



TALLINNA TEHNIKAÜLIKOOL
INSENERITEADUSKOND

Elektroenergeetika ja mehhatroonika instituut

EVOCONVERTERI PROGRAMMEERIMISE JA TESTIMISE SEADME DISAIN NING EHITUS

THE DEVELOPMENT OF A PROGRAMMING AND TESTING JIG FOR
EVOCONVERTERS

BAKALAUREUSETÖÖ

Üliõpilane: Mihkel Talmar

Üliõpilaskood: 164529MAHB

Juhendaja: Lauri Kütt

Tallinn 2019

(Tiitellehe pöördel)

AUTORIDEKLARATSIOON

Olen koostanud lõputöö iseseisvalt.

Lõputöö alusel ei ole varem kutse- või teaduskraadi või inseneridiplomit taotletud. Kõik töö koostamisel kasutatud teiste autorite tööd, olulised seisukohad, kirjandusallikatest ja mujalt pärinevad andmed on viidatud.

“.....” 201.....

Autor:

/ allkiri /

Töö vastab bakalaureusetöö/magistritööle esitatud nõuetele

“.....” 201.....

Juhendaja:

/ allkiri /

Kaitsmisele lubatud

“.....”201... .

Kaitsmiskomisjoni esimees

/ nimi ja allkiri

Elektroenergeetika ja mehhatroonika instituut

LÕPUTÖÖ ÜLESANNE

Üliõpilane: Mihkel Talmar 164529MAHB
Õppekava, peeriala: MAHB02/13 – Mehhatroonika
Juhendaja(d): Professor ja programmijuht, Lauri Kütt, +372 5645 1675
Konsultant: Erki Viidalepp, peainsener,
Evocon OÜ, +372 5621 9505, erki@evocon.com

Lõputöö teema:

(eesti keeles) *Evoconverteri programmeerimise ja testimise seadme disain ning ehitus*

(inglise keeles) *The Development of a Programming and Testing Jig for Evoconverters*

Lõputöö põhieesmärgid:

1. Valmistada kiirkinnitusega rakis (programmaator) Evoconverteri trükkplaadile.
2. Disainida ja valmistada mikrokontrolleriga toimiv trükkplaat programmaatori talitluseks ja testfunktsioonide läbiviimiseks.
3. Koostada programm Evoconverteri trükkplaadi automaatseks programmeerimiseks, MAC aadressi kättesaamiseks ning andmebaasi kirjutamiseks ja plaadi toimivuse kontrolliks.
4. Toimiv Evoconverteri trükkplaadi programmeerimise ja testimise seade.

Lõputöö etapid ja ajakava:

Nr	Ülesande kirjeldus	Tähtaeg
1.	Trükkplaadi ja rakise kujundamine ning koostamine	17.04.2019
2.	Programmaatori trükkplaadi mikrokontrolleri programmeerimine ja 01.05.2019 arvutiprogrammi loomine Evoconverteri plaadi programmeerimiseks, MAC aadressi plaadilt saamiseks ning andmebaasi kirjutamiseks ja trükkplaadi toimivuse testimiseks	01.05.2019
3.	Dokumentatsiooni kirjutamine ning lõputöö kirjalik vormistamine	14.05.2019
4.	Lõputöö valmimine	21.05.2019

Töö keel: eesti keel

Lõputöö esitamise tähtaeg: "21."mai 2019. a

Üliõpilane: Mihkel Talmar

Juhendaja: Lauri Kütt

Konsultant: Erki Viidalepp

SISUKORD

EESSÕNA.....	6
Lühendite ja tähiste loetelu	7
SISSEJUHATUS	8
1 TEOREETILIS-PRAKTILINE LÄHENEMINE	10
1.1 Elektroonikatoote kvaliteedikontrolli sammud	10
1.1.1 Trükkplaadi kvaliteedikontroll.....	11
1.1.2 Automaatne optiline inspeksioon.....	12
1.1.3 Röntgeninspeksioon.....	12
1.1.4 Ahelate korrektsuse testimine	12
1.1.5 Funktsionaalsustest.....	14
1.2 Lõpptoote koostamisega ja kvaliteedikontrolliga seotud protseduurid.....	15
1.3 Ülesande püstitus.....	15
1.4 Testitava pooltoote funktsionaalsed parameetrid.....	16
2 TESTRI KUJUNDAMISE ALUSED	17
2.1 Pooltoote testimisetapil läbi viidavad tegevused	17
2.2 Manuaalse testimise ja programmeerimise puudujäägid.....	18
2.3 Testimise ja programmeerimise automatiseerimine	19
2.3.1 Automatiseerimise ulatus	19
2.3.2 Automatiseerimise eelised.....	20
2.4 Nõuded testija pädevusele.....	21
2.5 Lähtetingimused testri kujundamisel tulenevalt ohutusnõuetest	22
3 MEHAANIKA OSA.....	24
3.1 Üldine kinnitamine ja geomeetria.....	24
3.1.1 Elektroonikakoostu mehaanilised parameetrid	24
3.1.2 Kinnitamise võimalused	24
3.2 Kinnitusrakise disain ja valmistamine	26
3.2.1 Pooltoote horisontaalsuunaline fiksaator	26
3.2.2 Pooltoote vertikaalsuunaline fiksaator	28
4 ELEKTROONIKA OSA	32
4.1 Plokkskeem.....	32
4.2 Komponendid	34
4.2.1 Komponentide valik ja võtme parameetrid	34
4.2.2 Komponentide paigutus	38
4.3 Trükkplaat.....	38
5 TARKVARA OSA.....	40
5.1 Tarkvara vajalikud tegevused.....	40
5.2 Andmevahetusprintsiihid	41
5.2.1 PyLink teek J-Link Seggeriga suhtluseks	42
5.2.2 Evoconi andmebaas.....	42
5.2.3 USB-UART seade jadaühenduse jaoks.....	43

5.3	Koodide ülesehitus ja algoritmid.....	44
5.3.1	Pythoni programmi algoritm.....	44
5.3.2	Mikrokontrolleri programmi algoritm.....	45
6	LOODUD TESTER: KATSETAMINE JA JÄRELDUSED.....	47
6.1	Testri toimivus.....	47
6.2	Ohutusele vastavus.....	48
6.3	Testri efektiivsus.....	49
	KOKKUVÕTE	50
	SUMMARY	52
	KASUTATUD KIRJANDUSE LOETELU	54
	LISAD	59
	Lisa 1 Riskijuhtimisteguri määr prooviseeria kohta	59
	Lisa 2 Tihedamini esinevad laotud trükkplaatide vead.....	60
	Lisa 3 Automaatne optiline inspeksioon	61
	Lisa 4 Röntgeninspeksioon	62
	Lisa 5 Funktsionaaltestimine	63
	Lisa 6 J-Link Segger programmeerimisseade	64
	Lisa 7 Evoconverteri trükkplaat ilma joodetud komponentideta	65
	Lisa 8 Testri armatuuri koost	66
	Lisa 9 Pooltoote vertikaalsuunaline fiksaator.....	68
	Lisa 10 Testri koostu joonis.....	70
	Lisa 11 Atmega328P-PU ühendamise skeem.....	71
	Lisa 12 USB-UART seade	72
	Lisa 13 Katse testri toimimisest	73
	Lisa 14 Autori elektroonikakoost	74

EESSÕNA

Lõputöö teema pakuti välja Evocon OÜ peainseneri Erki Viidalepa poolt eesmärgiga efektiivistada ettevõtte tootega (laotud trükkplaat) läbi viidavaid manuaalseid programmeerimise ja testimise operatsioone. Probleemide lahendamiseks loodud automaatse testri valmimist finantseeris Evocon OÜ ning töö praktiline osa valmistati maksimaalselt ettevõtte kontoriruumides Tallinnas. Autor pühendab erilised tänusõnad lõputöö juhendajale professor Lauri Kütile, kes abistas töö struktureerimisel ning eelkõige elektroonikaplaadi disaini koostamisel. Testri fiksaatori freesdetali valmimisele aitas kaasa mehaanika ja tööstustehnika instituudi tehnik Siim Paakspuu, kes nõustas CNC freespingi kasutamisel ning CAM programmi valmistamisel. Loetletud ülikooli töötajate ning Evocon OÜ kollektiivi abiga valmis toimiv Evoconverteri (toote) programmeerimise ja testimise seade bakalaureusetöö raames.

Lühendite ja tähiste loetelu

ABS – akrüülnitriil-butadieen-stüreen, plastiku liik

AOI – automaatne optiline inspeksioon (ingl k *automated optical inspection*)

ASCII – Ameerika informatsioonivahetuse standardkood (ingl k *American standard code for information interchange*)

AXI – röntgeninspeksioon (ingl k *x-ray inspection*)

BIN – binaardokumendi laiend (ingl k *binary file*)

CAD – raalprojekteerimine (ingl k *computer-aided design*)

COM – kommunikatsioonivärat (ingl k *communication port*)

DC – alalisvool (ingl k *direct current*)

FR4 – tuldtõkestav materjal, klass 4 (ingl k *flame retardant*)

ICT – ahelate korrektsuse testimine (ingl k *in-circuit testing*)

LED – valgusdiod (ingl k *light emitting diode*)

MAC-aadress – meediumipöörduse juhtimise aadress (ingl k *media access control address*)

PLA – polülaktiid, plastiku liik

PVC – polüvinüülkloriid, plastiku liik

SMD – pinnale paigaldatav komponent (ingl k *surface mount device*)

UART – asünkroonne jadavärat (ingl k *universal asynchronous receiver/transmitter*)

USB – universaalne järjestiksiin (ingl k *universal serial bus*)

SISSEJUHATUS

Tootmisliinide automatiseerimise valguses tõuseb päevakorrale idee neljandast tööstusrevolutsioonist, kus masinad ei ole mitte ainult arvutiprogrammidega kontrollitavad, vaid koguvad ka informatsiooni tootmisliini olukorra kohta. Sellest on võimalik teha parendusi kogu protsessi efektiivsemaks kulgemiseks. [1] Tarkade süsteemide arendamise seisukohast on oluline rakendada sensoreid tootmisinformatsiooni kogumiseks ning saadud andmed hilisemaks analüütiliseks töötamiseks salvestada. Tootmist puudutavatele andmetele, sealhulgas kogumisele, töötamisele ja kliendile kuvamisele, on keskendunud Eesti ettevõtte Evocon OÜ. Firma poolt pakutav süsteem hõlmab sensoreid, andmelogereid, pilvesüsteemi ning tarkvaralisi lahendusi andmete töötlemiseks ja esitlemiseks.

Evoconverter ehk andmelooger on Evocon OÜ poolt arendatud toode (edaspidi ka **lõpptoode**), mis ühendub liinile paigutatud nelja sensoriga. Lõpptoote ülesandeks on olenemata sensori tüübist (nt infrapunase sensor) koguda informatsiooni ja edastada saadud andmed pilvesüsteemi.

Lõpptoode valmistatakse ettevõttes Evocon OÜ koha peal, kus teostatakse toote aluseks oleva pooltoote testimine ning lõppkoostu valmimine. Ettevõttesse jõuavad pooltootena elektroonikakomponentidega **laotud trükkplaadid** tellimustööna Eesti elektroonikafirmast Tradex AS. Pooltoote valmistamisel on mikrokontroller, trafo, muundurid, takistid, kondensaatorid jne trükkplaadile joodetud Tradexi poolt. Täiendava kontrolli eesmärgil viib Evocon OÜ läbi baastesti, mis hõlmab pingete ja pooltootele paigutatud LED-ide töö kontrolli. Kui pinged vastavad soovitud vahemikule ja iga sensori toimimisele viitav LED süttib kirjelduste kohaselt, saab ettevõtte garanteerida laotud trükkplaadi töökindluse ja korrektsuse. Traditsiooniliselt on kirjeldatud teste siiani läbi viidud multimeetriga ning juhtmeid käsitsi igale pooltootele ümber ühendades.

Olulisteks pooltoodetega läbiviidavateks protsessideks Evoconis on samuti toote tööks vajaliku programmikoodi laadimine (mikrokontrolleri programmeerimine) ja toote andmete ettevõtte andmebaasi kandmine. Programmeerimise läbiviimiseks ühendab ettevõtte insener laotud trükkplaadi arvutiga programmaatorit ja silumisseadet (ingl k *debug probe*) rakendades. Seadme valmistaja poolt pakutavate rakendustega laetakse pooltoote mikrokontrollerile toimivuse aspektist oluline programmikood ja saadakse informatsioon trükkplaadi algseadistuste kohta. Arvutirakenduse aknasse loetav informatsioon sisaldab tootele omast MAC ehk meediumipöörduse juhtimise aadressi. Viimast kasutatakse unikaalse toote identifitseerimiskoodina. Selle kirjutab

testija eraldi programmi kasutades andmebaasi ja seob MAC-aadressi pooltootele kleebitava seerianumbriga. Nii luuakse vajalik baastabel hilisema kliendi ning tema tootmisliinidele paigaldatud toote vahel. Sellega standardiseeritud kontrolli- ja programmeerimisprotsessid Evocon OÜ kontoris lõppevad ning kirjeldatud protsessid läbinud toode edastatakse peale pakkimist kliendile (lõpptootena). Edasine seadistamine viiakse läbi kliendi tehases, kasutades sealseid liiniga ühildatud või Evoconi poolt pakutavaid sensoreid.

Praeguste Evoconi poolt läbi viidavate test- ja programmeerimisoperatsioonidega esineb märgataval hulgal komplikatsioone: protsess on aeglane, nõuab mitme seadme ja rakenduse kasutamist, juhtmete pideva pooltootelt teisele ümbertõstmisega purunevad pistikud, esinevad inimvead jne. Käesoleva lõputöö eesmärgiks on kirjeldatud protsesside parendamiseks arendada riistvara, millega automatiseerida Evoconi poolt läbiviidavad protsessid. Nii lühendatakse igale pooltootele kontrolliks kuluvat aega ja vähendatakse kontrollseadmete ja testitava pooltootega esinevaid vigu ning purunemisi. Seatud eesmärk eeldab laotud trükkplaadile **programmeerimise ja testimise seadme** ehk **testri** täiendavat arendust. Automatiseerimise tulemusena oleksid pooltoote testimise oodatavad tegevuste sammud järgnevad:

- Testri ühendamine personaalarvutiga
- Pooltoote kinnitamine seadmesse
- Testimis- ja programmeerimiskäivitamine
- Tootmisliinile paigaldamiskõlbliku lõpptoote eemaldamine seadmest
- Uue laotud trükkplaadi sisestamine testrisse

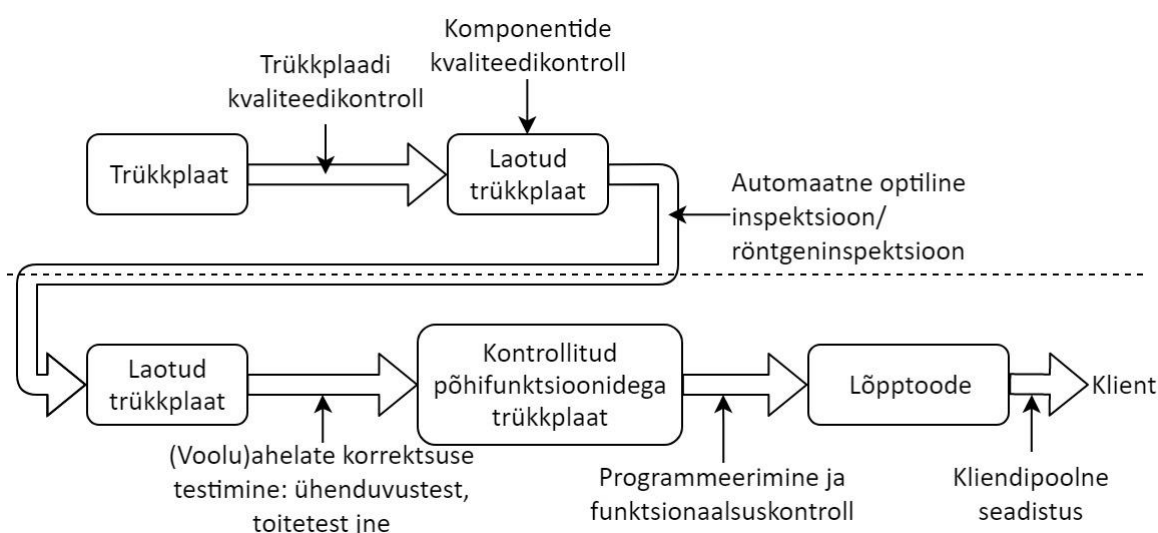
Lõputöös püstitatud testri kujundamise eesmärgist lähtuvalt jaguneb põhiosa struktuur kuueks peatükiks. Esimeses põhiosa peatükis antakse lugejale ülevaade trükkplaatide testimisvahendite hetkeolukorrast. Luuakse alus testri valmistamise lähtetingimustest testitava pooltoote detailse kirjeldusega ning püstitatakse konkreetne lähteülesanne. Teine peatükk on suunatud testri loomiseks vajalike täiendavate alusprintsipiide tutvustamiseks nagu praeguste testprotsesside puuduste kirjeldamine, nende võimalik kõrvaldamine automatiseerimisega ning ohutusnõuded testri valmistamiseks. Kolmas peatükk keskendub testri mehaanilisele osale, tuues välja selle arendamise protsessid koos põhjendustega. Põhiosa neljanda peatüki fookuses on testri elektroonika valmistamine ning autori elektroonikakoostu disain. Viies põhiosa peatükk kirjeldab tarkvaralisi arendusi ja arendatud programmide algoritme. Viimases kuuendas põhiosa alapunktis antakse ülevaade valminud testrist koos katseliste tulemustega, mis võrdlevad pooltootega varasemalt tehtud test- ja programmeerimisprotsesse ning uue testriga automatiseeritud versiooni.

1 TEOREETILIS-PRAKTILINE LÄHENEMINE

Antud peatükis esitatud ülevaade kirjeldab levinud elektroonikatoodete testmeetodeid nende tootmisprotsesside vaheetappides ning pärast pooltoote valmimist. Baasmeetodite teadmine annab võimaluse testprintsipiide integratsiooniks Evoconi jaoks parima võimaliku lahenduse väljatöötamisel. Peatüki lõpus püstitatakse lähteülesanne ning tutvustatakse testitavat pooltoodet.

1.1 Elektroonikatoote kvaliteedikontrolli sammud

Test- ja programmeerimistsükli läbinud laotud trükkplaadid on elektroonikatoodete koostude laialt levinud osad, mille korrektne toimimine on korrelatsioonis kogu toote eesmärgipärase funktsioneerimisega. Kvaliteedi tagamiseks on loogiline ja standardite järgi nõutud (nt EVS-EN 62326-1:2003) läbi viia trükkplaadi erinevates tootmisfaasides vastavaid kontrollsamme, mis annavad tootjale kindluse detaili kvaliteedis ning aitavad turul hoida head mainet. Oluline on seejuures tähelepanek, et iga järgnev kvaliteedikontroll sisuliselt tähendab eelneva kontrollprotsessi jätku juhul, kui detail on eelneva testi positiivsete tulemustega läbinud. Nii näiteks baaskontrollides vigaseks tunnistatud trükkplaadid järgnevates testides korrektseid tulemusi ei anna ning nende läbiviimine on sellisel juhul ressursiraiskamine. [2, 3] Trükkplaadi teekonda lõpliku valmimiseni, koos läbi viidavate kontrollmehhanismidega, on kujutatud joonisel 1.1 [2, 4, 5]:



Joonis 1.1 Elektroonikatoote kvaliteedikontrolli sammud

Järgnevates alapeatükkides on kirjeldatud erinevaid testmeetodeid, mida elektroonikatoode enne kliendini jõudmist läbib. Kirjeldamata on komponentide testimismeetodid, kuid eeldatakse siiski, et

erinevatest tehastest tarnitud komponendid on tootja poolt lubatud piirnäitajatele ja standarditele vastavad ning kvaliteedikontrolli standardid on tootmisahela igas etapis garanteeritud [6]. Analüüsitud ja kirjeldatud testmeetodid tuleb kvaliteetse pooltoote tagamiseks kirjeldada tarnija/allhankija poolelt, samuti peab pooltoote tellija olema teadlik nende protseduuride printsiipidest ja suutlikkusest.

1.1.1 Trükkplaadi kvaliteedikontroll

Trükkplaatide kvaliteedikontrolliks on Rahvusvaheline Elektrotehnika Komisjon (IEC) loonud ISO 9001 kvaliteedijuhtimissüsteemide standardiseerial baseeruva riskijuhtimisteguri (ingl k *risk management factor*), mille EVS-EN 62326-1:2003 standardist tulenevat jagunemist on kujutatud lisas 1. [2, 7] Tegemist on koguse kohta maksimaalset lubatavat defektiprotsenti kirjeldava ühikuga. Defektide väljaselgitamiseks jagab IEC kontrollmehhanismid kuute erinevasse klassi, mis tuleb standardile vastava tootmisseria puhul läbi testida vähemalt 12-kuulise intervalli tagant. Klassid jagunevad järgnevalt [2]:

- V (vaatlus, ingl k *visual*) kategooria: nt kogu plaadi visuaalne vastavus, välimus, juhtivradade olemasolu jne
- D (dimensiooni, ingl k *dimensional*) kontrollkategooria: plaadi välisdiameetrite mõõtmine, avade paiknevus jne
- S (pinnakonditsioon, ingl k *surface condition*) kategooria: joodetavus, puhtus jne
- E (elektriline, ingl k *electrical*) kategooria: vastava voolu olemasolu, korrektne pingeline jne
- P (füüsikaline, ingl k *physical*) kategooria: pinnakihi tugevus, tõmbetugevus jne
- Y (struktuuri terviklikkuse, ingl k *structure integrity*) kategooria: delamineerumine, tuleohtlikkus jne

Kvaliteeditaseme tõstmise huvides on mõistagi vajalik trükkplaatide kontrolli läbi viia tihemini kui aastase intervalli tagant ning ideaalis kõigi tehastest väljuvate pooltoodetega. Standardiseeritud pideva testmeetodi vajalikkus on tõstnud olulisele kohale automatiseeritud kontrollprotsesside kasutamise. Lisas 2 toodud tabeli põhjal saab väita, et iga neljas laotud trükkplaadiga esinev defekt tuleneb plaadil avatud kontaktist või liiniühendusest. See viitab kontrollmehhanismide olulisusele, mis võimaldavad kõige sagedamini esinevaid vigu tuvastada. Tuntumad automatiseeritud visuaalsed meetodid on automaatne optiline inspeksioon (ingl k **automated optical inspection, AOI**) ja röntgeninspeksioon (ingl k **X-ray inspection, AXI**). Laotud trükkplaadi testimise poole pealt kasutatakse enim ahelate korrektsuse testimist (ingl k **in-circuit testing, ICT**) ja funktsionaalsustestimist (ingl k **functional testing**). [4]

1.1.2 Automaatne optiline inspeksioon

Automaatne optiline inspeksioon (AOI) on visuaalkontrolli meetod laotud trükkplaatidele, kus üks või mitu foto- või videokaamerat skaneerivad plaati. Trükkplaati valgustatakse mitmest suunast ning masin teeb erinevate vaatenurkade alt fotosid, et arvuti saaks luua laotud trükkplaadist tervikliku pildi. Seejärel süsteem võrdleb moodustunud fotot soovitud disainiskeemidega. Sellisel meetodil leitakse efektiivselt plaadilt mügarikud, kriimud, avatud vooluahelad, lühised ja praod joodises. Samuti on lihtne tuvastada puuduvaid või viltu joodetud komponente. Paremaid tulemusi annab viimasel ajal loodud 3D optiline inspeksioon, mis võimaldab võrdlusel kasutada komponentide kõrgust plaadi pinnalt. Meetodi suurimaks nõrkuseks võib pidada ligipääsmatust elementide alla jäävatele pindadele ning sarnaselt on raskendatud detailse pildi loomine tihedalt paljude elementidega kaetud trükkplaadist. [4] Automaatse optilise inspeksiooni seadet on kujutatud lisas 3.

1.1.3 Röntgeninspeksioon

Röntgeninspeksioon (AXI) kõrvaldab eelnevalt kirjeldatud meetodi puudujääd: andmeid on võimalik saada joodetud komponentide kohta, mis visuaalselt varjavad joodisliidet. Röntgentuvastus baseerub loogikal, et materjalid neelavad röntgenkiiri proportsionaalselt oma elementide aatommassile: raskemad elemendid neelavad röntgenkiiri rohkem ja kergemad vähem. Joodiste tegemisel kasutatakse teatavasti raskeid metalle nagu tina või indium. Seevastu ülejäänud elektroonikaplaadi komponendid sisaldavad kergemaid elemente: hapnikku, vesinikku, väävlit, naatriumi ja vaske. Plaati läbistavad röntgenkiired moodustavad pildi teisele poole laotud trükkplaati ning sellelt tulevad joodised paremini esile, sest kiiri neeldus kõige rohkem. Röntgeninspeksiooni ei sega joodist katvad elemendid ega valgusest tulenevad varjud. Küll aga saab miinustena välja tuua meetodi kalliduse ning uue tehnoloogiaga kaasas käiva suutmatuse potentsiaali esialgu maksimaalselt ära kasutada. [4] Röntgeninspeksiooni seadet on kujutatud lisas 4.

