



SEINÄJOEN AMMATTIKORKEAKOULU
SEINÄJOKI UNIVERSITY OF APPLIED SCIENCES

Roni Roth

Tulenkestävien valukappaleiden kuivausuunin ohjaimen suunnittelu ja toteutus

Opinnäytetyö

Kevät 2024

Insinööri (AMK), Automaatiotekniikka



SEINÄJOEN AMMATTIKORKEAKOULU

Opinnäytetyön tiivistelmä

Tutkinto-ohjelma: Insinööri (AMK), Automaatiotekniikka

Suuntautumisvaihtoehto: Koneautomaatio

Tekijä: Roni Roth

Työn nimi alaotsikoinen: Tulenkestävien valukappaleiden kuivausuunin ohjaimen suunnittelu ja toteutus

Ohjaaja: Juha Yli-Hemminki

Vuosi: 2024

Sivumäärä: 36

Tämä opinnäytetyö tehtiin yhteistyössä tulenkestäviä muuraus- ja massaustöitä tekevän E-P Uunimuurarit Oy:n kanssa. Työn tarkoituksena oli suunnitella ja valmistaa prototyyppi ohjaimesta, jolla ohjataan tulenkestävästä valumassasta valmistettujen valukappaleiden kuivausuunia. Sähköllä toimivaa kuivausuunia on lämmitettävä valumassan valmistajan ilmoittamalla lämmityskäyrällä veden poistamiseksi valukappaleesta.

Ohjaimen alustaksi valittiin Raspberry Pi -tietokone, joka liitettiin kosketusnäyttöön. Tällä tietokoneella ohjattiin releen avulla sähkövastuksia ohjaavaa kontaktoria. Käyttöliittymä ja ohjelma ohjaimen toteutettiin Python-ohjelmointikielellä. Ohjaimen prototyyppiä päästiin testaamaan ja säätämään myös käytännössä. Testeistä kerättiin dataa tietokantaan lämmityskäyrän toteutumisesta.

Työn lopputuloksena saatiin valmistettua prototyyppi ohjaimesta ja ohjelmakoodista, jolla onnistuttiin ohjaamaan sähköuunia halutulla lämmityskäyrällä. Testausien ja kerätyn mittausdatan perusteella ohjaimesta ja ohjauskomponenteista löytyi vielä kehityksen kohteita.

¹ Asiasanat: sähkövastukset, Raspberry Pi, Python

SEINÄJOKI UNIVERSITY OF APPLIED SCIENCES

Thesis abstract

Degree programme: Bachelor of Engineering, Automation Engineering

Specialisation: Machine Automation

Author: Roni Roth

Title of thesis: Design and implementation of a controller for the drying kiln of refractory castings

Supervisor: Juha Yli-Hemminki

Year: 2024

Number of pages: 36

The thesis was done in collaboration with E-P Uunimuurarit Oy. E-P Uunimuurarit is a company that offers refractory services to heat producers. The purpose of the thesis was to design and implement a controller for a drying kiln, where refractory castings are dehydrated. Dehydration must be executed according to the heating curve specified by the manufacturer of refractory castable.

The contactor of the kiln's resistors was controlled by Raspberry Pi and a touchscreen. The user interface and the program of the controller were programmed with Python-language. The prototype of the controller was also tested and adjusted. The data from the tests was collected into a database.

As the result of the work, prototypes of the controller and the program code were produced. The controlling of the electric kiln succeeded according to the desired heating curve. Based on the tests and the collected measurement data, there were still areas for improvement in the controller and controlling components.

¹ Keywords: electric resistors, Raspberry Pi, Python

SISÄLTÖ

Opinnäytetyön tiivistelmä	1
Thesis abstract	2
SISÄLTÖ	3
Kuva-, kuvio- ja taulukkoluetelo	5
Käytetyt termit ja lyhenteet.....	7
1 JOHDANTO	8
1.1 Yritysesittely	8
1.2 Työn tausta ja rakenne.....	8
2 TEORIA.....	9
2.1 Tulenkestävä LCC-valumassa.....	9
2.2 Veden poisto valukappaleesta.....	9
2.3 Vastuslanka.....	10
2.3.1 Resistanssi.....	10
2.3.2 Ohmin laki.....	11
2.4 Elektromeekaaninen rele.....	12
2.5 Puolijohderele.....	12
2.6 Kontaktori	13
2.7 Termopari.....	14
2.8 Raspberry Pi 4.....	15
2.9 On/Off-säätö.....	16
2.10 PID-säätö	16
2.11 Pulssinleveysmodulaatio	18
3 TYÖN KUVAUS.....	19
3.1 Vanhaan ohjausjärjestelmään tutustuminen.....	19
3.2 Uuden ohjausjärjestelmän alustan ja komponenttien valinta.....	19
3.3 Käyttöliittymän tekeminen	20
3.3.1 Lämmityskäyrän asetus välilehti	21
3.3.2 Ajo välilehti.....	23

3.4	Ohjelma	24
3.4.1	Pääohjelma	24
3.4.2	Asetusarvon laskeminen	24
3.4.3	Lämpötila-anturin lukeminen	25
3.4.4	PID-säädin	25
3.5	Sovelluksen käyttö	25
3.6	Prototyyppi	30
3.7	Testaus	32
3.8	Työn tulokset	34
LÄHTEET	35

Kuva-, kuvio- ja taulukkoluetelo

Kuva 1. Tulipesän miehistöluukku kuivausuunissa	8
Kuva 2. Qt Designer sovellus.....	20
Kuva 3. Qt Designerilla tehty Lämmityskäyrän asetus välilehti	22
Kuva 4. QGraphicsView promote to PlotWidget	22
Kuva 5. Qt Designerilla tehty Ajo välilehti	23
Kuva 6. Lämmityskäyrän arvojen asetus	26
Kuva 7. Lämmityskäyrän esikatselu.....	26
Kuva 8. Lämmityskäyrän tallennus	27
Kuva 9. Lämmityskäyrän valinta	28
Kuva 10. Lämmityskäyrä avattuna.....	28
Kuva 11. Ajo käynnistettynä.....	29
Kuva 12. Ajon etenemisen seuranta	29
Kuva 13. Prototyypin rakennus	30
Kuva 14. Raspberry Pi ja relekortti kiinnitettynä kosketusnäyttöön	31
Kuva 15. Valmis ohjaimen prototyyppi.....	31
Kuva 16. Mittaustulos $K_p = 1,5$ $K_i = 50$ $K_d = 0$	32
Kuva 17. Mittaustulos $K_p = 1,5$ $K_i = 60$ $K_d = 0$	33
Kuva 18. Mittaustulos $K_p = 1$ $K_i = 60$ $K_d = 0$	33

Kuvio 1. Termoparin toiminta	14
Kuvio 2. Raspberry Pi 4 GPIO-Pinout.....	15
Kuvio 3. PID-säätimen lohkokaavio	16
Kuvio 4. PWM-signaalin kuvaajia eri pulssisuhteilla	18
Kuvio 5. Esimerkki lämmityskäyrästä.....	21
Taulukko 1. Ziegler-Nichols säätömenetelmä	17

Käytetyt termit ja lyhenteet

Alumel	Nikkelin, alumiinin ja mangaanin seos
Chromel	Nikkelin ja kromin seos
GPIO	General-Purpose Input/Output Yleiskäyttöinen ohjelmitava tulo-/lähtöpinni
Hydraatti	Aine, johon on sitoutunut vettä
I2C	Inter-Integrated Circuit. Ohjaus- ja tiedonsiirtoväylä
SPI	Serial Peripheral Interface. Synkroninen sarjaväylä

1 JOHDANTO

1.1 Yritysesittely

Tämä opinnäytetyö on tehty yhteistyössä E-P Uunimuurarit Oy:n kanssa. Uunimuurarit on tulenkestäviin muuraus- ja massaustöihin erikoistunut yhtiö (Uunimuurarit, i.a.). Yhtiön asiakkaita ovat muun muassa lämpölaitokset, energiayhtiöt, sahat ja muut prosessilämmöntuottajat.

1.2 Työn tausta ja rakenne

Yrityksen yhtenä tuotteena on erilaisten muotovalukappaleiden valmistus mittatilaustyönä. Valukappaleet kuivataan ennen asiakkaalle luovutusta 12 kW:n sähköuunissa (kuva 1). Nykyinen uunin ohjain on vanha ja vaikeakäyttöinen, joten sen tilalle haluttaisiin uusi käytettävyydeltään parempi ohjain. Tämän opinnäytetyön tavoitteena on suunnitella ja toteuttaa helppokäyttöinen ja riittävän tarkka lämpötilaohjain sähköuunin ohjaamiseen.

Työ on jaettu kahteen pääosaan, teoria ja työn kuvaus. Teoriaosassa tutustutaan valukappaleissa käytettävän valumassan ominaisuuksiin, käydään läpi sähkövastuksen toimintaa, uunin ohjaukseen vaadittavia komponentteja sekä säätötekniikkaa. Työn kuvauksessa perehdytään uuteen ohjausjärjestelmään valittaviin komponentteihin, käyttöliittymän ja ohjelman tekemiseen sekä toimintoihin. Työn kuvauksen loppupuolella esitetään mittausdataa rakennetun prototyypin toiminnasta sekä pohditaan työn tuloksia. Käyttöliittymän ja ohjelman esittely on rajattu sovelluksen osalta keskeisimpiin asioihin.



Kuva 1. Tulipesän miehistöluukku kuivausuunissa

2 TEORIA

2.1 Tulenkestävä LCC-valumassa

Tulenkestävät LCC (Low-cement castable) -valumassat on kehitetty saavuttamaan paras yhdistelmä mekaanista lujuutta, iskunkestävyyttä ja kestoja alkalista korroosiota vastaan korkeassa lämpötilassa (Hasle Refractories, i.a.). Niiden tyypillinen lämmönkesto on n.1200–1700 °C. Massoja käytetään erilaisten uunien ja tulipesien rakennusmateriaalina.

2.2 Veden poisto valukappaleesta

Valumassaa käytettäessä siihen sekoitetaan vettä (Bogan, 2018). Vesi reagoi sementin kanssa liittäen materiaalit yhteen. Massan kovetuttua siihen jää kahden tyyppistä vettä, fyysistä sekä kemiallista. Fyysinen vesi, mitä kutsutaan myös vapaaksi vedeksi, on vettä, joka ei ole reagoinut sementin kanssa, ja on valun huokosissa. Kemiallinen vesi on vettä, joka on sitoutunut sementin hydraatteihin.

Vapaa ja kemiallinen vesi on poistettava ennen kuin valettu kappale voidaan ottaa käyttöön ja altistaa korkeille lämpötiloille (Bogan, 2018). Vesi tulee kuivattaa hitaasti ja hallitusti, koska lämmitessään se laajenee ja tuottaa valuun sisäistä painetta. Jos sisäinen paine kasvaa liian suureksi, valu halkeaa räjähtämällä. Suurin osa vapaasta vedestä poistuu 100 °C lämpötilassa. Kemiallisen veden poistamiseen tarvitaan korkeampia lämpötiloja.

Valmistaja ilmoittaa valumassalle lämmityskäyrän, jota noudattamalla kuivaus suoritetaan. Lämmityskäyrässä on pitolämpötiloja tietyissä lämpötiloissa, jotta höyrystynyt vesi ei nosta sisäistä painetta liian korkeaksi.

2.3 Vastuslanka

Vastuslanka vastustaa sähkövirran kulkua, ja muuttaa sähköenergian lämmöksi (PelicaniWire, i.a.). Vastuslangat valmistetaan erilaisista metalliseoksista, joilla on omat ominaisuutensa (Hyndman, i.a.). yleisimmät seokset ovat:

- (FeCrAl) rauta-, kromi- ja alumiiniseos. Korkea resistanssi, lämmönkesto 1400 °C
- (NiCr) nikkeli- ja kromiseos. Korkea resistanssi, lämmönkesto 1250 °C
- (CuNi) kupari- ja nikkelseos. Matala resistanssi, lämmönkesto 400 °C
- (NiFe) nikkeli- ja rautaseos. Matala resistanssi, lämmönkesto 600 °C

Vastuslangan pituutta ja paksuutta muuttamalla voidaan säätää haluttu lämmitysteho.

