



Painon mittaamiseen tarvittavan konstruktion kehittäminen linjastosimulaattoriin

Daniel Prokki

OPINNÄYTETYÖ
Maaliskuu 2024

Konetekniikka
Koneautomaatio

TIIVISTELMÄ

Tampereen ammattikorkeakoulu
Konetekniikan tutkinto-ohjelma
Koneautomaatio

PROKKI, DANIEL:

Painon mittaamiseen tarvittavan konstruktion kehittäminen linjastosimulaattoriin

Opinnäytetyö 45 sivua, joista liitteitä 0 sivua
Maaliskuu 2024

Toiminnallinen opinnäytetyö käsitteli pakettien painon mittaamiseen kehitettävän konstruktion suunnittelua ja rakentamista TAMKin linjastosimulaattoriin. Opinnäytetyön tavoitteena oli antaa valmiudet projektin viimeistelylle sekä toimia oppimateriaalina opiskelijoille. Ensisijaisesti työssä pyrittiin selkeään ja johdonmukaiseen ratkaisuun, joka vastaisi tasoltaan työelämän tuotekehitysprojekteja. Selostuksen pohjalta lukija pystyy toistamaan työssä esitetyt vaiheet ja rakentamaan vastaavanlaisen mittajärjestelmän.

Opinnäytetyössä valmistettiin neljästä voima-anturista koostuva mittausjärjestelmä, joka tuottaa PLC:lle neljä DAT5025-muuntimella vahvistettua analogista signaalia (0-10V). Järjestelmä perustuu venymäliuska-antureihin ja Wheatstonen siltaan, jotka muuttavat mekaanisen painon sähköiseksi signaaliksi. Mittajärjestelmällä pystytään havaitsemaan 0–12 kg paketteja, noin 10 gramman tarkkuudella.

Opinnäytetyössä perehdytään ensin painon mittaamisen teoriaan ja esitellään erilaisia punnitusmenetelmiä ja -laitteita. Tämän jälkeen kuvataan suunnittelu- menetelmä, jota käytettiin painonmittausratkaisun kehittämiseen. Menetelmä perustuu yleiseen tuotekehityksen ratkaisutyökaluun, joka jakautuu kolmeen vaiheeseen: luonnosteluun, kehittämiseen ja viimeistelyyn.

Opinnäytetyön loppuosassa kuvataan järjestelmän suunnittelu ja toteutus, tulokset ja kalibrointi. Opinnäytetyössä onnistuttiin kehittämään TIA Portal -ohjelma, jossa neljän skaalainoperaattorin summa vastaa antureilla olevaa painomäärää. Opinnäytetyön tavoite sekä tarkoitus saavutettiin työn tilaajan vaatimuksien mukaisesti. Ratkaisua voidaan hyödyntää opetuksessa ja tutkimuksessa sekä teollisissa sovelluksissa. Jatkokehittämissuunnitelmaksi annettiin tapoja, joilla mittajärjestelmä voitaisiin liittää osaksi linjastosimulaattoria ja joilla ohjelman turvallisuutta voitaisiin lisätä.

Asiasanat: voima-anturi, paino, PLC, tuotekehitys

ABSTRACT

Tampereen ammattikorkeakoulu
Tampere University of Applied Sciences
Degree Programme in Mechanical Engineering
Machine Automation

PROKKI, DANIEL:
Weighing System for a Conveyor

Bachelor's thesis 45 pages, appendices 0 pages
March 2024

This functional thesis focused on a conveyor belt project. The thesis described a weight measurement system designed and built using four load cell sensors. The system amplifies sensor signals (0-10V) for a PLC using a DAT5025 converter. Based on the strain gauge sensors and the Wheatstone bridge principle, it can measure packages up to 12 kg with a 10-gram accuracy.

The thesis delved into weight measurement theory, exploring various methods and devices. It also studied a three-phase design methodology on sketching, prototyping and finalisation for the weight measurement solution. Finally, the thesis explored system design, implementation, results, and calibration.

A successful TIA Portal program was developed, translating signals from the four sensors into weight readings. This project achieved its goals according to the client requirements. The solution has applications in teaching, research, and industry. Further development suggestions include integrating the system into the line simulator and enhancing program security.

Key words: loadcell, weight, PLC, development

SISÄLLYS

1	JOHDANTO	6
1.1	Opinnäytetyön tausta	6
1.2	Tavoite ja tarkoitus	7
1.3	Tutkimusongelma ja suunnittelumenetelmä	8
2	PAINON MITTAAMISEN TEORIA	10
2.1	Painon mittaamisen historia	11
2.2	Voima-anturit.....	12
2.2.1	Venymäanturit	13
2.2.2	Puristusanturit.....	14
2.2.3	Palkkianturit.....	15
2.2.4	Single-point-anturit	17
2.3	Venymäliuska.....	18
2.4	Wheatstonen silta ja ulostulosignaali	19
3	SUUNNITTELUMENETELMÄN VAIHEET	22
3.1	Luonnostelu	22
3.2	Kehitysvaihe.....	24
3.3	Viimeistely	24
4	KEHITELTÄVÄN MITTAUSJÄRJESTELMÄN LUONNOSTELU.....	25
4.1	Vaatimuksien määrittely	25
4.2	Osatoimintojen ideointi ja avoimet kysymykset	26
4.3	Vastaukset avoimiin kysymyksiin	26
4.4	Morfologinen analyysi	29
5	TOIMIVAN KONSEPTIN RAKENTAMINEN	30
5.1	Konstruktion rakenne	30
5.2	Valittu voima-anturi AL6B-H-3.0KG-0.4B	31
5.3	Mittajärjestelmän kytkentäkaavio	33
5.4	Mittavahvistin DAT5025	34
5.4.1	DIP-asetukset.....	35
5.4.2	DAT5025 vahvistimen kalibrointi	36
5.5	Mittatulokset kalibroinnin jälkeen.....	37
5.6	TIA Portal -ohjelma painon mittaamiseen	38
6	POHDINTA	40
6.1	Tutkimuksen yhteenveto	40
6.2	Jatkotutkimukset	42
6.3	Kehitysehdotukset linjastosimulaattoriin.....	43
	LÄHTEET.....	44

ERITYISSANASTO tai LYHENTEET JA TERMIT (valitse jompikumpi)

TAMK	Tampereen ammattikorkeakoulu
F_g	kappaleen paino, N
m	kappaleen massa, kg
g	paikallinen putoamiskiihtyvyys, ms ²
HMI	Human machine interface, paneeli
PLC	Programmable logic controller, tietokone
HeVi	Hedelmä- ja vihannesosasto
R	Resistanssi, Ω
I	Virta, A
EMI	Electromagnetic interference
LVDT	Linear variable differential transformers
U	Jännite, V
ρ	johtimen resistiivisyys, Ω
l	johtimen pituus, m
A	Poikkileikkauksen pinta-ala, m ²

1 JOHDANTO

Paino on tärkeä informaatio niin tekniikan kuin muillakin aloilla. Tiedon pohjalta tarkastellaan tuotantoa, kehitetään asioita, rajataan ehtoja, arvostellaan hankintoihin liittyviä päätöksiä ja valintoja. Se tarjoaa tekniikan alalle vaihtoehtoja toteuttaa asioita eri tavoilla. Closs, Vandelinde & Morrissey (2013) arvioivat, että vaihtoehtojen myötä kustannuksia saadaan alemmaksi, tuottavuus virtaviivaistuu ja menekki kasvaa. Jotta välttämätöntä tietoa voidaan hyödyntää nykypäivänä, täytyy sen olla mahdollisimman luotettavaa ja dynaamista. (Closs ym. 2013, 1.) On siis tärkeää ymmärtää, miten painon mittaaminen liittyy osaksi prosessia ja miten haluttu tieto saadaan selvitettyä.

1.1 Opinnäytetyön tausta

Työn taustalla on TAMK:n tarve kehittää laboratoriotilan F2-29 automatisoitua linjastosimulaattoria (kuva 1). Simulaattori on tarkoitettu opiskelijoille oppimisympäristöksi. Sen pääasiallisena tavoitteena on kehittää opiskelijoiden valmiuksia työelämää varten. Linjastoon liittyvä ohjelmointitehtävä toimii yhtenä osatehtävänä ”Koneautomaation laboraatiot” -kurssia. Opiskelijoille on annettu ohjeistus, jossa laitteen pitää mitata paketin dimensiot kaikissa mahdollisissa asennoissa. Mittauksista saatujen dimensioiden perusteella lasketaan paketin tilavuus ja ilmoitetaan se käyttäjälle HMI-paneelissa.



KUVA 1. Automatisoitu linjastosimulaattori. (Kuva: Daniel Prokki)

Lisäominaisuutena linjastoon halutaan lisätä menetelmä, jolla voidaan mitata paketin paino liikkeessä. Tämän pohjalta opetellaan käsittelemään saatuja analogiasignaaleja, ja muuntamaan ne hyödynnettävään muotoon. Mittadataa käytetään esimerkiksi työelämässä ylemmillä automaation tasoilla määrittämään paketin kuljetustapa, esimerkiksi tilataanko kuljetukseen rekka vai pakettiauto.

1.2 Tavoite ja tarkoitus

Tämän opinnäytetyön tavoitteena on toimia aloitteena painon mittaamiseen soveltuvan järjestelmän kehittämisessä, sekä oppimateriaalina opiskelijoille. Ensimmäisessä työssä pyritään selkeään ja johdonmukaiseen ratkaisuun, joka vastaisi tasoltaan työelämän tuotekehitysprojektia. Selostuksen pohjalta lukija pystyy toistamaan työssä esitetyt vaiheet, ja rakentamaan vastaavanlaisen mittajärjestelmän.

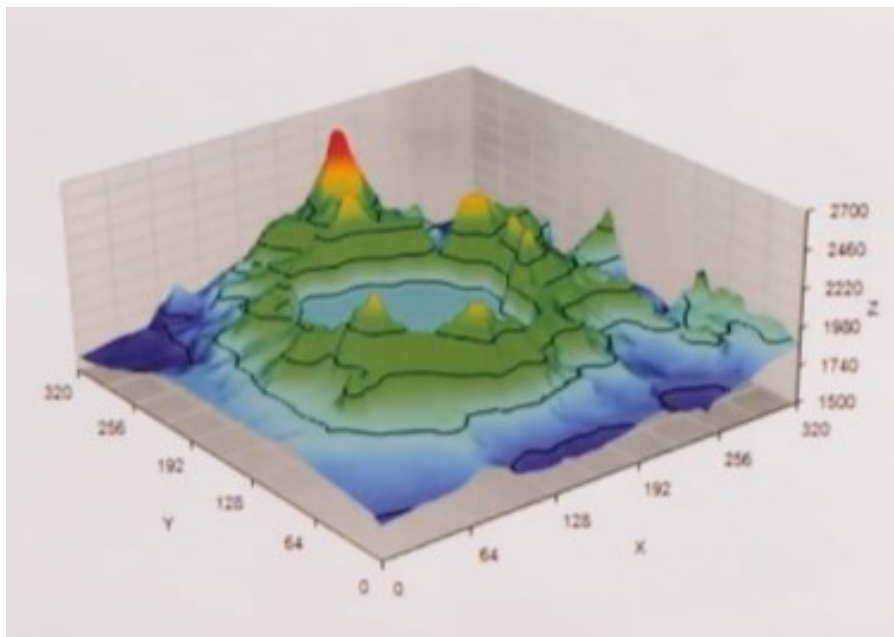
Opinnäytetyön tarkoituksena on rakentaa toimiva mittajärjestelmä, joka voidaan liittää linjastosimulaattoriin asiakkaan valitsemalla tavalla. Fyysinen ratkaisu muodostuu työntilaajan asettamista vaatimuksista. Näihin vaatimuksiin kuuluu:

- Menetelmä, jolla mitataan painoa

- Mittausdata pitää pystyä tulkitsemaan digitaalisesti PLC:llä
- Mittatarkkuus $\pm 0,5$ kg
- Mittaväli 0,5–4 kg
- Piirin komponentit soveltuvat teollisuuteen
- Rakennelman on kestävä (käyttöikä 10-vuotta)
- Systeemi on kalibroituavissa.

1.3 Tutkimusongelma ja suunnittelumenetelmä

Tilannetta opinnäytetyön alussa havainnollistetaan topologisen kartan avulla (kuvio 1). Kartasta etsitään korkeinta vuoren huippua, joka vastaa parasta kokonaisuutta eli ratkaisuvaihtoehtoa. Alkuvaiheessa ei kuitenkaan tiedetä, mikä vuorista on korkein, ja mitä reittiä pitkin huipulle päästään. Alun ongelmatilanteesta selvittää, kun käydään systemaattisesti jokaisen vuoren juurella tarkastamassa tilanne. (Rober 2022.)



KUVIO 1. Topologinen kartta suunnittelumenetelmästä (Rober 2022).

Koska toimivaan ratkaisuun on monia vaihtoehtoja ja reittejä, tämän opinnäytetyön tarkoitus saavutetaan systemaattisen tuotekehitysprosessin avulla. Roberin (2022) mukaan systemaattisella tarkastelulla löydetään paras mahdollinen ratkaisu, joka on perusteltavissa muista vaihtoehdoista. Suunnittelumenetelmän

ideana on irtaantua perinteisistä ratkaisuista, keräämällä aluksi paljon eri lähtökohtia projektille, mistä karsitaan pakkaa ohuemmaksi prosessin edetessä, kunnes jäljellä on sopivin ratkaisu (Jokinen 2001). Suunnittelumenetelmä jakautuu molempien asiantuntijoiden Roberin (2022) ja Jokisen (2001) mukaan kolmeen eri toimintavaiheeseen: luonnostelu, kehittäminen ja viimeistely. Näihin toimintavaiheisiin perehdytään kolmannessa luvussa syvemmin.

