplaadi parameetrite seadistamine KiCad tarkvaras

Antud osa eraldas autor eraldi punkti, kuna mõlema trükkplaadi valmistamine autori loodud projektifaili alusel oli tellitud sama teenusepakkuja käest. Vajalike parameetrite seadistamine viidi läbi üks kord, vastavalt tootja tehase võimalustele, ning seejärel kopeeriti uude projekti. Trükkplaadi parameetrite seadistamisel kasutas autor avalikult kättesaadavaid õppematerjale ning tootja ametlikku juhendit [14][15][18].

3.1.1 Trükkplaadi kihid

Trükkplaadi projekteerimise ettevalmistamise etapis valis autor järgmised aktiivsed kihid [15]:

- Esi- ja tagumine kontuurijooned (*front and back courtyard layers*) – määrab üksiku komponendi turvalise ala.
- Esi- ja tagumine pastakihid (*front and back paste layers*) – määratletud ala, kus tootja ei tohiks komponentide jootmise võimaldamiseks kasutada jootemaski.
- Esi- ja tagumine märgistuskihid (*front and back silkscreen layers*) – Trükkplaadi kiht, mis sisaldab märgistusi, silte, sümboleid või graafikat komponentide, polaarsuse, orientatsiooni või kokkupanekujuhiste kohta.
- Esi- ja tagumine maski kihid (*front and back solder mask layers*) – trükkplaadi pinnale kantav kaitsekiht, mis isoleerib ja kaitseb vasetrükiseid keskkonnamõjude, näiteks tolmu, niiskuse ja lühiste eest.
- Servade kaitseala (*Margin layer*) – trükkplaadil kasutatakse seda kihti servade kaitseala määratlemiseks. Antud kiht tagab piisava ruumi trükkplaadi serva ja

komponentide, radade või muude vaselementide vahel, et vältida võimalikke probleeme, nagu lühised, häired või tootmisvead.

- Esi- ja tagumine vasekihid (*front and back Copper layers*) – trükkplaadi alusmaterjalile lamineeritud vasefooliumi kiht. Seda kihti kasutatakse radade, kontaktpindade ja tasandite loomiseks, mis moodustavad elektrilised ühendused komponentide vahel plaadil.
- Serva lõike kiht (*edge cut layer*) – trükkplaadi kujunduses kasutatakse kihti trükkplaadi kuju määratlemiseks.

Mõlemad projektifailid, nii diskreetse kui ka integreeritud lähenemisega, on loodud kahekihilise trükkplaadi alusel.

3.1.2 Trükkplaadi seadistused

Trükkplaadi projekteerimise ettevalmistamise etapis seadis autor trükkplaadi parameetrid vastavalt tootja nõuetele [14]. Tootjal on õigus neid nõudeid igal ajal muuta, seega saab autor garanteerida määratletud parameetrite kehtivuse ainult trükkplaadi projekteerimise ajal. Autori määratletud parameetrid on esitatud järgmiselt (vt Lisa 3).

Parameetrid, mida tootja ei määratlenud või nende määramine ei oma tootmis protsessile mõju, jättis autor nende algsesse olekusse [18].

3.2 Digitaalse kahendloogika sisend-väljund mooduli diskreetne teostus

Käesolevas peatükis käsitleb autor diskreetse digitaalse kahendloogika sisend-väljund mooduli skeemi loomise ning trükkplaadi disainimise protsesse.

Projekti väljatöötamiseks kasutas autor järgmisi avalikult kättesaadavaid materjale, mis on ühtlasi vormistatud näidisprojektidena [11][12].

3.2.1 Skeemi väljatöötamine

Projekti elektriskeemi on tinglikult jagatud kaheks peamiseks osaks, nimelt:

- Diskreetse digitaalse kahendloogika sisendi kujundamine – vastupidava liidese loomine, mis suudaks mahutada kuus sisendit välistest automaatika

standardsignaali anduritest, eesmärgiga suurendada hüpoteetilise mikrokontrolleri võimet koguda andmeid erinevatest välisallikatest [19].

- Diskreetse digitaalse kahendloogika väljundi kujundamine – relee baasil põhinev väljundisüsteem, mis suudab hallata kahte väljundit kuni 250 VAC ja 10 A, mis võimaldab juhtida väliseid seadmeid, laiendades kontrolleri kasutusvõimalusi tööstus keskkondades [19].

3.2.1.1 Esmased inspiratsiooni allikad

Ülesande lahendamiseks mõeldud trükkplaadi kavandamise teekond on alanud võimalike komponentide uurimisega, mis võiksid ülaltoodu tingimustele vastata [19].

Otsing sobiva lahenduse järele sisaldas eksisteerivate lahenduste uurimist. Tulemusena on tabanud autor esmast inspiratsiooni uurides BeagleBone® tootja poolt pakutud „Power Cape“ ning „Relay Cape“ skeemitehnilisi lahendusi (vt Lisa 4-5) [19].

Leitud relee lahendus oli varustatud 4 releega, millest kahe tööpiirkond oli piiratud väärtustega 24 VDC 15 A ning kahe järgmise väärtustega 250 VAC 12 A. Leitud toitepinget reguleeriv skeem koosnes ühest lineaarsest pingeregulaatorist (5 V teisendamine 3.3 V-ks) ning ühest lülitavast pingeregulaatorist (30 V teisendamine 5 V-ks) [19].

Projekti edenedes otsustas autor säilitada releedel põhineva väljundlahenduse, kuid kasutades ainult neid releesid, mis vastavad projekti juhendaja poolt määratud tingimustele [19].

Pinget reguleeriva skeemitehnilise lähenemise oli autori poolt otsustatud teisendada paljulubavamaga alternatiiviga, kuna esmaselt valitud lahendusega kaasnes energiatarve suurenemine, võimalik ülekuumenemise vältimise vajadus ning üldine trükkplaadi maksumuse ja suuruse suurenemine [19].

3.2.1.2 Esmase prototüübi sisendi skeemi väljatöötamine

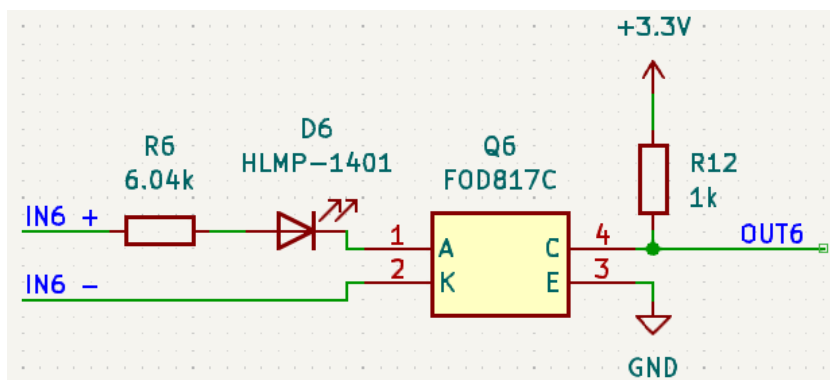
Esmase prototüübi skeemi sisendi väljatöötamine hõlmas mitmeid olulisi otsuseid ja korduvaid muudatusi sobiva lahenduse saavutamiseks [19].

Autor on uurinud kahte võimalikku lahendust sisendi jaoks. Esimene lahendus seisnes selles, et kasutada täiendavaid releesid, ehk üks relee iga sisendi kohta, ning teine selles, et iga mõeldud sisend oleks teostatud kasutades pingetaseme lülitid. Mõlemad lähenemised teeksid võimalikuks teostada signaalide vahetust kahe, erineval pingetasemel töötava, eraldiseisva süsteemi vahel [19].

Projekti juhendajaga konsulteerimise tulemusena peeti täiendavate releede lahendust mitmel põhjusel ebasoodsaks, sealhulgas [19]:

- Relee lülitamise aeg on antud eesmärkide jaoks liiga aeglane. Releedel on tavaliselt mehaanilised komponendid, mis füüsiliselt liiguvad vooluahela avamiseks või sulgemiseks, mille tagajärjel võib lülitusajad olla aeglasemad võrreldes näiteks optronidega, mis kasutavad signaalide elektrooniliseks edastamiseks valgust.
- Kuue täiendava relee vajadus nõuaks täiendavat trükkplaadi pindala, mis tulemusena võiks mõjutada prototüübi hinda.

Alternatiivne lahendus pingemuunduriga, kasutades optrone, tundus paljulubavam ning oli autori poolt valitud edasiseks arendamiseks (vt Joonis 11) [19].



