

Jere Aho

PID-SÄÄTIMEN VIRITYS SULJETUN PII- RIN KOKEILLA

Kandidaatintyö
Tekniikan ja luonnontieteiden tiedekunta
Tarkastaja: Veli-Pekka Pyrhönen
Joulukuu 2022

TIIVISTELMÄ

Jere Aho: PID-säätimen viritys suljetun piirin kokeilla
Kandidaatintyö
Tampereen yliopisto
Teknisten tieteiden kandidaatin tutkinto-ohjelma
Joulukuu 2022

PID-säädin on erittäin yleinen säädin teollisuuden automaattoratkaisuissa. Sitä käytetään esimerkiksi erilaisten aineiden lämpötilan ja virtauksen säätöön, sekä kappaleiden dynaamisten liikkeiden hallintaan. PID-säätimen viritys on systeemin toiminnan kannalta kriittistä. Suurimmassa osassa säätimistä käytetään ainoastaan P- ja I- haaroja D-haaran virituksen haastavuuden takia, tai sen takia, että kyseessä olevalle prosessimallille siitä ei ole hyötyä. Monessa käyttötapauksessa tämä ei haittaa, koska PI-säätimen toiminta on usein riittävää. Tässä työssä yritetään mallintaa tuntematonta prosessia FOTD-mallilla (First-Order-plus-Time-Delay -malli), ja laskea mallin avulla sopivat PI- sekä PID-parametrit.

Työn teoriaosassa esitellään tapa määrittää FOTD-mallin parametrit suljetun piirin askelvastekokeen perusteella. Lisäksi esitetään FOTD-mallin avulla laskettavat PI-säätimen vitysparametrien SIMC-virityssäännöllä, ja samalla mallilla PID-säätimen vitysparametrien laskenta Lambda-säännöllä. Työn toisessa vaiheessa tutustutaan Thermonix T-2500BE -laitteen toimintaan. Laite on elektroniikan testausta varten kehitetty laite, jolla voi säätää kappaleen lämpötilan halutuksi. Laite lämmitteää tai jäähdyttää paineistettua ilmaa, joka puhalletaan testattavaan kappaleeseen, jolloin lämpö siirtyy kappaleeseen pakotetulla konventiolla. Laitteella voi säätää joko ilman lämpötilaa, tai itse kappaleen lämpötilaa. Tässä työssä keskitytään ilman lämpötilasäätöön. Kolmannessa vaiheessa määritetään ilman lämpötilansäädölle prosessimalli, jonka avulla lasketaan PI- ja PID-säätimen parametrit, sekä kokeillaan niiden toimivuutta.

Työssä käsiteltävästä laitteesta ei ole käyttöohjekirjaa ja toimilaitekaaviota lukuun ottamatta valmistajan toimittamaa dokumentaatiota. Käyttöohjekirja ja toimilaitekaavio eivät ota kantaa laitteen säätimen tai säätöpiirin toimintaan. Laitteelle on kuitenkin olemassa patenti, joka käsittelee säätöpiirin toimintaa. Työssä havaitaan useampi ongelma, jotka viittaavat siihen, että laitteen toiminnasta ei saatu tarpeeksi tietoa.

Työssä saadut PI- ja PID-säätimen vitykset ovat jokseenkin toimivia, vaikka toiminta jätti parantamisen varaa. Säätimen vitykseksi päätettiin valita SIMC-säännöllä saatu PI-säädin. Lambda-virityssäännöt antoivat liian heikon I-haaran vityksen, mikä johti hitaaseen asetusarvoon pääsemiseen, sekä liian voimakkaan D-haaran vityksen, mikä taas aiheutti pieniamplitudista värähtelyä ilman lämpötilaan.

Avainsanat: PI-säädin, PID-säädin, SIMC, Lambda, säätötekniikka, FOTD-malli

Tämän julkaisun alkuperäisyys on tarkastettu Turnitin OriginalityCheck -ohjelmalla.

SISÄLLYSLUETTELO

1. JOHDANTO	1
2. PID-SÄÄTIMEN RAKENNE JA TOIMINTAPERIAATE	2
2.1 Rinnan- ja sarjankytöntärakenteen esitystavat	2
2.2 Proportionaalihaara	4
2.3 Integrintihaara	4
2.4 Derivointihaara	5
3. PROSESSIMALLIN SOVITTAMINEN SULJETUN PIIRIN ASKELVASTEEN PERUSTEELLA	6
3.1 Prosessimallin approksimointi suljetun piirin askelkokeella	6
3.2 Säätimen viritys SIMC-säännöllä	8
3.3 Säätimen viritys Lambda-säännöllä	9
4. THERMONIX T-2500BE	11
4.1 PID-säädin Thermonix T-2500BE:ssä	12
4.2 I-haaran toteutus	13
4.3 Toiminta alkutilanteessa	15
5. THERMONIX T-2500BE:N PID-SÄÄTIMEN VIRITYS	17
5.1 FOTD-mallin sovittaminen	17
5.2 Porraskoe	19
5.3 Viritysparametrien laskenta PI-säätimelle	20
5.4 Viritysparametrien laskenta PID-säätimelle	21
5.5 Parempien PID-säätimen viritysparametrien etsintä iteroimalla	23
6. YHTEENVETO	25
LÄHTEET	26

LYHENTEET JA MERKINNÄT

Lyhenteet

DUT	engl. Device Under Test, testattava laite. Tässä tapauksessa työn kohteena olevalla laitteella testattavat laitteet.
FOTD	engl. First-Order Plus Time Delay, matemaattinen malli systeemien mallintamiseen
PI	engl. Proportional Integral, PI-säädin
PID	engl. Proportional Integral Derivative, PID-säädin

Merkinnät

\dot{K}_D	Thermonix T-2500BE:n PID-säätimen derivointihaaran vahvistus
\dot{K}_I	Thermonix T-2500BE:n PID-säätimen integrointihaaran vahvistus
\dot{K}_P	Thermonix T-2500BE:n PID-säätimen proportionaalihaaran vahvistus
K'_D	Sarjamuotoisen PID-säätimen derivointiosan vahvistus
K'_I	Sarjamuotoisen PID-säätimen integrointi-osan vahvistus
K'_P	Sarjamuotoisen PID-säätimen proportionaaliosan vahvistus
G_{UD}	Siirtofunktio erosuureesta D-haaran ohjaussignaalin D-haaran osaan
K_D	Rinnakkaismuotoisen PID-säätimen derivointiosan vahvistus
K_I	Rinnakkaismuotoisen PID-säätimen integrointi-osan vahvistus
K_P	Rinnakkaismuotoisen PID-säätimen proportionaaliosan vahvistus
K_{c0}	Suljetun piirin askelvastekokeessa käytetty P-säätimen vahvistus
T_D	PID-säätimen derivointiaika
T_I	PID-säätimen integrointi-aika
t_p	Aika askelvastekokeen ensimmäiseen huippuun
u_I	Ohjaussignaalin I-haaran osa
u_P	Ohjaussignaalin P-haaran osa
τ_c	Virityssääntöjen viritysparameetri
Δy_∞	Askelvasteen loppuarvon muutos alkutilasta
Δy_p	Askelvasteen ensimmäisen huipun maksimin muutos alkutilasta
Δy_s	Asetusarvon muutos suljetin piirin askelvastekokeessa
Δy_u	Askelvasteen ensimmäisen alituksen minimin muutos alkutilasta
e	Erosuure
k	FOTD-mallin vahvistus

y	Säätöpiirin ulostulo, säädettävä suure
y_m	Säätöpiirin ulostulon mitattu arvo
y_s	Asetusarvo
K	Rinnakkaismuotoisen PID-säätimen vahvistus
u	Ohjaussignaali, säätimen ulostulo
θ	FOTD-mallin viive
τ	FOTD-mallin aikavakio

1. JOHDANTO

Lämpötilan takaisinkytketyssä säädössä halutun systeemin, kuten rakennuksen sisälämpötilan tai kappaleen, nesteen tai kaasun lämpötilaa halutaan hallita. Tavoitteena voi olla lämpötilan pitäminen vakiona ympäristön muutoksista huolimatta tai lämpötilan nopea ja tarkka muuttaminen. Lämpötilan takaisinkytketty säätöpiiri koostuu yleensä mittauksesta, lämpö- tai kylmälaiteesta ja säätimestä. Lämpötilan säädön käyttötarkoitus määrittää, millaisia ratkaisuja prosessin eri osissa on käytettävä.

Yksinkertainen esimerkki lämpötilan säädöstä on keittiöissä käytettävä uuni. Keittiöuuneissa säätimenä toimii yleensä perinteinen termostaatti, joka käynnistää ja sammuttaa lämmitysvastuksia sen mukaan, onko uunin lämpötila matalampi tai korkeampi kuin käyttäjän asettama haluttu lämpötila. Jotta lämmitysvastusta ei kytkettäisi päälle ja pois jatkuvasti, on termostaateilla hystereesiväliksi kutsuttu alue. Tämä tarkoittaa, että mitatun lämpötilan tulee poiketa tietyn verran halutusta lämpötilasta, jotta vastusten tilaa muutetaan. Tämän kaltainen säädin on varsin yksinkertainen, mutta lämpötilaa ei voi säätää kovin tarkasti. Tarkempaa säätöä varten tarvitaan säädettävä lämpölähde sekä kehittyneempi säädin, esimerkiksi PID-säädin (Proportional-Integral-Derivative -säädin). Tässä työssä perehdytään lämpötilan säätöratkaisun virittämiseen. Työn kohteena olevassa laitteessa on PID-pohjainen säädin.