1.1.4 Ahelate korrektsuse testimine

Ahelate korrektsuse testimine (ICT) tähendab elektrilise seadmega elementidega laotud trükkplaadi kontrollimist. Tehakse kindlaks komponentide õige paigutus, lühised, ühenduste puudumine ja vajadusel ka takistuste ning kondensaatorite mahtuvus. Meetodi eesmärk on testida, kas trükkplaat on korrektselt valmistatud ning elektriliselt on loodud eeldused trükkplaadi toimimiseks. Praktikas on ahelate korrektsuse testimine sageli väga tõhus. Isegi kui ahelas esineb vigu, siis avalduvad need

trükkplaadi jootepunktides ja on ICT meetodiga kontrollitavad. Täiendavalt on võimalik mõne ahelate korrektsuse testsüsteemi abil läbi viia lihtsamaid funktsionaalsuskontrolle, mis annavad trükkplaadi toimimisele lisagarantii. [5, 8] Ahelate korrektsuse testseadmete funktsionaalsus sõltub küll suuresti testitava plaadi kujust ning vajalikest mõõdetavatest parameetritest, kuid ülesehitusloogika alusel on eristatavad kolm peamist komponenti:

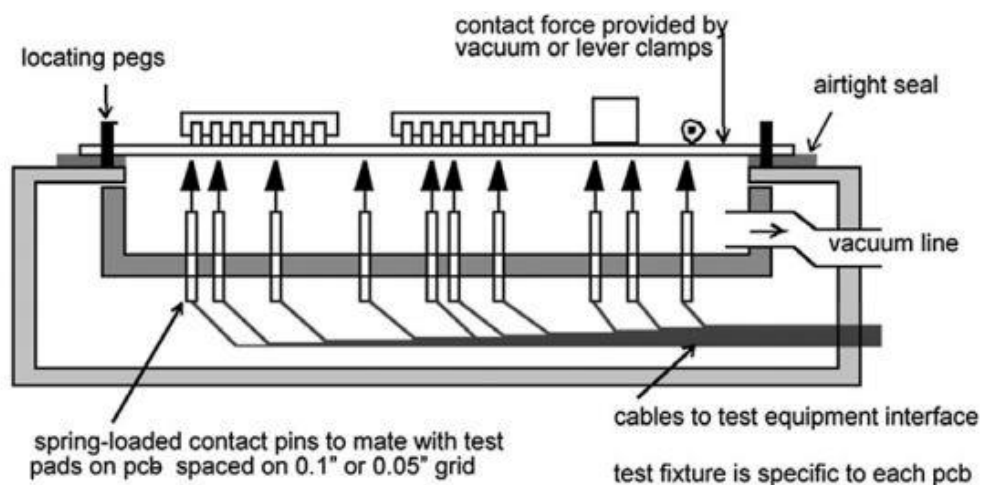
- Ahela tester: kogu testseade koosneb draiveritest ja sensoritest koostatud maatriksist, mille ülesandeks on viia läbi vajalikke mõõtmisi. Olenevalt süsteemi keerukusest võib selliseid draiverite ja sensorite punkte testsüsteemil olla kuni 1000 või isegi rohkem, mis on seotud ühenduspesaga. [5]
- Armatuur: liides, mille kuju on disainitud täpselt testitava plaadi järgi. Osa eesmärk on ühendada trükkplaat ning ahela tester, vedades draiverite sensorpunktid plaadil vajalikesse kohtadesse. Trükkplaadiga ühendamiseks kasutatakse tavaliselt erilistest nõeltest tehtud struktuuri, mille ühendusmehhanismide puhul kasutatakse **Pogo pin'e** – vedruga varustatud kontaktelemente ehk **vedruühendusklamme**. Need koosnevad liikuvast peast, kehast ja suletud vedrust, mille eesmärk on hoida kontakti liikuvat pead plaadi vastu surudes. [5, 8]
- Tarkvara: trükkplaadi struktuurist ja vajalikest mõõtmisparameetritest tulenevalt kirjutatud programm, mis juhendab kogu ahelate korrektsuse testimise tööd. [5]

Ahelate korrektsuse testmeetodite ülesehitusloogika proportsionaalse jaotuse alusel eksisteerivad kaks olulisemat tüüpi: fikseeritud nõeltega traditsiooniline tester ja liikuvate nõeltega tester (ingl k *flying probe test*). Esimesele seadmele on omane nõelte paigutamine muutumatu kujuga maatriksisse, mille paigutuse defineerib kontrollitav trükkplaat. Seejuures on vedruühenduste ehk **Pogo pin'ide** arv võrdne plaadilt mõõdetavate punktidega. Muudatused kontrollitavas plaadis tähendavad täiendusi kogu armatuuri ehituses ja programmis. Üldjoontes peetakse sellist fikseeritud struktuuriga testrit mõistlikuks tootmisserieiate puhul, mis ületavad vähemalt 250 toote arvu. [4, 5] Fikseeritud armatuuri struktuuri on kujutatud joonisel 1.2.

Liikuvate vedruühendustega tester on fikseeritud variandi edasiarendus ning eelnevast teataval määral paindlikum. Sellisel testril on kasutatavate **Pogo pin'ide** arv üldjoontes märkimisväärselt väiksem mõõtepunktide kogusest ning masin liigutab **Pogo pin'e** vastavalt kirjutatud programmile. Armatuuri peamine eesmärk on hoida siinkohal trükkplaati testperioodi ajal paigal. [5]

Üleüldises plaanis hindavad tootjad, et ahelate korrektsuse testimisel on võimalik tuvastada kuni 98% kõigist trükkplaatide elektroonikaga seotud vigadest. Täielikult selline hinnang tõele ei vasta,

sest praktilistel kaalutlustel pole võimalik nii head tulemust saavutada. Näiteks väikese mahtuvusega kondensaatorite arvvaartusi on keeruline tuvastada, kui kogu süsteemi elektriline mahtuvus on kondensaatori omast suhteliselt suurem. Täiendavad probleemid tekivad, kui ligipääs kõikidele elektrisõlmedele ja ühendustele pole plaadil tagatud tiheda komponentide paigutuse või katva suure elemendi tõttu. **Sellisel puhul kasutatakse kaudset testimist, mis tähendab mitmest elektroonikakomponendist koosneva struktuuri ühist testimist.** Nii kannatab mõistagi täpsus ja puudub suutlikkus teha järeldusi iga konkreetse elemendi kohta. [5]



Joonis 1.2 Ahelate korrektsuse testseadme fikseeritud armatuuriga struktuur ja põhimõte [9]:

locating pegs – paigalduskinnitid, *contact force provided by vacuum or lever clamps* – plaadi surumiseks kasutatakse vaakumit või klambrit, *airtight seal* – õhutihend, *vacuum line* – vaakumi tekitamise toru, *cables to test equipment interface* – ühenduskaablid, *spring-loaded contact pins* – vedruühendused/Pogo pin'id

1.1.5 Funktsionaalsustest

Funktsionaalsustesti puhul ühendub tester laotud trükkplaadi pistikühendusega või kindla mõõtepunktiga. Meetodi idee on jäljendada võimalikult täpselt lõpptoote tegelikku töökeskkonda ning -režiimi. Seega on tester tüüpiliselt tootspetsiifiline ning enamasti on keeruline luua mitme laotud trükkplaadiga ühilduvat universaalseadet, kuigi majanduslik pool motiveerib samme selles suunas tegema. Kogu funktsionaalsustestimise süsteem koosneb üldjoontes testkapist, trükkplaadiga ühilduvast liidesest, juhtmestusest, keskseadmest ja monitorist. Programmi osa jaguneb siin kaheks: testprogramm ja uuritava trükkplaadil jooksev programm. [4]

Funktsionaalsustest on kõige komplitseeritud testmeetod trükkplaadi kontrollimiseks, sest sisaldab suurt varieeruvust. Meetodil tuleb defineerida testimise ulatus ja milliseid sisendeid laotud trükkplaat vajab. Täiendavalt peab testi läbiviijal olema hea arusaam, millised tulemused viitavad plaadi korrektsele toimimisele ning kuidas defineerida testparameetrid. Seevastu annab kirjeldatav

meetod kõige tõetriuma pildi laotud trükkplaadi toimimisest. Seetõttu on kirjeldatu ainus viis, mis garanteerib, et lõpptoode isegi korrektsete elektrooniliste parameetrite juures realselt töötab. [4] Funktsionaaltestimist on kujutatud lisas 5.

1.2 Lõpptoote koostamisega ja kvaliteedikontrolliga seotud protseduurid

Käesoleva lõputöö fookuses oleva Evocon OÜ elektroonikatoote ehk andmelogeri valmistamine sisaldab erinevaid etappe, mille võib ülevaatlilikult jagada järgnevalt:

- Trükkplaadi tootmine
- Komponentide hange
- Trükkplaadi koostamine ja jootmine
- Programmeerimine
- Pakendamine

Pooltoote ehk elementidega laotud trükkplaadi valmistamise eest on vastutavaks Evocon OÜ partnerettevõtte Tradex AS, kes toodab plaadid Evoconi poolt koostatud disainile ja valitud elektroonikakomponentidele vastavalt. Kogu Evoconi poolt eelistatud tootmisprotsess on kirjeldatud eeldusel, et kõik laotud trükkplaadi valmimiseni vajalikud kontrollmehhanismid nagu **trükkplaadi kvaliteedikontroll ja automaatne optiline inspeksioon või röntgeninspeksioon on standarditele vastavalt Tradex AS või tema allhankijate/partnerite poolt täidetud**. Samuti on ettevõtte tegevuse aluseks teadmine, et plaadile joodetud komponendid on edukalt läbinud tootjatepoolse kvaliteedikontrolli. Evoconi-sisene kvaliteeditestide vastutusala algab sissetuleva pooltoote kontrollist. See hõlmab toote elektroonikaparameetrite baaskontrolli ja programmeerimist, mis teevad pooltootest lõpptoote. Seejärel pakendatakse toode, edastatakse kliendile ning vajadusel viiakse kliendi tehases läbi lõppseadistus.

1.3 Ülesande püstitus

Evocon OÜ ettevõttesisese pooltoote testimise vajadusest tulenevalt on oluline disainida automaatne programmeerimise ja testimise seade ehk tester, mille ülesehitus võimaldaks teostada pooltoote kvaliteedikontrolli ja täiendavat funktsionaalsust puudutavaid operatsioone. Lõpptulemusena soovib ettevõtte kasutusele võtta testri, mis täidab järgnevaid funktsioone:

1. Programmeerib pooltoote mikrokontrolleri andmelogeri korrektseks töötamiseks (sh sensori tagasisideahela funktsioneerimiseks).

2. Loeb pooltoote MAC-aadressi [10] ja kirjutab selle koos testija poolt sisestatava seerianumbriga (kleebiselt) ettevõtte andmebaasi.
3. Kontrollib pooltoote peamiste elektriahelate pingeid, mis puudutavad laotud trükkplaadi ja sensorite vahelise suhtluse osa.
4. Simuleerib korrektsete pingete olemasolul sensorite tagasisideahelat, et kontrollida signaali jäädvustamise tehnoloogiat ning selle tulemusel süttivaid LED indikaatoreid.

1.4 Testitava pooltoote funktsionaalsed parameetrid

Testri disaini alused on otseses seoses kontrollitava pooltoote ehituse ja tööpõhimõtetega. See on ka peamiseks tingimuseks, miks trükkplaatide testreid turul universaaltootena müüa pole. Antud töö fookuses on Evocon OÜ poolt arendatud andmelogeri laotud trükkplaadi testimine. Toode on kujutatud joonisel 2.1. Laotud trükkplaadi olulisemad elektroonikakomponendid koos nende funktsionaalsusega on järgnevad:

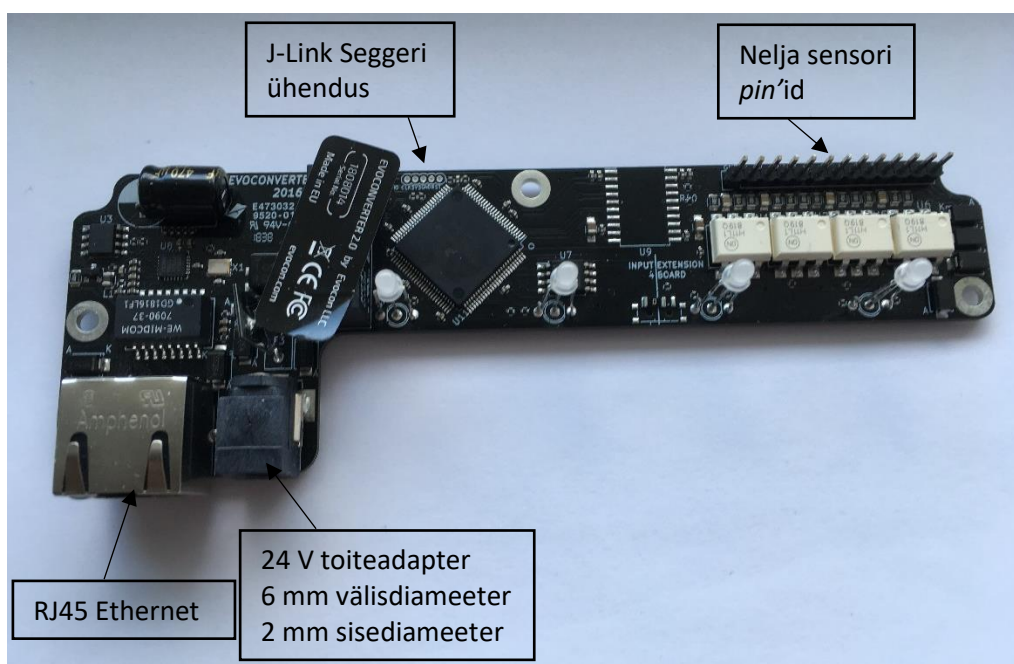
- 2 mm seinapaksusega alalisvoolu toiteallikale mõeldud toitepesa. Alalis-toitepinge nimiväärtus on 24 V.
- Standardne Ethernet-liidese pistikühendus (tüüp RJ45). Andmeloger ühendub ettevõtte lokaalvõrku, et laadida sensoritest tulenevad andmed pilve.
- Transformaator Ethernet-liidese nõutud isolatsiooni ja lahtisidestuse tagamiseks. [11]
- DC/DC muundur (NCS1S2403SC [12]), mis muundab sisendtoitepinge tasemelt 24 V mikrokontrolleri jaoks sobivale tasemele 3,3 V.
- Mikrokontroller (MK64FN1M0VLL12 [13]) tootega seotud funktsionaalsuse juhtimiseks.
- Optoisolaatorid 24 V ja 3,3 V lahtisidestamiseks ning kaitseks kõrgete sisendpingete vastu. [14]
- 4 LED indikaatorit, mis süttivad, kui sensorist antakse tootele signaal.
- 13 klemmiga pistik: kõigi nelja sensori jaoks 3 pistikut ning üks täiendav *pin* sensori jaoks, mida praegu ei kasutata.
- Viie kontaktiga pistikupesa plaadi programmeerimiseks

2 TESTRI KUJUNDAMISE ALUSED

Selles peatükis kõrvutatakse pooltoote manuaalne ja automaatne testimine – tuuakse välja nende võrdluses kummagi puudused ning tugevused. Omadusi kõrvutatakse testitavale pooltootele keskendudes, et leida optimaalne lahendus automatiseerimise rakendamiseks. Peatüki teine pool kirjeldab ohutusnõudeid, mida tuleb Eestis kehtivatel standarditel tuginevalt arvestada testi koostamisel.

2.1 Pooltoote testimisetapil läbi viidavad tegevused

Evoconi andmelogeri programmeerimiseks ja testimiseks manuaalsel kujul ühendab ettevõtte insener pooltootega mitmeid juhtmeid/kaableid ja kasutab protseduuride juures vajalikke arvutiprogramme. Andmelogeri koos viidetega pistikühendustele on kujutatud joonisel 2.1.



Joonis 2.1 Evoconverteeri laotud trükkplaat ja selle ühendused

Pooltootega läbi viidavad tegevused samm-sammult on järgnevad:

- 1) Esmalt ühendab insener tootega J-Link Segger programmeerimis- ja silumisseadme, mida on kujutatud lisa 6. Seade ühildub ühe juhtmega laotud trükkplaadiga, kasutades 5 *pini*'ga pistikut, ning arvutiga USB kaabli kaudu.

- 2) Ühenduse loomiseks on tootele vajalik tagada 24 V alalisvoolu toide tüüpiliselt võrguadapteriga ning Ethernet-võrgukaablit kasutades ühendada laotud trükkplaat lokaalvõrku.
- 3) Seejärel on loodud eeldused pooltoote programmeerimiseks, kasutades programmeerimise oma tarkvara J-Link RTT. Laetav kood on algselt kirjutatud C++ keeles.
- 4) Sama rakendusega loeb insener tootelt saadetud andmed, sealhulgas MAC-aadressi – viimase kirjutab ta manuaalselt andmebaasi tabelisse.
- 5) Programmeerimistsükli lõppedes kontrollitakse multimeetriga sensori *pin*'ide pinged.
- 6) Viimasena ühendatakse kliendi tehases seadistust läbi viies lõpptootega sensorid ja jälgitakse kogu süsteemi toimivust ühe toote täistsükli jooksul.

2.2 Manuaalse testimise ja programmeerimise puudujäägid

Manuaalsel testimisel ja programmeerimisel esineb hulganisti probleeme, mis puudutavad protsesside efektiivust ja kvaliteeti, riistvara kahjustamise võimalust ning inimese ohutust. Eelnenud nimekirjast saab kõige prioriteetsemaks pidada ohutusnõuete keerulist täitmist manuaalsel testimisel, mis halvimal juhul võib viia tööõnnetuseni. Testitav toode töötab küll madalal 24 V pingel, aga vead vahelduvvoolu adapteris võivad laotud trükkplaadi ohtlikult pingestada. Testimise ajal tõstab insener tootel ümber pistikuid ning võib sattuda laotud trükkplaadiga kontakti. Seeläbi eksisteerib elektrilöögi oht. Täiendavalt on toote trükkplaadi ja komponentide servad teravad. Mida rohkem testija plaadiga manuaalseid tegevusi tegema peab ning kokkupuuteolukordade arv on suur, seda suurem on tõenäosus end plaadiga vigastada.

Pideva juhtmete ja pistikute ümbertõstmisega laotud trükkplaadilt teisele plaadile kulutatakse ühenduskontakte ning lüheneb komponentide eluiga. Tootes kasutatud peamised ühenduskomponendid nende eluaega on märgitud tabelisse 2.1.

Tabel 2.1. Ühendused ja nende eluead (ühenduskordade arvu suhtes)

Ühendus	Kontaktid	Eluiga kasutuskordades	Allikas
Ethernet	4 (8) <i>pin</i> 'i	750	[15]
24 V pistikupesa (6.3 mm välisdiam, 2 mm sisediam)	3 <i>pin</i> 'i	5000	[16]
Sensorite <i>pin</i> 'id	12 (13) <i>pin</i> 'i	100	[17]
J-Link Seggeri ühenduse <i>pin</i> 'id	5 <i>pin</i> 'i	-	[18]

Laotud trükkplaadil kasutatava RJ45-tüüpi Etherneti pistikupesa maksimaalne tsüklite arv on näiteks 750 [15]. Sarnane vähenenud tsüklite arv on laiendatav RJ45 pistikule, mida ühendatakse iga testitava tootega vähemalt korra. Kümneid pooltooteid ühe testtsükliga katsetades kuluvad võrgukaablid ja toote pistikupesad. Täiendavalt esineb märgatavaid probleeme pistikuga J-Link Seggeril, mis ühendub plaadile 5 *pin*'iga. Lisas 6 kujutatud fotol on näha pistikut, mida on korduvalt proovitud ise parandada ning sellest tulenevalt peaks nimetatud ühenduse kasutustsüklite arvu piirama.

Manuaalse testimise ning programmeerimise juures mängib olulist rolli inimfaktor: mida rohkem inimene protsessis osaleb, seda suurem on võimalus teha vigu. Pooltoote toimivuse kontrolliks on insener kohustatud testimise sensorahelaid. Manuaalsel kujul pingeid multimeetriga kontrollides on potentsiaalseteks vigadeks näiteks: multimeeter vales režiimis, vaadatakse näitu ebakorrektselt, loodav kontakt *pin*'idega pole puhas jne. Teine potentsiaalne tõsine inimvigade valdkond esineb pooltoote MAC-aadressi ja seerianumbri andmebaasi kirjutamisel. Insener loeb toote MAC-aadressi ühe programmiga ning kirjutab koodi ümber teise programmi, mille ülesandeks on aadressirida andmebaasi luua. Sinna lisandub veel plaadile kleebitav seerianumber, mille testija trükib kleebiselt andmebaasi. Tähtedest ja numbritest koosnevad vähemalt seitsmekohalised aadressid ning seerianumbrid ja nende käsitsi trükkimine jätavad võimaluse eksimusteks. Selliste vigade esinemine tõestab taaskord vajadust protsessi automatiseerida.

Käsitsi tehtavate protsesside suureks miinuseks on madal efektiivsus ning ühele pooltootele kulutatud pikk aeg. Ajaline ressurss kaob kõigile varasemalt kirjeldatud test- ja programmeerimisetappidele. Tootmisprotsesside efektiivsusele rõhuvas ettevõttes on tegemist vastuolulise näidustusega, mis vajab selgelt parandamist.

2.3 Testimise ja programmeerimise automatiseerimine

Automatiseerimise tutvustamisega kirjeldatakse selles peatükis meetodiga kaasnevad hüvesid ning aspekte, kus protsessi kulgemine muutuks seeläbi ratsionaalsemaks. Käesolev lõputöö võtab neid tähelepanekuid testri kujundamisel arvesse.

2.3.1 Automatiseerimise ulatus

Manuaalsel testimisel esinevate vigade vähendamiseks ning ohutuse ja efektiivsuse parandamiseks on oluline viia protsessiahelas läbi muudatusi. Antud töö esimesel peatükil ning selle alapunktidel

tuginevalt eksisteerib mitmeid trükkplaatide kvaliteedi ning funktsionaalsuse kontrollmehhanisme, mis on saavutatud eeskätt automatiseerimise tulemusena. Fookuses olevale pooltootele sobivaima meetodi või nende integratsiooni loomiseks on tähtis defineerida, milliseid protsesse peab automaatne tester läbi viima ehk mis on automatiseerimise ulatus.

Ettevõtte Evocon OÜ saab pooltoote tellimustööna kätte joodetud ehk laotud trükkplaadi kujul. Seega on toode mehhaaniliselt ja elektrooniliselt valmis, kuid pole ilma programmeerimiseta võimeline funktsioneerima. Vajalikud manuaalsel kujul protsessid tootega kujutavad lihtsustatud pingete kontrolli, sensorahelate toimivust, programmeerimist ning laotud trükkplaadi andmete kandmist andmebaasi. **Automatiseerimise väljundina peab säilima nende protsesside tulem, kuid protsesside iseloomu ning kvaliteeti tuleb parandada.**

Loodava testri vajalike funktsioonide kompetents algab plaadi jõudmisega Evoconi kätte. Järelikult pole vaja kontrollida laotud trükkplaadi kõiki etappe, millest mõnda pole enam plaadile lisatud komponentidega isegi võimalik läbi viia. **Tester peab läbi viima protsesse, mis puudutavad ahelate korrektsuse testimist, programmeerimist ning funktsionaaltestimist.** Joonisel 1.1 jäävad need punktiirjoonest allapoole.

2.3.2 Automatiseerimise eelised

Automatiseerimise eesmärgiks on luua programmeerimise ja testimise seade ehk tester, mis asendab võimalikult paljusid manuaalseid operatsioone. Alustades mehaanilise paigaldusega, pooltoode kinnitatakse testrisse kiirkinnitusega, mis viib testija kokkupuute elektroonikakoostuga minimaalseks. Testija peab laotud trükkplaadi testrisse asetama, kinnitama ning hiljem eemaldama. Puudub vajadus erinevate juhtmete ümbertõstmiseks, sest need ühenduvad plaadiga läbi testri. Nii leitakse lahendus automatiseerimisega ohutuse küsimustele: testija voolu all trükkplaadi ühendusi puudutama ei pea ning vähendatakse elektrilöögi ohtu.

Testri kiirkinnitus kõrvaldab peaaesjalikult pistikute ja ühenduste kulumise ning vääriti ühendamise probleemi. Kui ühendus tuleb luua juhtmete kaudu vaid korra testriga ning mitte iga plaadiga eraldi, säästetakse pistikute eluiga ning väheneb elementide lõhkumise tõenäosus. Kõikide selliste manuaalsetest operatsioonidest tingitud vigaste ja kordusühendamiste elimineerimine suurendab kogu testimis- ja programmeerimisprotsessi efektiivsust.

Kogu automatiseerimise protsessi mõte on vähendada inimtegevust protsessis ning loogilise resultaadinä vähenevad inimtegevustest tulenevad vead. Kui lahendatakse MAC-aadressi lugemise ning selle koos seerianumbriga andmebaasi kirjutamise probleem ühe integreeritud programmiga, siis on kõrvaldatud praeguse protsessi üks sagedasemaid probleeme: numbrite valesti sisestamine. Ahelate korrektsuse testimise loogikat kasutades võib tester täiendavalt kanda pingete kontrollimise ülesannet ning multimeetri kasutamisest tingitud eksimused on välditavad. Neid põhimõtteid meeles pidades valmistatud testimissüsteem lahendab enamiku manuaalse meetodi vaatluses täheldatud vigadest.

