



TALLINNA TEHNIKAÜLIKOOL
MEHAANIKATEADUSKOND

Mehhatroonikainstituut
Mehhatroonikasüsteemide õppetool

MHK40LT

Thomas Einasto

**Unifitseeritud konduktomeetrilise
puiduniiskuse mõõtemuunduri arendus**

Autor taotleb
tehnikateaduste bakalaureuse
akadeemilist kraadi

Tallinn
2016

AUTORIDEKLARATSIOON

Deklareerin, et käesolev lõputöö on minu iseseisva töö tulemus.

Esitatud materjalide põhjal ei ole varem akadeemilist kraadi taotletud.

Töös kasutatud kõik teiste autorite materjalid on varustatud vastavate viidetega.

Töö valmis Ahti Põlderi juhendamisel

“.....” 2016 a.

Töö autor

..... allkiri

Töö vastab lõputööle esitatavatele nõuetele

“.....” 2016 a.

Juhendaja

..... allkiri

Lubatud kaitsmisele

..... õppekava kaitsmiskomisjoni esimees

“.....” 2016 a.

..... allkiri

BAKALAUREUSE LÕPUTÖÖ ÜLESANNE

2016. aasta kevadsemester

Üliõpilane: Thomas Einasto 134383MAHB
Õppekava: MAHB02/13 - Mehhatroonika
Eriala: Mehhatroonika
Juhendaja: Nooremteadur Ahti Põlder
Konsultant: Madis Einasto, PhD, Evikon MCI OÜ juhataja, +372 553 7978

LÕPUTÖÖ TEEMA:

Unifitseeritud konduktomeetrilise puiduniiskuse mõõtemuunduri arendus.
Development of the unified conductometric lumber moisture transmitter.

Töös lahendatavad ülesanded ja nende täitmise ajakava:

Nr	Ülesande kirjeldus	Tähtaeg
1.	Puiduniiskuse määramise meetodika kirjeldus, nõuete analüüs, kirjanduse ülevaade ja seadme lahendi funktsionaalskeem	14.03.2016
2.	Mõõtemooduli komponentide arvutused ja valik, trükksõlme, mõõteelektroodide ja seadme korpuse konstruktiivne teostus	04.04.2016
3.	Puiduniiskuse määramise algoritm lähtudes puidutakistuse ja temperatuuri mõõtetulemustest	10.04.2016
4.	Töö lõplik vormistamine, köitmine ja esitamine	20.05.2016

Lahendatavad insenertehnilised ja majanduslikud probleemid: Töö eesmärgiks on projekteerida kahe mõõtekanaliga puiduniiskuse mõõtemuundur unifitseeritud platvormi baasil puidukuivati automaatjuhtimissüsteemi koosseisu.

Töö keel: eesti keel

Kaitsmistaotlus esitada hiljemalt 16.05.2016

Töö esitamise tähtaeg 20.05.16

Üliõpilane Thomas Einasto /allkiri/..... kuupäev.....

Juhendaja Ahti Põlder /allkiri/..... kuupäev.....

SISUKORD

EESSÕNA	5
SISSEJUHATUS.....	6
1. PUIDUNIISKUSE MÕÕTMISMEETODID.....	7
1.1. Kuivahju meetod puiduniiskuse arvutamiseks.....	7
1.2. Elektrilised puiduniiskuse mõõtevahendid.....	8
1.2.1. Alalisvoolu takistusel põhinevad puiduniiskuse mõõtevahendid.....	10
1.2.2. Dielektrilisel meetodil põhinevad puiduniiskuse mõõtevahendid	10
1.3. Mõõtemetodi valik projekteeritavale seadmele	11
2. SEADME PROJEKTEERIMINE	14
2.1. Puidukuivati juhtimissüsteemi iseloomustus	14
2.2. Puiduniiskuse mõõtemooduli teostus	14
2.3. Komponentide valik.....	15
2.3.1. Temperatuuri mõju kompenseerimine	15
2.3.2. ADC valik.....	16
2.3.3. Koormustakisti valik ja mõõtevõime hindamine	16
2.3.4. Kaitsetakisti valik.....	18
2.4. Mõõtemooduli trükksõlme projekteerimine	19
2.5. Kaablite ühendused ja NTC sensori paigutus	20
2.3.3. Mõõteelektroodide konstruktsioon.....	21
2.6. Seadme korpus.....	24
2.7. Puiduniiskuse arvutuse algoritm	25
2.7.1. Puiduniiskuse arvutamine puidutakistuse ja temperatuuri alusel.....	25
2.7.2. Puidutakistuse ja temperatuuri arvutused.....	26
KOKKUVÕTE.....	29
SUMMARY	31
KIRJANDUSE LOETELU	32
LISAD.....	34
Lisa 1	34
Lisa 2	35
Lisa 3	36
Lisa 4	37

EESSÕNA

Käesoleva lõputöö teema kujunes välja puidutööstuse vajadusest operatiivselt ja usaldusväärselt kontrollida saematerjali (prussid, lauad, liistud) niiskusesisaldust selle kuivatamise käigus kamberkuivatites, et tagada toodangu nõutav ja ühtlane kvaliteet ning vähendada energiakulusid tänu kuivatuse režiimide ja kestuse optimeerimisele.

Autor osales eelneva tööpraktika ajal aparaadiehitusettevõttes Evikon MCI OÜ puidukuivatite automaatjuhtimissüsteemide realiseerimises ning nägi seniste puiduniiskuse mõõtmise tehniliste lahenduste puudusi (ebapiisavad mõõteulatus, lahutusvõime ja lineaarsus, temperatuurist tingitud hälbed), seega ajendas antud projektiga tegelemiseks autorit konkreetne huvi.

Lõputöö aluseks oleva projekti käigus luuakse uue, Evikon MCI OÜ unifitseeritud mõõtemuunduri platvormil põhineva kahe mõõtekanaliga puiduniiskuse mõõtemuunduri prototüüp ja projektdokumentatsioon, mis on aluseks seadme tootmis- ja kasutajadokumentatsioonile.

Käesolev bakalaureusetöö on kirjutatud Tallinna Tehnikaülikooli mehhatroonika-süsteemide õppetooli nooremteaduri Ahti Põlderit juhendamisel. Lähteülesande püstitas ja tehniliselt konsulteeris autorit Evikon MCI OÜ juhataja Madis Einasto.

SISSEJUHATUS

Bakalaureusetöö eesmärgiks on projekteerida puidukuivati automaatjuhtimissüsteemi koosseisu puiduniiskuse mõõtmise moodul ja siduda see ettevõtte poolt toodetava unifitseeritud mõõtemuunduri platvormiga.

Tulenevalt ettevõtte antud lähteülesandest on vaja luua seade, mis peab:

- Pidevalt määrama puidu veesisaldust kahes mõõtekohas kuivatusprotsessi ajal kamberkuivatis
- Vastama teostuse poolest rakenduse töötingimustele (keskkonnatemperatuur 0...+80 °C, relatiivne õhuniiskus 20...100 %, õhukiirus kuni 20 m/s)
- Vastama oma metrooloogiliste näitajate poolest rakenduse nõuetele (puiduniiskuse mõõtepiirkond 7...20 %, põhiviga 0,5 %)
- Ühilduma kontrollsüsteemis kasutatava protsessikontrolleri E8810 ja Mango Automation SCADA (*supervisory control and data acquisition*) tarkvaraga
- Projekteerimisel kasutada eelistatult tootja unifitseeritud sõlmi, komponente ja materjale ning minimeerida tootmisomahinda

Töös analüüsitakse levinumaid puiduniiskuse määramise meetodeid, nende sobivust antud rakendusele ja valitakse sobivaim tehnoloogia. Pakutakse välja mõõtemooduli põhimõtteline ja tehniline lahendus, tehakse asjakohased arvutused, hinnatakse metrooloogilisi näitajaid. Valitakse välja sobivad materjalid ja komponendid.

Töö käigus autor uurib I²C ja Modbus sideprotokolle ja tutvub PluraSens[®] unifitseeritud platvormiga. Ülesanneteks on projekteerida I²C liidesega mõõtemooduli trükksõlm, mis ühilduks etteantud unifitseeritud platvormiga, seadme komplekti kuuluvad mehaanilised komponendid (mõõteelektroodid, korpus) ning koostada puiduniiskuse arvutamise algoritm.

Puiduniiskuse mõõtemuundur on ettenähtud rakendamiseks puidutööstuses puidukuivatite automaatjuhtimissüsteemide koosseisus. Evikon MCI OÜ plaanib seadme tootmisse juurutada 2016.a III kvartalis.

1. PUIDUNIISKUSE MÕÕTMISMEETODID

1.1. Kuivahju meetod puiduniiskuse arvutamiseks

Puiduniiskust saab välja arvutada läbi puidu masside võrdluse enne ja pärast puidu kuivatamist. See on kõige kindlam viis teada saada tegelik puiduniiskuse väärtus, kuid seda ei kasutata puidukuivati juhtsüsteemides, kuna see on kulukas ja võtab palju aega. Seda meetodit kasutatakse pigem testimiseks ja seadmete kalibratsiooniks laborites. (Guidelines for on site..., 2001, lk. 5-6)

Kuivahju meetod vajab:

- Kuivatusahju, mis hoiab ühtlast ja stabiilset temperatuuri +102...105 °C
- Kaalu, mis võimaldab kaaluda vähemalt 1000 g täpsusega 0,1 g

Puiduniiskuse määramiseks kuivahju meetodil on vaja järgida järgmisi samme:

1. Lõigata 30...40 cm kauguselt laua otspinnast välja 2...3 cm pikkune katsekeha
2. Kaalu abil määrata katsekeha algmass – m_n
3. Asetada katsekeha 18...24 tunniks 102...105 °C ahju ja kuivatusperioodi lõpus kaaluda seda ühetunnise intervalli tagant, kuni see saavutab konstantse kaalu
Kui katsekeha on saavutanud konstantse kaalu jätkatakse punktiga 4
4. Arvutada puiduniiskus kasutades valemit 1.1

Valem puiduniiskuse arvutamiseks: $u = \frac{m_n - m_k}{m_k} \cdot 100$, (1.1)

kus u – puiduniiskus protsentides,

m_n – puidu mass enne kuivatamist,

m_k – puidu mass pärast kuivatamist 102...105 °C juures.