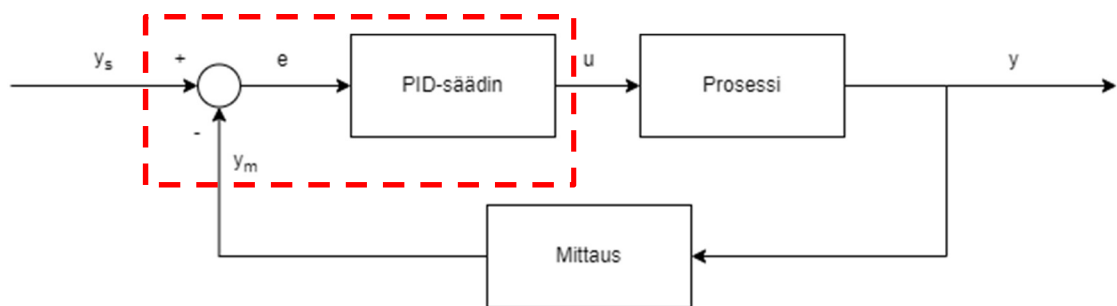
Thermonix T-2500BE on elektroniikan testaukseen suunniteltu laite, jonka tarkoitus on säätää kappaleen lämpötila halutuksi ja pitää se siinä alle 0,5 °C vaihtelulla. Kappale asetetaan ilmavirtaan, jonka lämpötilaa hallitaan lämpölaitteen avulla. Kappaleen lämpötilaa mitataan, ja ilmavirran lämpötilaa säädetään sen perusteella.

Alkutilanteessa laitteen toiminnassa on havaittu ongelma. Laite on mahdollista saada käyttöalueellaan tilaan, jossa lämpötila ei enää stabiloidu. Työn tavoitteena on tutkia, miten laitteen takaisinkytketyn säätöpiirin suorituskykyä voi parantaa suorittamalla suljetun takaisinkytketyn säätöpiirin kokeita.

Työssä käsitellään ensin PID-säätimen toimintaperiaatetta yleisellä tasolla. Tämän jälkeen esitetään työssä tarvittavia menetelmiä prosessimallin parametrien määrittämiseen, sekä PID-säätimen virityspanametrieni laskentaan. Seuraavaksi esitellään Thermonix T-2500BE -laitteen toimintaa, jonka jälkeen käytetään työssä esiteltyjä menetelmiä laitteen ilman lämpötilan säätöpiirin virityspanametrieni etsintään PI- ja PID-säätimille. Lopuksi testataan, kuinka hyvin uudet virityspanametrieni toimivat.

2. PID-SÄÄTIMEN RAKENNE JA TOIMINTAPERIAATE

PID-säädin eri muotoineen on yleisimmin käytetty säätöalgoritmi, sillä se soveltuu monenlaisten prosessien säätöön. Siinä on vain muutama vityysparametri, jotka voidaan laskea prosessimallin tai prosessille tehtyjen kokeellisten vasteiden perusteella. Tässä luvussa käsitellään PID-säätimen toimintaa, sekä erilaisia esitystapoja sen osille ja niiden yhdistämiselle. Seuraavassa kuvassa on esitetty yksinkertainen säätöpiiri:



Kuva 1. Yksinkertainen säätöpiiri

PID-säätimen sisääntulona on asetusrvo ja säädettävän suureen mittaus (kuvassa 1 y_s ja y_m). Kuvaan 1 on merkattu myös erosuure $y_s - y_m$, jolla korostetaan PID-säätimen algoritmin toimintaa. Säädin laskee sen perusteella kullakin hetkellä sopivan ohjaussignaalin. Ohjaussignaali syötetään toimilaitteelle, joka ohjaa prosessia. Jos kuvan 1 lohkokaaviossa oleva mittaus oletetaan ideaaliksi, on y_m yhtä suuri kuin y .

2.1 Rinnan- ja sarjankytkentärakenteen esitystavat

PID-säätimen niin sanottu oppikirjatoteutus on seuraava:

$$u(t) = K \left(e(t) + \frac{1}{T_I} \int_0^t e(T) dT + T_D \frac{de(t)}{dt} \right), \quad (1)$$

$$e(t) = y_s - y_m, \quad (2)$$

jossa $u(t)$ on ohjaussignaali, T_i integrointiaika ja T_d derivointiaika [1, s. 64]. Toinen yleinen esitystapa kaavalle 1 rinnankytkentä:

$$u(t) = K_p e(t) + K_I \int_0^t e(\tau) d\tau + K_D \frac{de(t)}{dt}. \quad (3)$$

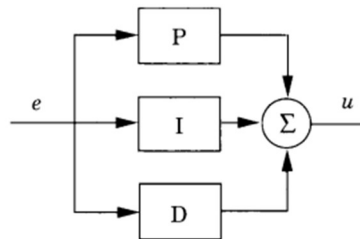
Kaavojen (1) ja (3) välille voidaan muodostaa yhteys valitsemalla K_p , K_i ja K_d seuraavasti [1, s. 72]:

$$K_p = K, \quad (4)$$

$$K_i = \frac{K_p}{T_i}, \quad (5)$$

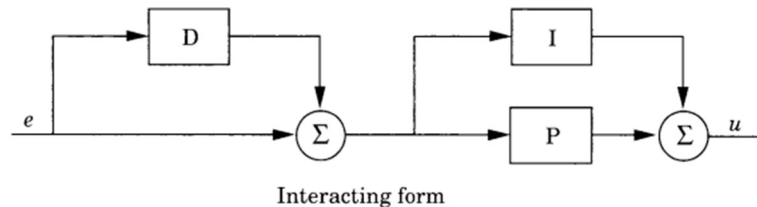
$$K_d = K_p T_d. \quad (6)$$

PID-säätimen rinnakkaismuotoinen esitystapa lohkokaaviomuodossa näyttää seuraavalta:



Kuva 2. PID-säätimen rinnakkainen esitystapa lohkokaaviomuodossa [1, s. 71]

Kuvasta 2 nähdään hyvin, että PID-säädin voidaan jakaa kolmeen eri haaraan: P-haaraan eli proportionaalihaaraan, I-haaraan eli integrointihaaraan ja D-haaraan eli derivointihaaraan. Joskus on helpompaa käyttää PID-säätimestä sarjamuotoista rakennetta:



Kuva 3. PID-säätimen sarjamuotoinen esitys lohkokaaviomuodossa [1, s. 71]

Sarjamuotoinen esitystapa siirtofunktiomuodossa on seuraava [2]:

$$K_{PID}(s) = \frac{K'_p (T'_i s + 1)(T'_d s + 1)}{T'_i s}. \quad (7)$$

Sarjamuotoisen esityksen parametrit voidaan muuttaa rinnakkaisen esityksen vastaaviksi seuraavilla muunnoskaavoilla [2]:

$$f = 1 + \frac{T'_d}{T'_i}, \quad (8)$$

$$K_p = K'_p f, \quad (9)$$

$$T_I = T'_{If}, \quad (10)$$

$$T_D = \frac{T'_D}{f}. \quad (11)$$

Yllä olevista kaavoista huomataan, että kun T_D on nolla, jolloin säädin toimii puhtaasti PI-säätimenä, esitystapojen välillä liikuttaessa parametrit eivät muutu.

2.2 Proportionaalihaara

P-haara on haaroista yksinkertaisin. Jos säädin toimisi puhtaasti P-haaran mukaisesti, olisi sen matemaattinen esitys seuraava [1, s. 65]:

$$u_P(t) = K_P(y_s - y(t)) + u_b = K_P e(t) + u_b. \quad (12)$$

Erosuurta siis vain kerrotaan jollain vakiolla. P-haarassa huomionarvoista on se, että systeemin ollessa asetusarvossa ohjaus on nolla. Pelkkä P-säätö siis ei riitä systeemin saattamiseksi asetusarvoonsa, jos prosessi vaatii nolasta poikkeavaa sisääntuloa pysyäkseen kyseisessä tilassa. P-haaran ulostuloon voidaan myös lisätä vakio-ohjauskomponentti u_b , jolloin myös pelkällä P-säädöllä voidaan pysyä asetusarvossa.

2.3 Integrointihaara

Säätimen integrointihaara pitää huolen siitä, että systeemi saadaan asetusarvoonsa, ja pysymään siinä. Jos integrointikerroin oletetaan vakioksi, on I-säädön matemaattinen esitys

$$u_I(t) = K_I \int_0^t e(t) dt. \quad (13)$$

Jos integrointikerroin ei ole vakio, voi I-haaran toteutus olla joko kaavan 13. mukainen tai seuraava:

$$u_I(t) = \int_0^t K_I(t) e(t) dt. \quad (14)$$

Näiden kaavojen ero on siinä, että kaavassa 13 K_I :n muuttuessa kesken ajon, koko integrointi kerrotaan uudella tunnuksella K_I . Tämä voi johtaa suuriin piikkeihin ohjauksessa. Tämän vuoksi I-haara saatetaan toteuttaa myös kaavan (14) mukaisena. Tällöin voidaan ajautua tilanteeseen, jossa integrointi täytyy nollata. Näin voi käydä esimerkiksi silloin, jos ajon aikana K_I on käynyt huomattavan suurena, jolloin säädin ei välttämättä

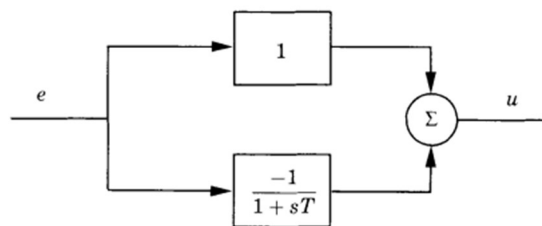
palautu järkevään tilaan ilman nollausta. Tästä voi seurata ongelmia myös moodin vaihdon yhteydessä, jolloin säädin esimerkiksi vaihdetaan kesken ajon PI-säätimestä P-säätimeksi tai toisin päin.

2.4 Derivointihaara

Derivointihaaran tarkoitus on parantaa suljetun piirin stabiiliutta. Siitä on hyötyä etenkin systeemeissä, joissa prosessimallin aikavakio on suuri, jolloin ohjausarvo näkyy järjestelmän ulostulossa hitaasti. [1, s. 68]

PID-säätimen derivointihaara derivoi ero suurta ja pyrkii täten ennustamaan, mihin suuntaan se on muuttumassa ja kuinka voimakkaasti. Koska kyseessä on derivointi, vaikuttaa mittauskohina D-haaran ulostuloon voimakkaasti. Tästä syystä D-haaraan syötettävää ero suurta yleensä suodatetaan kohinan vaikutusten minimoimiseksi.