2.4 Nõuded testija pädevusele

Evocon OÜ eesmärgiks on lihtsustada pooltootega tegeleva testija väljaõpet ning kergendada tema töö olemust. Varasemalt kirjeldatud käsitsi testimise ja programmeerimisega peavad pooltootega tegeleva tööliste teadmised olema ulatuslikud ning tehtavate protsesside järjekord selgeks õpitud. Tööline peab oskama kasutada mitmeid erinevaid programme ja tundma suhtlust andmebaasidega. Suur töökoormus ja pisidetilide täpne jälgimine pikendab tööliste väljaõpet, töötades seejuures vastu protsesside efektiivsusele fookuseeritud ettevõtte põhimõtetele.

Planeeritud automaatne programmeerimine ja testimise seade vähendab nõudeid testija pädevusele, kitsendades tema vajadusi teadmistele. Seega laheneb uue testiriga pädevusnõue. Testimist ja programmeerimist ei pea enam läbi viima ekspert, kes tunneb hästi pooltoote ehitust ning oskab erinevaid programme kasutada. Tuvastatud vead saab insener kõrvale jäetud toodetest üle vaadata ning anda hinnangu ainult üksikutele laotud trükkplaatidele, kus tema teadmisi on vaja: kogu protsessis insener enam osalema ei pea.

Automatiseerimise tulemusena lüheneb testija väljaõppeks kuluv aeg ning ettevõtte kogenenumatel inseneridel jääb rohkem ajalisi ressursse muudeks tegevusteks. Täiendava positiivse aspektina luuakse uue meetodiga baas testija paremaks tähelepanelikkuseks, sest testimise ning programmeerimise manuaalne osa lihtsustub ja protsessi läbiviija peab arvestama vähemate aspektidega.

2.5 Lähtetingimused testri kujundamisel tulenevalt

ohutusnõuetest

Testri arendamise seisukohast on oluline määrata vajalikud lähteparameetrid ja -tingimused, millele valmistatav seade tulenevalt rahvusvahelistest standarditest ja heast inseneritavast vastama peaks. Prioriteetseks peetakse nendes valdkondades inimese ohutust testrit kasutades. Kuna tegemist on elektroonilise testriga, siis asetub rõhk eelkõige elektri- ja tuleohutusele, kuid teataval määral ka mehaanikast tulenevatele ohutusprintsipiidele.

Elektrilistele mõõtmisseadmetele määratud ohutustandardist tulenevalt testitakse elektriseadmete tule levikut katseliselt seadme asetamisega valge siidpaberiga kaetud okaspuupinnale ning testitava sihtobjekti katmisel marliga. Pinnale ei tohi seadmest langeda sulametalli, põlevaid osakesi ega ükski katsevahenditest ei tohi süttida. [19] Seatud keerulistele kriteeriumitele vastamiseks on elementaarne, et trükkplaatide disainil tuleks vältida kuumenevaid osi, mis võiksid kergestisüttivate materjalide puhul esile kutsuda põlengu. Kõik sellised elementidele määratud kuumustingimused jäävad 100°C piiresse ning on oluline enne testri laiatarbelist kasutamist läbi testida [19]:

- Juhusliku kokkupuutega pinnad
 - Metall, pinnakatteta või anodeeritud: 65°C
 - Metall, pinnakattega: 80°C
 - Plastid: 85°C
 - Väikesed (alla 2 cm²) pinnad: 100°C
- Nupud ja käepidemed
 - Metall: 55°C
 - Plastid: 70°C

Tuleohutuse seisukohast on seega elementaarne eelistada komponente, millel on pinnakate ja kasutatud plastmassi, sest ohutu kuumuslävi on kõrgem. Elektroonikakontsernides on tuleohutuse eesmärgil tihtipeale kasutusel rikastatud materjalid, kuhu on lisatud keemiliste või füüsikaliste meetodite kaudu tuld tõkestavaid elemente nagu näiteks halogeene. [20]

Samaväärselt oluline ohtliku kuumusläve järgi disainitud elementide kasutamisele on testris arvestada tuleohutusega programmikoodi kirjutades. Programm peab sisaldama kontrollfunktsioone, mis tagaksid seadme töö väljalülitamise ohuolukordades. Kasutada tuleb

ajutisi parameetreid, et programmi toimimiseks vajalikke ressursse piirata. Kindlasti tuleb koodi kirjutamisel arvestada töötava seadme arhitektuuri ja tehniliste näitajatega. [21]

Elektriohutust silmas pidades kontrollitakse eelkõige kasutajale ligipääsetavate kohtade pingestatust ning isolatsioonide pidavust. Testimise aluseks on viia katsed läbi piirtasemid ületavate vooluparameetrite juures. Kuivades tingimustes on vahelduvpinge piirtaseme efektiivväärtus 33 V ja tippväärtus 46,7 V ning alalispinge korral 70 V. Voolu piirtasemeteks loetakse siinuselise vahelduvvoolu juures efektiivväärtust 0,5 mA või 0,7 mA – parameetrid on aga sõltuvad vooluahelast ning võivad situatsioonikohaselt ulatuda ka 70 mA. Alalisvoolu puhul märgitakse piirväärtuseks 3,5 mA. Selliste näitajatega on võimalik kergemate põletushaavade teke. [19]

Piirtaset ületavate väärtuste esinedes kasutatakse ohutuse tagamiseks isolatsiooni või takistatakse mõnel muul moel inimese ligipääs voolu juhtivale materjalile. Erilist tähelepanu vajavad siinkohal testseadme klemmid, sest elektroonikavahendi toimivuse saavutamiseks peab inimene ühendama seadme vooluvõrku ja viiakse läbi füüsiline kontakt. Klemmide juures tuleb välistada seadme pingestatunud osade juhuslik puudutamine. [22] Viimane on oluline käesoleva töö kontekstis, sest vaatamata laotud trükkplaadi töötamisele 24 V ehk ohutu pingega, säilib siiski tõenäosus, et vooluvõrku ühendatav adapter on vigane ning ei muunda 230 V vahelduvvoolu korrektselt 24 V alalisvooluks.

Mehhaanilistest ohtudest on vajalik testri disainil arvestada erinevaid vigastusi põhjustavate ohufaktoritega. Kindlasti tuleks elimineerida autori elektroonikakoostult kõik teravad ääred, mis põhjustavad löikevigastusi ja püüda vältida kehaosadele vigastusi põhjustavaid liikuvaid seadmeosi. Ohutuse huvides tuleb kõik elemendid tugevasti kinnitada, et hoida ära testrist väljalenduvaid detaile. [19]

3 MEHAANIKA OSA

Mehaanika osa fookuses on Evoconi laotud trükkplaat, mille olulisemate mõõtmetega joonist on kujutatud lisas 7. Uurimise all on pooltoote kinnitamisvõimalused, mis tagaksid testimiseks toote piisavalt stabiilse fikseerimise ning toetaksid laotud trükkplaati ohututest punktidest. Täiendavalt on mehaanika seisukohast oluline keskenduda mehaanilistele vahenditele, mis testri kaudu on suutelised looma elektrilise kontakti pooltoote ning testri vahel. Kogu kinnitusrakis peab lahendama eelnevalt kirjeldatud probleeme ning vastama insener-tehnilistele kvaliteedinõuetele.

3.1 Üldine kinnitamine ja geomeetria

Konkreetne lõputöö peatükk kirjeldab pooltoote testrisse kinnitamise printsiipe. Arutlusel on parameetrid, mida tuleb kinnitusmeetodi väljatöötamisel arvestada.

3.1.1 Elektroonikakoostu mehaanilised parameetrid

Evoconi andmelogeri laotud trükkplaat, mille elektroonikakomponentideta joonist on kujutatud **lisas 7**, on testri arendamise seisukohast mugava kujuga detail. Trükkplaadi tasapind on moodustunud lihtsatest geomeetristest kujunditest. Toote pikemale põhiosale, pikkusega 147mm ja laiusel 26 mm, on külje peale liidetud teine ristkülik (21x38 mm). Keeruliste kujudetailide puudumine lihtsustab testri kujundamise samaväärsetele ristkülikutele, mis kergendab kogu rakise valmistamisprotsessi.

Pooltoote trükkplaati on puuritud kolm ava, mis asuvad kolme erineva serva lähisel. Nende eesmärk on kinnitada lõpptoode kaitsvasse korpusesse, et vältida laotud trükkplaadi kokkupuudet kahjustava keskkonnaga ning tagada süsteemi soovitud toimimine.

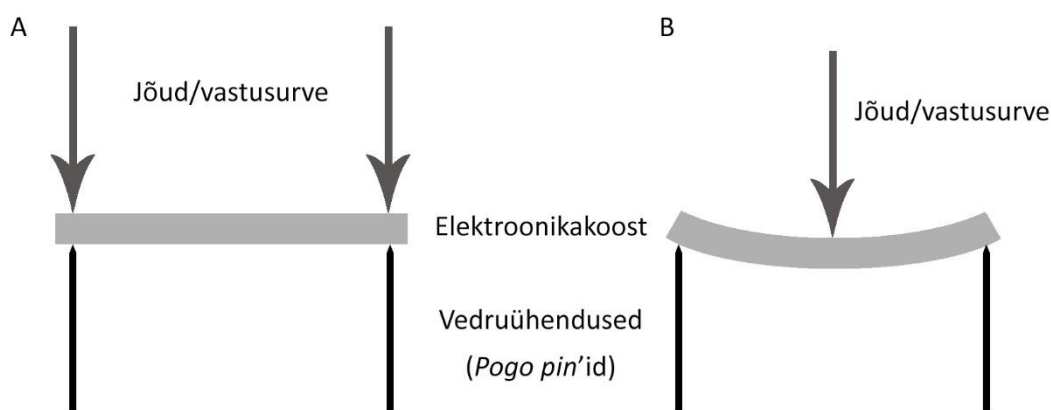
Toote trükkplaat on tehtud materjalist FR4, mis on klaaskiust ja epovaigust komposiitmaterjal. FR4 on suurepäraseks isolaatoriks ning kannatab kõrgemat temperatuuri kui 170°C, mis on tuleohutuse seisukohast oluline parameeter. [23]

3.1.2 Kinnitamise võimalused

Pooltoote horisontaalsuunaliseks fikseerimiseks sobivad kirjeldatud kolm 3,2 mm diameetriga ava, millest pole aga ilma kruvi või poltkinnitusega vertikaalsuunaliseks fikseerimiseks abi. Poltide või

kruvide kinnitamine muudaks automatiseeritud testprotsessi aeglaseks. **Standarditest tulenevaks Evocon OÜ kvaliteedikohustuseks on aga laotud trükkplaadiga läbi viia põhilisi pingete kontrollid, mis viitab ahelate korrektsuse testmeetodi (ICT) ja vertikaalsuunalise jõu praktiseerimisele.** ICT testmeetodil suruvad *Pogo pin*'id pooltoodet alt ülesse ja vajalik on vastusurve.

Siin tulevad uurimise alla painde- ning väändedeformatsioonid. IPC standardi kohaselt ei tohi kaardumine ning väändumine pärast trükkplaadi jootmist ületada 1,5% viik tehnoloogia puhul ning 0,75% pindliit tehnoloogia koostudel [24]. *Pogo pin*'ide survest tuleneva painde ja väände vähendamiseks peab plaadile avaldama vastupidist survet *Pogo pin*'ide puutekohale võimalikult lähedalt. Eelistada tuleb meetodit, nagu on kujutatud joonise 3.1 vasakpoolses A sektioonis, lühendades momendi jõu õlga [25]. Meetodil B toimub plaadi suurem läbipaindumine.



Joonis 3.1 Meetodid vastupidiseks surveks *Pogo pin*'idele

Ahelate korrektsuse testmeetodit kirjeldava joonise 1.2 alusel on tavalisemateks vedruühendusklommide vastusurve avaldamise võimalusteks vaakum või klamberkinnitus. Vaakumversioon nõuab testi seotust hermeetilise eraldusruumiga või näiteks vaakumkoti kasutamist. Käesoleva töö perspektiivis vaakummeetod keerulise teostuse tõttu vaatlusele ei tule. Seevastu on lihtsamini teostatav klamberkinnitamine, mis nõuab laotud trükkplaadilt elektroonikakomponentidest vaba pinda või ära jaotatud koormust. Miniaturised elektroonikakomponendid on nõrgad detailid ning kindlasti tuleks võimalusel vältida surve avaldamist komponentidele. Äärmisel juhul on aktsepteeritav surve jaotamine komponentide vahel, kuid see sõltub iga komponendi mehaanilisest näitajast ja vastupidavusest survele. Neid näitajaid võib leida toote andmelehel.

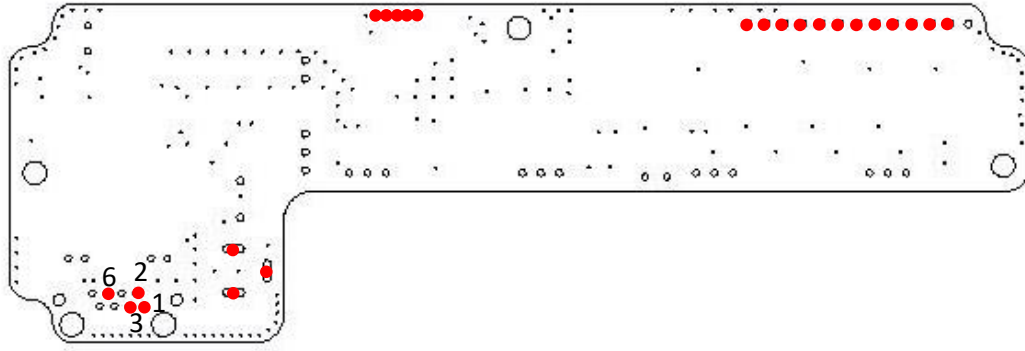
3.2 Kinnitusrakise disain ja valmistamine

Kinnitusrakise disaini loomiseks defineerib antud töö autor arvesse võetavad parameetrid kokkuvõtlikult. Testri disain peab sobituma järgnevate tingimustega:

- Plaadi välised mõõtmed: pikkus 141 mm ja laius 47/28 mm
- Kolm 3,2 mm diameetriga ava plaadil
- Maksimaalne vääne või paine 0,75%. Konkreetne arv on defineeritud juba joodetud pindliitetehnoloogiaga koostudele [24] ning neid elemente sisaldab Evoconi laotud trükkplaat.
- Vedruühendusklommide ehk *Pogo pin*'ide kasutamine ühenduse loomiseks
- Ülesandeks on mõõta pingeid, testida LED indikaatoreid sensorite tagasisideahela läbi, programmeerida plaat ja kirjutada MAC-aadress pilvesüsteemi.
- Vajalikud ühendused:
 - 24 V pingega vooluühendus testitavale pooltootele
 - Sensorite *pin*'id. Tootega ühendub 4 sensorit, millel on kõigil 3 ühendusklemmi.
 - Võrguühendus: vajalik laotud trükkplaadi programmeerimiseks ja MAC-aadressi kirjutamiseks
 - Programmeerimise *pin*'id (5 tk)
- Kinnitamiseks avaldada survet otseselt plaadile või jaotada surve komponentide vahel.

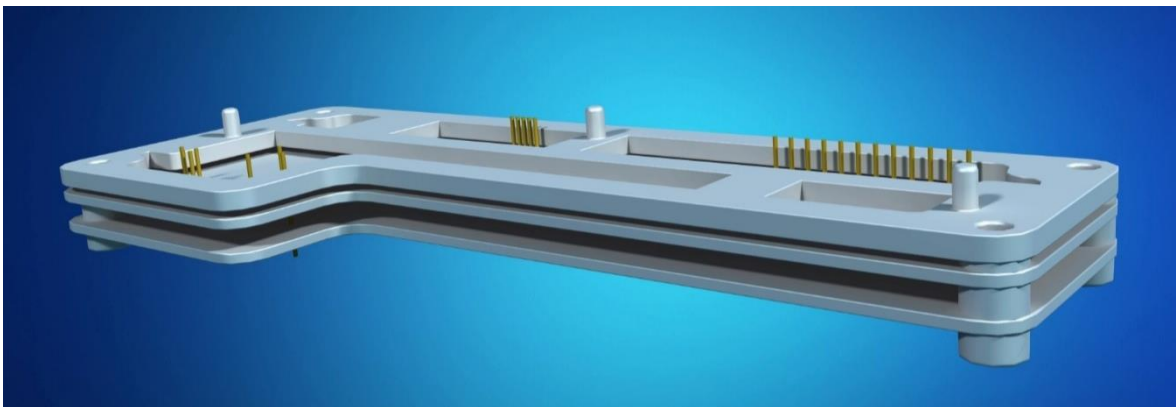
3.2.1 Pooltoote horisontaalsuunaline fiksaator

Horisontaalsuunalise pooltoote fikseerimise eest vastutab laotud trükkplaadi alla jääv armatuur, mis kasutab eesmärgi täitmiseks plaadi kolme ava. Täiendava ülesandena peab alus looma elektroonse ühenduse toote ning testri elektroonikakoostu vahel. Kompleksülesande täitmise esimese sammuna määratakse testimiseks oluliste *Pogo pin*'ide asukoht süsteemis. Laotud trükkplaadi varustamiseks 24 V pingega kasutatakse kolme, võrguühenduse loomiseks nelja või kaheksat, programmeerimiseks viite ja sensorite testimiseks 12 *Pogo pin*'i. Rõhutada tuleb siinkohal, et kuigi RJ45 pistikul on kokku kaheksa ühendusklemmi, siis 10BASE-T/100BASE-T kasutamisel andmete saatmiseks ja vastuvõtmiseks kasutatakse neist vaid nelja. Need asuvad positsioonidel 1, 2, 3 ja 6 ning ülejäänud nelja ühenduse kaasamine süsteemi pole vajalik. [26] Joonisel 3.2 on kujutatud olulised ühenduspunktid.



Joonis 3.2 Olulised pooltoote mõõte- ja ühenduspunktid

Kogu süsteemis on seega minimaalselt vajalikud 24 vedruühendust. Mõõtepunktide struktuurist selgub, et kõikidel joodistel peale programmeerimispistiku ulatuvad joodetud elementide viigud trükkplaadist läbi. Nende puhul on soovitatav kasutada krobelse ja haakuva peaga *Pogo pin*'e, nagu on kroonühendused [27]. Programmeerimiskontaktide puhul on eelistatud terava otsaga *Pogo pin*'id, mis sobituvad paremini avade puhul [28]. Ahelate korrektsuse testmeetodile omaselt vajavad kõik need vedruühendused toetavat armatuuri, mis peab võimaldama 16,55 mm pikkustel ühendustel vedruna kokku suruda kuni 2,65 mm - see on maksimaalne võimalik [27]. Ohutuse seisukohast ei tohi armatuur juhtida elektrit, olles soovitatavalt tehtud plastmassist. Plastmassist keeruliste struktuuride valmistamine on lahendatav 3D printimisega, millega saab piisava täpsusega printida kõik avad *Pogo pin*'ide püsti hoidmiseks. Autori visiooni disainist, mis täidab kõik peatükis püstitatud eesmärgid, on kujutatud joonisel 3.3 ning insener-tehnilist joonist koostust lisas 8.



Joonis 3.3 Vedruühendused ja armatuuri struktuur.

Kujundatud armatuur aitab püsti hoida õrnu *Pogo pin*'e ning selle jaoks on kolmekihilise armatuuri kahel alumisel kihil vedruühendusklommidele vastava 0,9 mm diameetriga avad. Ülemisel kihil on suuremad sisselõiked kõigis kohtades, kus laotud trükkplaadi viigud ulatuvad joodetud plaadist läbi

ning teevad trükkplaadi alumise pinna ebatasaseks. Testitava pooltoote horisontaalsuunaliseks fikseerimiseks on loodud plaadi kolme ava läbistavad sambad. Alumine kiht on tasapinnast 3,7 mm kõrgusel, mis võimaldab sinna alla paigutada testri elektroonikakoostu koos väiksemate komponentidega. Suuremad elektroonikakomponendid, mis võivad vajada aeg-ajalt vahetamist või mille ümberprogrammeerimine on sagedane nähtus (nt mikrokontroller), tuleb autori kujundatud testri elektroonikakoostul paigutada kohta, mis ei jää kihtide alla. Nii saab komponentidele mugavamalt ligi ning alumise kihi struktuur ei nõrgene kõrgematest komponentidest tulenevate löigete, avade tõttu. Kogu armatuur prinditakse plastmassist, milleks võib olla 3D printeritel levinud ABS. Printdetailid on näidatud lisas 8.

3.2.2 Pooltoote vertikaalsuunaline fiksaator

Ahelate korrektsuse testimise tavapäraseim pooltoote kinnitusmeetod on vastusurvet avaldav klamber (*clamp*), mille potentsiaalset näidisversiooni on kujutatud lisas 9. Selline klamber suudab hoida vastupidist survet kuni 100 N [29]. Testimiseks kasutatakse 24 *Pogo pin*'i, millest iga maksimaalne surve (vedru on põhja surutud) on tootja poolt märgitud $m = 120 \text{ g} = 0,120 \text{ kg}$ [27]. Klambri sobivus on tõestatatav järgnevalt [30]:

$$F = m \cdot g \quad (3.1)$$

F – raskusjõud, N

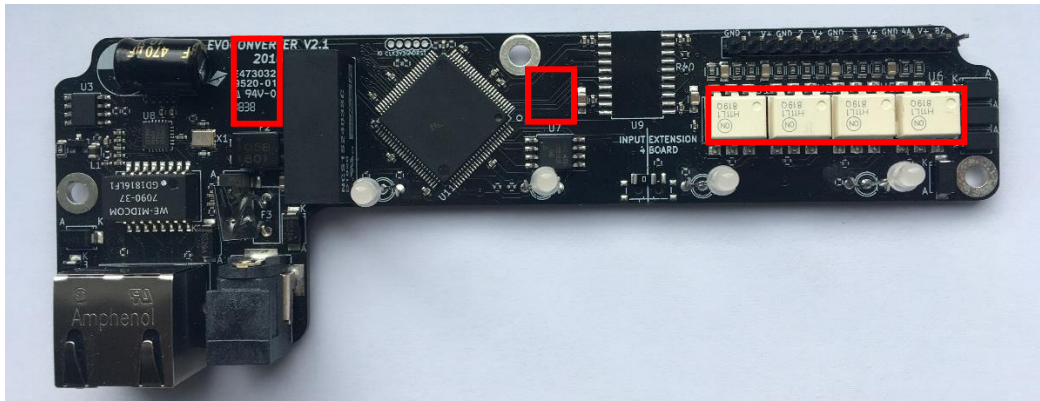
m – mass, kg

g – raskuskiirendus, Maal $9,81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$

$$F = 0,120 \text{ kg} \cdot 9,81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} = 1,18 \text{ N}$$

Järelikult on 24 vedru maksimaalne surve $F_{\text{max}} = 24 \cdot 1,18 \text{ N} = 28,32 \text{ N}$ ja $100 \text{ N} > 28,32 \text{ N}$. **Selline maksimaalne surve (kui vedrud on põhja surutud) ei suuda survet avaldavat klambrit avada.**

Seejärel tuleb lahendada küsimus, millistele punktidele laotud trükkplaadil vastusurvet avaldada, et pooltoode kahjustada ei saaks. Meeles peaks pidama kahte olulist asjaolu. Esiteks tuleb võimalusel vältida komponentide vajutamist või hajutada klambri surve komponentide vahel. Teiseks valida vastusurve punktid vedruühendustele võimalikult lähedal. Nendel tähelepanekutel baseeruvalt on plaadil kolm võimalikku toetuspunkti, mis on kontuuriga märgitud joonisel 3.4.



Joonis 3.4 Evoconverteri laotud trükkplaadi sobilikud survepunktid

Vasakpoolses kahes regioonis puuduvad elemendid ning survet avaldatakse otse plaadile – see on kõige turvalisem meetod. Kahjuks pole RJ45 ja volupistikule lähemal tasast elementidest vaba ala, millele suruda. Kõige parempoolset punast regiooni täidavad neli optoisolaatorit. Nendele elementidel ei paku tootja andmelehel maksimaalse surve kohta väärtusi [31]. Teisest küljest asuvad need neli elementi ühel tasapinnal, millega on hea survet komponentide vahel ühtlustada. Optoisolaatorid toetuvad korpuse põhjaga plaadi pinnale ehk surve korral pole karta viikude paindumist. Klamber peab sinna regiooni toetuma, et hoida pooltoodet sensorühendusi kontrollivate 12 *Pogo pin*'i poolt põhjustatud deformatsiooni eest. Optoisolaatorite ümber asuvad elementidest vabad regioonid on kas liiga väikesed või on ala lähedal pikkade viikudega LED indikaatorid, mis metallist klambriaga kokku puutudes võivad põhjustada lühise. Täiendavate vabade alade pakkumine trükkplaadil saab tulla järgmise Evoconverteri versiooni kujundamisega, milles on arvesse võetud testri tagasisidet.