1.2. Elektrilised puiduniiskuse mõõtevahendid

Puiduniiskuse mõõtevahendeid on põhjalikumalt käsitletud John Marchant ja Jamie Hartley, kelle tööst saab järelda, et levinud on kahte tüüpi mõõtevahendid: alalisvoolu takistuse mõõtmisel põhinevad mõõteelektroodidega niiskumõõttjad ja dielektrilise läbitavuse määramisel põhinevad lamellidega puiduniiskuse mõõturid (Methods of determining..., 1995, lk. 11). Joonis 1.1 illustreerib mõlemat tüüpi lihtsamaid kantavaid mõõteseadmeid, mida kasutatakse saematerjali niiskuse pisteliseks mõõtmiseks.



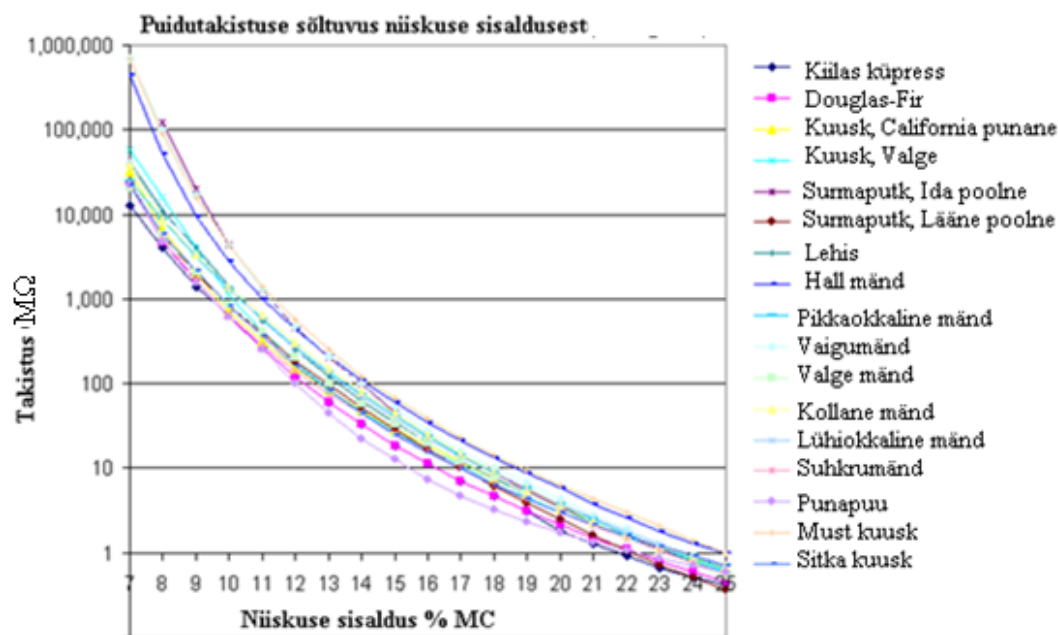
Joonis 1.1 Alalisvoolul põhinev mõõdik Dielektrilisel meetodil põhinev mõõdik
(Guidelines for on site..., 2001, lk. 7).

Dielektrilisel meetodil põhinevaid lamellelektroodidega niiskumõõttjaid on Phil Mitchell kirjeldanud, kui keskmise puiduniiskuse kiireks määramiseks mõeldud seadmeid. Samuti on Mitchell täheldanud, et seda tüüpi seadmete kasutamisel tuleb tähele panna, et puit oleks piisava paksuse ja tihedusega, kuna vastasel juhul võib puidu all olev materjal mõjutada mõõtetulemust. Soovituslik on mõõta samasuguse puitmaterjali virna tipust, surudes seadme lamellid tihedalt vastu puitu ja olles veendunud, et mõõdetav pind on kuiv (Methods of moisture content..., 2005).

Alalisvoolu takistusel põhinevaid puiduniiskuse mõõtevahendeid on kirjeldanud Christen Skaar. Need seadmed on mõeldud puiduniiskuse lokaalseks määramiseks teatud mõõtekohas, mis asub katsekehal (Wood-Water Relations, 1988). Kasutades William L. James'i töös toodud kalibreerimistabelit, mis on toodud Lisas tabelina L.1, saame järelda, et selle seadmetüübi kasutamisel peab arvestama, et puidu elektriline takistus langeb eksponentsiaalselt puiduniiskuse kasvades (Electric moisture meters..., 1988, lk. 4, Table 1).

Võttes aluseks Christen Skaar'i töö saab täheldada, et puidu elektrilise takistuse sõltuvus selle niiskusesisaldusest erineb olenevalt puidu liigist ja temperatuurist (Wood-Water Relations, 1988, pt. 6).

Graafik 1.1 illustreerib puidu elektrilise takistuse sõltuvust selle niiskusesisaldusest ja puiduliigist (Wood moisture meter...). Lisas 1 toodud Tabel L.2 on toodud andmed detailselt takistusliku niiskusemõõtja mõõtetulemuste sõltuvust puidu temperatuurist.



Graafik 1.1. Puidu elektritakistuse sõltuvus niiskusesisaldusest (Wood moisture meter...).

1.2.1. Alalisvoolu takistusel põhinevad puiduniiskuse mõõtevahendid

Valdek Tamme, Peeter Muiste ja Hannes Tamme uuringutest ilmneb, et "puiduniiskuse määramise elektrilise takistuse mõõtmisel põhinev tehnoloogia on laialdaselt kasutuses puidutööstuses, kuna see on ökonoomne ja kindel viis puiduniiskuse leidmiseks" (Tamme *et al*, 2013, lk. 1). Christen Skaar on oma töös selgitanud, et elektrilisel takistusel põhinevad puiduniiskuse mõõtevahendid toimivad tänu puitu sisestatud metallelektroodide paarile, millele rakendatakse alalispinge ja puitu läbitava voolu mõõtmise teel määratakse puidu elektriline takistus (Wood-Water Relations, 1988, pt. 6).

Phil Mitchell'i ja William L. James'i töödest saab järeldada, et elektrilise takistuse mõõtmisel põhineva seadme mõõtepiirkond ulatub 7...25 %MC, arvestades ühelt poolt puidu kiu küllastumise punkti (FSP - *fibre saturation point*) ja teiselt poolt ülikõrget ja raskelt mõõdetavat elektrilist takistust, mille puit saavutab kuivamisel (Methods of Moisture Content..., 2005 ; Electric Moisture Meters..., 1988, lk. 3).

William L. James'i, Jamie Hartley ja John Marchant'i töödest selgub, et FSP sõltub puiduliigist, kuid ühiselt aksepteeritud keskmine asub 26...30 %MC juures. FSP saavutamisel on kogu vaba niiskus puidu rakust eemaldunud, kuid samas on raku sein veel niiskusega küllastunud, mille tõttu elektroodide vaheline puidutakistus on suhteliselt madal ($<1 \text{ M}\Omega$) ja ebastabiilne (Methods of Determining..., 1995, lk. 7; Electric Moisture Meters..., 1988, lk. 3). Seega pole puiduniiskuse määramine takistuslikul meetodil FSP-st kõrgemal usaldusväärne, samas pole sellel ka praktilist vajadust.

1.2.2. Dielektrilisel meetodil põhinevad puiduniiskuse mõõtevahendid

Dielektriline meetod niiskuse määramiseks põhineb materjali dielektriliste omaduste analüüsil sõltuvalt selle veesisaldusest. Dielektrilised puidu niiskusemõõtjad mõõdavad puidu elektrilist mahtuvust ja sellest tuletatud dielektrilist konstanti raadiosagedustel. Sellised lamellelektroodidega mõõtevahendid mõõtepiirkonnaga

5...25 %MC kasutavad vahelduvvoolu, mis läbib 15...30 mm puitu, seejuures on puit kondensaatori dielektrikuks (Guidelines for on-site..., 2001, lk. 7; Mitchell. 2005).

Siin peab arvestama, et kuna dielektrilised mõõturid määravad puidu keskmist niiskusesisaldust välimises kihis, avaldab tulemusele tugevat mõju pinnaniiskus (Guidelines for on-site..., 2001, lk. 8). Seega, kui puidu pinda märjata, mida puidukuivatuse protsessi ajal sageli tehakse, siis selline mõõtevahend näitab koheselt ebausaldusväärset tulemust, mistõttu dielektrikul põhinevad puiduniiskuse mõõtevahendid on pigem kasutatavad kuivatatud puidu pisteliseks kontrolliks.

Samuti on dielektrilisel meetodil põhinevad puiduniiskuse mõõtevahendid väga tundlikud puidu tihedusele, seetõttu pole need seadmed kuigi mugavad, kuna neid peab pidevalt ümber seadistama vasvalt puidu tihedusele (Wood-water relations, 1988, pt. 6).

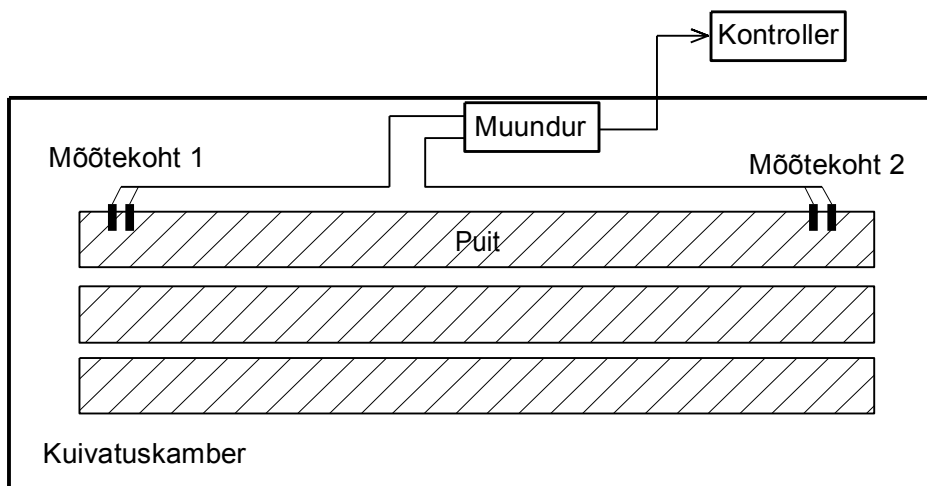
1.3. Mõõtemetodi valik projekteeritavale seadmele

Lähteülesande kohaselt on projekteeritava seadme otstarve puiduniiskuse pidev kontroll kuivatuskambris. Mõõtemetodi valikul peame arvestama rakenduse eripäradega – erinevate puiduliikidega, varieeruva puidu tihedusega, hõõveldamata saematerjali pinna karedusega, samuti puidu pinna perioodilise niisutamisega. Eeltoodust järeldame, et puidu pinnale asetatavaid lamellelektroode kasutatav dielektriline meetod ei ole kõige sobivam antud rakendusele.