Derivointihaaran niin kutsuttu klassinen toteutus on seuraava:



Kuva 4 Derivointihaaran ”klassinen” toteutus [1, s. 70]

Kuvan 4 lohkoavion mukainen derivointihaaran siirtofunktio erosuureesta ohjaussignaaliin on seuraava [1, s. 70]:

$$G_{UE}(s) = \frac{sT_D}{1 + sT_D}. \quad (15)$$

Tällä toteutustavalla erosuure suodatuu automaattisesti.

D-haaralle sopivan viritysparametrin löytäminen voi joillekin prosesseille osoittautua hankalaksi, joten PID-säädintä käytetään usein PI-säätimenä ilman D-haaraa.

3. PROSESSIMALLIN SOVITTAMINEN SULJETUN PIIRIN ASKELVASTEEN PERUSTEELLA

Tässä luvussa käsitellään tuntemattoman prosessin mallin määrittämistä takaisinkytketyn säätöpiirin askelvastekokeilla. Tätä varten matemaattisen prosessimallin rakenne ja kertaluokka tulee kiinnittää. Tässä työssä prosessimallina käytetään FOTD-mallia. Luvussa esitetään myös yksinkertaisia FOTD-malliin perustuvia vityssääntöjä PI- ja PID-säätimille.

3.1 Prosessimallin approksimointi suljetun piirin askelkokeella

Koska laitteen toimilaitteelle (lämmitin) sekä prosessille (joko pelkän ilman lämmittäminen tai ilman ja sen kautta kappaleen lämmittäminen) avoimen järjestelmän kokeiden suorittaminen on vaikeaa, täytyy mallit approksimoida suljetun järjestelmän kokeiden avulla.

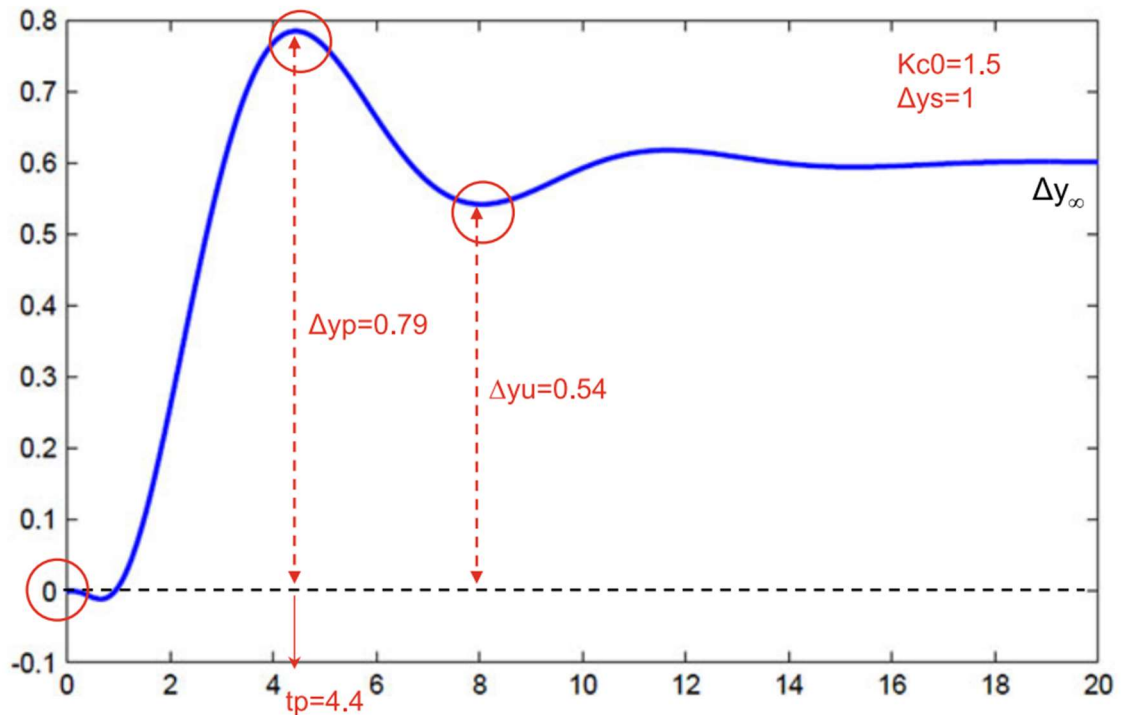
Skogestad ja Grimholt [3, s. 150 – 153] esittävät Vilanovan ja Visiolin kirjassa tavan approksimoida prosessimalli suljetun piirin kokeesta käyttämällä ainoastaan P-säätöä. Tapa on aiemmin esitetty Skogestadtin ja Shamsuzzohan artikkelissa The setpoint overshoot method: A simple and fast closed-loop approach for PID tuning [3]. Tässä tavassa koetta varten valitaan p-säätimen vahvistukseksi sellainen, että askelvasteen ylitys on noin 30 %. Tämän jälkeen tehdään askelvastekoe, jonka tuloksista voidaan laskea tarvittavat parametrit k , τ ja θ FOTD-mallia varten.

FOTD-malli voidaan esittää siirtofunktiomuodossa seuraavasti [3, s. 149]:

$$P(s) = \frac{k}{\tau s + 1} \exp(-\theta s), \quad k \neq 0, \tau > 0, \theta > 0. \quad (16)$$

Kaavassa (16) k on prosessin DC-vahvistus, τ prosessin aikavakio ja θ prosessin viive.

Kuvassa 5 on esitetty suljetun piirin askelkoe käyttäen P-säädintä vahvistuksella 1.5, jolla askelvasteen ylitys Δy_p on noin 30 % systeemin ulostulon loppuarvosta Δy_∞ .



Kuva 5. Askelvastekoe suljetulle piirille [3, s. 151]

Askelvasteesta tarvitaan seuraavat parametrit [3, s. 151]:

- säätimen P-vahvistus, K_{c0}
- askelvasteen muutos, Δy_s
- aika ensimmäiseen huippuun, t_p
- askelvasteen ensimmäisen huipun maksimiarvo (muutos alkutilasta) Δy_p
- askelvasteen ensimmäisen alituksen minimi, Δy_u .

Nämä parametrit ovat askelvastekokeesta helpoimmat ja robusteimmat määrittää [4]. Näiden parametrien määrittämiseen kokeesta tarvitsee vain datan alusta ensimmäiseen alitukseen, jonka jälkeen testi voidaan lopettaa. Arvio vasteen loppuarvolle Δy_∞ voidaan laskea kaavalla [3, s. 152]:

$$\Delta y_\infty = 0,45(\Delta y_p + \Delta y_u). \quad (17)$$

Loppuarvon muutos voidaan myös määrittää jatkamalla koetta, kunnes ulostulo on stabiiloinut. Kaavalla saadaan kuitenkin yleensä tarpeeksi tarkka arvio mallin määrittämistä varten.

Yllä mainituista arvoista voidaan laskea ylitys D [3, s. 152]:

$$D = \frac{\Delta y_p - \Delta y_\infty}{\Delta y_\infty} \quad (18)$$

ja loppuarvon virhe B [3, s. 152]:

$$B = \left| \frac{\Delta y_s - \Delta y_\infty}{\Delta y_\infty} \right|. \quad (19)$$

Skogestadt ja Grimholt käyttävät näitä arvoja apuparametrien A ja r laskemiseen [3, s. 152].

$$A = 1,152D^2 - 1,607D + 1 \quad (20)$$

$$r = \frac{2A}{B} \quad (21)$$

Yllä olevien kaavojen avulla voidaan määrittää FOTD-mallin parametrit k , θ ja τ [3, s. 152]:

$$k = \frac{1}{K_{c0}B}, \quad (22)$$

$$\theta = t_p(0,309 + 0,209e^{-0,61r}), \quad (23)$$

$$\tau = r\theta. \quad (24)$$

Sijoittamalla yllä olevat parametrit FOTD-mallin yleiseen kaavaan saadaan tutkittavan systeemin prosessia approksimoiva malli, jota voidaan käyttää säätimen viritysparametrien laskennassa.

3.2 Säätimen viritys SIMC-säännöllä

PI- ja PID- säätimien viritysparametrit voidaan määrittää prosessin matemaattisen mallin perusteella. Tässä työssä käytetään matemaattisena mallina FOTD-mallia. FOTD-mallista voidaan laskea prosessille PI-säätimen viritysparametrit käyttämällä SIMC-sääntöä [2]. SIMC-sääntöjen mukaisia PID-säätimen parametreja varten tulisi prosessille määrittää toisen asteen siirtofunktio.

SIMC-sääntö on Skogestadin parantelema versio aiemmin julkaistusta IMC-virityssäännöstä. SIMC-säännön mukaiset PI-säätimen parametrit voidaan laskea seuraavilla kaavoilla:

$$K'_P = \frac{1}{k} \frac{\tau}{\tau_c + \theta}, T_I = \min(\tau_c, 4(\tau_c + \theta)), \quad (25)$$

jossa K_C on säätimen p-vahvistus, T_I säätimen integrointi-aika, τ FOTD-mallin aikavakio, k FOTD-mallin vahvistus, θ FOTD-mallin viive ja τ_c tavoiteltu suljetun piirin aikavakio, joka toimii SIMC-säännön viritysparametrina. [2]

SIMC-säännössä τ_c on ainoa käyttäjän valitsema parametri. Suositeltu valinta ”tiukalle säädölle” on $\tau_c = \theta$ [3, s. 155]. Parametria voidaan myös iteroida, kunnes sopiva viritys on löydetty.