Joonisel 3.4 kujutatud regioonide sobivuse tõestamiseks tehakse arvutused ja analüüs järgnevate sammude ning arutluskäigu alusel:

1. Laotud trükkplaadi vedruühenduste vastu surudes ei vajutata vedrusid lõpuni välja kahel põhjusel:
 - a. Joodised on erinevate kõrgustega. Surudes arvutuslikult plaadi *Pogo pin*'ide vastu lõpuni välja, võivad mõned joodised avaldada vedru lõppasendis suuremat survet ning vedruühendused lõhkuda.
 - b. Joodised on erinevate laiustega ning kõikide pooltoodete juures ka mitte täpselt sama koha peal. Säilib oht, et vedruühendusklammide kroon ei haaku hästi joodisega ning libiseb kõrvale, luues kontakti krooni küljega. Kui sellisest asendist suruda *Pogo pin* lõpuni, siis see ilmselt murdub.

2. Vedruühenduse avaldatava surve arvutamiseks asendist, kus vedru on näiteks poole võrra kokku surutud, tuleb kõigepealt arvutada vedru jäikustegur k vedru lõppasendist $x = 2,65 \cdot 10^{-3}$ m ja sellele vastavat jõudu $F = 1,18$ N kasutades [30].

$$a. \quad k = \frac{F}{x} \quad (3.2)$$

k – jäikus

F – elastsusjõud, N

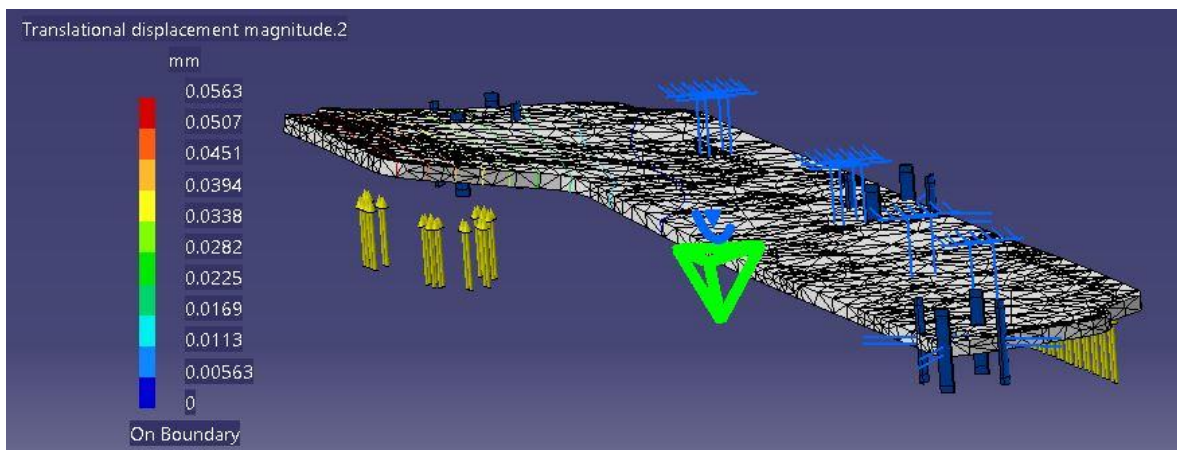
x – deformatsiooni suurus, m

$$b. \quad k = \frac{1,18 \text{ N}}{2,65 \cdot 10^{-3} \text{ m}} = 445,28$$

3. Ühe vedru jõu arvutamiseks arvestatakse, et *Pogo pin* surutakse maksimaalsest distantsist poole võrra ehk $x = 1,33$ mm.

$$a. \quad F = 445,28 \cdot 1,33 \cdot 10^{-3} \text{ m} = 0,59 \text{ N}$$

4. Analüüs koostatakse programmis CATIA V5. Märgitakse kolm armatuuri fiksaatorsammast pooltoote horisontaalsuunalise liikumise piiramiseks, kolm tugipunkti joonisel 3.4 näidatud kohtades ning iga *Pogo pin*'i kohta käiv jõud $F = 0,59$ N. Need jõud mõjuvad joonisel 3.2 toodud punktidele. Arvutused tehakse analüüsi lihtsuse huvides elementideta trükkplaadiga. Võetakse teadmiseks, et kui elementideta trükkplaadi deformatsioon jääb 0,75% piiresse, siis sobib kinnitamismeetod igal võimalikul juhul. Joodetud komponentidega oleks reaalne deformatsioon veelgi väiksem, sest komponendid tugevdavad koostu. Trükkplaadi materjaliks määratakse FR4 [23].



Joonis 3.5 Trükkplaadi analüüs

Joonis 3.5 on trükkplaadi tugevusanalüüsi tulemus. Selgub, et kõige enam paindub trükkplaat läbi servast, kus asuvad RJ45 ning volupistik. Maksimaalselt väändub plaat sealt 0,06 mm. IPC-TM-650 testmeetodil 2.4.22 tuginevalt, milles antakse väände- ja paindeprotsendi arvutamiseks, saab leida väände- ja paindeprotsendi [32]:

$$V\ddot{a}andeprotsent = \frac{R}{2(D)} \cdot 100 \quad (3.3)$$

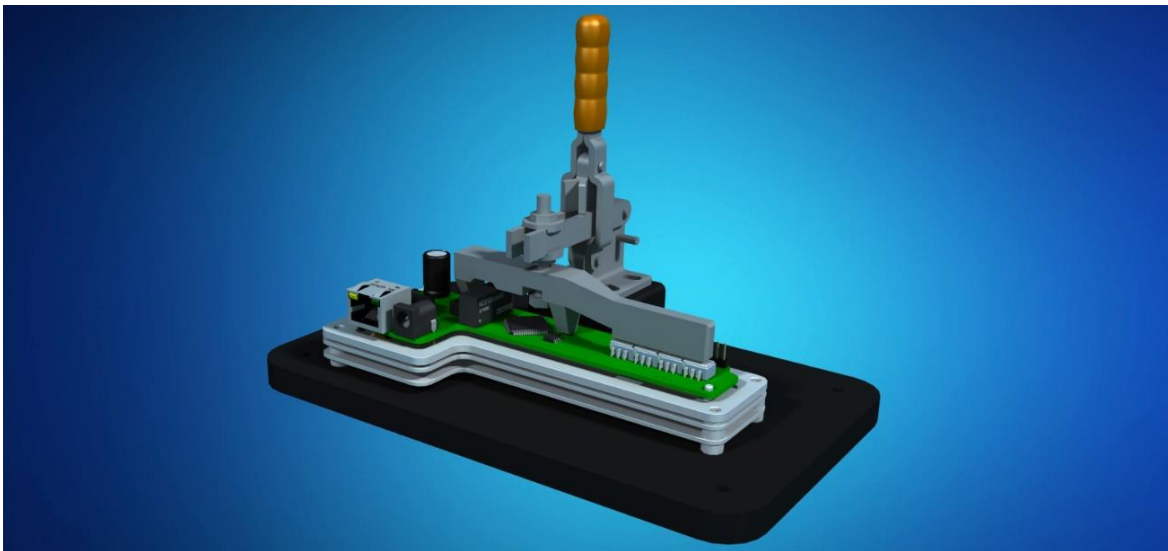
R – maksimaalne etaloni suurus, mis mahuks nulltasapinna ja deformeerunud osa vahele, m;
deformatsiooni ulatus deformeerumata oleku nullasendist

D – objekti ümber joonestatud minimaalse ristküliku diagonaal, m

Trükkplaadi väändumise ulatuse saab analüüsist $R = 6 \cdot 10^{-5}$ m ja CAD mudelist võetuna on $D = 0,15$ m.

$$V\ddot{a}andeprotsent = \frac{6 \cdot 10^{-5} \text{ m}}{2 \cdot 0,15 \text{ m}} \cdot 100 = 0,02\%$$

Arvutatud väändeprotsent jääb lubatud 0,75% piiresse ehk selline vastusurve toetab *Pogo pin*'ide poolt avaldatud jõu all piisavalt toetust laotud trükkplaadile. Sobilikust tulemusest tingituna pakub autor testri mehaanilise osa lõplikuks disainiks mudeli, mille 3D kujutist on näidatud joonisel 3.6 ning mille koostu insener-tehniline joonis on lisa 10.



Joonis 3.6 Testri mehaanilise osa 3D disain

Armatuuri *Pogo pin*'idele asetatud testitav pooltoode fikseeritakse rakisesse klambriga. Ostutootena hangitud klambri külge kinnitub poldiga autori disainitud alumiiniumist freesdetail, mis vajutab plaadil konkreetsele kolmele ning varem tõestatud punktile. Detaili joonist on näha lisa 9 joonisel L9.3. Freesimiseks vajaliku CNC freespingi G-koodi tegemiseks kasutati Siemens NX tarkvara moodulit *manufacturing*. Koodi alusel freesprotsessi on kujutatud lisa 9 joonisel L9.2. Kogu testri fikseerimiseks jääb koostu alla PVC plastikust plaat, mis elektriohutuse tagamiseks ning lühiste vältimiseks voolu ei juhi. Plaadil on eraldi PLA plastikust 3D prinditud kõrgem tasand, mis tõstab klambri pooltoote kinnitamiseks õigele kõrgusele.

4 ELEKTROONIKA OSA

Elektroonika osa kesksel kohal on kõikide testrile määratud programmeerimis- ja testfunktsioonide realiseerimine, luues ühenduse arvuti ja selle programmi ning testitava pooltoote vahel. Täiendavalt on autori elektroonikakoost vastutav lihtsamate loogikafunktsioonide ning andmetöötluse eest, mis teevad pooltootelt saadava informatsiooni mõistetavaks arvutiprogrammile. Töö väljundiks on autori enda disainitud ja elementidega varustatud trükkplaat, mis sobitub mehaanika seksioonis välja töötatud testriga, arvestades rakise kuju ja parameetreid.

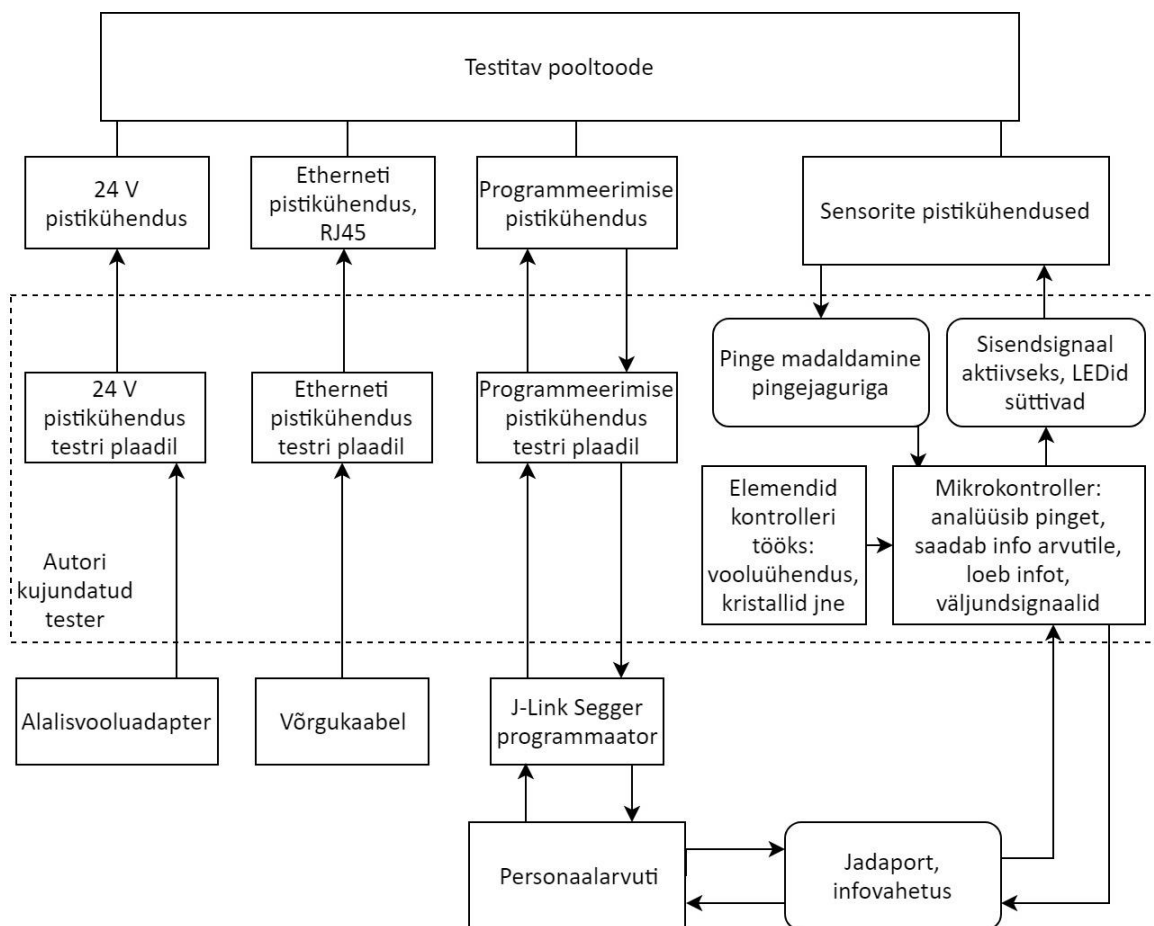
4.1 Plokkskeem

Enne konkreetse trükkplaadi kujundamist ning komponentide valikut on oluline defineerida pooltootega teostatavad funktsioonid, selle sisendid ja arvutiprogrammile infoedastuse meetodid. Ülevaatliku pildi saamiseks loetletakse autori elektroonikakoostu konkreetset ülesanded ning realiseeritakse plokkskeemina. Autori disainitud elektroonikakoost peab vastama järgnevatele funktsionaalsusest tingitud nõuetele:

- Looma ühenduse testitava pooltoote Ethernet-pistikupesa ja testriga ühendatud võrgupistikuga.
- Varustama pooltoodet 24 V pingega.
- Ühendama testriga seotud J-Link Segger programmaatori pooltootega.
- Mõõtma pooltoote sensorühenduste pingeid ning saatma töödeldud informatsiooni nt jadapordi tehnoloogiat kasutades arvutile. UART-jadaport on küll tänapäevaste andmevoogude juures aeglane ühendus, kuid rahuldab suure tõenäosusega autori elektroonikakoostu ja arvuti andmevahetuskiiruse nõuded. [33]
- Käivitama arvutilt saadud käskude peale testitava pooltoote sensorahela LED indikaatorid visuaalseks kontrolliks.
- Olema suuteline teostama lihtsamaid autonoomseid otsuseid: nt kas pinge on tootele sobiv või mitte.

Joonisel 4.1 on ülevaatlikult näidatud disainitava testri elektroonikasüsteemi tööpõhimõte, mis elemente see sisaldama peaks ning kuidas süsteem ühendub testitava pooltoote ja personaalarvutiga. Toite-, võrgu- ja programmeerimisühenduse jaoks on autori elektroonikakoost signaali (või voolu) vahendaja rollis. Selle eesmärk on, et testri kasutaja ühendaks juhtmed testriga ainult korra ning tester oleks omakorda ühenduses pooltootega, kasutades *Pogo pin*'e. Nii

säästetakse pistikuid. Sensorite pistikühenduse ning sellega seonduva signaaliga teeb elektroonikakoost märkimisväärselt rohkem protseduure. Evoconverteril on iga sensori kohta kolm ühenduse *pin*'i: 24 V väljundpinge, maandus ja sisend, mis loeb 24 V signaali, kui sensor tuvastab tootmisliinil objekti. Autori elektroonikakoost peab kõigepealt kontrollima pooltoote ahelate korrektsust ehk väljundpinge 24 V olemasolu. Kontrollimiseks kasutatakse mikrokontrollerit, kuid 24 V tuleb kontrolleri jaoks pingejaguriga sobivale pingele viia. Kas pinge on soovitud vastav või esineb anomaaliaid, saadab kontrolleri sellest informatsiooni personaalarvuti programmile. Personaalarvutist saadakse käsk pooltoote LED-ide visuaalseks kontrolliks. Kontrolleri rakendab vastava elektriahela. Elektriahel peab sisaldama lüliteid, sest mikrokontroller ei suuda sensorite pistikupesa sisendi jaoks 24 V rakendada. Kontrolleri juhib lüliti, mis ühendab toote sensorite *pin*'ide 24 V väljundid 24 V sisendiga ning LED indikaator süttib. Lisaks peab autori elektroonikakoost sisaldama elemente mikrokontrolleri korrektse funktsioneerimise tagamiseks.



Joonis 4.1 Disainitava elektroonikakoostu tööpõhimõte ja ühendus pooltoote ning personaalarvutiga

4.2 Komponentid

Trükkplaadi disain ning komponentide valik tulenevad eelmises alapunktis püstitatud funktsionaalsetest nõuetest ning joonisel 4.1 märgitud plokk skeemist. Kui autori elektroonikakoost toimib voolu-, võrgu- ja programmeerimisühenduse juures vahendajana, siis muudele elektroonikaelementidele peale pistikupesade keskendumine pole vaja. Elektroonikakoostu põhilised elemendid ja keerukus seisnevad sensorite *pin*'ide testimises. Käesolevas peatükis tuleb juttu kõikide komponentide olulistest parameetritest, valikuküsimustest, pistikupesadest ja nende võimalikest paigutustest.

4.2.1 Komponentide valik ja võtme parameetrid

Toiteühenduse tagamiseks tuleb tester ühendada võrgutoiteadapteriga, mis muundab 230 V vahelduvpinge 24 V tasemele ning muudab vahelduvvoolu alalisvooluks. Selline adapter on varasemalt testimise jaoks olemas ning kasutatav ka tehastes Evoconi lõpptootete vooluga varustamiseks. Ratsionaalne on kasutada sama 24 V ja 0,5 A adapterit, mis tähendab testril pooltootega sama pistikupesa kasutamist. Pistikupesa välisdiameeter on 6,3 mm ning sisediameeter 2 mm. [16]

Võrguühenduse jaoks kehtib vooluühendusega sama põhimõte: kasutada autori kujundatavas testri elektroonikakoostus pooltootega sama RJ45 Etherneti pesa. Sobivaks variandiks on Amphenoli RJ45 pesa, mida on ettevõtte oma toote jaoks varasemalt juba tellinud. [15]

Programmeerimiseks on Evoconi tootel siiani olnud vaid 5 ava tüüpi kontakti, millega testija ühendab J-Link Seggeri pistiku. Paremaks ühenduseks ning pistiku fikseerimiseks on testri elektroonikakoostul soovitatav kasutada plaadile joodetud pistikupesa, milleks võiks olla 2206SA-05-46 [34].

Sensorite *pin*'ide testimiseks vajab autori elektroonikakoost elektriahelat, mis sisaldaks autonoomselt käituvat üksust. Selliseks autonoomseks elemendiks oleks mikrokontroller. Viimase valikust on mõistlik kõnealuse ahela kujundamisel alustada, sest mikrokontroller seab teatavad nõuded ahela elementidele: milliseid elemente on vaja kontrolleri tööks lisada.

Mikrokontroller

Mikrokontrolleri lahendustest tõusevad esile Atmega-seeria kontrollerid, mille eeliseks on kontrollerile laetava Arduino baasprogrammi (ingl k *bootloaderi*) korral välise programmeatori kasutamise vajaduse puudumine, samuti hästi kättesaadavate programmeerimistööriistade olemasolu. Antud mikrokontrolleril töötava tarkvara funktsionaalsus on suhteliselt lihtne ja selle tööd ning töökindlust on võimalik kontrollida ka ilma täiendava välise simulaatorita. DIP-tüüpi korpusel mikrokontroller kannab nime **Atmega328P-PU** ning see on toodetud Atmeli poolt [35]. Valitud DIP-tüüpi kontroller on võimalik paigutada eraldi trükkplaadile käivasse pessa, mille tulemusena saab kontrollerit vajadusel eemaldada ja programmeerida ka väljaspool testrit.

Atmega328P-PU toimimiseks vajalike elementide skeem on näidatud lisas 11. Mikrokontrolleri korralikuks töötamiseks on vaja 5 V toidet, 16 MHz kvartsresonaatorit, kahte 20 pF ja ühte 100 nF mahtuvusega kondensaatorit. Toitepinge olemasolu kontrolliks võib 5 V sisendi ja maanduse vahele ühendada takisti ja LED indikaatori. Atmega328P-PU on täiendavate elementide koguse suhtes vähenõudlik ning kasutatakse ainult minimaalselt vajalikke komponente. 5 V toite saab autor testriga ühenduva personaalarvuti USB pesast. Kvartsresonaator tagab kontrolleri püsiva töösageduse, et täita funktsioone ning selleks elemendiks sobib FOXSLF/160-20 [36]. Kondensaatorite olemasolu ühtlustab erinevaid signaali ja pingete kõikumisi. [37, 38]

Pingete mõõtmisahelad

Toimiv Atmega328P-PU mikrokontroller suudab mõõta pingeid kuni 5 V. Kuna sensorahela väljundi *pin*'id kannavad 24 V pinget, on nende testimiseks tarvilik kasutada pingejagurit, mis muundab 24 V mikrokontrollerile mõõtmiseks sobivaks suuruseks. Mikrokontrolleri ohutuse tagamiseks väärtustatakse $U_{in} = 24 \text{ V}$ lugemisväärtus $U_{out} = 4,5 \text{ V}$, mis mahub mikrokontrolleri mõõtemaksimumi piiresse. Kasutatava pingejaguri puhul on oluline kahe takisti erinevus: mida suurem see on, seda suurem on jagamistegur. Valin esimeseks takisti väärtuseks $R_1 = 3 \text{ k}\Omega$ ning arvutuslikult tuleb teise takisti väärtus järgnev [39]:

$$R_2 = \frac{R_1 \cdot U_{out}}{(U_{in} - U_{out})} \quad (4.1)$$

R_2 – teise takisti väärtus, Ω

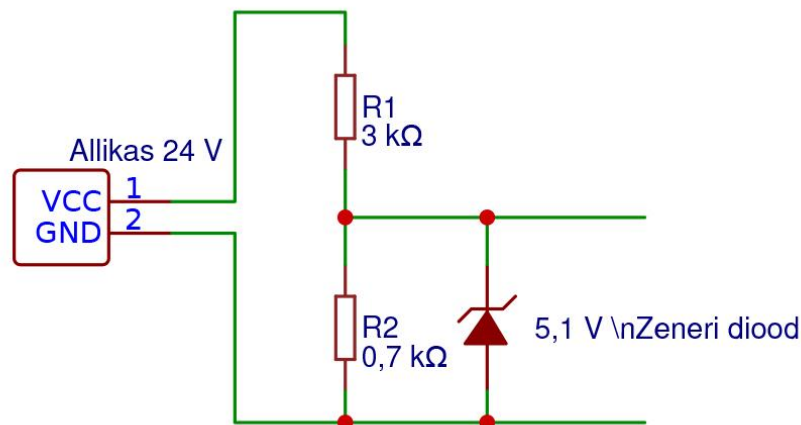
R_1 – esimese takisti väärtus, Ω

U_{out} – väljundpinge, soovitud pinge, V

U_{in} – sisendpinge, V

$$R_2 = \frac{3000 \Omega \cdot 4,5 \text{ V}}{(24 \text{ V} - 4,5 \text{ V})} = 692 \Omega$$

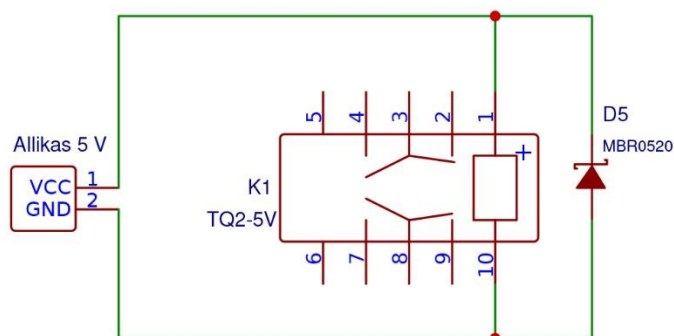
Valemist selgub, et teise takistina peaks kasutama $R_2 = 692 \Omega$ takistit. Reaalses elus on täpselt sellise väärtusega takistit raske leida ning 692Ω tuleb asendada lähima võimalikuga E-reas, milleks on näiteks $0,698 \text{ k}\Omega$ takisti (E96 rida). Mikrokontrolleri ohutuse huvides on ahelasse sama takistiga rööbiti vajalik ühendada stabilitron (Zener-diod), mis kontrolleriile liiga kõrge pinge otse maandusesse juhib. Zener-diod hakkab vastupidiselt ehk katoodilt anoodile elektrit juhtima kindla pingeväärtuse ületamisel, milleks antud kontrolleri juures on näiteks $5,1 \text{ V}$. [40] Zeneriga varustatud pingejaguriga skeem on näha joonisel 4.2.



