



TALLINNA TEHNIKAÜLIKOOL  
INSENERITEADUSKOND  
Instituudi nimetus

# **PID KONTROLLERI DISAIN TÖÖSTUSLIKULE KOHVIAUTOMAADILE**

## **PID CONTROLLER DESIGN FOR COMMERCIAL COFFEE MACHINE**

BAKALAUREUSETÖÖ

Üliõpilane: Maksim Gerassimenko

Üliõpilaskood: 205867 EAAB

Juhendaja: Martin Jaanus, vanemlektor

(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.

"....." ..... 20.....

Autor: .....

/ allkiri /

Töö vastab bakalaureusetöö/magistritööle esitatud nõuetele

"....." ..... 20.....

Juhendaja: .....

/ allkiri /

Kaitsmisele lubatud

"....." .....20... .

Kaitsmiskomisjoni esimees .....

/ nimi ja allkiri /

## **Lihtlitsents lõputöö reprodutseerimiseks ja lõputöö üldsusele kättesaadavaks tegemiseks<sup>1</sup>**

Mina Maksim Gerassimenko:

1. Annan Tallinna Tehnikaülikoolile tasuta loa (lihtlitsentsi) enda loodud teose

PID KONTROLLERI DISAIN TÖÖSTUSLIKULE KOHVIAUTOMAADILE,

mille juhendaja on Martin Jaanus,

1.1 reprodutseerimiseks lõputöö säilitamise ja elektroonse avaldamise eesmärgil, sh Tallinna Tehnikaülikooli raamatukogu digikogusse lisamise eesmärgil kuni autoriõiguse kehtivuse tähtaja lõppemiseni;

1.2 üldsusele kättesaadavaks tegemiseks Tallinna Tehnikaülikooli veebikeskkonna kaudu, sealhulgas Tallinna Tehnikaülikooli raamatukogu digikogu kaudu kuni autoriõiguse kehtivuse tähtaja lõppemiseni.

2. Olen teadlik, et käesoleva lihtlitsentsi punktis 1 nimetatud õigused jäävad alles ka autorile.

3. Kinnitan, et lihtlitsentsi andmisega ei rikuta teiste isikute intellektuaalomandi ega isikuandmete kaitse seadusest ning muudest õigusaktidest tulenevaid õigusi.

---

13.05.2024

---

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

**Elektroenergetika ja mehhatroonika instituut**  
**LÕPUTÖÖ ÜLESANNE**

**Üliõpilane:** Maksim Gerassimenko, 205867

Õppekava, peeriala: EAAB16/17, Elektroenergeetika ja Mehhatroonika

Juhendaja(d): Vanemlektor Martin Jaanus, 56913193 (amet, nimi, telefon)

Konsultant: .....(nimi, amet)

..... (ettevõtte, telefon, e-post)

**Lõputöö teema:**

(eesti keeles) *PID kontrolleri disain tööstusliku kohviautomaadile*

(inglise keeles) PID controller design for commercial coffee machine

**Lõputöö põhieesmärgid:**

1. Uurida teoreetiliselt PID kontrolleri disaini tehniliste aspektid ja simuleerida süsteemi
2. Võimaluse korral tutvuda laiemal auditooriumil kohvi ajaloo ja kontekstiga tänapäeval

**Lõputöö etapid ja ajakava:**

Nr	Ülesande kirjeldus	Tähtaeg
1.	Õpingukava ja lähteülesanne esitamine	05.02.24
2.	teoreetilise osa kirjutamine	30.02.24
3.	arvutuste/mõõtmiste/modelleerimise teostamine	15.03.24
4.	uuringu tulemuste kirjeldamine	25.03.24
5.	järelduste kirjutamine	5.04.24
6.	Lõputöö esitamine eelkaitsmiseks	24.04.24
7.	Kaitsmistaotluse esitamine	06.05.24
8.	Lõputöö esitamine	13.05.24
9.	Kaitsmistaotluse kinnitamine	25.05.24
10.	Juhendaja arvamus	30.05.24
11.	Kaitsmise esitluse faili esitamine	04.06.24
12.	Bakalaurusetööde kaitsmine	05.-10.06.24
13.	Lõpuaktused	19.-28.06.24

**Töö keel:** Eesti keel **Lõputöö esitamise tähtaeg:** ".....".....20.....a

**Üliõpilane:** ..... /allkiri/ ".....".....20.....a  
**Juhendaja:** ..... /allkiri/ ".....".....20.....a  
**Konsultant:** ..... /allkiri/ ".....".....20.....a  
**Programmijuht:** ..... /allkiri/ ".....".....20.....a

*Kinnise kaitsmise ja/või lõputöö avalikustamise piirangu tingimused formuleeritakse pöördel*

# SISUKORD

EESSÕNA .....	7
SISSEJUHATUS .....	8
1.PÕHIOSA .....	10
1.1 Kohvimasina tööpõhimõtte.....	10
1.1.1 Hüdrauliline osa .....	11
1.1.2 Elektriline osa .....	14
1.2 PID regulaator.....	17
1.2.1 PID Algoritmid .....	18
1.2.1.1 Proportsionaallüli.....	18
1.2.1.2 Integraallüli .....	19
1.2.1.3 Diferentsiaal lüli .....	20
1.3 PID kontrolleri projekteerimine .....	22
1.3.1 Juhtseade .....	23
1.3.2 Nulli läbimise detektor .....	24
1.3.3 Temperatuuri andur.....	25
1.3.3.1 Temperatuuri mõõtmised .....	26
1.3.3.2 Temperatuuri anduri kalibreerimine .....	27
1.4 PID häälestamine.....	28
2.KOKKUVÕTE.....	35
3.CONCLUSION .....	36
4.    KASUTATUD KIRJNADUSE LOETELU .....	37
LISAD .....	38

## EESSÕNA

2020 a. sügisel autor astus sisse TTÜ-se Elektroenergeetika ja Mehhatroonika instituudile ja samas hakkas ta töötama kooli kõrval. Üks vastanud CV-le ettevõtetest oli KING COFFEE SERVICE OÜ, kus autor kandideeris tehniku kohale. Töö eesmärk oli algusest lihtne — hooldama kohvimasinaid. Kohvimasina hooldamine on tihendite/kuluosa ja veefiltrite vahetus teatud aja pärast, et tagada baristadele muretu ja jätkusuutlikut masina kasutamist ning parima kohvi maitset. Mõned hooldused toimusid teistes linnades, mis on põnev kogemus oma riiki paremini tundma.

Ajaga läksid oskused kõrgemale tasemele ja töömaht muutus suuremaks/raskemaks. Seega autor hakkas tegema vastutustundlikumat tööd: veekaredus testid/õige veefiltreerimis süsteemi valik, elektritööd (juhtmestikku vahetus ja muud tööd), elektroonika/jõuelektroonika remont ja PID kontrolleri paigaldused. Muidugi ilma töökollektiivi abita/hoolsuseta ei tekkinudki positiivne keskkond töötamiseks ja enesearenguseks. Tehnilise osakonna kolleegid olid alati valmis nõustada, et päeva lõpus mure sai lahendatud. Üks päev pärast PID kontrolleri paigalduse autoril tekkis mõte, et oleva teadmisega võiks oma kontrolleri ka disainida traditsioonilise kohvimasinala (commercial coffee machine) ja avaldada nagu hea bakalaureuse lõputöö ülesanne. Lisaks autor arvab meie/teie linna elanikele on vahva kuulata nii meeldiva jooki masina valmistajast.

Kohvi maailmas PID kontrolleri (Proportsionaalne-Integraalne-Diferentsiaalne kontrolleri) paigaldatakse erineva sektori masinasse:

- Traditsioonilised masinad — La Marzocco, Faema, Nuova Simonelli, Vicotira Arduino jne.
- Superautomaatmasinad — Eversys, Schaerer, Dr.Coffee, Rex-Royal jne.

PID kontrolleriiga saavutatakse kõrgema stabiilsust vee kütmisel nii espresso jaoks kui ka auru jaoks. Lisaks sellele kui masin seisab kasutamata, siis tänu PID kontrollerile süsteem tasakaalustub ja tema elektritarbe on üsna väike, millega võib vabalt jätta kohvimasinat seista üleöö välja lülitamata. Need eelised põhjustavad PID kontrolleri trendi turul nagu „Premium“ varustus. Seega autor soovib oma lõputööga lahti seletada PID kontrolleri väärtust ja efektiivsust peale kohvimaailma tausta.

# SISSEJUHATUS

Kohv on viimased sajandid üks populaarsematest jookidest maailmas tänu oma maitsele, aroomile ja toimele. Igaühel on oma eelistused maitssvale kohvile, kuid meile klassikalised kohvisid (espresso/cappuccino/flat white/latte) leiduvad igas kohvikus. Euroopas kohvitamine on ammu kultuuri osa, enamused ei alusta oma päeva ilma kohvita. Kohvikus käiakse brunch'i ajal, töötamiseks arvuti taha, kohtumiseks kolleegidega/tuttavatega. Inimeste jaoks kohvik on lihtne ja mugav kokkusaamise koht. Muidu kasvas ka amatööri arv, kes oskavad hinnata ja nautida erikohvi (specialty coffee) joomist. Järelikult turul leidis koht ka sellistele ettevõttele, kes suudavad nende amatööri ootused ära täita. Tänapäeval kõrgeima kvaliteediga kohvi pakkumised ei ole enam unistus.

Enne Renessanssi kohviajalugu on näha pigem legendides, mis kirjeldavad ühe puu marjade stimuleeriva toimet. On teada, et üks esimestest looduses kasvavaid kohvipuit leiti Etioopias (vana Kaffa provintsi Abessiinia). Üks legend kõlab järgmiselt, et esimene kohvipuu marjade suurepärase omaduse avastaja on etioopia karjus Kaldi 7-8 sajandil pKr. Ligikaudu samal ajal pärineb arabi keel ja tema ürik, mis kinnitab kohvipuude kasvatamist Etioopias. Kuid tihedamini legendide peategelaseks olid Etioopia mungad. Tänu sellele, et nende elus oli päris palju pikka rünnakuid neil oli laiem silmaring võrreldes teistega. Suure tõenäosusega nad korjasid Kaffa'st kohvimarjad ja töid kuivana kodusse ning uuesti pehmeks ja sõid. Toon ühe põneva fakti: esimese kohvi oad korda röstiti juhuslikult, kui kohvimarjad kukkusid sütele.

Järgmiselt hakkas kohvijook edasi liikuma maailmas ja jõudis Araabia poolsaarele. Sattudes Lähis-Ida regioonides kohalik rahvas võttis imelist joogi vastu hea meelega ja kulutati Allahi kingituseks, järeltõlkesena Islami vaimulikud jõid kohvi ka palvetamise ajal. Muidugi Islam ei olnud sihtpunkt ja kohv liigus edasi maailmasse. Ottomani impeeriumi türklased töid kohvi Konstantinoopolisse ja 1475. aastal tegi oma ukse lahti esimene ajaloos kohvituba Kiva Han. See sündmus tekkis kohvi kiiresti populaarsemaks ja tavalised inimesed võtsid uueks harjumuseks kohvi jooma. See harjumus läks ootamatult nii sügavalt, et inimesed unustasid palvetada. Riik proovis sisse viia ranged reeglid kuni kelleltki elu võtma, et karistuse ohu ees inimesed muutsid käitumisviisi. Õnneks meile tugevad seadused ei takistanud kohvijoomist ja need tühistati. Euroopasse kohv jõudis 16. sajandi lõpus ja kokkuvõttes lugu, kuidas kohvijook integreeris keskkonnale oli sarnane.