Yksinkertaisuuden vuoksi säännön kaavat on johdettu sarjamuotoisen PI-säätimen siirtofunktioista. Työssä käsiteltävässä laitteessa käytetään PID-säätimen rinnakkaisista malleista. Laitteen PID-säätimestä kerrotaan enemmän luvussa 4.1. Luvussa 2.1 esitettiin muunnoskaavat PID-säätimen sarjamuotoisen esityksen parametreista rinnakkaismuotoiseen esitykseen. Kaavoja (4), (5) ja (6) sekä (9) – (14) käyttämällä saadaan muodostettua SIMC-kaavojen antamista parametreista kaavan 3 mukaiselle rinnakkaiselle PI-säätimelle soveltuvat parametrit. PI-säätimelle $T_D = 0$.

$$K_P = K'_P \quad (26)$$

$$K_I = \frac{K_P}{T_I} \quad (27)$$

Käyttämällä SIMC-säännön kaavaa (25) ja yllä olevia muunnoskaavoja (26) ja (27) voidaan laskea kaavan (4) mukaiselle rinnakkaiselle PID-säätimelle parametrit seuraavasti:

$$K_P = \frac{1}{k} \frac{\tau}{\tau_c + \theta}, K_I = \frac{K_P}{\min(\tau_c, 4(\tau_c + \theta))}. \quad (28)$$

Näitä kaavoja käsitellään vielä alaluvussa 4.1 ennen kuin ne ovat työssä käytettävän laitteen PID-säätimen mukaisia.

3.3 Säätimen viritys Lambda-säännöllä

Lambda-säännöt sopivat hyvin systeemeihin, joissa aikavakio on suuri viiveeseen verrattuna [1]. Niillä on helppo laskea PI-säätimen lisäksi myös PID-säätimen parametreja, sillä PID-parametrit voidaan laskea myös FOTD-mallista.

Lambda-virityssäännöt rinnakkaiselle säätimen esitystavalle ovat seuraavat [1, s. 189]:

$$K_P = \frac{1}{k} \frac{\frac{\theta}{2} + \tau}{\frac{\theta}{2} + \tau_c}, \quad (29)$$

$$T_I = \tau + \frac{\theta}{2}, \quad (30)$$

$$T_D = \frac{\tau\theta}{\theta + 2\tau}, \quad (31)$$

jossa τ_c on Lambda-virityssääntöjen käyttäjän määrittämä parametri. Yleisesti käytettyjä peukalosääntöjä τ_c :n valintaan ovat robustille säädölle $\tau_c = 3\tau$, ja aggressiiviselle säädölle $\tau_c = \tau$. [1, s. 187]

Muunnetaan vielä kaavoja (4), (5) ja (6) käyttäen säännöt siten, että ne antavat parametrit kaavan (3) mukaisen rinnakkaisen PID-säätimen toteutukselle:

$$K_P = \frac{1}{k} \frac{\frac{\theta}{2} + \tau}{\frac{\theta}{2} + \tau_c}, \quad (32)$$

$$K_I = \frac{K_P}{\tau + \frac{\theta}{2}}, \quad (33)$$

$$K_D = \frac{K_P \tau \theta}{\theta + 2\tau}. \quad (34)$$

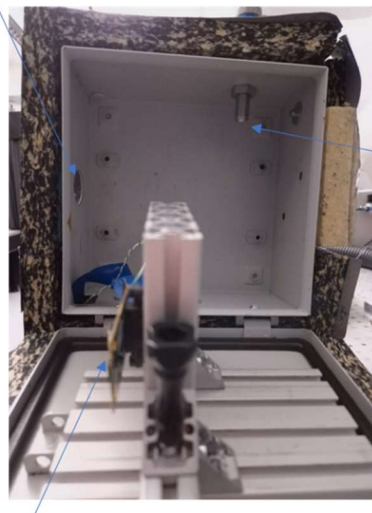
Myös kaavoihin (32), (33) ja (34) palataan myöhemmin alaluvussa 4.1. Niiden avulla lasketaan työssä viritettävälle PID-säätimelle sopivat parametrit.

4. THERMONIX T-2500BE

Thermonix T-2500BE on elektroniikan testausta varten suunniteltu laite. Laitteen tarkoitus on lämmittää testattava laite tai komponentti haluttuun lämpötilaan (*servotehtävä*), ja lämpötilan saavutettua tavoitearvonsa pitää se vakiona (*regulointitehtävä*). Kyseistä laitetta käytetään kameralaitteiden ja -moduulien testaukseen.

Kappaleen lämmittäminen tai kylmentäminen tehdään asettamalla kappale ilmavirtaan, jonka lämpötilaa säädetään. Kappaletta varten on laatikko, johon ilma kuljetetaan putkea pitkin. Laatikko on esitetty kuvassa 6.

Aukko, josta voidaan kuvata testikuvia

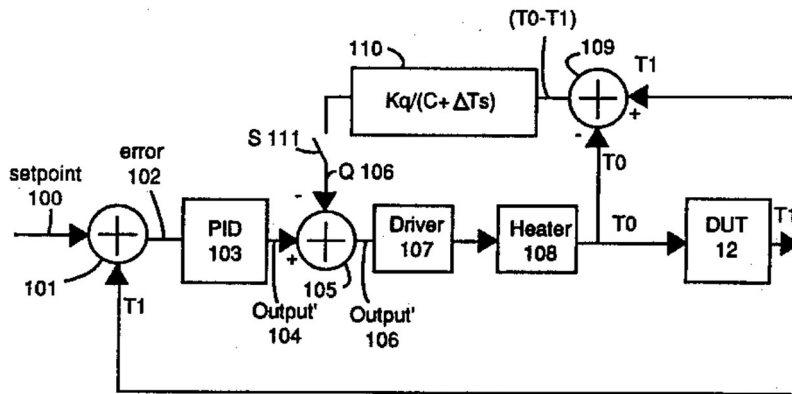


Lämpötilaa ohjaavan ilman tuloaukko

Kameramoduuli

Kuva 6. Laatikko, johon testattava laite asetetaan. Laatikko suljetaan testauksen ajaksi.

Ilmavirta muodostetaan paineilmalla, jota varten laite vaatii ulkoisen paineilmanlähteen. Ilman tilavuusvirran suuruuden voi asettaa halutuksi, ja se pyritään pitämään vakiona lämpötilansäädön aikana. Seuraavalla sivulla olevassa kuvassa 7 on esitetty laitteen säätöpiiri lämpötilalle lohkokaaviomuodossa.



Kuva 7. Thermonix T-2500BE säätöpiirin lohkokaavioesitys [5]

Laitteen säätimenä on PID-säädin. PID-säätimen oletetusta toteutuksesta kerrotaan luvussa 2.1. Säätimen lisäksi laitteen (DUT) lämpötilan säätöpiirissä on ylimääräinen takaisinkytkentä (kuvassa 7 109 ja 110) lämmittimen epälineaarisuuksien kompensoimiseksi huoneenlämpötilan läheisyydessä [5]. Tässä työssä keskityttiin ilman lämpötilansäätöön, joten epälineaarisuuksien kompensointia ei tässä työssä käsitellä.

Säätimen voi asettaa säätämään joko puhallettavan ilman lämpötilaa tai testattavan kappaleen lämpötilaa. Kyseisen laitteen käyttötarkoituksessa yleisemmin käytetään kappaleen lämpötilansäätöä, mutta ilman lämpötilansäätö mahdollistaa tämän lisäksi esimerkiksi tarkkojen maksimi- ja minimilämpötilojen asettamisen puhallettavalle ilmalle.

Laitteen PID-säätimen parametrit on määritetty erikseen testilaitteen lämmitykselle ja viilennykselle, sekä ilman lämpötilansäädön tapauksessa kuumalle ilmalle (yli 30 °C) ja kylmälle ilmalle (alle 30 °C). PID-parametrien lisäksi laitteen lämpötilansäädön tapauksessa on määritettävä myös epälineaarisuuksien kompensointiin liittyvä parametri K_q .

4.1 PID-säädin Thermonix T-2500BE:ssä

Työssä tutkitavan laitteen säädin on lähellä rinnakkaista mallia (kaava (8)). Patenttia tutkimalla selviää, että laitteelle syötettävät parametrit vaativat vakiokertoimet seuraavasti [5]:

$$\dot{K}_p = 4K_p, \quad (32)$$

$$\dot{K}_i = 32K_i, \quad (33)$$

$$\dot{K}_d = 8K_d. \quad (34)$$

Näiden kaavojen avulla voidaan johtaa SIMC- ja Lambda -virytyssäännöt laitteen PID-säätimelle sopiviksi.