Joonis 4.2 Zener-dioidiga pingejaguri skeem

Releed

Testitavate pingete korrektsete väärtuse määramisel jätkub pooltoote LED-ide kontroll. Selleks peab mikrokontroller personaalarvutist saadud käskude abil juhtima sensorihela *pin*'ide 24 V väljundi sama ahela sisendi *pin*'ile. Nii imiteeritakse sensori positiivset signaali ja pooltootel süttib sensorile viitav LED indikaator. Kirjeldatud lülitamiseks on sobiv kasutada releed. Relee loob sisend- ja väljundraja vahel ühenduse, kui juhtsignaal läheb kas kõrgeks või madalaks (olenevalt rele ühendamisest). Vastavaks releeks skeemile on Panasonicu TQ2-5V, mille juhtimiseks on sobilik 5 V signaal $28,1 \text{ mA}$ nominaalvoolu juures [41]. Oluline on rele paigutamisel meeles pidada, et komponent sisaldab induktiivpooli. Kui 5 V lülitussignaali releelt ära võtta, üritab pool teatud lühikese ajaperioodi vältel voolu liikumist säilitada. See on tingitud pooli magnetväljast, mis toob kaasa elektromotoorjõu tekke. Selleks, et poolis tekkiv pinge teisi komponente ei kahjustaks ning komponendi magnetväli saaks vaikselt hääbuda, ühendatakse skeemi rele juhtimiseks kasutatavat pinget taluv diod. See loob eraldi vooluringi rele väljalülitamisel tekkinud voolule ning pinge ei saa kõrgeks minna. Näide diodi skeemi lisamisest on näha joonisel 4.3. [42]



Joonis 4.3 Diodi ja relee paralleelühendus

Autori elektroonikakoostu vajalikud komponendid on toodud tabelis 4.1 ning nende asukoht joonisel 4.4. Valitud elementidest piisab, et valmistada ülesandes püstitatud funktsioonidele vastav joodetud trükkplaat.

Tabel 4.1 Autori trükkplaadi jaoks vajalikud komponendid

Elemendi tüüp	Mudel	Tootja	Kogus	Väärtus	Märke joonisel	Allikas
24 V pistikupesa	RAPC722	Switchcraft	1	-	J4	[16]
Etherneti pesa	RJHSE-5384	Amphenol	1	-	RJ2	[15]
Program. pistikupesa	2206SA-05-46	Multicomp	1	-	U4	[34]
Mikrokontroler	Atmega328P-PU	Atmel	1	5 V	U1	[35]
Kvartsresonaator	FOXSLF/160-20	Fox	1	16 MHz	Y1	[36]
Kondensaator	08055A200JAT2A	AVX	2	20 pF	C2/C3	[43]
Kondensaator	08051C104JAT2A	AVX	1	100 nF	C1	[44]
LED	KP-3216SGC	Kingbright	1	20 mA, 2,2 V	LED1	[45]
Takisti (LED-i jaoks)	CRCW1206150RFK EA	Vishay	1	150 Ω	R2	[46]
Takisti (pingejagur)	RR1220P-302-B-T5	Susumu	4	3 k Ω	R6, R8, R10, R12	[47]
Takisti (pingejagur)	WF08U6980BTL	Walsin	4	698 Ω	R5, R7, R9, R11	[48]
Zener-diod	MMSZ4689-E3-08	Vishay	4	5,1 V	D1, D2, D3, D4	[49]
Relee	TQ2-5V	Panasonic	4	5V	K1, K2, K3, K4	[41]
Shottky diod	MBR0520L	ON Semiconductor	4	20 V, 500 mA	D5, D6, D7, D8	[50]

4.2.2 Komponentide paigutus

Enne trükkplaadi lõpliku disaini väljatöötamist on kasulik koondada elementide paigutamise jaoks olulised tingimused. Komponentide paigutamisel tasuks lähtuda sellistest printsiipidest:

- Paigutada ühe funktsiooni lahendamiseks seotud komponendid ühte struktuuri.
- Vältida suuremate komponentide paigutamist testimisarmatuuri alla, kuhu on jäetud 3,7 mm ruumi. Sellest parameetrist moodustub 1,6 mm testri trükkplaat.
- Paigutada komponendid nii, et automaatne trükkplaadi radade vedamise süsteem suudaks ühendusrajad luua maksimaalselt kahele kihile. Rajad trükkplaadi pealmisel ja alumisel kihil on odavam variant toota, kui täiendavad rajad vahepealsetel kihtidel.
- Toiterajad peavad olema laiemad ja tugevamad, soovituslikult vähemalt 1 mm laiustena.
- Tuleb tagada maksimaalselt tugevad maa/maandusühendused. Soovituslik on kasutada maa/maanduskihti. [51]

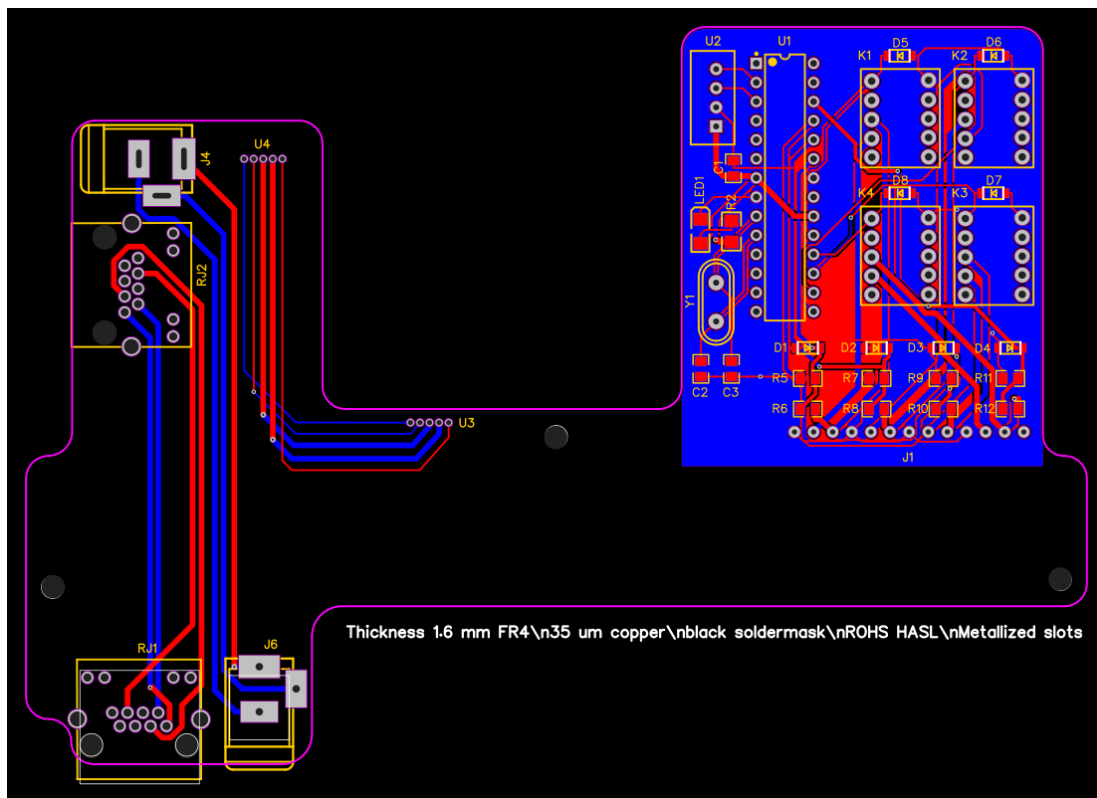
4.3 Trükkplaat

Trükkplaadi disainiks kasutab töö autor veebipõhist trükkplaadi disaini tasuta tarkvara EasyEDA, mis võimaldab plaate disainida ning JLCPCB kaudu Hiinast tellida [52]. Kasutades tabelis 4.1 välja toodud elemente ning eelmises alapunktis püstitatud komponentide paigutuse põhimõtteid, pakub autor trükkplaadi kujundusena välja versiooni, mida kujutab **joonis 4.4**. Trükkplaadi disaini aluseks olev skeem ja jootmisprotsessi kujutav foto on näidatud **lisas 14**.

Disainitav trükkplaat koosneb kolmest sektsioonist: pooltoote trükkplaadi kujuga osa, armatuuri alt väljas asuvad vasak tiib ning parem tiib. Armatuuri alt välja jäävate sektsioonide vahele jääb tühi ala, kuhu mahub testri kinnitusklamber. Testitava pooltoote alla jääva osa elementide ühenduskontaktidesse paigaldatakse *Pogo pin*'id. Vedruühenduste punktides hargnevad ühendusrajad vasakusse ja paremasse ülemisse tiiba, kus luuakse ühendus trükkplaadi vastavate komponentidega. Punased rajad kulgevad trükkplaadi pealmisel kihil ning sinised alumisel. Sama värviloogika kehtib ka maanduskihtide kohta – need ühendavad sensori testahela kõiki maandusi.

Vasakusse tiiba joodetakse kõik pistikupesad ehk komponendid, mis vaid vahendavad testitava pooltoote ning testriga ühendatud juhtmete andmevahetust või voolu. Kohale RJ2 läheb RJ45 pistik, paika J4 voolupistik ning kohale U4 J-Link Segger programmeatori jaoks pistikupesa. Toitevoolu ja Etherneti rajad on teistest radadest laiemad ehk 1 mm laiused. Võrdluseks on toiteahelaga mitteseotud rajad 0,25 mm laiused.

Paremas tiivas toimuvad kõik protsessid, mida on vaja sensorahelate *pin*'ide testimiseks ning ühenduseks personaalarvutiga. Mikrokontroller on seksiooni keskse asetusega ning kohal U1 – kontroller on ühendatud plaadiga sinna joodetud pistikupesaga. Nii on võimalik kontrollerit hiljem ümber programmeerida. Kontrolleri toimimiseks vajalik kvartsresonaator asub asendis Y1 ning selle all kaks 20 pF väärtusega kondensaatorit. LED tuli, selle toimimiseks vajalik takisti ning 100 nF väärtuses kondensaator toiteahela stabiliseerimiseks asuvad kohe kvartsresonaatori peal kohtadel LED1, R2 ja C1. Kohal U2 on pistikupesa jadapordi jaoks: üks ühendus on 5 V pinge, teine maandus ning kaks vastutavad andmesuhtluse eest arvutiga. Kohtadel R5-R12 (kohe sensorite *pin*'ide kohal) asuvad $R_1 = 3\text{ k}\Omega$ (4 tk) ja $R_2 = 0,698\text{ k}\Omega$ (4 tk) takistid pingejagurina. 24 V pinge on suunatud takistisse R_1 , millele järgnev rada jookseb mikrokontrollerisse. Teine R_1 juurest tulev rada läbib takistit R_2 ning on ühendatud maandusega. R_2 takistitega paralleelselt on ühendatud 5,1 V Zener-diood loogikal, mida on kujutatud joonisel 4.2. Need asuvad positsioonidel D1-D4. Selliseid pingejaguri ja Zener-dioodi ahelaid on skeemis neli tükki. Kohtadel K1-K4 on asetatud releed. Iga rele on ühendatud ühe mikrokontrolleri väljundiga relee juhtumiseks ning 24 V sisendiga, mis mikrokontrolleri signaali peale ühendatakse relee väljundiga. Relee juhtahelaga on rööbiti ühendatud diodid joonise 4.3 meetodil ning asuvad kohtadel D5-D8. Sarnaselt trükkplaadi vasakpoolsele seksioonile on siingi toiterajad (24 V või 5 V) laiemad, kui signaalühendused: 1 mm ja 0,25 mm.



Joonis 4.4 Autori trükkplaadi disain

5 TARKVARA OSA

Tarkvara sektsiooni ülesandeks on jõuda toimivate programmide valmimiseni, mis tagaksid varasemalt kirjeldatud testri riistvara korrektse töö. Peatükk kirjeldab, milliste probleemide lahendamiseks tarkvara tegelema peab, püstitades koodi kirjutamiseks lähteprintsipiibid. Seejärel süvenetakse andmevahetuse temaatikasse, kuna see on arvuti ja testri vahelises suhtluses fookuses. Osa lõppeb programmikoodi kirjeldavate algoritmidega ning nende seletustega, mis viisid lõpliku lahenduse valmimiseni.

5.1 Tarkvara vajalikud tegevused

Evoconverteri pooltoote testimine toimub automaatsel kujul kahe põhiseadmega: valminud testri ja personaalarvutiga. Sensorahelate testimiseks vajab autori joodetud trükkplaat mikrokontrollerit ja koodi, mis seda testimist juhiks. Personaalarvuti eesmärk on anda kasutajale tagasisidet mõõdetud tulemuste kohta ning koguda informatsiooni, millist ülesannet tester täitma hakkab. Nendele kahele põhiseadmele on struktuuris veel täiendavalt J-Link Segger programmeator ja jadapordi ühenduse testri ning arvuti vahel loov seade. Alamseadetele eraldi tarkvara programmeerida ei ole vaja ning need toimivad põhiseadmetest saadud käskude ja informatsiooni alusel.

Personaalarvuti on programmeerimise ja testimise ahelas peamiselt kasutajaliidese rollis: arvuti peab andma pärast igat protsessi kasutajale teada saavutatud tulemustest ning küsima järgnevate protsesside kohta, mida soovitakse läbi viia. Mõned protsessid algatab arvuti eelnevalt määratud positiivsete resultaate ilmnedes autonoomselt. Personaalarvuti tarkvara vajalikud tegevused on järgnevad:

- Protsesside ja kasutaja vahelise liidese loomine
- J-Link Seggeri arvutirakenduste asendamine. Programm peab suutma programmeatoriga ühenduda ning selle tegevust juhtida.
- Testitavalt pooltootelt saadud informatsiooni filtreerimine MAC-aadressi automaatseks leidmiseks
- Andmebaasiga ühendumine ning MAC-aadressi ja seerianumbri sinna lisamine. Vajadusel peab kontrollima andmelogeri olemasolu andmebaasis.
- Sensorahelate kontrolli läbiviimine ning vajaliku informatsiooni edastamine testri mikrokontrollerile

Testri mikrokontrolleri juures teostatav analoog-digitaalmuundamine asendab testimisahelas multimeetrit. Mikrokontroller viib läbi lihtsamaid mõõtmisoperatsioone ning osaleb andmevahetuses. Ülesannetest tulenevalt peab mikrokontrolleril jooksev tarkvara:

- Looma kontrollerile neli mõõtmispunkti ning väljundpunktid toote LED-ide põletamiseks ja andmevahetuseks
- Tuvastama mõõdetud pinge vastavuse 24 voldile või mitte ja andma selle kohta personaalarvutile informatsiooni
- Lülitama käskude peale LED indikaatorid põlema ja välja

Kogu süsteemi toimivuse huvides on tarkvaralistes küsimustes oluline järgida programmide ülesehitamisel loogilist järjestust, milles eksimused võivad juba algfaasis välistada õigete resultaatide saamise. Näiteks ei saa seadme MAC-aadressi lugeda enne, kui süsteem on programmeeritud, sest pooltoote mikrokontroller ei tööta. Programmaatoriga seotud tegevused on mõistlik teostada ühe plokina – nii saab enne järgnevate osade juurde asumist programmaatori sulgeda. LED-ide kontrolli ei saa aga läbi viia ilma pooltoodet juhtiva koodita, sest sensorite tagasisideahel ei toimi. Selliseid tähelepanekuid silmas pidades oleks protsesside järjekord programmides kirjeldatav nii:

1. Seadme programmeerimine
2. MAC-aadressi lugemine
3. Suhtlus andmebaasiga: MAC-aadressi otsimine/kirjutamine ja seerianumbri lisamine
4. Pingete mõõtmine
5. LED-ide kontroll

5.2 Andmevahetusprintsiibid

Kahe tarkvara eri seadmetes funktsioneerides kerkib olulise küsimusena üles andmevahetus ja kuidas seda informatsioonikadudeta läbi viia. Peatükis 4.1 sai tutvustatud suhtlusmeetodina jadapordi põhimõtet, kuid ilma võimaliku teostuslahenduseta. Käesoleva peatükk lahendab tekkinud puudujäägi. Täiendavalt sai personaalarvuti tarkvarale defineeritud omadus asendada programmaatoriga kaasnevaid rakendusi ja arendada suhtlust autori enda tarkvara kaudu. See teeb kasutajale testri kasutamise efektiivsemaks. Peatüki alguses keskendutakse viimase lahendamise võimalikkusele. Tutvustamisele kuulub ka andmevahetus Evoconi andmebaasiga, mida vajatakse MAC-aadressi ja seerianumbriga seotud protsessides.

5.2.1 PyLink teek J-Link Seggeriga suhtluseks

Pooltoote programmeerimiseks ja J-Link Segger seadmega ühildumiseks kasutas ettevõtte insener programmeerijaga kaasnenud RTT rakendusi (ingl k *Real Time Transfer*, reaalaaja ülekanne), mis võimaldasid toote ja arvuti vahel kiiret andmevahetust [53]. Näiteks MAC-aadressi lugemiseks kasutati rakendust J-Link RTT Client, mis avas programmiakna. Sisestades pooltootele omase tootekoodi ning käsud „seiska“ („*halt*“), „lähtesta“ („*reset*“) ja „käivita“ („*go*“), jooksis aknasse hulganisti informatsiooni toote kohta. Informatsiooni hulgas oli ka seadme MAC-aadress ja seda näiteks kujul MAC: fc:c2:3d:19:1a:ce. Eesmärk on kutsuda oma programmiga automaatselt esile J-Link Seggeriga ühildumine, pooltoote programmeerimine ja toote tagasiside ning sorteerida sealt välja MAC-aadress puhtal kujul (ilma kooloniteta).

Ülesandega saab hakkama Pythonile installitav teek PyLink, mis võimaldab avada J-Link Seggerit ning viia läbi andmevahetust nii, et kogu suhtlusinformatsioon jookseb läbi Pythoni programmi [54]. Seeläbi kõrvaldatakse probleemid, mis võiksid tekkida autori Pythoni programmi ja ametlike RTT programmide suhtlusest, sest viimased kasutust enam ei vaja. Käsud ühenduse loomiseks on lihtsad ning eeldavad vaid tootekoodi teadmist, mis on kõigil tellitud trükkplaatidel ühesugune (antud kontekstis *serial number*, aga tähendab tootekoodi; nt 123456789). Piisab programmis järgnevatest ridadest [54]:

```
1. import pylink #Laeb teegi
2. jlink = pylink.JLink() #Seob muutuja teegiga
3. jlink.open(serial_no=123456789) #Avab seadme ja loob ühenduse tootega
```

Teegis eksisteerivad ka RTT programmidele sarnased seiskamise ja lähtestamise käsud, nagu näiteks *jlink.halt()* ja *jlink.reset()*. Muidugi sisaldab PyLink teek veel hulganisti muid funktsioone, mida saab näha andmelehel [55].

5.2.2 Evoconi andmebaas

Evoconi andmebaas on ligipääsetav ainult ettevõtte võrgust ning sisaldab andmeid iga andmelogeri kohta, mis ettevõtte on tellinud, testinud ja müünud. Pärast programmeerimist lisatakse sinna uus andmelogeri rida, mis kõigele lisaks mahutab MAC-aadressi ja plaadile kleebitud seerianumbrit. Protsessi automatiseerimiseks peab autori programmilõik sisaldama pöördumisi andmebaasi poole, mis kas lisavad sinna informatsiooni või kontrollivad sellise MAC-aadressi olemasolu andmebaasis.

Andmebaasiga suhtluseks on Pythonis sobilik teek PyMySQL. Üks tähtsamaid käske selles teegis on `pymysql.connect()`, mis loob andmebaasiga ühenduse. Sulgudesse tuleb lisada info andmebaasi kohta, mille poole pöörduetakse. Käsuga `connection.cursor()` viiakse viide andmebaasis õigele reale ja reaga `connection.commit()` täidetakse muudatus. Andmete lugemiseks viida juurest saab kasutada näiteks käsku `cursor.fetchone()`. Nende peamiste funktsioonidega teegist saab sisuliselt täide viia kogu vajaliku suhtluse arvuti ning Evoconi andmebaasi vahel, mis on käesoleva töö jaoks piisav. [56]

5.2.3 USB-UART seade jadaühenduse jaoks

Jadaühenduse teostamiseks arvuti ja testri vahel on lihtne kasutada seadet, mis teisendab USB signaali UART (asünkroonne jadavärat, ingl k *universal asynchronous receiver/transmitter*) tüüpi signaaliks. Sellist seadet on kujutatud lisas 12. UART sisaldab endas ainult kahte signaaliliini, millest üks on mõeldud andmete edastuseks (Tx) ja teine andmete lugemiseks (Rx). Ühe seadme andmete edastusliin vastab teise seadme vastuvõtjale ning vastupidi. Kui andmeid liinil ei edastata, hoitakse pinget liinil kõrge väärtuse peal. Andmeedastuse alustamiseks tõmbab saatja pingeväärtuse alla üheks kellatsükliks, millele järgneb informatsioon kõrgete ja madalate nivoodega kuni 8 bitti. Infoedastuse lõppedes esineb paarsusbitt, mille kõrge väärtus 1 vihjab, et eelnev info pidi olema paaritu arv bitte ning 0 korral paarisarv. Signaaledastus lõpeb kõrge väärtuse hoidmisega vähemalt 2 biti ulatuses. [57]

UART liini toimimine on oluline mõistmaks, kuidas programmeerida seeläbi infoedastust. Tähtis on siinkohal ühe andmeedastustsükli võimekus 8 bitti ehk 1 bait: UTF-8 kodeerimissüsteem on suuteline muutama iga ASCII tähemärgi 8 bitiseks koodiplokiks [58]. See tähendab, et ühe tähe edastamiseks on vajalik 1-4 tsüklit UART signaali. Tihtipeale lihtsamate tähemärkide, nagu numbrid ja tähestikutähed, jaoks piisab ühest tsüklist, sest need asuvad ASCII tabeli alguses [59]. Programmeerimise mõistes tuleb iga tähemärk infoedastuseks teisendada UTF-8 formaati, kasutades selleks käsku `encode()` ning saadud info dekodeerimiseks sõna `decode()` [60]. Lihtsaim näide selliseks infoedastuseks, kasutades jadaühendust ning selle teeki `serial`, oleks järgnev [61]:

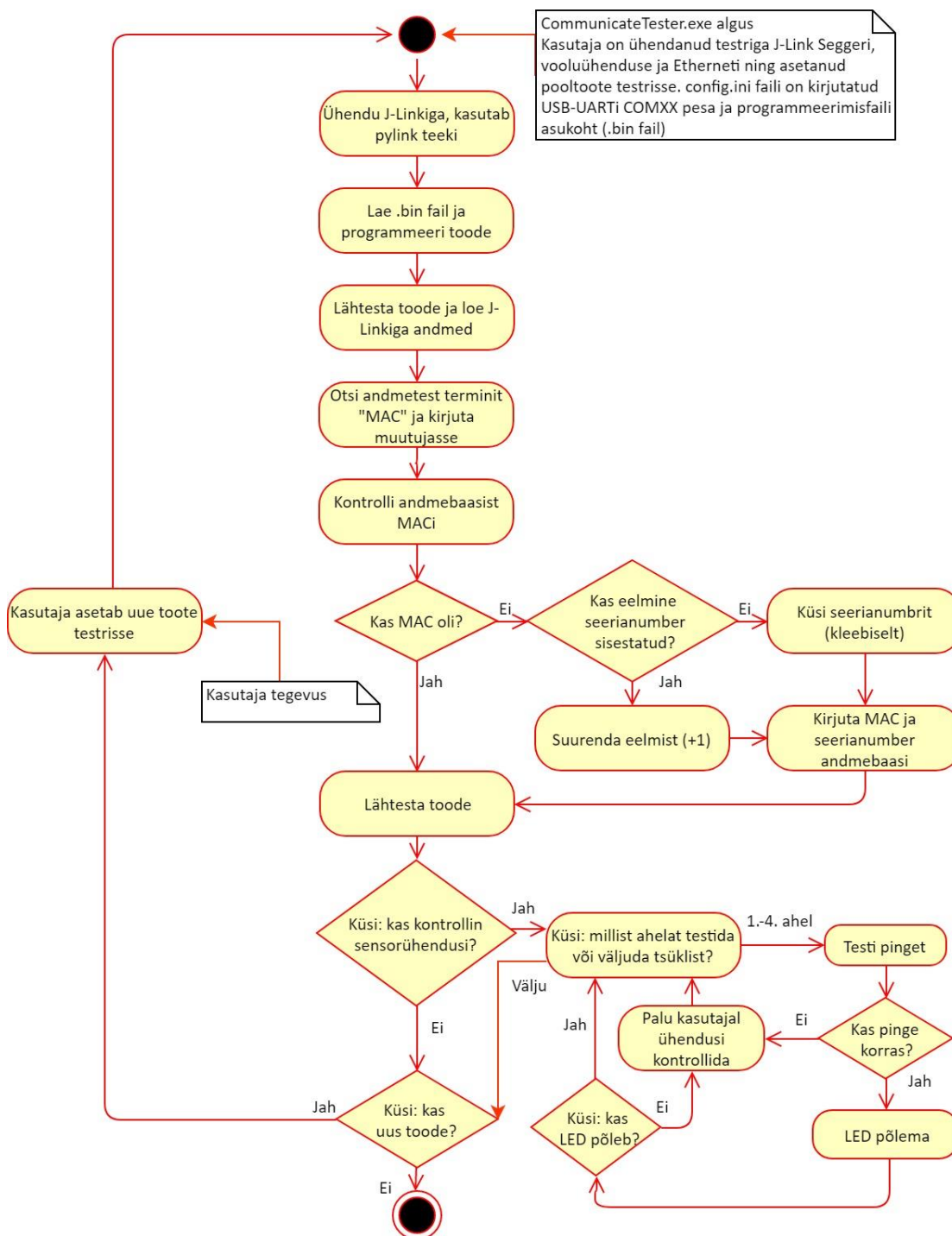
```
1. import serial #Loeb teegi
2. ser = serial.Serial(COMXX, 9600, timeout = 1) #Avab jadapordi
3. ser.write(text.encode()) #Kirjutab kodeeritud teksti MCU-le
4. ser.close() #Sulgeb jadaühenduse
```

Informatsiooni lugemishetke tabamiseks on Arduino IDE-s kasutusel näiteks `Serial.available()`, mis annab ühenduse olemasolul tõese väärtuse [62]. Kuna autor kasutab Atmega328P-PU kontrolleri programmeerimiseks Arduino IDE-d (C keel), siis sobib selline funktsioon rakendamiseks.