Joonis 11 Pingetaseme lülitil põhinev esmase prototüübi ühe sisendi skeem

Komponentide valik ning nende nominaalid olid tingitud projekti juhendaja soovist, spetsialistide soovist, kes ei ole seotud ülikooliga, komponentide eelneva testimise tulemustest enne trükkplaadi lõplikku rakendamist ning inspiratsiooni allikaks võetud näidisprojektist, mille skeem on avalikult kättesaadav [11]. Lisaks kehtestas projekti juhendaja täiendavaid nõudeid, mis puudutasid sellised skeemi aspekte, nagu: lubatav

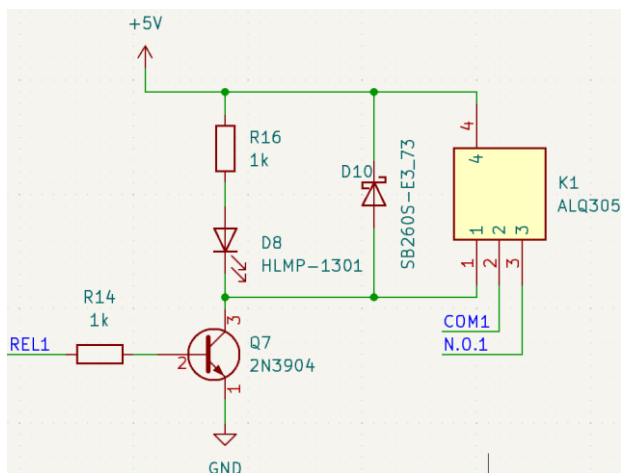
voolutarbimise piir iga sisendi ning väljundi suhtes, nimelt 5 mA, iga sisendi võimekus opereerida tööstuslikudel automaatika pingeniivodel, nimelt 24 ($\pm 10\%$)V.

3.2.1.3 Esmase prototüübi väljundi skeemi väljatöötamine

Et mitte ainult hüpoteetiliste tööstussüsteemide signaale vastu võtta, vaid ka nende komponente juhtida, kavandas autor järgmise skeemi (vt Joonis 12). Selle skeemi tööpõhimõtte lühikirjeldus on toodud punktis „2.2.6.5 Relee väljund“.

Kuna esialgne prototüüp oli mõeldud töötama konkreetse tootja arendusplatvormiga, nimelt The BeagleBoard.org Foundation, otsustas autor võtta aluseks sama tootja valmisprojekti, et vältida raskusi nende koostoimes. Doonoriprojektiks on saanud toode ametliku nimetusega „BeagleBone® Relay Cape“ [12].

Muudatustena tulid vaid kõrgsageduslik ja madalsageduslik filterkondensaatorid nominaalidega 1 μF ja 10 μF , mis viidi toitepinge sisendile lähemale tehes neid ühiseks mõlema relee väljundi jaoks (vt Lisa 6). Täiendavalt muudeti doonorprojektis kasutusel olevad releede tüüp SPDT-lt SPST-le. Mõlemad kirjeldatud muudatused tehti prototüübi tootmise lõpliku odavamise eesmärgil.



Joonis 12 Esmase prototüübi väljundi skeem

3.2.2 Trükkplaadi väljatöötamine

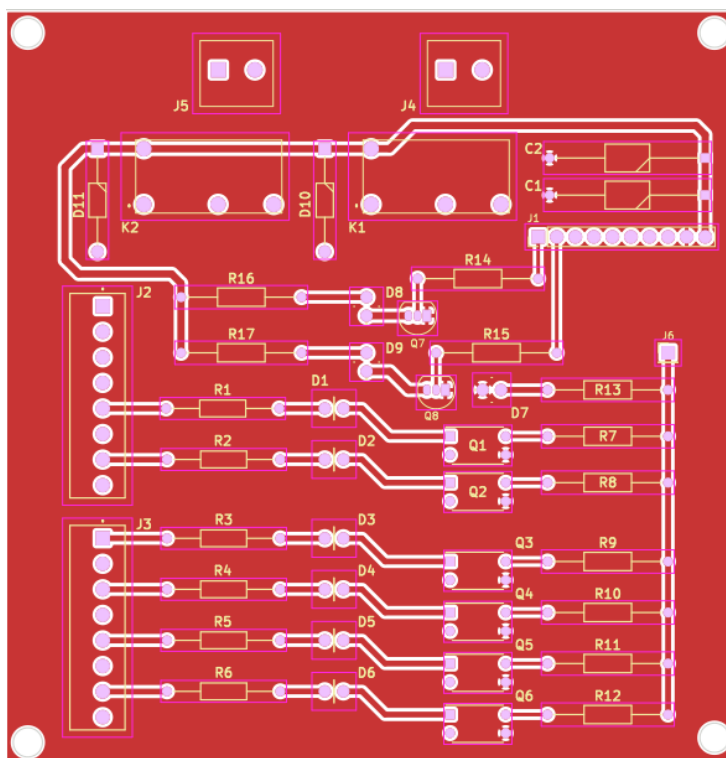
Tulevase trükkplaadi aktiivsete kihtide valik ning parameetrite seadistamine on varasemalt kirjeldatud punktides „3.1.1 Trükkplaadi kihind“ ning „3.2.1 Trükkplaadi seadistused“.

Trükkplaadi projekteerimise ja järgnevalt ka trükkplaadi tellimuse esitamise käigus, kasutas autor järgmiseid avalikult kättesaadavaid võrgumaterjale [14-16][18].

Töötamine trükkplaadiredaktoriga oli autori jaoks uus kogemus, mis tõi kaasa vastavad raskused. Uuriti palju uusi materjale, kasutades eelpool viidatud allikaid, mis viisid lõpliku prototüübi projekteerimisel viivituseni. Kõige sagedasemad probleemid, millega autor silmitsi seisis, olid valesti seatud parameetrite piirväärtused ja komponentide paigutamine ilma nende piirväärtuste arvestamata. Kuna mainitud puudused mõjutasid suuremat osa prototüübi elementidest, tehti disainis mitu korda ulatuslikke ümberplaneerimisi. See ümberplaneerimine mõjutas prototüübi selliseid omadusi nagu komponentide paigutus trükkplaadil, komponentide vahelised ühendused, trükkplaadi proportsioonid ja ühendusklemmide numeratsioon.

Trükkplaadi viimase versiooni, nimelt versiooni C, kõigi eelnevalt mainitud esikihtide joonis (vt „3.1.1 Trükkplaadi kihid“) asub allpool (vt Joonis 13). Tagumiste kihtide pilt on saadaval ka lisamaterjalides (vt Lisa 7).

Kõigi esialgse prototüübi loomisel kasutatud komponentide loend on samuti saadaval lisamaterjalides (vt Lisa 8).



Joonis 13 Esmase prototüübi trükkplaadi esikihtide kujutus

3.3 Digitaalse kahendloogika sisend-väljund mooduli integreeritud teostus

Käesolevas peatükis käsitleb autor integreeritud digitaalse kahendloogika sisend-väljund mooduli skeemi loomise ning trükkplaadi disainimise protsesse.

Projekti väljatöötamiseks kasutas autor järgmisi avalikult kättesaadavaid materjale, mis on omakorda saanud ka näidis projektideks [12][13].

3.3.1 Skeemi väljatöötamine

Integreeritud lähenemisviisil põhineva uue skeemi kavandamise eesmärk oli autori soov täiustada mõningaid esmase diskreetse lahendusega projekti alamkomponente.

Autorile seatud eesmärgid olid järgmised: suurendada tulevase trükiplaadi töödeldavate sisendite arvu kuuest kaheksani, serialiseerida infoedastus trükiplaadi ja hüpoteetilise mikrokontrolleri vahel, rakendada IEC 61131-2 (vt. p. 2.2.2) standardi toetamine iga realiseeritud sisendi puhul, vähendada tulevase trükiplaadi mõõtmeid täielikult üle minnes SMD komponentidele, välja arvatud releed ja ühenduspesad.

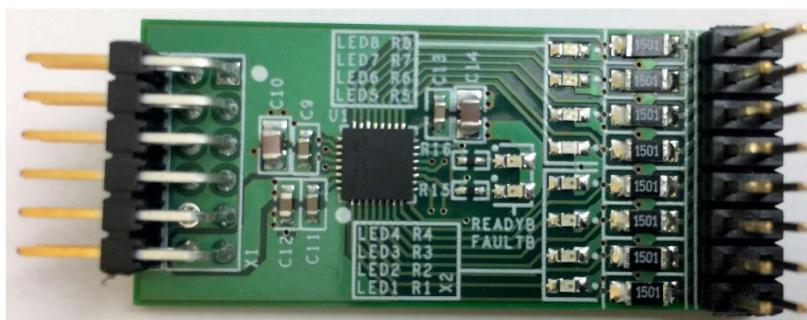
Lähtudes ülaltoodud tingimustest oli antud projekti osa jagatud kaheks peamiseks osaks, nimelt:

- Integreeritud digitaalse kahendloogika sisendi kujundamine – vastupidava liidese loomine, mis suudaks mahutada kaheksa sisendit välistest anduritest ja nende info edaspidiseks serialiseerimiseks, eesmärgiga suurendada hüpoteetilise kontrolleri võimet koguda andmeid mitmetest välisallikatest [19].
- SMT tehnoloogial põhineva digitaalse kahendloogika väljundi kujundamine – relee baasil põhinev väljundisüsteem, mis suudab hallata kahte väljundit kuni 250 VAC ja 10 A, mis võimaldab juhtida väliseid seadmeid, laiendades mikrokontrolleri kasutusvõimalusi tööstusautomaatika keskkondades [19].