Kaavoja (28), (32) ja (33) käyttämällä saadaan laitteelle sopivat SIMC-säännöt PI-säätimelle. Säännöt ovat seuraavat:

$$\dot{K}_P = \frac{4}{k} \frac{\tau}{\tau_c + \theta}, \dot{K}_I = \frac{32K_P}{\min(\tau_c, 4(\tau_c + \theta))}. \quad (35)$$

Yhdistämällä kaavat (29), (30) ja (31) kaavoihin (32), (33) ja (34) saadaan Lambda-virytyssäännöiksi laitteelle seuraavat:

$$\dot{K}_P = \frac{4}{k} \frac{\frac{\theta}{2} + \tau}{\frac{\theta}{2} + \tau_c}, \quad (36)$$

$$\dot{T}_I = 32 \left(\tau + \frac{\theta}{2} \right), \quad (37)$$

$$T_D = \frac{8\tau\theta}{\theta + 2\tau}. \quad (38)$$

Integrointiaika ja derivointiaika (kaavat (37) ja (38)) täytyy vielä muuttaa kaavojen (4) ja (5) avulla laitteelle syötettävään muotoon:

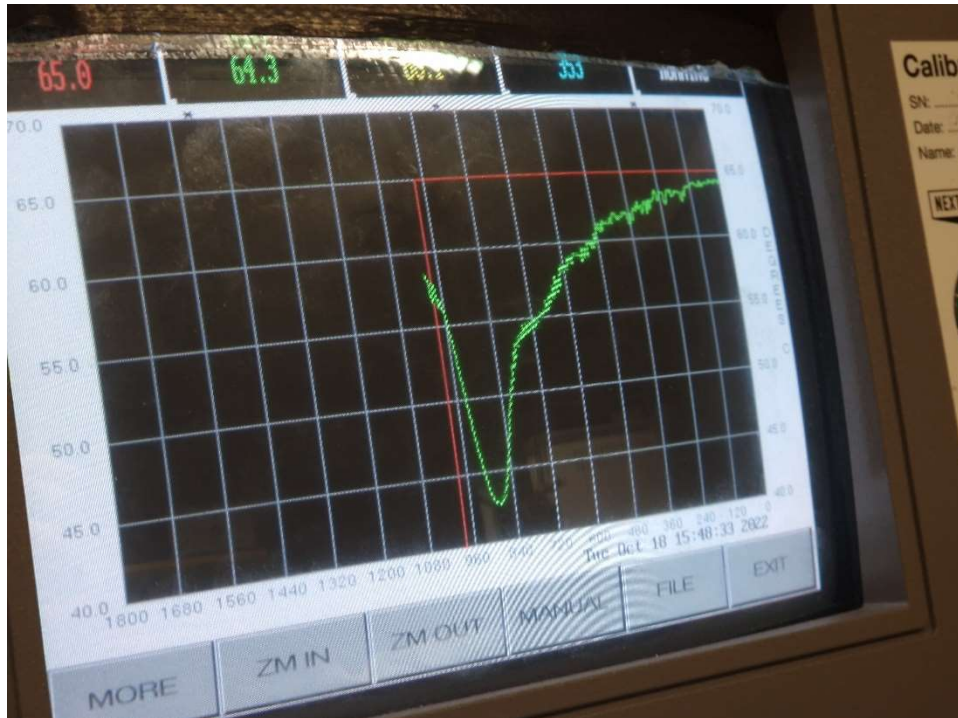
$$\dot{K}_I = \dot{K}_P 32 \left(\tau + \frac{\theta}{2} \right), \quad (39)$$

$$K_D = \dot{K}_P \frac{8\tau\theta}{\theta + 2\tau}. \quad (40)$$

Näillä kaavoilla voidaan laskea laitteelle sopivat Lambda-virytyssääntöjen mukaiset PID-parametrit FOTD-mallin perusteella.

4.2 I-haaran toteutus

Työtä tehdessä alaluvussa 3.2 esitettyihin I-haaran eri toteutustapoihin törmättiin, kun säätimelle oli löydetty ensimmäinen PI-säätimen viritys. Heti virityksen jälkeen laite toimi kuten oli oletettu. Laitteen uudelleenkäynnistyksen jälkeen ensimmäinen askelvaste näytti kuitenkin seuraavalla sivulla olevan kuvan 8 mukaiselta.



Kuva 8. Askelvaste laitteen uudelleenkäynnistyksen jälkeen

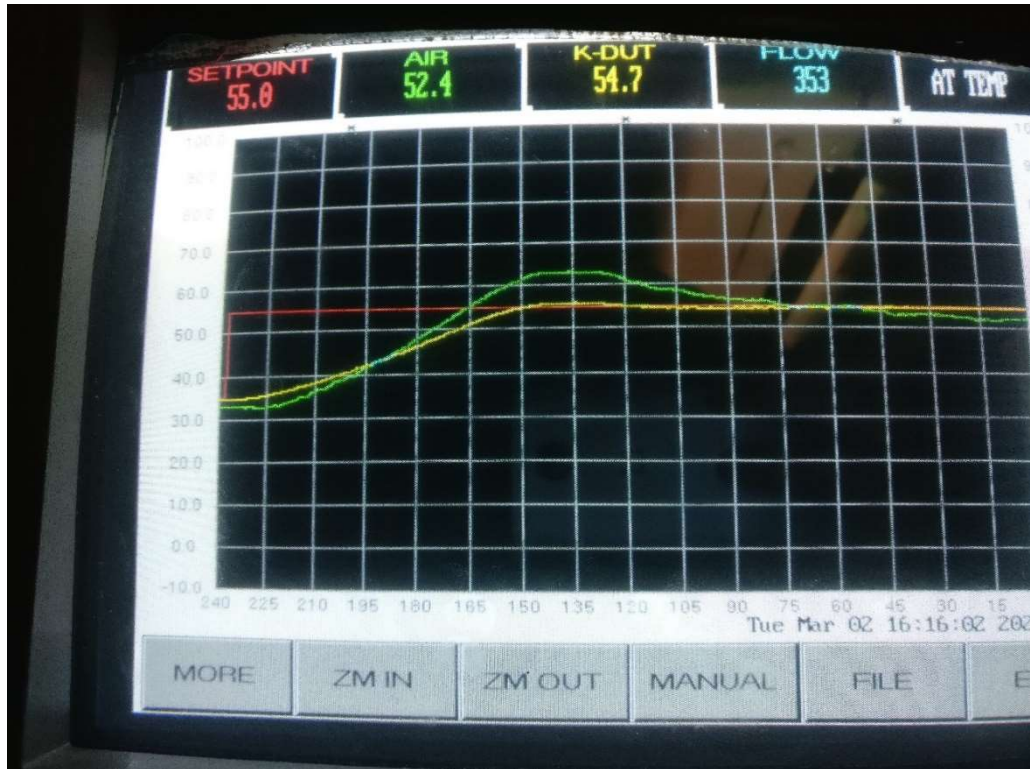
Kuvasta 8 voidaan todeta, että laitteen uudelleenkäynnistyksen jälkeen laitteella menee kauan päästä asetusarvoon. Kun asetusarvo on saavutettu, laite toimii kuten ennen uudelleenkäynnistystä. Tutkiminnan jälkeen selvisi, että tämä todennäköisesti johtuu I-haaran ohjauskomponentin nollautumisesta uudelleenkäynnistyksen yhteydessä.

Jotta saadaan selville, kummalla tavalla I-haara on toteutettu, voidaan esimerkiksi kokeilla säädintä siten, että $K_P = 0$, $K_D = 0$, ja K_I asetetaan ensin suureksi. Tämän jälkeen muutetaan asetusarvoa, ja kun säädettävä suure alkaa muuttua huomattavasti, asetetaan K_I takaisin nolllaksi. Jos suureen muuttuminen jatkuu samaan malliin, voidaan olettaa I-haaran olevan kaavan (14) mukainen.

I-haaran toteutuksella kaavan (14) mukaisesti saadaan se etu, että vahvistuksen muuttaminen kesken ajon ei aiheuta koko integraalin kertomista uudella vahvistuksella, jolloin ohjaukseen ei tule epäjatkuvuuksia vahvistusta muuttaessa. Huonona puolena siinä on, että K_I :tä muuttamalla säätimen saa helposti tilaan, josta se ei palaudu, tai palautuminen kestää kauan. Tätä varten säätimeen voidaan implementoida nollaustoiminto, jolla jo kertyneen ohjauksen saa nolllattua. Työssä tutkittavan laitteen säätimestä ei tällaista ominaisuutta ainakaan käyttöliittymän kautta löytynyt, joten eri K_I :n arvoja kokeillessa laite ajautui usein tilaan, jossa se piti käynnistää uudelleen, mikä hidasti laitteen toiminnan tutkimista.

4.3 Toiminta alkutilanteessa

Laitteen toiminta ennen työn aloittamista on hieman epäselvää, ja työn ensimmäinen vaihe olikin selvittää, miten se toimii. Tämä tehtiin suorittamalla yksinkertaisia, erisuuruisia askelkokeita. Seuraavassa kuvassa on esitetty askel huoneenlämmöstä 55 celsiusasteeseen.

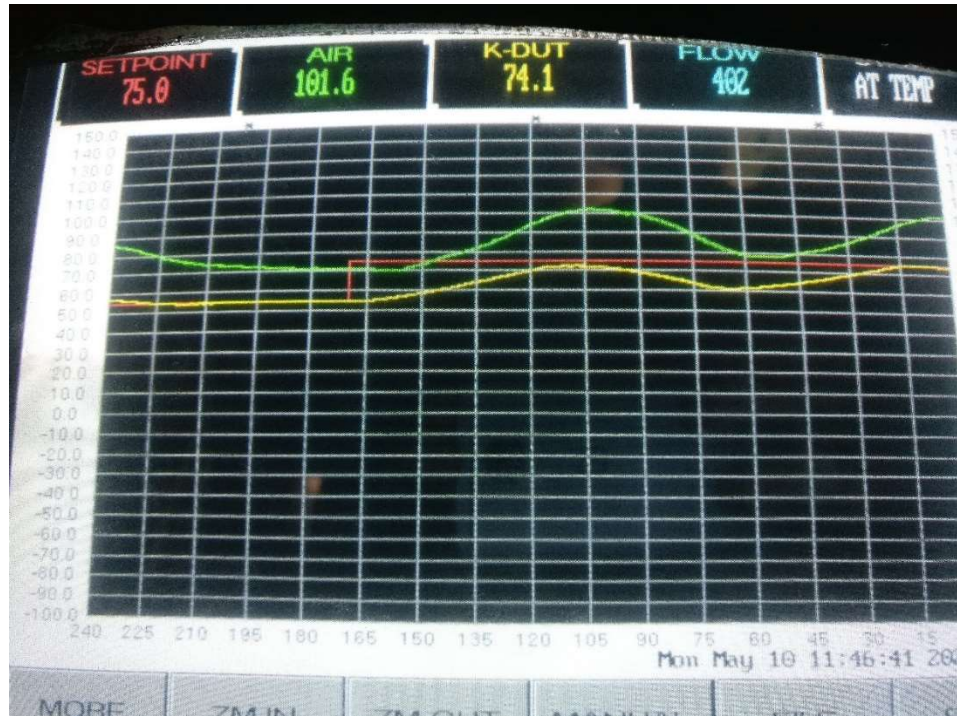


Kuva 9. Askel 25 celsiusasteesta 55 celsiusasteeseen

Kuvassa 9 punainen käyrä on käyttäjän asettama asetusrvo. Vihreä on puhallettavan ilman lämpötila, ja keltainen on testattavan laitteen lämpötila.