5.3 Koodide ülesehitus ja algoritmid

Peatükis 5.1 püstitatud nõuetel baseeruvalt koostatakse testri valmistamisel kaks algoritmi ning nendele vastavalt kaks programmikoodi: personaalarvuti kood Pythonis ning mikrokontrolleri kood C-s. Mõlemad koodid arendavad omavahelist suhtlust jadaühenduse kaudu.

5.3.1 Pythoni programmi algoritm



Joonis 5.1 Personaalarvuti Pythoni programmi algoritm

Joonisel 5.1 on näidatud kasutaja tehtud Pythoni programmi algoritm. Kogu programmi toimimine eeldab, et kasutaja on ühendanud testriga Etherneti ja voolukaabli ning loonud arvuti ja testri vahel ühenduse J-Link Seggeri ja USB-UART seadmega. Seejärel võib kasutaja asetada pooltoote testrisse ning fikseerida selle klambriga. Enne programmi käivitamist peaks testri kasutaja kirjutama programmiga kaasnevasse config.ini faili ühele reale COM numbri, millesse USB-UART seade on ühendatud, ning teisele reale programmeerimisfaili asukohta. Kui andmed pole korrektselt faili sisestatud, annab programm sellest kasutajale teada. Näide korrektselt sisestamisest võiks olla selline:

```
COM= COM12
```

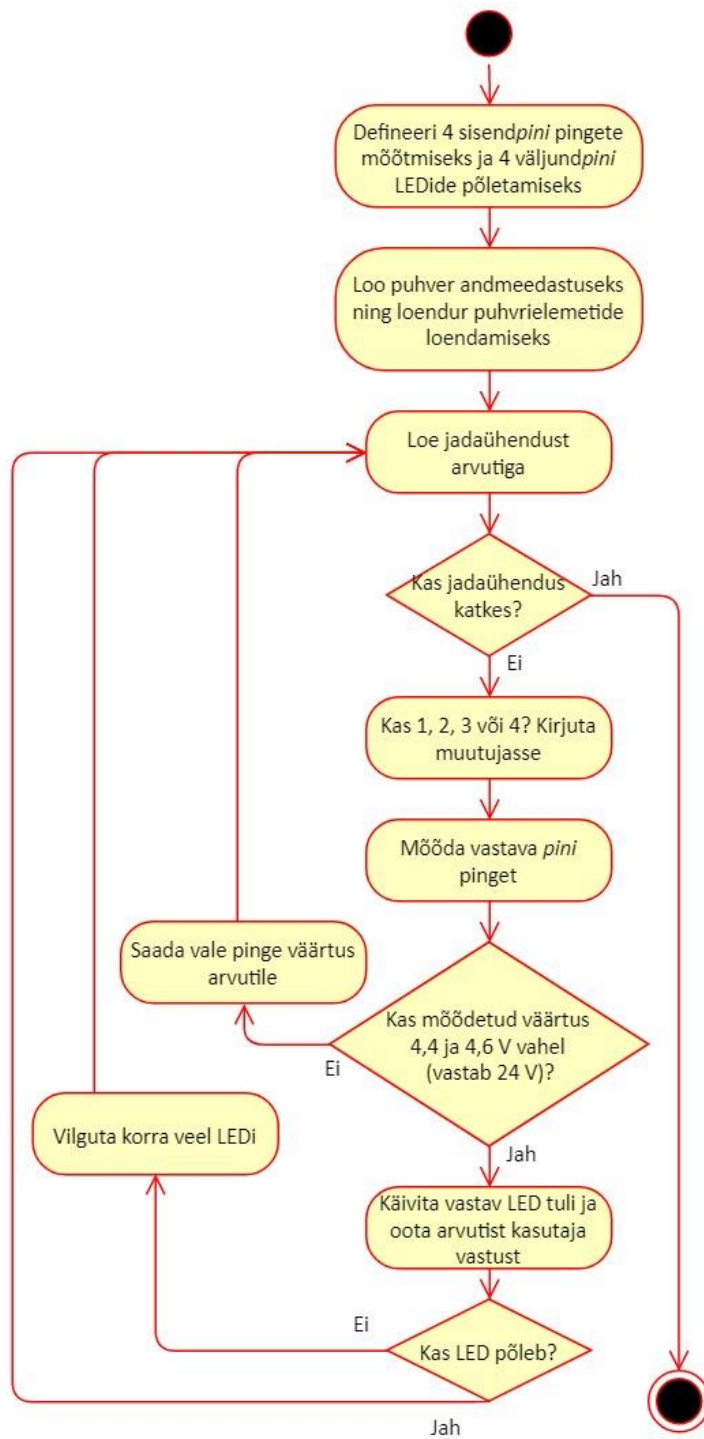
```
BIN= C:\Users\M\AppData\Local\Programs\Python\Python37-32\evocon_initial.bin
```

Programmi käivitamisel luuakse esimese asjana ühendus J-Link Seggeriga ning programmeeritakse pooltootele tarkvara, mis saadakse evocon_initial.bin failist. Seejärel loetakse PyLinki meetodeid kasutades pooltoote andmed, millest otsitakse terminit MAC. Meediumipöörduse juhtimise aadressi olemasolu päritakse andmebaasist. Kui sellist MAC-aadressi andmebaasis ei ole, kirjutatakse see sinna, lisades juurde tootele kleebitava seerianumbri. Programmi käivitamise esimesel tsükli küsitakse kleebisel olevat seerianumbrit kasutajalt. Pärast toimub seerianumbri suurendamine ühe võrra inkrementeerimise teel. MAC-aadressi tsüklist väljudes tehakse pooltootele *reset* ning sisenetakse sensorahelate kontrolli. Siin küsitakse kasutajalt, mitmenda ahela kontroll läbi viiakse. Vastavalt sisestatud parameetrile saadetakse informatsioon mikrokontrollerile, mis viib läbi mõõtmise. Kui pinge on korras, antakse sellest kasutajale teada ning süttib ahela LED. Tuli kustub testija märguande peale: kui LED põles, siis kustutatakse see, kui LED ei põlenud, proovitakse LEDi korra vilgutada. Seejärel algab kogu tsükkel uuesti, kuni kasutaja soovib sisestada uue pooltoote.

5.3.2 Mikrokontrolleri programmi algoritm

Atmega328P-PU mikrokontrolleri ülesandeks on juhtida sensorahelate pingete testimisi ja käivitada LED indikaatoreid. Käsk kogu testahela toimimiseks tuleb personaalarvuti Pythoni programmist jadaühendusena. Seega seisneb mikrokontrolleri töö pidevas valmisolekus ning enne käskude saamist tegevusi ei tehta. Kui jadaühenduse kaudu jõuab kontrollerini number 1-4, rakendatakse sensorahelale vastav kontrolleri *pin* mõõtmiseks. Kui pingejagurist saadud pinge jääb 4,4 ja 4,6 V vahele, loetakse ahel toimivaks ning käivitatakse LED tuli. Seda tehakse kontrolleri väljundi *pin*'i kõrgeks seadmisega. *Pin*'i signaal lülitab relee kaudu sensorahela 24 V väljundi ja 24 V sisendi kokku.

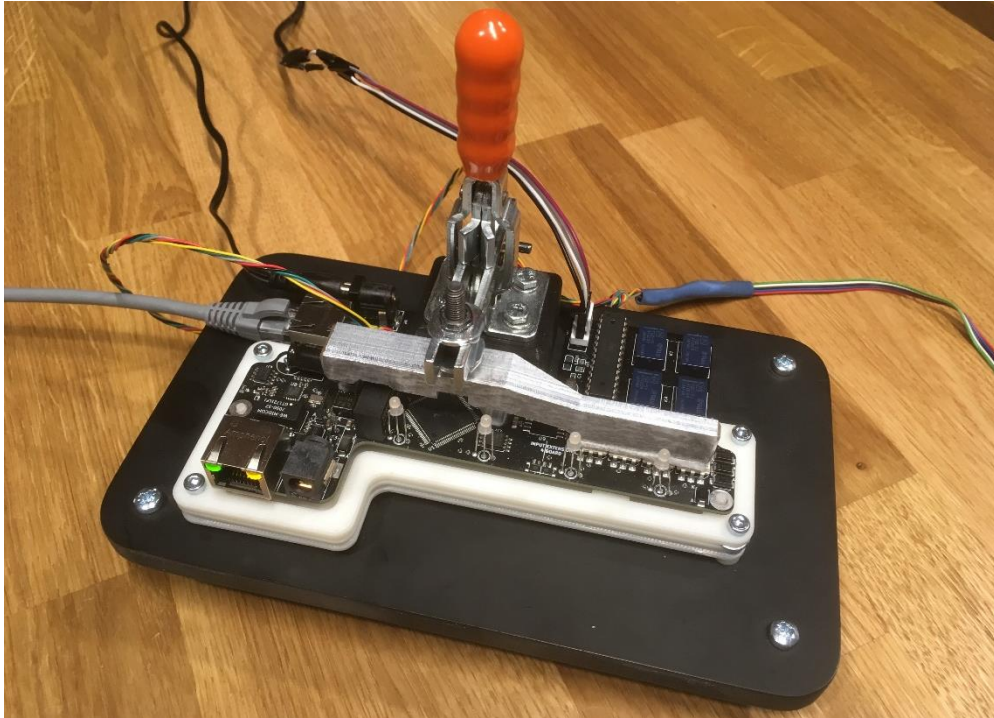
Seejärel ootab kood seni, kuni tuleb uus signaal jadaühendusest. Kui see on positiivne, kustutatakse LED indikaator ning ahel loetakse testituks. Negatiivse vastuse korral proovitakse LED-i mikrokontrolleri *pin*'iga veel korra vilgutada ning ahela testimine lõpetatakse. Mõlema variandi juures ootab kontrollor uut signaali järgneva testimiseks arvutilt. Kui jadaühendus katkestatakse, kontrollor enam tegevusi ei tee ning programm loetakse lõppenuks. Algoritmi mikrokontrolleri programmist on näha joonisel 5.2.



Joonis 5.2 Atmega328P-PU mikrokontrolleri programmi algoritm

6 LOODUD TESTER: KATSETAMINE JA JÄRELDUSED

Integreerides mehaanika, elektroonika ja tarkvara sektioonis valmistatud detailid ning programmid, valmis Evoconverteri programmeerimise ja testimise seade ehk tester. Tööprotsessis testrit on kujutatud joonisel 6.1.



Joonis 6.1 Töötav programmeerimise ja testimise seade

Fotol oleva testriga on ühendatud voolu- ja võrgukaabel ning J-Link Seggeri programmeerimise ja USB-UART seadmed. Testrisse sisestatud pooltoode on valmis programmeerimis- ja kontrollprotsessideks, millele viitavad toote RJ45 pesa kaks põlevat LED indikaatorit (kiirus 100 Mbit/s ja ühendus). Need indikaatorid põlevad ainult siis, kui pooltootega on ühendatud toide ning võrguühendus. Vajalike protseduuride lõppedes saab kasutaja toote lihtsalt eemaldada, vajutades oranži peaga kinnitusklambri, ja asendada testitava toote uuega. Nii algab uus tsükkel.

6.1 Testri toimivus

Programmeerimise ja testimise seadme toimivuse kontrolliks viis autor läbi proovitsükli testrisse kinnitatud pooltootega. Nõuetele sobivaks tulemuseks katsel on, kui tester programmeerib toote, kirjutab selle MAC-aadressi andmebaasi, küsib kasutajalt kleebisele märgitud tootenumbrit ja viib läbi pingete kontrolli. Protsessi resultaatina peaks Evoconi andmebaasi ilmuma toote kohta kirje.

Katseliselt selgus, et tester täidab nõutud funktsioone ning andmebaasi ilmus uus andmelogeri kirje. Pingete kontrollimisel registreeriti tootel 24 V vastav sisendväärtus ning LED indikaatorite kontroll läbiti kasutajaga suheldes probleemideta. Autor testis läbi ka situatsiooni, kus pinge sisendväärtus skeemile on 24 V erinev: nii 12 V juures kui 26 V juures andis tester sellekohase veateate ning informeeris kasutajat pingeväärtusest. Ekraanil kuvatud segmenti katkest 12 V sisendpingega on kujutatud **lisas 13**. Konkreetse katseseksioonis hoiti pooltoodet testris kuni teise sensorahela testimise lõpuni. Seejärel eemaldati toode ning pingestati testri *Pogo pin* toiteploki 12 V pingega.

6.2 Ohutusele vastavus

Valminud tester vastab peatükis 2.5 püstitatud ohutusnõuetele tule-, elektri ja mehaanilise ohutuse seisukohast. Poole tunni töötamise järgselt mõõdeti kõige kuumema detailina mikrokontrolleril 24°C, mis oli paar kraadi soojem toatemperatuurist. Standardist (peatükk 2.5) tulenev kuumuspiir käega katsutavatel plastikutel on 70°C ning metallidel 55°C – juhuslike kontaktpindade puhul on piirmäärad veel kõrgemad. Seega valminud tester ei kujuta termilist/tuleohtu.

Elektriturvalisuse tagamiseks kontrollis töö autor multimeetriga läbi kõik testri pingeahelad. Tulemused vastasid ootustele ning 5 V ahel ja 24 V ahel näitasid vastavaid väärtuseid. Peatükis 2.5 defineeritu alusel on alalisvoolu ohtlik pingeväärtus 70 V ning nii kõrgeid väärtuseid skeemist ei leitud. Täiendavalt on ohutuse tagamiseks maandatud võrguadapteri miinusklapp (maa), juhul, kui ühenduses elektrivõrguga rike peaks tekkima. Viimasel juhul rakendub elektrikilbis rikkevoolukaitse, mis katkestab ahela. Testrit varustav süsteem peab olema võrgus rikkevoolukaitse järel.

Seejuures tuleb aga arvestada, et kasutatav pinge on madal ning ohtu ei kujuta. Siiski on turvalisem toiteahela trükkplaadiväliseid punkte mitte puudutada. Viimasest tuleneb ka testri suur eelis: toide tuleb testriga ühendada ainult korra ning rohkem ahela katsumiseks vajadust pole. Puutevõimalust piiravad testri PVC plastikust alus ja kinnitusklambri isolaatorkate.

Mehaanilise turvalisuse tagamiseks on testril välditud teravaid nurki: aluse ja armatuuri nurgad on tehtud raadiusega. Alusplaadi pind on peene liivapaberiga töödeldud ning pinnakaredus vigastavaid osakesi ei eralda. Armatuur ja kinnitusklamber on aluse külge kinnitatud tugevate M3 ja M4 poltidega nii, et koost klambrit fikseerides ära ei lagune. Autori elektroonikakoost on kinnitatud armatuuri ja aluse külge.

6.3 Testri efektiivsus

Testri valmistamise üks peamisi eesmärke oli automatiseerimisega muuta Evoconi tootega läbiviidavaid protsesse efektiivsemaks. Parimaks võimalikuks meetodiks testri hindamisel on läbi viia katse ning võrrelda tulemusi manuaalse ja automaatse testimise vahel. Esimeses katse pooles viib ettevõtte tööline pooltoote programmeerimise ja testi läbi disainitud testriga. Teises katse etapis ühendab ta juhtmed iga tootega manuaalselt. Ta programmeerib toote J-Link Seggeri tarkvaraga ning kirjutab MAC-aadressi andmebaasi käsitsi. Seejärel mõõdab testija sensorahelate pingeid multimeetriga. Kogu testi teine pool kujutab varasemaid protsesse Evoconi pooltootega. Testide võrdlemiseks kasutatakse kümnele tootele automaatsel ja manuaalsel testprotsessil kulunud aega. Ajad võetakse andmebaasist, kuhu on märgitud MAC-aadressi andmebaasi ilmumise kirjed koos aja ja kuupäevaga. Uue kirje ilmumine tähistab intervalli täitumist. 14. mail sooritatud testi tulemused on toodud tabelis 6.1.

Tabel 6.1 Automaat- ja manuaaltestimise kirjete ajad Evoconi andmebaasis

Automaatne testprotsess testriga		Manuaalselt sooritatud protsess	
Sisestamise aeg	Intervall eelmisest kirjest	Sisestamise aeg	Intervall eelmisest kirjest
14-05-19 08:42		14-05-19 09:10	
14-05-19 08:45	00:03:07	14-05-19 09:16	00:06:28
14-05-19 08:48	00:03:34	14-05-19 09:22	00:06:09
14-05-19 08:54	00:05:49	14-05-19 09:30	00:07:41
14-05-19 08:56	00:02:02	14-05-19 09:35	00:05:02
14-05-19 08:59	00:02:53	14-05-19 09:44	00:09:02
14-05-19 09:01	00:01:57	14-05-19 09:52	00:07:56
14-05-19 09:03	00:02:11	14-05-19 10:01	00:08:34
14-05-19 09:06	00:02:31	14-05-19 10:12	00:11:32
14-05-19 09:07	00:01:28	14-05-19 10:19	00:06:55
14-05-19 09:10	00:02:37	14-05-19 10:27	00:07:35
Keskmine	00:02:49		00:07:41

Lihtsustatud katsest selgunud andmete põhjal saab väita, et automatiseerimise resultaadina kiirenesid tootega tehtavad protsessid rohkem kui 2 korda. Muidugi oleneb nii vähete katseandmete puhul resultaat üksikjuhtudest: esineb vigane toode ning protsess mõlemal juhul pidurdub. Kõigele vaatamata vihjab katse, et testri loomisega on tekkinud tendents efektiivsuse paranemiseks. Märkimata ei saa seejuures jätta mugavuse ja ohutuse kasvu ning võimalike inimvigade ja komponentide kulutamise vähenemist. Konkreetsete parameetrite väljatoomiseks mainitud sektorites on vaja pikemat katseplaani, sest näiteks elektroonsed vead ei ole tootmise lõppfaasis laotud trükkplaatide puhul sage nähtus.

KOKKUVÕTE

Evocon OÜ laotud trükkplaadi ehk pooltootega läbiviidavate protsesside parendamisele suunatud töö fookuses on toote programmeerimise ja testimise seadme ehk testri valmistamine. Projekteeritud ja valmistatud testri ning ühtlasi ka kogu lõputöö eesmärk keskendub manuaalsete protsesside maksimaalsele automatiseerimisele. Idee oli testtsüklist kaotada iga laotud trükkplaadiga juhtmete ühendamine, eraldiseisva mitme programmeerimis- ja andmebaasitarkvara samaaegne kasutamine ning multimeeterseadme ekspluateerimine. Sellisel viisil efektiivistati tootega Evoconi kontoris läbiviidavaid protsesse.

Püstitatud eesmärgist tulenevalt jagunes testri valmistamine kolmeks sektsiooniks: mehaanika, elektroonika ja programmeerimise osa. Lõplik koost oli nende kolme alamvaldkonna integratsioon. Mehaanika osas defineeriti probleemi lahendamiseks valitud meetodi olemus: programmeerimiseks ja testimiseks luuakse tootega kiirkontakt vedruühendusklemme ehk *Pogo pin*'e kasutades. Vedruühendusklenn on silindrit meenutav ühendusdetail, mis sisaldab endas vedru. Kontakt saadakse *Pogo pin*'e laotud trükkplaadi joodiste vastu surudes. Mehaanika ülesandeks on selline ühendus tagada armatuuri ja klambriga. Projekteeritud kolmekihiline ABS plastikust armatuur hoiab *Pogo pin*'e püsti ning suunab need õigete jootepunktide vastu. Armatuuri ülemine kiht fikseerib testrisse asetatud toote horisontaalsuunalise liikumise. Klamberkinniti avaldab testitavale tootele pealmist survet vedruühendusklennide vastu ning tagab vertikaalsuunalise fikseerimise. Laotud trükkplaadi fikseerimisel tekkivate kahjustuste vältimiseks viidi mehaanikasektsioonis läbi tugevusanalüüs valitud toetuspunktide ning *Pogo pin*'ide poolt avaldavate survetega. Kinnitusklambri olulisimaks detailiks on autori disainitud ja valmistatud freesdetail, mis vajutab tootel ohutusse punktidesse. Mehaanikasektsiooni võttis kokku testri komponente ühendav alus, mis on ohutuse tagamiseks isolator.

Elektroonika osa keskendus autori trükkplaadi disainile ning elektroonikakomponentide valikule. Sektsiooni lahendada olid järgnevad ülesanded: testriga ühendatud voolu-, võrgukaabli ning programmaatori ühenduse vahendamine testri ja testrisse asetatud pooltoote vahel ning sensorahelate pingete ja LED-ide kontroll. Ühenduse vahendamiseks piisab *Pogo pin*'ide ja autori trükkplaadile joodetud pistikupesade vahelise kontakti loomisest. Pingete testimine ja LED-ide lülitamine nõuab aga autori elektroonikakoostus keerulisema elektriahela disaini, mis sisaldaks protsessi läbiviivat juhtaju ehk mikrokontrollerit. Lahendatavaid probleeme ning elektriskeemide valmistamise põhimõtteid ja arvutusi arvesse võttes disainiti selles sektsioonis testrisse sobituv

autori trükkplaat. Disainiskeemidel tuginevalt telliti plaat Hiinast ning töö autor jootis plaadile toimimiseks vajalikud komponendid: pistikupesad, mikrokontrolleri, kvartsresonaatori, releed, takistid, dioodid jne.

Viimases programmeerimise seksioonis olid märksõnadeks operatsioonide juhtimine ning andmevahetus. Valmistatud tester peab olema kasutajale juhitud personaalarvuti kaudu. Personaalarvutis töötav rakendus programmeerib testrisse asetatud toodet programmeerimisseadet kasutades, loeb tootelt MAC-aadressi ehk meediumipöörduse juhtimise aadressi ning kirjutab selle automaatselt ettevõtte andmebaasi. Täiendavalt on sama rakendus testri ja inimese vahelise suhtluse vahendajaks pingete ja LED-ide kontrollprotsessis. Sellise mitme ülesande lahendamisele suunitletud programmi kirjutab autor programmeerimiskeeles Python. Sektsiooni käigus valmis veel teinegi lühem programm, mis laeti testri elektroonikaplaadi Atmega328P-PU mikrokontrollerile. Rakendus juhib kontrollerit pingete mõõtmisel, LED indikaatorite süütamisel ning arvutiga informatsiooni vahendamisel jadaport ühenduse kaudu.

Mehaanika, elektroonika ja programmeerimise osa lõpptulemuste ühendamisel saadud Evoconverteri programmeerimise ja testimise seade vastab töös püsitatud automatiseerimise ja efektiivsuse kasvu eesmärgile. Katseliselt tehti kindlaks, et ühele Evoconi tootele kuluvate protsesside aeg ettevõtte kontoris vähenes rohkem kui 2 korda. Täiendavalt kasvas protsessi mugavus ja vähenes kompleksus. Protsessi lihtsustumine vähendab testimiseks vajaliku väljaõppe pikkust ja testija kvalifikatsiooni ning aitab läbiviidavatele protsessidele rohkem keskenduda. Nii väheneb inimvigade tekke oht, sest jälgitavaid protsesse on automatiseerimise tõttu vähem.

Jätkuprojektina näeb töö autor testri automatiseerimise ulatuse suurendamist. Praegu annab testija plaadil juhitud LED indikaatori toimivusest tagasiside personaalarvuti rakendusele läbi visuaalse kontrolli. Valgustundliku elemendi lisamine testrisse, mis tuvastab LED indikaatori süttimise, viiks seadme automatiseerimise veelgi kõrgemale tasemele.

SUMMARY

The thesis company Evocon OÜ is an enterprise which mainly focuses on sensor-driven monitoring and the improvement of equipment efficiency in manufacturing processes. In order to achieve remarkably good results in the field of efficiency, Evocon has designed a product named Evoconverter – a datalogger which receives data from sensors on a production line and sends it to the cloud. The key problem for Evocon has lied in manually testing and programming of datalogger PCBs: measuring voltages with a multimeter, using multiple separate devices and interfaces for programming the board and reading its MAC address, and using a significant amount of time to connect each PCB with a PC. The purpose of this research is to design a quick-release programming and testing jig for Evoconverters which could solve the problems of Evocon.

The thesis is divided into six main sections: theoretical-practical approach to the problem, the basics of designing a jig, the development of mechanics, electronics and PCB design, software engineering and analysis of the problem solution. The first two parts mainly focused on the problem description and market analysis of quick release testbenches, while giving theoretical basis for further development.

In the mechanics section, author defined the ideal method for jig design: **in-circuit testing** was implemented as it uses a simple way of establishing quick connection with PCBs. The idea is to press conducting spring probes against the measuring points of the board. As mechanical force is needed, the author designed a suitable fixture for Evoconverter PCB which locks the horizontal and vertical movement of the board during the testing cycle. For the horizontal fix, special armature was 3D printed which acts as an interface between the tester and the device under test (DUT), routing probes to the relevant points on the board. Vertical fix was established with the combination of clamp and milled pressing device. The device presses on the analytically safest points on the board to prevent PCB from dangerous bending and damaging. The armature and clamp were attached to isolating surface for safety reasons.