2.3.1 Resistanssi

Sähkövirran kulkua vastustavaa ominaisuutta kutsutaan resistanssiksi (Hautala & Peltonen, 2016, s. 272). Laitetta, jolla on resistanssia, kutsutaan vastukseksi. Johtimen resistanssi riippuu johtimen pituudesta, poikkipinta-alasta ja materiaalin resistiivisyydestä. Johtimen resistanssi määritellään yhtälöllä (1).

$$R = \rho \frac{l}{A} \quad (1)$$

missä

R on resistanssi, jonka yksikkö on Ω , Ohmi

ρ on materiaalivakio resistiivisyys, jonka yksikkö on Ωm tai $\Omega\text{mm}^2/\text{m}$

l on johtimen pituus

A on johtimen poikkipinta-ala

Metallijohtimien resistanssi riippuu myös lämpötilasta (Hautala & Peltonen, 2016, s. 272–273). Lämpötilan kasvaessa metallijohtimen resistanssi kasvaa. Kapealla lämpötila-alueella lämpötilariippuvuus on lähes lineaarista, jolloin lämpötilariippuvuuden yhtälö (2) pätee. Mitä suuremmaksi lämpötila kohoaa, sitä epälineaarisemmaksi resistanssin lämpötilariippuvuus muuttuu. Erittäin matalissa lämpötiloissa (alle 20 K) lineaarisuus katoaa täysin. Lähellä absoluuttista nolapistettä jotkin metallit, esimerkiksi alumiini, tina ja lyijy, menettävät resistanssinsa kokonaan. Ilmiötä kutsutaan suprajohtavuudeksi.

$$R = R_0[1 + \alpha(T - T_0)] \quad (2)$$

missä

R on resistanssi

R_0 on resistanssi vertailulämpötilassa T_0

α on materiaalivakio resistanssin lämpötilakerroin, jonka yksikkö on 1/K

T on lämpötila

T_0 on vertailulämpötila (useasti 20°C)

2.3.2 Ohmin laki

Ohmin lain mukaan laitteen päiden välinen jännite U on suoraan verrannollinen sen läpi kulkevaan virtaan I . Verrannollisuuskerroin määrittelee laitteen resistanssin R : (Hautala & Peltonen, 2016, s. 276)

$$U = RI \quad (3)$$

missä

U on jännite

I on virta

R on resistanssi

Metallivastuksille ohmin laki (3) pätee, jos lämpötila pysyy vakiona ja virta ei kohoa liian suureksi (Hautala & Peltonen, 2016, s. 276). Esimerkiksi hehkulampulla tutkittuna jännite ei ole suoraan verrannollinen virtaan, jolloin Ohmin laki ei ole voimassa. Resistanssi voidaan kuitenkin määrittää kullakin jännitteen arvolla yhtälöstä (4).

$$R = \frac{\Delta U}{\Delta I} \quad (4)$$

missä

R on resistanssi

ΔU on pieni jännitteen muutos

ΔI on vastaava virran muutos

2.4 Elektromekaaninen rele

Rele on sähköisesti toimiva kytkin (Yleiselektroniikka, i.a.). Releeseen syötetään ohjausjännite, joka aktivoi sähkömagneetin vetäen kontaktin joko muodostamaan tai katkaisemaan piirin. Releitä käytetään yleisesti kuormien ohjaamiseen matalammalla jännitteellä. Tästä on erityisesti hyötyä silloin, kun kytkimellä tai olemassa olevalla piirillä ei ole mahdollisuutta käsitellä vaadittavaa virtaa.

2.5 Puolijohderele

Puolijohderele on rele, jossa ei ole liikkuvia ja kuluvia kontakteja (Omron, i.a.). Puolijohdereleessä käytetään kytkinelementtinä puolijohdetta, kuten transistoria, tyristoria tai triakkia. Ohjaussignaalin ja ohjattavan kuorman välillä käytetään myös optoerotinta luomaan galvaninen erotus.

Puolijohderelettä pystytään ohjaamaan nopeammin ja nopeammalla taajuudella päälle ja pois kuin elektromagneettista relettä (Omron, i.a.). Se kuitenkin tuottaa lämpöä sitä enemmän, mitä suurempaa virtaa sillä ohjataan. Näin ollen puolijohdereleen lämpötilaa on tarkkailtava ja se voi vaatia erillisen jäähdytyksen. Suuria virtoja kestävää puolijohderelettä voidaan kutsua puolijohdekontaktoriksi.

Puolijohdereleestä on saatavilla nollapistekytkeytyvää versiota, joka kytkee itsensä päälle aina lähellä vaihtosähkön siniaallon nollapistettä (Panasonic, 2020). Tämä vähentää releen tai kontaktorin nopeasta kytkennästä syntyvää häiriötä sähköverkossa.

2.6 Kontaktori

Kontaktori on toimintaperiaatteeltaan samanlainen kuin rele, mutta se on suunniteltu kytkeämään isompia virtoja (Siemens apt, 30.11.2020). Kontaktorin kelalle johdetaan sähkövirta, mikä saa kelan vetämään kontaktorin koskettimet kiinni. Kelalle syötettävä ohjausjännite on usein paljon pienempi, kuin ohjattava virtapiiri. Esimerkiksi kontaktorin ohjauskela voi toimia 24 V:n jännitteellä, ja kontaktorilla ohjataan 400 V:n virtapiiriä.

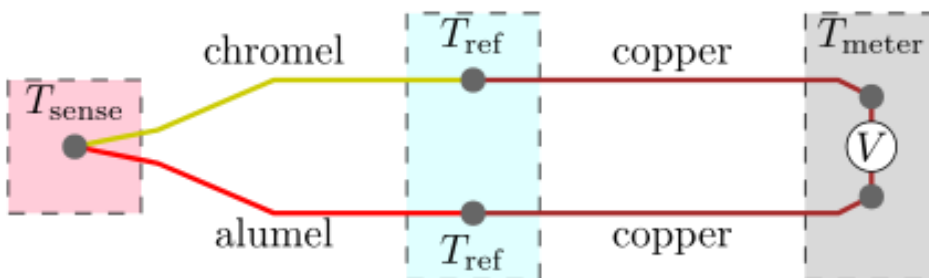
Kontaktorien käyttöluokissa määritellään virta-arvot, jotka kontaktorin on kyettävä kytkeämään ja katkaisemaan (Schneider Electric Suomi, 2017). IEC 947-4 -standardin mukaiset kontaktorien AC-käyttöluokat ovat:

- AC-1 käsittää kuormat, joiden tehokerroin on vähintään 0.95. Resisttiiviset ja hieman induktiiviset kuormat.
- AC-2 käsittää liukurengasmootoreiden käynnistyksen, suunnanvaihdon ja tippikäytön.
- AC-3 käsittää oikosulkumoottorikäytöt
- AC-4 käsittää oikosulku- ja liukurengasmootoreiden suunnanvaihdon ja tippikäytön.
- AC-14 käsittää sähkömagneettisten kuormien kytkennän, teho vedossa on alle 72 VA.
- AC-15 käsittää sähkömagneettisten kuormien kytkennän, teho vedossa on yli 72 VA.

2.7 Termopari

Termopari on anturi, jolla mitataan lämpötilaa (Omega, i.a. -a). Se koostuu kahdesta eri materiaalista valmistetusta metallilangasta, jotka on liitetty toisesta päästä yhteen (kuvio 1). Kun liitoskohtaa lämmitetään tai jäähdytetään, muodostuu jännite, joka on lämpötilasta riippuvainen. Termoparit erotellaan niissä käytettävän metalliparin mukaan tyypeihin J, K, T, E ja N.

Yleisin käytettävä termoparityyppi on K, jonka metallipari on Chromel ja Alumel (Omega, i.a. -b). K-tyyppin termoparin mittaustemperatuuri on $-200\text{--}1250\text{ }^{\circ}\text{C}$. Sen tuottama lämpötilasta riippuvainen jännite on hyvin pieni ($0\text{--}50\text{ mV}$:n luokkaa), joten mittauspiiriltä vaaditaan tarkkuutta.



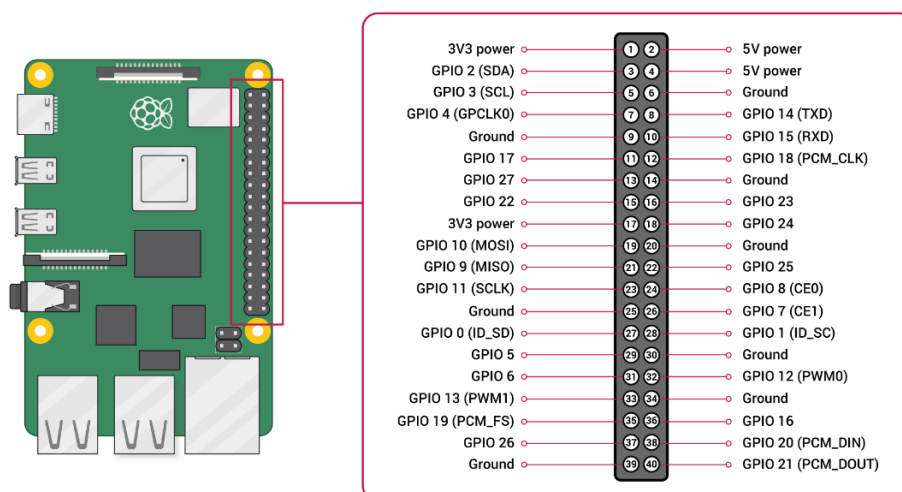
Kuvio 1. Termoparin toiminta (Nanite, 2014)

2.8 Raspberry Pi 4

2019 julkaistu Raspberry Pi 4 on brittiläisen Raspberry Pi Foundationin kehittämä luottokortin kokoinen yhden piirilevyn tietokone (Upton, 2019). Raspberry Pi 4 sisältää monipuoliset liitännämahdollisuudet (Raspberry Pi, i.a. -a):

- 2,4 GHz ja 5,0 GHz:n Wlan
- Bluetooth 5.0 ja BLE
- Gigabit Ethernet
- 2x USB 2.0 ja 2x USB 3.0
- 40-pinninen GPIO
- 2x micro-HDMI
- DSI-näyttöliitäntä
- CSI-kameraliitäntä
- Micro-SD-muistikorttipaikka

GPIO-pinnejä (kuvio 2) voidaan ohjelmassa ohjata tuloiksi ja lähdöiksi kuten halutaan (Raspberry Pi, i.a. -b). Lähtönä toimiessa GPIO-pinnin jännite on lähtö päällä (high) 3,3 V, ja pois päältä (low) 0 V. Tulona toimiessaan puolestaan 3,3 V luetaan high-tilaksi ja 0 V low-tilaksi. Yksinkertaisten tulojen ja lähtöjen lisäksi pinnejä voidaan käyttää myös muihin tarkoituksiin, kuten PWM-lähtönä, SPI-väylänä tai I2C-väylänä.



Kuvio 2. Raspberry Pi 4 GPIO-Pinout (Raspberry Pi, i.a. -b)

2.9 On/Off-säätö

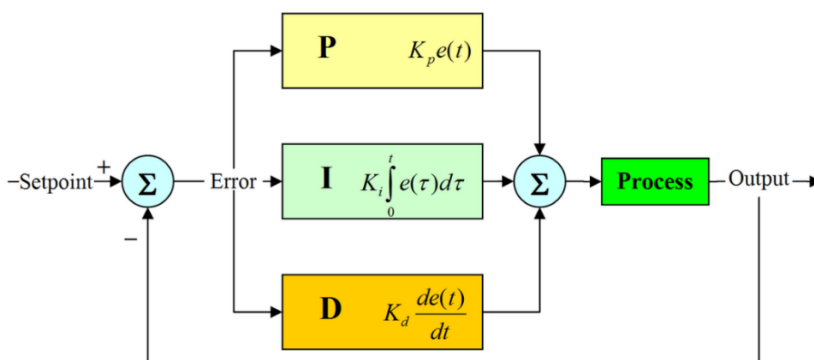
On/Off-säätö on yksinkertainen ja edullinen tapa säätää lämmitystä (Eaton, i.a.). Säädin pitää vastusta päällä, kunnes haluttu lämpötila saavutetaan. On/Off-säätimelle täytyy asettaa hystereesiarvo, jotta vältetään lähdön liian nopea värähteleminen päälle ja pois lähellä haluttua lämpötilaa. Tällöin säädin ei kytke vastusta päälle heti, kun alitetaan haluttu lämpötila, vaan vasta kun asetettu hystereesipiste alitetaan.