Kuvasta 9 voidaan lukea, että asettumisaika (2 %) kyseisellä askeleella on n. 90 sekuntia. Ylitystä on vain vähän, ja kappaleen lämpötila asettuu tarkasti tavoitearvoonsa.

Kuvan 9 askelvasteesta nähdään kappaleen lämpötilasäädön vaste asetusrvoa muuttaessa 55 asteesta 75 asteeseen. Ilman maksimilämpötila tämän testin aikana oli asetettu 90 °C:een. Toisin sanoen laite yrittää pitää ilman lämpötilan maksimissaan 90 asteessa. Näin ei kuitenkaan näytä käyvän, vaan ilman lämpötila jää oskilloimaan sadan ja 80 celsiusasteen välille.



Kuva 10. Laitteen lämpötilansäädön askel 55 °C:sta 75 °C:n, kun ilman maksimilämpötila 90 °C

Kuten tästä voidaan todeta, on ilman lämpötilasäätö epästabiili. Tämän voi todeta siitä, että ilman lämpötila alkaa oskilloimaan, kun se saavuttaa ilman lämpötilan rajoitusarvon.

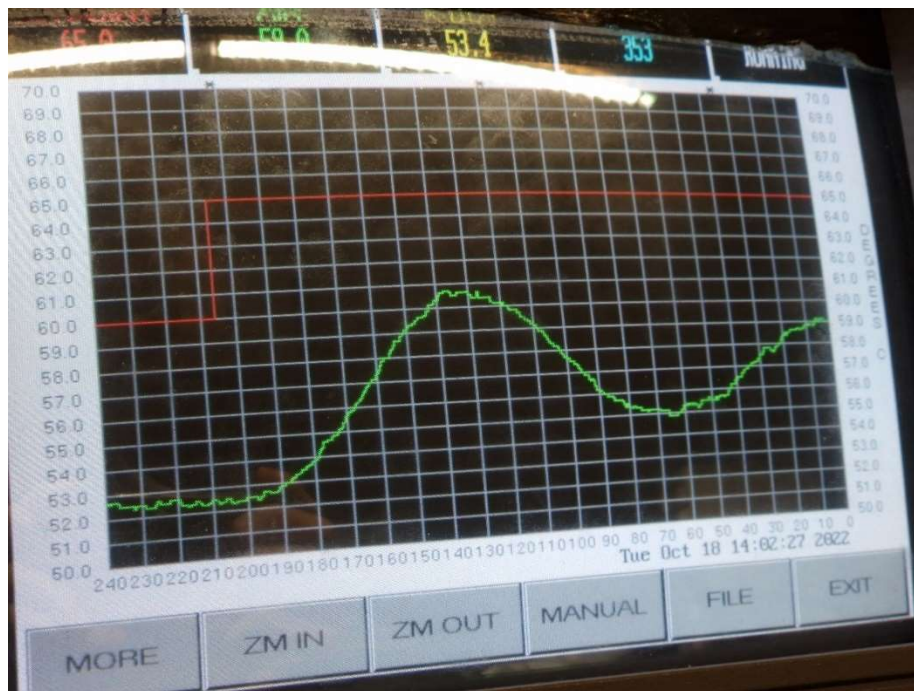
Tässä luvussa esitettyjä kuvaajia luettaessa on huomioitava, että alkutilanteessa ilman lämpötilalukema ei kaikilla lämpötilan arvoilla pidä paikkaansa ilma-anturin kalibroinnin vuoksi. Tämä voidaan päätellä vertaamalla ilman ja testattavan laitteen lämpötilakäyriä. Laitteen lämpötilan vakioituttua ilman lämpötila asettuu laitteen lämpötilan alapuolelle. Kappaletta lämmittäessä yli ympäristön lämpötilan tämän ei pitäisi olla mahdollista, sillä testattava kameramoduuli ei tässä testissä ollut päällä, eikä lämpöä pääse täten itse kameramoduulista syntymään.

5. THERMONIX T-2500BE:N PID-SÄÄTIMEN VIRITYS

Tässä luvussa selostetaan työssä tutkittavan laitteen prosessimallin ja sen parametrien määrittäminen ja PID-säätimen virittäminen. Tässä käytettävät menetelmät ovat esitetty luvussa kolme. Kaikki laskenta tehtiin käyttämällä Python-ohjelmointikieltä ja Python Control Systems Toolbox -kirjastoa [6]. Kirjasto mukailee paljon MATLAB-sovelluksen Control System Toolboxia, mutta sitä saa käyttää vapaasti sekä yksityisessä että kaupallisessa käytössä.

5.1 FOTD-mallin sovittaminen

FOTD-mallin sovittamista varten laitteelle tarvitsee suorittaa alaluvun 3.2 mukainen askelvastekoe. Askelvastekoetta varten saatiin iteroimalla säätimen P-vahvistukseksi 600. Askelvastekokeen tulos ilman lämpötilansäätöön on alla.



Kuva 11. Suljetun piirin askelvastekoe ilman lämpötilansäädölle

Kuvasta 11 voidaan lukea loput arvot FOTD-mallin parametrien laskentaa varten. Arvot on esitetty alla olevassa taulukossa.

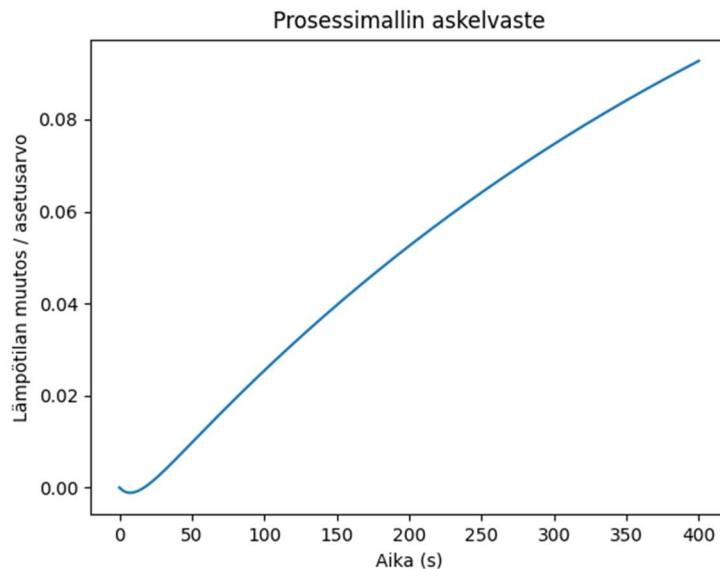
Taulukko 1. Askelvastekokeen parametrit

Selitys	Muuttuja kaavoissa	Arvo
P-säätimen vahvistus	K_P	600
Askelvasteen muutos (C)	Δy_s	5
Aika ensimmäiseen huippuun (s)	t_p	70
Askelvasteen ensimmäisen huipun maksimi-arvo (muutos alkutilasta) (C)	Δy_p	8.3
Askelvasteen ensimmäisen alituk- sen minimi (muutos alkutilasta) (C)	Δy_u	2.5

Taulukossa 1 olevilla parametreilla saadaan alaluvussa 3.2 esitettyjen kaavojen avulla laskettua FOTD-malliksi

$$P(s) = \frac{0.174}{495s + 1} \exp(-21.6s) \quad (41)$$

Alla simuloitu avoimen piirin askelvaste FOTD-mallilla.

**Kuva 12.** Simuloitu prosessimallin askelvaste

Kuvasta 12 nähdään, että FOTD-prosessimallia voisi approksimoida hyvin myös viiveellisellä integraattorimallilla, jos sitä tarkastelee askelvastekokeen aikaikkunassa. Simuloinnissa viivettä on approksimoitu Pade-mallilla, jonka takia askelvaste käy alussa negatiivisena.

5.2 Porraskoe

Laitteelle tehtiin porraskoe pelkällä P-säädöllä epälineaarisuuksien selvittämiseksi. Porraskokeessa suoritettiin askelvasteita 25 ja 70 celsiusasteen välillä viiden asteen askelilla. Porraskokeen tulokset ovat alla olevassa taulukossa:

Taulukko 2. Porraskokeen tulokset

Step	Huipunaika (s)	Δy_p (C)	Δy_u (C)	y_{end} (C)	k	Aikavakio	Viive	K_p	K_i
25 - > 30	65	7.2	2.9	25	0,06	182.8	20	181.74	7.95
30 - > 35	74	8.2	3.3	29.5	0,20	614	22.9	181.7	5.3
35 - > 40	70	7.9	2.9	34	0.23	669	21.6	178.2	5.5
40 - > 45	65	7.5	2.5	39	0.06	160.2	20.2	176.3	8.8
45 - > 50	74	8	2.5	43	0.11	345.4	22.9	175.8	5.1
50 - > 55	74	8.1	2.1	48	0.074	228.1	22.9	177.9	6.2
55-> 60	74	8	2.1	53	0.067	203.5	22.9	177.6	7.0
60 - > 65	70	8.3	2.5	57	0.23	660.3	21.6	175.9	5.4
65 - > 70	77	7.5	2	62	0.039	127.9	24.5	177.3	11.1

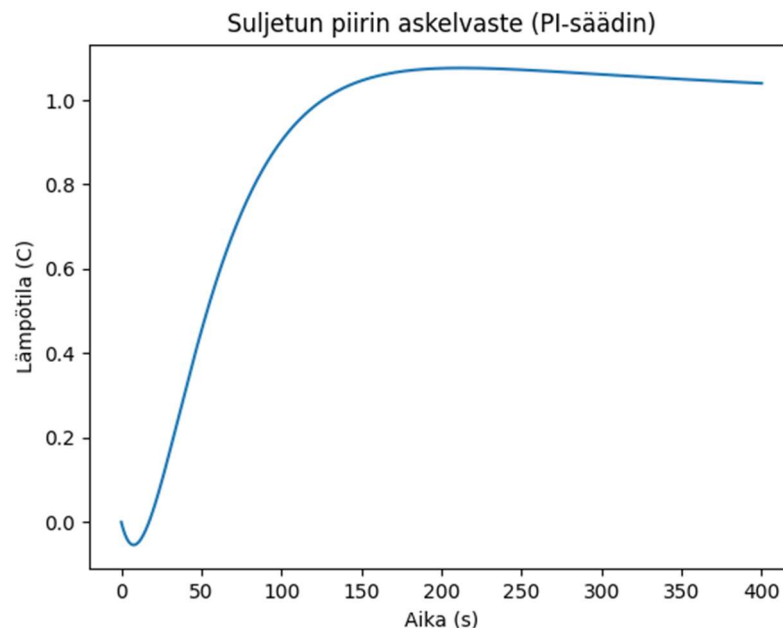
Taulukosta 1. nähdään, että saadun prosessimallin aikavakio ja DC-vahvistus k vaihtelee paljon. Tämä johtunee siitä, että askelvasteiden loppuarvon ja alkuarvon väli on lähes sama kuin asetusarvon muutos. Tällöin FOTD-mallin sovituksen kaavoissa jaetaan pienellä luvulla, jolloin arvot heittelevät paljon. Huomionarvoista on, että K_p pysyy lähes samana, eikä myöskään K_p vaihtelee läheskään kuten prosessimallien parametrit.