Valgustus-/hiilgeajal kohvi valmistati enamasti türgi moodi. See tähendab jahvatatud kohvi keetmine ibrikus. Tähtis märkus, et türgi kohv on valmistus viis — mitte kohvi liik. Aga see võtab 3-5 minutit aega, kuna jook väljastatakse. Kuna 19 sajandi Euroopal kohvi ettevõtlus hakkas hästi sisse tooma raha ärimehel, kohvi kiirem valmistamine pakkus huvi. See oli „katalüsaator“ esimese kohvimasina leiutamiseks. Nii valmistati esimese espressomasina prototüübi 1822. aastal ja leiutaja nimi oli prantslane Edward Bernard Babaut. Aga algseadet arendas edasi turukõlblikuks Edward Loysel de Santais ja 1855. aastal avastas Pariisi maailmanäitusel. Tööpõhimitteliselt võetakse kokku pressitud kohvikupu ja auruklappi avamisel pressiti kuum vett läbi kohvipuru. See oli innovatsioon, kuna masin suutis korduvalt rohkem kohvi valmistada tunnis. Räägitakse, et masinat võimsust jätkus tuhande tassi täitmiseks tunnis. Muidu masinal olid ka puudujäägid, masin jooksis kokku või kõrvetas kohvi ära ja lõpptulemus ei olnud võrdluses parem vanema kohvivalmistamise viisiga.

Kaasaegse espressomasina tööpõhimõtet mõtles välja Milanos Luigi Bezera 1901. aastal. Ta kasutas ~86°C vett ja 1.5 bar´i rõhuga lasis pressitud kohvitabletile. NB! Täna espressovalmistamisel kuldne kesk on 93°C vesi ja 9 bar´i. Väidetavalt mõtles Milanos ka kaasaegse termini „espresso“, mis on itaalia keeles sõna „esprimere“ minevikuvorm ja tähendab „läbi surutud“

Nii arenes kohvikultuur ja tema valmistusviisid. Autor tahab peatuda konkreetselt espressomasina peal ja anda ülevaadet kaasaegse masina ehitusest, kui keerukaks muutis konstruktsioon traditsioonilisel espressomasinatel ja disainida/näidata PID kontrolleri mõju süsteemile.

# 1.PÕHIOISA

Enne PID kontrolleri disainimist ja tema mõju analüüsist on vaja selgeks teha mis asi on see süsteem, mida autor soovib optimeerida PID kontrolleri abil. Peale seda on võimalik edasi liikuda teemasse ning lahti seletada PID kontrolleri nüansid, tema disain ja simulatsioonid.

Sissejuhatuses autor mainis espresso masinat, mis debüteeris Pariisi maailmanäitusel. Vajalik täpsustus on see, et näitusel oli auru-espressomasin(). Nagu oli kirjas, aur on jõud, mis pressib kuuma vett läbi kohvipuru. Aga peale seda on olemas, ka teistsugused masinad, milles kasutatakse erinevat jõudu kuuma vee liikumiseks. Üks nendest on kolb-espressomasin(). Tema eristav tunnus on see, et vee pressimiseks kasutati füüsilise jõudu. Inimene vajutas kangale, et laadida ja pressida kuuma vett läbi kohvipuru. Kõige levinud on pumba-espressomasinad, kus elektripump paneb liikuma vett. Viimase tööpõhimõtet hakkab autor avaldama lugejale antud töös.

## 1.1 Kohvimasina tööpõhimõtte

Iga espresso masin on disainitud meelega, et kütta vett. Mida kallim, seda keerukam on kütmise viis, täpsem/stabiilsem vee temperatuur ja suurem tasside valmistamise võime jahutamata. Espresso masinad liidetakse: auruboileriga ja ilma. Ilma auruboilerita selles töös vaatlema ei hakka, kuna kommerts lahendus nõuab joogi valmistamist „pingi ees“ algusest lõpuni ja lisaks ilma auruboilerita ei saa kohvimasina abil vahustada piima või kätte saada kuuma vett.

Boilerid tehtud roostevaba terasest, torud vasest, masinad disainitakse nii 3-5 aastaks, kui ka üllatavalt 15-20 aastaks. Kohvimasina sees on terve võrk vee-/aurutorudest, juhtmetest ja tänapäeval kohvimaailma masinate ehitus jõudis nii kaugele, et baristad võtavad osa masina disainimes, et arendada toote teiste baristade jaoks.

### 1.1.1 Hüdrauliline osa

Vesi on espresso masina tööks põhiline vedelik, suure tähelepanu pööratakse tema liiklusele masina sees (vt. Joonis 1. Hüdrauliline diagramm, La Marzocco FB-70 3-gruppiline.). Näidiseks on valitud hüdrauliline diagramm espresso masinast La Marzocco FB-70, 3 gruppi. Masina boilerid on valmistatud AISI 316L terasest. Torude, solenoidi ja veelenduri kehade materjaliks on laialt levinud vasest.

Joonisest on näha kuidas liigub vesi topelt boileriga espressomasinal. Vesi sattub pumbast (nr. 1) sisse, kus jaotub espresso ja auruboileri täitmiseks jaotil (nr. 4). Espresso boiler tavaliselt on täidetud veega lõpuni ja tema rõhk on näha analoog anduril (nr. 16) ja üle rõhku laskmiseks on paisumis ventiil (nr. 21). Nominaal rõhk kuumal espresso boileri on kuni 12 bar'i ja kohvi vee pruulides 9.

Vesi on aine, mis paisub jääval rõhul tõstes temperatuuri 1°C võrra ja rohkem, kuid antud süsteemis rõhk hakkab tõstma ka, kuna vesi paisub suletud kontuuril. Seda, kui palju paisub vesi algsest mahust kirjeldab soojuspaisumise koefitsient  $\beta$  (vt. tabel 3, Lisa peatükk). See koefitsient annab võimaluse arvutada teoreetiliselt paisunud vee mahtu seosega:

$$dV = V_0 * \beta * (t_1 - t_0) \quad (1.1)$$

Kus,

$dV = V_1 - V_0$  — on vee paisumisel tekkinud lisa veemaht,  $m^3$ ;

$V_0$  — esialgne veemaht,  $m^3$ ;

$V_1$  — saavutatud veemaht,  $m^3$ ;

$\beta$  — soojuspaisumise koefitsient,  $\frac{1}{^\circ C}$ ;

$t_0$  — esialgne veetemperatuur,  $^\circ C$ ;

$t_1$  — saavutatud veetemperatuur,  $^\circ C$ ;

Lähtudes valemist 1.1 arvutame vee paisumisel tekkitud lisa vee mahtu, võttes boileri mahuks tehases antud väärtust 5l. Vee temperatuuri tõstmisel 10°C kuni 90°C peaks arvestama soojuspaisumise koefitsienti ning on võimalik arvutada ka paisunud vee mahu:

$$dV = 0.005m^3 * 0.000640 * (90^\circ C - 10^\circ C) = 0.000256m^3 = 0.256l = 256ml$$

See nähtavus seletab, miks paisumis ventiil on hädavajalik süsteemis. Kuna veetrassi surve tavaliselt on 3-5 bar'i, siis vee pruulides läbi kohvi muidu süsteemi rõhk tõuseb tänu vee paisumisele, kuid rõhk jääb liiga madalaks, aga espresso valmistamine mõtleb

väikese veekoguse väljustamine suurtel rõhudel. Selle jaoks kasutatakse labapumbad(Joonis 2. Labapump). Laia kasutuse kohvimasinates võtsid pumbad kaubamärgi Fluid-o-Tech. Need on üks labapumba liigist, mis lisavad energiat vedelikele rakendades jõudu mehaaniliselt. Nende pumbade tunnuseks on voolukiiruse proportsionaalne sõltuvus mootori pöörlemiskiirusest. Rakendades pöördmomendi pumba veovõlile pöörleb ka rootor. Rootoris on paigaldatud väiksed plaadid, mis asuvad rootori pöörlemissuuna suhtes 12-14° kaldu. Need labad liiguvad vabalt rootori sees. Tsentrifugaal jõud surub rootoris paigutatud plaadid staatori korpuse vastu, mille tulemusena moodustuvad hermeetiliselt suletud õõnsused, mille kogus tingitud plaatide arvuga. Ühe õõnsuse maht suureneb järk-järgult(toimub imemine õõnsusesse) ja samas väheneb teise õõnsuse maht(vedelike süstimine õõnsusest).

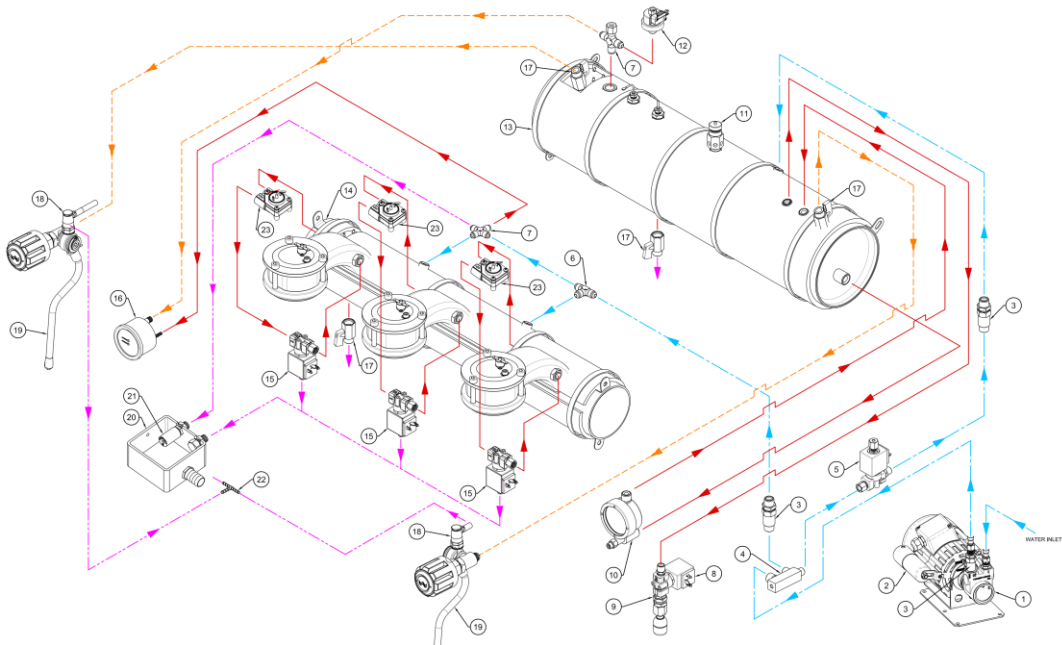
Kuna veerõhud on piisavalt suured on vaja kohvi vee pruulides veekoguse mahtu piirata väljustamisel, et ta ei pritsinud laialai, vaid ilusti voolas sirgelt alla lai pinnaga. Vee surve piiramiseks kasutatakse erikruvi „gicleur“, mille sees on väike auk. Tavaliselt augu diameeter on 0.6-0.8 mm ja paigaldatakse mugaval hüdraulilise kohal. Selleks, et vesi voolas gruppist alla lai pinnaga kasutatakse „shower screen“ ehk sõel, et vesi jaotus teatud pinnal ühtlaselt ja voolas alla.

Veekoguse on võimalik doseerida käsitsi või veeloenduri abil(nr. 23). Tema töö põhineb Hall efektil. Veeloendur koosneb tahkest kehast, mille sees on propeller kahe magnetiga. Peal on elektrimagnet andur, mis mõõdab propelleri pöörlemist. Järgmisena on solenoid(nr. 15), mis avaneb voolu rakendamisel mähisele ja sealt vesi liigub gruppist välja, mis asub solenoidist üleval. Kõik nimetatud espresso boileril süsteemid on tehtud eesmärgiga teenindama barista soovid ja tagada stabiilsust suurel kliendi vooludel.

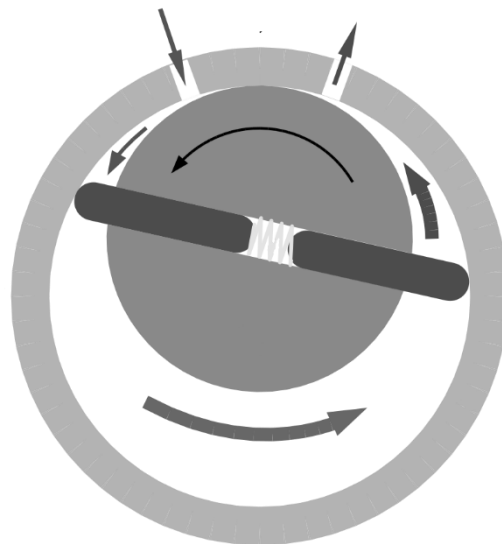
Auruboileri ülesandeks on genereerida auru. Vesi auruboilerisse sattub auto-fill solenoidi(nr.5) avamisel ja täidab nii kaua, kui vee taseme andur määrab õiget vee kogust. Ainult lõpetades auruboileri täitmist hakkab kohvmasin edasi kütma vett. Auruboileri rõhk on tavaliselt 1.5 bar´i ja see on võimalik seadistada rõhu releega, nagu näidatud diagrammil(nr. 12).