3.3.1.1 Täiustatud prototüübi sisendi skeemi väljatöötamine

Lähtudes eelnevalt uuritud teoreetilisest materjalist (vt. p. 2.2) ja täiustatud projektile rakendatud tingimustest (vt. p. 3.3.1), oli autori poolt tehtud otsus võtta inspiratsiooni valmis integreeritud lahendusest.

Teoreetiliste materjalide põhjal [3] tegi autor valiku tootja Analog Devices Inc. ning nende lahenduse MAX22190 [17] kasuks. Antud tootja esitas ka valmis toote näite (vt Joonis 14), kasutades MAX22190 [13]. Andmelehel on üksikasjalikult kirjeldatud kõik kasutatud komponendid, esitatud skeemid ja isegi valmis trükiplaadi aktiivsed kihid, mis oluliselt kiirendasid autori projekti täiustamise tööd.



Joonis 14 MAX22190PMB [13]

MAX22190 on tööstuslike digitaalsete sisendite seade, mis vastab standardile IEC 61131-2. See muundab kaheksa 24 V tööstuslikku digitaalset sisendit jadaedastusega bitivooks, mida saab lugeda SPI-liidese kaudu. MAX22190PMB ühildub ainult voolu allikana töötavate sensoritega. MAX22190 toiteallikaks võib olla kas 24 V väljundpinge või ühendatud 3,0 – 5,5 V toiteallikas. See moodul kasutab seda võimalust, et elimineerida vajadus välise 24 V toiteallika järele [13].

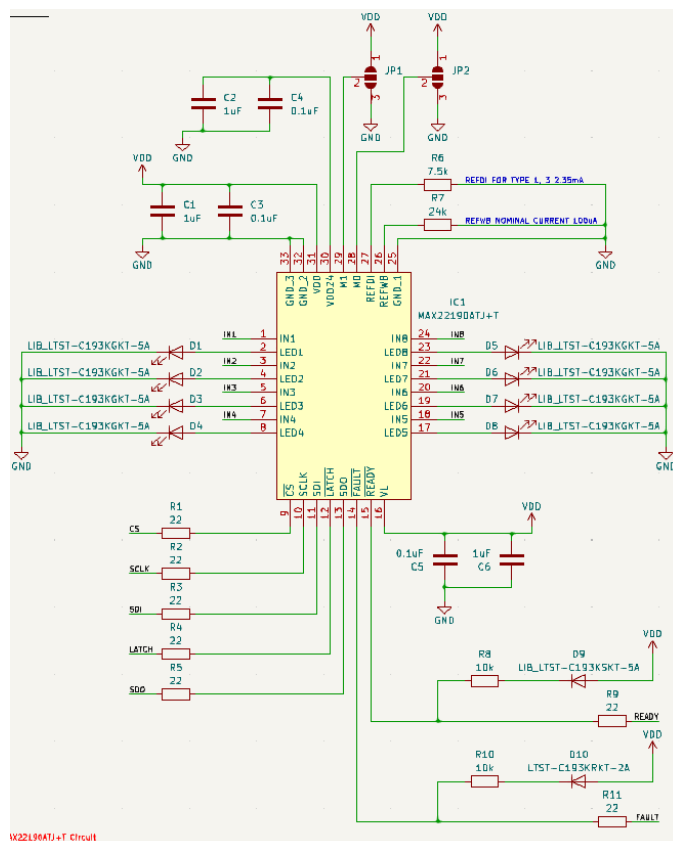
MAX22190 on varustatud kaheksaga sisendiga, mis on konfigureeritud vastama standardile IEC 61131-2 tüüpidele 1, 3 digitaalsed sisendid. Takistus R10, koos sisendtakistustega R1 – R8, määrab sisendi voolu piirangu (vt. Joonis 15). Iga sisendkanaliga on kaasas LED (LED1 – LED8), et visuaalselt näidata digitaalse sisendi olekut. Teine MAX22190 märkimisväärne omadus on selle võime tuvastada katkestatud juhtme olukordi igal sisendil, mis aitab diagnoosida vigase anduri juhtmestikku. Takistus R9 on kasutatud nominaalse „Wire break detection“ voolu seadistamiseks 100 μ A-le [13].

MAX22190-l on palju sisseehitatud diagnostilisi funktsioone, et toetada veakindlaid rakendusi. See hõlmab juhtmekatke tuvastamist, pingeallika jälgimist, kiibi temperatuuri jälgimist ja CRC-d SPI liidese suhtluse jaoks [13].

MAX22190 SPI-ühilduv liides on mõeldud sisendandmete, diagnostikaandmete lugemiseks ja kõigi registre konfigurimiseks. Liides saab töötada neljas režiimis, mille määravad sisendid M0 ja M1. Autori täiustatud projekti puhul on M0 seatud

kõrgeks ja M1 madalaks, mis näitab 16-bitist kaadri pikkust, CRC režiimi keelatud ja „daisy chaini“ keelamist [13].

Kuigi nimiväärtused ja komponentide loetelu esitas tootja, tegi autor otsuse vältida täpset tüüpide kopeerimist ja valida komponendid identsete nimiväärtuste ning sarnaste parameetritega, aga madalama hinnaga. Alltoodud lahendus on autori integreeritud digitaalse kahendloogika sisendi skeem (vt Joonis 15).



Joonis 15 Integreeritud digitaalse kahendloogika sisendi skeem

3.3.1.2 Täiustatud prototüübi väljundi skeemi väljatöötamine

Täiustatud prototüübi väljundi skeem on oma kujunduse poolest jäänud samaks (vt. p. 3.2.1.3). Erinevus esialgse prototüübiga seisneb selles, et kõik võimalikud komponendid olid autori poolt teisendatud SMD tüüpi komponentideks identsete nominaalidega ning sarnaste parameetritega.

Täiustatud prototüübi täisskeem on esitatud lisa materjalides (vt Lisa 11).

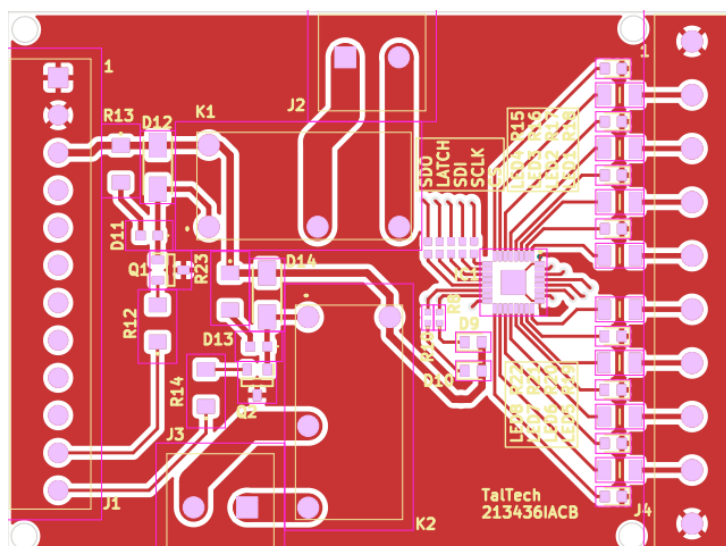
3.3.2 Trükkplaadi väljatöötamine

Tulevase trükkplaadi aktiivsete kihtide valik ning parameetrite seadistamine oli autori poolt varasemalt kirjeldatud peatükkides 3.1.1 ja 3.2.1.

Täiustatud trükkplaadi loomisel omas autor juba piisava kogemuse töös trükkplaadiredaktoriga, mistõttu kõik varemalt mainitud takistused rohkem ei pidurdanud arendamise protsessi.

Trükkplaadi viimase versiooni (versioon F), kõigi eelnevalt mainitud esikihtide joonis asub allpool (vt Joonis 16). Tagumiste kihtide pilt on saadaval ka lisamaterjalides (vt Lisa 9).

Kõigi täiustatud prototüübi loomisel kasutatud komponentide loend on samuti saadaval lisamaterjalides (vt Lisa 10).



Joonis 16 Täiustatud prototüübi trükkplaadi esikihid

4 Testimine ning analüüs

Käesolevas peatükis kirjeldatakse mõlema trükkplaadi testimist ning analüüsitakse mõlemat lähenemisviisi testimistulemuste põhjal.