The electronics section of the thesis focused on the author's tester PCB and the selection of electrical components. The key problems were how to establish power, Ethernet and programming connection between the tester and Evoconverter PCB as the cables were straightly plugged to tester but not the DUT anymore. Strategically placed sockets and tracks on tester PCB were the solution in this case. Additionally, the tester is responsible for testing the voltage of Evoconverter

PCB's sensor circuit and blinking the LEDs for visual check. These tasks needed the implementation of MCU as a central controlling device for author's board. The circuit was complemented with relays for LED switching, voltage divider for voltage checks and all the necessary components for MCU's proper working condition (crystal, diodes, capacitors etc).

The fifth programming section solved the communication problems between the tester, PC and the database. The author-made Python program running on PC programs the DUT with J-Link debug probe, writes the MAC address automatically to the database and acts as a user interface in the voltage and LED check cycle. The other program was written in C and loaded to the Atmega328P-PU MCU used in the tester PCB. As a result, the MCU is ready to test voltages, set pins high for relay switch and send test results via serial connection to the PC.

As an outcome, the integration between mechanics, electronics and programming resulted in fully functioning jig which improves the testing efficiency of Evoconverter PCBs more than 2 times. A practical test was carried out in the last analytical section. With jig, the engineer is required to connect each Evoconverter PCB once with the tester and all the separate device connections for testing, programming and reading MAC address are omitted from the test cycle. This results in possible reduction of human errors, e.g. manual voltage inspection with multimeter is replaced with the automated version run by the PC. Only one integrated computer software is needed for all the essential operations with the DUT eliminating the confusion caused by various programs.

For the follow-up project, automated extra functions could be added to the tester. For instance, with the current LED check, the user gives visually identified feedback to the main testing program. This could be avoided with the implementation of photovoltaic elements making the check independent of human reaction.

KASUTATUD KIRJANDUSE LOETELU

1. Industry 4.0 – Bring on the Future. – *Estonian Clusters*. 2015.
<https://www.estonianclusters.ee/industry-4-0-bring-on-the-future/> (05.04.19)
2. Printed boards – Part 1: Generic specification. Eesti standard EVS-EN 62326-1:2003.
3. How to Ensure the Quality of PCB? – *Pcbcart*.
<https://www.pcbcart.com/article/content/ensure-PCB-quality.html> (22.04.19)
4. Inspection and testing methods for PCBs: An overview. – *Caltronics*.
<https://caltronicsdesign.com/wp-content/uploads/2016/11/Inspection-and-testing-methods-for-PCBs-an-overview.pdf> (06.04.19)
5. ICT, In Circuit Test Tutorial. - *Electronis notes*. <https://www.electronics-notes.com/articles/test-methods/automatic-automated-test-ate/ict-in-circuit-test-what-is-primer.php> (08.04.19)
6. Testing PCB Components. – *Thomas*. <https://www.thomasnet.com/articles/automation-electronics/testing-pcb-components> (22.04.19)
7. Kvaliteedijuhtimissüsteemid. Nõuded. Eesti standard EVS-EN ISO 9001:2015.
8. Spring Loaded Contacts. – *Harwin*. <https://www.harwin.com/connectors-hardware/spring-loaded-contacts/> (08.04.19)
9. Wilson, P. The Circuit Designer's Companion. 3rd ed. Oxford: Elsevier, 2012. 377. [Online]
http://mouser.eetrend.com/files/2017-08/%E8%AE%A8%E8%AE%BA%E7%89%88%E4%B8%BB%E9%A2%98/100007469-24204-ying_wen_.pdf (08.04.19)
10. Media Access Control Address. -*Technopedia*.
<https://www.techopedia.com/definition/5301/media-access-control-address-mac-address> (22. 04.19)
11. Application Note on Transformers. – *Mini-Circuits*.
<https://ww2.minicircuits.com/app/AN20-002.pdf> (16.04.19)
12. NCS1 Series. – *muRata Ps*. https://power.murata.com/pub/data/power/ncl/kdc_ncs1.pdf (16.04.19)
13. MK64FN1M0VLL12. – *Octopart*. <https://octopart.com/mk64fn1m0vll12-nxp+semiconductors-70300948> (16.04.19)
14. What 54sa n Optoisolator? – *Sunpower*. <https://www.sunpower-uk.com/glossary/what-is-an-optoisolator/> (16.04.19)

15. RJHSE – 53. – *Mouser Electronics*. <https://www.mouser.ee/ProductDetail/523-RJHSE-5384?R=RJHSE-5384virtualkey52350000virtualkey523-RJHSE-5384> (27.04.19)
16. RAPC722X. – *Switchcraft*.
http://www.farnell.com/datasheets/1643330.pdf?_ga=2.81390231.1829175210.1556812410-1835940353.1536914632&_gac=1.127350527.1555078549.Cj0KCQjw7sDIBRC9ARIsAD-pDFp5WHnBc2Whfrp62cSw5wJEZZNxfk-F3sAy9loOngtubZW3GHJhX-gaAjmPEALw_wcB
(02.05.19)
17. Header connector. – *Molex*.
http://www.farnell.com/datasheets/2793899.pdf?_ga=2.45345700.1829175210.1556812410-1835940353.1536914632&_gac=1.251131380.1555078549.Cj0KCQjw7sDIBRC9ARIsAD-pDFp5WHnBc2Whfrp62cSw5wJEZZNxfk-F3sAy9loOngtubZW3GHJhX-gaAjmPEALw_wcB
(02.05.19)
18. M50-3530542. – *Mouser Electronics*. <https://www.mouser.ee/ProductDetail/Harwin/M50-3530542?qs=%2Fha2pyFaduJlxj%2FJw386eqv%252BNuk5xgOld7iky%2F5%252B0gpgtNFGFzp%252B0g%3D%3D> (02.05.19)
19. Ohutusnõuded elektrilistele mõõtmis-, juhtimis- ja laboratooriumiseadmetele. Osa 1: Üldnõuded. Eesti standard EVS-NE 61010-1:2010.
20. Flame retardants in printed circuit boards. – *EPA*. 2014.
https://www.epa.gov/sites/production/files/2015-01/documents/pcb_updated_draft_report.pdf (16.04.19)
21. Elektriohutus madalpingevõrkudes vahelduvpingega kuni 1000 V ja alalispingega kuni 1500 V. Kaitsesüsteemide katsetamis-, mõõte- ja seireseadmed. Osa 15: IT-süsteemide isolatsiooniseireseadmete ja IT-süsteemide isolatsioonirikke tuvastamise seadmete funktsionaalse ohutuse nõuded. Eesti standard EVS-NE 61557-15: 2014.
22. Elektriohutus madalpingevõrkudes vahelduvpingega kuni 1000 V ja alalispingega kuni 1500 V. Kaitsesüsteemide katsetus-, mõõte ja seireseadmed. Osa 1: Üldnõuded. Eesti standard EVS-NE 61557-1: 2007.
23. Typical Properties Data Sheet of FR4. – *Cylex*.
<http://www.cylexplastics.co.uk/images/pdf/Cylex%20FR4%20Epoxy%20Fiber%20Glass%20Laminated%20Sheet%20Properties%20Data%20Sheet.pdf> (03.05.19)
24. Ühtne tööstusstandard. Nõuded joodetud elektri- ja elektroonikakoostudele. Eesti standard IPC J-STD-001G EE: 2017
25. Jõumoment. – *Füüsika leksikon*. <https://xn--fsikaleksikon-woba.ee/artikkel/joumoment-ja-impulsimoment/joumoment/> (02.05.19)

26. Nikkel, S. How to wire Ethernet Cables. – *Ertyu*. 2019.
https://www.ertyu.org/steven_nikkel/ethernetcables.html (02.05.19)
27. P50-H-120-G – Contact, Connector, Plunger, Spring Probe. – *Farnell*.
<https://ee.farnell.com/multicomp/p50-h-120-g/plunger-serrated/dp/1568261?st=plunger%20contact%20connector> (02.05.19)
28. P50-E-120-G – Contact, Connector, Plunger, Large Point, Spring Probe. – *Farnell*.
<https://ee.farnell.com/multicomp/p50-e-120-g/plunger-large-point/dp/1568259?st=contact%20connector%20plunger> (02.05.19)
29. V100/2B – Toggle Clamp. – *Farnell*. <https://ee.farnell.com/brauer/v100-2b/toggle-clamp-vertical/dp/1378202> (03.05.19)
30. Vilipuu, M. Koolifüüsika: mehaanika2 (kaugõppele).
https://www.ttu.ee/public/m/Marek_Vilipuu/FI_doks/taiendusope/3_DYNAAMIKA.pdf
(03.05.19)
31. H11L1SM. – *Mouser*. <https://www.mouser.ee/ProductDetail/H11L1SM?R=H11L1SM>
(03.05.19)
32. IPC-TM-650 Test Methods Manual. Number 2.4.22. [Online]
<https://www.ipc.org/TM/2.4.22c.pdf> (03.05.19)
33. Serial Port. – *Techopedia*. <https://www.techopedia.com/definition/3665/serial-port>
(04.05.19)
34. 2206SA-05-46 – Board-To-Board Connector. – *Farnell*.
<https://ee.farnell.com/multicomp/2206sa-05-46/socket-pcb-1-row-vert-5way/dp/1577766?st=1.27%20mm%205%20contacts> (12.05.19)
35. Atmega328P-PU. – *Mouser*. <https://www.mouser.ee/ProductDetail/Microchip-Technology-Atmel/ATMEGA328P-PU?qs=K8BHR703ZXguOQv3sKbWcg==> (04.05.19)
36. FOXSLF/160-20 – Crystal, 16 MHz. – *Farnell*. <https://ee.farnell.com/fox-electronics/foxslf-160-20/crystal-16-0mhz-20pf-thd/dp/2063950?st=fox%2016%20MHz%20oscillator>
(04.05.19)
37. Arduino Uno SMD. – *Arduino*. <https://www.arduino.cc/en/uploads/Main/arduino-uno-smd-schematic.pdf> (04.05.19)
38. Hareendran, T.K. Build Your Own Arduino & Bootloader an Atmega Microcontroller – part 1. – *Electroschematics*. <https://www.electroschematics.com/10955/build-arduino-bootload-atmega-microcontroller-part-1/> (04.05.19)
39. Simply Electronics. Voltage Dividers – *Electronics Basics* 12. 2016.
https://www.youtube.com/watch?v=fmSC0NoaG_I (04.05.19)

40. The Zener Diode. – *Electronics Tutorials*. https://www.electronicstutorials.ws/diode/diode_7.html (12.05.19)
41. TQ Relays. – *Panasonic*. https://www.panasonic-electric-works.com/pew/eu/downloads/ds_61020_en_tq.pdf (04.05.19)
42. Why Is there a Diode Connected in Parallel to a Relay Coil? – *Electronicsarea*. <https://electronicsarea.com/why-is-there-a-diode-connected-in-parallel-to-a-relay-coil/> (13.05.19)
43. 08055A200JAT2A – SMD Multilayer Ceramic Capacitor.- *Farnell*. <https://ee.farnell.com/avx/08055a200jat2a/cap-20pf-50v-5-c0g-np0-0805/dp/2332762?st=20%20pf%200805> (12.05.19)
44. 08051C104JAT2A – SMD Multilayer Ceramic Capacitor. – *Farnell*. <https://ee.farnell.com/avx/08051c104jat2a/cap-0-1-f-100v-5-x7r-0805/dp/2332715?st=100%20nf%200805> (12.05.19)
45. KP-3216SGC – LED, Low Power, Green, SMD. – *Farnell*. <https://ee.farnell.com/kingbright/kp-3216sgc/led-1-6mm-x-2mm-green-15mcd-568nm/dp/8530033?st=led%201206> (13.05.19)
46. CRCW1206150RFKEA – SMD Chip Resistor. – *Farnell*. <https://ee.farnell.com/vishay/crcw1206150rfkea/res-150r-1-0-25w-1206-thick-film/dp/1469656?st=resistor%201206%20150%20ohm> (13.05.19)
47. RR1220P-302-B-T5 – SMD Chip Resistor. – *Farnell*. <https://ee.farnell.com/susumu/rr1220p-302-b-t5/res-3k-0-1-0-1w-0805-thin-film/dp/1653304RL?st=smd%20resistor%20302> (04.05.19)
48. WF08U6980BTL – SMD Chip Resistor. – *Farnell*. <https://ee.farnell.com/walsin/wf08u6980btl/res-698r-0-1-0-1w-0805-thin-film/dp/2670313?st=smd%20resistor%20700%20ohm%200805> (04.05.19)
49. MMSZ4689-E3-08 – DIODE, ZENER, 5.1V, 0.5W, SOD-123-2. – *Farnell*. <https://ee.farnell.com/vishay/mmsz4689-e3-08/diode-zener-5-1v-0-5w-sod-123/dp/2393843?st=zener%20diode%205.1%20V> (12.05.19)
50. MBR0520L – Schottky Rectifier. – *Farnell*. <https://ee.farnell.com/on-semiconductor/mbr0520l/diode-schottky-0-5a-20v-smd/dp/1467521?st=MBR0520> (13.05.19)
51. PCB Layout Tips and Tricks. Use a Ground Plane Whenever Possible. – *All About Circuits*. <https://www.allaboutcircuits.com/technical-articles/pcb-layout-tips-and-tricks-use-a-ground-plane-whenever-possible/> (13.05.19)

52. An Easier and Powerful Online PCB Design Tool. – *EasyEDA*. <https://easyeda.com/> (04.05.19)
53. Real Time Transfer. – *Segger*. <https://www.segger.com/products/debug-probes/j-link/technology/about-real-time-transfer/> (11.05.19)
54. PyLink: Control your J-Link with Python. – *PyLink*. <https://pylink.readthedocs.io/en/latest/> (11.05.19)
55. Pylink. – *Pylink*. <https://pylink.readthedocs.io/en/latest/pylink.html> (11.05.19)
56. Examples. – *PyMySQL*. <https://pymysql.readthedocs.io/en/latest/user/examples.html> (11.05.19)
57. Basic of UART Communication. – *Circuit Basics*. <http://www.circuitbasics.com/basics-uart-communication/> (11.05.19)
58. UTF-8 Encoding. – *FileFormat.Info*. <https://www.fileformat.info/info/unicode/utf8.htm> (11.05.19)
59. ASCII Table and Description. – *AsciiTable*. <http://www.asciitable.com/> (11.05.19)
60. Python String Encode. – *Python by Programiz*. <https://www.programiz.com/python-programming/methods/string/encode> (11.05.19)
61. Opening serial ports. – *PySerial*. <https://pyserial.readthedocs.io/en/latest/shortintro.html> (11.05.19)
62. Available(). – *Arduino*. <https://www.arduino.cc/en/serial/available> (11.05.19)
63. Automated Optical Inspection. – *Cyberoptics*. https://cyberoptics.com/eai_products_categories/automated-optical-inspection/ (16.05.19)
64. ILX-1000. – *I-Bit*. <http://www.i-bit.co.jp/en/products.html> (16.05.19)
65. Automated Functional Test. – *M.I.S. Electronics Inc*. <https://www.miselectronics.com/PCB-Functional-Testing.html> (16.05.19)
66. J-Link Debug Probes. – *Segger*. <https://www.segger.com/products/debug-probes/j-link/> (16.04.19)
67. Micro SATA Cables USB to Serial TTL CP2102... – *Amazon*. <https://www.amazon.in/Micro-SATA-Cables-Machine-Upgrade/dp/B006JKNWLE> (18.05.19)

LISAD

Lisa 1 Riskijuhtimisteguri määr prooviseeria kohta

Riskijuhtimisteguri määr prooviseeria kohta [4] on esitatud tabelis L1.1.

Tabel L1.1 Riskijuhtimisteguri määr prooviseeria kohta [4]

Proovi suurus	Riskijuhtimistegur									
	6,5	4	2,5	1,5	1	0,65	0,40	0,25	0,15	0,10
1-8	2	3	5	-	-	-	-	-	-	-
9-15	2	3	5	8	13					
16-25	3	5	5	8	13	20				
26-50	5	7	7	8	13	20	32			
51-90	6	7	11	12	13	20	32	50		
91-150	7	9	11	12	13	20	32	50	80	
151-280	8	11	13	19	20	29	32	50	80	125
281-500	10	12	17	21	29	47	48	50	80	125
501-1200	12	15	19	27	34	47	73	75	80	125
1201-3200	14	17	24	31	42	53	73	116	120	125
3201-10000	16	23	29	38	50	68	86	116	189	192
>10000	16	29	35	46	60	77	108	135	189	294

Lisa 2 Tihedamini esinevad laotud trükkplaatide vead

Trükkplaatide vead nende esinemissageduse järgi reastatult on esitatud tabelis L2.1.

Tabel L2.1 Elektroonikakoostudes sagedamini esinevad vead [5]

Defekt	Esinemisprotsent (%)	Tüüp	Joodisega seotud?
Avatud ühendus	25	Struktuurne	Jah
Puudulik toide	18	Struktuurne	Jah
Lühis	13	Struktuurne	Jah
Puudub elektrikomponent	12	Struktuurne	Ei
Vigane elektrikomponendi paigutus	8	Struktuurne	Jah
Katkine elektrikomponent	8	Elektriline	Ei
Vale elektrikomponent	5	Elektriline	Ei
Liigne joodis	3	Struktuurne	Jah
Puudub mitteelektriline komponent	2	Struktuurne	Jah
Komponendi vale orientatsioon	2	Elektriline	Ei
Vigane mitteelektriline komponent	2	Struktuurne	Ei

Lisa 3 Automaatne optiline inspeksioon

Automaatse optilise inspeksiooni seadet on kujutatud joonisel L3.1.



Joonis L3.1 Automaatse optilise inspeksiooni seade [63]

Lisa 4 Röntgeninspeksioon

Röntgeninspeksiooni seade sarnaneb väliselt automaatse optilise inspeksiooni seadmele, kuid tavapärase kaamerate asemel on kasutusel röntgenpilt [4]. Sellist seadet on kujutatud joonisel L4.1.



Joonis L4.1 Röntgeninspeksiooni seade [64]

Lisa 5 Funktsionaaltestimine

Funktsionaaltestimine tähendab elektroonikakoostu lõpliku töötamissituatsiooni läbikatsetamist. Seega ühendatakse elektroonikakoostuga eelkõige seadme toimimiseks vajalikud pistikühendused, nagu hilisemalt teeb ka lõpptoote kasutaja. [4] Näidet funktsionaaltestimises olevast elektroonikakoostust ja selle ühendamisest on kujutatud joonisel L5.1.



Joonis L5.1 Funktsionaaltestimises elektroonikakoost [65]

Lisa 6 J-Link Segger programmeerimisseade

Pooltoote programmeerimiseks kasutab insener J-Link Segger programmeerimisseadet [66]. Seadet tervikuna on näha joonisel L6.1 ja pistikut joonisel L6.2.



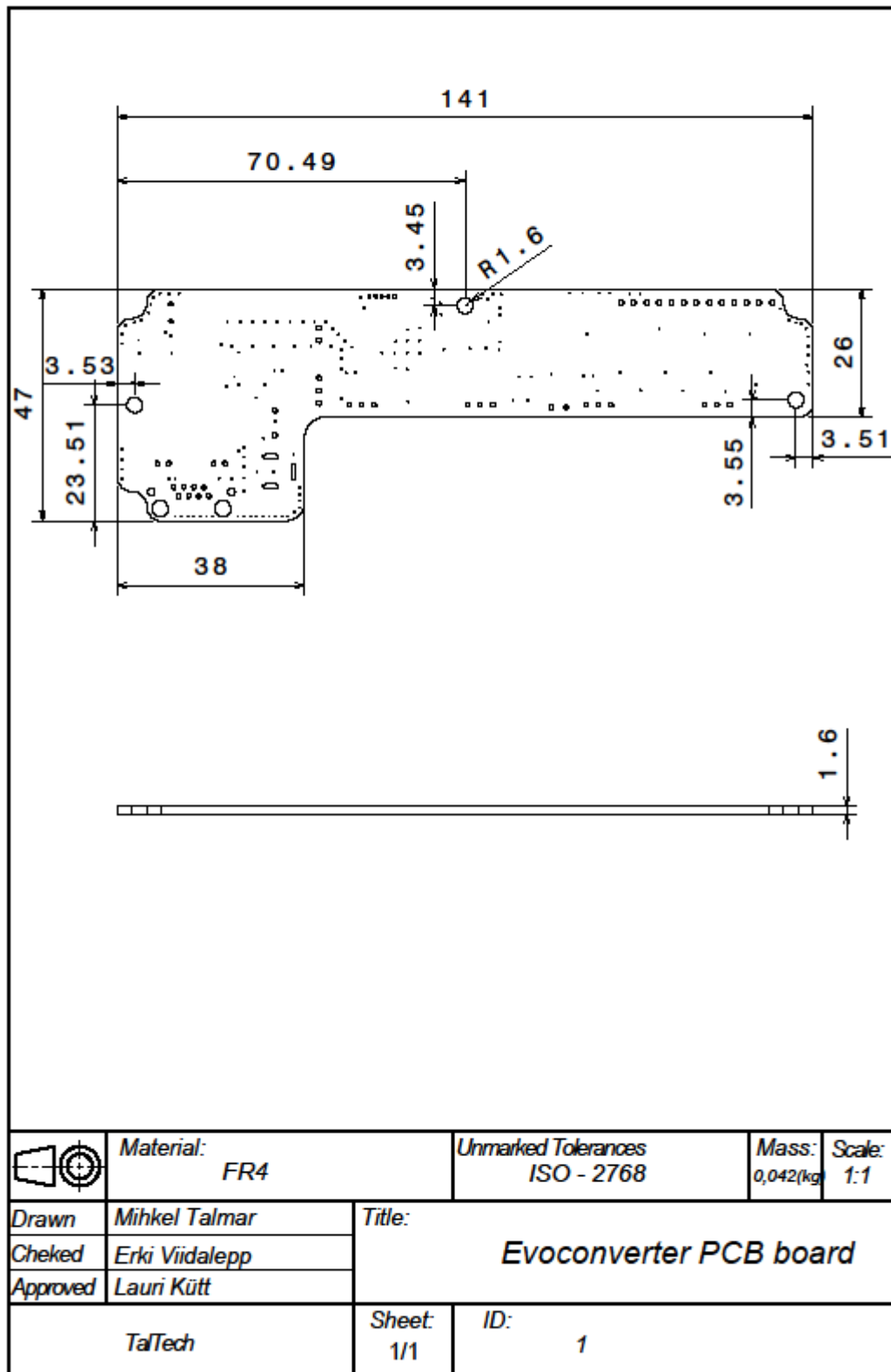
Joonis L6.1 J-Link Segger programmeerimisseade



Joonis L6.2 Programmeerimisseade pistik

Lisa 7 Evoconverteri trükkplaat ilma joodetud komponentideta

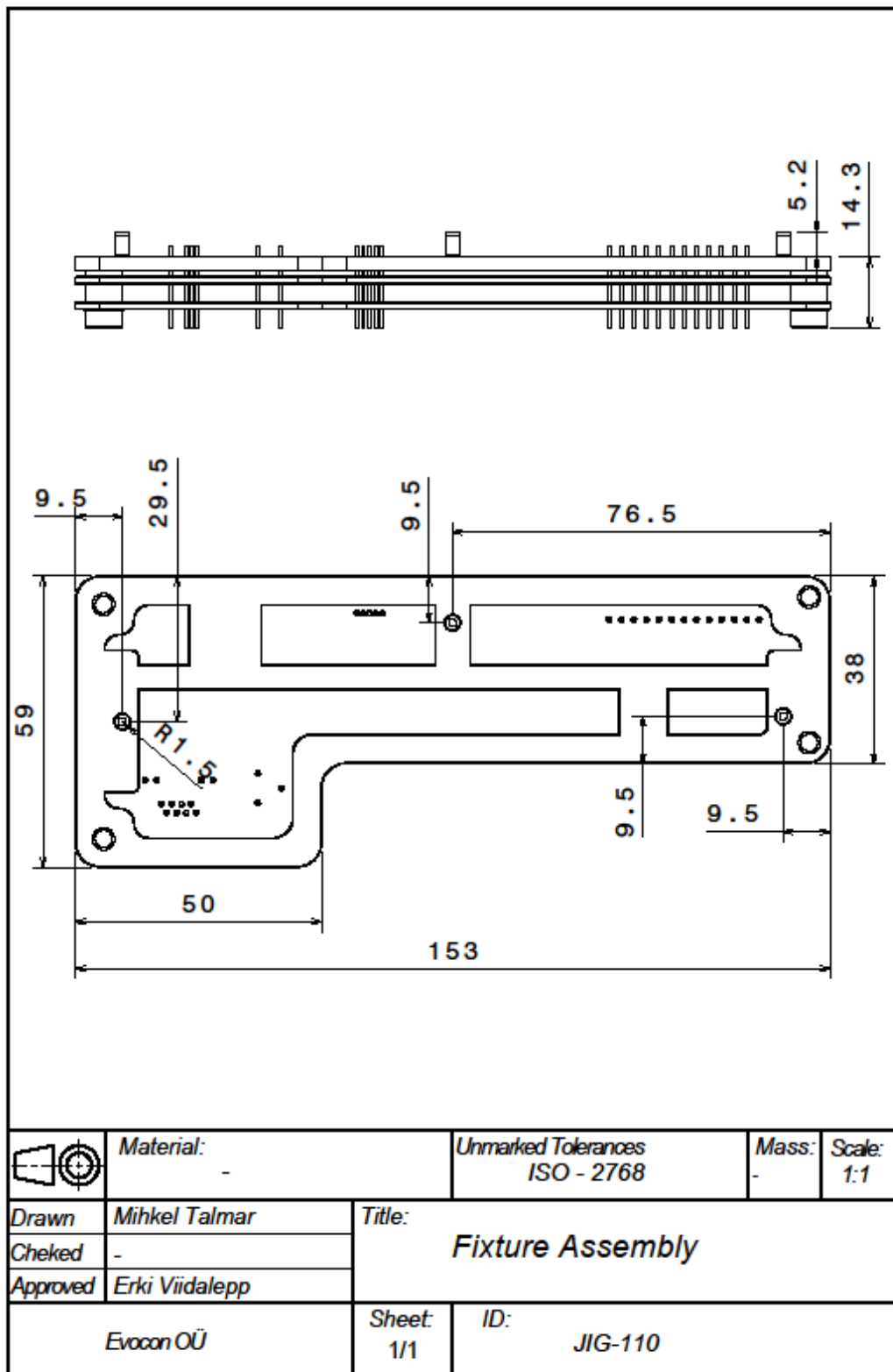
Joonis L7.1 kujutab testitava pooltoote trükkplaati ning annab olulisemad mõõdud



Joonis L7.1 Evoconverteri trükkplaat

Lisa 8 Testri armatuuri koost

Testri *Pogo pin*'idest ja ABS plastikust kihtidest moodustatud koostu on näha joonisel L8.1.