2 PAINON MITTAAMISEN TEORIA

Painolla tarkoitetaan milloin massaa, milloin voimaa. Yleiskielessä ja arjessa paino esitetään tavarán tai aineen mittana. Tällöin painon yksikkönä on kilogramma, vaikka paino F_g on standardin SFS 3991 mukaan voima, joka pitää kappaleen pitämiseksi paikallaan koordinaatistossa. Oikea yksikkö painolle on siis newton. Paino riippuu kappaleen sijainnista maapallolla, koska se lasketaan massan m ja paikallisen putoamiskiihtyvyyden g tulona kaavassa 1. (Inkinen & Tuohi 2006, 98–99.)

$$F_g = mg \tag{1}$$

Painon mittaaminen jakaantuu kahteen kokonaisuuteen: staattiseen ja dynaamiseen. Molempia prosesseja pidetään tärkeinä kehityksen kulmakivinä. Ne ovat tuoneet mukanaan laitteita, joilla havaitaan zeptogrammasta (10^{-21}) gigagrammaan (10^9) ja yhdestä proteiinimolekyylistä valtameriristeilijään (Closs ym. 2013, 1–2).

Staattisella punnitsemisella tarkoitetaan tilannetta, jossa materiaalia punnitaan jonkin mekanismin päällä levossa. Staattinen tilanne on kaikista yleisin ja arkisin tapa, jolla painoa mitataan. (Closs ym. 2013, 1–2.) Näihin tilanteisiin törmää ruokakauppojen HeVi-osastolta lääkärin vastaanotolle ja siitä teollisuuden sovelluksiin saakka.

Teollisuuden useimmat sovellukset vaativat kuitenkin kyvyn punnita materiaaleja liikkeessä. Tuotantoprosessi riippuu liikkeestä, sillä pysähtyminen punnintaa varten hidastaa koko tuotantoa ja yrityksen tehokkuutta. Tämän takia materiaaleja pitää punnita dynaamisesti. (Closs ym. 2013, 1–2.)

2.1 Painon mittaamisen historia

Vaihtokaupan seurauksena sivilisaatioon syntyi tarve mitata, laskea ja punnita. Arvellaan, että ensimmäinen tasapainoon perustuva vaaka keksittiin jo Mesopotamian aikaan yli 6000 vuotta sitten (kuva 2). Vaa'an periaate on säilynyt tähänkin päivään asti, ja sitä käytetään yhä joissain sovelluksissa. (D. Martin 2020.) Symbolinakin tunnettu vaaka kuvaa hyvin punnitsemisen merkityksellisyyttä osana sivilisaation kehitystä.



KUVA 2. Vaaka kuvitettuna noin 6000 vuotta sitten (D. Martin 2020).

Vaakojen suosio laski yhdeksännellätoista vuosisadalla, kun tilalle tulivat mekaaniset puntarit, jotka käyttivät vipuja ja jousia vastuksen luomiseen. Paino indikoitiin mitta-asteikolla, mikä nopeutti tuloksen tulkitsemista. Mekaanisen punnitsemisen etuna oli myös tarkempi tulos, koska standardisoitua vastapainoa ei tarvinnut asettaa enää oikealle kohdalle. (Closs ym. 2013, 2–3.)

Mekaanisten vaakojen aikakausi loppui 1940-luvun loppupuolella. Uutena keksintönä tulivat load cell -anturit, jotka muuttavat mekaanisen voiman sähköiseksi signaaliksi (kuva 3). Ne korvasivat lähes kokonaan mekaaniset vaa'at. Niiden etuina olivat laajemmat sovellusmahdollisuudet sekä huomattavasti helpottunut tiedonkeruu. Antureihin on nykyään lisätty myös älyä, jolloin ne pystyvät keskustelemaan muun ympäristön kanssa. (Closs ym. 2013, 2–3.)



KUVA 3. Load cell-tyyppejä (Eilersen n.d.).

2.2 Voima-anturit

Voima-antureissa (engl. *load cell*) on useita eri variaatioita, jotka jakaantuvat vielä omiksi osajoukoiksi. Selkeyden vuoksi tässä osuudessa käsitellään vain kyseiseen aihealueeseen soveltuvia ratkaisuja. Clossin (2013) mukaan antureista on pääasiallisesti seuraavanlaisia variaatioita:

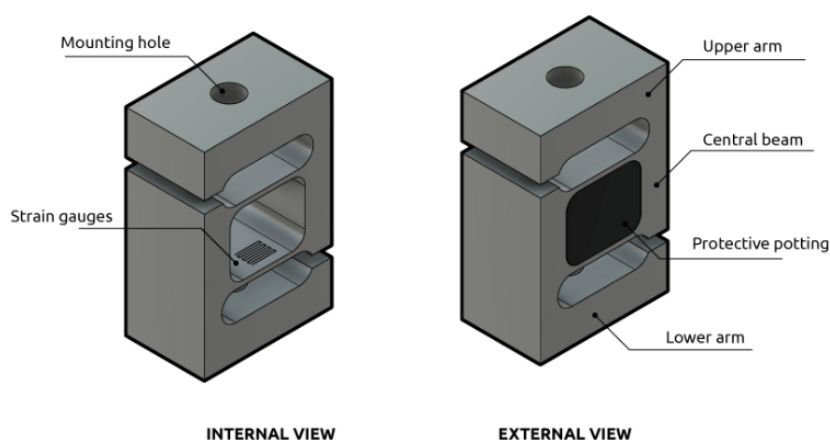
- LVDT (Linear Variable Differential Transformers)
- venymäliuska
- värähtelevä vaijeri
- pneumaattinen
- hydraulinen
- kapasitiivinen.

Teollisuudessa käytetyimpiä variaatioita ovat venymäliuskoihin perustuvat anturit. Voima-anturi koostuu rungon lisäksi venymäliuskoista, jotka on kiinnitetty tiettyyn kohtaan runkoa samalla muodostaen Wheatstonen siltaa muistuttavan resistiivisen piirin. Antureita käytetään puristuksen tai jännityksen mittaamiseen. Antureilta tuleva sähköinen signaali on analoginen tai digitaalinen. (Closs ym. 2013, 65–71.) Sovelluskohteesta riippuen venymäliuska-anturit jaetaan neljään pääkategoriaan: venymä (engl. *tension*), puristus (engl. *compression*), palkki

(engl. *beam*) ja ”single-point”. Uusia voima-anturityyppejä kehitetään jatkuvasti vastaamaan muuttuvan markkinan tarpeita. (Flintec 2024.)

2.2.1 Venymäanturit

Kuvan 4 anturilla mitataan pääasiallisesti venymistä, mutta se soveltuu myös puristuksen mittaamiseen. Muotonsa vuoksi anturista puhutaan ”S-tyyppin” voima-anturina. Rakenteeltaan se koostuu kahdesta varresta ja niiden välisestä keskipalkista. Venymäliuskat ovat varsien välisessä keskipalkissa. (Flintec 2024.)



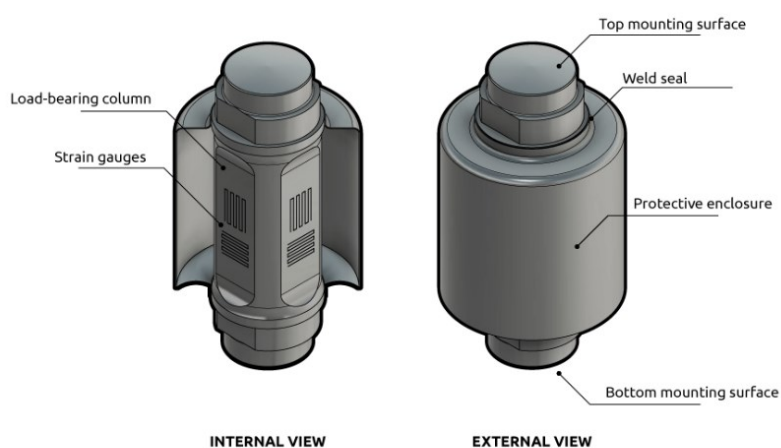
KUVA 4. Venymäanturi (Flintec 2024).

Kun anturiin kohdistuu jännityksiä, ylempi ja alempi varsi taivuttavat keskipalkkia yhtä suurella voimalla, jolloin keskipalkin venymäliuskojen resistiivisyys muuttuu. Olennaista venymää mittaavissa tilanteissa on, että ylemmän ja alemman varren kiinnikepisteet ovat linjassa anturin pystysuuntaisen akselin kanssa. (Flintec 2024.) Anturi vaatii tukipisteitä tai linkkejä punnittavan alustan ja kiinnikekohdan välille, jotta kuorma olisi linjassa pysty akselin kanssa. Kaikenlaiset välikappaleet, kuten tukipisteet ja linkit tuovat prosessiin hystereesiä. (Closs ym. 2013, 74.)

Linjasto tai kuljetushihna sovelluksissa suositellaan anturin venymäkäytäntöä puristuskäytännön sijaan. Tällöin anturin suorituskyky ei laske epäkeskeisen painojakauman takia, toisin kuin puristukseen perustuvissa tilanteissa. (Closs ym. 2013, 74.) Teollisuudessa anturia käytetään keskiluokan sovelluksissa eli noin 100–10 000 kg (Flintec 2024).

2.2.2 Puristusanturit

Kuvan 5 anturi soveltuu parhaiten puristusta mittaaviin tilanteisiin. Malliltaan anturit ovat sylinterimäisiä ja niiden päissä on kiinnitystasot. Sisällä on ydin, jonka pintaan on kiinnitetty venymäliuskat. Ydin toimii paine-elementtinä, jonka muodonmuutokset havaitaan kuormituksen yhteydessä. Toimintaperiaate vaihtelee leikkaus-, taivutus-, ”ring-torsion” tai sarakkeen mittauksien (engl. *column measurements*) välillä. (Flintec 2024.)



KUVA 5. Puristusanturi (Flintec 2024).

Konstruktio on yksi ensimmäisistä, mitä sovellettiin kuljetinhihnojen kanssa. Tyyppillisesti anturi asennetaan punnittavan kappaleen alle, mutta sitä voidaan käyttää myös päinvastaisesti venymän mittaukseen. Käyttökohteet soveltuvat hyvin raskaisiin ja staattisiin tilanteisiin, esimerkiksi siilojen tai kulkuneuvojen punnitsemiseen. (Closs ym. 2013, 72–73.)

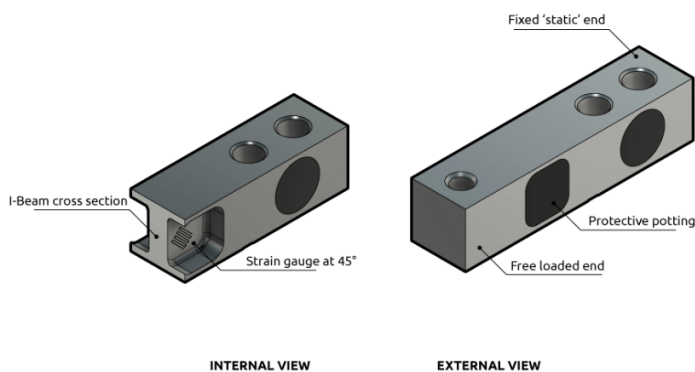
Heikkoutena on, että kukin malli vaatii lähes täydellisen kuorman kohdistuksen anturin kiinnitystasoihin. Kuorma pitää tuoda joustavan laakeroinnin (engl. *bearing point*) kautta, mikä on mahdollista, kun anturi on mekaanisesti vakautettu nivelillä tai ohjaustangoilla. Mekaniikan lisääminen prosessiin hidastaa laitteen reaktioaikaa ja samalla punnitsemista. Kitkan osallisuus heikentää ajan kanssa tuloksien luotettavuutta. (Closs ym. 2013, 72–73).

2.2.3 Palkkianturit

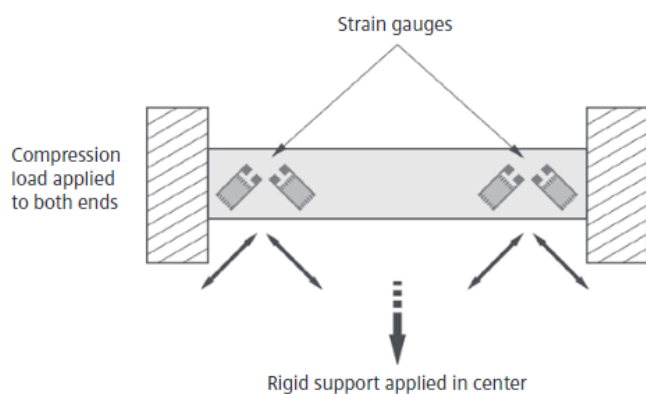
Palkkityyppiset anturit jaetaan kahteen alatyypin: leikkaus- ja taivutusvoima voima-antureihin. Alatyypit jaetaan taas yksi- ja kaksipäisiin antureihin. Kunkin alatyypin kohdalla pätee pitkälti samat ominaisuudet. Kaksi- ja yksipäisten mallien välillä on paremmuseroja, jotka riippuvat täysin käyttökohteesta. (Flintec 2024.)

Kuvien 6 ja 7 leikkausanturit on suunniteltu keski- ja raskaanluokan sovelluksiin. Yksipäisen anturin leikkauskuvasta nähdään, että venymäliuskat ovat palkkiin muotoillussa syvennyksessä 45 asteen kulmassa. Tämän asettelun ansiosta suurimmat leikkausjännitykset keskittyvät venymäliuskoille. Rakenteeltaan anturit ovat vähemmän alttiita sivuttaissuuntaisille kuormille. (Closs ym. 2013, 73–75.)

Tämän alatyypin anturit voidaan kiinnittää suoraan staattisiin tai dynaamisiin rakenteisiin, ilman stabilointia tuovia komponentteja. Koska kuormitus kohdistuu suoraan solulle, venymäliuskat reagoivat nopeammin muuttuviin tilanteisiin parantaen prosessin tarkkuutta. Kuitenkin erittäin raskaissa sovelluksissa ulkoisilla varmistuksilla saavutetaan luotettavampi kestävyys. (Closs ym. 2013, 73–75.)