4.1 Kahendloogika sisend-väljund mooduli diskreetse prototüübi testimine

Esmase prototüübi loomisel pidi autor arvestama lisapiirangutega, mis kehtestati nii juhendaja poolt kui ka süsteemi omaduste tõttu, mille osaks esmane prototüüp pidi saama.

Juhendaja kehtestatud piirang nägi ette, et hüpoteetilise tööstussüsteemi poolt iga sisendi tööks tarbitava vooluhulk ei tohiks ületada 5 mA. Süsteemi poolt kehtestatud piirang nägi ette, et releed juhtimiseks ja signaali iga sisendilt kontrollerrisse edastamiseks tarbitava vooluhulk summaarselt ei tohiks ületada 250 mA. Määratud piirangud olid autori poolt arvesse võetud esmase prototüübi projekteerimisetapil. Testimise ülesandeks oli veenduda nii mooduli tervikuna toimimises kui ka vastavuses kehtestatud piirangutele.

Esmase prototüübi testimine koosnes mitmest osast. Esiteks pidi autor veenduma iga kavandatud sisendi vastavuses juhendaja nõuetele. Selleks rakendas autor igale skeemi optroniga sisendile (vt Joonis 11) kontrollsignaali erineva pingeväärtusega, vahemik valiti 5 V kuni 24 V sammuga 5 V, et näha, kuidas see mõjutab voolu väärtust nii optoisolatsiooni välis- kui ka siseküljel, ehk hüpoteetilise tööstusautomaatika süsteemi ning mikrokontrolleri poolel.

Eraldiseisvaks testiks on releede testimine. Kuna mõlemad releed saavad nii toidet kui ka juhtsignaali mikrokontrolleri süsteemi poolt, siis oli vaja veenduda, et antud skeemi osa (vt Joonis 12) vastab teisele rakendatud piirangule.

Diskreetse kahendloogika sisend-väljund mooduli prototüübi testimise tulemused on esitatud ülejäärgmises punktis (vt p. 4.3).

4.2 Kahendloogika sisend-väljund mooduli integreeritud prototüübi testimine

Tuginedes punktis 3.3.1 mainitud muudatustele ja uutele omadustele, pidi autor muutma lähenemisviisi täiustatud prototüübi testimiseks.

Andmelehe järgi, IEC 61131-2 sisendspetsifikatsioonide täitmiseks suureneb MAX22190 iga sisendviigu voolutarve lineaarselt sisendpingega, kuni see saavutab voolu piiraja poolt määratud taseme. Mis tahes pinge edasine tõus üle selle lävendi ei põhjusta suuremat sisendvoolu [17].

Autori poolt mõeldud sisendite testimine seisnes selles, et rakendada igale neist kontrollsignaali erineva pingeväärtusega, pingete vahemik ning samm on identne esmase prototüübi vahemikule ning sammule (vt. p. 4.1), ning mõõta sellega järgnevaid voolu muutusi, kuni takistiga määratud piirini. Autori poolt seadistatud takisti oli nominaaliga 7.5 k Ω , mis tähendab, et peaks iga sisendi voolutarbe olema piiratud väärtusega 2.35 mA.

Võrreldes esmase prototüübiga, omab täiustatud lahendus MAX22190 SPI-ühilduva liidese. Liides saab töötada neljas režiimis, mille määravad sisendid M0 ja M1 (vt Tabel 4) [13].

Tabel 4 MAX22190 SPI liidese seadistamise võimalused [17]

MODE	M1: M0	FRAME LENGTH	CRC	DAISY CHAIN
0	0 0	24-bit	Yes	No
1	0 1	16-bit	No	No
2	1 0	24-bit	Yes	Yes
3	1 1	16-bit	No	Yes

Lähtudes ülaltoodud seadistamise võimalustes ning autori poolt valitud konfiguratsioonist (vt p. 3.3.1.1), seisneb antud täiustatud prototüübi osa testimine selles, et dekodeerida SPI kommunikatsiooni ning veenduda, et saadud andmed vastavad tõele, ehk rakendatud signaalid ning SPI tulemus on üks teisele vastavuses.

Kuna täiustatud prototüübil on kõigi trükkplaadi komponentide jaoks üks toiteallikas, kavatseb autor prototüübi voolutarbimist kontrollida ka maksimaalse koormuse juures, et veenduda, et see vastab 250 mA piirangule.

Integreeritud kahendloogika sisend/väljund mooduli prototüübi testimise tulemused on esitatud järgmises punktis.

4.3 Testimise tulemused ning analüüs

Antud punktis esitatakse mõlema trükkplaadi testimise tulemusi ning nende tulemuste analüüsi.

4.3.1 Esmase prototüübi testimise tulemused

Allolevast tabelist on võimalik näha iga sisendi kohta (optronid Q1 – Q6) tehtud voolu mõõtmisi (vt Tabel 5).

Tabel 5 Sisendite voolu tarbimise mõõtmiste tulemused

Pinge	Q1	Q2	Q3	Q4	Q5	Q6
5 V	0,4 mA	0,4 mA	0,4 mA	0,4 mA	0,4 mA	0,4 mA
10 V	1,2 mA	1,2 mA	1,2 mA	1,2 mA	1,2 mA	1,2 mA
15 V	2,0 mA	2,0 mA	2,0 mA	2,0 mA	2,0 mA	2,0 mA
20 V	2,8 mA	2,8 mA	2,8 mA	2,8 mA	2,8 mA	2,8 mA
24 V	3,5 mA	3,5 mA	3,5 mA	3,5 mA	3,5 mA	3,5 mA

Järgnevas tabelis on võimalik näha iga optroni väljundi kohta (optoisolaator Q1 – Q6) tehtud voolu mõõtmiste tulemusi. Iga teostatud mõõtmine oli tehtud mikrokontrolleri süsteemi poolel (vt Tabel 6).

Antud tabeli tulemuste korral tuleb arvestada, et samas ahelas asub ka LED indikaator (vt Lisa 6). Kui ühelegi sisendile pole pinge rakendatud, ehk ükski optron pole avatud, siis voolutarbe antud ahelas on 1,5 mA.

Tabel 6 Väljundite voolu tarbimise mõõtmiste tulemused

Pinge	Q1	Q2	Q3	Q4	Q5	Q6
5 V	1,8 mA	1,8 mA	1,8 mA	1,8 mA	1,8 mA	1,9 mA
10 V	3,7 mA	3,7 mA	3,8 mA	3,8 mA	3,8 mA	3,9 mA
15 V	4,5 mA	4,5 mA	4,5 mA	4,5 mA	4,6 mA	4,6 mA
20 V	4,5 mA	4,5 mA	4,6 mA	4,6 mA	4,6 mA	4,6 mA
24 V	4,6 mA	4,6 mA	4,6 mA	4,6 mA	4,6 mA	4,6 mA

Järgnevas tabelis on võimalik näha relee skeemide kohta (vt Joonis 12) tehtud voolu mõõtmiste tulemusi (releed K1-K2). Mõõdetud oli transistori baas-emitter ning kollektor voolud (vt Tabel 7).

Tabel 7 Relee skeemi voolu mõõtmised

Relee	BEvool	C vool
K1	2,5 mA	38,2 mA
K2	2,5 mA	38,8 mA

4.3.2 Täiustatud prototüübi testimise tulemused

Allolevast tabelist on võimalik näha iga MAX22190 sisendi kohta (sisendid 1-8) tehtud voolu mõõtmisi (vt Tabel 8).

Tabel 8 MAX22190 8 sisendi voolu mõõtmised

Pinge	Sisend 1	Sisend 2	Sisend 3	Sisend 4	Sisend 5	Sisend 6	Sisend 7	Sisend 8
5 V	1,3 mA	1,3 mA	1,3 mA	1,3 mA	1,3 mA	1,3 mA	1,3 mA	1,3 mA
10 V	2,3 mA	2,3 mA	2,3 mA	2,3 mA	2,3 mA	2,3 mA	2,3 mA	2,3 mA
15 V	2,3 mA	2,3 mA	2,3 mA	2,3 mA	2,3 mA	2,3 mA	2,3 mA	2,3 mA
20 V	2,3 mA	2,3 mA	2,3 mA	2,3 mA	2,3 mA	2,3 mA	2,3 mA	2,3 mA
24 V	2,4 mA	2,3 mA	2,3 mA	2,3 mA	2,3 mA	2,3 mA	2,3 mA	2,3 mA

Komponentide asendus SMD tüüpi komponentidele relee skeemis pole oluliselt mõjutanud voolu tarbimist. Testimis tulemused on esitatud tabelis (vt. Tabel 7).

Paralleelselt töödeldavate MAX22190 sisendite arv ei mõjuta oluliselt skeemi üldist voolutarbimist. Mõõdetud voolutarve, olukordades kui ühelegi MAX22190 sisendile ei rakendata pinget või pinge rakendatakse kõigile sisendile, on 1,3 ($\pm 3\%$)mA.