5.3 Viritysparametrien laskenta PI-säätimelle

Kun tiedetään prosessin FOTD-malli, voidaan SIMC-säännöllä laskea prosessille sopiva PI-säätö. Viritysparametrien laskukaavat esiteltiin alaluvussa 3.3. Sijoittamalla alaluvun 4.1 kokeen arvot kaavoihin (26), (27) ja (28) ja iteroimalla säännön viritysparametria siten, että $\tau_c = 2\theta$ saatiin PI-säätimelle seuraavat parametrit:

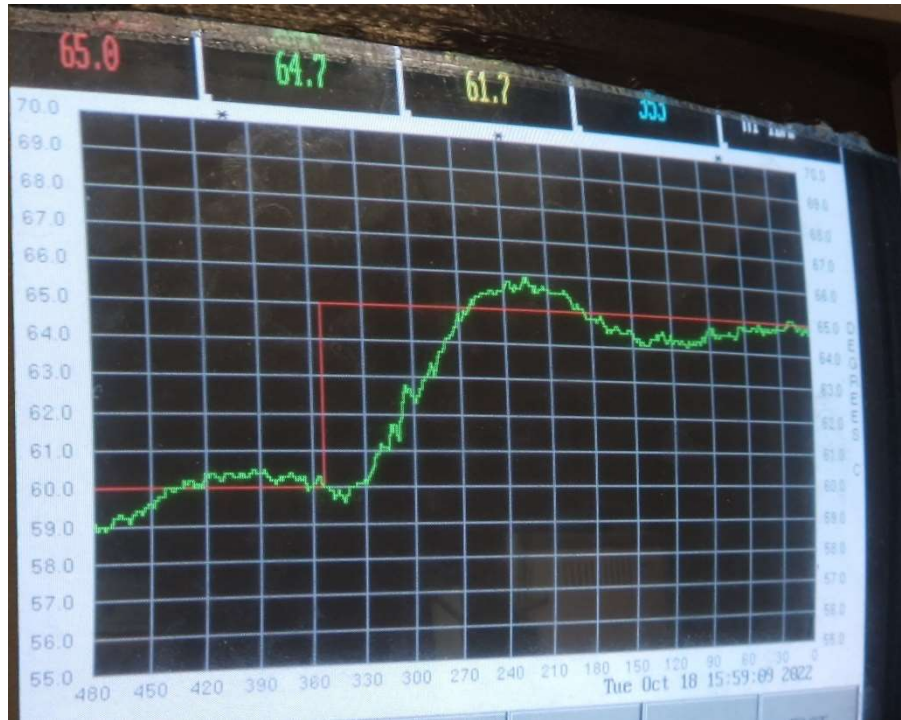
$$K_p = 176, K_I = 5.5. \quad (42)$$

Nyt voidaan simuloida näillä viritysparametreilla PI-säätimellä ohjattua prosessia. Suljetun piirin simuloiduksi askelvasteeksi saatiin seuraava:



Kuva 13. Suljetun piirin simuloitu askelvaste PI-säätimellä. Prosessimalli alaluvun 3.1 mukainen, viritysparametrit alaluvusta 3.2.

Kuvasta 13 voidaan nähdä, että askelvasteessa on ylitystä, joka palautuu hitaasti. Kokeillaan seuraavaksi tätä viritystä itse laitteella. Viivettä approksimoidaan Pade-approksimaatiolla. Alla olevassa kuvassa on vastaavilla parametreilla askelkoe itse laitteella.



Kuva 14. Askelvaste PI-säätimellä, $K_p = 180$, $K_i = 6$

Kuvasta 14 nähdään, että askelvaste itse laitteella ei ole täysin samanlainen kuin simuloitu. Nousuaika ja asettumisaika ovat hyvin samanlaiset, mutta systeemin vaimennus näyttäisi simuloitua pienemmältä, sillä ylitys korjaantuu nopeammin, ja alitustakin tapahtuu hieman.

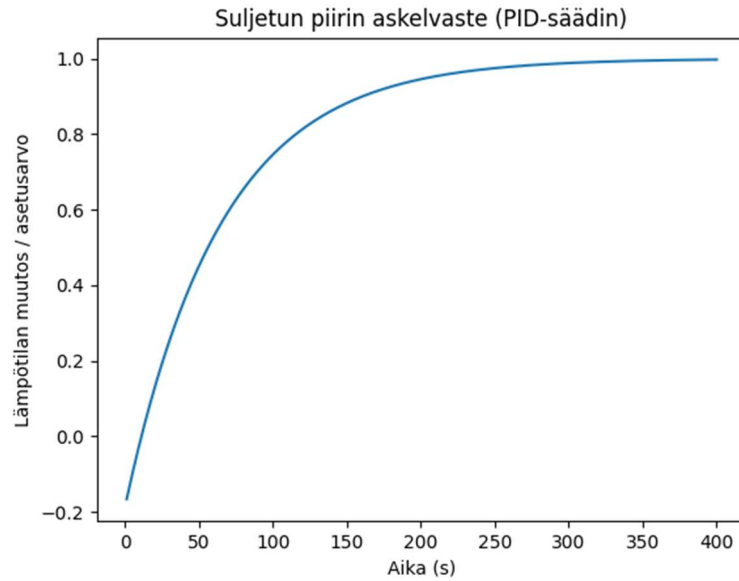
5.4 Viritysparametrien laskenta PID-säätimelle

PID-säätimen viritysparametrit FOTD-mallin perusteella voidaan laskea Lambda-säännöillä. Lambda-säännöt on esitelty alaluvussa 3.4. Alaluvussa 5.1 määritetyn FOTD-mallin perusteella saadaan PID-säätimen parametreiksi laskettua kaavoja (36), (39) ja (40) käyttämällä seuraavat arvot:

$$\hat{K}_p = 152, \hat{K}_i = 2.6, \hat{K}_D = 3260. \quad (43)$$

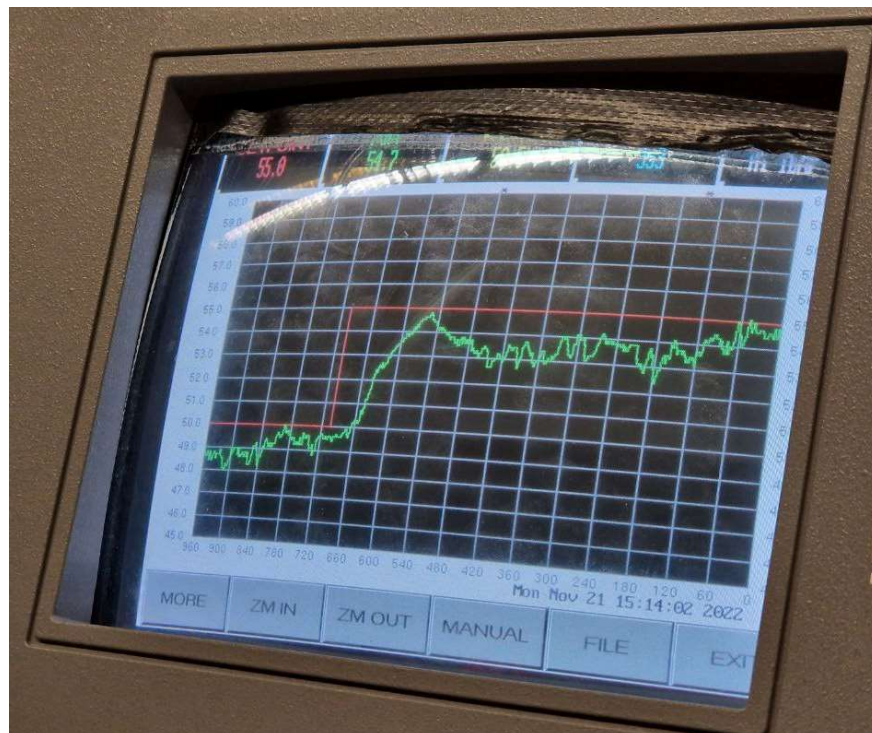
Huomataan, että \hat{K}_i vaikuttaa suhteellisen pieneltä, ja \hat{K}_D suhteellisen isolta.