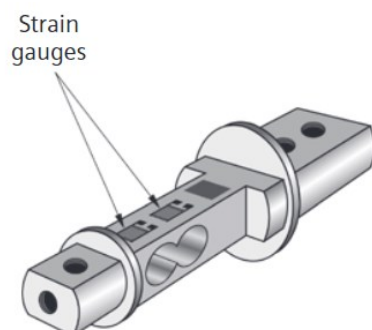


KUVA 6. Yksipäinen leikkausvoima-anturi (Flintec 2024).

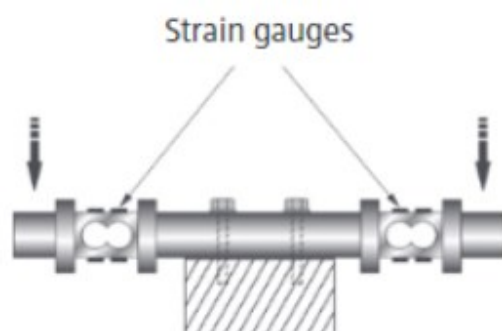


KUVA 7. Kaksipäinen leikkausvoima-anturi (Closs ym. 2013, 75).

Kuvien 8 ja 9 taipuma-anturit on suunniteltu pienen- ja keskiluokan sovelluksiin. Teollisuudessa taipuma-antureita käytetään enemmän keskiluokan kohteissa. Venymäliuskat ovat sillassa palkin ylemmän ja alemman tason kohdissa, joihin kertyy maksimaaliset jännitykset. Kuperan pinnan venymäliuskat venyvät, kun koveran pinnan supistuvat. Anturityypillä on hyvä lineaarisuus voiman ja ulostulosignaalin kanssa. Käyttökohde on joko venymä tai kompressi. (Closs ym. 2013, 73–75.)

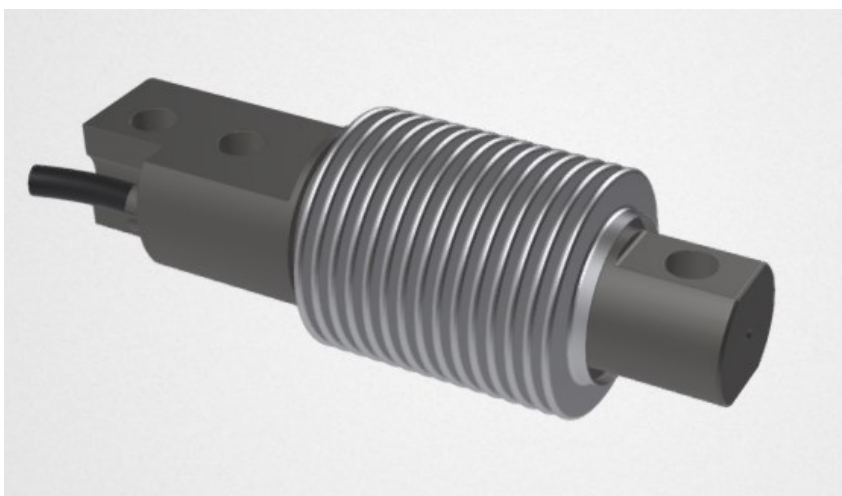


KUVA 8. Yksipäinen taipuma-anturi (Closs ym. 2013, 73).



KUVA 9. Kaksipäinen taipuma-anturi (Closs ym. 2013, 74).

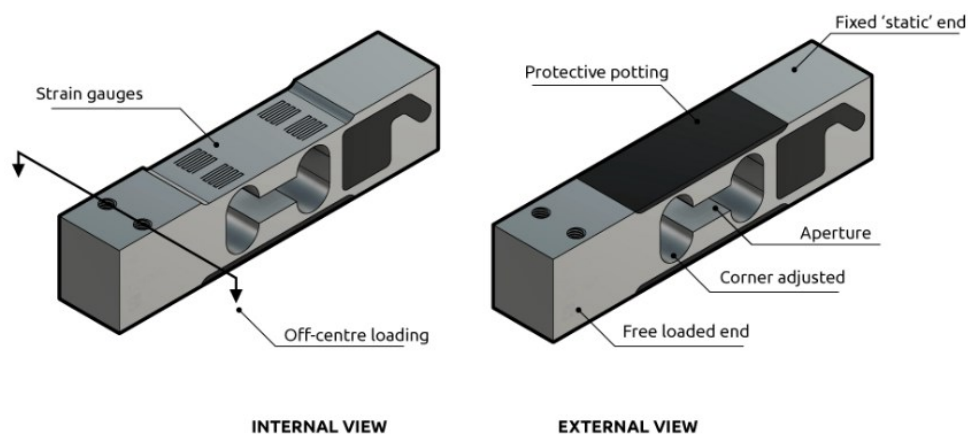
Ongelmakohtana on, että painon on tultava oikein anturille, jotta saavutetaan yhtenäisiä tuloksia. Ratkaisu vaatii tukipisteitä, vipuja tai ohjaussauvoja, minkä seurauksesta asetelmaan liittyy hystereesiä. (Closs ym. 2013, 73–75.) Tällä tarkoitetaan sitä, että järjestelmässä on ominaisuus, joka hidastaa sen reagointia muutoksiin. Ongelmasta johtuen teollisuudessa ovat yleistyneet jousimaiset versiot, jotka pystyvät huomioimaan monisuuntaisia taipumia (Flintec 2024). Kuvassa 10 on jouta muistuttava taipuma-anturi.



KUVA 10. Nykyään yleisempi versio taipuma-anturista (Flintec 2024).

2.2.4 Single-point-anturit

Kuvan 11 anturi suunniteltiin alun perin pieniä vaakoja varten, esimerkiksi ruoka-kaupan vaakoihin. Pienen kapasiteetin ansiosta, anturityyppiä tavataan teollisuudessa etenkin 0.25–10 kg sovelluksissa. Geometrialtaan anturi muistuttaa palkkityyppisiä ratkaisuja. Erottava tekijä on leikkaus, jonka muodot vaihtelevat koon ja käyttötarpeen mukaan. Leikkauksella ja venymäliuskojen asettelulla tehdään anturille ominainen kyky toimia epätasapainoisen kuorman kanssa. Anturin muilla rakenteellisilla valinnoilla, ehkäistään horisontaalisia voimia vaikuttamasta mitausprosessiin. (Flintec 2024.)

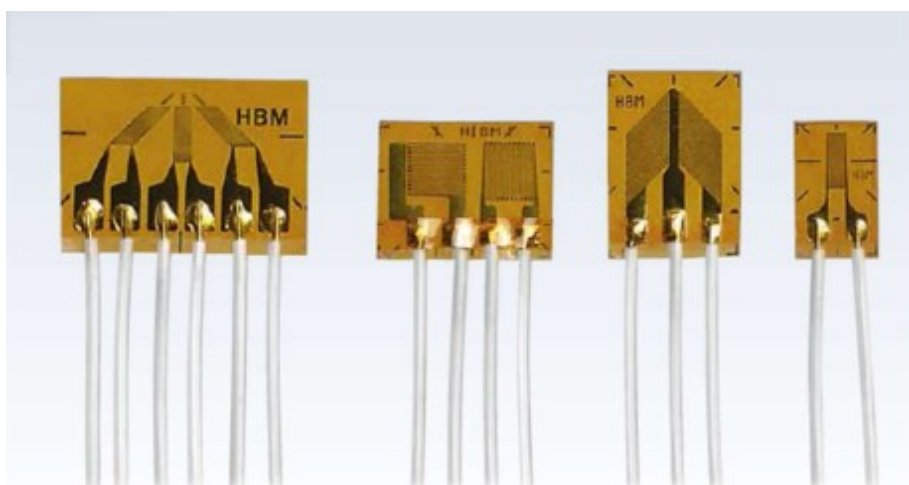


KUVA 11. Single-point-anturi (Flintec 2024).

Anturi kykenee punnitsemaan niin staattisissa kuin dynaamisissa tilanteissa, joissa paino ei ole linjassa anturin kanssa. Muilla anturityypeillä painon pitää olla lähes aina aksiaalisesti linjassa, jotta mittaus on tarpeeksi luotettava. Anturi voidaan kiinnittää suoraan alustaan, joka tuo aiemmin todettuja hyötyjä kuten nopeutta ja tarkkuutta. (Closs ym. 2013, 76–77.)

2.3 Venymäliuska

Venymäliuska on resistiivinen anturi, jolla mitataan muodonmuutoksia esimerkiksi edellä mainituista voima-antureista. Kuvan 12 venymäliuskat voivat perustua puolijohteisiin ja metallikalvoihin. Liuskoilla on yhteinen toimintaperiaate, jossa mitattavan kohteen kokema kuorma aiheuttaa muutoksen liuskan resistanssissa. (Hoffmann 1989, 1–7.)



KUVA 12. Erilaisia venymäliuskoja (HBM n.d.).

Hoffmannin (1989) kirjasta ilmenee, että venymäliuskojen välillä olevan useita muuttujia. Eri yhdistelmien johdosta venymäliuskoja voidaan liittää lähes kaikenlaisiin käyttökohteisiin, jotka määrittävät esimerkiksi seuraavia muuttujia:

- koko
- johdinkuvio
- kytkentä
- rakenne.

Johtimen resistanssi R riippuu johtimien pituudesta l , johdinmateriaalin resistiivisyydestä p sekä poikkileikkauksen alasta A seuraavan yhtälön

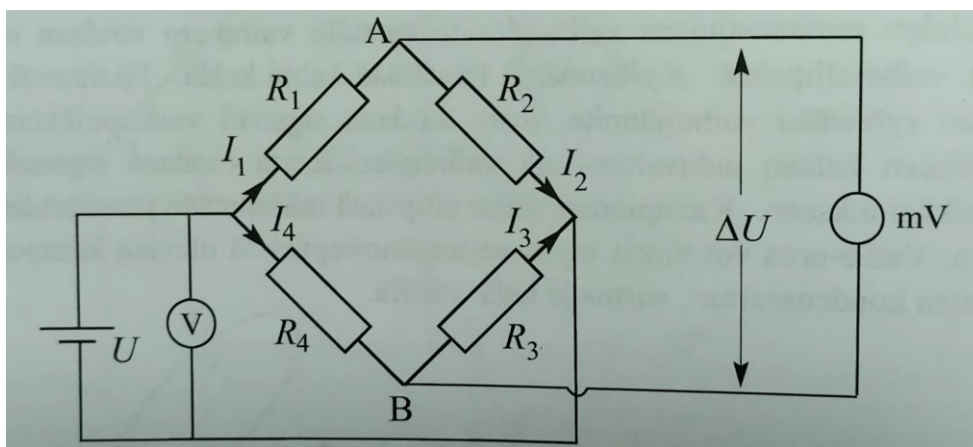
$$R = p \cdot \frac{l}{A} \quad (2)$$

mukaan. Liuskan suuntainen supistuminen tai venyminen vaikuttaa johdinalkioiden geometriaan, jolloin koko liuskan resistanssi muuttuu. Puolijohdeliuskoilla resistiivisyyden suhteellinen muutos on selkeästi parempi kuin metallikalvoliuskoilla. Metallikalvoliuskojen etuna on taas lineaarisuus ja alhainen riippuvuus lämpötilaan. (Arminen ym. 2010, 26–27.) Mittausten luotettavuus on riippuvainen anturin ja mitattavan kohteen välisestä liitoksesta. Liitoksen pitää olla tiukka ja kykenevä välittämään jännitykset muuttumattomina anturille. Vaatimukset saavutetaan parhaiten sidosaineella. (Hoffmann 1989, 12.) Venymäliuska reagoi venymään kuorman tyypistä riippumatta. Yleisesti kuormat ovat voimaa, vääntömomenttia, painetta tai jännitystä. (Arminen ym. 2010, 26–27.)

2.4 Wheatstonen silta ja ulostulosignaali

Arminen ym. (2010) kirjassa on esitetty kuviossa 2 Wheatstonen silta, joka muodostuu sähkölähteen ja neljän vastuksen piiristä. Kun pisteillä A ja B on sama potentiaali, silta on tasapainossa. Tällöin sillan resistanssin R ja virran I välisille tuloille pätee, että $R_1 I_1 = R_4 I_4$ ja $R_2 I_2 = R_3 I_3$. Jakamalla yhtälöt puolittain ja huomioiden, että $I_1 = I_2$ ja $I_4 = I_3$, tulee

$$\frac{R_1}{R_2} = \frac{R_4}{R_3} \quad (3)$$



KUVIO 2. Wheatstonen silta (Arminen ym. 2010, 100).

Wheatstonen siltaa käytetään nykyään vastusten resistanssien muutosten havaitsemiseen, vaikka mittauksessa tarkasteltava suure on jokin muu kuin resistanssi. Jos mitattavassa suureessa tapahtuu jokin muutos, muuttuu yhden tai useamman vastuksen resistanssi, jolloin silta putoaa tasapainoisesta tilasta. Pisteiden A ja B välinen potentiaaliero ΔU kertoo tiedon muutoksen aiheuttaneen suureen arvosta. Resistanssin muutoksen ΔR ollessa verrannollinen halutun suureen arvoon ja jos $\Delta R \ll R$, on ΔU myös verrannollinen kohdesuureen muutokseen. (Arminen ym. 2010, 100–102.)

Tarkkuuden ja herkkyyden kannalta on tärkeitä, että sillassa olevat resistanssit ovat yhtä suuret tasapainotilanteessa. Edullista on myös, jos haluttu suure muuttaa kahden vastuksen resistanssia saman verran mutta vastakkaisiin suuntiin. Näiden vastuksien tulee tällöin olla sillassa viereisiin haaroihin esimerkiksi R_1 ja R_2 . (Arminen ym. 2010, 100–102.)