Selleks, et tekitada õiget auru rõhku boileri sees on olemas vakuumventiil, mis laseb liigse õhku katlast välja. Rõhulüliti ei oska tuvastada erinevust õhu- ja aururõhu vahel, kui vesi laieneb kütmisel. Tänu vakuumventiilile vee laienemisel tekkinud õhurõhk liigub katlastvälja, kuid aururõhk suleb ventiili ja on teada tõsist aurusurvet. Auruboileritel on olemas ka kaitse ventiil "safety valve", mis hoiab boilerit all ülerõhu tekkimisest. Tehasest nad on seadistatud 1.8 bar´i peale, ja ületades selle väärtust ta avaneb. 1 korra rakendamise puhul peab vahetama uue vastu.

Edasi aur liigub boilerist auruklappidesse(nr. 18), et vahustada piima. Auruboiler kuum vesi auruga ka on kasutusel ja läheb solenoidisse(nr. 8), et väljastada tee/amerikano vett. Muidu auruboileril võib olla vee taseme klaas(nr. 10).



Joonis 1. Hüdrauliline diagramm, La Marzocco FB-70 3-gruppiline. [1]



Joonis 2. Labapump

### 1.1.2 Elektriline osa

Elektriline diagramm(Joonis 3. Elektriline diagramm)vastab eelmises alapeatükki punktis hüdraulilisele skeemile, kuid lihtsustamiseks kohvi boileri gruppide arv on võrdne 1 ja auruboileri maht on vähem ka. Antud juhul masin on ühendatud 1-faasilise toitega (230V) ja edasi jaotub masina sees.

Sellise skeemi võimsus on 2600W, millega juhe peab olema vastava ristlõikega –  $2.5mm^2$ , et kaabli voolu läbilaske võime oli piisavalt suur ja/või parem kui varuga. KOGU võimsus tuleb kütteelementide ja pumba elektrimootori võimsuste summast. Auruboileri kütteelement on kõige võimsam antud süsteemis– 1300W, kohviboileri– 1000W ja elektrimootori – 300W.

Ohmi seaduse abil on võimalik arvutada täis koormatud masina voolu tarbimist(vt. valem 1.2):

$$I = \frac{P}{U} = \frac{2600W}{230V} = 11,30A \sim 12A \quad (1.2)$$

Ülejäänud masina tarbijad: solenoidid, juhtplaat, veelugejad tavaliselt tarbivad nii nähe energiat, et nendega arvestatakse määramatuse tasemel ja arvutatud voolu ümmardatakse suuremale arvule.

Pumba paneb liikuma asünkroon elektrimootor. Kõik nimiandmed on joonises 4. Andmesildist on näha, et mootori võimsus on 300W, pingeline 220/230V ja vool 1.5 A. Korrutades nimipinget ja tarbitava voolu andmesildist saame mootori koguvõimsuse:

$$S = U_n * I = 230 * 1.5 = 345VA \quad (1.3)$$

Teades kogu võimsust saab arvutada mootori võimsusteguri :

$$\cos \varphi = \frac{P}{S} \quad (1.4)$$

Kus,

P– aktiivvõimsus, W;

S– Näivvõimsus, VA;

$\cos \varphi$ – ühikuta suurus, mille väärtus on 0...1 vahemikus

Mootori nimiandmete põhjal arvutame tema võimsusteguri:

$$\cos \varphi = \frac{P}{S} = \frac{300}{345} \sim 0.87$$

Tulemus järeldab kõrget võimsusteguri ning efektiivset elektrienergia muundumist mehhaanilisse. Muidu mootoril on käivitus kondensaator  $6\mu F/450V$ , mis on

jadaühendatud ergutusmähisega ning nihutab faasi ergutus- ja peamähisel 90° võrra käivitamisel.

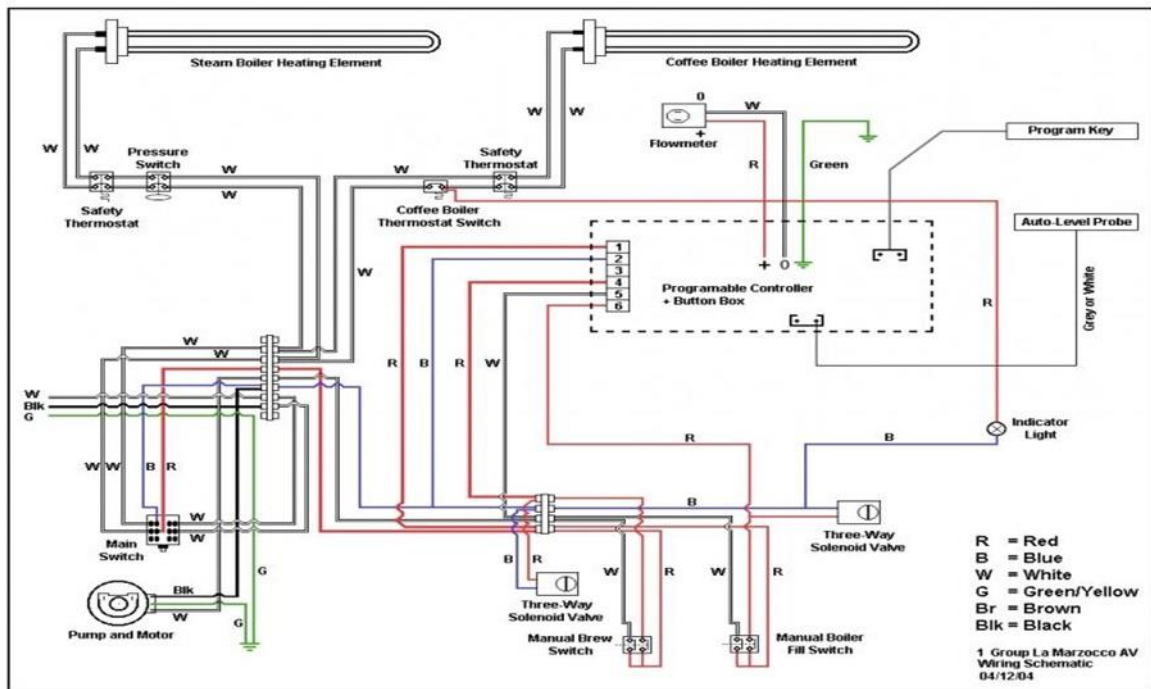
Antud diagrammil vee kütmise süsteem on üks lihtsamatest, kus espresso boileri kütmist juhib termostaat lüliti ja auruboileril rõhu lüliti. Termostaat on paigaldatud eraldi kolvile, mis on keeratud espresso boileri sisse tema keskel ja vaatab otse küttekehase. Läbi kolvi kaudselt läheb soojaks ka termostaat, mille kontaktid on NC nii kaua kui saavutab ette nähtud temperatuuri. Kui soovituslik temperatuur on saavutatud, lähevad termostaadi kontaktid lahti ja voolu rakendamine küttekehale katkestub. Jahutades lähevad termostaadi kontakti jälle lukku ja kütmine jätkub. Selline 2 punktiga kütmine toob suured võnkumised soovituslikku temperatuuri saamisel ning energiakaod masina soojas hoidmises kasutamata. Rõhu lülitil on sama skeem auruboileri kütmisel.

Lisaks iga boileri kütmise vool käib läbi kaitse termostaadi, et vältida ülekuumenemisest. Nendel on katkestamise temperatuur määratud tehases 135 °C.

Veetaseme määramine auruboileris toimub ka elektri abil. Boileri külge on keeratud metallist andur, mis on ühendatud masina juhtplokkiga. Juhtplokk veetaseme määramiseks laseb väikest voolu läbi andurit, et vee puudutamisel tekkis ahel läbi maanduse. Niikaua kui vett pole piisavalt boileris, siis ahel on katkestatud ning tingimus solenoidi sulgumiseks on täitmata. Solenoidi pannakse kinni siis, kui tekib ahel läbi andurit, vett ja maandatud juhtplokki ehk auruboileril on piisavalt.

Juhtplokki protsessi juhtimise eest vastutab AVR mikrokontroller ATtiny 2313 20-pin 20MHz. Tema abil masina nupud panevad vett jooksmas ja veeanduriga salvestatud kogused välja andma, ning kustuma taimer nuppuplokkil.

Plaadil olevad nihkeregistrid 74hc094 juhtivad ULD2003 draiverid. On olemas 3 sümistorväljundid, mis juhtivad gruppi solenoidid ja 3 releeväljundit teevee, täite-solenoidi juhtimiseks ja gruppi solenoidi manuaalselt avamiseks.



Joonis 3. Elektriline diagramm [1]



Joonis 4. Asünkroonmotori nimiandmed



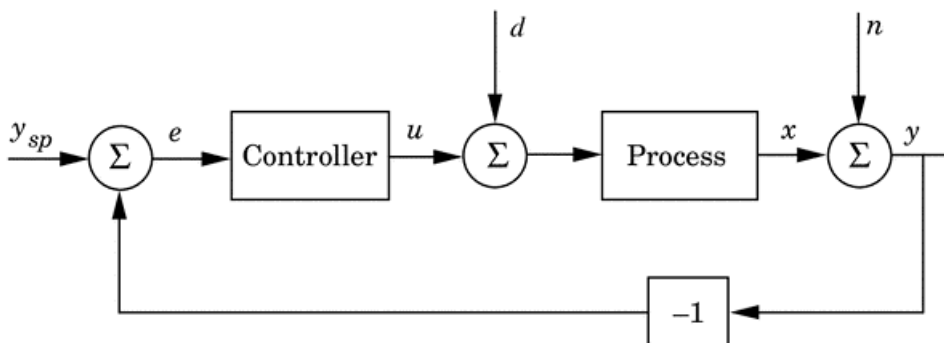
## 1.2 PID regulaator

PID-regulaator (proportsionaal-integraal- diferentsiaalregulaator, vt. Joonis 5. PID-regulaator juhtimissüsteemis tagasisidega) on hästi levinud juhtimissüsteem tagasisidega. Tänapäeval enamus kasutusel olevaid regulaatoreid töötavad PID algoritmi põhjal. Ta on rakendatav paljudele praktilistele ülesandele, lihtsalt integreeriv tööstusprotsessidele ja madalaga tootmishindaga. Tema abil on võimalik tasakaalustada hästi erinevad süsteeme, näiteks:

- Temperatuuri kontroll – ahjud, külmkapid, jootekolvid
- Pöörlemiskiirus – elektrimootorid
- Balanseerimine – kvadrokopter, güroskuuterid

Elektronika arenemisega läksid mikroprotsessorid ja analoog-digitaalmuundurid odavamaks ning alustati kasutama PID-regulaatorites automaatset parameetrite seadistamist ja adaptiivset algoritme. Tema struktuur muutis keerukamaks, peale korrigeerimist PID-regulaatorid võivad olla varustatud häiresignaali, reguleerimisahela katkestamise ja dünaamilise vahemikku ületamise funktsiooniga.

Muidu vaatamata pikaajalise arendusele ja suure publikatsiooni arvule pühendatud PID-regulaatorile jäävad ka probleeme integraalse küllastamisega, hüsteeriliste ja mittelineaarse objektide juhtimisega, automaatne häälestamine ja adaptatsiooni küsimustes. PID kontrollid võivad olla ilma anti-aliasing filtrita(AAF) ning liiga tugev müra ja välised häired teevad parameetrite häälestamist raskem. Kaasaegsel juhtimissüsteemidel tihti dünaamika on tundmatu, reguleerimisprotsessid ei saa pidada sõltumatuks, mõõtesignaalid sisaldavad mürasid, koormus on ebastabiilne.