Simuloitu askelvaste näillä arvoilla näyttää seuraavalta:



Kuva 15. PID-säätimen simuloitu vaste. $K_P = 154$, $K_I = 2,4$, $K_D = 3260$

Simuloitu askelvaste lähtee negatiivisista arvoista simuloinnissa käytetyn viiveen pade-approksimaation takia. Seuraavaksi kokeiltiin näitä arvoja itse laitteella. Askelvastekokeen tulos näyttää seuraavalta:



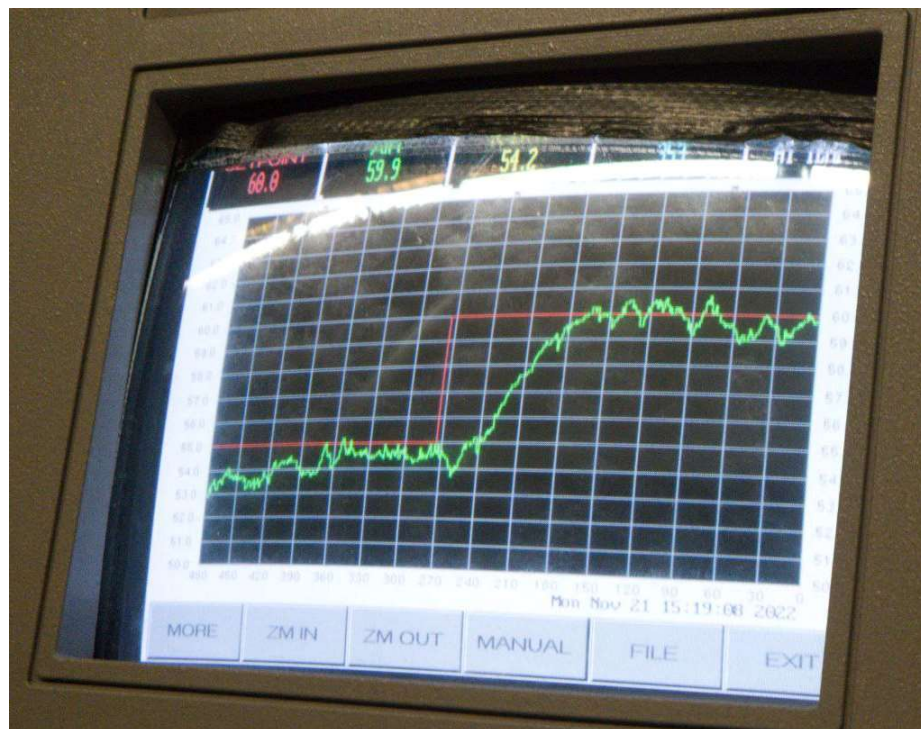
Kuva 16. Askelvastekoe PID-säätimellä. $K_P = 154$, $K_I = 3$, $K_D = 3260$

Kuten kuvasta 16 voidaan todeta, ei tämä viritys näytä toimivan kauhean hyvin. Vas- teessa näyttäisi olevan kohinainen, mikä voisi johtua liian suuresta K_D :n arvosta.

Lambda-säännön viritysparameetria muuttamalla järkevämmän oloisia parametreja ei löytynyt. Voidaan siis todeta, että määritetty FOTD-malli ei ole riittävän hyvä tämän virityssäännön käyttöä varten. On myös hyvin mahdollista, että PID-säätimen toimintaa ei tunneta tarpeeksi hyvin, ja jokin tärkeä ominaisuus on jäänyt vielä huomioimatta.

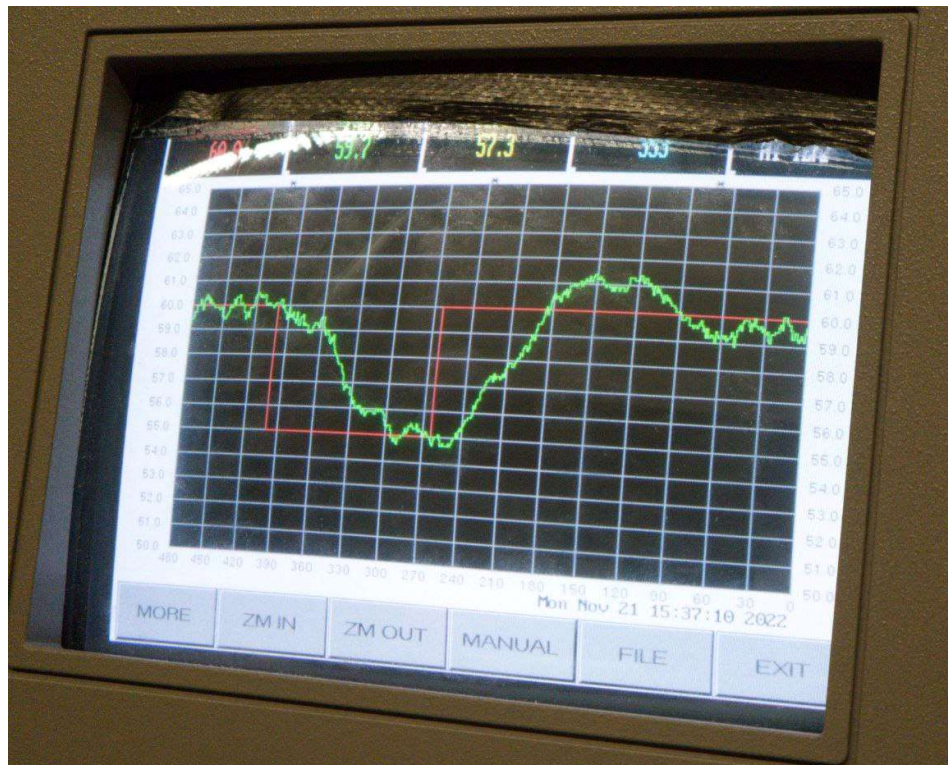
5.5 Parempien PID-säätimen viritysparameetrien etsintä iteroimalla

Kuvan 16 vasteesta voidaan kuitenkin huomata, että PID-säätimen I-haaran kerroin voisi olla liian pieni, ja D-haaran kerroin liian suuri. Seuraavaksi kokeiltiin askelvastekoetta isommalla I-haaran kertoimella:



Kuva 17. PID-säätimen askelvastekoe. $K_P = 154$, $K_I = 10$, $K_D = 3260$

Nyt voidaan todeta, että kuvan 17 askelvasteen perusteella K_I :n arvoa kasvattamalla systeemin toiminta parani. Heiluntaa esiintyy kuitenkin edelleen ilman lämpötilassa ± 1 °C. Kokeillaan seuraavaksi pienentää K_D :n arvoa:



Kuva 18. PID-säätimen askelvastekoe. $\dot{K}_P = 154$, $\dot{K}_I = 10$, $\dot{K}_D = 326$

Kuvan 18 vasteesta voidaan todeta, että \dot{K}_D :tä pienentämällä myös systeemin suuritaajuinen, mutta pieniamplitudinen värähtely pieneni, mutta samalla myös askelvasteen ylitys kasvaa. Tässä kohdassa todettiin, että PID-säätimen arvojen iteroiminen on erittäin työlästä, ja todettiin PI-säätimessä pysymisen olevan parempi ratkaisu.

6. YHTEENVETO

Työssä tutkittiin PID-säätimen viritystä suljetun piirin askelvastekokeilla, sekä parantaa Thermonix T-2500 BE -laitteen ilman lämpötilansäätöpiirin suorituskykyä. Laitetta käytetään kameramoduulien ja -laitteiden testaamiseen eri lämpötiloissa. Tavoitteena oli viritää laitteen ilman lämpötilansäätöpiirin PID-säädin uudelleen. Työssä laitteelle tehtiin suljetun piirin askelvastekokeita, joiden perusteella määritettiin FOTD-mallin parametrit. FOTD-mallia käytettiin PI- ja PID-säädinten vitysparametrien laskentaan SIMC- ja Lambda -säännöillä.

Asetusarvoon asettava viritys löytyi sekä PI- että PID-säätimille, mutta niiden toimintaan jäi vielä parantamisen varaa. PI-säädin päätettiin jättää käyttöön. PID-säätimellä ei saatu etua ilman, että ilman lämpötilassa esiintyisi epämääräistä pieniamplitudista ja suuritaajuuksista heilumista.

Laitteen säätimen toiminnan selvittäminen osoittautui erittäin työlääksi, sillä dokumentaationa toimivat laitteelle tehty patentti, sekä käyttöohjekirja, joista jälkimmäinen ei ota kantaa laitteen säätöpiirin toimintaan millään lailla. Patentista voitiin tehdä johtopäätöksiä, jotka auttoivat työn etenemistä paljon. Yksityiskohtia säätimestä jäi kuitenkin puuttumaan. Säätimen ohjausarvoa ei voitu tarkastella, eikä D-haaran suodatusratkaisusta ollut tietoa. Työssä epäonnistui joko prosessin mallintaminen tai säätimen toiminnan selvittäminen. Kohtalaiseen viritykseen päästiin, mutta hyvin toimivasta säädöstä jäätettiin. Parempaan viritykseen voisi päästä, jos saisi valmistajalta tarkemman dokumentaation laitteen säätöpiirin toteutuksesta. Toinen vaihtoehto olisi jatkaa laitteen tutkimista ja kokeiluja, mutta se olisi paljon työläämpää.

LÄHTEET

- [1] K. J. Åström, H. Tore, *Advanced PID Control*, Isa, 2006.
- [2] C. Grimholt, S. Skogestad, "Optimal PI and PID control of first-order plus delay processes and evaluation of the original and improved SIMC rules," *Journal of process control*, nro 70, s. 36-46, 2018.
- [3] A. V. Ramon Vilanova, *PID Control in the Third Millenium*, Lontoo: Springer, 2012.
- [4] S. S. Shamsuzzoha M, "The setpoint overshoot method: A simple and fast closed-loop approach for PID tuning," *Journal of Process Control*, 2010.
- [5] D.-y. Fu, "Computer-implemented method and system for precise temperature control of a device under test," 1993. [Online]. Available: <https://patents.google.com/patent/US5205132A/en?q=us5205132a>. [Haettu 14 5 2021].
- [6] python-control.org, "Python Control Systems Library Documentation," copyright 2020 [Online]. Available: <https://python-control.readthedocs.io/en/0.9.2/>.