Voima-anturit soveltavat siltaa venymien tai puristuksen mittaamiseen. Venymäliuskat ovat kytketty osaksi Wheatstonen siltaa kuormituskohdissa, jolloin pakettin aiheuttama taipuma muuttaa vastuksien resistanssia ja sillan tasapainotilaa. (Salo 2023.) Sillasta saatavat jännitearvot ovat vain muutamia millivolteja (Luotsinen 1983, 39–40). Herkkä analoginen signaali on altis häiriölähteille ja vaikeasti tulkittava sellaisenaan. Mahdollisia virhelähteitä ovat lämpötila, anturin käyttöjännite, sähkömagneettiset häiriöt, luontainen kohina sekä lähtöjännitteen ryömintä ajan suhteen. Nämä häiriöt vaikuttavat painokuorman väärään tulkintaan. (Vilénius 2019, 2–17.)

Yksinkertaisimmassa tapauksessa piiri koostuu neljän resistorin sillasta (Closs ym. 2013, 70). Jotta punnituksesta saavutetaan kuitenkin jonkinlainen tulos, on analogiasignaali käsiteltävä instrumentointivahvistimen läpi. Vahvistin muuntaa millivoltit helpompaan muotoon PLC:lle esimerkiksi 4–20 mA tai 0–10 V analogiseksi signaaliksi. Teollisuudessa käytetään venymäliuskojen signaalin vahvistamiseen esimerkiksi kuvan 13 tyyppisiä vahvistinkortteja. (Salo 2023.)



KUVA 13. DAT5025 venymäliuska vahvistin (DATEXEL n.d.).

Piiriä voidaan kuitenkin asettaa eri tavoin, jolloin vaikutetaan esimerkiksi lämpötilaan ja ulkoiseen kohinaan. Monimutkaisemmassa piirissä on vahvistimen lisäksi AD-muunnin, jolla saavutetaan korkeampi resoluutio ja suoja EMI:ltä, tai signaalin suodatin virhelähteitä varten. (Vilenius 2019, 2–17.)

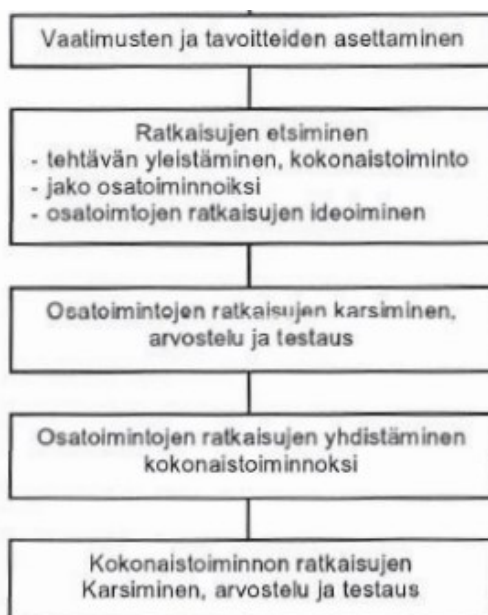
3 SUUNNITTELUMENETELMÄN VAIHEET

Tässä osiossa jatketaan johdannossa esitetyn suunnittelumenetelmän teorian avaamista. Myöhemmissä kappaleissa sovelletaan tämän luvun teoriaosuutta mittajärjestelmän ratkaisun kehittämiseksi. Jokaisessa alaluvussa perehdytään eri toimintavaiheisiin ja avataan niiden sisältöä tarkemmin. Todettakoon, että viimeistelyvaihe jää tässä opinnäytetyössä työn tilaajan, TAMKin, hoidettavaksi, mutta sen sisältö esitetään tuotekehitysprosessin kuvaamiseksi.

3.1 Luonnostelu

Luonnostelu alkaa vaatimusten määrittelyllä (kuvio 3). Vaatimusten perusteella painotetaan tärkeitä ominaisuuksia projektissa ja luodaan perustuksia ongelmien ympärille. Vaatimukset formuloidaan Jokisen (2001) käyttämän fiksun mallin mukaan (engl. *SMART model*):

- Smart = (fiksu)
- Measurable = (mitattavissa)
- Agreed-to = (sovittu)
- Realistic = (realistinen)
- Time-constrained = (aikasidonnainen).



KUVIO 3. Luonnosteluvaiheen kulku (Jokinen 2001, 22).

Tällä tavalla pyritään välttämään suurpiirteisiä vaatimuksia. (Jokinen 2001, 73–75.) Puutteellisille vaatimuksille suoritetaan tieteellisiä testejä tai tiedonkeruuta. Ilman vaatimuksia tai rajoitteita syntyy helposti ylianalysoinnin loukko (engl. *analysis paralysis*) (Rober 2022.) Tällä tarkoitetaan sitä, että suunnittelijalla on liikaa vaihtoehtoja, minkä seurauksena projekti ei käynnisty. Mitä tarkemmin vaatimukset määritellään, sitä helpommin ne ovat saavutettavissa.

Projektin alkuvaiheessa vaatimukset listataan muistiin ja jaetaan oleellisiin ja epäoleellisiin. Jako on tärkeä osa, koska sen perusteella punnitaan vaatimuksista saatuja hyötyjä työmäärään nähden. Tätä ajatusta kuljetetaan koko prosessin läpi. Oleellisten vaatimusten tulee täytyä, jotta voidaan todeta projektin olevan valmis. Epäoleellisiin vaatimuksiin tulee taas pyrkiä, mutta niitä ei vaadita viimeisessä mallissa. (Rober 2022.) Tämän jälkeen ideoidaan luovilla menetelmillä osatoimintoja. Osatoiminnot ovat mahdollisia ratkaisuja, joilla vaatimukset toteutuvat. Kaikille oleellisille vaatimuksille ideoidaan osatoimintoja, kunnes jokaiselle on yksi tai useampi ratkaisu. (Jokinen 2001, 21–24.)

Yhdessä osatoiminnot ja vaatimukset muodostavat avoimia kysymyksiä. Kysymysten pohjalta pyritään hahmottamaan, millaisia ongelmakohtia sovelluskohteeseen liittyy, Jokinen (2001) toteaa. Kysymyksille suoritetaan lyhyitä tieteellisiä testejä tai tiedonkeruuta (Rober 2022). Tarkoituksena on saada mahdollisimman paljon tietoa osatoiminnoista, sillä niiden jatkoa arvioidaan morfologisessa analyysissä (Jokinen 2001, 67–81).

Kun kaikkiin avoimiin kysymyksiin löydetään vastaukset, karsitaan turhat osatoiminnot pois. Jäljelle jäävistä yhdistetään parhaat osatoimintoratkaisut kokonaistoiminnoiksi. (Jokinen 2001, 73–76.) Tarvittaessa osa- tai kokonaistoiminnoille tehdään konseptitodistus (engl. *proof of concept*), jolla varmennutaan sekä teknisten että taloudellisten ominaisuuksien riittävydestä (Rober 2022).

3.2 Kehitysvaihe

Kehitysvaihe on tärkein osa suunnittelumenetelmää. Tähän valitaan yksi tai useampi kokonaistoiminto, joista kehitetään konkreettisia luonnoksia. Prosessin nopeuttamiseksi kokonaistoiminnoista laaditaan alustavia piirroksia ja simulointeja. Ratkaisuluonnokset ovat nopeita toimivia ratkaisuja, joita testataan ja parannetaan. Epäonnistumalla usein ja nopeasti säästetään resursseja, koska kaikkia ongelmia ei tarvitse ennakoida etukäteen. Heikkojen kohtien ilmetessä tehdään uusi ideointikierrös ja palataan tarvittaessa luonnosteluun vaiheeseen. (Rober 2022.)

Syntyneitä konsepteja käsitellään taas vaatimuslistassa, josta sopivimmat ratkaisut valitaan jatkoon. Konseptien ominaisuuksia verrataan oleellisiin vaatimuksiin, joiden tulee tässä vaiheessa suurilta osin täytyä. Arvostelu tehdään huolellisesti, sillä tästä vaiheesta valitaan usein vain yksi konsepti viimeistelyvaiheeseen, Rober (2022) ja Jokinen (2001) painottavat. Valmiin prototyypin yhteydessä määritellään, mitä kohtia kehitetään viimeistelyssä (Jokinen 2001, 90–92.)

3.3 Viimeistely

Tässä vaiheessa rakennetaan viimeistely versio prototyypistä, joka liitetään käyttökohteeseen. Projektista riippuen prototyyppiä voidaan optimoida viimeistelyyn versioon saakka tai aloitetaan viimeisen version rakentaminen alusta. Yleisesti ottaen tämä vaihe tarkoittaa parempien materiaalien, komponenttien ja valmistusmenetelmien käyttöä sekä ulkonäöllisiin piirteisiin puuttumista. Tärkeintä on vertailla vaatimuksien täyttymistä, sillä oleellisten vaatimuksien tulee täytyä kokonaan, jotta voidaan varmuudella todeta tuotteen valmius. (Rober 2022.)

Viimeistelylle tuotteelle tehdään vielä testejä, joilla määritellään individualistisia ominaisuuksia. Työelämässä tuotteesta tehdään esimerkiksi huolto-ohjeet, osaluettelo, ohjekirja ja työ- ja kokoonpanopiirustukset. Toiminnallisuudet ja ominaisuudet raportoidaan tulevaa käyttöä varten. Lopputuotteena on kehitetty konstruktioehdotus. (Jokinen 2001, 96–99.)

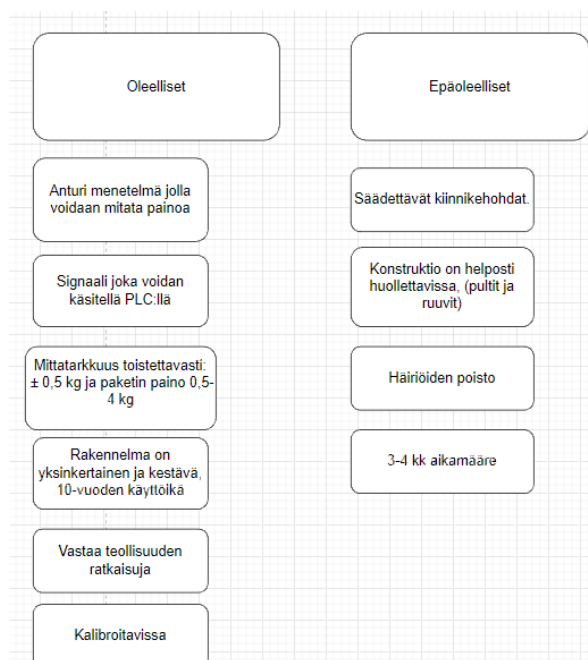
4 KEHITELTÄVÄN MITTAUSJÄRJESTELMÄN LUONNOSTELU

Tässä luvussa käydään läpi luonnosteluvaihe aiemmin kuvatun suunnittelumenetelmän mukaan. Asiasisältö esitellään sellaisenaan, eikä valintaperusteisiin syvennytä tarkemmin, sillä ne on esitetty kolmannessa luvussa. Luonnostelun tulokset esitetään samassa järjestyksessä ja niitä kommentoidaan selventävästi. Tarkoituksena on pohjustaa prototyypivaihetta ja näyttää miten siihen päästiin.

4.1 Vaatimusten määrittely

Vaatimukset jaettiin kuviossa 4 oleellisiin ja epäoleellisiin. Ne kulkevat tärkeysjärjestyksessä ylhäältä alas. Suurin osa vaatimuksista ovat asiakkaan määrittelemiä, mutta listassa on myös omia vaatimuksia. Omilla vaatimuksilla tuodaan lisäarvoa projektiin ja helpotetaan suunnittelijan ajatustyötä (Rober 2022).

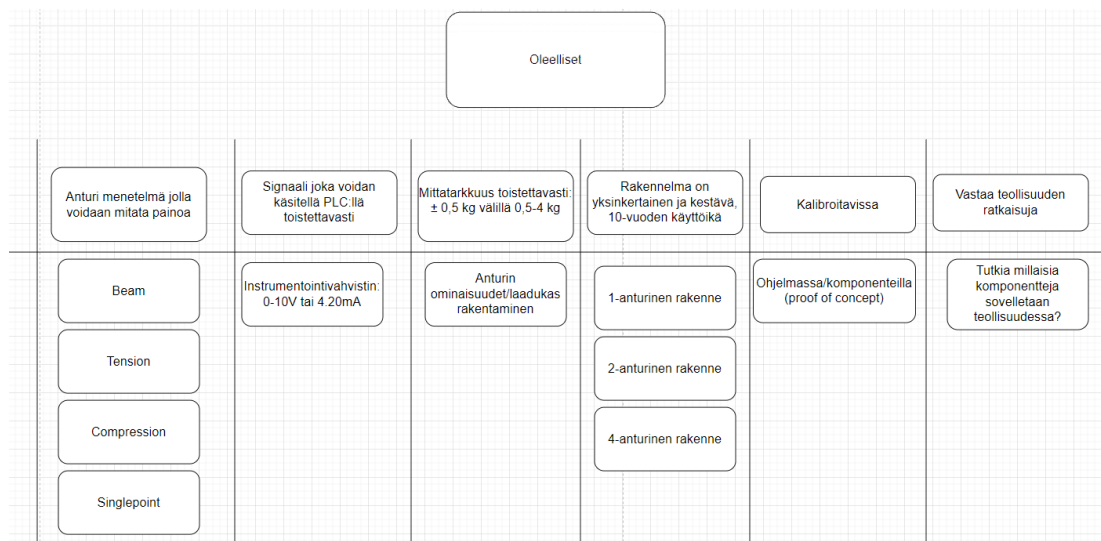
Vaatimusten paikat eivät ole välttämättä lopullisia. Epäoleellisia vaatimuksia voidaan siirtää oleellisten puolelle, ja päinvastoin. Varsinkin oleellisten vaatimusten paikkaa tulee pohtia, sillä ne saattavat pahimmassa tapauksessa pysäyttää koko projektin etenemisen. (Rober 2022.)