Joonis 5. PID-regulaator juhtimissüsteemis tagasisidega. [2]

## 1.2.1 PID Algoritmid

Kõik olevad algoritmid PID kontrollritel ja teistel on suunatud tagasiside andmete töötlemiseks ja juhtimissignaali arvutamiseks. Ise PID algoritm sai oma nime tänu kolme teguri liitmisele, mille võib esitada valemi kujul:

$$u(t) = K \left[ e(t) + \frac{1}{T_i} \int_0^t e(\tau) d\tau + T_d \frac{de(t)}{dt} \right] \quad (1.5)$$

Kus,  $u$  – kontrolleri väljund,  $e$  – viga[SP-PV(t)],  $t$  – aeg, proportsionaalne võimendus  $K$ , integraalae  $T_i$  ja tuletisaeg  $T_d$ .

Põhimõtteliselt PID kontroll on juhtimisviis, kus võetakse arvesse minevikku(I), olevikku(P) ja tulevikku(D) vead ja kõik tegurid liidetakse kokku lõpliku juhtsignaali arvutamiseks.

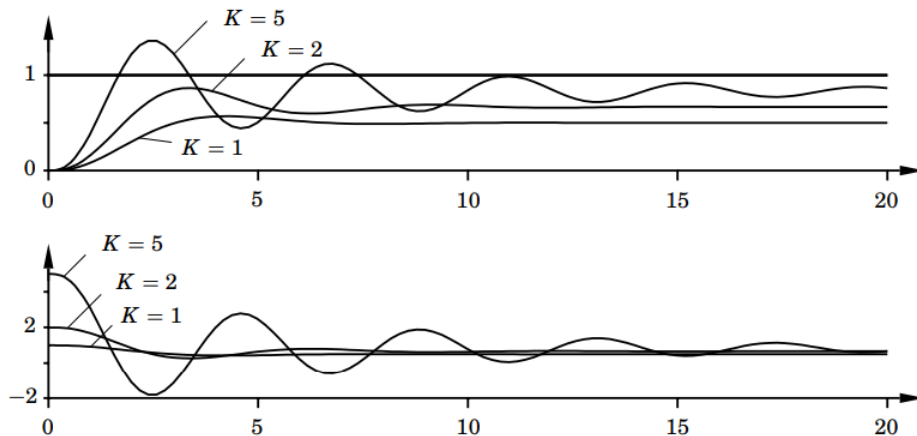
### 1.2.1.1 Proportsionaallüli

Proportsionaalne toime reageerib seadeväärtuse ja hetkväärtuse vahele ehk veale . Arvväärtust saab tuletada valemist 1.5 järgmise seosega:

$$u(t) = Ke(t) + u_b \quad (1.6)$$

Proportsionaalne tegur  $K$  on proportsionaalne sisendveaga  $e(t)$ . Liiga suure proportsionaalse võimenduse korral on suur muutus väljundis saadud vea muutusele ja tema suurendamisel jälgitav süsteem muutub ebastabiilsemaks. Teisest küljest liiga väikse võimendusega regulaator on vähem tundlik ehk madal väljundi reaktsioon suurele sisendveale. Kui proportsionaalne võimendus on liiga väike, siis juhttoimet võib olla liiga vähe süsteemi häirete reageerimisel.(vt. Joonis 6. )

Kontrolleril, mis kasutab ainult proportsionaalset võimendust objekti/süsteemi kontrollimiseks tekib püsiviga reguleerimise korral, sest proportsionaalse toime käivitamiseks sisendviga peab olema mitte null. Püsioleku viga on võrdeline protsessi võimendusega ja pöördvõrdeline proportsionaalse võimendusega. Püsioleku vea vähenemiseks lisatakse bias teguri seadepunktile ja väljundile või kasutatakse integraal tegurit. Muutuja  $u_b$  on bias/reset. Kui sisendviga  $e(t)$  on 0, siis väljund võtab bias väärtuse. Teda arvutatakse järgmiselt  $(u_{max} - u_{min})/2$ , kuid tema väärtus võib käsitsi reguleerida, et püsioleku viga oleks null seadeväärtuses.



Joonis 6. Kontrolleri simulatsioon P regulaatori jaoks. Protsessi ülekande funktsioon on  $f(x)=(x-1)^{-3}$ . Ülemine graafik näitab seaduspunkti 1 ja protsessi väljund  $y$  erinevate regulaatori võimenduse  $K$  väärtuste korral. Alumine graafik näitab reguleerimis signaali väljundi  $u$  erinevate võimenduste  $K$  väärtustele. [2]

### 1.2.1.2 Integraallüli

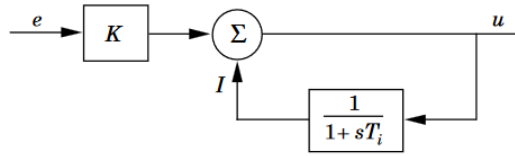
Integraal toimingu abil kompenseeritakse protsessi väljundis püsioleku viga, millest ei saa lahkuda ainult proportsionaalse toimega. Tänu sellele väike positiivne viga (hetkväärtus väiksem seadeväärtusest) alati tõstab vajadusel reguleerimissignaali ja negatiivne viga (hetkväärtus on suurem seadeväärtusest) vastupidi vähendab reguleerimis signaali, olenemata sellest, kui väike see viga on. Näiteks, kujutame ette püsi olekus süsteemi konstantse juhtsignaaliga  $u_0$  ja veaga  $e_0$ , siis saame valemist 1.5 järgmise seose:

$$u_0 = K(e_0 + \frac{e_0}{T_i}t) \quad (1.7)$$

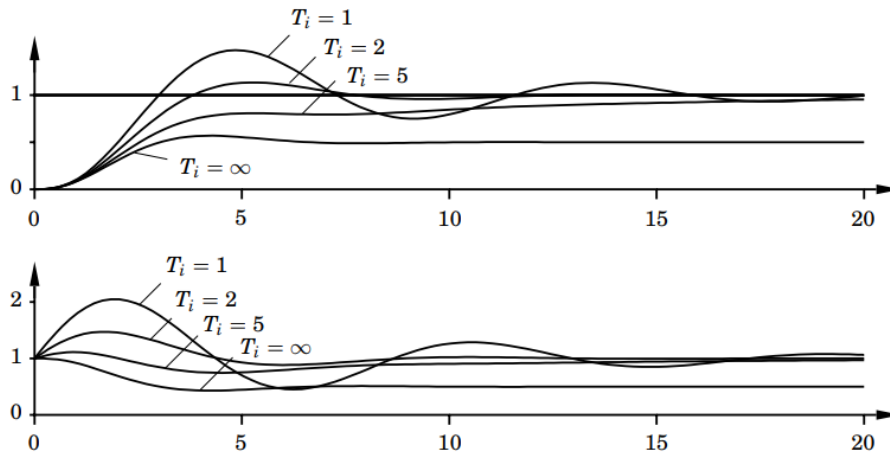
Nii kaua, kui  $e_0 \neq 0$ , see on vastuolus olekuga, et reguleerimissignaali  $u_0$  on konstantne. Integraal toimega kontrolleri annab alati nulli püsiseisundi vea.

Integraallüli algoritm võib kujutada ette nagu seade, mis reguleerib bias/reset muutuja väärtuse automaatselt proportsionaal osa toimele. See on kujundatud järgmise plokki diagrammil (vt. joonis 7), mis näitab proportsionaal kontrolleri, kus väärtuse nullimist reguleeritakse automaatselt. Reguleerimine toimub signaali tagasisidestamisel, mis on filtreeritud väljundi väärtus ja liidetud kokku enne kontrolleri väljundit. Sellist algoritmi nimetatakse ka „automatic reset“ või üks esimetest integraal toime rakendamist. Plokk diagrammi põhjal saab tuletada proportsionaal-integraal toime valemi:

$$u(t) = K \left[ e(t) + \frac{1}{T_i} \int_0^t e(\tau) d\tau \right] \quad (1.8)$$



Joonis 7. Integraal toime positiivse tagasiside viivitusega.

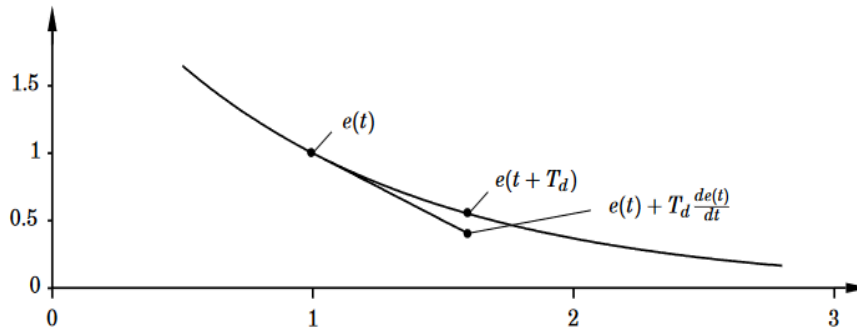


Joonis 8. Kontrolleri simulatsioon I regulaatori jaoks. Protsessi ülekande funktsioon on  $f(x)=(x - 1)^{-3}$ , P lüli toime võrdne 1. Ülemine graafik näitab seaduspunkti 1 ja protsessi väljund  $y$  erinevate regulaatori Integraal ajale. Alumine graafik näitab reguleerimis signaali väljundi  $u$  erinevate Integraal aja väärtustele. [2]

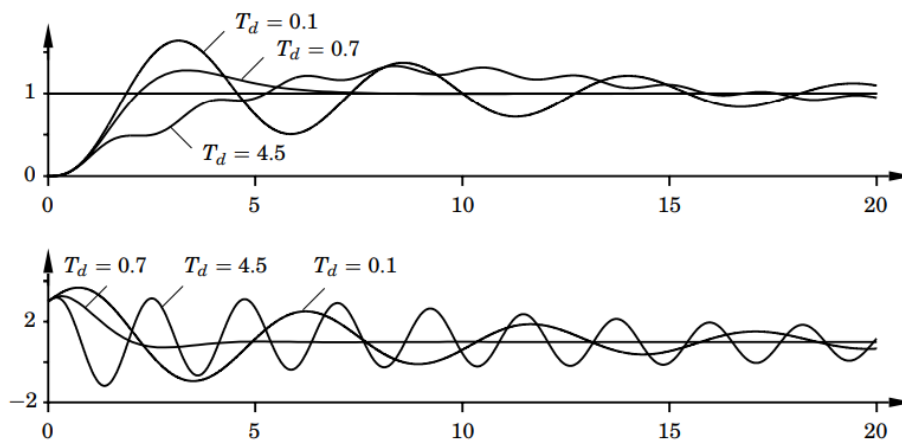
### 1.2.1.3 Diferentsiaal lüli

Diferentsiaal toime kasutatakse suletud ahela süsteemide stabiliseerimiseks. Protsessi dünaamika tõttu kulub mingi aeg, enne kui reguleerimis signaali mõju muutub protsessi seisundit ja see on märgatav. See tähendab, et kontrolleri korrigeerimis väljund jääb hiljaks. Proportsionaalse-diferentsiaal kontrolleri toime võib tõlgendada nii, et reguleerimine on tehtud proportsionaalselt ja samal ajal tagab prognoositava kontrolleri väljundit protsessi oleku hoidmiseks teatud piirides, kusjuures prognoos tehakse ennustades viga veakõvera abil. Põhi valem PD kontrolleri jaoks:

$$u(t) = K \left[ e(t) + T_d \frac{de(t)}{dt} \right] \quad (1.9)$$



Joonis 9. Diferentsiaal toime tõlgendamine kui prognoositav kontroll, kus prognoosi saadakse viga lineaarse ekstrapolatsiooni teel. [2]



Joonis 10. PD kontrolleri simulatsioon. Protsessi ülekande funktsioon on  $f(x)=(x - 1)^{-3}$ , P lüli toime võrdne 1 ja I lüli toime on 2. Ülemine graafik näitab seaduspunkti 1 ja protsessi väljund  $y$  erinevate regulaatori Diferentsiaal ajale. Alumine graafik näitab reguleerimis signaali väljundi  $u$  erinevate Diferentsiaal aja väärtustele. [2]