Puidu elektrilise takistuse mõõtmisel puitu sisestatavate elektrootodide abil peame arvestama vaid temperatuuri ja puiduliigiga, seega võib eeldada, et alalisvoolu takistusel põhinev puiduniiskuse määramise tehnoloogia sobib paremini antud ülesandeks. Sellist seadet on suhteliselt lihtne ümberseadistada vastavalt puiduliigile, sest takistuse sõltuvused erinevate liikide puhul erinevad vaid nihke poolest, nagu näeme graafikust 1.1.

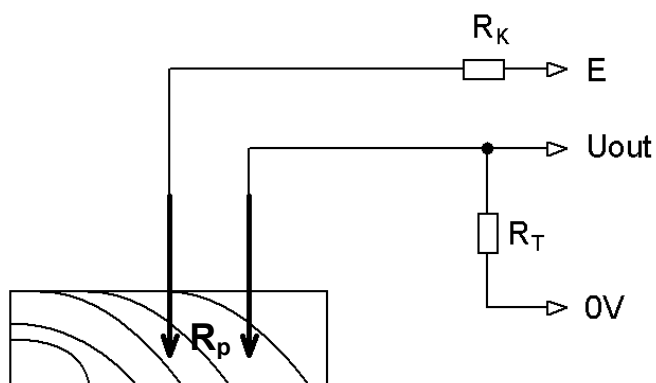
Joonis 1.2 illustreerib tüüpilist puidukuivatuskambrit, kus asuv puiduniiskuse mõõtemuundur mõõdab puidutakistust kahes mõõtekohas kahe mõõteelektroodide paari abil. Mõõteelektroodide paarid sisestatakse puitu enne kuivatusprotsessi algust

kahes mõõtekohas materjali virna erinevates otstes, et kontrollida kuivamise ühtlust. Tuginedes autori senistele töökogemustele puidukuivati automaatika valdkonnas, võib hinnata, et puiduniiskust kontrollitakse kuivatusprotsessi ajal segeli samaaegselt isegi 4..8 mõõtekohas, et tõsta mõõtetulemuste usaldusväärsust. Seega oleksid eelistatud mitmekanalilised lahendused.



Joonis 1.2. Puidutakistuse mõõtmine kuivatuskambri kahes otsas.

Puidutakistuse määramiseks mõõtekohas tekitame pingejaguri kaitsetakistist R_K , puidutakistusest R_p ja koormustakistist R_T , nagu on kujutatud joonisel 1.3. Puidutakistuse määramiseks kasutame mõõteelektroodide paari, mille sisestame puitu valitud mõõtekohas. Rakendame pingejagurile alalispinge E ja mõõdame väljundpinget U_{out} , millest arvutame välja puidu takistuse ja sellele vastava puidu niiskuse (Cornell, 2015). Arvutused teostame unifitseeritud mõõtemuunduri mikrokontrolleri poolt vastava programmi abil.



Joonis 1.3. Puidutakistuse mõõtmine alalispinge abil

Hindame valitud lahendi võimalikku mõõteulatust ja seame kriteeriumid projekteeritava mõõtemooduli eraldusvõimele ja mõõtetäpsusele. Antud projektis arvestame William L. James'i, Jamie Hartley ja John Marchant'i töödest tulenenud järeldustega, et FSP tekib umbes 25 %MC juures ja Christen Skaar'i uurimuse tulemustega, et puiduniiskust tavaliselt ei mõõdeta üle 20 %MC, sest mida lähemale FSP-le seda ebatäpsemad on mõõtetulemused (Methods of Determining..., 1995, lk. 7; Electric Moisture Meters..., 1988, lk. 3; Wood-water relations, 1988, pt. 6). Nagu näha graafikust 1.1, on mõõtepiirkonna ülempiiril puidu takistus 0,5...1 M Ω .

Teiselt poolt, puiduniiskusel alla 7 %MC kasvab Eestis levinud puiduliikide puhul puidu elektriline takistus mõõteelektroodide vahel väärtuseni 10...50 G Ω . Nõutav takistuse mõõtmise diapsoon on seega 1 : 10 000...50 000. Mõõtemooduli ADC peab olema sellele diapsoonile vastava resolutsiooniga. Samas pole tänu puidu niiskuse ja takistuse logaritmilisele seosele takistuse mõõtmistäpsuse nõuded kuigi kõrged. Lähteülesande kohaselt ei tohi seadme absoluutne mõõtehälve ületada 0,5 %MC, see aga vastab, nagu näeme graafikust 1.1, suhtelisele mõõteveale 30...60 % takistuse mõõtmisel.

2. SEADME PROJEKTEERIMINE

2.1. Puidukuivati juhtimissüsteemi iseloomustus

Evikon MCI puidukuivati kontrollsüsteem on ettenähtud 5 kuni 30 ööpäeva kestva puidukuivatusprotsessi täisautomaatseks läbiviimiseks operaatori poolt etteantud kuivatusrežiimi alusel. Kontrollsüsteem reguleerib temperatuuri ja õhu relatiivset niiskust kambris ja juhib ventilaatoreid kuivatusrežiimis määratud ajagraafikute järgi.

Süsteem koosneb protsessikontrollerist E8810, unifitseeritud platvormiga õhu temperatuuri, relatiivse õhuniiskuse ja puiduniiskuse mõõtemuunduritest ning releedega juhtmoodulitest täiturmehhanismide lülitamiseks. Protsessikontroller on tööstuslik miniarvuti, kuhu on installeeritud Linux operatsioonisüsteem ja veebipõhist kaugjuhtimist võimaldav SCADA tarkvara. Protsessikontroller suhtleb mõõtemuundurite ja juhtmoodulitega läbi RS485 võrgu Modbus RTU protokollil abil.

Unifitseeritud mõõtemuunduri platvorm sisaldab analoog- ja releeväljundeid, Modbus RTU protokollil toega RS485 digitaalliidest ning võimaldab ühendada automaatikasüsteemidega erinevate parameetrite sensoreid (Evikon, 2015).

2.2. Puiduniiskuse mõõtemooduli teostus

Käesoleva seadme projekteerimisel lisame unifitseeritud mõõtemuunduri platvormile uue alalisvoolu takistuse mõõtmisel põhineva puiduniiskuse mõõtemooduli. Niiskuse määramiseks rakendame puidule läbi mõõteelektroodide toitepinge E ja mõõdame puitu läbivat voolu I_m . Voolu I_m määrame selle poolt koormustakistil R_t tekkiva pingelanguse U_{in} mõõtmise teel nagu näha jooniselt 1.3.

$$U_{in} = I_m \cdot R_t, \quad (2.1)$$

kus U_{in} – pingelangus koormustakistil,

I_m – puitu läbiv vool

R_t - koormustakisti

Mõõdetav signaal ehk pinge U_{in} tekib koormustakistil, kuna jadaühenduses takistustest koosnev mõõteahel R_k , R_p ja R_t toimib pingejagurina.

$$I_m = E / (R_p + R_t), \quad (2.2)$$

$$\text{seega } U_{in} = E \cdot R_t / (R_t + R_p), \quad (2.3)$$

Valemites 2.2 ja 2.3 pole arvestatud kaitsetakistiga R_k , kuna selle väärtus on tühine võrreldes puidu takistusega R_p . Sisendpingena E kasutame mõõteplatvormi stabiliseeritud 5 V väljundpinget, kuna see on välja toodud mõõtemooduli liidese pistikule. Puiduniiskuse mõõtemuunduri andmevahetuseks unifikseeritud platvormiga kasutame I²C liidest.

2.3. Komponentide valik

2.3.1. Temperatuuri mõju kompenseerimine

Kuna puidu takistus sõltub lisaks niiskusele ka temperatuurist, peame mõõtma temperatuuri mõõteelektroodide läheduses, et kompenseerida temperatuuri muutusest põhjustatud mõõtehälvet. Selleks tuleb valida sobiv temperatuurisensor, mida saab paigaldada mõõtekohta.

Valime temperatuurisensoriks NTC termistori selle kõrge tundlikkuse tõttu. Sensori konkreetse tüübi valikul lähtume ettevõttes enim kasutatavast tüübist NTC10A (Evikon, 2015), mille nominaaltakistus 25 °C juures on 10 kΩ, muutumiskõvera tähiseks tootelehel on A ja B-parameetri väärtus on 3942 (Selco Products, 2015). B-parameeter on koefitsient, mis iseloomustab termistori takistuse muutumist temperatuurist ja seda kasutatakse temperatuuri arvutamiseks takistuse alusel (Lavenuta, 2013). Valitud termistori mõõtepiirkonnaks on -30...+150 °C (Selco Products, 2015), mis sobib puidukuivatuskambri töötingimustega.

Temperatuuri määramiseks koostame termistoriga pingejaguri analoogselt puidutakistuse ahelale. Nii saame välja arvutada termistori väärtuse, tuginedes pingejaguri valemitale 2.1, 2.2 ja 2.3, asendades neis puidutakistuse R_p termistori takistusega R_{NTC} . Termistori NTC10A takistuse sõltuvus temperatuurist on toodud Lisas tabelis L1.2. Koormustakisti väärtuseks valime $R_n = 100 \Omega$, sel juhul muutub väljundpinge vahemikus 3...400 mV keskkonnatemperatuuri vahemikus 0...+80 °C.

2.3.2. ADC valik

Lähteülesande kohaselt peab puiduniiskuse mõõtemuundur olema I²C liidest toetava ADC-ga. Kuna peame kahes mõõtekohas mõõtma nii puidutakistust kui ka temperatuuri, siis vajame kokku nelja mõõtekanalit. Tulenevalt ptk. 1.3 toodud mõõtediapasooni arvutustest peab ADC lahutusvõime olema vähemalt 17...18 bit. Leiame, et I²C liidesega ADC-de seas lahutusega vähemalt 18 bit on saadaval: Microchip MCP342x seeria (Microchip Technology Inc., 2008) ja Linear Technology LTC2485 seeria (Linear Technology Corp., 2005).

