

Servohydrauliikan opetuslaitteen modernisointi ja kehittäminen

Kimmo Koivuperä

Kone- ja tuotantotekniikan koulutusohjelman opinnäytetyö
Konetekniikka
Insinööri (AMK)

KEMI 2013

ALKUSANAT

Haluan kiittää Kemi-Tornion Ammattikorkeakoulun yliopettajaa Lauri Kantolaa mielenkiintoisesta ja haastavasta opinnäytetyön aiheesta ja työn valvomisesta. Haluan myös kiittää perhettäni ja läheisiäni, jotka ovat olleet tukenani opinnäytetyön aikana.

TIIVISTELMÄ

KEMI-TORNION AMMATTIKORKEAKOULU, Koulutusala

Koulutusohjelma:	Kone- ja tuotantotekniikan koulutusohjelma
Opinnäytetyön tekijä:	Kimmo Koivuperä
Opinnäytetyön nimi:	Servohydrauliikan opetuslaitteen modernisointi ja kehittäminen
Sivuja:	60
Päiväys:	24.4.2013
Opinnäytetyön ohjaaja(t):	Lauri Kantola
<p>Tässä opinnäytetyössä perehdyttiin servohydrauliikan opetuslaitteeseen ja pohdittiin sen mahdollistamia opetussisältöjä. Lisäksi työssä esitettiin laitteelle kehitysehdotuksia ja osoitettiin laitteessa olevia puutteita tai ongelmakohtia.</p> <p>Työn tavoitteena oli saada kartoitettua servohydrauliikan opetuslaitteen nykytilanne, kehitysmahdollisuudet ja laitteen mahdollistamat opetussisällöt. Opinnäytetyössä perehdyttiin servoventtiilitekniikkaan, hydrauliikan sähköiseen ohjaukseen ja PID-säätimen teoriaan. Teoriaosuuden pohjalta pohdittiin laitteen mahdollistamia opetussisältöjä ja esitettiin servohydrauliikan opetuslaitteella toteutettavia tehtäviä.</p> <p>Työn teoriaosuus toteutettiin keräämällä kotimaisista kirjallisuuslähteistä tietoa hydrauliikan sähköisestä ohjauksesta ja PID-säätimestä. Lisäksi perehdyttiin itse servohydrauliikan opetuslaitteeseen, jolla suoritettiin kokeita ja kirjattiin tuloksia ylös.</p> <p>Opinnäytetyön lopputuloksina saatiin kartoitettua servohydrauliikan opetuslaitteen viat ja kehitys mahdollisuudet. Lisäksi saatiin aikaan myös hydraulikaavio ja komponenttiluettelo. Työn lopussa on eritelty laitteessa olevat viat sekä esitelty kolme erilaista kehityspolkua kustannusarvioineen, joiden pohjalta laitetta voidaan kehittää opetustarkoituksessa eteenpäin.</p>	
Asiasanat: servohydrauliikka, PID-säädin, avoin ohjauspiiri, suljettu säätöpiiri.	

ABSTRACT

KEMI-TORNIO UNIVERSITY OF APPLIED SCIENCES, Education

Degree programme:	Mechanical and production engineering
Author(s):	Kimmo Koivuperä
Thesis title:	Modernization and development of the servo hydraulics teaching device
Pages (of which appendixes):	60
Date:	24 April 2013
Thesis instructor(s):	Lauri Kantola
<p>The purpose of this final project was to examine the servo-hydraulics teaching device and find out what can be taught with it. Some development proposals and problematic issues are also presented.</p> <p>The aim was to find out the current condition of the servo-hydraulics teaching device and the development potential. This project focused on the theory of the servo-valve technology, the electrical control of hydraulics and PID-control. The teaching possibilities of the servo-hydraulics teaching device were considered on the basis of the theory.</p> <p>The information of the theory part was collected from Finnish literature on the electrical control of hydraulics and PID-controller. In addition, some experiments were carried out and the results were written down.</p> <p>As a conclusion, the problematic issues of the servo-hydraulics teaching device and the development possibilities were discovered. A hydraulic diagram and the list of components were also solved. Three different development paths were specified together with the cost estimates. Based on these development paths, it can be decided what to do with the servo-hydraulics teaching device.</p>	
<p>Keywords: servo hydraulic, PID-controller, open loop control, closed loop control.</p>	