2.10 PID-säätö

PID (Proportional, Integral, Derivative) -säädin on hyvin yleinen teollisuudessa käytetty säätöalgoritmi (National Instruments, 2023). Sen peruseriaate on lukea anturidata, laskea P-, I- ja D-komponenteille arvot, jotka yhteen laskemalla saada säätimelle lähtöarvo (kuvio 3).

P-osan arvo riippuu asetetun arvon ja saadun mittaustuloksen erotuksesta (National Instruments, 2023). Kyseistä erotusta kutsutaan säätövirheeksi. P-osan vahvistus määrittää kertoimen P-osalle. Esimerkiksi, jos säätövirhe on 10, ja vahvistus 5, saadaan P-osan arvoksi 50. Pelkällä P-osalla prosessiin jää yleensä säätöpoikkeamaa, eli asetettuun arvoon ei täysin päästä.

I-osa integroi säätövirhettä ajassa (National Instruments, 2023). I-osan arvo kasvaa niin kauan, kun säätövirhettä esiintyy, nostaen säätimen lähtöarvoa, jotta asetettuun tavoitearvoon päästäisiin. D-osa puolestaan reagoi mittaustuloksen äkillisiin muutoksiin säätäen lähtöä.



Kuvio 3. PID-säätimen lohkokkaavio (SilverStar, 2006)

PID-säädintä käytettäessä sille tulee asettaa P-osan vahvistus (K_p), integrointi-aika (K_i) ja derivointiaika (K_d) (National Instruments, 2023). Näiden arvojen paikoilleen hakemista kutsutaan PID-säätimen virittämiseksi. Virittämiseen on kehitetty useita eri menetelmiä, yksi suosituimmista on Ziegler-Nichols-menetelmä.

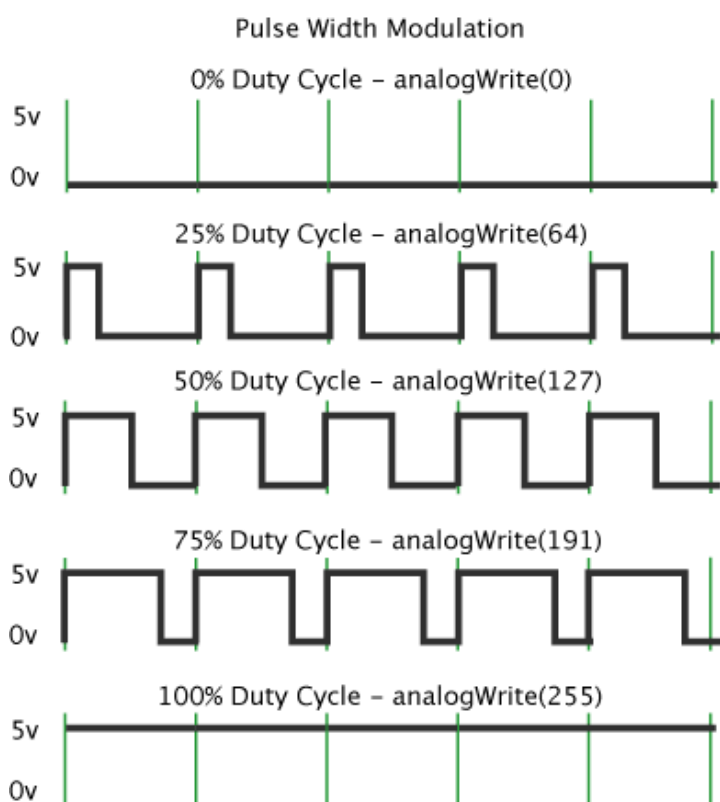
Ziegler-Nichols-menetelmässä integrointi-aika ja derivointiaika asetetaan aluksi nolnaan, jonka jälkeen P-osan vahvistusta kasvatetaan, kunnes saavutetaan kriittinen piste K_c , jossa lähtö alkaa värähtelemään jakson ajalla P_c . (National Instruments, 2023). Tämän jälkeen K_p , K_i ja K_d säädetään taulukon mukaisesti (taulukko 1).

Taulukko 1. Ziegler-Nichols-säätömenetelmä (National Instruments, 2023)

Ohjaus	K_p	K_i	K_d
P	$0,5 \cdot K_c$	-	-
PI	$0,45 \cdot K_c$	$P_c/1,2$	-
PID	$0,60 \cdot K_c$	$0,5 \cdot P_c$	$P_c/8$

2.11 Pulssinleveysmodulaatio

Pulssinleveysmodulaatiota (PWM) käytetään vähentämään kuormalle syötettävää sähkötehoa kytkemällä signaali päälle ja pois suurella taajuudella (Dietrich, 2022). PWM-signaali käyttää kahta ohjausparametria: taajuus, eli jakson aika ja pulssisuhde. Pulssisuhde (kuvio 4) ilmoitetaan prosentteina, ja se kuvastaa, kuinka kauan signaali on päällä suhteessa jakson aikaan.



Kuvio 4. PWM-signaalin kuvaajia eri pulssisuhteilla (The arduino.cc team, 2010)

PWM-signaalin pulssisuhdetta voidaan ohjata esimerkiksi suoraan PID-säätimen lähdön avulla 0–100 %. PWM-ohjauksessa käytetään yleensä korkeita taajuuksia, esimerkiksi himmentimenä led-valoille. Korkeaa taajuutta käyttämällä led-valon vilkkuminen ei ole ihmisen havaittavissa, vaan näyttäytyy valon himmenemisenä.

Lämmitysvastusta ohjattaessa PWM-signaalilla on käytettävä tarpeeksi matalaa taajuutta, jonka rele tai kontaktori kykenee kytkemään vahingoittumatta.

3 TYÖN KUVAUS

3.1 Vanhaan ohjausjärjestelmään tutustuminen

Työ aloitettiin käymällä läpi uunin vanha ohjausjärjestelmä. Se osoittautui hyvin yksinkertaiseksi. Ohjaimeen on kytketty lämpötila-anturi ja ohjain ohjaa suoraan kontaktoria, joka kytkee vastukset päälle. Lämpötila-anturi osoittautui tyypiltään K-tyypin termopariksi.

3.2 Uuden ohjausjärjestelmän alustan ja komponenttien valinta

Alustalta vaaditaan tulo, jolla voidaan lukea lämpötila-anturia, ja lähtö, jolla ohjataan kontaktoria. Uudessa järjestelmässä halutaan kiinnittää huomiota sen helppokäyttöisyyteen. Siihen halutaan kosketusnäyttö ja selkeä käyttöliittymä.

Alustaksi valikoitui Raspberry Pi 4. Siihen voidaan liittää edullinen kosketusnäyttö HDMI- tai DSI-liitännällä, ja sen GPIO-lähtöjä ja -tuloja voidaan ohjelmoida halutulla tavalla. Myös suorituskyky riittää hyvin tähän sovellukseen. Hankintahinta oheistarvikkeineen on hyvin edullinen verrattuna teollisuustietokoneeseen tai ohjelmoitavaan logiikkaan ja siihen liitettävään HMI-paneeliin. Ohjelmointikieleksi valikoitui Python, koska sille löytyy paljon valmiita kirjastoja, joilla voidaan ohjata esimerkiksi GPIO-liitäntöjä.

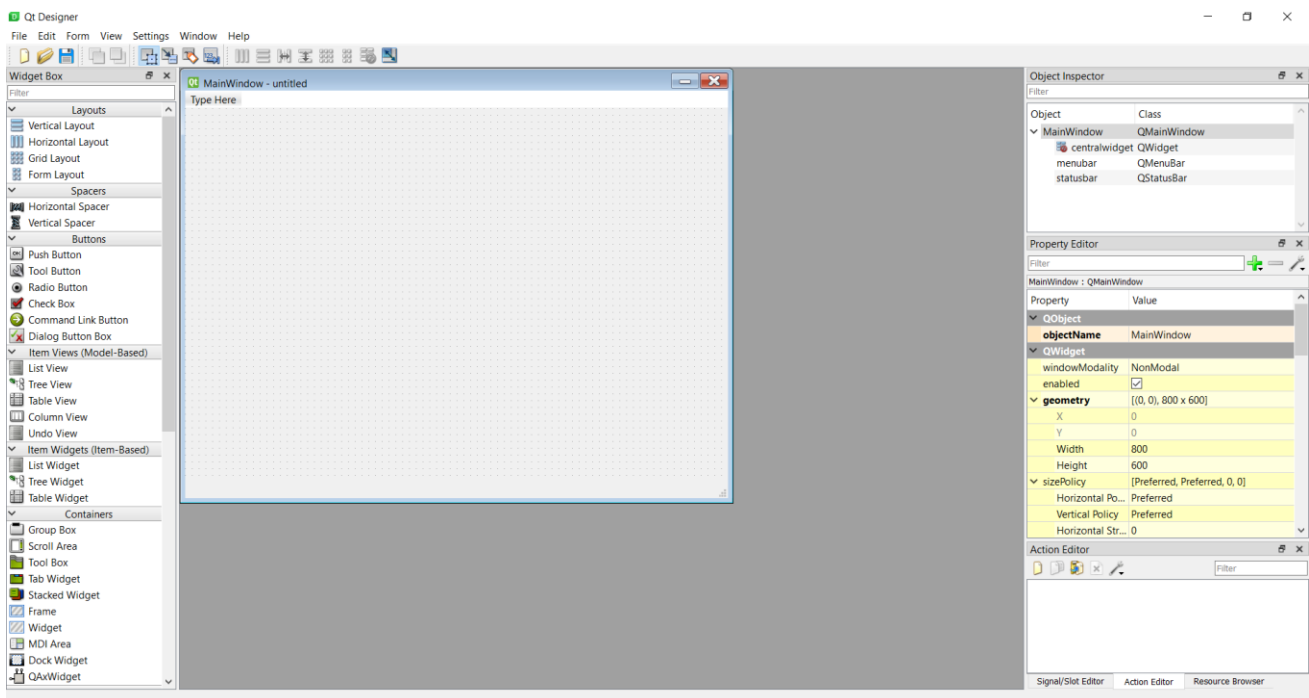
Käytön helpottamiseksi kosketusnäytön on oltava riittävän suuri. Näytöksi valikoitui Raspberry Pille suunniteltu 10.1" kapasitiivinen kosketusnäyttö 1280 x 800 -resoluutiolla ja DSI-liitännällä. Näytön takana sijaitsee kiinnityspiste Raspberry Pille. Siitä on helppo liittää lyhyt lattakaapeli näyttöön. Näyttö saa virran suoraan Raspberry Pin GPIO-pinneistä.

Sähkövastuksia päätettiin ohjata nykyisellä olemassa olevalla kontaktorilla. Kontaktorin ohjaamiseksi tarvitaan rele, jota puolestaan ohjataan Raspberry Pin GPIO-lähdöllä. Releeksi valikoitui valmis 3-kanavainen relekortti, joka sisältää myös optoerottimet. Relekortti on suunniteltu käytettäväksi Raspberry Pin kanssa, joten se voidaan liittää suoraan GPIO-liitäntään.

Termoparin liittämiseksi Raspberry Pihin tarvitaan muunninpiiri, joka muuntaa termoparin jännitteen Raspberry Pin ymmärtämäksi viestiksi. Muuntimeksi valikoitui muunninkortti, joka lähettää termoparin lämpötilaviestin SPI-väylään. Muunnin perustuu MAX31855-mikropiiriin, ja sille löytyy valmis Python-kirjasto käytettäväksi Raspberry Pin kanssa.

3.3 Käyttöliittymän tekeminen

Käyttöliittymän ohjelmointiin käytettiin graafisten käyttöliittymien toteuttamiseen suunniteltua PyQt5-sidosta (kuva 2). PyQt5 on Riverbank Computing Limitedin kehittämä Python-sidos alustariippumattomalle Qt kehitysympäristölle (Riverbank Computing, i.a.). Apuna ohjelmoinnissa käytettiin PyQt5-paketin asennuksen mukana tulevaa Qt Designer -sovellusta, jolla käyttäjä voi luoda käyttöliittymän graafisesti, ja sovellus luo sen pohjalta automaattisesti koodin käyttöliittymälle. Tämä koodi voidaan ladata käyttöön Python-ohjelmakoodin sisällä. Qt Designerin käyttö nopeuttaa käyttöliittymän luomista, kun jokaista asiaa ei tarvitse itse kirjoittaa koodiin.