Arvestades seda, et Linear Technology LTC2485 seeria on 24 bit lahutusvõimega, kuid ainult ühe mõõtekanaliga, valime ADC Microchip MCP342x seeriast, mis on ka tunduvalt soodsam lahendus. Peame valima sobiva 18-bitise ADC, mis sisaldaks nelja mõõtekanalit. Nendele nõuetele vastab Microchip MCP3424. See on 18 bit lahutusega nelja sõltumatu mõõtekanaliga ja I²C liidesega $\Delta\Sigma$ tüüpi ADC (Microchip Technology Inc., 2008).

2.3.3. Koormustakisti valik ja mõõtevõime hindamine

Koormustakisti R_T valiku kriteeriumid on järgnevad:

a) Et vältida ADC ülekoormust, peab olema täidetud tingimus

$$\frac{R_T}{R_T + R_{P-min}} < \frac{U_{REF}}{E}, \quad (2.4)$$

kus U_{ref} – ADC referentspinge

b) R_T peab olema võimalikult suur, et sellel tekkiv pingelangus U_m oleks mõõdetav maksimaalse resolutsiooni ja täpsusega.

Microchip MCP3424 tootelehest leiame ADC parameetrid, mida kasutame U_{in} mõõtmistäpsuse hindamisel. ADC sammu arvutamisel peame ADC resolutsioonist ühe biti eemaldama, sest üks bit on kasutusel U_{in} märgi määramiseks (Microchip Technology Inc., 2008, lk. 15).

Tabel 2.1 MCP 3424 parameetrid (Microchip Technology Inc., 2008).

Uref (V)	Lahutus (bit= 2^N)	Samm = Uref/lahutus/2 (V)	Müra (V)
± 2.048 V	18 bit = 2^{18}	$2.048/2^{17}=15,6*10^{-6}$ V	$1,5*10^{-6}$ V

Tabelist 2.1 näeme, et mõõdetava pinge ülempiir on 2,048 V (Uref), eraldusvõime (samm) võimendusel PGA=1 on 15,6 μ V (Microchip Technology Inc., 2008. Table 4-1) ja müratase 1,5 μ V. Vastavalt lähteülesandele peab mõõtmine toimuma eraldusvõimega ja absoluutse põhiveaga mitte halvem kui $\pm 0,5$ %MC. See eeldab, et puidu minimaalsel mõõdetaval niiskusel 7,0 %MC ja niiskusel 7,5 %MC ei tohi seadme sisendpingete erinevus ΔU_{in} jääda alla 15,6 μ V, ehk ADC eraldusvõime.

Eelnevalt valisime etalonpuiduks Douglas-Fir kuuse, mille parameetreid saab lugeda tüüpilisteks, enamuse teiste puiduliike puhul erinevad takistuse ja niiskuse sõtuvused ± 1 %MC võrra. Graafikust 1.1 ja Lisas toodud tabelist L.1 leiame Douglas-Fir kuusel

$$R_p (7,0 \% MC) \approx 22 \text{ G}\Omega$$

$$R_p (8,0 \% MC) \approx 5 \text{ G}\Omega$$

$$R_p (7,5 \% MC) \approx \sqrt{22 * 5} \approx 11 \text{ G}\Omega$$

Kasutades pingejaguri valemit 2.3, saame välja arvutada vahe U_{in} (7 %MC) ja U_{in} (7,5 %MC) koormustakisti valitud väärtusel, mida võrdleme ADC sammuga. Koormustakisti väärtuse valime nii, et kasutada ADC mõõteulatust maksimaalselt. Kontrollime tulemusi valitud koormustakisti $R_t = 500 \text{ k}\Omega$ puhul:

$$U_{in} (20 \%MC) \approx 0,8 \text{ V}$$

$$U_{in-max} = 0,8 \text{ V} < 2,048 \text{ V (Uref)}$$

$$U_{in} (7,0 \%MC) \approx 110 \mu\text{V}$$

$$U_{in-min} \approx 110 \mu\text{V}$$

$$U_{in} (7,5 \%MC) \approx 220 \mu\text{V}$$

$$\Delta U_{in} (7,0 / 7,5 \%MC) \approx 110 \mu\text{V}$$

$$U_{in} (8,0 \%MC) \approx 500 \mu\text{V}$$

$$\Delta U_{in} (7,5 / 8,0 \%MC) \approx 280 \mu\text{V}$$

Valitud R_t väärtus sobib antud kriteeriumitesse. Väikseim ΔU_{in} on ligi 7 korda suurem ADC lahutusvõimest ja suurim U_{in} on ligi 2,5 korda väiksem, kui ADC mõõteulatus, mis annab piisava varu ka teiste puiduliikide puhul.

Elektromagnetiliste häirete esmaseks mahasurumiseks ühendame puiduniiskuse kanalite koormustakistitega paralleelselt kondensaatorid, tekitades madalpääsufiltrid lõikesagedusega 1...2 Hz. Täiendav signaali filtreerimine toimub digitaalselt mikrokontrolleri poolt. Kuna puidu takistuse muutumine toimub äärmiselt aeglaselt (päevade jooksul), siis saame kasutada signaali pikaajalist keskmistamist, et ära filtreerida mürad ja häired.

2.3.4. Kaitsetakisti valik

Joonisel 1.3 kujutatud sisendahelasse oleme lisanud kaitsetakisti R_k , mis on ettenähtud voolu I_m piiramiseks läbi mõõteahela ja toiteallika ülekoormuse vältimiseks puiduniiskuse mõõteelektroodide juhusliku lühistamise või maandamise puhul. Kaitsetakisti R_k väärtus peaks olema tühine võrreldes puidu minimaalse takistusega R_{p-min} (niiske puidu puhul, mõõtepiirkonna ülempiiril) ja termistori minimaalse takistusega $R_{NTC-min}$, et selle mõju puiduniiskuse arvutustele oleks oluliselt, ehk vähemalt kolm korda väiksem seadme lubatud mõõteveast.

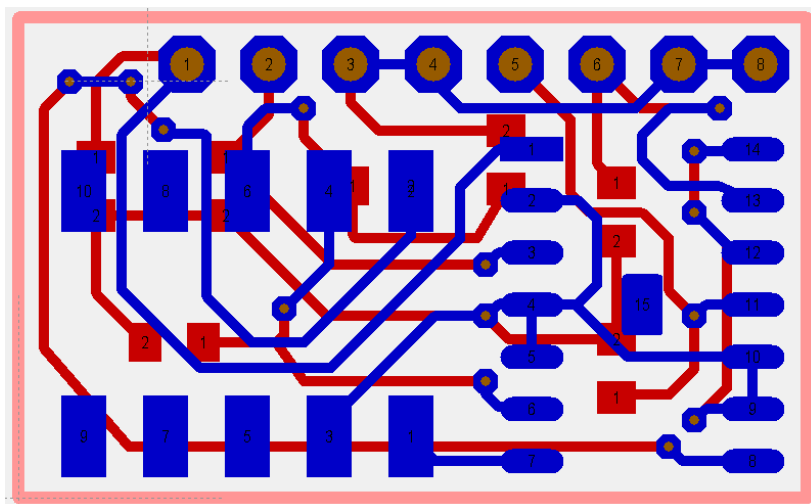
R_k valikul arvestatavad kriteeriumid:

- 1) $R_k \ll R_p \Rightarrow R_k < 0,1 R_{p-min} \Rightarrow R_k < 100 \text{ k}\Omega$
- 2) $R_k \ll R_{NTC} \Rightarrow R_k < 0,1 R_{NTC-min} \Rightarrow R_k < 200 \Omega$
- 3) Lühisvool $I_m < 100 \text{ mA} \Rightarrow R_k > E / I_m = 5 \text{ V} / 100 \text{ mA} = 50 \Omega$

Valime $R_k = 100 \Omega$, mis vastab kõigile kolmele kriteeriumile.

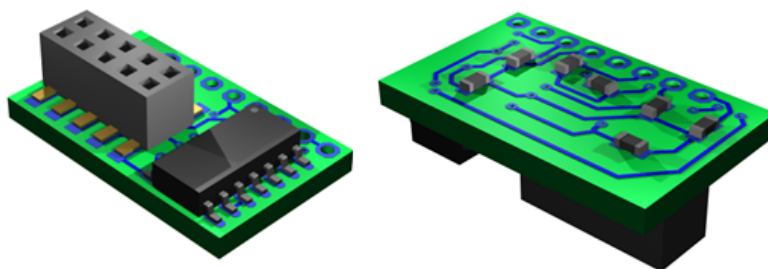
2.4. Mõõtemooduli trükksõlme projekteerimine

Mõõtemooduli trükksõlme disainimiseks oli ettevõtte poolt etteantud rida tingimusi, mida pidi jälgima PCB loomisel. PCB suuruseks on 19.25 x 11.75 mm, mis võimaldab paigaldada mõõtemoodul selleks ettenähtud kohta unifikseeritud mõõtemuunduri „emaplaadil“. CAD keskeskkonnas Target 3001! projekteeritud kahepoolne trükkplaat on kujutatud joonisel 2.4.



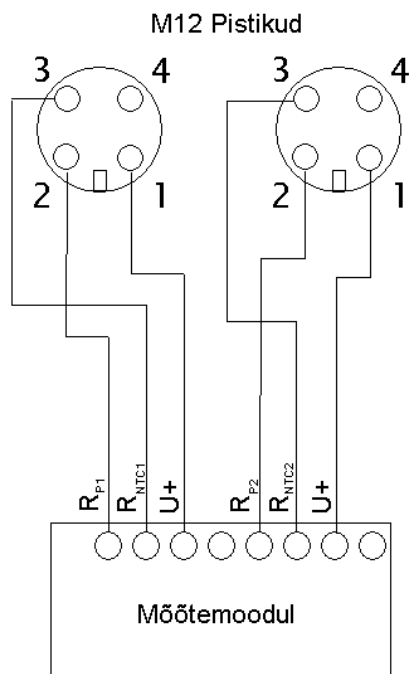
Joonis 2.4. Mõõtemooduli projekteeritud kahepoolne trükksõlm

Valitud ADC MCP3424 on saadaval kahes erinevas korpuses – TSSOP14 ja SOIC14 (Microchip Technology Inc., 2008). Valitud sai korpuse TSSOP14, kuna see sobis oma mõõtude poolest paremini trükkplaadile. Koormus- ja kaitsetakistid ning filtrikondensaatid on suurusega SMD 0603, mis on ettevõtte toodetes enim kasutusel. Mõõtemooduli ühendamiseks „emaplaadiga“ kasutati SMD PIN-head tüüpi *female* pistikut kontaktide sammuga 2 mm. Joonis 2.5 illustreerib monteeritud komponentidega mõõtemooduli välisilmet.