Joonis L8.1 Testri armatuuri koost

Armatuuri ABS plastikust kihid toodeti 3D printimise tehnoloogiaga. Valminud detaile on kujutatud joonisel L8.2.



Joonis L8.2 Armatuuri 3D prinditud kihid

Lisa 9 Pooltoote vertikaalsuunaline fiksaator

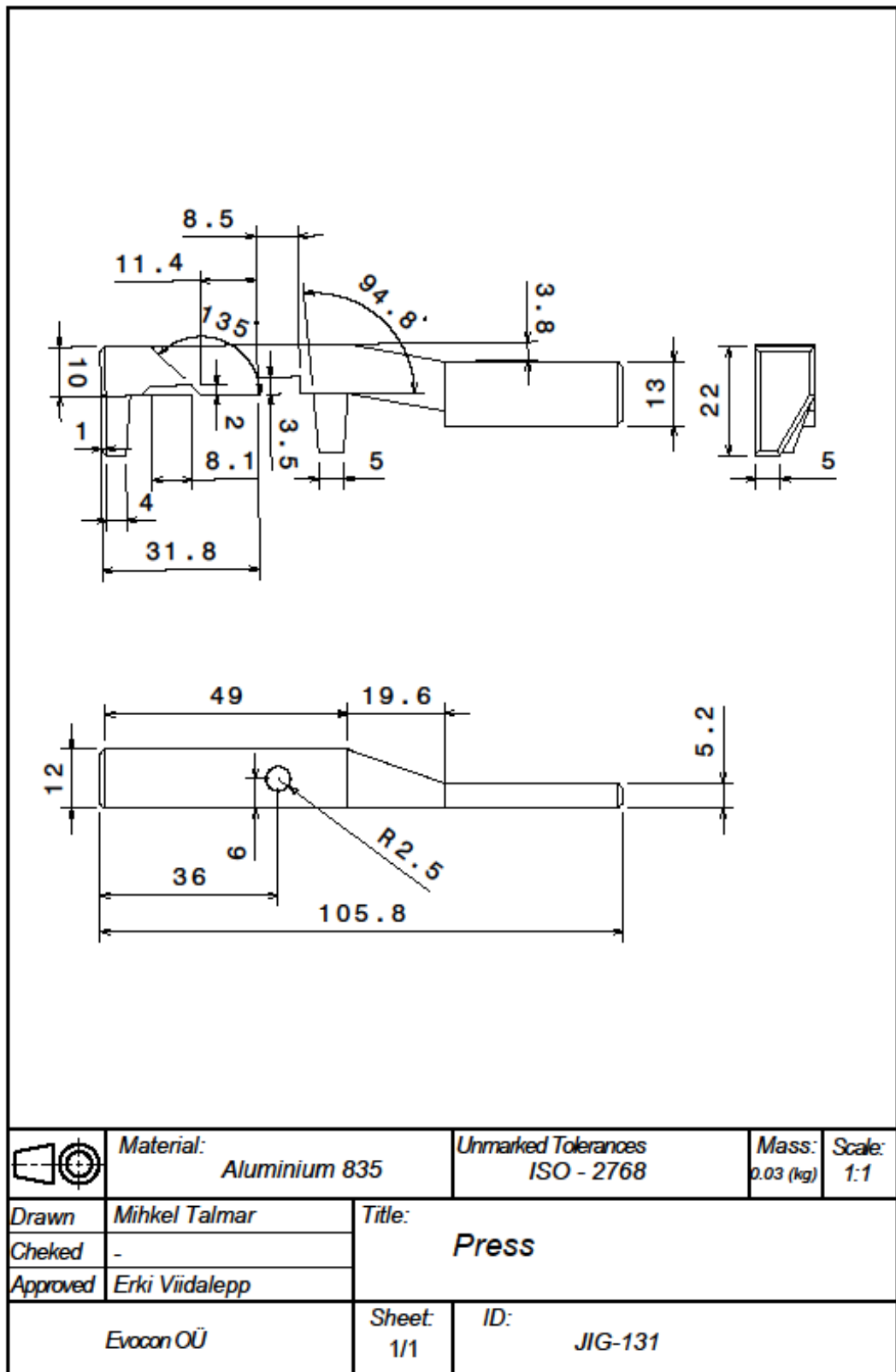
Pooltoote testrisse kinnitamiseks valmis vertikaalsuunaline fiksaator, mis koosneb kahest detailist: klambrist ja freesdetailist. Ostutootena hangitud klambrit on kujutatud joonisel L9.1. Autori disainitud freesdetail (press) avaldab Pogo pin'idele vastusurvet plaadi seisukohast ohututele punktidele. Viimase detaili freesimist on kujutatud joonisel L9.2 ja insener-tehnilist joonist on näha joonisel L9.3.



Joonis L9.1 Kinnitusklamber [28]

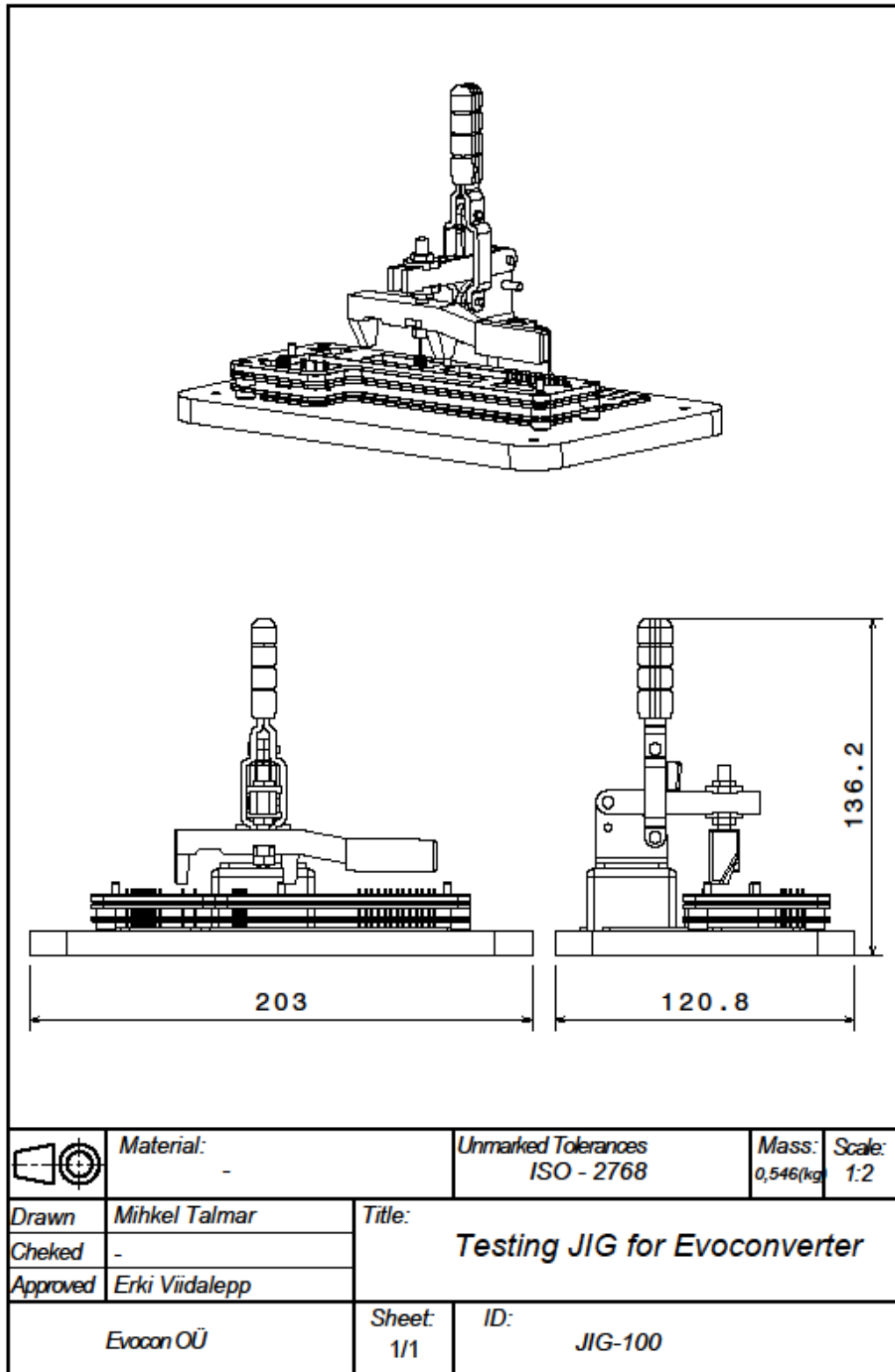


Joonis L9.2 Autori detaili CNC freesprotsess



Joonis L9.3 Autori freesdetaili joonis

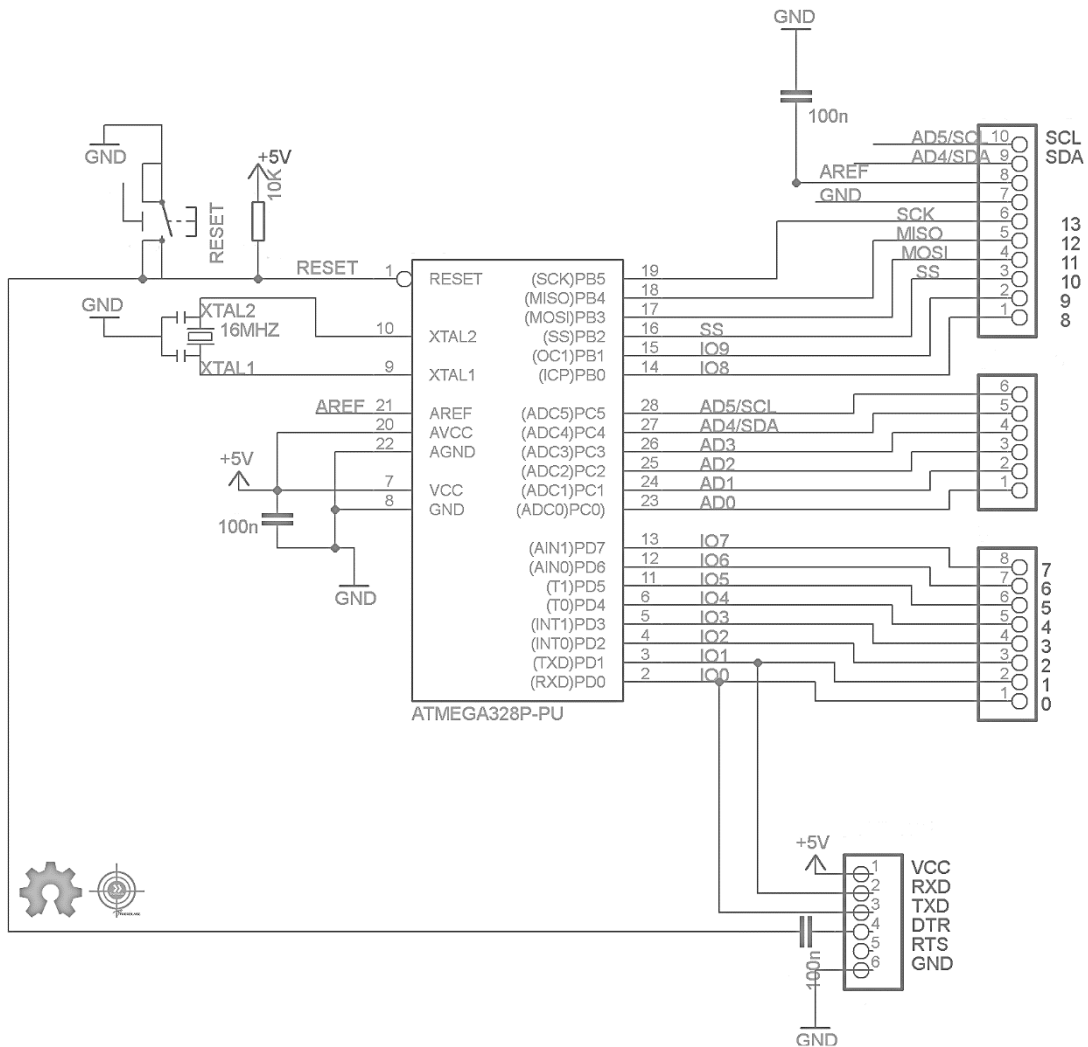
Testri koostu põhimõõtmega joonist on näha joonisel L10.1.



Joonis L10.1 Testri koostu joonis

Lisa 11 Atmega328P-PU ühendamise skeem

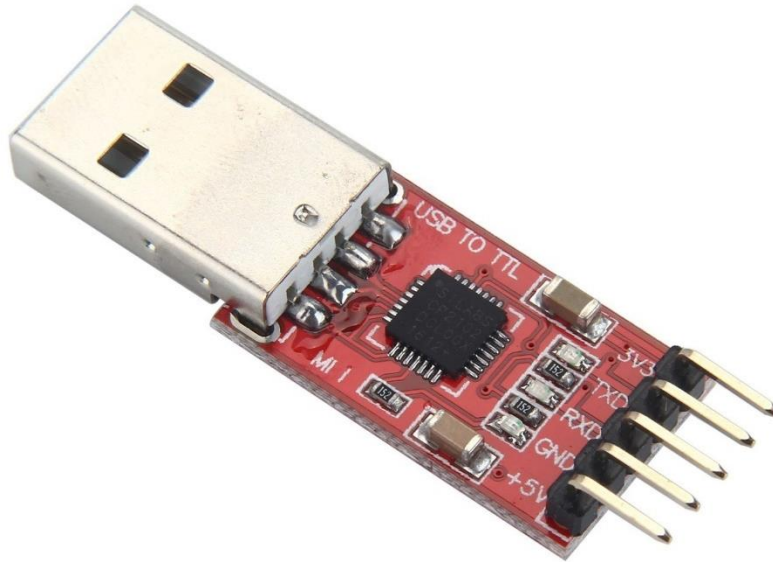
Atmega328P-PU mikrokontrolleri kasutamiseks enda elektroonikakoostus on vaja teada täiendavaid elektroonikaelemente ja nende skeemi ühendamise põhimõtteid, et tagada kontrolleri korrektne toimimine. Mikrokontrolleri (Atmega328P-PU) ühendamise skeemi on näidatud joonisel L11.1.



Joonis L11.1 Atmega328P-PU ja toimimiseks vajalike elementide elektroonikaskeem [38]

Lisa 12 USB-UART seade

Jadaühenduse loomiseks arvuti ja testri vahel saab kasutada USB-UART seadet, mille foto on joonisel L12.1.



Joonis L12.1 USB-UART seade [67]

Lisa 13 Katse testri toimimisest

Testri toimimise kontrolliks viis autor läbi katse, kus testrisse oli esialgu ühendatud pooltoode ning programmeerimise ja testimise tsükkel toimus ootuspärase mustri järgi. Seejärel eemaldati testrist pooltoode ning toiteploki anti testri kolmanda sensorahela testimise *Pogo pin*'ile 24 V asemel 12 V. Ekraanil kuvatud tulemusi on näha joonisel L13.1.

```
Python 3.7.0 (v3.7.0:1bf9cc5093, Jun 27 2018, 04:06:47) [MSC v.1914 32 bit (Intel)] on win32
Type "copyright", "credits" or "license()" for more information.
>>>
  RESTART: C:\Users\M\AppData\Local\Programs\Python\Python37-32\Communicate.Tester\CommunicateLogger\CommunicateLogger.py
Connecting to JLink...
Connecting to MK64FNI10xxx12...
Connected, starting RTT...
Serial Wire Viewer
Reading data from port 0:

MAC: fcc23d188f43

MAC address is not in the database. Shall I write? [y/n]: y
Insert Serial: 1808103
Serial no. is 1808103

Creating Datalogger
OK

Do you want to check the LEDs? [y/n]:y
COM12 is open...

Please enter LED to be checked (or 'e' to exit): 1
LED to be checked: 1

Voltage seems fine

Is the led okay? [y/n]: y
Lets move on

Restart
Please enter LED to be checked (or 'e' to exit): 2
LED to be checked: 2

Voltage seems fine

Is the led okay? [y/n]: y
Lets move on

Restart
Please enter LED to be checked (or 'e' to exit): 3
LED to be checked: 3

Voltage is bad: 11.92

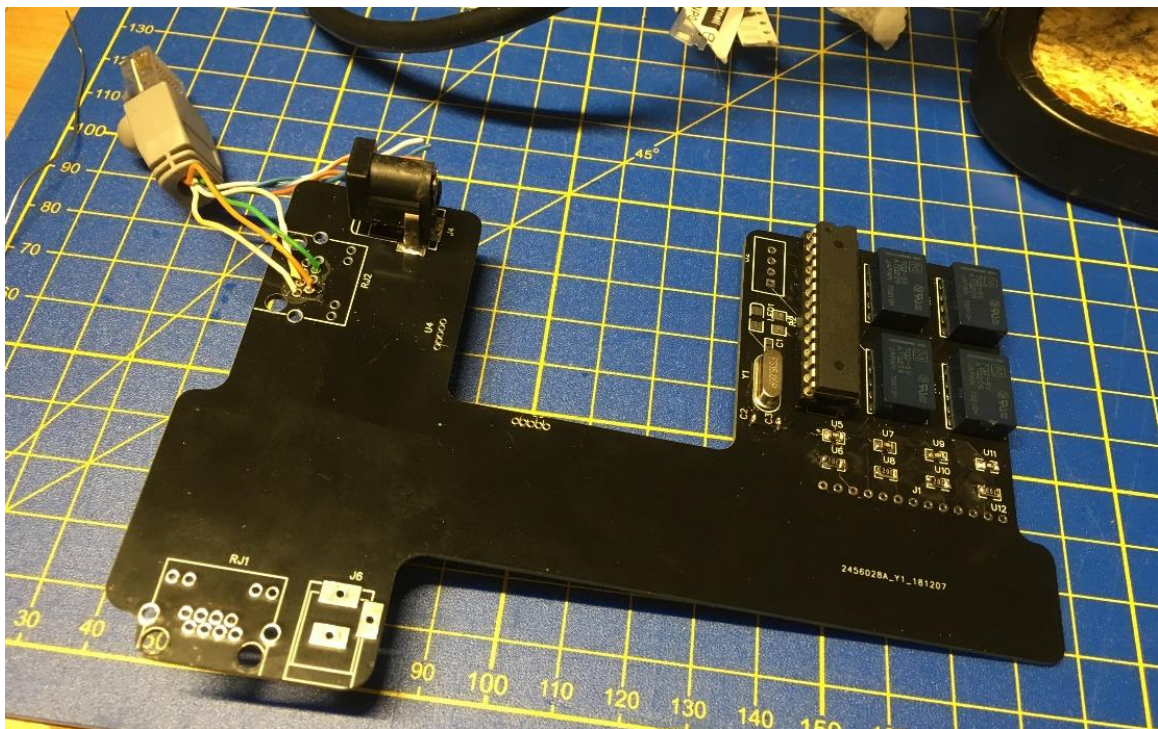
Restart
Please enter LED to be checked (or 'e' to exit): e
Change the PCB and press enter...|
```

Joonis L13.1 Pythoni programmiaken testri toimimise katses

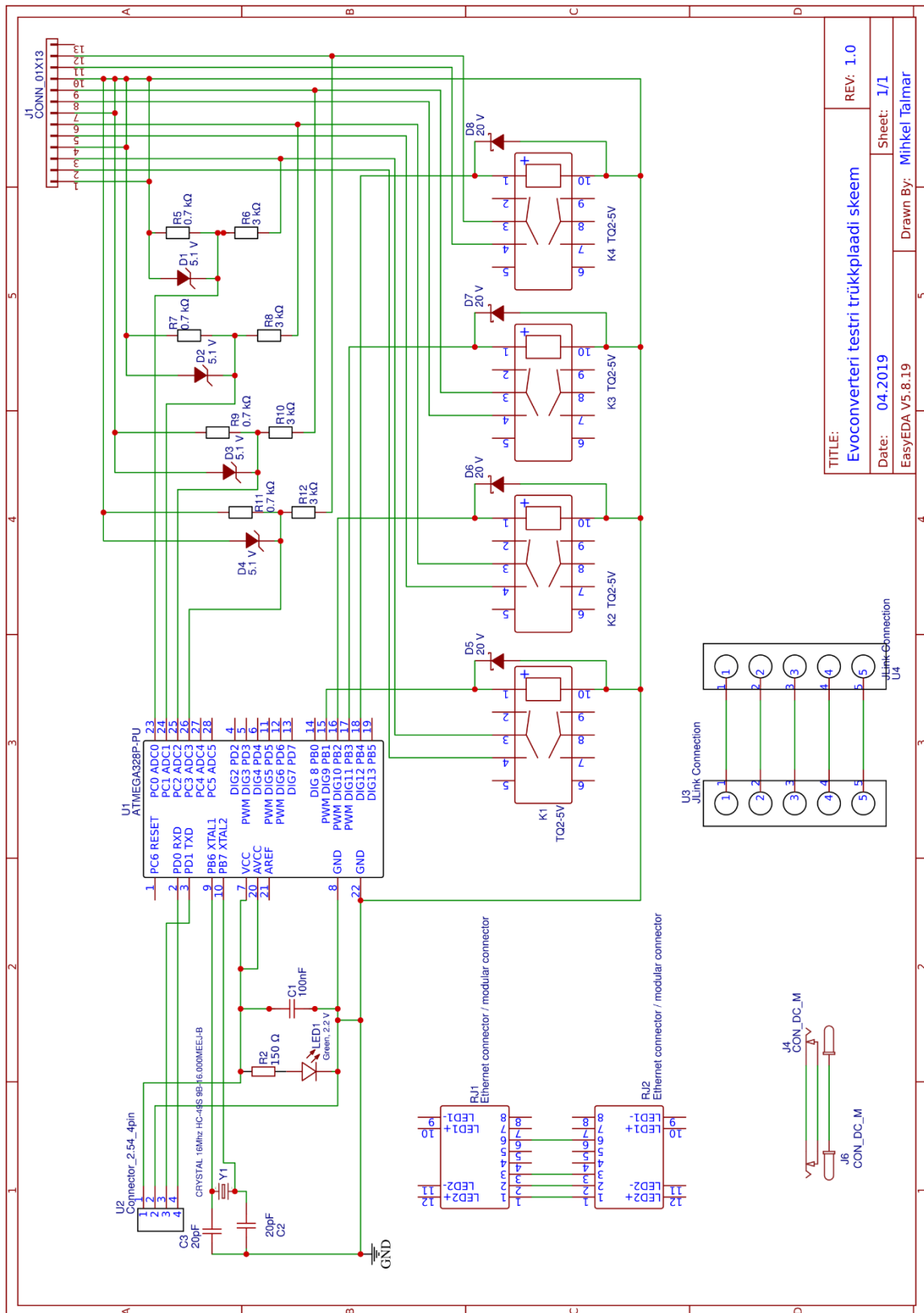
Lisa 14 Autori elektroonikakoost

Autori disainitud tester sisaldab elektroonikakoostu, mille jootmise vaheetappi on kujutatud joonisel L14.1. Selles faasis pole trükkplaadile lisatud veel kõiki testri jaoks vajalikke komponente ning Etherneti pesa on ajutiselt asendatud pooleks lõigatud võrgukaabliga, mis on plaadile otse külge joodetud. Hiljem need puudused ja asendused kõrvaldati.

Trükkplaadi disaini aluseks koostatud elektroonikaskeemi on näha joonisel L14.2. Selle skeemi põhjal paigutas autor elemendid elektroonikakoostu ning vedas komponentide vahele elektroonsed rajad.



Joonis L14.1 Autori elektroonikakoostu jootmisprotseduuri vaheetapp



TITLE:	REV: 1.0
Evoconverteri testri trükkplaadi skeem	Sheet: 1/1
Date: 04.2019	Drawn By: Mihkel Taimar
EasyEDA V5.8.19	

Joonis L14.2 Autori trükkplaadi skeem