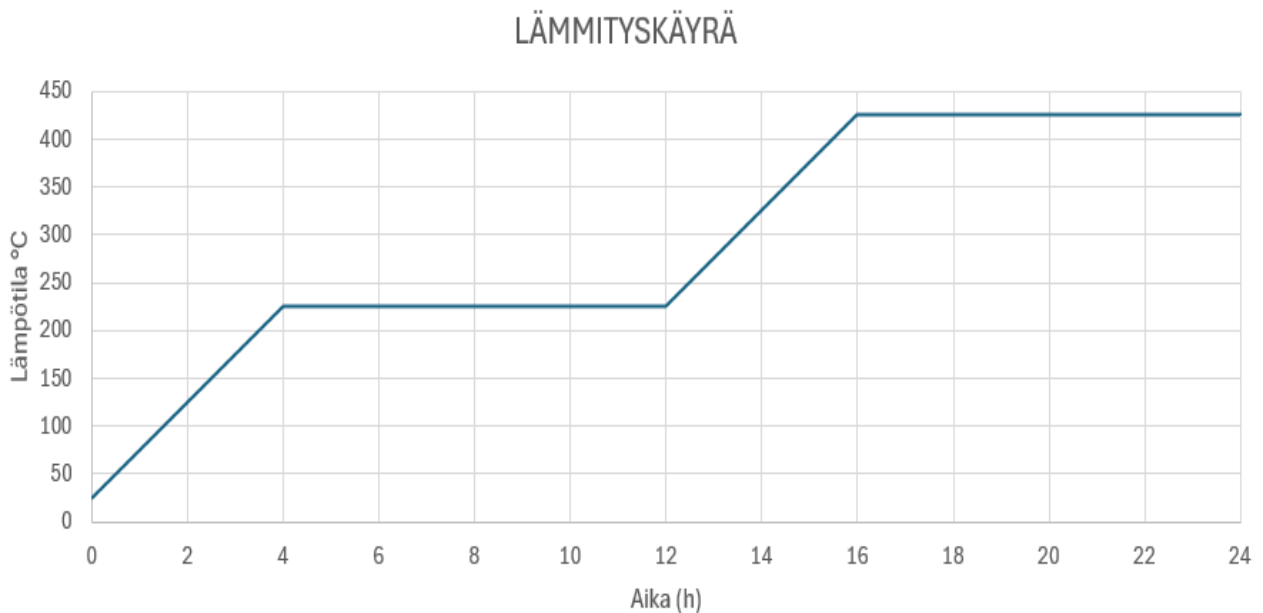


Kuva 2. Qt Designer -sovellus

Pääikkunaan lisättiin välilehdet lämmityskäyrän asetukselle ja uunin ajolle. Ikkunan oikeaan laitaan lisättiin työkalupalkki, johon lisättiin painikkeet virtuaalisen näppäimistön avaamiseksi ja sovelluksen sammuttamiseksi.

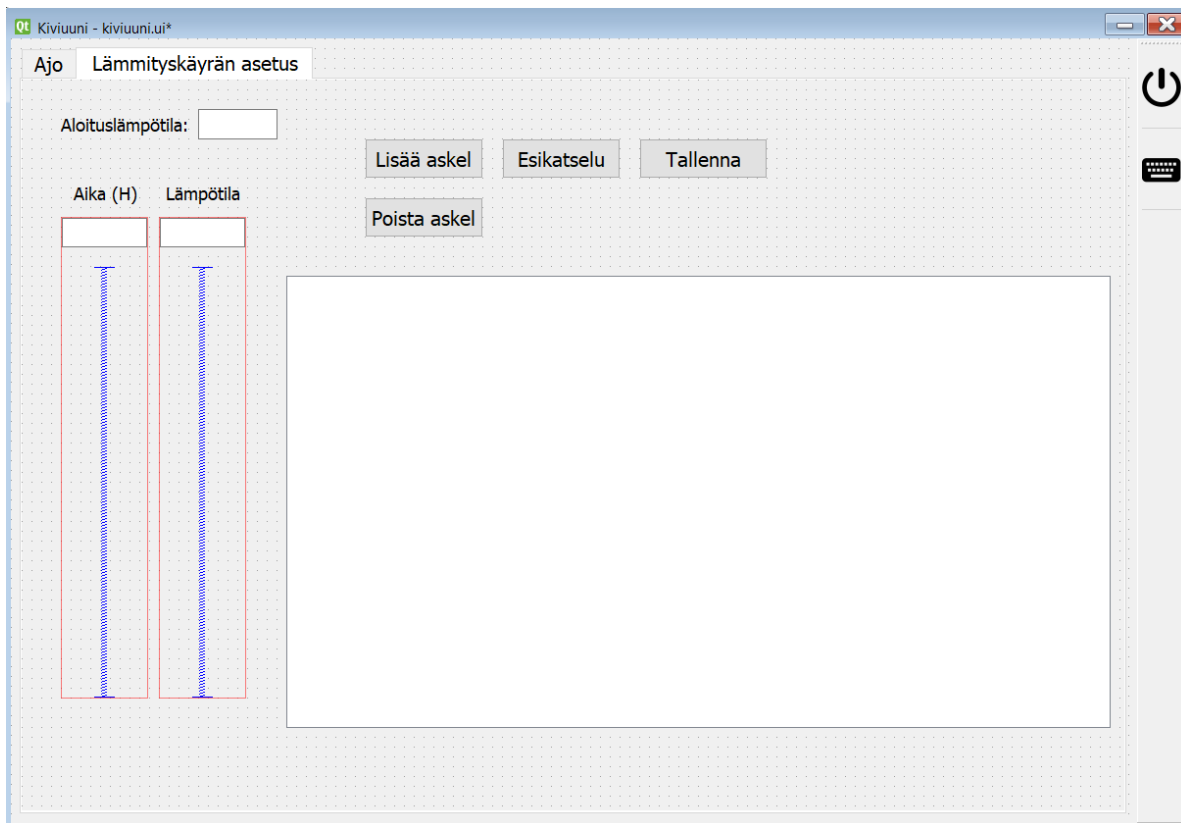
3.3.1 Lämmityskäyrän asetus -välilehti

Uunin lämpötilaa halutaan ohjata aina lineaarisesti ylös tai pitää vakiona. Lämmityskäyrät (kuvio 5) muodostuvat näin ollen peräkkäisistä askelista, jotka ovat lineaarisia suorja, joilla on oma kulmakertoimensa.



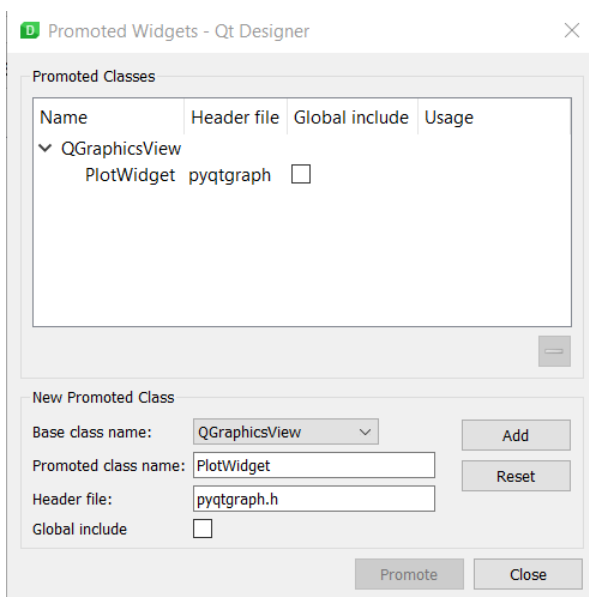
Kuvio 5. Esimerkki lämmityskäyrästä

Lämmityskäyrän asetus toteutetaan syöttämällä ohjelmaan näiden peräkkäisten suorien alku- ja loppupisteet. Pisteiden syöttämiseksi lisättiin välilehdelle (kuva 3) kentät aloituslämpötilalle sekä ajalle ja lämpötilalle. Ne sijoitettiin molemmat oman layoutin sisälle. Tämä mahdollistaa myöhemmin ohjelmassa uusien kenttien lisäämisen seuraavien askelien pisteiden syöttämiseksi painiketta painamalla. Välilehdelle lisättiin QGraphicsView-olio, johon voidaan piirtää esikatselu lämmityskäyrästä syötettyjen arvojen perusteella. Askelien lisäämiseksi, poistamiseksi, esikatselun näyttämiseksi ja asetetun lämmityskäyrän tallentamiseksi lisättiin välilehdelle painikkeet.



Kuva 3. Qt Designerilla tehty Lämmityskäyrän asetus -välilehti

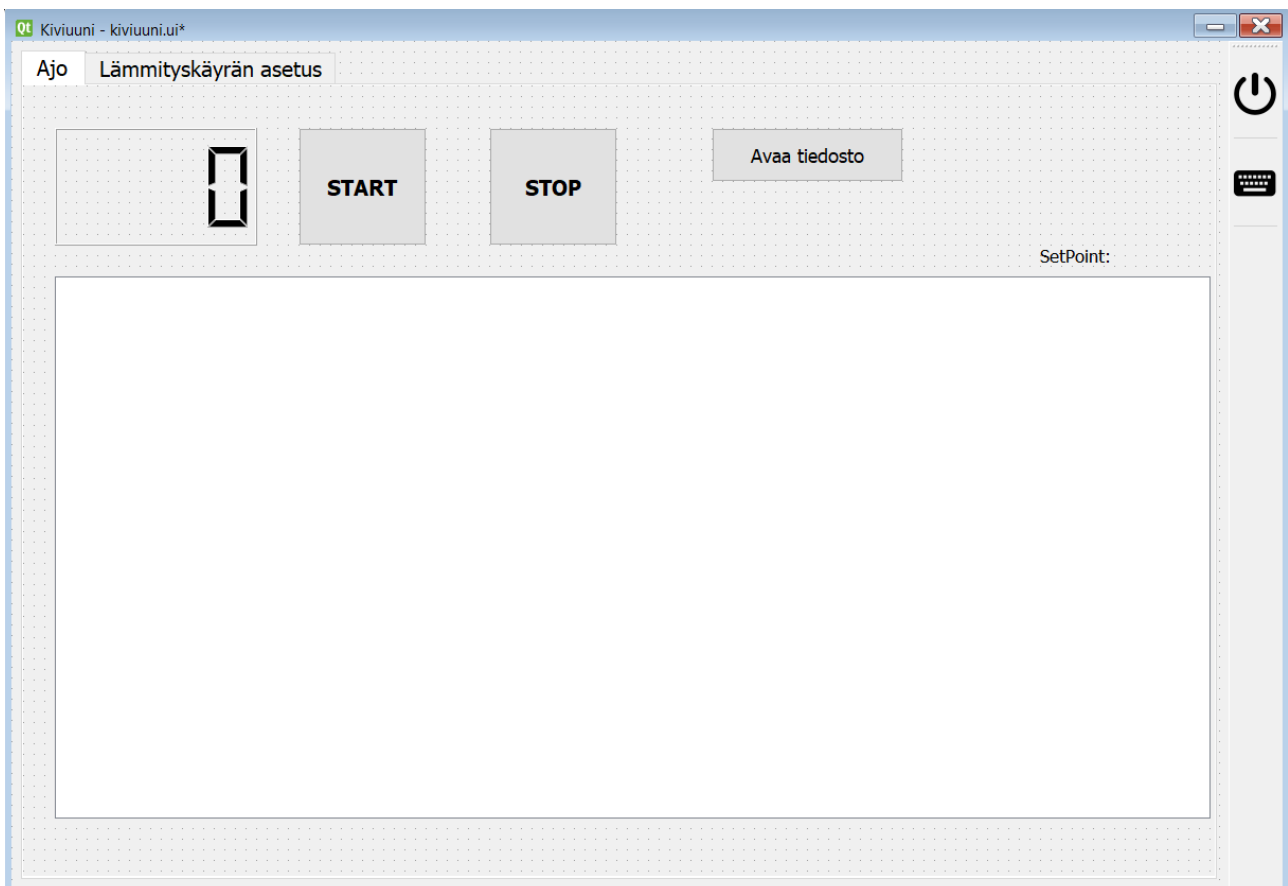
Lämmityskäyrien visualisoinnissa päädyttiin käyttämään pyqtgraph-moduulia, joten QGraphicsView-olio piti asettaa ohjelmaa ladattaessa korvaantumaan pyqtgraph-moduulin PlotWidget-oliolla. Tämä tapahtuu Qt Designerissa klikkaamalla objektia hiiren oikealla painikkeella ja valitsemalla Promote to (kuva 4).