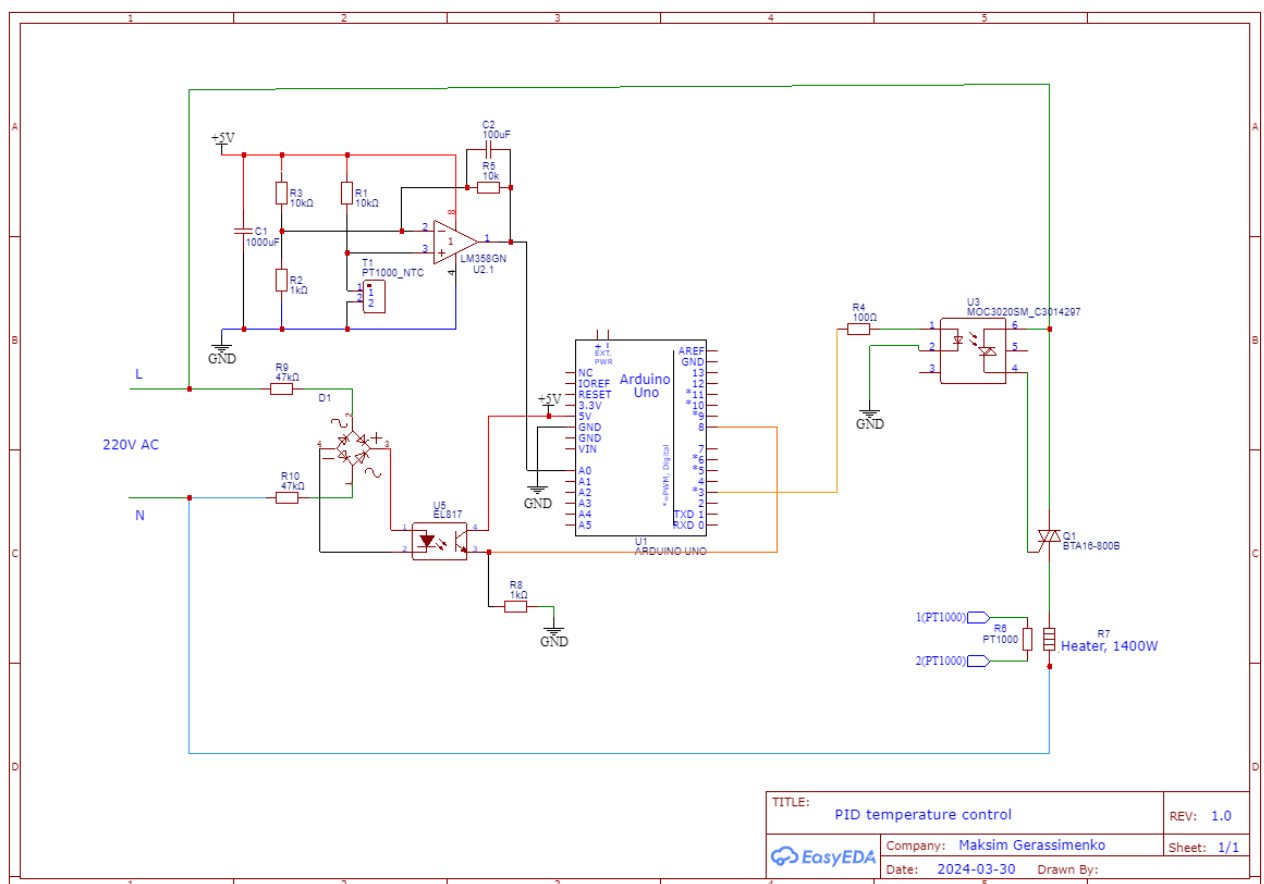
## 1.3 PID kontrolleri projekteerimine

Antud lõputöös on püstitatud ülesanne disainida PID kontrolleri kohvimasina jaoks.

Katseliseks vahenditeks on kasutatud:

- Arduino UNO Rev3;
- Küttekeha 220V AC, 1400W;
- Temperatuuri andur PT1000(2 wire);
- Operatsioonvõimendi LM358;
- Foto-paar EL817;
- Optro-triac MOC3020;
- Sümistor BTA16-600B;

Antud elektriskeemiga(vt. joonis 11) saab 220V AC PID temperatuuri kontrollida (vt. joonis 11). Programmi kood on toodud lisade peatükkis.



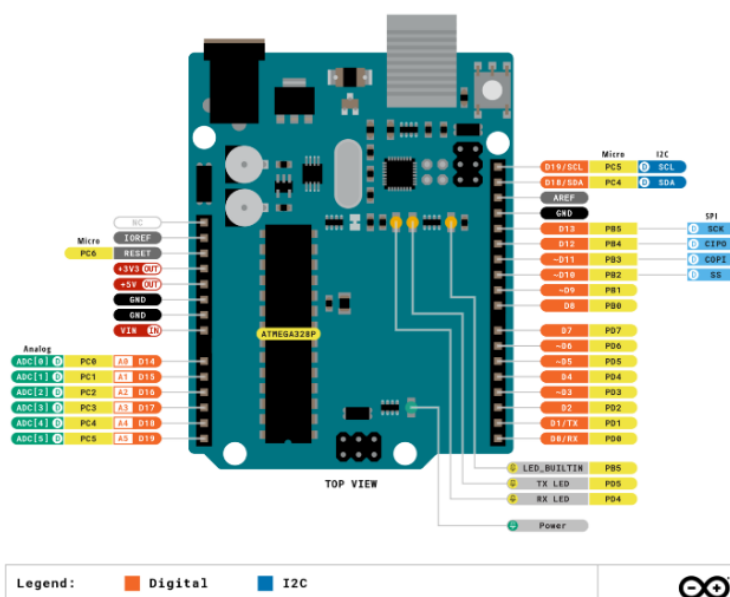
Joonis 11. PID regulaatori elektriskeem vahelduvvoolu ahela

### 1.3.1 Juhtseade

Põhiseadmeks, millega toimub juhtimine on Arduino UNO Rev3. Arduino UNO Rev3 on universaalne mikrokontroller, mille arvutusvõime põhineb mikroprotsessoril Atmega 328P. Mikrokontrolleril on olemas kokku 14 digitaal väljundid/sisendit, kus 6 nendest saab kasutada pulsilaiusmodulatsiooni(PWM) jaoks. Peale seda on paigaldatud 6 analoog sisendit, 16MHz keraamiline resonaator, USB pistik ja reset nuppu. Sisend toideks sobib välis allikas 5-20VDC(soovitatakse 7-12V), tööpinge 5VDC ja digitaal/analoog väljundite vool kuni 20mA.

Lisaks sellele valik põhineb mugava programmeerimis keskkonna tõttu — Arduino IDE(Integrated Development Enviroment). Programmi kood tohib kirjutada teksti redigeerimis programmis C või C++ keeles ja IDE ise kompileerib ja tõlgib kasutaja programmi mikroprotsessori jaoks mõistavaks keeleks. Veebis leidub suur raamatukogu, kus on kirjeldatud süntaks programm koodi kirjutamiseks. Käesoleva mikrokontrolleri programm koodi võib ka arendada kirjutades terve programmi Atmega328P registri keeles. Antud juhul avaneb suurem kasutusala ja mikrokontroller kasutab vähem oma ressursse tõlkimiseks ning reageerimis aeg muutub kiiremaks. Läbi IDE keskkonda saab valmis programmi üleslaadida otse mikrokontrollerisse läbi USB pistiku.

Veel üks kasulik funktsioon IDE on Serial Monitor. Kõige rohkem Serial Monitori kasutatakse suhtlemiseks Arduino-plaadiga läbi kasutaja arvuti ja see on mugav vahend programmi reaajas jälgimiseks. Serial Plotter´i abil on võimalik koostada vajadusel graafiku programmi andmete põhjal reaalselt ajas.

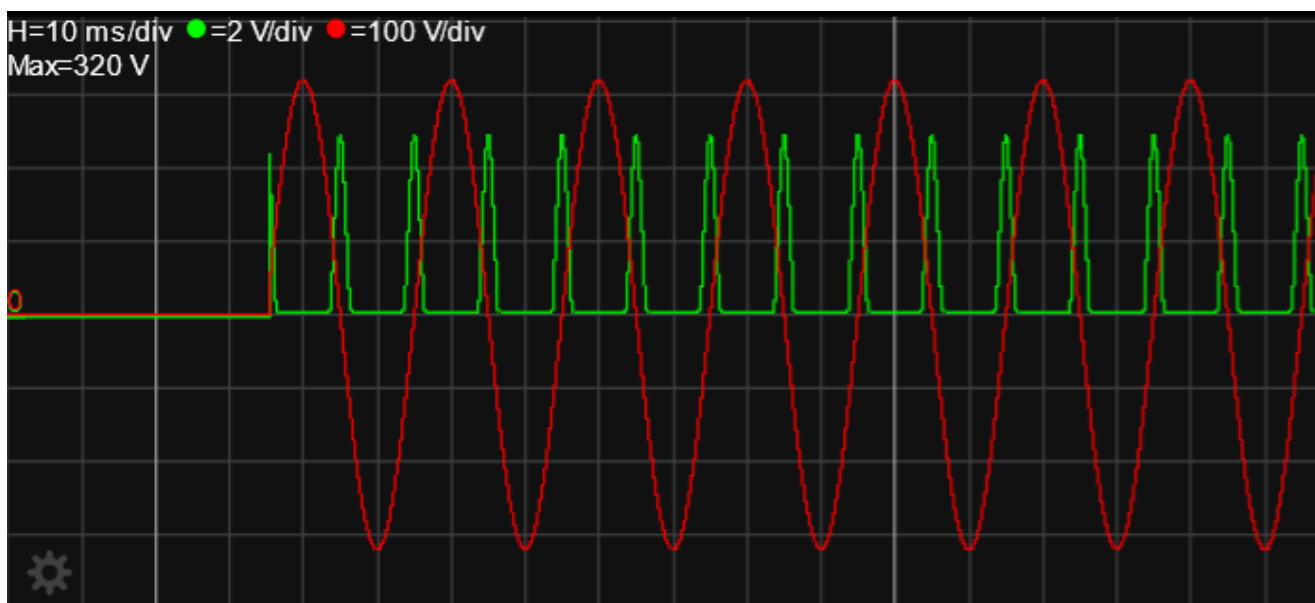


Joonis 12. Arduino Uno plaadi väljundid ja tema nimed.  
[5]

### 1.3.2 Nulli läbimise detektor

Elektriskeemi koostamisel valiti koormuse reguleerimiseks sümistorit BTA16-600B. Kuna tegemist on vahelduvvoolu ahelaga, siis sümistorit ei saa juhtida PWM signaaliga ja avada nagu transistorilt. Tuleb jälgida pinget ümberlülitamise hetk, ajastada ja lülitada triac'i katkestades osa sinusoidist. Selleks meil on vaja teada, millal vool lülib ümber ehk läbib null punkti.

Mikrokontrolleriga Arduino UNO rev3 on vajalik jälgida nulli läbimist. Selle jaoks on kasutatud 2 asju: dioodsild KBJ1008 ja fotopaar EL817. Need komponendid on valitud, kuna mikrokontrolleriga ei ole võimalik lugeda negatiivsed pinget ja suuremat kui 5V. Dioodsild muundab vahelduvpinget alalispingeks. Sisendiks on paigaldatud 2 takisti väärtusega  $47k\Omega$ , et piirata voolu 10mA fotopaarile. Fotopaari eesmärk on reageerida rakendatud alalispinge muutusele dioodsillast iga kord, kui faas läbis nulli. Nulli läbimisel tekkib lühiajaline pingelang ja fotopaari väljund võrdne 0V (vt. joonis 12). Sellist pinget kõikumist hakkame lugema mikrokontrolleri abil digitaalsel pinnil number 8 seadistatud pinget sisendiks.



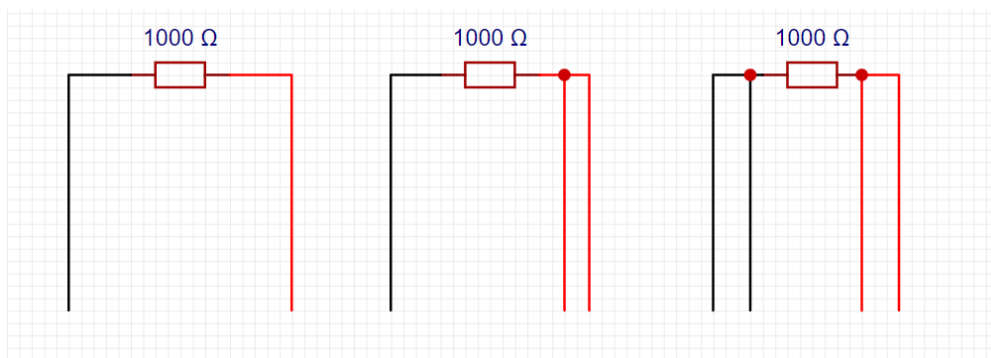
Joonis 13. Nulli läbimise tuvastamine. Punane graafik on vahelduvvoolu siinuse peak-to-peak väärtused. Roheline graafik on fotopaari ahela väljund. Iga nulli läbimist märgistab graafiku tõus 5V-ni. Võrreldes lõputöö elektriskeemiga käitumine nulli läbimisel on reversiivne ehk see on illustratiivne graafik põhimõtte näideks.