KUVIO 4. Oleelliset ja epäoleelliset vaatimukset.

4.2 Osatoimintojen ideointi ja avoimet kysymykset

Kuviossa 5 ideoitiin mahdollisia ratkaisuja oleellisille vaatimuksille. Vaatimukset esitetään omalla ylärivilläään tärkeysjärjestyksessä, vasemmalta oikealle, kun sarakkeissa ovat osatoiminnot. Epäoleellisia vaatimuksia ei oteta tässä kohtaa huomioon. Rober (2022) painottaa, että myöhemmissä vaiheissa voidaan huomata jonkin epäoleellisen vaatimuksen olevan helposti toteutettavissa, jolloin se kannattaa ottaa osaksi ideointivaihetta.



KUVIO 5. Osatoiminnot oleellisiin vaatimuksiin.

Avoimia kysymyksiä muodostui tarkennusta vaativiin kohtiin. Kysymykset on esitetty alla samassa tärkeysjärjestyksessä kuin edellisessä kuviossa:

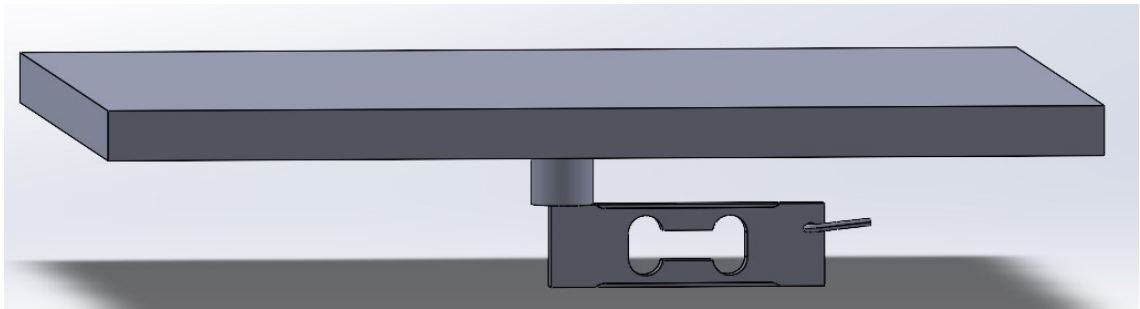
- Millaisiin kohteisiin eri voima-anturityypit soveltuvat? (1)
- Miten signaalia pitää käsitellä ennen PLC:tä? (2)
- Mikä antureista pystyy vaadittuun mittatarkkuuteen? (3)
- Mikä on soveltuvin rakennelma? (4)
- Riittääkö osaaminen ohjelmassa/komponenteilla tehtävään kalibrointiin? (5)
- Millaisia komponentteja teollisuudessa käytetään? (6)

4.3 Vastaukset avoimiin kysymyksiin

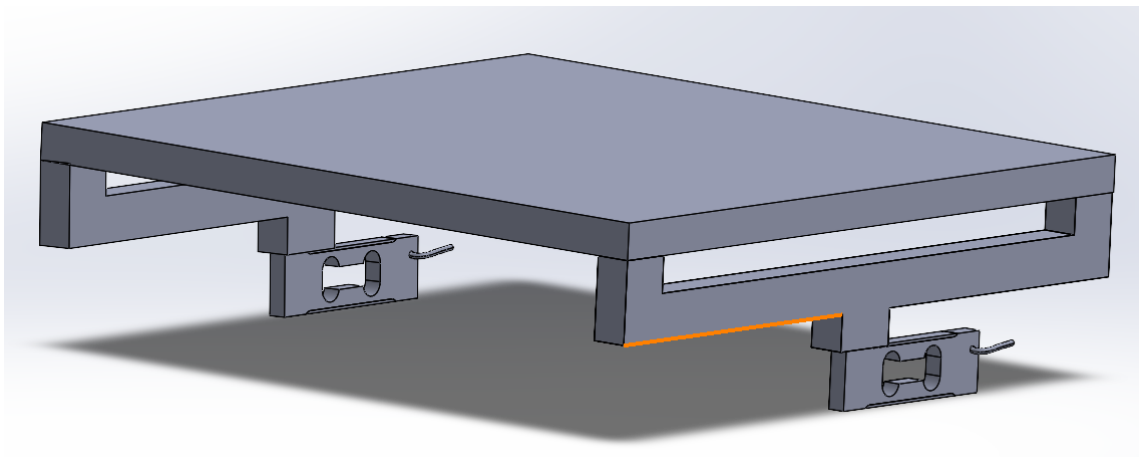
Todettakoon, että teoriaosuudessa vastattiin kysymyksiin (1), (2), (3) ja (6). Kysymykseen (5) vastataan poikkeuksellisesti kehitysvaiheessa, koska tällöin koko

piiri ja konstruktio on toiminnassa. Rober (2022) toteaa, että konseptitodistus olisi hyvä tehdä ennen kehitysvaihetta, ettei resursseja kulutettaisi turhaan. Kysymykseen (4) vastataan seuraavissa kappaleissa, joissa esitellään eri rakennelmat ja niiden ominaisuudet.

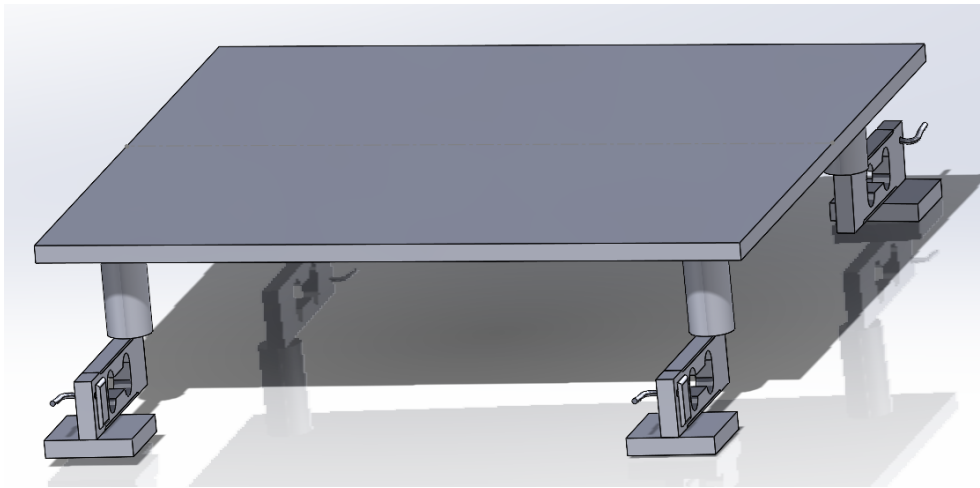
Kuvissa 14, 15 ja 16 on havainnollistettu eri rakennelmia. Tarkempi rakennelma riippuu siitä, mitä anturityyppiä käytetään. Esimerkiksi venymäantureilla kiinnikekohdat tulisivat mitta-alueen yläpuolelle. Yhden ja kahden anturin rakennelmilla on miltei samat ominaisuudet anturityypistä riippumatta. Niihin pätee esimerkiksi se, että ne ovat epävakaampia neljän anturin systeemin verrattuna, koska kiinnikekohdat sijoittuvat samalle akselille levyn keskipisteen kanssa. Toisena yhdistävänä tekijänä on sauva- ja tukirakenteiden tarve. Neljän anturin asetelmassa sauva- ja tukirakenteita ei tarvitse huomioida, koska mitta-alue tuetaan antureilla tasaisesti kulmista. Seuraavassa kappaleessa tarkastellaan kaksianturisen rakennelman ominaisuuksia tieteellisen testin avulla.



KUVA 14. 1-anturin ratkaisu. (Näyttökuva: Daniel Prokki)



KUVA 15. 2-anturin ratkaisu. (Näyttökuva: Daniel Prokki)



KUVA 16. 4-anturin ratkaisu. (Näyttökuva: Daniel Prokki)

Soveltuvinta rakennetta tutkittiin puupalikoilla (kuva 17). Testistä rakennettiin kuvaa 15 vastaava systeemi. Rasituksia simuloitiin esittelemällä noin 4 kg kuorma levyllä. Kuormaa liikutettiin päädyistä toiseen, simuloiden linjaston toimintaa. Testistä havaittiin, että paketti aiheutti mitta-alueelle tullessaan ja lähtiessään piste-momentin anturin kiinnityskohtaan, minkä seurauksena rakennelma irtosi liitok-sistaan. Pitkällä aikavälillä kahden tai yhden anturin rakennelmat olisivat alttiim-pia kiinnikekohtien peittämiselle (Notko 2023). Testissä havaittiin myös, että tuki-sauvojen lisääminen monimutkaistaa konstruktioita huomattavasti, koska niiden valmistaminen on aikaa ja tarkkuutta vaativaa.

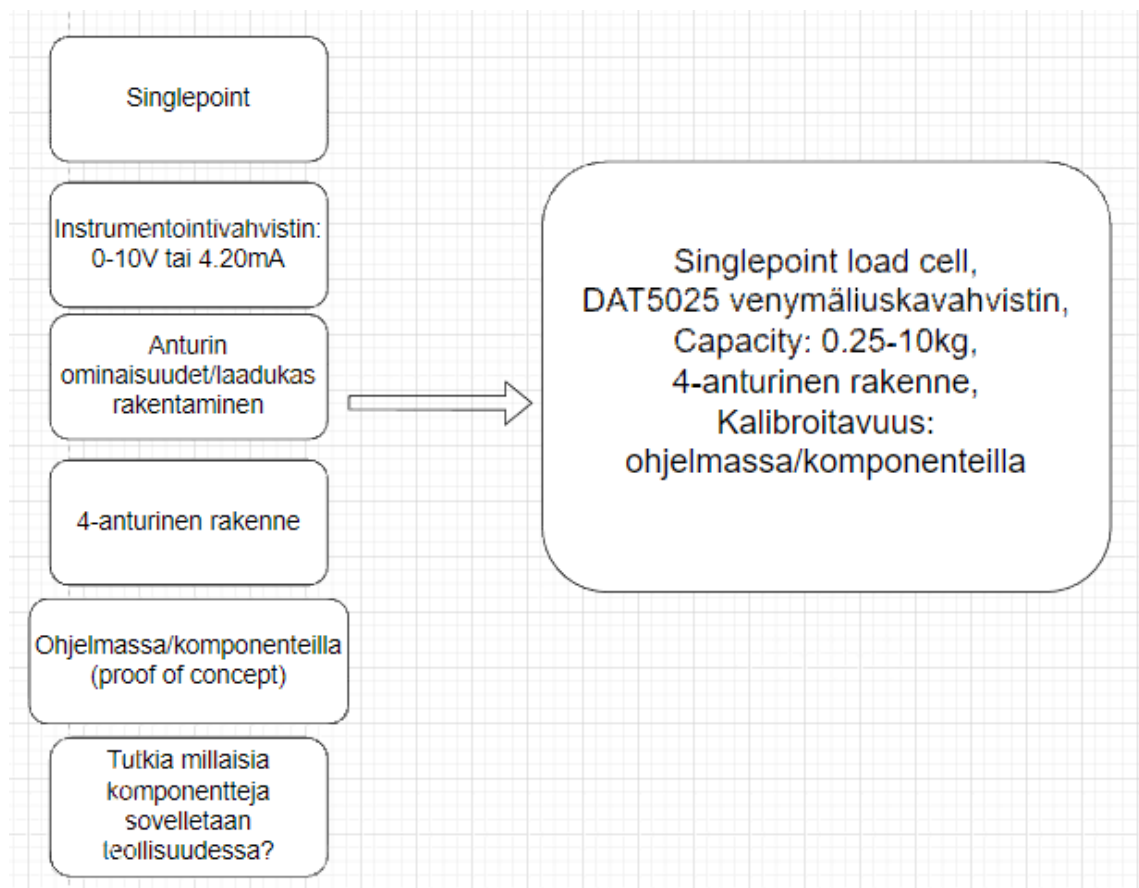


KUVA 17. Kahden anturin rakennelma. Anturit tulevat pienien keskipalkkien alle. Kuvasta havainnollistuu, kuinka järjestelmä pyrkii taipumaan ääripäättilanteissa. (Kuva: Daniel Prokki)

4.4 Morfologinen analyysi

Yhteensopivista osatoiminnoista koottiin yksi kokonaistoiminto (kuvio 6). Osatoimintojen arvioinnissa painotettiin yksinkertaisuutta, ajankäyttöä, toteutettavuutta ja saadun hyödyn suhdetta työmäärään (Rober 2022). Päätökset tehtiin aikaisemmin kerätyn tiedon pohjalta. Tulokseksi saatiin kokonaistoiminto, joka on kuvion oikeassa reunassa.

Kokonaistoiminto koostuu neljästä single-point-anturista, jotka kytketään neljän DAT5025 venymäliuskavahvistimen kautta PLC:lle. Mittauksesta saadaan neljä analogiasignaalia, joiden summa vastaa paketin kokonaispainoa. Antureiden teettämät arvot kalibroidaan vahvistimilla. Lopputuloksena pitäisi olla oleelliset vaatimukset täyttävä kokonaistoiminto. Seuraavaksi kehitetään toimiva konsepti kokonaistoiminnosta.



KUVIO 6. Morfologisen analyysin tulos.