Joonis 2.5 Monteeritud mõõtemoodul.

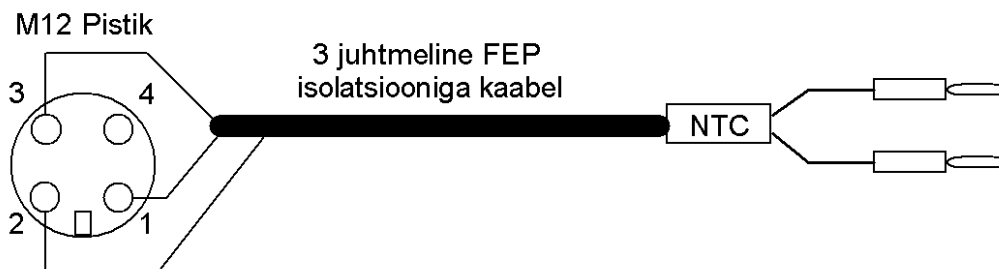
Mõõteahelate juhtmete ühendamiseks tekitati trükkplaadil läbiviigud läbimõõduga 0,8 mm ja sammuga 2,5 mm. Mõõtemooduli trükksõlm ühendatakse kahe M12 pistikuga seadme korpusel, eraldi pistik kummalegi mõõtekanalile. Juhtmete ühendusskeem on esitatud joonisel 2.6.



Joonis 2.6. Kahe mõõtekanali sisendahelate ühendused pistikupesadega

2.5. Kaablite ühendused ja NTC sensori paigutus

Mõõteelektroodide ühendamiseks seadmega on valitud kolmejuhtmeline FEP-tüüpi fluoroplastist isolatsiooniga kaabel, mis on vastupidav kuivatuskambri agressiivsele keskkonnale. Kuna temperatuuri on vaja mõõta lähestikku mõõteelektroodidega, siis paigutame termistori kaabli hargnemis punkti mõõteelektroodide juhtmeteks. Termistor on kaitstud mehaaniliste vigastuste ja keskkonnamõju eest termokahaneva isolatsioonitoruga. Mõõtekaabli konstruktsioon ja ühendused on näidatud joonisel 2.7.



Joonis 2.7. Mõõtekaabli ühendused skemaatilisel

2.3.3. Mõõteelektroodide konstruktsioon

Elektroodideks, mida kasutame puidu takistuse mõõtmiseks, valime kruvielektroodid nende paigalduse lihtsuse ja vastupidavuse tõttu, kuna kruvielektroode on lihtsam ja kiirem paigaldada kui naeielektroode. Naeielektroodide puhul on tiheda ja korrektse paigalduse jaoks vajalik läbida aga kolmekäiguline paigaldusprotsess, mis on ebamugav ja ajakulukas, seega kasutame antud projektis kruvielektroode.

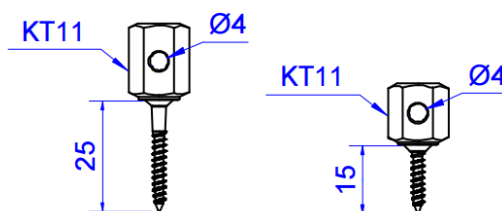
Elektroodide materjaliks valime A2 roosevaba terase, mis tagab piisava korrosioonikindluse kuivatuskambri keskkonas. Kruvielektroodide paigaldus ei vaja ettevalmistust ja näeb ette vaid elektroodide krüvimist saematerjali otsmutrivõtme abil, mis on lihtne protseduur ning tagab kindla ja tiheda kontakti mõõdetava puiduga.

Kruvielektroodide valmistamiseks tuleb kokku keevitada roostavaba puidukruvi ja kuuskantpea KT11. Kruvielektroodi kuuskantpea külgsinna tsentrisse puuritakse ava $\varnothing 4$ mm, mida kasutatakse mõõtekaabli ühendamiseks elektroodidega banaanpistikute abil. Joonisel 2.1 on kujutatud konstrueeritud kruvielektrood.



Joonis 2.1. Projekteeritud kruvielektrood

Kruvielektroodide sissekeeritava osa pikkusteks määrame 15 mm ja 25 mm, mis on ettevõtte klientide poolse tagasiside alusel osutunud optimaalseteks mõõtudeks levinuma paksusega saematerjali jaoks. Joonis 2.2 illustreerib kruvielektroodi mõlemat versiooni.



Joonis 2.2. Kruvielektroodide standardversioonid

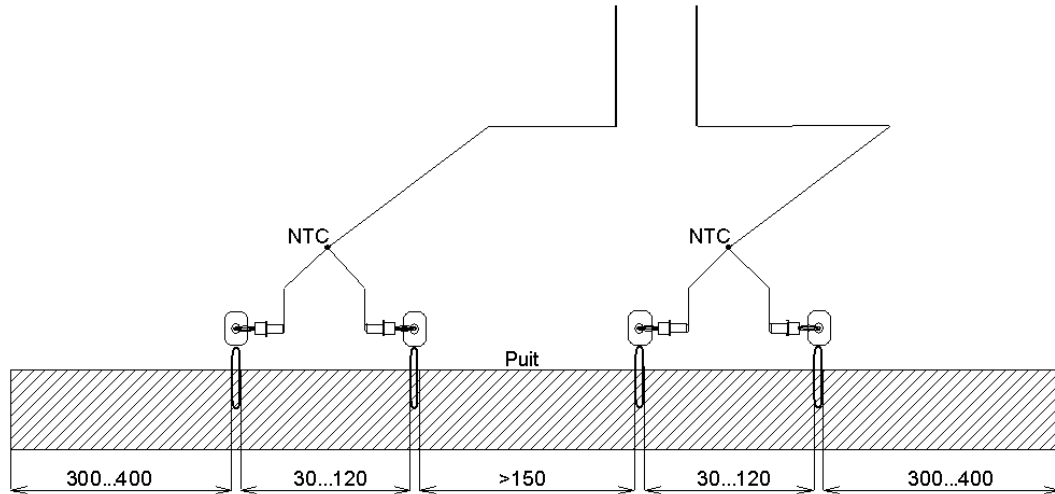
Mõõtemuunduri ja elektroodide vaheline ühendus tagatakse standardsete 4 mm banaapistikute abil, mis sisestatakse kuuskantpea avasse, tagades tiheda, kindla ja mugava ühenduse mõõteelektroodide ja mõõtemuunduri vahel. Banaapistikud on valitud oma lihtsuse tõttu, kuna igakord kui kuivatis vahetatakse kuivatatavat puitu tuleb mõõteelektroodid uuesti kruvida mõõtekohtadesse. Pidevalt kaabliga ühendatud mõõteelektroodidega oleks see tülikas ja seadme konstruktsioon poleks nii vastupidav. Sellepärast kasutame pistikuid, et mugavalt vahetada mõõtekohtade asukohti peale igat kuivatust.

Pikemad elektroodid on soovitatav ülemises osas kuni keermeni katta teflonisolatsiooniga, et puidukuivatusprotsessi ajal puitu niisutav vesi ei lühistaks seadet ja mõõtmise toimiks vaid etteantud sügavusel. Kruvielektroodid peavad olema kinnitatud samasse kehasse, soovitatavalt risti pinnaga ja omavahelise kaugusega 30...50 mm (Dietsch, 2015).

Mõõtekoha valikul on mõistlik lähtuda kuivahju meetodi juhenditest, seega mõõteelektroodid tuleks asetada vähemalt 30...40 cm kaugusele puidulõikest, kuna peame arvestama sellega, et puit kuivab oma lõikeäärte läheduses kiiremini kui sellest kaugemal.

Holger Forsen'i ja Veikko Tarvainen'i eksperimentaaluuringust selgub, et mõõteelektroodide vahekaugus üksteisest võib varieeruda 30...120 mm piires, mõõtetulemused praktiliselt ei muutunud kui testiti puiduniiskuse seadmeid mõõteelektroodide vahega 20, 30, 60 ja 120 mm. Sellest uuringust võime järeldada, et kui jääda vahemikku 30...120 mm, siis elektroodidevaheline kogutakistus on valdavalt määratud elektroodide lähiümbruse takistusega (Forsen *et. al*, 2000, lk. 33-34).

Erinevad mõõtekohad peaksid asuma üksteisest vähemalt 150 mm kaugusel, et ei tekiks mõõtekohtade vahelisest voolust tingitud anomaaliaid (Dietsch, 2015). Joonisel 2.3 on esitatud paigaldusnõuded konstrueeritud mõõteelektroodidele.



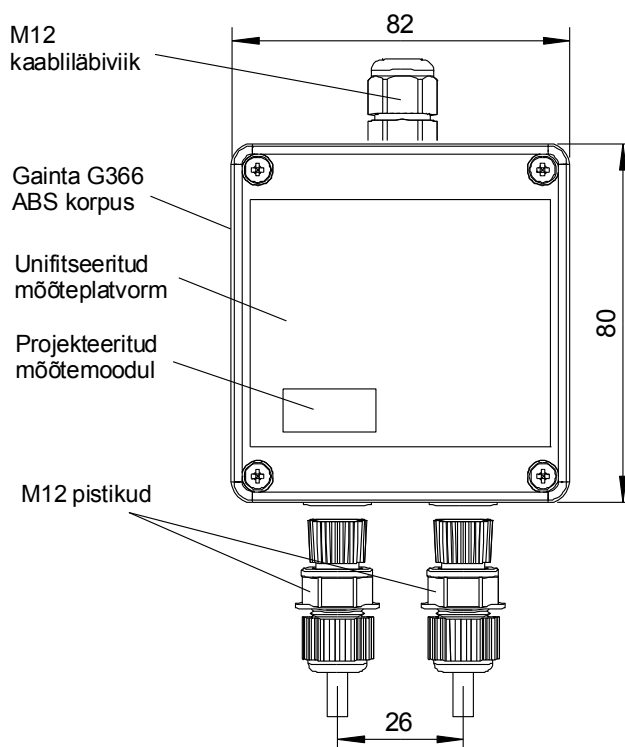
Joonis 2.3. Mõõteelektroodide paigaldusnõuded

Mõõteelektroodide kaablite ühendamiseks seadmega valime ettevõttes kasutatavad nelja kontaktiga M12 pistikud, mis on ettenähtud tööstusautomaatika seadmetesse. Pistikud on kaitseklassiga IP67, see väldib lekkeid juhtmete vahel ja niiskuse või tolmu sattumist mõõtemuunduri korpusesse.