Kuva 4. QGraphicsView promote to PlotWidget

3.3.2 Ajo-välilehti

Ajo-välilehdelle (kuva 5) lisättiin numeronäyttö näyttämään termoparin mittaama lämpötila. Lämmitysohjelman käynnistämiseksi ja pysäyttämiseksi lisättiin omat START- ja STOP-painikkeet. Käytettävyyden lisäämiseksi haluttiin Lämmityskäyrän asetus -välilehdellä tallentaa asetettu lämmityskäyrä, ettei samaa lämmityskäyrää käytettäessä sitä tarvitse aina sovelluksen käynnistämisen jälkeen asettaa uudelleen. Tallennetun lämmityskäyrän avaamiseksi lisättiin myös Avaa tiedosto -painike. Avatun lämmityskäyrän visualisoimiseksi lisättiin myös Ajo-välilehdelle QGraphicsView-olio, joka taas asetettiin korvaantumaan Plot-Widget-oliolla. Avatun tiedoston nimen näyttämiseksi sekä ohjelman käydessä asetuslämpötilan (SetPoint) esittämiseksi lisättiin tekstikentät.



Kuva 5. Qt Designerilla tehty Ajo-välilehti

3.4 Ohjelma

Ohjelman kirjoittamiseen käytettiin Visual Studio Code -lähdekoodieditoria. Ohjelma jaettiin selkeyden vuoksi neljään eri Python-tiedostoon, suoritettavien prosessien mukaisesti:

- pääohjelma
- asetusarvon laskeminen
- lämpötila-anturin lukeminen
- PID-säädin.

3.4.1 Pääohjelma

Pääohjelma aukaisee käyttöliittymäikkunan, sisältää funktiot käyttöliittymän painikkeille, ja määrittää ne suoritettavaksi painikkeita painettaessa. Koska sovelluksessa on suoritettava muutamaa prosessia päällekkäin, suoritetaan lämpötila-anturin datan lukeminen, lämpötilan asetusarvon laskeminen ja säätimen lähtöarvon laskeminen erillisissä säikeissä (Threads). Pääohjelmassa määritetään säikeet ja yhdistetään niiltä saapuvat signaalit toisiin säikeisiin ja pääohjelman funktioihin. Signaalien avulla voidaan välittää muuttujia eri prosessien välillä.

3.4.2 Asetusarvon laskeminen

Python-tiedosto sisältää luokan, jolle annetaan argumenttina lista valitun lämmityskäyrän askelien alku- ja loppupisteistä. Luokan sisäinen funktio antaa START-painikkeen painalluksesta PID-säätimelle asetusarvoksi lämmityskäyrän aloituspisteen. Kun aloituspisteen lämpötila saavutetaan, laskee funktio seuraavan askeleen kulmakertoimen ja vakiotermin. Niiden avulla lämmityskäyrältä lasketaan PID-säätimelle uusi asetusarvo 0,5 s välein. Kun kaikki askeleet loppuvat ja lämpökäyrä on suoritettu loppuun, antaa funktio PID-säätimelle asetusarvon 0, ja lämmitys kytkeytyy pois päältä.

3.4.3 Lämpötila-anturin lukeminen

Python-tiedosto sisältää luokan, jonka sisäinen funktio lukee Raspberry Pin SPI-väylään liitetyn termoparin muunninpiirin lähettämän lämpötilatiedon anturilta. Koska muunninpiiri osoittautui hyvin häiriöalttiiksi, joudutaan funktion sisällä suodattamaan luettua mittausdataa. Funktio lukee arvon anturilta 0,1 s välein. Jos arvo poikkeaa edellisestä mitatusta arvosta yli 2 astetta, mittaus hylätään. Hyväksytyt alle 2 astetta poikkeavat arvot tallennetaan listaan. Kun listassa on 10 arvoa, niistä lasketaan keskiarvo, mikä lähetetään PID-säätimelle sekä käyttöliittymän lämpötilanäyttöön.

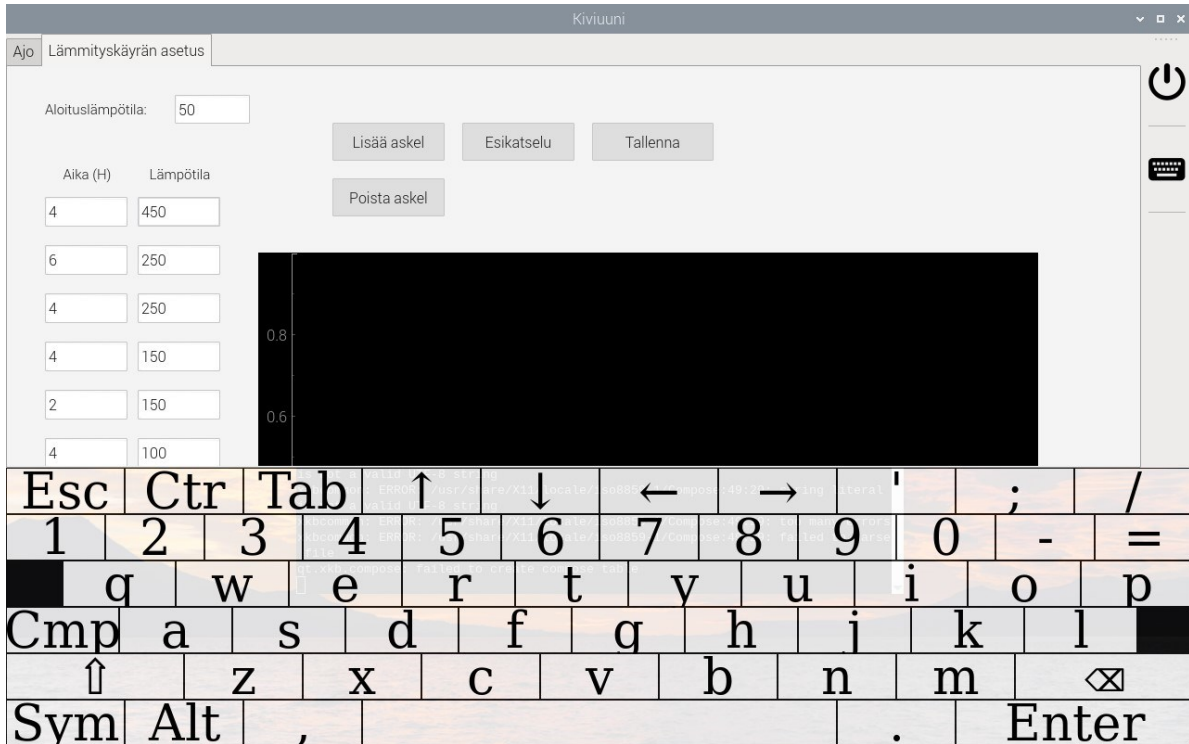
3.4.4 PID-säädin

Python-tiedosto sisältää PID-säätimen, joka ohjaa Raspberry Pin PWM-lähtöä. Koska käytössä on tavallinen rele ja kontaktori, jotka eivät kestä nopeaa edestakaista kytkemistä, on PWM-taajuus asetettu hyvin matalaksi 0,05 Hz. Tällä taajuudella PWM:n jakson aika on 20 s. PID-säätimen lähtöarvo ohjaa PWM:n pulssisuhdetta 0–100 %. Ohjelmassa on kuitenkin rajoitettu pulssisuhteen asetus siten, että alle 10 %:n pulssisuhdetta ei sallita. 20 s jakson ajalla se tarkoittaa sitä, että kontaktorin pienin kytkentäaika on 2 s.

PID-säätimen integraaliosan arvo on asetettu kasvamaan vain 4 asteen kaistalla asetuslämpötilan alapuolella. Integraaliosan arvo myös nollaantuu aina, kun asetuslämpötila ylitetään. Tämän avulla asetusarvo pystytään saavuttamaan, mutta liiallista ylitystä ei tapahdu.

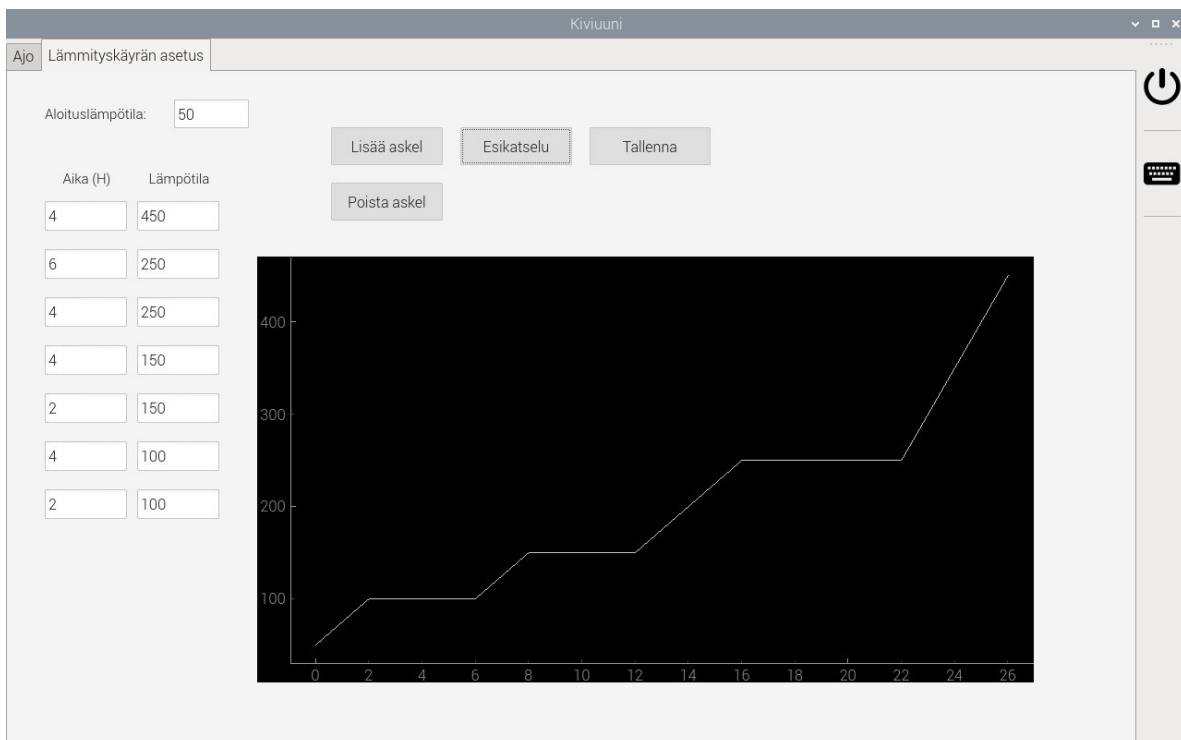
3.5 Sovelluksen käyttö

Lämmityskäyrän asetus -välilehdellä syötetään käyrän aloituslämpötila, mihin lämpötila nostetaan suoraan käynnistettäessä ajo. Jokaiselle käyrän askeleelle asetetaan kesto aika tunteina sekä tavoitelämpötila askeleen lopussa. Arvojen syöttämistä varten työkalupalkissa on painike, joka avaa virtuaalisen näppäimistön (kuva 6).