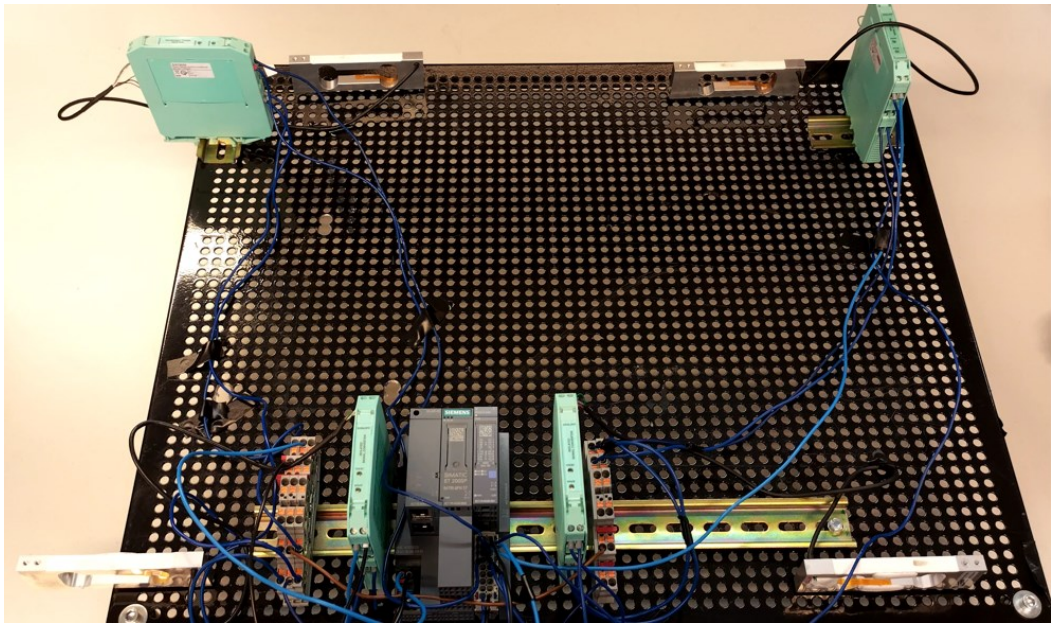
5 TOIMIVAN KONSEPTIN RAKENTAMINEN

Tässä luvussa rakennetaan toimiva konsepti, jonka työntilaaaja voi liittää osaksi linjastosimulaattoria. Luku etenee loogisesti järjestelmän kasaamisjärjestyksessä. Kappaleen perusteella lukija pystyy rakentamaan vastaavan painon mittaamiseen tarkoitetun järjestelmän.

Alussa esitetään koko konstruktion rakenne (engl. *layout*). Rakenteesta edetään valittuun voima-anturiin sekä sen asennukseen liittyviin huomioihin. Mekaanisen asettelun jälkeen esitetään järjestelmän kytkentäkaavio, jonka jälkeen perehdytään antureilta tulevan signaalin käsittelyyn. Signaalia muokataan mittavahvistimella, johon valmistaja on antanut tarkat ohjeet. Lopussa esitetään kalibroinnin jälkeen saatuja mittatuloksia tunnetuilla painoilla ja ladataan toimiva ohjelmakoodi TIA Portal -ohjelmistolla.

5.1 Konstruktion rakenne

Kuvassa 18 nähdään koko prototyypin rakenne. Se hahmottelee linjastosimulaattoriin soveltuvaa neliömäistä asetelmaa, jossa mitta-alustan nurkkiin on sijoitettu tukipisteiksi voima-anturit. Reunoilta saadaan myös luotettavampia mittatuloksia, koska käytetyn demoalustan reunakohdat ovat jäykempiä verrattuna alustan keskikohtaan. Viimeistellyssä ratkaisussa anturit ovat toki samassa linjassa mitta-alustan kanssa ja niiden paikka on sidottu alustan nurkkien mukaan. Anturit asettiin niin, että mittapäät osoittavat ulospäin alustasta, jolloin ne vievät vähemmän tilaa. Prototyypin kannalta asetelmalla ei ole väliä, sillä riittää vain, että anturit ja vahvistimet ovat lähekkäin johtojen kytkemistä varten.



KUVA 18. Prototyypin rakenne. (Kuva: Daniel Prokki)

Voima-antureissa on omat kiinnikepaikat ruuveille, mutta vahvistin kiinnitetään alustaan DIN-kiskon avulla. Samaista kiskoa käytettiin myös riviliittimien kiinnittämiseen. Kiskojen ansiosta vahvistimien ja riviliittimien paikkaa pystytään helposti säätämään oikealle etäisyydelle kytkentöjä tehdessä. Voima-anturit ja vahvistimet asennettiin pareina, koska anturin valmistajan Variohm Eurosensorin (2019) mukaan johtojen pituuden muuttaminen vaikuttaa maksimitulon kalibrointiin. Tämän takia asennuksessa pitää huomioida vahvistimen ja anturin välinen etäisyys, jotta johtojen pituutta ei tarvitse muuttaa.

5.2 Valittu voima-anturi AL6B-H-3.0KG-0.4B

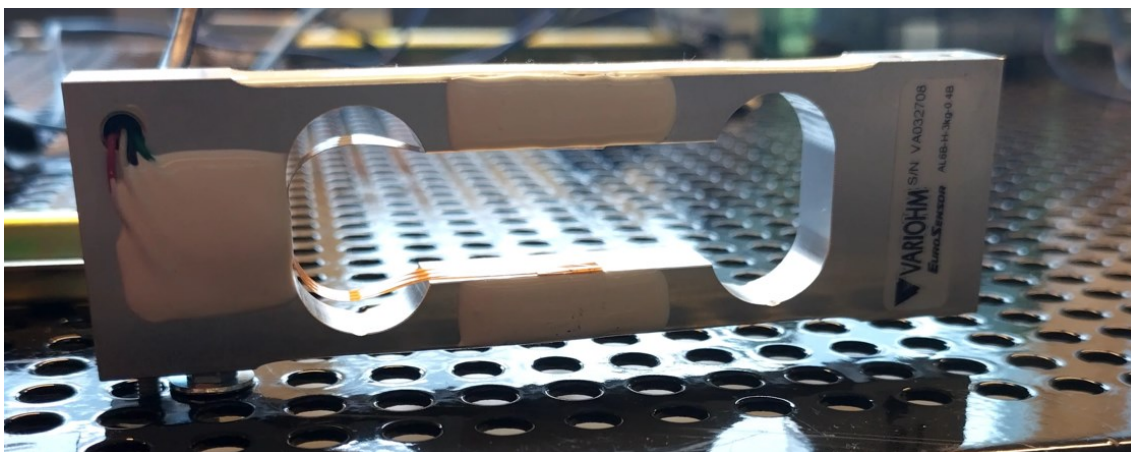
Lopulliseksi voima-anturiksi valikoitui Variohm Eurosensorin malli AL6B-H-3.0KG-0.4B (kuva 19). Kyseinen anturimalli valittiin työn tilaajan toimesta, koska anturin 3 kilogramman kapasiteetti ja korkea tarkkuus soveltuu annettuihin vaatimuksiin. Muilla anturityypeillä kapasiteetti oli yleisesti suurempi kuin 3 kg. Liian suuri kapasiteetti vaikuttaa mittatuloksen tarkkuuteen (Korpela 2024).



KUVA 19. Voima-anturi AL6B-H-3.0KG-0.4B (Variohm Eurosensor. 2019).

Pelkästään yksittäinen anturi kykenee melkein mittaamaan täysipainoisen 4 kg paketin tuotetietolomakkeen (engl. *datasheet*) mukaan. Antureissa on tiedysti jonkin verran varmuuskerrointa, joten ne kestävät hieman enemmän kuin annetaan ymmärtää. Clossin ja ym. (2013) mukaan voima-antureilla on tyypillisesti 1.5–2 varmuuskerroin, eli kyseinen anturi kykenee vielä mittaamaan 4.5–6 kg. Linjastosimulaattorissa paino jakaantuu lisäksi neljän anturin kesken, joten todellinen maksimipaino koko mitta-alustalle on noin 18 kg, jos alustan painoa ei huomioida.

Kuvasta 19 nähdään anturin kiinnitystapa. Ala- ja yläpohjassa on aina kaksi 7 mm keskiöetäisyydelle olevaa M3x10 kierrettä. Kiinnitystä varten runkoon on koneistettu 17x10 mm tasainen kiinnitysalue, johon liitetään esimerkiksi erilliset korokepalat. (Variohm Eurosensor 2019.) Anturin kylkeen merkatusta nuolesta selviää mittapää ja kuorman suunta. Kiinnittämisessä pitää huomioida, että anturin ja kiinteän pinnan välillä on riittävästi tilaa, jotta mittapää pääsee tarkoituksellisesti liikkumaan. Taipuman aiheuttaman muutoksen takia, anturi pitää nostaa noin 10 mm korokepalalla ilmaan. Anturi on syytä kiinnittää korokepaloiheen myös jäykkään runkoon, jotta vain anturissa tapahtuisi suurin taipuma. (Korpela 2024.)

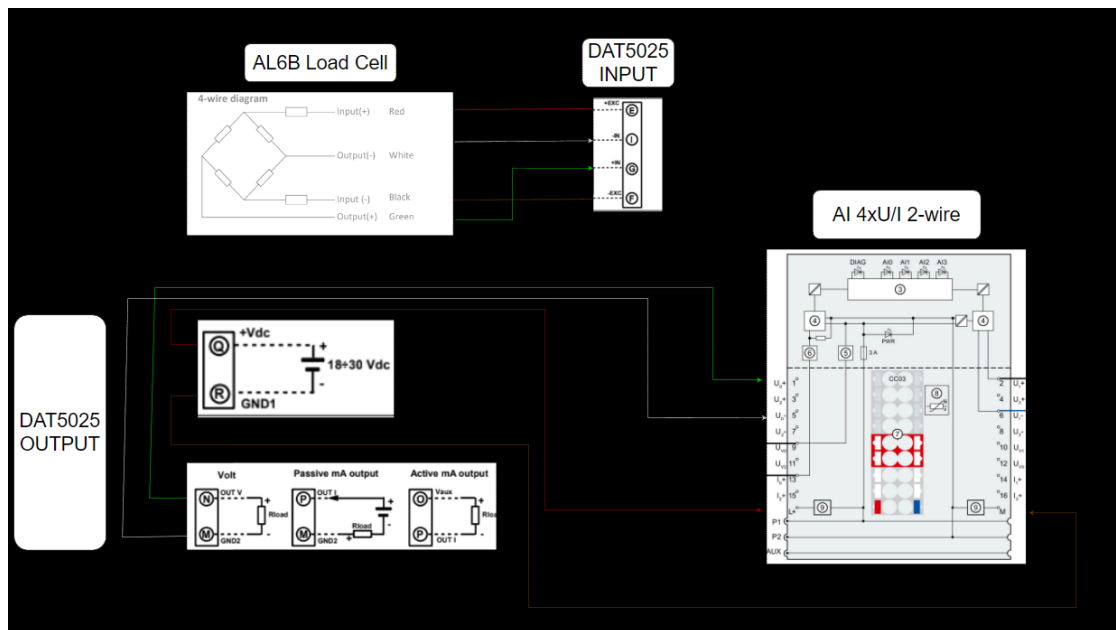


KUVA 19. Anturin dimensiot (Variohm Eurosensor. 2019).

5.3 Mittajärjestelmän kytkentäkaavio

Kuviossa 7 on esitetty yhden voima-anturin piiri PLC:een analogiakortille. Piiri jakaantuu käytännössä kahteen osuuteen: analogiavahvistimen sisääntuloon (engl. *input*) ja ulostuloon (engl. *output*). Piirissä vahvistimille syötetään 24 V ja voima-anturille vahvistimen kautta 10 V. Koko mittajärjestelmä koostuu neljästä vastaavanlaisesta kytkennästä. Neljälle vahvistimelle kannattaa kuitenkin jakaa yhteiset maa ja virtalähteet riviliittimien avulla.

Anturin siltakytkentä on esitetty kuvion yläosiossa. Anturilta tulevat johdot kytkeään vahvistimen sisääntulokanaviin kuvion mukaisesti. Anturilta saadaan lisäksi viides johto, joka on suojajohdin. Se voidaan halutessa kytkeä vahvistimen sisääntulopuolen "L" kanavaan (Variohm Eurosensor 2019). Alempi osio kuviossa edustaa vahvistimen ulostulopuolelta lähteviä kytkentöjä PLC:een sisääntulokortille. Siemensin (2020) ohjeesta selviää, että analogiseen tulokorttiin, ET200 SP AI 4xU/I 2-wire ST, mahtuu neljä analogista jänniteviestiä. Positiiviset jännitetulokanavat ovat välillä 0-3, ja ne esitetään merkillä U_{n+} . Negatiiviset jännitetulokanavat ovat välillä 0-3, ja ne esitetään merkillä U_{n-} . Yhden vahvistimen jännitearvot kytketään kortissa saman numeroisiin kanaviin. (Siemens 2020.)



KUVIO 7. Anturin, vahvistimen ja AI-kortin kytkentäkuva.

5.4 Mittavahvistin DAT5025

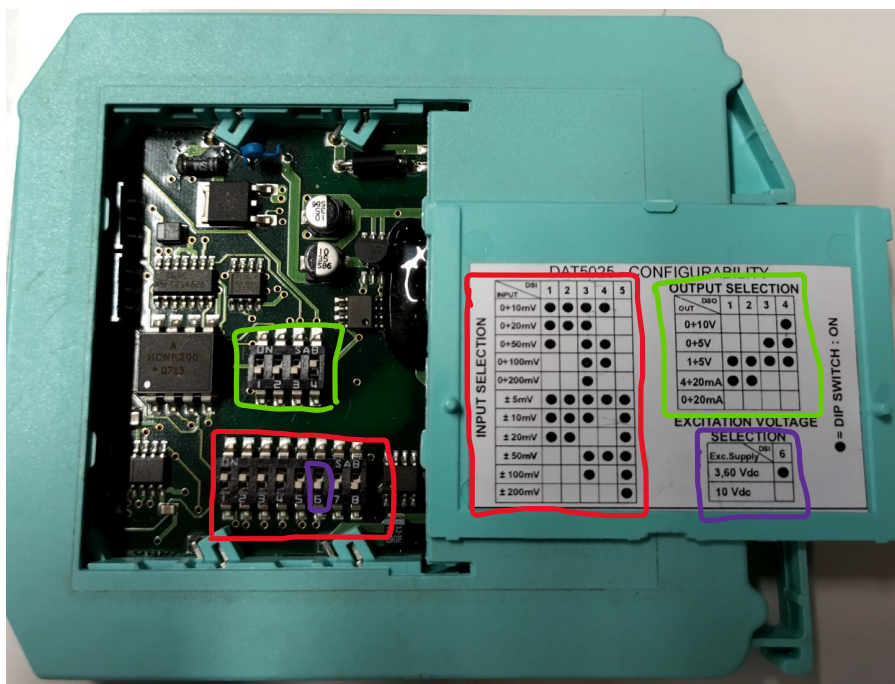
DAT5025 on eristetty muuntaja venymäliuska- ja silta-antureille. Se tarjoaa jännite- tai virtaviestejä, jotka ovat suoraan verrannollisia venymäliuska- tai silta-anturien tulosignaalien kanssa. Vahvistimella on asetuksista riippuen paljon ominaisuuksia:

- Säädettävä tulosignaali alue: 0+10 mV - 0+200 mV tai ± 5 mV - ± 200 mV
- Silta-jännite 3,6 V ja 10 Vdc
- Ohjelmoitava tulo- ja lähtöalue DIP-kytkimillä
- DIN-kiskoasennus.