2.6. Seadme korpus

Seadme korpuse valikul peame arvestama, et keskkond kuivatuskambris puidu-kuivatuse protsessi ajal on niiske (kuni 100 %RH, soe (kuni +80 °C) ja tolmu- kui ka veepritsmekindel. Seade peab vastavalt lähteülesandele olema nii tolmu- kui ka veepritsmekindel. Et vastu pidada nendele tingimustele peab mõõtemuuduri korpus vastama IP65 kaitseklassile. Ettevõtte poolt kasutatavate korpuste valikus on Gainta G366, mis on IP65 kaitseklassiga (Gainta Industries Ltd., 2015.). Korpus on valmistatud vastupidavast tumehallist ABS plastikust, mõõtmed on 82 x 80 x 55 mm. Mõõtemuunduri trükksülm kinnitatakse korpusesse horisontaalselt nagadele nelja kruvi abil.

Selleks, et mahutada korpuse ühele küljepinnale kaks M12 pistikut, kuna tegemist on kahe mõõtekanaliga seadmega, tuleb kasutada korpuse 82 mm laiust külge, kuhu tuleb puurida pistikute avad $\varnothing 12$ mm tsentrite vahega 26 mm. Korpuse vastasküljele tuleb puurida ava $\varnothing 16$ mm väljundkaabli läbiviigu jaoks. Väljundkaabli kinnitamiseks kasutame Skintop plastikust kaabliliitmikut, mis tagab kaabli turvalise kinnituse. Sobiv on IP68 kaitseklassiga ja $\varnothing 6$ –12 mm kaablitele ettenähtud kaabliliitmik. Seade korpuses on näidatud joonisel 2.4.



Joonis 2.4. Kahekanaliline puiduniiskuse mõõtemuundur korpuses

2.7. Puiduniiskuse arvutuse algoritm

2.7.1. Puiduniiskuse arvutamine puidutakistuse ja temperatuuri alusel

Forsen ja Tarvainen uurisid puidu elektrilise takistuse sõltuvust niiskusest, puiduliigist ja temperatuurist erinevate puiduniiskuse seadmetega. Nad leidsid, et puidutakistuse muutumiskõverad on üsna sarnased erinevate mõõteseadmetega mõõtmisel, ehkki seadmed on erinevalt kalibreeritud. Samuti viisid nad läbi temperatuuri mõju katsed, mõõtes puidu elektrilist takistust temperatuuridel -10 °C, +5 °C, +20 °C, +40 °C, +60 °C ja +70 °C (Forsen *et al.* 2000. lk. 59).

Puidutakistuse valem, kus on sisse arvestatud temperatuuri mõju, avaldub Samuelssoni mudeli analüüsist järgnevalt (Forsen *et al.* 2000. lk. 24):

$$\log(\log(R) + 2) = -0,00147 T - 0,0262 u - 0,00158 Tu + 1,075, \quad (2.5)$$

kus R – puidu takistus (M Ω),
 u – puidu niiskus (%),
 T – puidu temperatuur (°C)

(Forsen *et al.* 2000, lk. 3-4).

Valemist 2.5 tuletame avaldise 2.6, mille abil saame välja arvutada puiduniiskuse, arvestades selle sõltuvust nii puidu takistusest kui ka temperatuurist:

$$u = -\frac{\log(\log(R)+2)+0.00147 T-1.075}{0.000158T+0.0262} \quad (2.6)$$

Valemit 2.6 kasutame puiduniiskuse väljaarvutamiseks mikroprotsessori poolt, pärides ADC-st temperatuuri ja puidutakistuse mõõtekanalitest vastavaid mõõtetulemusi. Muutujate väärtused arvutatakse välja kasutades ADC teisendusvalemeid. Valemites kasutatavad konstandid sisestatakse ja salvestatakse protsessikontrolleri vahemällu selle käivitamise ajal vastavalt valitud puiduliigile. Mõõtmisprotseduuri diagramm on toodud Lisas 3.

2.7.2. Puidutakistuse ja temperatuuri arvutused

Puidutakistuse ja temperatuuri arvutamiseks kasutame seost ADC sisendpinge ja selle digitaliseeritud mõõtetulemuse vahel vastavalt avaldisele 2.7. (Seidle, SparkFun Electronics, 2013.).

$$\frac{Br}{U_{ref}} = \frac{N}{U_{in}}, \quad (2.7)$$

kus Br – ADC resolutsioon,
 U_{ref} – ADC referentspinge,
 N – Numbriline väärtus, mis vastab sisendpingele,
 U_{in} – Sisendpinge

Mikrokontrolleri programmeerimiseks kasutame ADC muunduri ja valitud komponentide tootelehti, kust leiame ülesande lahendamiseks lähteandmed. Salvestame vaikeväärtused mikrokontrolleri vahemällu, mida protsessor kasutab, et välja arvutada puidu takistuse, kasutades valemit 2.7, ja salvestades kahes mõõtekohas määratud puiduniiskuse vastavatesse Modbus registritesse.

Lähteandmed puidutakistuse arvutamisel:

$$U_{ref} = 2,048 \text{ V}$$

$$Br = 18 - 1 = 17 \text{ bit}$$

$$R_T = 500 \text{ k}\Omega$$

$$E = 5 \text{ V}$$

Avaldame valemist 2.7 digitaalsignaali väärtuse, et saada valem 2.8.

$$N = \frac{Br * U_{in}}{U_{REF}} \quad (2.8)$$

Avaldame sisendpingest puidutakistuse, et saada puidutakistuse valem 2.9.

$$R_P = \frac{E * R_T}{U_{IN}} - R_T \quad (2.9)$$

Avaldame puidutakistuse ADC väljundist

$$R_P = R_T \left(\frac{Br * E}{N * U_{REF}} - 1 \right) \quad (2.10)$$

Kasutades eeltoodud valemeid ja protseduuri, saame unifitseeritud mõõtemuunduri mikrokontrolleri programmeerida küsitama Microchip MCP3424 ADC-d ja arvutama puidutakistuse kahes erinevas mõõtekanalis. Analoogselt arvutatakse ka temperatuuri.

Lähteandmed temperatuuri arvutamisel:

$$U_{REF} = 2,048 \text{ V}$$

$$Br = 18 - 1 = 17 \text{ bit}$$

$$T_0 = 298 \text{ K}$$

$$R_0(25 \text{ }^\circ\text{C}) = 10 \text{ k}\Omega$$

$$R_N = 100 \text{ }\Omega$$

$$B = 3942 \text{ K}$$

$$E = 5 \text{ V}$$

Temperatuuri arvutamiseks sobib Steinharti-Harti kolmandat järku eksponentsiaalne võrrand (Lavenuta, 2013). Siin tuleb tähele panna, et selle võrrandiga arvutame temperatuuri välja kelvinites, kuid puiduniiskuse arvutamiseks tuleb temperatuur ümberarvutada Celsiuse skaalasse.

Steinharti-Harti kolmandat järku eksponentsiaalne võrrand (Lavenuta, 2013).

$$R_{NTC} = R_0(25 \text{ }^\circ\text{C}) * e^{B * (\frac{1}{T} - \frac{1}{T_0})}, \quad (2.11)$$

kus R_{NTC} – termistori takistus,

$R_0(25 \text{ }^\circ\text{C})$ – termistori takistus nimitemperatuuril,

B – B-parameeter,

T_0 – nimitemperatuur kelvinites (298 °K).

Avaldame temperatuuri valemist 3.6, et saada valem 3.7 temperatuuri väärtus kelvinites. Temperatuur Steinharti-Harti võrrandist Celsiuses arvestades, et lihtsustatuna $0 \text{ }^\circ\text{K} = -273 \text{ }^\circ\text{C}$

$$T = \frac{1}{\frac{\ln \frac{R_{NTC}}{R_0}}{B} + \frac{1}{T_0}} - 273 \quad (2.12)$$

Temperatuur ADC väljundist

$$T = - \left(\frac{1}{\frac{\ln\left(\frac{Br \cdot E}{R_N N \cdot U_{ref} - 1}\right) - R_K}{\frac{R_0}{B} + \frac{1}{T_0}}} \right) - 273 \quad (2.13)$$

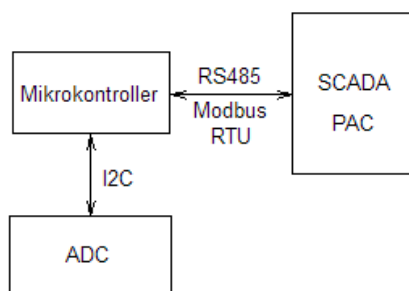
Kasutades termistori jaoks koostatud valemeid saame unifitseeritud mõõtemuunduri mikrokontrollerit programmeerida, et see arvutaks välja temperatuuri kummaski mõõtekanalis.

MCP3424 ADC kanalite määrangud on järgnevad:

- CH1 - puidutakistus mõõtekohas 1
- CH2 - puidutakistus mõõtekohas 2
- CH3 - temperatuur mõõtekohas 2
- CH4 - temperatuur mõõtekohas 1

Kui ADC mooduli ja mikrokontrolleri vaheliseks andmevahetuseks kasutame I2C protokollit, siis puidukuivati automaatjuhtimissüsteemis pöördub protsessikontroller E8810 mõõtemuunduri poole, kasutades Modbus RTU protokollit RS485 võrgus, et perioodiliselt lugeda mõõtemuunduri Modbus registritest välja arvatud puiduniiskuse. Modbus võrgus on protsessikontroller määratud Master ja mõõtemuundur Slave seadmeks.

Ülevaade puidukuivati kontrollsüsteemi andmevahetusest on toodud joonisel 2.9.



Joonis 2.9 Süsteemi töötamise põhimõte

Projekteeritud seadme täielik funktsionaalskeem on esitatud lisa 4.