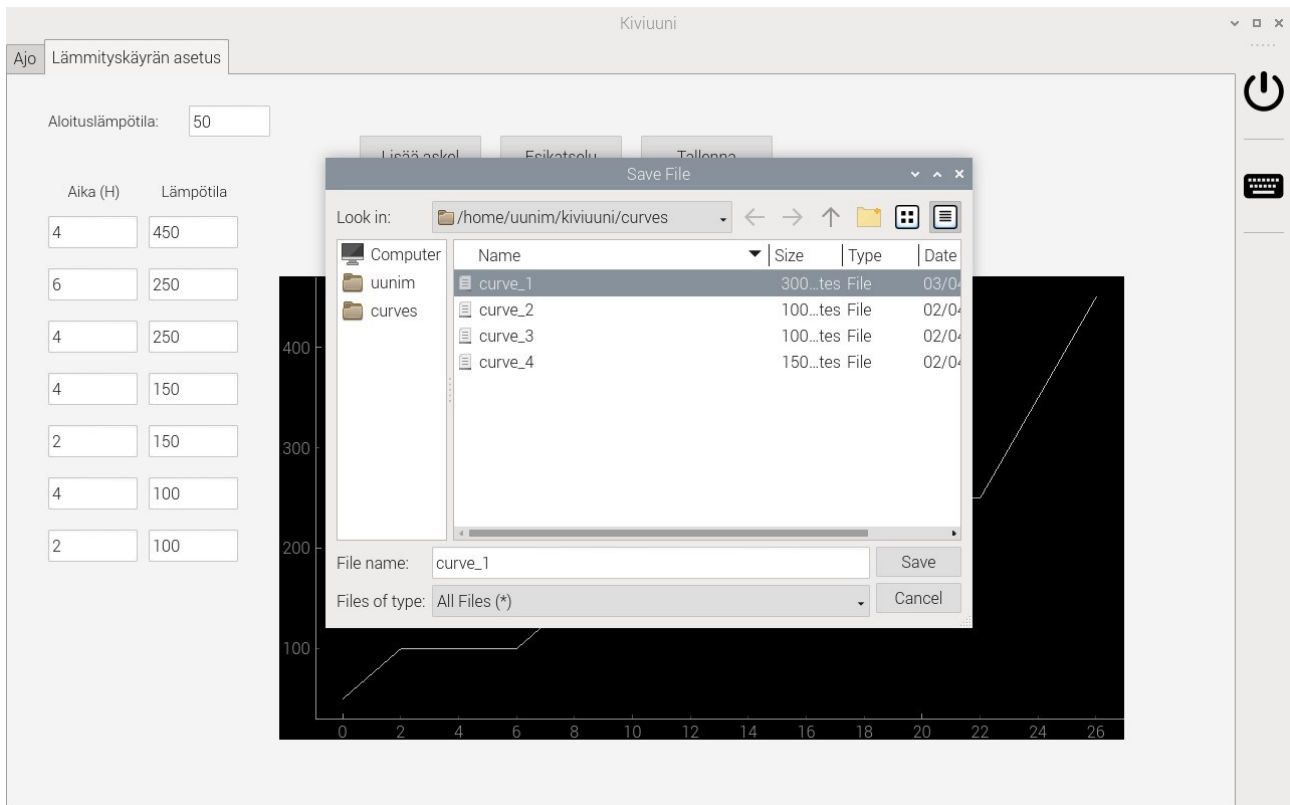
Kuva 6. Lämmityskäyrän arvojen asetus

Kun arvot on syötetty, Esikatselu-painiketta painamalla saadaan näytölle kuva asetetusta lämmityskäyrästä (kuva 7).



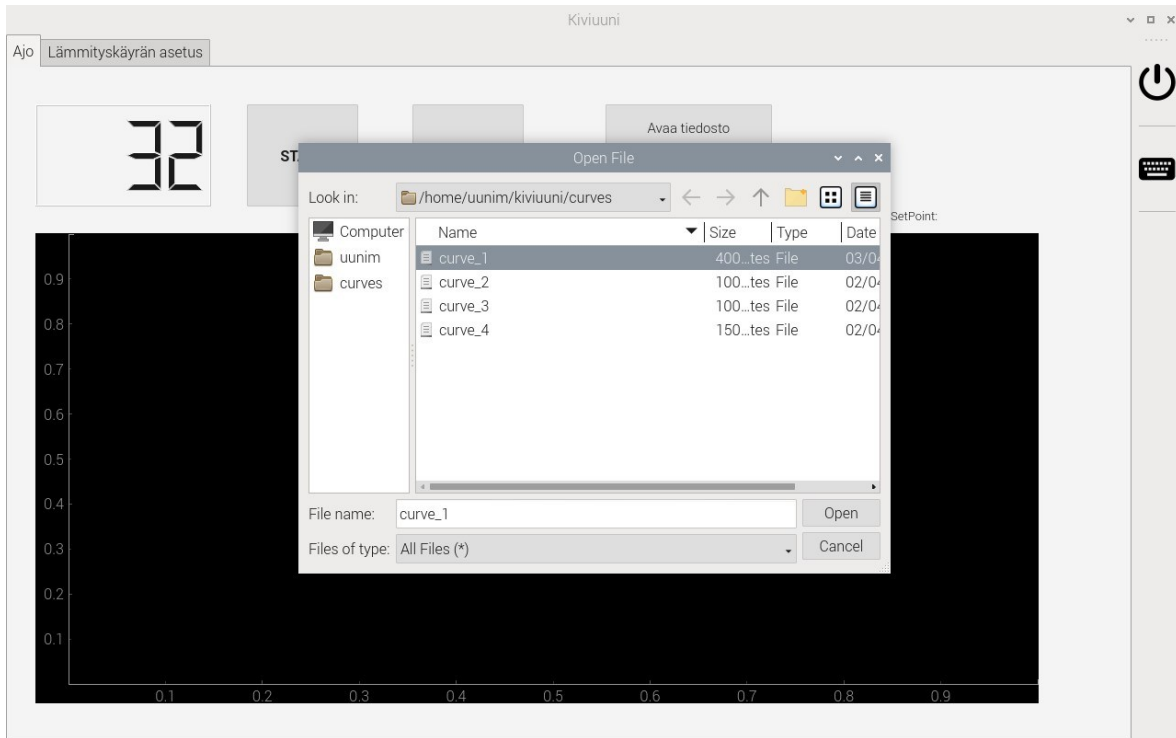
Kuva 7. Lämmityskäyrän esikatselu

Esikatselun jälkeen syötetty lämmityskäyrä tallennetaan painamalla Tallenna-painiketta. Avautuvassa ikkunassa uudelle käyrälle syötetään nimi ja tallennetaan Save-painikkeella (kuva 8).

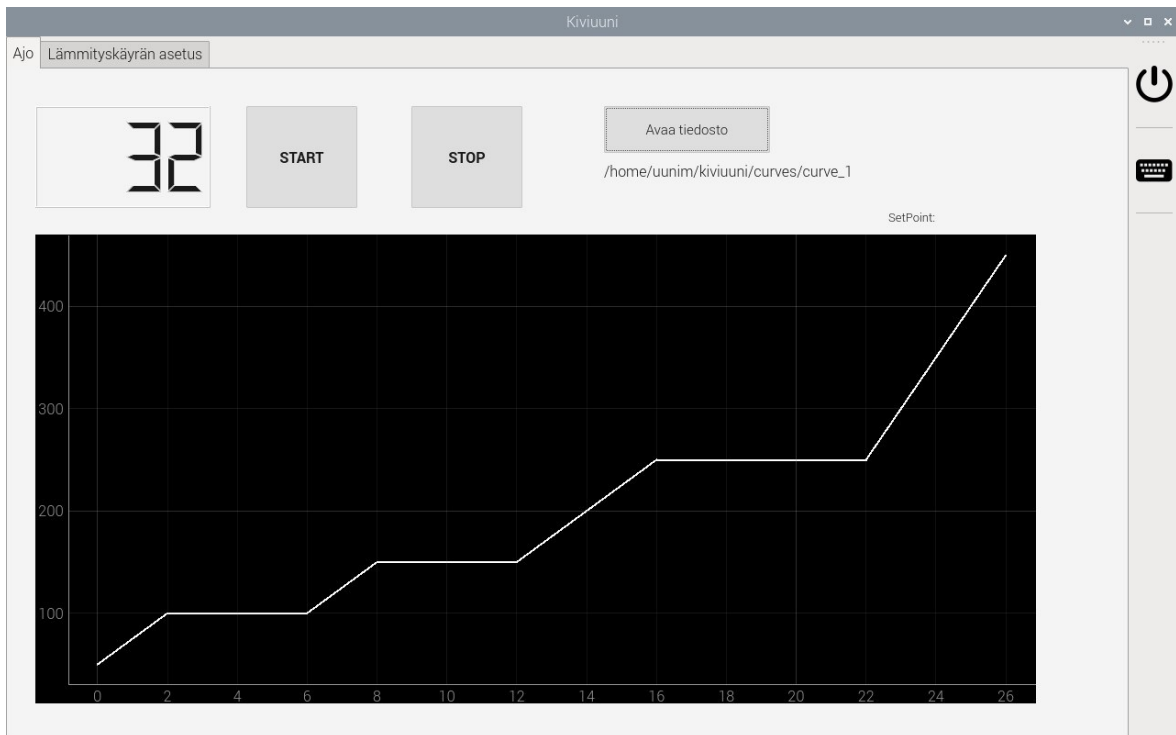


Kuva 8. Lämmityskäyrän tallennus

Ajo-välilehdellä avataan tallennettu lämmityskäyrä Avaa tiedosto -painikkeella. Avautuvasta ikkunasta valitaan haluttu tallennettu tiedosto ja painetaan Open-painiketta (kuva 9). Avattu lämmityskäyrä piirretty näytölle (kuva 10).