SISÄLLYS

ALKUSANAT	2
TIIVISTELMÄ.....	3
ABSTRACT	4
SISÄLLYS	5
1 JOHDANTO.....	7
2 SERVOHYDRAULIIKAN OPETUSLAITE	8
2.1 Toiminta ja rakenne	8
2.2 Hydraulikaavio	11
3 SÄHKÖHYDRAULISET VENTTIILIT	13
3.1 Jatkuvat toimiset venttiilit yleensä.....	13
3.2 KytKentäventtiilit	13
3.3 Proportionaaliventtiilit	14
3.4 Regelventtiilit	15
3.5 Servoventtiilit	16
3.6 Suuntaventtiilit	16
3.7 Virtaventtiilit	17
3.8 Paineventtiilit.....	18
4 HYDRAULIIKAN SÄHKÖINEN OHJAUS	20
4.1 Avoin ohjauspiiri	20
4.2 Suljettu säätöpiiri	21
4.3 PID-säädin.....	22
4.3.1 Eroelin.....	22
4.3.2 P-elin (vertoelin).....	23
4.3.3 I-elin (integroiva elin).....	24
4.3.4 D-elin (derivoiva elin)	26
4.3.5 PID-säädin.....	28
5 SERVOHYDRAULIIKAN OPETUSLAITTEEN KÄYTTÖSOVELLUKSET	30
5.1 Asema-anturin kalibrointi ja toiminta.....	30
5.2 Servoventtiilin rakenne ja toiminta.....	35
5.3 PID-säätimen elinten toiminta ja käyttäytyminen	40
5.4 PID-säätimen virittäminen ja asemasäätö	45
5.4.1 Erosuureen muodostaminen	46

5.4.2	PID-säätimen virittäminen	47
5.4.3	Asemasäätö eli paikoitus.....	50
6	MODERNISOINTI JA KEHITTÄMINEN	52
6.1	Kehityspolku 1.....	52
6.2	Kehityspolku 2.....	53
6.3	Kehityspolku 3.....	53
7	POHDINTA	55
	LÄHTEET	56
	LIITTEET.....	57

1 JOHDANTO

Opinnäytetyön aiheena on servohydrauliikan opetuslaitteen modernisointi ja kehittäminen. Laite on ollut Kemi-Tornion Ammattikorkeakoululla jo pidemmän aikaa ja laboratiotilojen uudistamisen myötä ilmeni tarve käydä laitteen toiminta läpi ja selvittää, ovatko laitteen komponentit toimintakuntoisia. Lisäksi tarkoituksena on selvittää, kuinka laitetta tai sen toimintaa voisi kehittää opetuskäyttöä silmällä pitäen. Ensimmäisenä laite täytyi kuitenkin siirtää Ammattiopisto Lappian puolelta Kemi-Tornion Ammattikorkeakoulun tiloihin. Sopiva tila laitteelle löytyikin prosessiautomaation laboratoriosta.

Työn tarkoituksena on kuvata laitteen toiminta ja rakenne, sekä selvittää koelaitteen mahdollistamat opetussisällöt. Keskeisenä osana työhön kuuluu selvittää servoventtiilien toiminta ja käydä läpi hydraulinen servojärjestelmä. Lisäksi työssä käsitellään PID-säädin ja sen teoria. Mittauksien avulla pyritään selvittämään venttiilien ja käytön tekniset suoritusarvot, kuten venttiilin ohjausvaste ja taajuusvaste. Työssä selvitetään servoventtiilin rakenne, toiminta ja venttiilin ohjaustapa. Laitteen toiminnan selvittämiseen kuuluu kaksitoimisen sylinterin ajaminen servoventtiilillä, laitteen asema-anturin toiminta ja kalibrointi, kaksitoimisen sylinterin asemasäädön toteuttaminen laitteen asemataikainkytkennällä sekä virittää PID-säädin eli hakea säätimen parametrit. Lisäksi työssä laaditaan laitteen hydraulikkakaavio ja komponenttien kuten paineantureiden, servoventtiilien, sylinterien ja mittareiden testaaminen sekä dokumentointi.