### 1.3.3 Temperatuuri andur

Püstitatud ülesande lahendamisel autor valib temperatuuri mõõtmiseks anduri PT1000. PT1000 on analoogne temperatuuri takisti, mida kasutatakse enamasti tööstuses ja täpsusmõõtmiseks. PT1000 on RTD(Resistance Temperature Detector) anduri tüüp. Nendele on iseloomulik omavahel PTC(Positive Temperature Coefficient), see tähendab et temperatuuri suurenemisega tõuseb anduri takistus. Tööstuses said oma laia kasutuse tänu oma kõrgema täpsusklassi mõõtetulemustele, pikale kasutuseale ja lihtsale paigaldus võimele. Muidu need andurid käituvad lineaarselt, anduri ahela väljundpinget saab mõõta ja töötlemata mikrokontrolleriga ilma keeruliste matemaatilise valemita. PT1000 omab laia mõõte diapasooni ( $-200^{\circ}\text{C}$  kuni  $600^{\circ}\text{C}$ ).  $0^{\circ}\text{C}$  juures on selle anduri takistus  $1000\Omega$  ja tundlikkus 1 kraadi muutusele  $3,895\Omega$ . Lihtsa pingejagajaga koos takistiga nt.  $10k\Omega$  saaks 5V pingel temperatuuri muutuse teise kümnendkoha märgata.

PT1000 on mitu liigi: 2,3 ja 4 juhtmega(vt. joonis 13). Kahe juhtmega on lihtsamad ja odavam, aga kahe juhtmega ei ole võimalik kompenseerida lisa takistust teisest komponentidest. Selle probleemi lahendamiseks on välja toodud 3- ja 4-juhtmelised versioonid. Mõõteahelas sõltuvalt tüübist on 1 või mõlemad liinid ühendatud paralleelselt anduri külge. Tulemuseks tekib 2 mõõteahela, kus 1 on vastutav temperatuuri mõõtmise eest ja teine väljundi takistuse kompenseerimiseks.



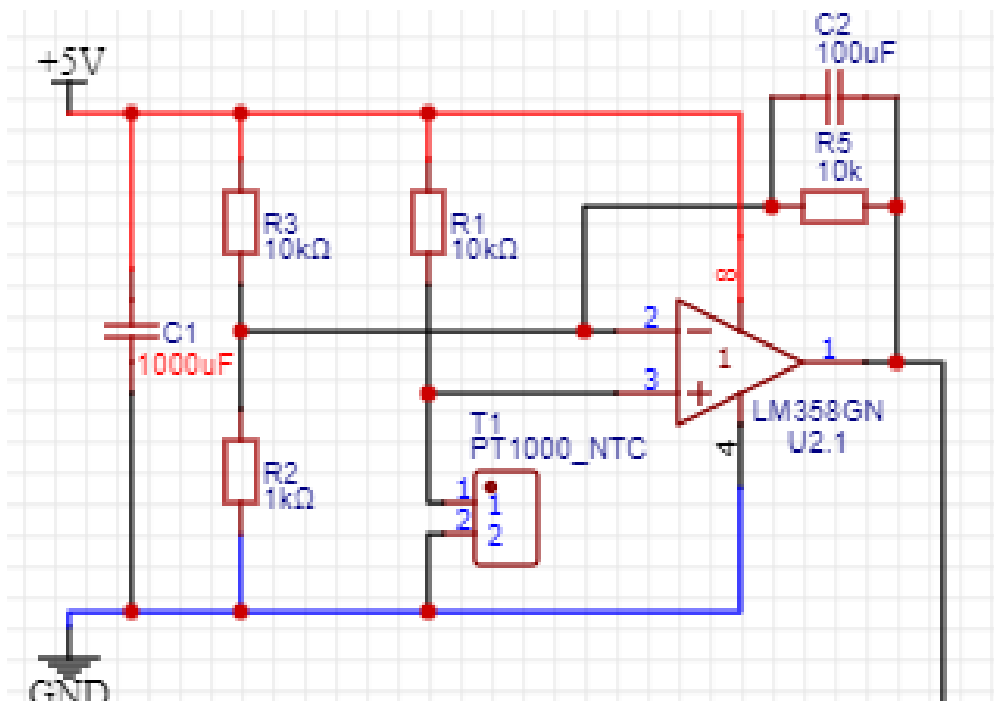
Joonis 14. 2,3 või 4 juhtmega PT1000 andur.

### 1.3.3.1 Temperatuuri mõõtmised

Mikrokontrolleriga takistuse mõõtmine ja tema muutnud väärtuse töötlemine ei ole võimalik, seega on vajalik teisendada PT1000 takistused analoogpingeks, mida on võimalik lugeda mikrokontrolleri abil. Selleks, et PT1000 anduri mõõdu lugeda Arduinoga, on vajalik võimendi, mis on lineaarne sisendpinge suhtes. Sellise ülesanne lahendamiseks on kasutatud operatsioon-võimendi LM358(vt. joonis 14). Vooluahel saab toidet 5V mikrokontrollerist. Kahe esimese takisti vahel(R3 ja R2) tekkib pinge ~0,45V ja on ühendatud võimendi inverteeriva pinniga. Teise pingejaguri on ühendatud R1 takistiga ja ise PT1000 anduriga ning ühendatud mitteinverteeriva võimendi pinniga. Kahe pingejaguri näidute vahest saame kätte võimendi väljundi, mille edastame Mikrokontrollerile analoog sisendisse. R5 takisti rööbiti ühendatud takistitega R2 ja R3, negatiivsel tagasisidestamisel. Arvutades ekvivalenttakistuse liini ja kasutades kondensaatorit 100  $\mu F$  saame arvutada ajalise viivituse järgmise seosega:

$$t = R_{ekv} * C = \left[ \frac{1}{\frac{1}{R_3} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_5}} \right] * C = 833.3 * 0.0001 = 0.08333s = 83.33 ms \quad (2.0)$$

Nii moodi me saame iseseisvalt stabiliseeriva süsteemi, mis töötab lineaarsel režiimil.



Joonis 15. PT1000 anduri muundur

### 1.3.3.2 Temperatuuri anduri kalibreerimine

Selleks, et õigesti lugeda temperatuuri PT1000 muunduri väljundist, peaks määrama seose saadud pinge ja temperatuuri vahel. Selleks peab süsteemi kalibreerida. PT1000-l on teada kindlad takistuse väärtused igale Celsius kraadile teatud diapsoonis. Seega on võimalik simuleerida anduri käitumist võõra takistiga. Täpsete katsete teostamiseks on vaja 1000  $\Omega$  takisti ja potentsiomeeter  $\sim 500 \Omega$  ühendatud omavahel jadamisi. Tavaliselt takistid ei võrdle täpselt oma nimitakistuse väärtusele ja selle vahe kompenseerimiseks meil on vaja potentsiomeetrit. Lõputöö eesmärgi täitmiseks piisab kütmist kuni 60-90°C, seega süsteemi kalibreeritakse 0°C ja 100°C vahel.

Esimesena on vaja mõõta muunduri väljundpinget 0°C peal. Seadistame katsetakistid täpselt 1000  $\Omega$ , ning ühendame takistid muunduriga ning Arduino peal arvutatakse tarkvaras analoogsisendist loetud pinget. Antud juhul see on 0,52V.

Järgmisena tuleb mõõta muunduri väljundpinget 100 °C peal. Tabelist on teada, et anduri takistus soovitud temperatuuril on 1385  $\Omega$ . Katse takisti tohib nüüd tagasi muunduri ahelasse ühendada ning märkida pinget, mille väärtus on 2,40V.

Nende väärtuste abil on võimalik arvutada kogu pinge muut määratud diapsoonis:

$$U_{\Delta} = U_{100^{\circ}\text{C}} - U_{0^{\circ}\text{C}} = 1,88 \text{ V} \quad (2.1)$$

Lõpus on võimalik määrata seose pinge ja temperatuuri vahel anduri näidu määratlemiseks Celsius kraadides:

$$temp = \frac{voltage_{sensor} * 100}{1,88} \quad (2.2)$$

## 1.4 PID häälestamine

Käesolevas peatükis kirjeldatakse PID kontrolleri võimendustegurite arvutused, mille eesmärk on viia juhtimissüsteemi tasakaalustatud olekusse. See on üks tähtsamatest osast PID kontrolleri disainimisest, kuna alampeatükist „PID algoritmid“ oli kirjeldatud eraldi iga parameetri mõju protsessile, mis on hästi erinevad üksteisest. Seega tekkib keerukus, kuidas neid leida, et kõik kolm parameetri toetasid üksteist juhtimissüsteemis valitud seade punktis.

Põhilised meetodid häälestamiseks on võimalik kasutada palju erinevaid meetodit, mis sobiksid kütmiss protsessile on järgmised:

- **Katse-eksitus** — PID regulaatori võimendustegurid muudetakse ühe kaupa, kuna saavutatakse soovitud tulemus.
- **Ziegler-Nichols** — Proportsionaalse toime võimendust suurendatakse väärtuseni, kuna protsessi käitumine on stabiilne ja võnkumised on pidevad. Võnkumise perioodi järgi arvutatakse teised tegurid.
- **Tyreus-Luyben** — PID kontrolleri võimendustegurid arvutatakse teisi väärtust, aga põhimõtteliselt on sama mis Ziegler-Nichols.
- **Cohen-Coon** — Protsessi olek peab olema stabiilne kaste algusest. Sellisel juhul muudetakse juhttoimet astmeliselt. Juhttoime väärtuse suurendamisel jälgitakse protsessi tagasisidet, täpsemalt mõõdetakse ajalised viivitused ning oleku hüpped kuna uueni stabiliseerimiseni. Viivituse ja hüpete põhjal arvutatakse PID koefitsiendid.
- **Åström-Hägglund** — Sellist meetodit võib nimetada automaat häälestuseks. Selles meetodis teostatakse 2 punktiga positsioonreguleerimist nii, et juhttoime oli suurem 0%, aga väiksem 100%. Võib valida 2 punkti võimalikult lähedad üksteisele, et vähendada protsessi võnkumisi. Kui protsess tagasiside on vähem seadepunktist, siis tõstetakse astmeliselt juhttoime ja kui tagasiside ületab seadepunkti, juhttoime vähendatakse. Aga nii jäävad võnkumised protsessil, mille järgi saab nt. **Ziegler-Nichols** meetodi kasutada PID parameetrite arvutamiseks.