Vahvistimen asetuksia säädetään DIP-kytkimillä, ja kalibroidaan zero-potentiometrillä ja span-potentiometrillä. Laitteen päällä sijaitsevilla nollopotentiometrillä ja span-potentiometrillä kalibroidaan vahvistimen minimi- ja maksimituloarvo niitä vastaaviin jännite tai virta-arvoihin. Kalibrointia ennen on kuitenkin määritettävä DIP-kytkimet. (DATEXEL n.d.)

5.4.1 DIP-asetukset

Tähän prototyyppiin valittiin (kuva 20) mukaiset DIP-asetukset: $0 \div 10$ mV, $V_{exc} = 10$ Vdc, out $0 \div 10$ Vdc. Kuvan taulukko määrittelee DAT5025-vahvistimen tukevat tulo- ja lähtöjännite- tai virta-alueet. Taulukon avulla määritetään DIP-kytkimien asetukset halutulle alueelle. Edellä mainitut tulo- ja lähtöjännitearvot vastaavat tuloalueella: On, On, On, On, Off, Off. Lähtökytkimien konfigurointi on taas: Off, Off, Off, On.



KUVA 20. Vahvistimen DIP-asetukset. (Kuva: Daniel Prokki)

Vahvistimen ulostulosignaali riippuu sen vastaanottavasta komponentista. Siemensin (2020) mukaan ulostulo, $0 \div 10$ V, sopii prototyyppissä käytettyyn analogiseen korttiin, ET200 SP AI 4xU/I 2-wire ST, koska se pystyy käsittelemään viestin. Tulokortti pystyy lisäksi seuraaviin jännite- ja virtaviesteihin: $4 \div 20$ mA, $0 \div 20$ mA, ± 5 V, ± 10 V ja $1 \div 5$ V (Siemens 2020). Mainittakoon, että virtaviesti olisi sopivampi valinta, jos ympäristössä olisi paljon häiriölähteitä. Virtaviesti on vähemmän alttiimpi häiriöille kuin jänniteviesti. Jänniteviestiin vaikuttaa myös johtojen resistanssi, kun virtaviesti pysyy muuttumattomana. Tämä asia kannattaa huomioida, jos vahvistimen ja kortin välinen matka on pitkä. (Jouppila 2024.)

Valinta 3,6 V:n ja 10 V:n sillanjännitearvojen välillä riippuu taas sovelluksesta. Anturin tyyppi, haluttu lähtösignaalin taso ja mitta-alueen tarkkuus ovat valintaan vaikuttavia tekijöitä. Yksi päätekijä on anturin lähdön herkkyys (engl. *output sensitivity*), joka on mV/V lukema (kuva 21). Se kertoo anturilta siltaan syötetyn jännitteen perusteella anturilta lähtevän mV lukeman. Valittaessa 10 sillansyöttöjännite saadaan suuremmalla kulmakertoimella oleva lineaarinen suora, jonka y-akselin suurin arvo on 9–10 mV, kun 3.6 V jännitteen on noin 3.24 mV. Jyrkemmän kulmakertoimen omaava suora on herkempi pienille kuorman muutoksille, joten se soveltuu paremmin sovellukseen. (Jouppila 2024).

Specifications		
Accuracy class		H
Output sensitivity (= FS)	mV/V	0.9 ± 0.1

KUVA 21. Anturin AL6B-H-3.0kg-0.4B lähdön herkkyys (Variohm Eurosensor. 2019).

Viimeinen tuloalueen valinta 0÷10 mV perustuu myös tarkkuuteen sekä itse mitaustapahtumaan. Painon tullessa mitta-alustalle kaikki kuorma kohdistuu alaspäin. Anturi taipuu ainoastaan yhteen suuntaan, koska laboratorio-olosuhteissa sillä ei ole sivuttaissuuntaisia tai vetäviä voimia. Tällöin anturi antaa arvoja 0–10 mV alueella. Muut kuin alaspäin suuntautuvat voimat aiheuttavat venymäliu-koissa vastakkaissuuntaisia muutoksia, jolloin anturi antaa negatiivisia mV luke-mia. Jos mittauksessa ilmenisi toistuvasti tällaisia voimia, olisi syytä asettaa vahvistimen tuloalueeksi ±10 mV. Tämänhetkiselä valinnalla saadaan parempi tarkkuus prosessista, koska anturin teettämät jänniteviestit ovat lähellä vahvistimen asetuksien arvoja. (Korpela 2024).

5.4.2 DAT5025 vahvistimen kalibrointi

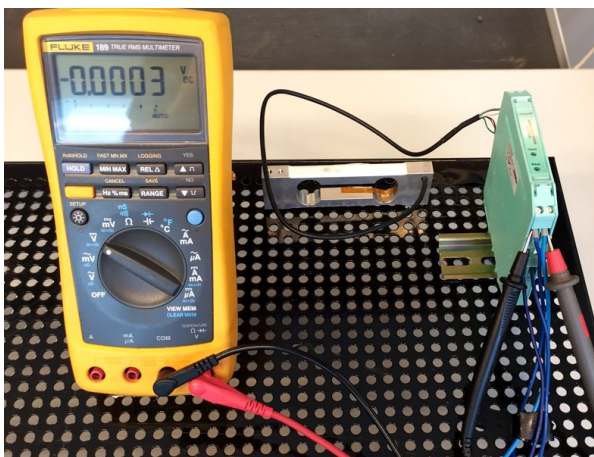
DIP-asetuksien jälkeen vahvistin pitää kalibroida. Mannisen (2024) mukaan kalibroinnilla varmistetaan, että vahvistimelta lähtevä jännitesignaalia vastaa DIP-asetuksien mukaisia maksimi- ja minimiarvoja 0–10 V. Vahvistimen antama jänniteviesti vaihtelee voima-anturiin kohdistuvan painon mukaan. Kun anturilla ei ole painoa vahvistimen jänniteviesti tulisi olla 0 V, ja 3 kg:n painolla sen tulisi

saavuttaa maksimiarvo, eli 10 V. Ilman kalibrointia lähtösignaalissa on virheitä, jotka johtavat virheellisiin mittaustuloksiin. (Manninen 2024.) Kalibroinnissa säädetään painon ja lähtösignaalin välistä kulmakerrointa (Korpela 2024).

Kalibrointi koostuu minimi- ja maksimituloarvon konfiguroinnista. Minimituloarvoa säädetään zero-potentiometrillä ja maksimituloarvoa span-potentiometrillä. Kalibrointi alkaa minimituloarvon määrittelystä. Minimituloarvon, 0 kg, ollessa asetettuna nollapotentiometriä säädetään niin kauan, kunnes vahvistimen lähtöjännite vastaa taulukossa määriteltyä pienintä lähtöarvoa, eli 0 V. Tämän jälkeen asetetaan maksimituloarvo. Kun maksimituloarvo on asetettu, 3 kg, span-potentiometriä säädetään niin, että vahvistimen lähtöjännite vastaa taulukon suurinta lähtöarvoa, eli 10 V. Optimaalisen tuloksen saavuttamiseksi tätä kiertoa vaiheiden välillä toistetaan 4–7 kertaa, kunnes lähdonarvot ovat halutulla alueella. (DA-TEXEL n.d.) Vahvistinta kalibroitaessa lähtöjännitteet mitataan yleismittarin avulla vahvistimen ”N” ja ”M” kanavista.

5.5 Mittatulokset kalibroinnin jälkeen

Mittaukset suoritettiin Fluken 189 -mallin yleismittarilla (kuva 22). Mittaukset toistettiin neljällä eri tunnetulla painolla, mukaan lukien 0 kg. Paino asetettiin sille tarkoitettuun kohtaan, jonka jälkeen yleismittarilta luettiin tulos. Jokainen mittaus toistettiin 3–5 kertaa tuloksen luotettavuuden varmistamiseksi. Mittaustapahtuma pidettiin samana ja kaikissa mittauksissa käytettiin aiemmin mitattuja punnuksia. Mittaukset alkoivat 0 kg, ja päättyivät maksimipainoon, eli 3 kg.



KUVA 22. Mittaustapahtuma (kuva: Daniel Prokki).

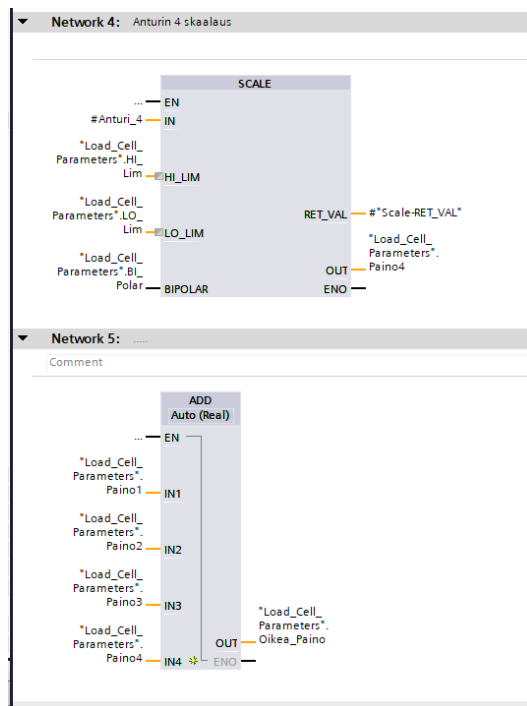
Neljältä vahvistimelta saatuja mittatuloksia on esitetty alla (taulukko 1). Tulokset esitetään kahden desimaalin tarkkuudella. Taulukosta nähdään, että anturit saavat sadasosien tarkkuudella samoja tuloksia. Tämä perusteella voidaan todeta, että antureilla on hyvä lineaarisuus (Manninen 2024). Täten ohjelmassa ei tarvitse ottaa huomioon antureiden poikkeamaa (engl. *offset*) tai ohjelmoida omia kalibrointisuoria kullekin anturille.

TAULUKKO 1. Vahvistimen jännite, tunnetuilla punnuksilla.

Käytetty punnus (kg)	Anturi 1	Anturi 2	Anturi 3	Anturi 4
m (kg)	U_{11} (V)	U_{12} (V)	U_{21} (V)	U_{22} (V)
0	0.00	0.00	0.00	0.00
1.324	4.41	4.41	4.41	4.41
1.339	4.48	4.48	4.48	4.48
3.0	10.00	10.00	10.00	10.00

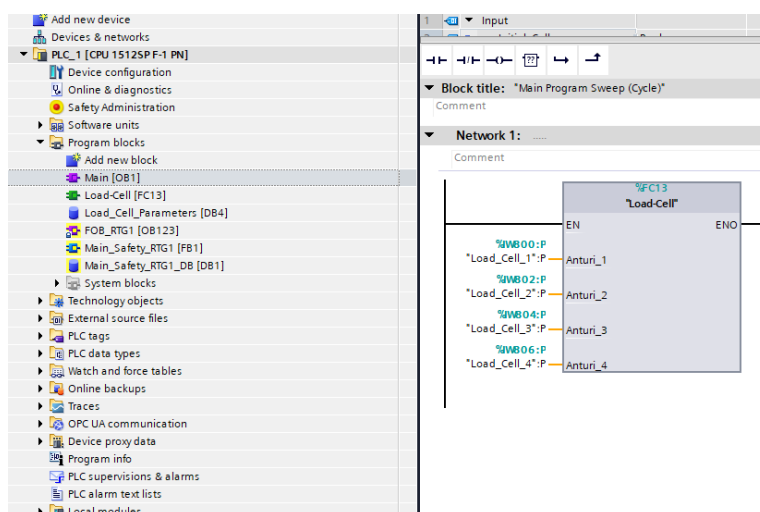
5.6 TIA Portal -ohjelma painon mittaamiseen

Toimivan ohjelmakoodin toteutus on yksinkertainen (kuva 23). Neljä analogista arvoa summataan skaalauksen jälkeen yhteen, jolloin kaikkien voima-anturien yhteistulos on alustalla oleva paino. Skaalauksessa ylä- ja alarajoihin pitää laittaa oikeat arvot, 0 ja 3, sekä asettaa bipolar -arvo epätodeksi (engl. *false*). Siemensin (2006) toteaa, että bipolar -arvo asetetaan epätodeksi, jos antureilta tulevat arvot eivät ole negatiivisia. Tällöin skaalausoperaattoriin tulee integer -arvo väliltä 0–27648. Jos bipolar on totta, antureilta tulevat integer -arvot vaihtelevat välillä -27648–27648. (Siemens 2006.)



KUVA 23. FC-lohkon sisältö (näyttökuvaa: Daniel Prokki).