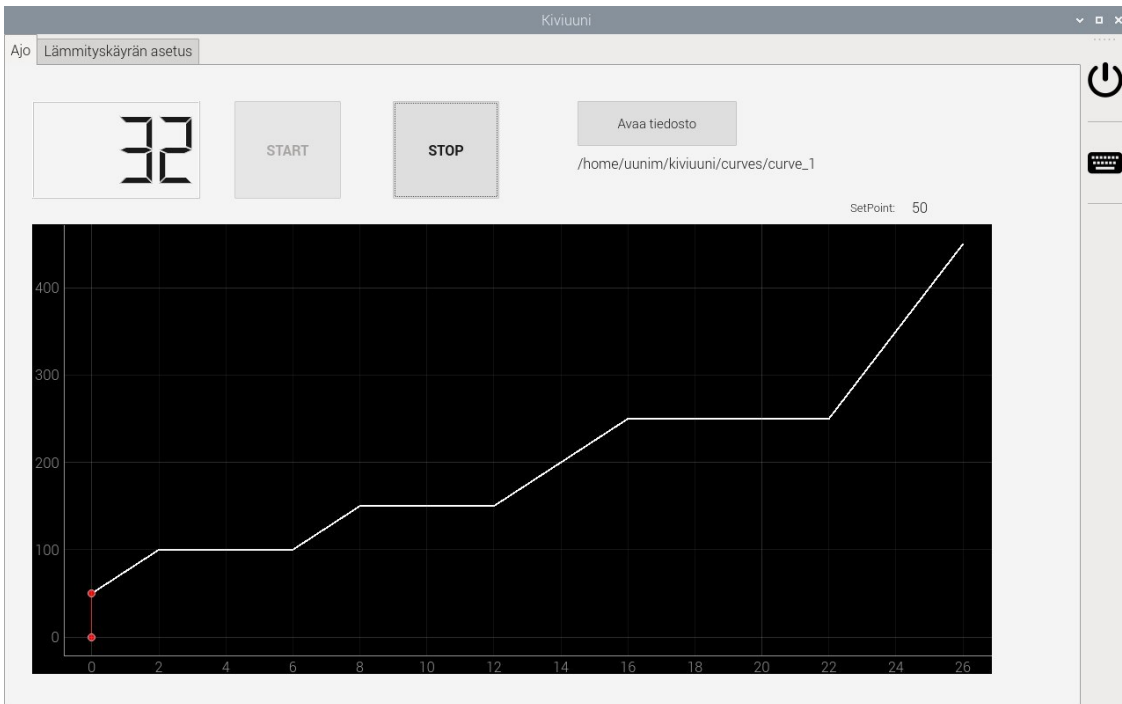


Kuva 9. Lämmityskäyrän valinta

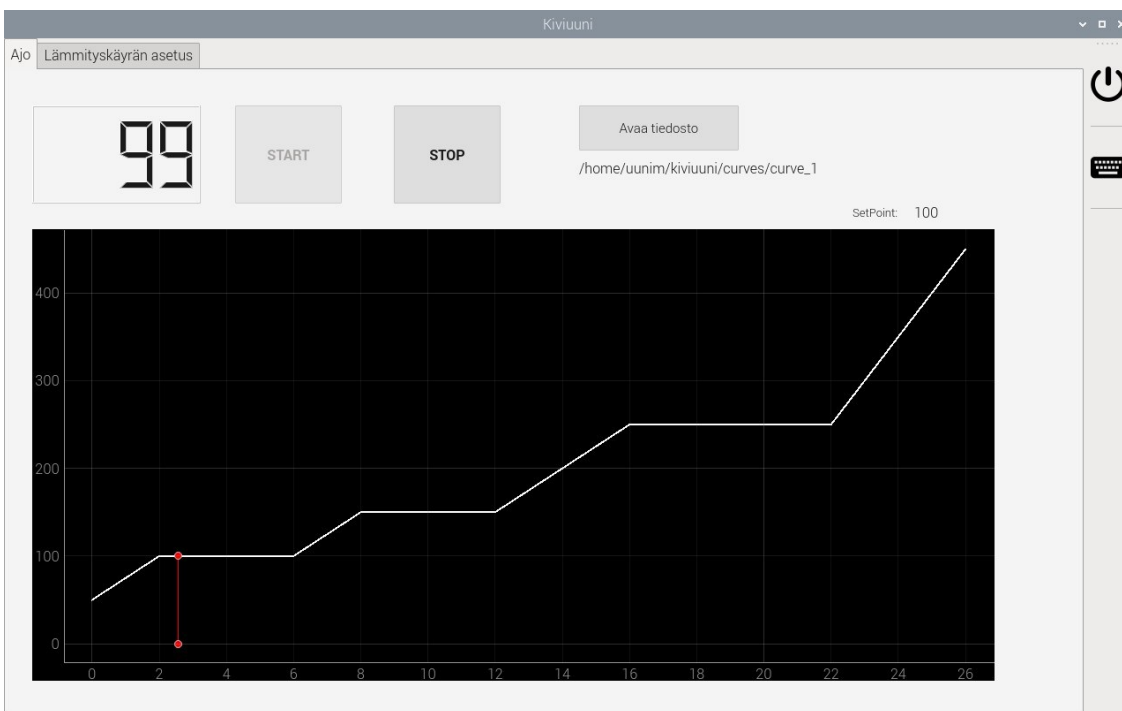


Kuva 10. Lämmityskäyrä avattuna

Lämmityskäyrän ajo aloitetaan START-painikkeella ja voidaan keskeyttää STOP-painikkeella (kuva 11). Lämmityskäyrää ajettaessa liikkuu käyrällä osoitin visualisoiden missä kohtaa käyrää ollaan menossa (kuva 12). Kun lämmityskäyrä on ajettu loppuun, kytkeytyy lämmitys pois päältä.



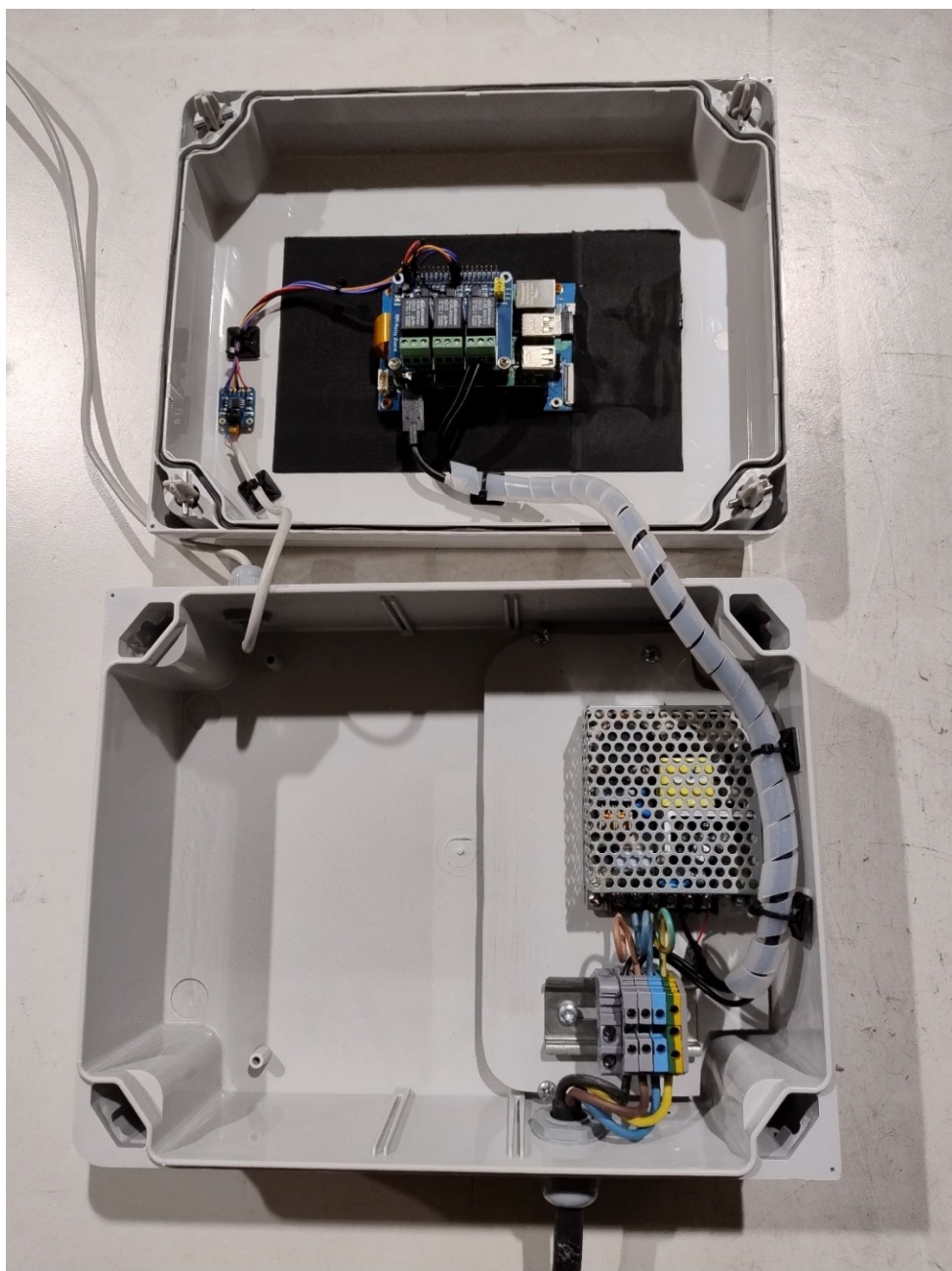
Kuva 11. Ajo käynnistettynä



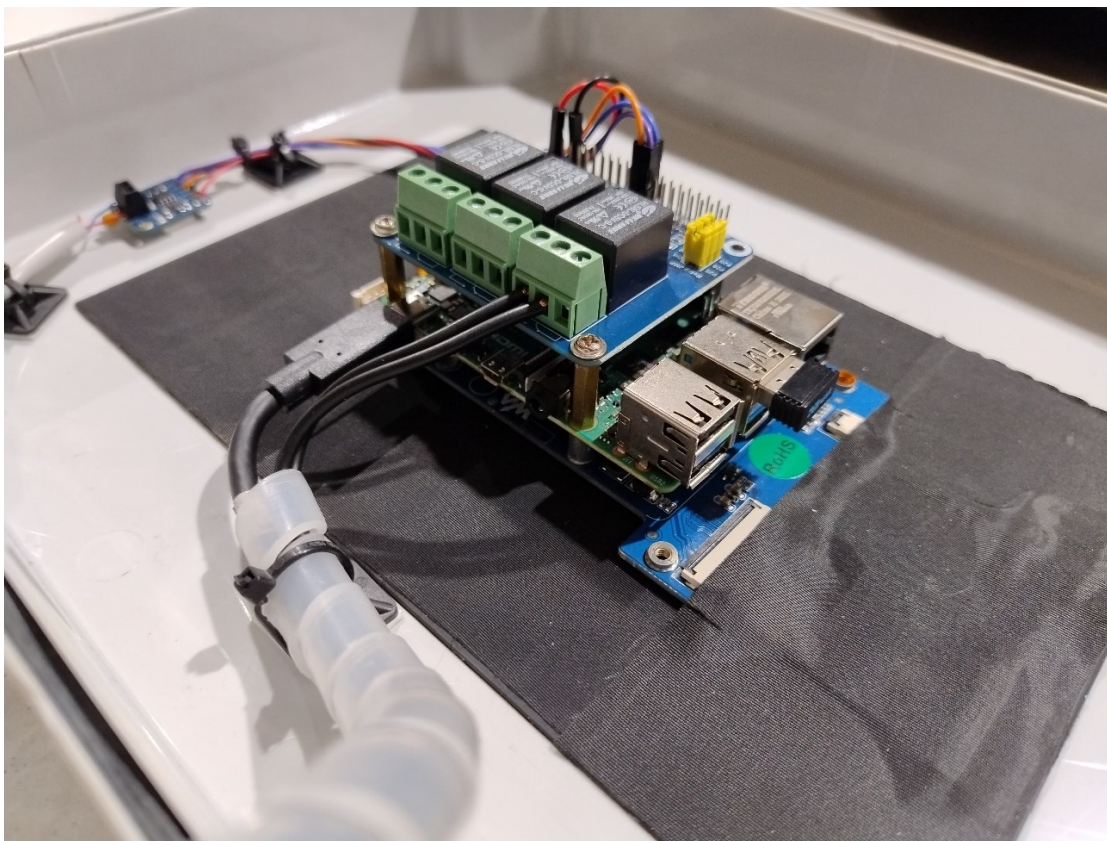
Kuva 12. Ajon etenemisen seuranta

3.6 Prototyyppi

Ohjaimesta rakennettiin prototyyppi muoviseen laitekoteloon (kuva 15). Raspberry Pi ja siihen kiinnitetty relekortti asennettiin kosketusnäytössä sille valmiina olevalle kiinnityspisteelle (kuva 14). Kosketusnäytön ja Raspberry Pin virransyötöksi valikoitui 5 V/4 A -hakkuvirralähde. Termoparin muunninpiiri (kuvassa 13, kotelon vasemmassa reunassa) sijoitettiin kotelon sisällä mahdollisimman kauaksi virtalähteestä sekä jännitteisistä johtimista häiriöiden minimoimiseksi.



Kuva 13. Prototyypin rakennus



Kuva 14. Raspberry Pi ja relekortti kiinnitettynä kosketusnäyttöön



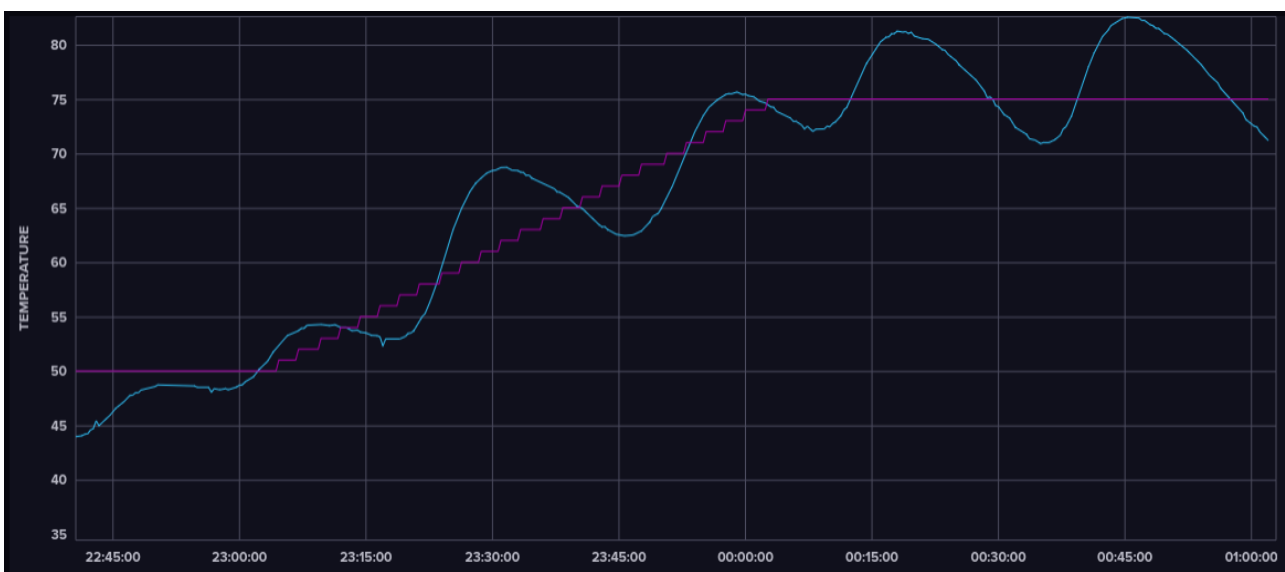
Kuva 15. Valmis ohjaimen prototyyppi

3.7 Testaus

Testausta varten ohjaimen prototyyppi kytkettiin ohjaamaan uunin sähkövastuksien kontaktoria. Mittaustuloksien tallentamiseksi asennettiin Raspberry Pille influxDB-tietokanta. InfluxDB on Influxdatan kehittämä tietokanta aikasarjoille (Influxdata, i.a.). InfluxDB:n käyttöliittymässä voidaan esittää tietokannan dataa suoraan kuvaajassa. Tietokantaan tallennettiin asetustilaa ja mitattua lämpötilaa influxdb_client-Python-kirjaston avulla. Koska lämpötilan vaihtelu prosessissa on hidasta, päätettiin säädintä käyttää pelkästään PI-säätimenä ilman derivoivaa osaa. Asettamalla K_d nolnaan derivoiva osa poistuu käytöstä.