Ajaliste piirangute tõttu ei saanud autor testida SPI protokolliga vahendusel sisendite info väljalugemist, kuna see vajab täiendava draiveri kirjutamist hüpoteetilisele mikrokontrolleriga süsteemile.

4.3.3 Järeldus

Tuginedes mõlema prototüübi voolutarbimise testimistulemustele (vt. p. 4.3.1-4.3.2), analüüsitud teoreetilistele materjalidele erinevatest allikatest (vt. p. 2.2.1-2.2.7) ning arvestades täiustatud prototüübi laiendatud võimalusi (vt. p. 3.3.1.1), võib autor järeldada, et integreeritud komponentidel põhinev prototüüp on eelistatavam lahendus käesolevas diplomitöös määratletud probleemi lahendamiseks.

5 Kokkuvõte

Antud lõputöö raames oli seatud eesmärk arendada universaalne moodul, mis laiendaks mikrokontrollerite digitaalsete kahendloogika sisendite ning väljundite funktsionaalsust.

Töö eesmärgiks oli lahendada probleem, mis seisneb mikrokontrollerite võimetuses opereerida otse tööstuslike süsteemidega, mis töötavad kõrgematel pingetasanditel.

Vastavalt püstitatud eesmärgile analüüsis autor võimalikke lähenemisi trükkplaadi sisendite ja väljundite arendamiseks ning teostas kaks projekti, milles rakendati nii diskreetset kui ka integreeritud lähenemisviisi. Mõlemad lahendused hõlmasid trükkplaadi disainimist ja töötava mooduli prototüübi loomist.

Autor hindas valitud skeemitehniliste lähenemisviiside mõju loodud mooduli energiakasutusele. Hindamis tulemuseks on järeldus, et eelistatavam lahendus käesolevas diplomitöös määratletud probleemi lahendamiseks on integreeritud lahendus.

Projekti edasiarendusena on plaanis kirjutada SPI protokollide parser, et saaks teist prototüüpi täielikult testida.

Kasutatud kirjandus

- [1] IBM, „What is Industry 4.0?“, IBM. [Võrgumaterjal]. Saadaval: <https://www.ibm.com/topics/industry-4-0>. [Kasutatud 1 Aprill 2024].
- [2] Oracle, „What is Industry 4.0?“, Oracle. [Võrgumaterjal]. Saadaval: <https://www.oracle.com/scm/manufacturing/what-is-manufacturing/what-is-industry-4-0/>. [Kasutatud 1 Aprill 2024].
- [3] S.Dhanani, „Architecting a High Channel Density Digital IO Module for Next-Generation Industrial Automation Controllers“, Analog Devices, 12 Mai 2023. [Võrgumaterjal]. Saadaval: <https://www.analog.com/en/resources/technical-articles/architecting-a-high-channel-density-digital-io-module.html>. [Kasutatud 3 Aprill 2024].
- [4] Maxim Integrated Inc, „INDUSTRIAL DIGITAL IO“, Maxim Integrated Inc, November 2018. [Võrgumaterjal]. Saadaval: <https://pdfserv.maximintegrated.com/en/pg/Industrial-Digital-IO-Design-Guide.pdf>. [Kasutatud 3 Aprill 24].
- [5] Siemens AG, „Connection of Encoder Types in Compliance with IEC 61131-2 to DI Modules“, Siemens AG, Märts 2015. [Võrgumaterjal]. Saadaval: https://support.industry.siemens.com/dl/files/921/109477921/att_863631/v2/109477921_Compliance_IEC_61131-2_DI_module_en.pdf. [Kasutatud 7 Aprill 2024].
- [6] F.Dehmelt, „Cascading of input serializers boosts channel density for digital inputs“, Texas Instruments Inc, 2008. [Võrgumaterjal]. Saadaval: <https://www.ti.com/lit/an/slyt301/slyt301.pdf>. [Kasutatud 8 Aprill 2024].
- [7] StackExchange, „What are FIT's and how they used in reliability calculations?“, StackExchange, 15 Juuli 2016. [Võrgumaterjal]. Saadaval:

- <https://electronics.stackexchange.com/questions/59774/what-are-fits-and-how-they-used-in-reliability-calculations>. [Kasutatud 8 Aprill 2024].
- [8] A.Kamath, „How To Simplify Isolated 24-V PLC Digital Input Module Designs,“ Texas Instruments Inc, August 2017. [Võrgumaterjal]. Saadaval: <https://www.ti.com/lit/ab/slla370b/slla370b.pdf?ts=1713088926870>. [Kasutatud 14 Aprill 2024].
- [9] Contec Group, „Digital I/O Basic Knowledge,“ Contec Group. [Võrgumaterjal]. Saadaval: <https://www.contec.com/support/basic-knowledge/daq-control/digital-io/>. [Kasutatud 22 Aprill 2024].
- [10] Ultra Librarian, „Discrete Components vs Integrated Circuits: Similarities & Differences,“ Ultra Librarian, 06 Oktoober 2022. [Võrgumaterjal]. Saadaval: <https://www.ultralibrarian.com/2022/10/06/discrete-components-vs-integrated-circuits-similarities-differences-ulg>. [Kasutatud 27 Aprill 2024].
- [11] Mantech Electronics Ltd, „4 Channel 24V to 5V Optocoupler Isolation Module PLC Signal Level Voltage Conversion Board NPN Output P/N: 190551 DST-1R4P-N,“ Mantech Electronics Ltd. [Võrgumaterjal]. Saadaval: <https://www.mantech.co.za/Datasheets/Products/DST-1R4P-N-190551.pdf>. [Kasutatud 27 Aprill 2024].
- [12] J.Kridner, „BeagleBone® Relay Cape,“ BeagleBoard.org, 4 Juuni 2018. [Võrgumaterjal]. Saadaval: https://github.com/lorforlinux/capes/blob/master/beaglebone/Relay/Relay_Cape_sch.pdf. [Kasutatud 27 Aprill 2024].
- [13] Maxim Integrated Inc, „MAX22190PMB#,“ Maxim Integrated Inc, August 2018. [Võrgumaterjal]. Saadaval: <https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/MAX22190PMB.pdf>. [Kasutatud 27 Aprill 2024].
- [14] JiaLiChuang Co. Ltd, „PCB Manufacturing & Assembly Capabilities,“ JiaLiChuang Co. Ltd. [Võrgumaterjal]. Saadaval: <https://jlcpcb.com/capabilities/pcb-capabilities>. [Kasutatud 28 Aprill 2024].

- [15] Pcbcupid, „What is PCB Stackup & How to Setup in KiCad,“ Pcbcupid, 30 Juuni 2023. [Võrgumaterjal]. Saadaval: <https://pcbcupid.com/posts/tutorial/kicad/pcb-stackup-how-to-setup-in-kicad/>. [Kasutatud 28 Aprill 2024].
- [16] Pcbcupid, „JLCPCB: Selling PCB At Bargain, Starting from \$2,“ Pcbcupid, 1 November 2024. [Võrgumaterjal]. Saadaval: <https://pcbcupid.com/posts/manufacturers/jlcpcb/>. [Kasutatud 28 Aprill 2024].
- [17] Maxim Integrated Inc, „Octal Industrial Digital Input with Diagnostics,“ Maxim Integrated Inc, September 2020. [Võrgumaterjal]. Saadaval: <https://www.mouser.ee/datasheet/2/609/MAX22190-3128357.pdf>. [Kasutatud 28 Aprill 2024].
- [18] Pcbcupid, „#8 How To Use Constraints And Net Class Directive tool in KiCad 7.0,“ Pcbcupid, 13 Märts 2023. [Võrgumaterjal]. Saadaval: <https://www.youtube.com/watch?v=Fv9zQ3nkLqk&list=PLn6004q9oeqGI91KifK6xHGuqvXGb374G&index=8&t=4s>. [Kasutatud 28 Aprill 2024].
- [19] Tallinna Tehnikaülikool, „Tööstuslik kontrolleri BeagleBone Black baasil,“ Tallinna Tehnikaülikool, 14 Jaanuar 2024. [Võrgumaterjal]. Saadaval: https://livettu-my.sharepoint.com/:b:/r/personal/jagali_taltech_ee/Documents/IAS1420/240114_IAS1420_RevE.pdf?csf=1&web=1&e=d4jHEN. [Kasutatud 30 Aprill 2024].
- [20] J.Kridner, „BeagleBone® Power Cape,“ BeagleBoard.org, 4 Juuni 2018. [Võrgumaterjal]. Saadaval: https://github.com/lorforlinux/capes/blob/master/beaglebone/Power/Power_Cape_sch.pdf. [Kasutatud 30 Aprill 2024].