Käytännössä ohjelma on toteutettu yhdellä FC-lohkolla, jossa on neljä skaalain-operaattoria. Lohkolle on nimetty oma muistialue. Muistialueessa on skaalauksessa tarvittavat parametrit sekä jokaisen skaalain operaattorin antama arvo ja summauksesta syntyvä lopullinen paino. Ohjelman pääosassa antureiden konfiguroidut osoitteet liitetään FC-lohkon oikeisiin sisääntulokanaviin (kuva 24). Ohjelma toimii suunnitellusti ja antaa tuloksia 10 gramman sisään tunnetuille painoille.



KUVA 24. Main-ohjelman sisältö (näyttökuvaa: Daniel Prokki).

6 POHDINTA

Tässä tutkimuksessa haluttiin selvittää, millainen on soveltuvin painon mittausmenetelmä, joka pystyy täyttämään tilaajan vaatimukset. Tilaajan vaatimukset täyttävä ratkaisu löydettiin systemaattisen suunnittelumenetelmän avulla. Suunnittelijan omien ajatusten lisäksi ratkaisuun on käytetty kirjallisuudesta ja asiantuntijoilta kerättyä tietoa. Seuraavissa alaluvuissa esitellään työn keskeiset tulokset, arvioidaan tutkimuksen onnistumista, ja esitellään jatkotutkimusmahdollisuuksia sekä kehitysehdotuksia.

6.1 Tutkimuksen yhteenveto

Tämä tutkimus alkoi TAMK:n tarpeesta kehittää automatisoidun linjastosimulaattorin toimintaa. Opiskelijoille tarkoitettuun simulaattoriin haluttiin lisätä painon mittaamiseen tarkoitettu menetelmä, jota opiskelijat pystyvät käyttämään tehtävänannon mukaan. Tällä työllä ei ollut tarkoituksena saada viimeistelyä ratkaisua simulaattoriin, vaan aloittaa kehitysprojekti ja antaa työn tilaajalle teoriatausta viimeistelyä varten. Työn suurempana tavoitteena oli toimia aloitteena painon mittaamiseen soveltuvan järjestelmän kehittämisessä sekä oppimateriaalina opiskelijoille. Annettu tehtävä oli puhdas tuotekehitysprojekti, joka päättyi toimivaan prototyyppiin.

Tutkimusongelmaa lähdettiin selvittämään systemaattisella suunnittelumenetelmällä. Tuotekehityksessä käytetty systemaattinen suunnittelumenetelmä koostuu luonnostelusta, kehitysvaiheesta ja viimeistelystä. Perusidea menetelmässä on laajentaa ratkaisumahdollisuuksia ja sitten kaventaa joukkoa, kunnes jäljellä on yksi vaatimus täyttävä ratkaisu. Luonnostelussa ideoidaan vaatimuksia täyttäviä osatoimintoja, joista myöhemmin muodostuu kokonaistoimintoja, joiden jatkoa arvioidaan morfologisessa analyysissä. Valitun kokonaistoiminnon jälkeen tuotteesta tehdään toimiva prototyyppi. Lopuksi prototyyppi viimeistellään ja lanseerataan markkinoille.

Koko opinnäytetyö etenee loogisesti suunnittelumenetelmän mukaan, alkaen taustoittavasta teoriasta. Teoriataustaa projektille selvitettiin painon mittaamisen alkuajoista tämän päivän lähteisiin asti. Taustasta selvisi, että paino on tärkeä tieto useilla eri aloilla, ja se on läsnä jokapäiväisessä arjessa. Nykypäivänä painoa mitataan pääasiallisesti voima-antureiden (engl. *load cell*) avulla. Näitä antureita on nykypäivänä useita erilaisia, ja joidenkin valmistajien välillä on ristiriitaista tietoa esimerkiksi antureiden päätyypeistä tai malleista. Voima-anturin tyyppi riippuu pitkälti sovelluskohteesta, minkä takia uudenlaisia antureita syntyy jatkuvasti. Pääasialliset voima-anturityypit ovat: venymä (engl. *tension*), puristus (engl. *compression*), palkki (engl. *beam*) ja ”single-point”. Nämä anturit perustuvat venymäliuskoihin, jotka ovat siltaan kytkettyjä resistiivisiä antureita. Kuorman aiheuttama muutos taivuttaa voima-anturin runkoa, jolloin siinä kiinni olevan venymäliuskan geometria muuttuu aiheuttaen samalla muutoksen sillan tasapainossa. Sillasta lähtevä jänniteviesti on lineaarinen muutoksen aiheuttaneeseen voimaan.

Voima-anturit ovat herkkiä laitteita, joten ne tarvitsevat toimiakseen mittavahvistimen ja mahdollisesti muita komponentteja, joilla suojataan analogista signaalia. Mittavahvistimella kalibroidaan anturin teettämät arvot vastamaan DIP-asetuksien maksimi- ja minimituloarvoja. Vahvistimella päätetään esimerkiksi anturille syötettävä siltajännite, joka vaikuttaa sen kulmakertoimen suuruuteen ja sitä kautta anturin herkkyyteen. Vahvistimella päätetään myös PLC:lle tulevan viestin muoto, joka voi olla virta- tai jänniteviesti.

Lopputulokseksi saatiin järjestelmä, joka koostui neljästä AL6B single-point-voima-anturista, neljästä DAT5025 vahvistimesta sekä ET 200SP analogisesta tulokortista. Nämä komponentit muodostavat yhdessä mittajärjestelmän, jossa antureilta tuleva jänniteviesti, mV, skaalataan vahvistimella 0–10 V viestiksi, mikä edelleen viedään PLC:hen liitetulle AI 4xU/I 2-wire ST kortille. PLC:lle tulevat arvot skaalataan ohjelmassa, minkä jälkeen ne summataan yhteen lopullisen tuloksen saamiseksi. Luvussa 5 esitetyistä tuloksista huomataan, että prototyypin mittajärjestelmä toimii luotettavasti ja järjestelmä kykenee havaitsemaan sadasosien muutokset jännitearvoissa.

Työn voidaan todeta onnistuneen niin tavoitteeltaan kuin tarkoitukseltaan. Opin näytetyöstä saatiin rakenteeltaan looginen ja ymmärrettävä, koska jokainen työvaihe etenee kronologisessa järjestyksessä. Tarkoitukseen päästiin täyttämällä oleelliset vaatimukset, jotka on esitetty luvussa 4. Tarkkuuden tasolla annetut vaatimukset jopa ylitettiin, koska anturit antavat tuloksen noin 10 g tarkkuudella. Tehtyjen testin perusteella neljän anturin rakennelma on kaikista kestävin, jolla voidaan saavuttaa 10 vuoden käyttöikä. Järjestelmän jokainen komponentti on varmistettu asiantuntijoiden perusteella soveltuvan teollisuuden käytäntöihin. Viimeinen vaatimus, kalibrointi, suoritettiin vahvistimella avulla. Aiempien lukujen perusteella voidaan varmuudella todeta ratkaisun olevan soveltuvin vaihtoehto, joka täyttää oleelliset vaatimukset.

Työn luotettavuutta on aina syytä kyseenalaistaa. Lähteitä on käytetty monipuolisesti eri kielillä, niin kirjallisia kuin verkkolähteitä. Täydennystä vaativiin kohtiin on kerätty asiantuntijahaastatteluista saatu tieto. Luovaan suunnitteluprosessiin tulee kuitenkin välttämättä vaikuttamaan suunnittelijan omat tuntemukset ja näkemykset. Tekstissä lähteeseen viittaamattomiin kohtiin on käytetty suunnittelijan omaa ääntä. Näitä kohtia on syytä tarkastella kriittisesti.

6.2 Jatkotutkimukset

Lisätutkimuksia aiheeseen liittyen voidaan tehdä eri osa-alueilta. Painon mittauksen tulevaisuus tulee varmasti muuttumaan tekniikan kehittyessä. Isoimpana tutkimuksen kohteena voisi olla erilliset menetelmät, joilla painoa voidaan mitata. Varsinkin langattomien ratkaisujen tutkiminen avaisi mahdollisuuden uusille kokonaistoiminnoille. Tällöin suunnittelumenetelmään saataisiin vielä laajempi lähtöalusta, josta saattaisi löytyä parempia ratkaisuvaihtoehtoja.

Yrityksille tärkeä tieto, paino, on merkityksellistä. Tuottavuuden näkökulmasta on tärkeää optimoida prosessi mahdollisimman dynaamiseksi. Tähän liittyen voitaisiin yleisesti selvittää, että milloin ja miten painon mittaus suoritetaan osana prosessia. Tarkoituksena olisi selvittää dynaamisempia ratkaisuja prosessin tuotta-

vuuden tehostamiseksi. Tutkimuksella voitaisiin tuottaa mahdollisesti jollekin yritykselle tärkeää dataa. Kerätyn tiedon pohjalta, kohdeyritys pystyisi tekemään parannuksia mittaustapahtumaan liittyen.

6.3 Kehitysehdotukset linjastosimulaattoriin

Prototyypin liittäminen linjastosimulaattoriin voidaan tehdä ainakin kahdella tavalla. Voima-anturit voidaan asettaa linjaston rullakehikon pohjaan kiinni, jolloin ne ovat varmasti jäykässä alustassa kiinni. Antureiden viereen olisi samalla helposti liitettävissä DIN-kiskoilla oleva vahvistin. Asennukseen tarvitsisi korokepalan ja rullaston tasoon yltävät kiinniketapit, joita pitkin kuorma tuotaisiin antureille.

Toinen vaihtoehto on kiinnittää anturit kehikon sivuun. Tällöin saadaan eduksi anturien koron sekä linjaston suuntaisen liikkeen säädettävyys. Sivuun kiinnitetty anturi tulisi kiinni yleisellä alumiiniprofiililla, jolla säädettävyys tehtäisiin. Vahvistimet voitaisiin asettaa DIN-kiskoineen rullakehikon pohjaan, ja tuoda johdotus seinämää pitkin antureille.

Ohjelmakoodiin voi kehittää myös lisää toimintoja. Yksi toiminnoista voisi olla taa-raus, jossa asetetaan käyttäjän haluama lähtöpaine ohjelmassa nollapainoksi. Tilanne on verrattavissa leipomiseen, jossa jauhoja punnitessa pitää huomioida ensin kipun paino. Kippo asetetaan puntarille nollapisteksi, minkä jälkeen voidaan punnita jauhojen määrä. Koska paino on tärkeä tieto, voisi ohjelmaan lisätä myös turvallisuutta viemällä paino salasanojen taakse. Näitä kehitysehdotuksia käyttämällä työlle saadaan viimeistelty lopputulos, joka on alkuperäistään parempi.

LÄHTEET

Arminen, E., Mäkelä, R., Mäkinen, E., Puhakka, P. & Vierinen, K. (2010). Fysiikan laboratoriotyöt. Tampere: Tammertekniikka.

Cache industry siemens. 2006. Scaling and unscaling analog values. Pdf-dokumentti. Viitattu 18.3.2024. https://cache.industry.siemens.com/dl/files/722/23330722/att_114700/v1/scaling_and_unscaling_analog_values.pdf

Closs, R., Vandelinde, H. & Morrissey, M. (2013). Automated weighing technology process solutions. New York: Momentum Press.

Datexel. (n.d.). DAT5025. Viitattu 29.1.2024. <https://www.datexel.it/en/signal-converters-signal-transmitters-and-converters/dat5025-2/>

Eilersen. (n.d.). History. Viitattu 3.1.2024. <https://eilersen.com/history>

Flintec. (2024). Weight. Viitattu 4.1.2024. <https://www.flintec.com/weight-sensors/load-cells/what-is-a-load-cell>

Hoffman, K. (1989). An introduction to measurements using strain gages. Darmstadt: Hottinger Baldwin Messtechnik GmbH.

HBM. (n.d.). Strain gages and accessories. Pdf-dokumentti. Viitattu 15.1.2024. <http://www.ae.metu.edu.tr/seminar/strain-gage/brosur.pdf>

Inkinen, P. & Tuohi, J. (2006). Momentti 1. Keuruu: Otava.

Jokinen, T. (2001). Tuotekehitys. Helsinki: Otatieto.

Jouppila, V. lehtori. Haastattelu 10.2.2024. TAMK.

Korpela, M. lehtori. Haastattelu 6.2.2024. TAMK.

Luotsinen, O. 1983. Prosessisuureiden anturit. Helsinki. Insinööritieto Oy.

Manninen, R. yliopettaja. Haastattelu 4.2.2024. TAMK.

Martin, J. D. (2020). Scales and balances. Viitattu 3.1.2024. <https://www.idmartin.org/scalesbalances>

Notko, A. J. opettaja. Haastattelu 12.1.2023. TAMK.

Rober, M. (2022). Creative Engineering. Studio. Viitattu 1.1.2024. <https://studio.com/mark-rober-engineering/classroom/curriculum> (Vaatii käyttöoikeuden)

Salo, T. vanhempi kehitysinsinööri. Haastattelu 15.12.2023. TAMK.

Siemens. (2020). Analog Input Module AI 4xU/I 2-wire ST. Pdf-dokumentti. Viitattu 18.3.2024. [https://cache.industry.siemens.com/dl/files/624/59753624/att_75681/v1/et200sp_ai_4xu_i_2_wire_st_manual_en-US_en-US.pdf]

Variohm Eurosensor. 2019. AL6B Single Point Load Cell. Verkkosivu. Viitattu 18.3.2024. <https://www.variohm.com/products/load-cells-weighing-and-force-sensors/single-point-load-cells/al6b-single-point-load-cell>

Vilenius, E. 2019. Sähköisten häiriö- ja virhelähteiden vaikutusten minimointi vaakajärjestelmässä. Sähkötekniikka. Lappeenrannan teknillinen yliopisto. Kandidaatintyö. Viitattu 13.1.2024. https://lutpub.lut.fi/bitstream/handle/10024/160274/Kandidaatintyo_Vilenius_Elmo.pdf?sequence=1&isAllowed=y