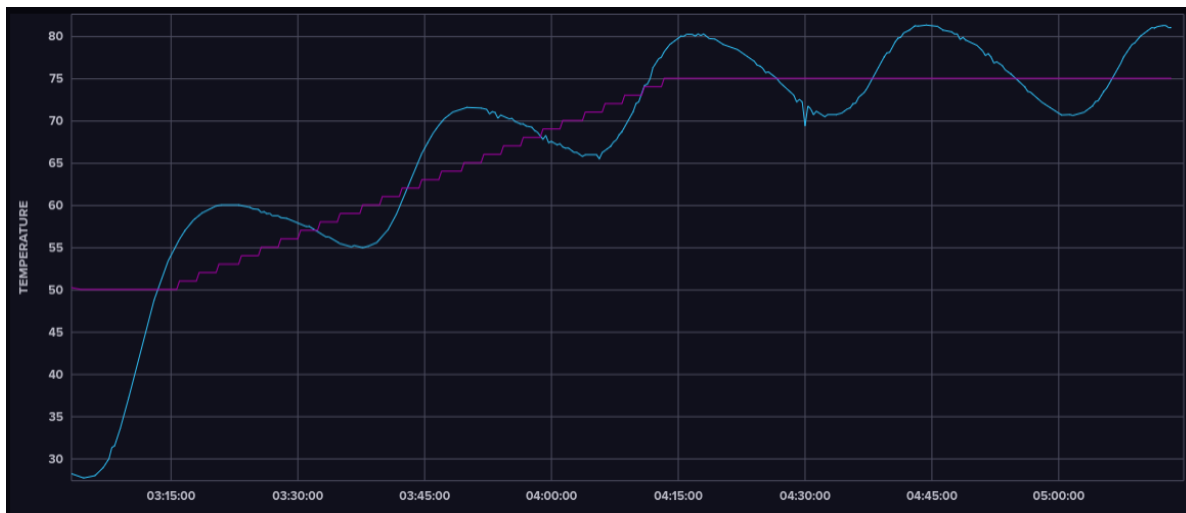
Testausta lähdettiin suorittamaan aluksi asettamalla PID-säätimelle arvot $K_p = 1$, $K_i = 1000$, $K_d = 0$. Säädin toimii tällöin käytännössä pelkkänä P-säätimenä. Mitä suurempi K_i arvo on, sitä vähemmän integraaliosuus vaikuttaa säätimen lähtöarvoon. Pelkällä P-osan vahvistuksella 1 ei päästy asetusravoon, joten vahvistus nostettiin arvoon 1,5. Nyt asetusravoon päästiin ylittämättä liiallisesti sitä. Lämpötilan laskiessa kuitenkin kesti todella pitkään ennen kuin asetusravo saavutettiin uudelleen.

Seuraavaksi päätettiin ottaa mukaan integraaliosuus. P-osan vahvistus K_p pidettiin samana arvossa 1,5 ja K_i -arvoa lähdettiin hakemaan kokeilemalla. Mitä pienempi K_i -arvo oli, sitä nopeammin asetusravo saavutettiin, mutta vastaavasti myös asetusravon ylitys lisääntyi. Arvolla 50 päästiin ± 10 °C lämpötilavaihteluun asetusravon ympärillä (kuva 16).



Kuva 16. Mittaustulos $K_p = 1,5$ $K_i = 50$ $K_d = 0$

K_i -arvoa edelleen kasvattamalla arvoon 60 päästiin pienempään asetusrvon ylitykseen. Aika asetusrvon uudelleen saavuttamiseen lämpötilan laskiessa kasvoi hieman (kuva 17).



Kuva 17. Mittaustulos $K_p = 1,5$ $K_i = 60$ $K_d = 0$

K_i -arvoa edelleen kasvattamalla asetusrvon saavuttamiseen kuluva aika kasvoi huomattavasti, joten K_p -arvoa kokeiltiin pienentää arvoon 1 ja K_i pidettiin arvossa 60. Tällä päästiin ± 5 °C lämpötilavaihteluun asetusrvoon nähden (kuva 18). K_p -arvoa edelleen pienentämällä asetusrvoa ei enää saavutettu, koska integraaliosuus on ohjelmassa integraaliarvon liiallisen kasvamisen estämiseksi rajattu toimimaan kapealla kaistalla asetusrvon alapuolella.



Kuva 18. Mittaustulos $K_p = 1$ $K_i = 60$ $K_d = 0$

3.8 Työn tulokset

Ohjaimella onnistuttiin ohjaamaan sähköuunia halutulla lämmityskäyrällä, siinä on riittävät toiminnot ja käyttäminen on tarpeeksi helppoa. PID-säätö ja PWM-ohjaus osoittautui haastavaksi tavallisen kontaktorin ohjaukseen. Kontaktoria ei pystytty ohjaamaan tarpeeksi lyhyitä aikoja päälle, minkä vuoksi lämmityksen tarkkuus kärsii. Kontaktorin kytkentä myös aiheutti jonkin verran häiriöitä. Häiriö ilmeni ajoittain kosketusnäytön välkkymisenä kontaktorin päästäessä koskettimet irti kytketystä tilasta, jolloin lämmitysvastusten aiheuttama kuormitus irtoaa sähköverkosta. Päivittämällä ohjausreleen ja kontaktorin nollapistekytkeytyvään puolijohdeversioon pystyttäisiin PWM-taajuutta kasvattamaan ja ohjaamaan lähtöä tarvittaessa pienemmällä pulssisuhteella. Silloin lämmityksen tarkkuus paranisi ja häiriöt sähköverkkoon vähenisivät. Kuitenkin tavallisella kontaktorilla saavutettuun $\pm 5\text{ }^{\circ}\text{C}$ tarkkuuteen oltiin tyytyväisiä ja se riittää kyseiseen sovellukseen.

Ohjelmakoodi toimi odotetulla tavalla, mutta vaatii vielä jatkokehitystä ennen käyttöönottoa. Ohjelmasta puuttuu vielä virheenkäsittelytoimintoja esimerkiksi käyttäjän väärästä toiminnasta tai lämpötila-anturin vikaantumisesta johtuviin tilanteisiin. Näissä virhetilanteissa ohjelman on kyettävä kytkemään lämmitys pois päältä. Myös mahdollisten sähkökatkojen varalle voisi ohjelmaa kehittää niin, että se osaisi lähteä jatkamaan mahdollisesti kesken jäänyttä lämmityskäyrän ajoa sähköjen palauduttua.

LÄHTEET

- Bogan, J. (1.8.2018). *What Ceramic Manufacturers Need to Know about Dryout of Refractory Castables for Kilns and Furnaces*.
<https://www.ceramicindustry.com/articles/97227-what-ceramic-manufacturers-need-to-know-about-dryout-of-refractory-castables-for-kilns-and-furnaces/>
- Dietrich, S. (23.11.2022). *Understanding the Basics of Pulse Width Modulation (PWM)*.
<https://control.com/technical-articles/understanding-the-basics-of-pulse-width-modulation-pwm/>
- Eaton. (i.a.). *On/Off control for HVAC control*. Haettu 23.3.2024.
<https://www.eaton.com/us/en-us/products/controls-drives-automation-sensors/industrial-control-center/automation-control/hvac-control/on-off-control.html>
- Hasle Refractories. (i.a.). *Castables*. Haettu 18.3.2024.
<https://hasle-refractories.com/castables/>
- Hautala, M., & Peltonen, H. (2016). *Insinöörin (AMK) FYSIIKKA OSA I* (12. painos). Lahden Teho-Opetus.
- Hyndman. (i.a.). *Resistance alloys*. Haettu 6.5.2024.
<https://resistancewire.com/resistance-alloys>
- Influxdata. (i.a.). Haettu 15.4.2024.
<https://www.influxdata.com/>
- Nanite. (16.8.2014). *Circuit diagram for K-type thermocouple, including all three block temperatures* [kuvio]. Wikimedia Commons.
https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Thermocouple_circuit_Ktype_including_voltmeter_temperature.svg CC0
- National Instruments, (30.3.2023). *The PID Controller & Theory Explained*.
<https://www.ni.com/en/shop/labview/pid-theory-explained.html>
- Omega. (i.a. -a). *Thermocouple probes*. Haettu 20.3.2024.
<https://www.omega.com/en-us/resources/thermocouple-hub>
- Omega. (i.a. -b). *What is a type K Thermocouple?* Haettu 20.3.2024.
<https://www.omega.com/en-us/resources/k-type-thermocouples>
- Omron. (i.a.). *Solid-state Relays*. Haettu 20.3.2024.
<https://www.ia.omron.com/support/guide/18/introduction.html>

- Panasonic. (21.10.2020). *What is the zero-cross function of a solid-state relay (SSR)? What is it used applications?* <https://ac-blog.panasonic.com/relay/what-is-the-zero-cross-function-of-a-solid-state-replay-ssr-what-is-it-used-applications>
- PelicanWire. (i.a.). *Resistance wire*. Haettu 19.3.2024.
<https://pelicanwire.com/our-solutions/resistance-wire/>
- Raspberry Pi, (i.a. -a). *Raspberry Pi 4 Tech Specs*. Haettu 25.3.2024.
<https://www.raspberrypi.com/products/raspberry-pi-4-model-b/specifications/>
- Raspberry Pi, (i.a. -b). *Raspberry Pi Documentation*. Haettu 25.3.2024.
<https://www.raspberrypi.com/documentation/computers/raspberry-pi.html>
- Riverbank Computing. (i.a.). *What is PyQt?* Haettu 15.4.2024
<https://riverbankcomputing.com/software/pyqt/intro>
- Schneider Electric Suomi. (14.12.2017). *Mitä tarkoittaa Tesys -kontaktorien käyttöluokat?*
<https://www.se.com/fi/fi/faqs/FA333698/>
- Siemens apt. (30.11.2020). *What is a contactor?*
<https://siemens-apt.com/blog/faq/what-is-a-contactor>
- SilverStar. (26.10.2006). *Depicts a traditional PID controller* [kuvio]. Wikimedia Commons.
<https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Pid-feedback-nct-int-correct.png> CC BY-SA
- The arduino.cc team. (26.9.2010). *A diagram showing a pulse width modulated signal at 0%, 25%, 50%, 75% and 100% intensity* [kuvio]. Wikimedia Commons.
https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Pwm_5steps.qif CC BY-SA
- Uunimuurarit. (i.a.). Haettu 6.5.2024
<https://uunimuurarit.fi/>
- Upton, E. (24.6.2019). *Raspberry Pi 4 on sale now from \$35*.
<https://www.raspberrypi.com/news/raspberry-pi-4-on-sale-now-from-35/>
- Yleiselektroniikka. (i.a.). *Releet - Opas releiden maailmaan*. Haettu 20.3.2024.
<https://www.yeint.fi/uutiset/releet>