Cohen-Coon meetodi kasutamisel peame arvestama, et peale häälestust juhttoime võib üle reguleerida süsteemi või tekitada võnkumisi. See on tingitud ise häälestus meetodiga, kus võimendusteguri arvutamiseks kasutatakse ajalised hüpped ning viivitused peamiselt. See tähendab, et lisaks sellele on vaja teostada peenhäälestust süsteemi tasakaalustamiseks ja võnkumisi vähendamiseks. Peale häälestust peab PID regulaator vastama järgmisele nõutele:

- Maksimaalne ülereguleerimine ei tohi olla suurem kui 10%
- Staatiline viga peab olema väiksem või võrdne 0,5 °C
- Seadeväärtust saavutatakse võimalikult kiiresti

PID regulaatori häälestamiseks oli valitud katseseadmeks 1 kohviboiler mahuga 3,4 L ja kütteelement võimsusega 1,4 kW, mille jaoks autor hakkab PID võimendustegurid häälestama. Cohen-Coon meetod eeldab täita järgmised punktid:

1. Teostada astmeline juhttoime muutus ning salvestada protsessi simulatsiooni algusest kuni temperatuuri stabiliseerumiseni. Põhiinfo salvestamiseks saab kasutada näiteks PuTTY.
2. Teisendada temperatuuri muutus protsentuaalasse skaalasse, arvestades anduri mõõtevahemikuga, ehk antud juhul temperatuur °C /600°C.
3. Arvutada protsessi võimendus(gain process):

$$gp = \frac{\text{temp. muut } \%}{\text{juhtt. muut } \%} \quad (2.3)$$

4. Mõõta viivitus td. Ta nätab mis aja pärast juhttoime muutust hakkab süsteemi hetkväärtus tõusma.
5. Arvutada väärtus, mis vastab 63% kogu temperatuuri muutusele.
6. Leida aeg  $\tau$  mis võrdub td ja 63% temperatuuri muutuse väärtuse saavutamise vahe ajaga.
7. Arvutada PID regulaatori võimendustegurid  $K_p$ ,  $K_i$  ja  $K_d$  kasutades järgnevad valemid(vt. valemid 2.4—2.9). Kuna Cohen-coon meetodi valemid on mõeldud teist tüüpi PID regulaatorile, tuleb võimendustegur  $K_p$  ja ajalised tegurid  $T_i$  ja  $T_d$  ümberteisendada.

$$K_c = \frac{1,35}{g_p} \left( \frac{\tau}{td} + 0,185 \right) \quad (2.4)$$

$$T_i = 2,5 \cdot td \cdot \frac{\tau + 0,185 \cdot td}{\tau + 0,611 \cdot td} \quad (2.5)$$

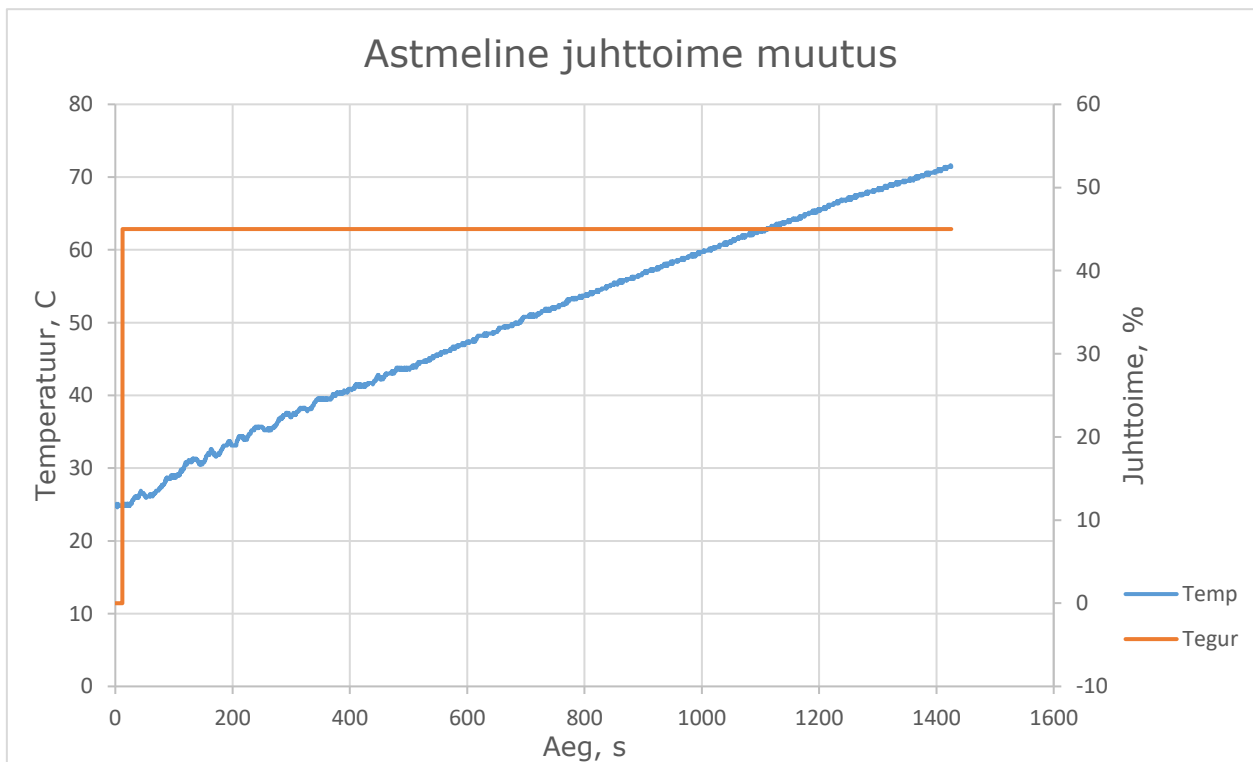
$$T_d = 0,37 \cdot td \cdot \frac{\tau}{\tau + 0,185 \cdot td} \quad (2.6)$$

$$K_p = K_c \quad (2.7)$$

$$K_i = \frac{K_c}{T_i} \quad (2.8)$$

$$K_d = K_c \cdot T_d \quad (2.9)$$

Autor valis sümistori avatud aja peale nulli läbimist 3000 mikrosekundit, mis tähendab ~45% võimsuse rakendamist küttelemendile. Sellistes tingimustes oli läbiviidud katse.



Joonis 16. Juhttoime astmeline muut PID regulaatori häälestamiseks

Nii valides juhttoime 45% koguvõimsusest on kätte saadud temperatuuri tõuse graafik(vt. joonis 16). Astmelise juhttoime muutuse graafiku abil arvutatakse kõik vajalikud ajalised viivitused/hilistused, et järgmiselt kätte saada PID võimendustegurid(vt. tabelid 3.1; 3.2). Kogu tabeli info on saadud graafiku analüüsist ja valemite 2.4–2.9 kasutamisest.

Tabel 1. Juhttoime muutuse graafiku analüüs 1

Temp alg	Temp lõpp	Temp muut	Temp muut %	PWM %	Protsessi võimendus	t0	t1	t2	td
24,8	71,6	46,8	0,078	0,45	0,173	12,4	58	817,9	45,6

1 tabelist on näha temperatuuri miinimum ja maksimum väärtused ning kogu muut katsetamise ajal. T0 tähendab aja, millal toimus juhttoime muutus. T1 näitab millal hakkas juhtsüsteem reageerima juhttoime muutusele ja t2 on aeg 63% kogu temperatuuri muutmise saavutamist.

Tabel 2. Juhttoime muutuse graafiku analüüs 2

Temp 63%	$\tau$	Kc	Ti	Td
54,3	759,9	131,16	111,25	16,7

Kogutud andmete põhjal on võimalik arvutada esialgsed PID võimendustegurid ilma peenhäälestuseta:

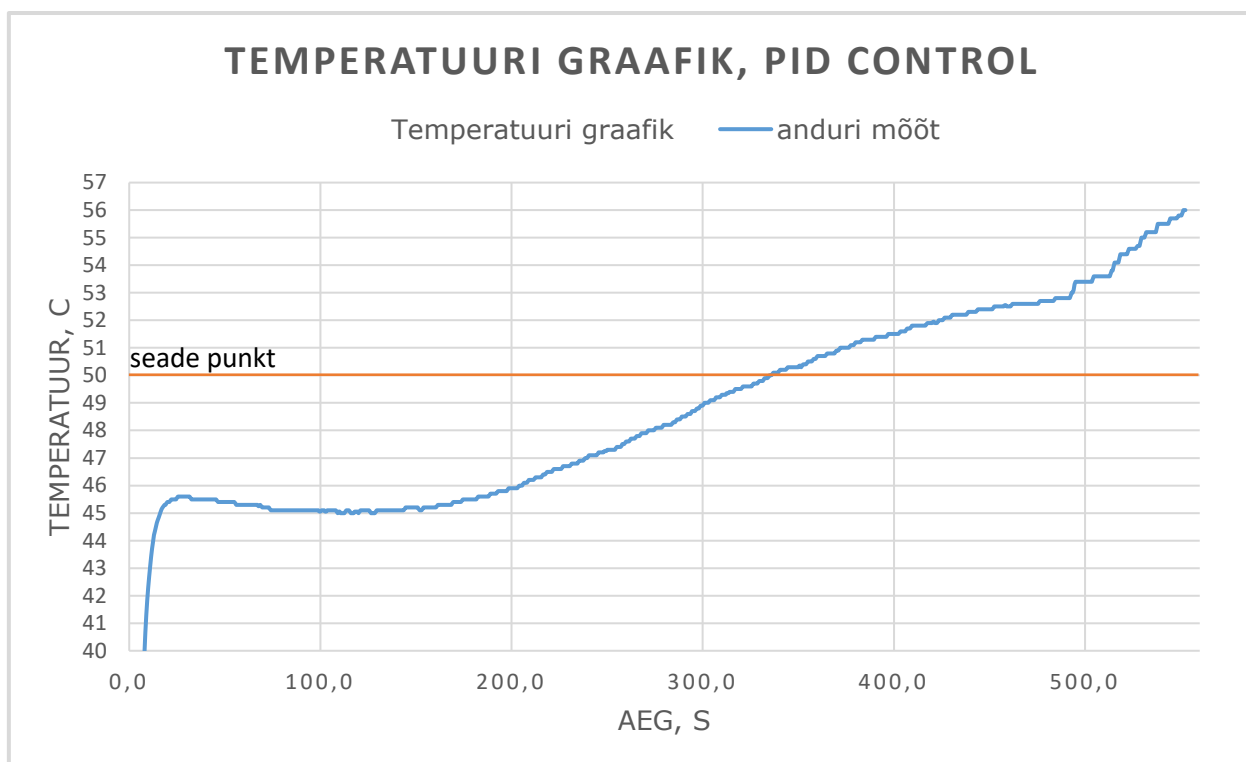
$$K_p = K_C = 131,16$$

$$K_i = \frac{K_C}{T_i} = \frac{131,16}{111,25} = 1,18$$

$$K_D = K_C \cdot T_D = 131,16 \cdot 16,7 = 2198,76$$

Järgmiselt tuleb ära kontrollida, kas saadud võimendusteguritega PID regulaator hakkab vastama ülevaltoodud nõutele või mitte. Selleks neid laaditakse üles kontrollikesse ja käivitatakse kütmine protsessi. Seade punkt võrdne 50 °C ja programmikoodi tsükkel võrdub 500 millisekundit.

Graafikust(vt. joonis 17) on näha, et kontroll aegub ajaliselt 50-100 sekunditel protsessi käivitamisest ning edaspidine seade punkti saavutamine viib ülereguleerimisele, seda on näha graafikus alates 400 sekundist, kus temperatuur tõuseb üles. 1 tingimustest PID regulaatorile on täitmata, täpsemalt punkt, kus ei tohi ülereguleerimisel olla rohkem kui 10%, antud juhul ei tohi 55°C ületada. Ülereguleerimine on tekkinud liiga suure diferentsiaal koefitsiendi tõttu, mille abil ta proovis ära parandada tuleviku viga arvestamata liiga suure hetkväärtuse muutust. Lisaks sellele kütmine võttis liiga kaua aega. Graafikus on maha võetud aeglane kütmine, et ülereguleerimis protsess oli paremini jälgitav.



Joonis 17. PID regulaatori mõju süsteemile enne peenhäälestust.