Lisa 1 – Lihtlitsents lõputöö reprodutseerimiseks ja lõputöö üldsusele kättesaadavaks tegemiseks¹

Mina, Konstantin Ivanov

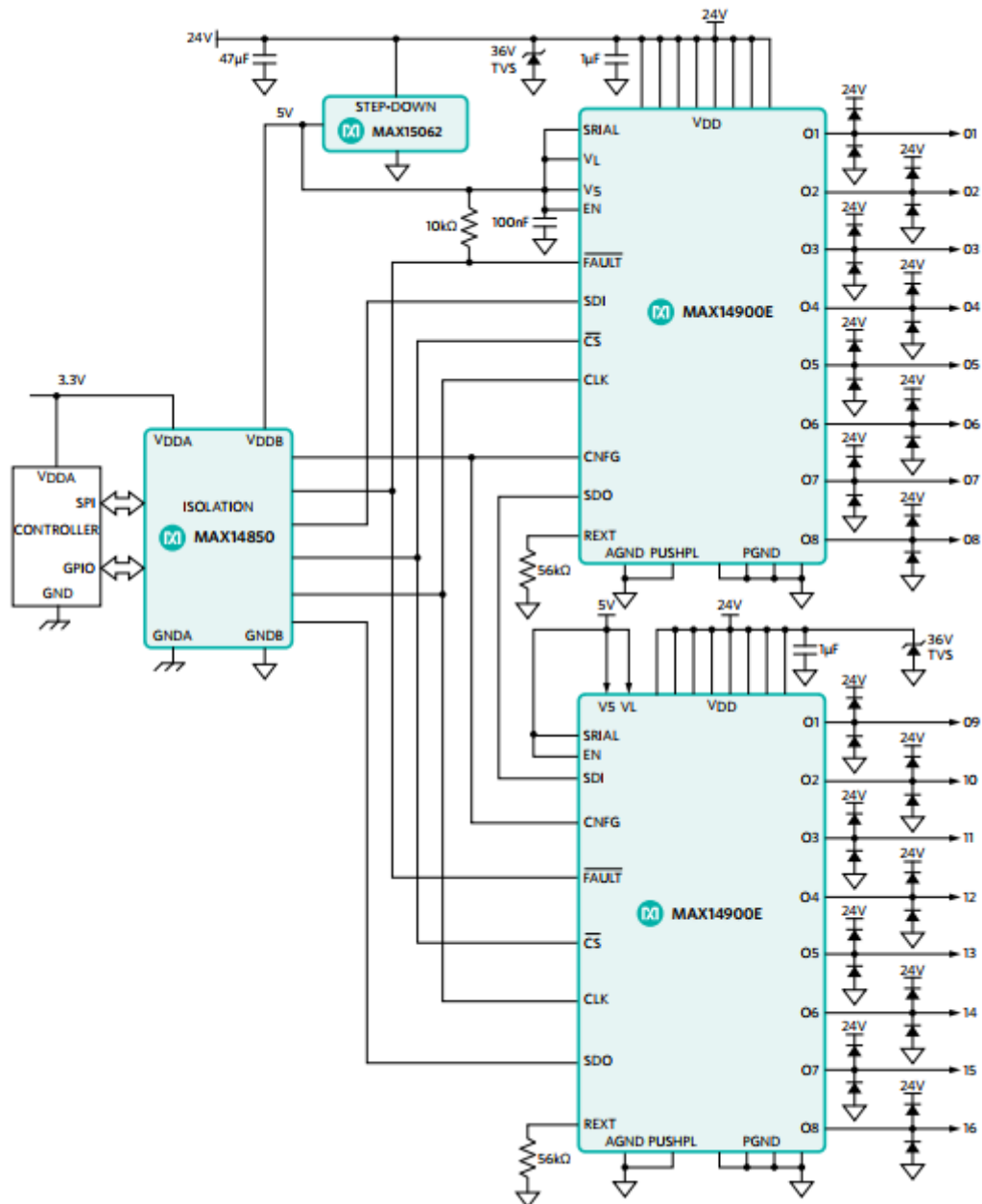
1. Annan Tallinna Tehnikaülikoolile tasuta loa (lihtlitsentsi) enda loodud teose „Universaalse sisend-väljund mooduli trükkplaadi prototüüp“, mille juhendaja on Andres Rähni
 - 1.1. reprodutseerimiseks lõputöö säilitamise ja elektroonse avaldamise eesmärgil, sh Tallinna Tehnikaülikooli raamatukogu digikogusse lisamise eesmärgil kuni autoriõiguse kehtivuse tähtaja lõppemiseni;
 - 1.2. üldsusele kättesaadavaks tegemiseks Tallinna Tehnikaülikooli veebikeskkonna kaudu, sealhulgas Tallinna Tehnikaülikooli raamatukogu digikogu kaudu kuni autoriõiguse kehtivuse tähtaja lõppemiseni.
2. Olen teadlik, et käesoleva lihtlitsentsi punktis 1 nimetatud õigused jäävad alles ka autorile.
3. Kinnitan, et lihtlitsentsi andmisega ei rikuta teiste isikute intellektuaalomandi ega isikuandmete kaitse seadusest ning muudest õigusaktidest tulenevaid õigusi.

01.04.2024

¹ Lihtlitsents ei kehti juurdepääsupiirangu kehtivuse ajal vastavalt üliõpilase taotlusele lõputööle juurdepääsupiirangu kehtestamiseks, mis on allkirjastatud teaduskonna dekaani poolt, välja arvatud ülikooli õigus lõputööd reprodutseerida üksnes säilitamise eesmärgil. Kui lõputöö on loonud kaks või enam isikut oma ühise loomingu tegevusega ning lõputöö kaas- või ühisautor(id) ei ole andnud lõputööd kaitsvale üliõpilasele kindlaksmääratud tähtajaks nõusolekut lõputöö reprodutseerimiseks ja avalikustamiseks vastavalt lihtlitsentsi punktidele 1.1. ja 1.2, siis lihtlitsents nimetatud tähtaja jooksul ei kehti.

Lisa 2 – Kaheksa kanaliga integreeritud digitaalne kahendloogika väljundi skeem













Rohkem andmeid alloleva skeemi kohta on võimalik leida tootja andmelehel [4].



Joonis 17 Kaheksa kanaliga integreeritud digitaalne kahendloogika väljundi skeem [4]

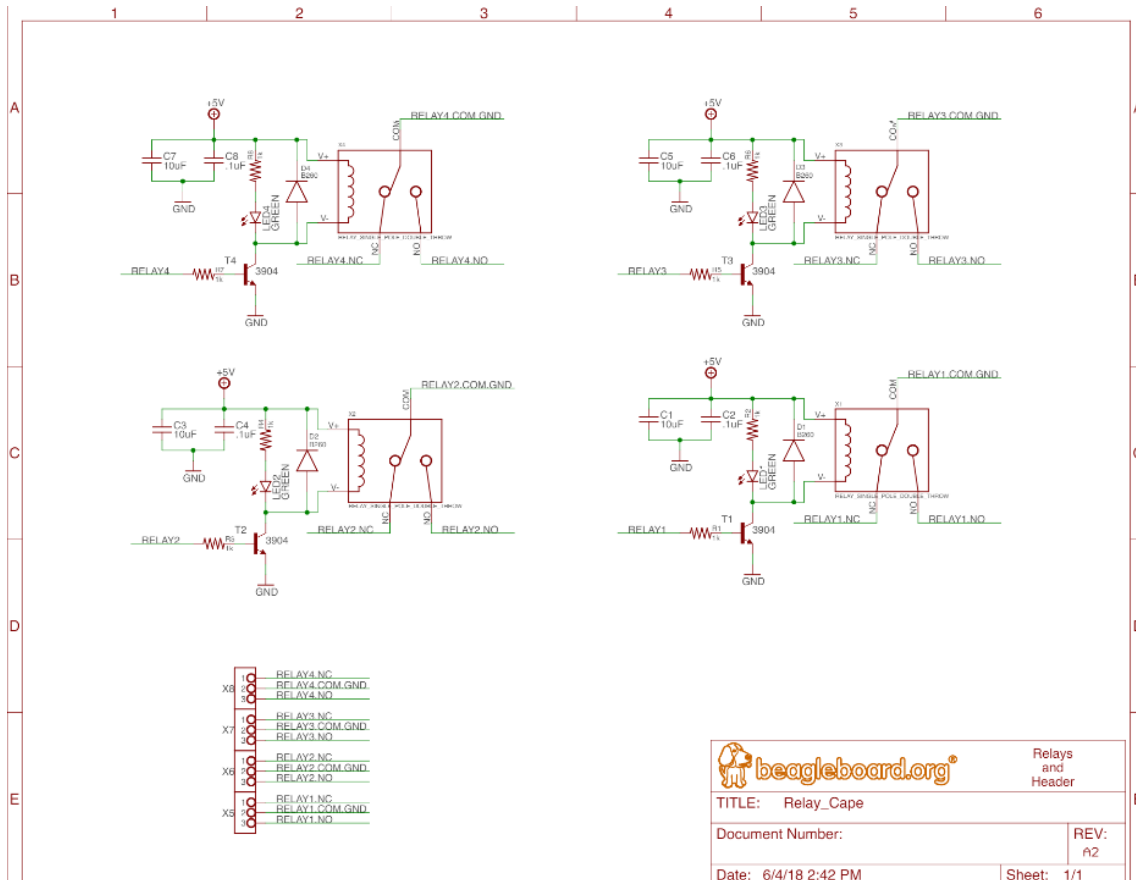
Lisa 3 – Trükkplaadi projekteerimisreeglite piirangud

Rohkem andmeid alloleva joonise parameetrite kohta on võimalik leida tootja veebilehelt [14].