KOKKUVÕTE

Bakalaureusetöö teema kujunes välja autori tööandja Evikon MCI OÜ juhataja Madis Einasto ettepanekul. Ülikoolipoolseks juhendajaks oli autorile Tallinna Tehnika-ülikooli Mehhatroonikainstituudi nooremteadur Ahti Põlder.

Lõputöö ülesanne tekkis ettevõtte vajadusest välja arendada puidukuivati automaatjuhtimissüsteemile kahekanaline termokompenseeritud puiduniiskuse mõõtemuundur etteantud unifitseeritud platvormil.

Projekteerimise algfaasis analüüsis autor puiduniiskuse mõõtemetodeid, mille käigus valiti projekti sobiv tehnoloogia puiduniiskuse mõõtmiseks. Varasem prototüüpseade kasutas puiduniiskuse määramiseks alalisvoolu takistuse meetodit, andes rahuldavaid tulemusi, seega mõõtemetodi valikul arvestati ka eelneva kogemusega.

Puidu takistuse temperatuurisõltuvuse kompenseerimine lahendati NTC termistori lisamisega mõõteahelasse, mille abil mõõdetakse temperatuuri mõõtekohtades.

Autor arendas välja mõõtemooduli trükksõlme, valides arvutuste tulemusena sobiva 18-bitise resolutsiooniga I^2C liideseaga $\Delta\Sigma$ ADC ja muud komponendid ning projekteerides mooduli trükkplaadi Target 3001! CAD keskkonnas.

Puitu sissekeeratavate mõõteelektroodide konstrueerimisel arvestati eelnevalt ettevõtte klientidepoolse tagasisidega. Elektroodide projekteerimiseks ja dimensioneerimiseks kasutati raalprojekteerimisprogramme SolidWorks ja TurboCAD.

Seadmele valiti tolmu- ja veekindel korpus, kaablite ühendusteks kasutati M12 pistikuid ja kaabliläbiviike tagamaks seadme töökindluse puidukuivatuskambri tingimustes.

Töö viimases etapis autor koostas puiduniiskuse arvutamise algoritmi, sh termokompensatsiooni, ja mõõteprotseduuri diagrammi, mis edastati ettevõtte tarkvarainseneridele, kes vastavalt programeerivad unifitseeritud mõõtemuunduri mikrokontrolleri.

Projekti võib lugeda õnnestunuks, sest selle eesmärk ja peamised püstitatud ülesanded said edukalt täidetud. Seadme projekteerimisel minimeeriti tootmisomahinda ja seetõttu võib eeldada, et projekteeritud lahendus juurutatakse ettevõtte poolt tootmisesse juba 2016.a III kvartalis, mis parandab oluliselt puidukuivatite automaatjuhtimissüsteemide funktsionaalsust.

SUMMARY

The topic of the Bachelor's thesis was proposed by CEO of Evikon MCI OÜ Madis Einasto. The thesis was tutored by Ahti Põlder, early-stage researcher at Department of Mechatronics in Tallinn University of Technology.

The thesis assignment has evolved from the company need to design a new two-channel temperature compensated lumber moisture transmitter for automatic timber dryer control systems on the basis of unified transducer platform.

In the early stage of the project the author analysed the methods of determining moisture content in lumber and chose a suitable method for moisture measurement in this application. The promising test results of an earlier resistance type prototype were considered when choosing the optimal technological solution for the device.

To achieve temperature compensation while measuring lumber resistance, NTC thermistors were added to measure temperature at the measuring point.

The author selected a suitable 18-bit $\Delta\Sigma$ ADC with I²C interface and other components for the module based on calculations performed, designed the PCB board of the measurement module, screw type measurement electrodes and the sealed enclosure and cable connectors for the device.

In final phase of the project the author developed an algorithm for calculation of lumber moisture and the diagram of measurement procedure.

The thesis assignments can be considered successful as the goal and main objectives were accomplished. During the transmitter development the cost was minimized and therefore the product is scheduled for production in Q3 2016. This new device will substantially enhance the functionality of timber drying kiln control systems.

KIRJANDUSE LOETELU

Cornell, T. (2015). Voltage and Current Dividers: What They Are and What They Do. <http://www.allaboutcircuits.com/technical-articles/voltage-and-current-dividers-what-they-are-and-what-they-do/> (05.03.2016)

Dietsch, Ph., Franke, S., Frenke, B., Gamper, A., Winter, S. (2015). Methods to determine wood moisture content and their applicability in monitoring concepts. — *Journal of Civil Structural Health Monitoring*. 5 (2), 115-127. SpringerLink (26.02.2016)

Evikon MCI OÜ. E2228 User Manual. (2015). https://www.evikon.ee/pdf/evikon/E2228_UM_EN.pdf (27.04.2016)

EVIKON MCI OÜ. ET201 Datasheet. (2009). https://www.evikon.eu/pdf/evikon/ET201_DS_EN.pdf (27.04.2016)

Forsén, H., Tarvainen, V. (2000). Accuracy and functionality of hand held wood moisture content meters. — *VTT Publications*. 420. Espoo, Technical research center of Finland. <http://www.vtt.fi/inf/pdf/publications/2000/P420.pdf> (04.2016)

Gainta Industries Ltd. (2015). G366/G256. http://www.gainta.com/pdf/g366_g256.pdf (29.04.2016)

Guidelines for on-site measurement of moisture in wood building materials. (2001). http://publications.gc.ca/collections/collection_2011/schl-cmhc/NH15-456-2001-eng.pdf (25.02.2016)

Hartley, J., Marchant, J. (1995). Methods of determining the moisture content of wood. Technical paper, 41. Research Corpus of State Forests of New South Wales, Australia. http://www.dpi.nsw.gov.au/__data/assets/pdf_file/0007/389689/Methods-of-Determining-the-Moisture-Content-of-Wood.pdf (02.03.2016)

James, W. (1988). Electric Moisture Meters for Wood. General Technical Report FPL-GTR-6. — *Forest Products Laboratory*. U.S. Department of Agriculture. <http://www.fpl.fs.fed.us/documnts/fplgtr/fplgtr06.pdf> (05.03.2016)

Lavenuta, G. (2013). An explanation of the beta and Steinhart-Hart equations for representing the resistance vs. temperature relationship in NTC thermistor materials. — *QTI Sensing Solutions*. <https://www.thermistor.com/sites/default/files/specsheets/Beta-vs-Steinhart-Hart-Equations.pdf> (16.05.2016)

Linear Technology Corp. (2005). LTC2485. 24-Bit $\Delta\Sigma$ ADC with Easy Drive Input Current Cancellation and I²C Interface <http://cds.linear.com/docs/en/datasheet/2485fd.pdf> (10.02.2016)

Microchip Technology Inc. (2008). MCP3422/3/4. 18-Bit, Multi-Channel $\Delta\Sigma$ Analog-to-Digital Converter with I2C™ Interface and On-Board Reference.
<http://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/22088b.pdf> (10.03.2016)

Mitchell, P. (2005). Methods of Moisture Content Measurement in the Lumber Furniture Industries. — *Wood Products Notes*. Department of Wood and Paper Sciences, College of Forest Resources, North Carolina State University. Raleigh, NC.
https://www.ce.ncsu.edu/nreos/wood/wpn/methods_moisture.htm (10.03.2016)

Nathan Seidle, Sparkfun Electronics. (2013). Analog to Digital Conversion.
<https://learn.sparkfun.com/tutorials/analog-to-digital-conversion/all> (29.04.2016)

Selco Products. (2015). NTC Resistance-Temperature Table.
http://educyclopedia.karadimov.info/library/NTC_Resistance%20-%20Temperature%20Table.pdf (02.04.2016)

Skaar, Ch. (1988). Electrical Properties of Wood. — *Springer Series in Wood Science*. SpringerLink.
<http://link.springer.com/book/10.1007%2F978-3-642-73683-4> (05.03.2016)

Tamme, V., Muiste, P., Tamme, H. (2014). Experimental study of resistance type wood moisture sensors for monitoring wood drying process above fibre saturation point / Takistus-tüüpi puidu niiskuse andurite eksperimentaalne uurimine puidu kuivatamise monitooringul niiskussisaldustel üle kiu küllastuspunkti. — *Forestry Studies*. 59 (1), 28–44. EBSCOhost (26.02.2016)

Wood moisture meter. An engineer's approach to woodworking.
https://woodgears.ca/lumber/moisture_meter.html (29.04.2016)

LISAD

Lisa 1

Tabel L.1.1. Douglas-fir takistuse sõltuvus puiduniiskusest (80 °F juures)

Species of wood	Moisture content (pct)																								
	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	Resistance (MΩ)					
<i>Conifers</i>																									
Baldcypress	12,600	3,980	1,410	630	265	120	60	33	18.6	11.2	7.1	4.6	3.09	1.78	1.26	0.91	0.66	0.51	0.42						
Douglas-fir (coast region)	22,400	4,780	1,660	630	265	120	60	33	18.6	11.2	7.1	4.6	3.09	2.14	1.51	1.10	.79	.60	.46						

Tabel L.1.2. Douglas-fir puiduniiskuse sõltuvus temperatuurist

Table A-3. Combined correction factor for the Douglas Fir - Larch (D Fir-L) species grouping

Wood Temp. °C.	METER READING																													
	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30						
-40	14	16	17	19	21	22	24	26	27	29																				
-35	13	15	17	18	20	21	23	25	26	28	30																			
-30	13	14	16	17	19	21	22	24	25	27	29	30																		
-25	12	14	15	17	18	20	21	23	24	26	28	29																		
-20	11	13	14	16	18	19	21	22	24	25	27	28	30																	
-15	11	12	14	15	17	18	20	21	23	24	26	27	29	30																
-10	10	12	13	15	16	18	19	20	22	23	25	26	28	29	30															
-5	10	11	13	14	15	17	18	20	21	22	24	25	27	28	29															
0	9	11	12	13	15	16	18	19	20	22	23	24	26	27	28	30														
5	9	10	12	13	14	16	17	18	20	21	22	23	25	26	27	29	30													
10	9	10	11	12	14	15	16	18	19	20	21	23	24	25	26	28	29	30												
15	8	9	11	12	13	14	16	17	18	19	21	22	23	24	26	27	28	29												
20	8	9	10	11	13	14	15	16	17	19	20	21	22	23	25	26	27	28	30											
25	7	9	10	11	12	13	14	16	17	18	19	20	21	23	24	25	26	27	29	30										
30	7	8	9	10	12	13	14	15	16	17	18	20	21	22	23	24	25	26	28	29	30									
35	7	8	9	10	11	12	13	14	16	17	18	19	20	21	22	23	24	26	27	28	29	30								
40	6	7	8	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	22	23	24	25	26	27	28	29	30							
45	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30						
50	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29						

- Notes:
1. This table represents an average correction for D fir-L based on interior and coastal Douglas-fir, and western larch.
 2. See notes in text with regard to implications regarding meter accuracy when using these tables.
 3. Data compiled from Forintek Publications "Moisture Content Correction Factors for the Resistance-Type Moisture Meter, Eastern Species" publication number SP511E [6] and Moisture Content Correction Tables for the Resistance-Type Moisture Meter, Western Canadian Species [7].