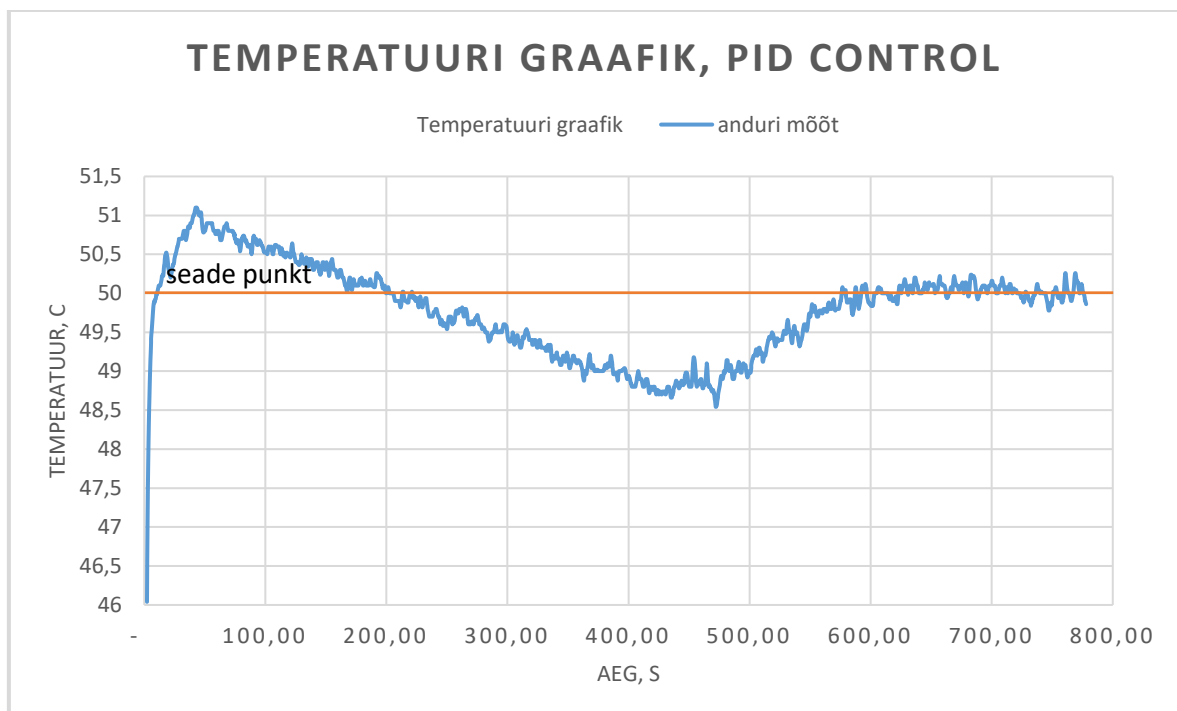
Sellise olukorra lahendamiseks tuleb abiks peenhäälestus, kus on võimalik võimendustegurid jagada/korrutada erinevate koefitsientidega, kuna protsessi juhtimine muutub kõlblikuks. Sellist meetodid nimetatakse veel katse-eksitus meetodiks. Korruga on soovitatav muuta ainult ühte teguri, et käitumise muutmine oli jälgitavam.

Uute katsete eesmärgiks oli saavutada kiiremat seadepunktile mineku, vähendada ülereguleerimist ning jälgida, et staatiline viga oli võimalikult väike. Teostades mitmed katsed oli saadud järgmised võimendustegurid:

$$K_p = K_C \cdot 5 = 131,16 \cdot 5 = 655,78$$

$$K_i = \frac{K_C}{T_i} \cdot 2 = \frac{131,16}{111,25} \cdot 2 = 2,36$$

$$K_D = \frac{K_C \cdot T_D}{5} = \frac{131,16 \cdot 16,7}{5} = 437,95$$



Joonis 18. PID regulaatori mõju süsteemile peale peenhäälestust.

Seadepunktiks jäi 50°C, aga programmi tsükkel jäi lühemaks — 250 milli sekundit. Uue graafiku(vt. joonis 18) põhjal saame järeldada, et PID regulaatori häälestus õnnestus. Ülereguleerimisel juhtimissüsteem kuumunes üle ainult 1,1 °C võrra rohkem seadepunktist ja jahtus kuni 48,5 °C ning pärast hoias ilusti soovitusliku temperatuuri, kus staatiline viga oli vähem kui 0,5°C.

## 2.KOKKUVÕTE

Euroopas kohvitamine on ammu kultuuri osa, enamus ei alusta oma päeva ilma kohvita. Kohvikus käiakse brunch'i ajal, töötamiseks arvuti taha, kohtumiseks kolleegidega/tuttavatega. Inimeste jaoks kohvik on lihtne ja mugav kokkusaamise koht. Keegi ei saa eitada, et kohv on üks tuntumatest jookidest üle maailma. Tema pikaajalised traditsioonid austatakse tänapäevani. Ajalugu võttis oma alguse sellisel ajal, et tema päritolu kohta räägitakse legendides.

Ise autor sai tuttavaks kohvi kultuuriga läbi töökohta, kus põhitegevuseks on kohvimasinate hooldamine. Üks päev autoril tekkis idee, et olevate teadmistega saab PID kontrolleri disainida traditsioonilise kohvimasinala (commercial coffee machine) ja avaldada nagu hea bakalaureuse lõputöö ülesanne. Nii oli püstitatud järgmised ülesanded lõputöö koostamisel:

1. Uurida teoreetiliselt PID kontrolleri disaini tehniliste aspektid ja simuleerida süsteemi
2. Võimaluse korral tutvuda laiemal auditooriumil kohvi ajaloo ja kontekstiga tänapäeval

Käesolevas töös räägitakse:

1. Kohvimasina tööpõhimõttest, hüdrauliline- ja elektriosa
2. PID algoritmid
3. PID kontrolleri disain ja häälestamine

Lõpptulemusest saab järeldada, et disainitud PID kontroller täidab oma ülesanded. Kõik disainis kasutatud komponendid on kättesaadavad Eesti poodides, mis teeb koostamise lihtsamaks. Autor on kindel, et tulevikus tuleb koostatud skeemi edaspidi arendada, sest algus on juba tehtud.

Eraldi autor väga tänulik King Coffee Service'le, et andsid sellise võimaluse lõputöö kirjutamiseks.

### 3. CONCLUSION

In Europe, drinking coffee has long been part of the culture, and most people don't start their day without it. People go to a café for brunch, to work at the computer, to meet colleagues/acquaintances. For people, the café is a simple and convenient meeting place.

No one can deny that coffee is one of the most famous drinks in the world. Its long-standing traditions are still respected today. Its history began at such a time that legends tell of its origins.

The author himself became acquainted with the coffee culture through his workplace, where his main activity is the maintenance of coffee machines. One day, the author had the idea that with the knowledge available, a PID controller could be designed for a traditional coffee machine (commercial coffee machine) and published as a good undergraduate thesis assignment. So, the following tasks were set for the thesis:

1. to investigate theoretically the technical aspects of PID controller design and simulate the system.
2. to study, if possible, the history and context of coffee for a wider audience today.

If possible, to explore the potential of the CID in the context of the present work:

1. the working principle of the coffee machine, the hydraulic and electrical parts
2. PID algorithms
3. PID controller design and tuning.

From the final result it can be concluded that the designed PID controller performs its tasks. All the components used in the design are available in Estonian shops, which makes the assembly easier. The author is confident that the future will bring further development of the designed schematic, as a start has already been made.

Separately, the author is very grateful to King Coffee Service for giving such an opportunity to write the thesis.

## 4. KASUTATUD KIRJNADUSE LOETELU

- [1] La Marzocco, „La Marzocco Technical Center,“ [Võrgumaterjal]. Available: <https://techcenter.lamarzocco.com>.
- [2] K. J. Åström ja T. Hägglund, Advanced PID Control, Lund: International Society of Automation (ISA), 2006.
- [3] „Engineering ToolBox,“ 2001. [Võrgumaterjal]. Available: [https://www.engineeringtoolbox.com/volumetric-temperature-expansion-d\\_315.html](https://www.engineeringtoolbox.com/volumetric-temperature-expansion-d_315.html).
- [4] J. F. Smuts, Process Control for Practitioners, OptiControls Inc , 2011.
- [5] Arduino, „Arduino Docs,“ [Võrgumaterjal]. Available: <https://docs.arduino.cc/>.
- [6] Tallinna Tehnikaülikool, „Inseneriteaduskonna kirjalike tööde mall,“ [Võrgumaterjal]. Available: <https://taltech.ee/oppetoo-korraldus-inseneriteaduskond>. [Kasutatud 02 märts 2021].
- [7] V. Bakalov, A. Ignatov ja B. Kruk, Elektrilahelate ja elektroonika teooria alused, Raadio ja side, 1989.
- [8] W. G. Jung, IC Op-Amp Cookbook 3rd ed. Edition, Prentice Hall;, 1986.
- [9] L. V. M. S. Angeelika Kang, Kohviraamat, Tallinn: Tallinna Raamtutrukikoda, 2006.

# LISAD

Tabel 3. Veepaisumis koefitsendid [3]

Temperatuur, °C	( $\beta$ /°C)
0	-0.000050
4	0
10	0.000088
20	0.000207
30	0.000303
40	0.000385
50	0.000457
60	0.000522
70	0.000582
80	0.000640
90	0.000695

```

// Constants
#define KYTE_PIN 3
#define NULL_PUNKTI_LABIMINE_PIN 8
#define SET_POINT_TEMP 50
#define TEMP_READ_DELAY_MS 250
#define MAX_KYTE_DELAY_US 7700

// PT1000 temperature sensor
const int PT1000_PIN = A0;
const float vt_factor = 1.88; // temperature to voltage ratio
const float offset = -27.43; // sensor resistance compensation offset

// Variables
volatile uint8_t last_state = 0;
volatile bool null_labimine_detected = false;

volatile unsigned long current_time = 0;
volatile unsigned long previous_time, previous_time_1 = 0;
volatile float temp_c = 0;
volatile float temp_c_smoothed, temp_c_previous = 0;
volatile float LPF = 0.125;

volatile float elapsedTime, Time, timePrev;
volatile double PID_error, PID_previous_error = 0;
volatile int PID_value;
volatile int kp = 728.4; // Proportional gain
volatile int ki = 2.62; // Integral gain
volatile int kd = 486.6; // Derivative gain
volatile int PID_p = 0;
volatile int PID_i = 0;
volatile int PID_d = 0;

void setup() {
  DDRD |= (1 << DDD3); // Set pin 3 (KYTE_PIN) as output
  DDRB &= ~(1 << DDB0); // Set pin 8 (NULL_PUNKTI_LABIMINE_PIN) as input
  PORTD &= ~(1 << PORTD3); // Set KYTE_PIN low
  PCICR |= (1 << PCIE0); // Enable PCMSK0 scan
  PCMSK0 |= (1 << PCINT0); // Set pin D8 (zero cross input) trigger an interrupt on
state change.
  Serial.begin(9600);
}

void loop() {
  current_time = millis();
  if (current_time - previous_time >= TEMP_READ_DELAY_MS) {
    // Read temperature
    int sensor_value = analogRead(PT1000_PIN);
    float voltage = sensor_value * (5.0 / 1023.0);
    previous_time += TEMP_READ_DELAY_MS;
    temp_c = (((voltage * 100) / vt_factor) + offset);
    // Low Pass Filter to smooth the temperature measurement
    temp_c_previous = temp_c;
  }
}

```

```

temp_c_smoothed = temp_c_smoothed - (LPF * (temp_c_smoothed -
temp_c_previous));

PID_error = SET_POINT_TEMP - temp_c_smoothed;
PID_p = kp * PID_error;
PID_i = PID_i + (ki * PID_error);
timePrev = Time;
Time = millis();
elapsedTime = (Time - timePrev) / 1000;
PID_d = kd * ((PID_error - PID_previous_error) / elapsedTime);
PID_value = PID_p + PID_i + PID_d;

if (PID_value < 0) {
    PID_value = 0;
}

if (PID_value > MAX_KYTE_DELAY_US) {
    PID_value = MAX_KYTE_DELAY_US;
}

if (PID_error >= 1.5) {
    PID_value = MAX_KYTE_DELAY_US;
}

if (PID_error < -0.5) {
    PID_value = 0;
}

if (PID_i > 6400) {
    PID_i = 6400;
}

PID_previous_error = PID_error;

Serial.print(temp_c_smoothed, 1);
Serial.print(" ");
Serial.print(PID_value);
Serial.print(" ");
Serial.println(current_time);
Serial.print("Kp:");
Serial.print(PID_p);
Serial.print(" Ki:");
Serial.print(PID_i);
Serial.print(" Kd:");
Serial.println(PID_d);
}
if (null_labimine_detected) {
    delayMicroseconds(MAX_KYTE_DELAY_US - PID_value);
    PORTD |= (1 << PORTD3); // Set KYTE_PIN high
    delayMicroseconds(100);
    PORTD &= ~(1 << PORTD3); // Set KYTE_PIN low
    null_labimine_detected = false;
}
}
ISR(PCINT0_vect) {

```



```
if (PINB & B00000001) {  
  if (last_state == 0) {  
    null_labimine_detected = true;  
  }  
} else if (last_state == 1) {  
  null_labimine_detected = true;  
  last_state = 0;  
}  
}
```