Copper		Arc/circle approximated by segments	
	Minimum clearance:	<input type="text" value="0.127"/>	mm
	Minimum track width:	<input type="text" value="0.127"/>	mm
	Minimum connection width:	<input type="text" value="0.127"/>	mm
	Minimum annular width:	<input type="text" value="0.13"/>	mm
	Minimum via diameter:	<input type="text" value="0.5"/>	mm
	Copper to hole clearance:	<input type="text" value="0.3"/>	mm
	Copper to edge clearance:	<input type="text" value="0.3"/>	mm
Holes		Max allowed deviation: <input type="text" value="0.005"/> mm	
	Minimum through hole:	<input type="text" value="0.3"/>	mm
	Hole to hole clearance:	<input type="text" value="0.5"/>	mm
uVias		Note: zone filling can be slow when < 0.005 mm.	
	Minimum uVia diameter:	<input type="text" value="0.2"/>	mm
	Minimum uVia hole:	<input type="text" value="0.1"/>	mm
Silkscreen		Zone fill strategy	
	Minimum item clearance:	<input type="text" value="0.15"/>	mm
	Minimum text height:	<input type="text" value="1"/>	mm
	Minimum text thickness:	<input type="text" value="0.08"/>	mm
		<input type="checkbox"/> Allow fillets outside zone outline	
		 Min thermal relief spoke count: <input type="text" value="2"/>	
		Length tuning	
		<input checked="" type="checkbox"/> Include stackup height in track length calculations	

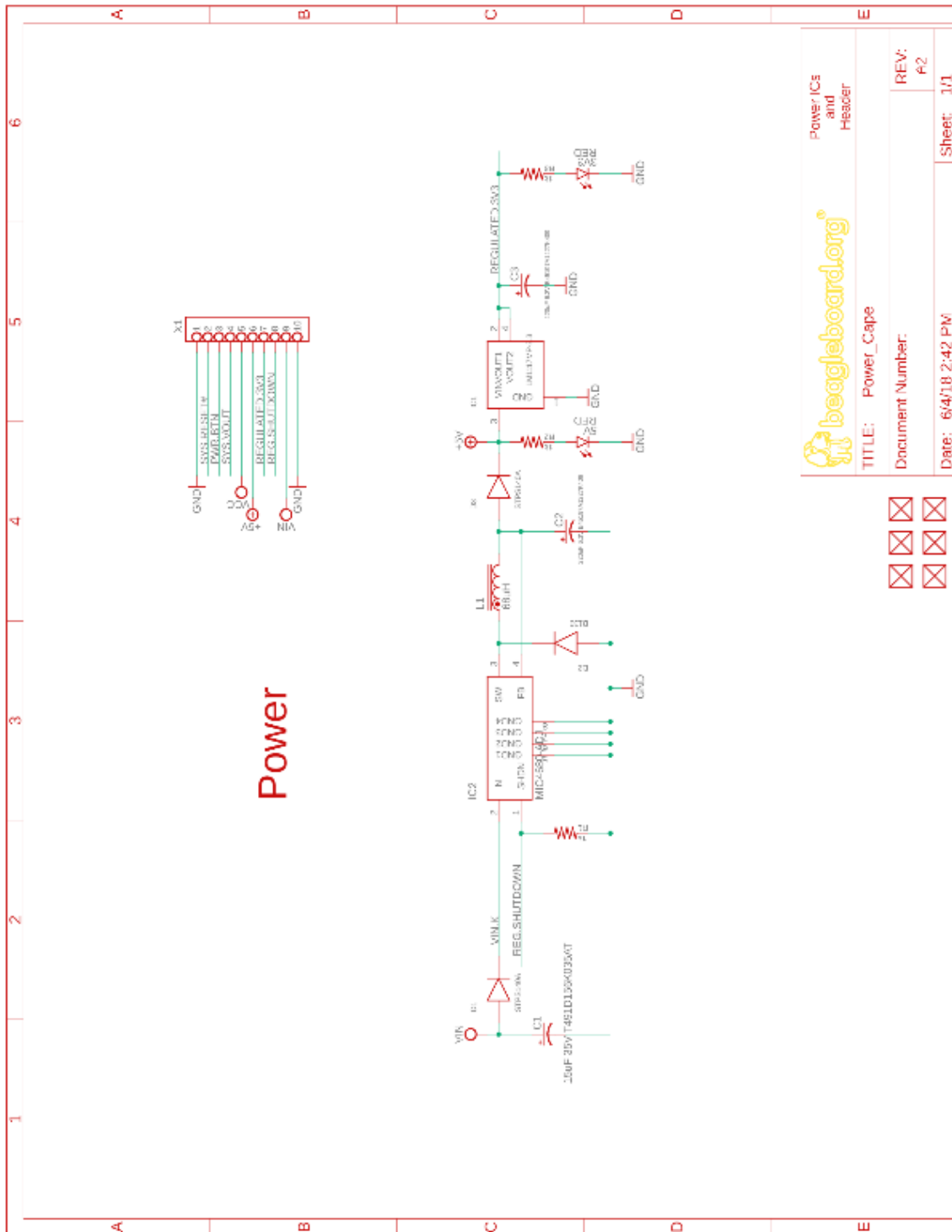
Joonis 18 Trükkplaadi projekteerimisreeglite piirangud

Lisa 4 – BeagleBone® relee väljundi skeem



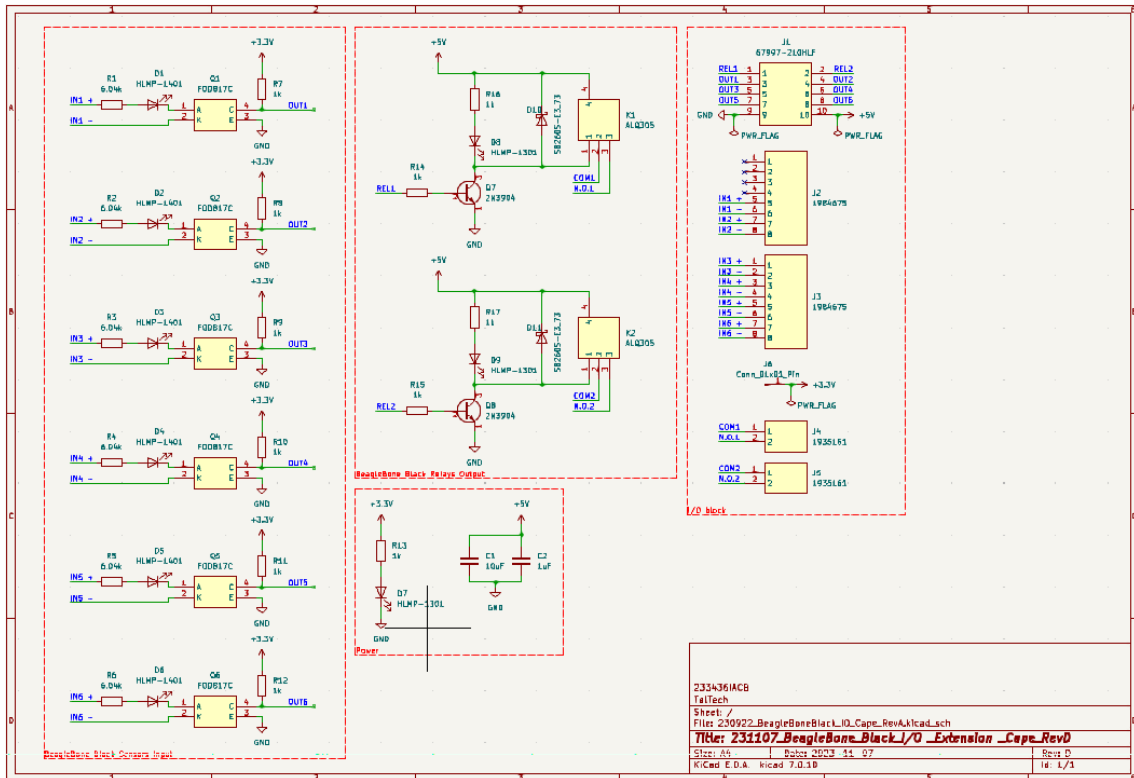
Joonis 19 BeagleBone® relee väljundi skeem [12][19]