Lisa 2

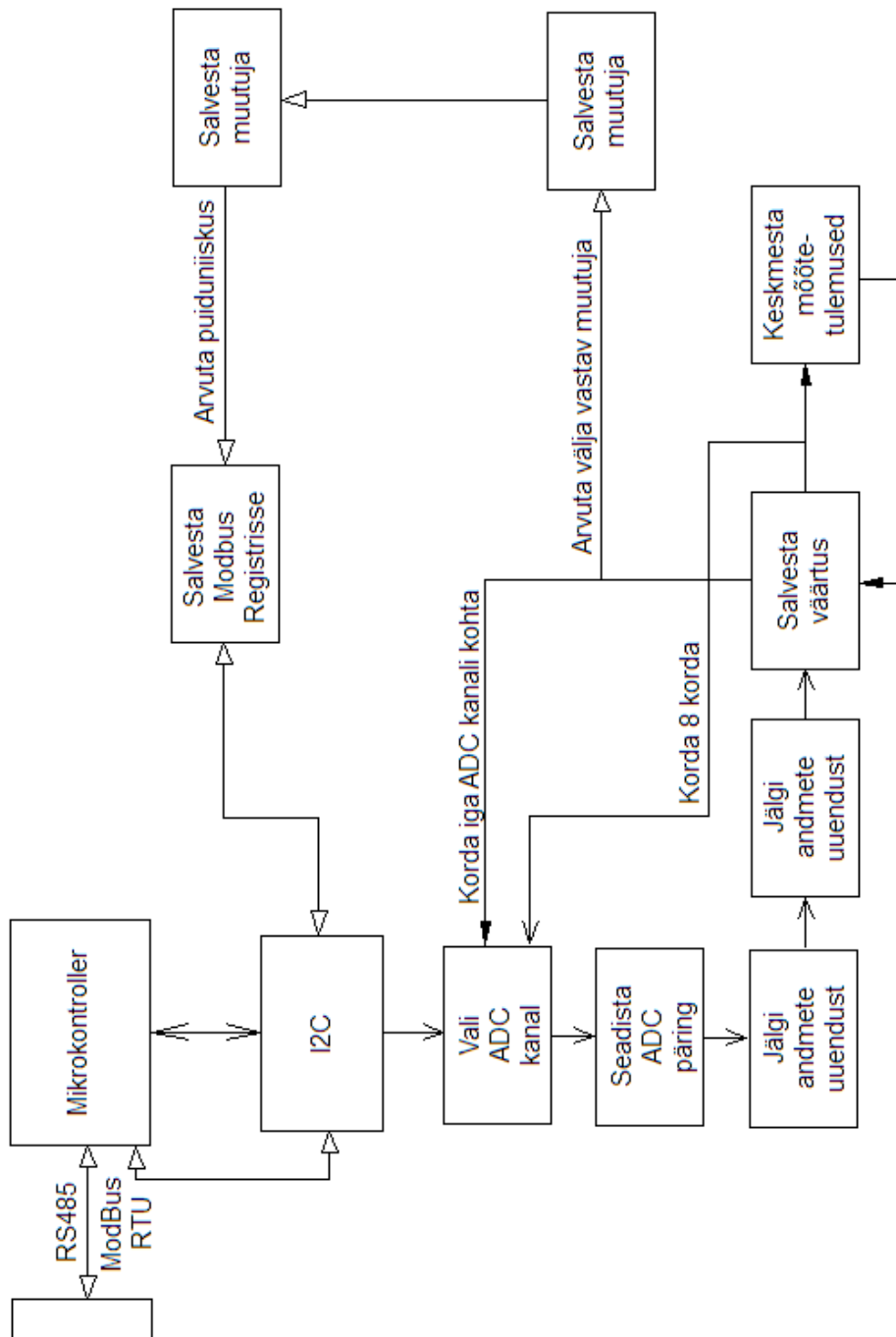
Tabel L.2.1. NTC takistuse sõltuvus temperatuurist

β at 25°C/85°C	Curve A		Curve B		Curve C		Curve D		Curve E	
	3975K		3942K		3695K		4262K		4434K	
	Typical R ₂₅ = 1K to 100K		Typical R ₂₅ = 10K to 100K		Typical R ₂₅ = 5K to 20K		Typical R ₂₅ = 25K to 100K		Typical R ₂₅ = 1K to 200K	
	R _T /R ₂₅ RATIO		R _T /R ₂₅ RATIO		R _T /R ₂₅ RATIO		R _T /R ₂₅ RATIO		R _T /R ₂₅ RATIO	
Temperature °C	RATIO	NTC	RATIO	NTC	RATIO	NTC	RATIO	NTC	RATIO	NTC
	-50	67.13	7.1	56.39	6.7	44.13	6.3	82.36	7.4	89.69
-45	47.26	6.9	40.56	6.5	32.36	6.1	57.30	7.1	62.25	7.2
-40	33.69	6.7	29.48	6.3	23.97	5.9	40.34	6.9	43.69	7.0
-35	24.29	6.4	21.64	6.1	17.92	5.3	28.72	6.7	30.98	6.8
-30	17.71	6.2	16.03	5.9	13.52	5.6	20.67	6.5	22.20	6.6
-25	13.05	6.0	11.99	5.7	10.29	5.4	15.02	6.3	16.06	6.4
-20	9.711	5.8	9.040	5.6	7.891	5.2	11.03	6.1	11.73	6.2
-15	7.297	5.6	6.875	5.4	6.102	5.1	8.174	5.9	8.644	6.0
-10	5.534	5.4	5.270	5.2	4.754	4.9	6.113	5.7	6.425	5.8
-5	4.234	5.3	4.071	5.1	3.731	4.8	4.611	5.6	4.816	5.7
0	3.266	5.1	3.168	4.9	2.949	4.6	3.507	5.4	3.638	5.5
5	2.540	5.0	2.483	4.8	2.346	4.5	2.689	5.2	2.770	5.4
10	1.991	4.8	1.959	4.7	1.879	4.4	2.077	5.1	2.125	5.2
15	1.572	4.7	1.556	4.5	1.514	4.3	1.617	4.9	1.642	5.1
20	1.249	4.5	1.244	4.4	1.227	4.1	1.267	4.8	1.277	5.0
25	1.000	4.4	1.000	4.3	1.000	4.0	1.000	4.7	1.000	4.8
30	0.8056	4.3	0.8088	4.2	0.8196	3.9	0.7943	4.5	0.7881	4.7
35	0.6530	4.1	0.6579	4.1	0.6754	3.8	0.6349	4.4	0.6250	4.6
37	0.6014	4.1	0.6066	4.0	0.6260	3.8	0.5815	4.4	0.5706	4.5
40	0.5325	4.0	0.5380	4.0	0.5594	3.7	0.5106	4.3	0.4986	4.5
45	0.4367	3.9	0.4423	3.9	0.4655	3.6	0.4130	4.2	0.4001	4.3
50	0.3601	3.8	0.3654	3.8	0.3893	3.5	0.3359	4.1	0.3228	4.2
55	0.2985	3.7	0.3034	3.7	0.3270	3.4	0.2747	4.0	0.2619	4.1
60	0.2487	3.6	0.2531	3.6	0.2760	3.4	0.2259	3.9	0.2136	4.0
65	0.2082	3.5	0.2121	3.5	0.2338	3.3	0.1866	3.8	0.1750	3.9
70	0.1752	3.4	0.1785	3.4	0.1990	3.2	0.1549	3.7	0.1441	3.8
75	0.1480	3.3	0.1508	3.3	0.1700	3.1	0.1293	3.6	0.1193	3.7
80	0.1256	3.2	0.1280	3.2	0.1457	3.0	0.1083	3.5	0.09915	3.7
85	0.1071	3.2	0.1091	3.2	0.1254	3.0	0.09115	3.4	0.08278	3.6
90	0.09161	3.1	0.09327	3.1	0.1084	2.9	0.07704	3.3	0.06941	3.5
95	0.07870	3.0	0.08006	3.0	0.09392	2.8	0.06538	3.2	0.05844	3.4
100	0.06786	2.9	0.06897	2.9	0.08168	2.8	0.05570	3.2	0.04940	3.3
105	0.05873	2.9	0.05962	2.9	0.07127	2.7	0.04764	3.1	0.04192	3.2
110	0.05100	2.8	0.05171	2.8	0.06237	2.6	0.04089	3.0	0.03571	3.2
115	0.04444	2.7	0.04500	2.8	0.05476	2.6	0.03522	2.9	0.03053	3.1
120	0.03885	2.7	0.03928	2.7	0.04821	2.5	0.03045	2.9	0.02619	3.0
125	0.03408	2.6	0.03439	2.6	0.04257	2.5	0.02641	2.8	0.02254	3.0
130	0.02997	2.5	0.03020	2.6	0.03769	2.4	0.02298	2.8	0.01947	2.9
135	0.02645	2.5	0.02660	2.5	0.03346	2.4	0.02006	2.7	0.01687	2.8
140	0.02340	2.4	0.02349	2.5	0.02979	2.3	0.01756	2.6	0.01467	2.8
145	0.02076	2.4	0.02080	2.4	0.02658	2.3	0.01542	2.6	0.01279	2.7
150	0.01487	2.3	0.01846	2.4	0.02377	2.2	0.01358	2.5	0.01118	2.7

Lisa 3

Joonis L 3.1. Seadme mõõtettsükli diagramm

Mõõtettsükkel



Lisa 4

Joonis L 4.1 Seadme funktsionaalskeem