Lisa 5 – BeagleBone® kontrolleri toiteskeem



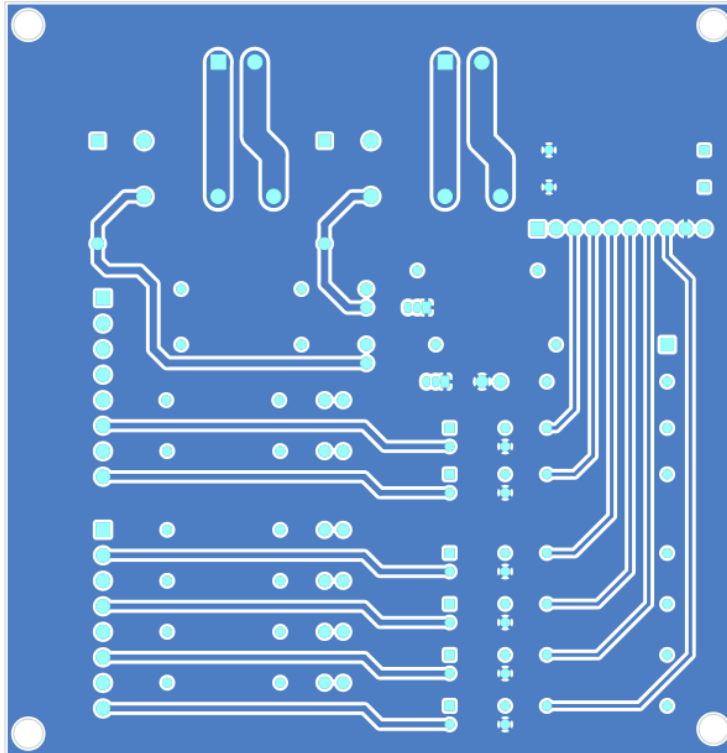
Joonis 20 BeagleBone® kontrolleri toiteskeem [19][20]

Lisa 6 – Esmase prototüübi täisskeemi



Joonis 21 Esmase prototüübi täisskeemi [19]

Lisa 7 – Esmase prototüübi trükkplaadi tagumiste kihtide kujutus



Joonis 22 Esmase prototüübi trükkplaadi tagumiste kihtide kujutus

Lisa 8 – Esmase prototüübi komponentide nimekiri

FOD817C (Optoisolaator)

HLMP-1301 (LED)

ALQ305 (Relee)

2N3904TFR (NPN transistor)

MRS25000C1001FRP00 (Takisti 1 k Ω)

C410C105K3R5TA (Kondensaator 1 uF)

C430C106K3R5TA (Kondensaator 10 uF)

SB260S-E3/73 (Schottky diood)

1984675 (Pistik)

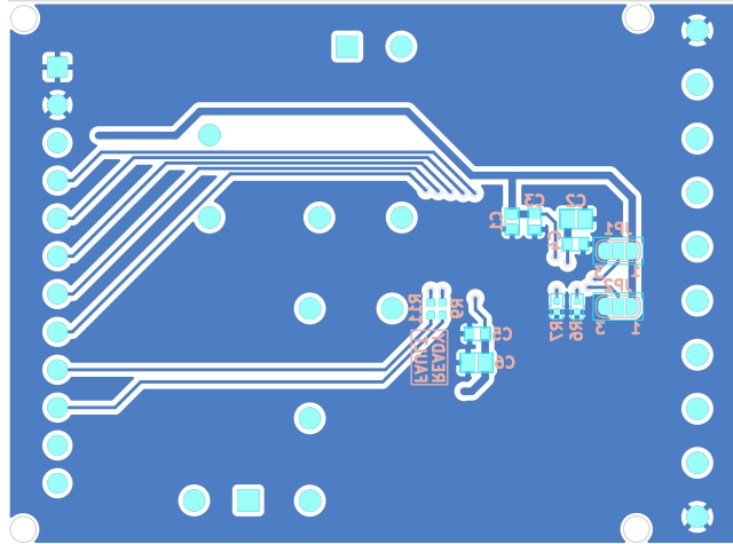
1935161 (Pistik)

67997-210HLF (Pistik)

HLMP-1401 (LED)

YR1B6K04CC (Takisti 6.04 k Ω)

Lisa 9 – Täiustatud prototüübi trükkplaadi tagumiste kihtide kujutus



Joonis 23 Täiustatud prototüübi trükkplaadi tagumiste kihtide kujutus

Lisa 10 – Täiustatud prototüübi komponentide nimekiri

MAX22190ATJ+T (Digitaalne isolaator)

MMBT3904 (NPN transistor)

1935161 (Pistik)

ERJ-P08F1001V (Takisti 1 k Ω)

150060SS75003 (LED)

CDBA260-G (Shottky diood)

LTST-C193KGKT-5A (LED)

CRCW12061K50FKEAHP (Takisti 1,5 k Ω)

UMK107AB7105KA-T (Kondensaator 1 uF)

CL10B104KC8NNNC (Kondensaator 100 nF)

GRJ21BC72A105KE11L (Kondensaator 1 uF)

ERJ-2RKF2402X (Takisti 24 k Ω)

ERJ-2GEJ220X (Takisti 22 Ω)

ERJ-2RKF1002X (Takisti 10 k Ω)

LTST-C193KSKT-5A (LED)

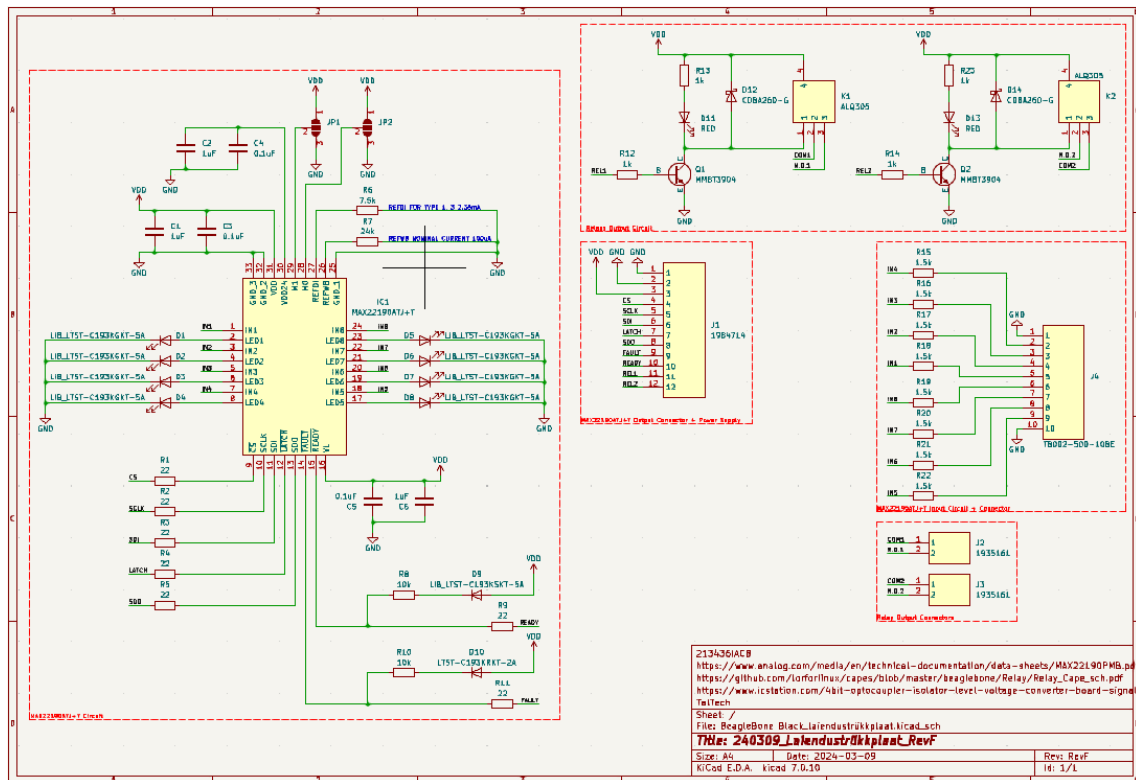
LTST-C193KRKT-2A (LED)

ERJ-2RKF7501X (Takisti 7,5 k Ω)

TB002-500-10BE (Pistik)

1984714 (Pistik)

Lisa 11 – Täiustatud prototüübi täisskeem



Joonis 24 Täiustatud prototüübi täisskeem