Lopuksi tehdään suunnitelma laitteen modernisoimiseksi. Siinä tarkastellaan miten laitteen mekaniikkaa, hydraulikkaa, anturointia tai ohjausjärjestelmää voisi uusia tai parantaa. Lisäksi arvoidaan, kuinka laitteen käytettävyyttä voisi parantaa sekä selvitetään mitä laitteen muutostyöt tulevat kustantamaan.

2 SERVOHYDRAULIIKAN OPETUSLAITE

2.1 Toiminta ja rakenne

Mannesmann Rexrothin valmistaman laitteen tarkoituksena on havainnollistaa, kuinka servohydrauliikka ja PID-säädin käytännössä toimivat. Laitteeseen kuuluvat pyörien päällä oleva hydrauliikka sekä sähköinen ohjausyksikkö, jolla laitetta pystytään ajamaan. Kuvassa 1 on esitetty kyseinen servohydrauliikan opetuslaite.

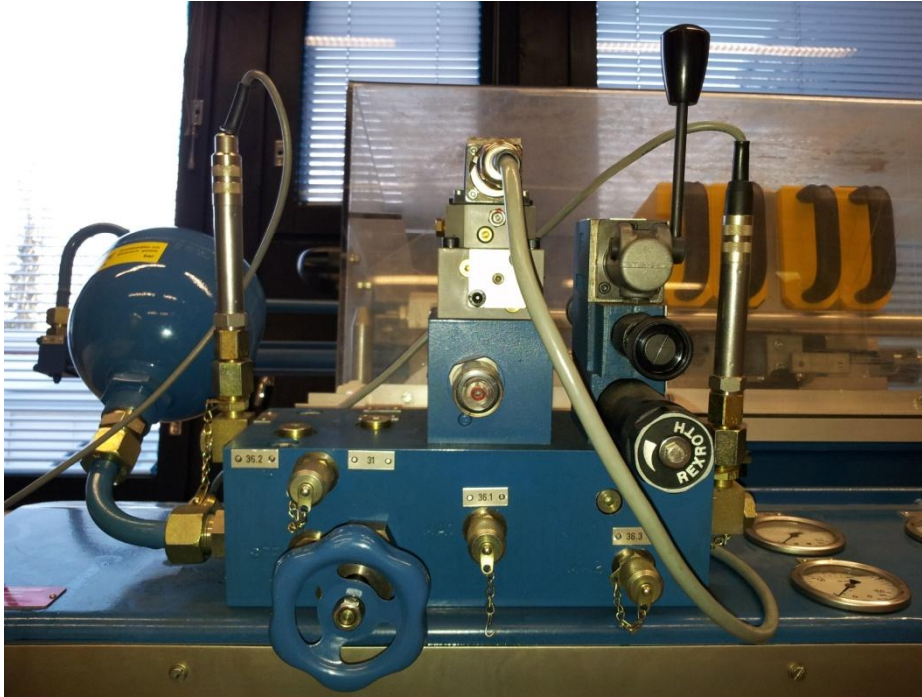


Kuva 1. Servohydrauliikan opetuslaite.

Hydrauliikkaosioon kuuluvat koneikko, venttiilit, paineanturit, painemittarit, asemaanturi ja sylinterit. Laitteessa on kaksi sylinteriä. Toinen sylinteri liikuttaa 30 kg:n painoista massaa servoventtiilin avulla. Toinen sylinteri on niin kutsuttu häiriösylinteri, jonka tehtävänä on vastustaa liikuteltavan massan liikkeitä.

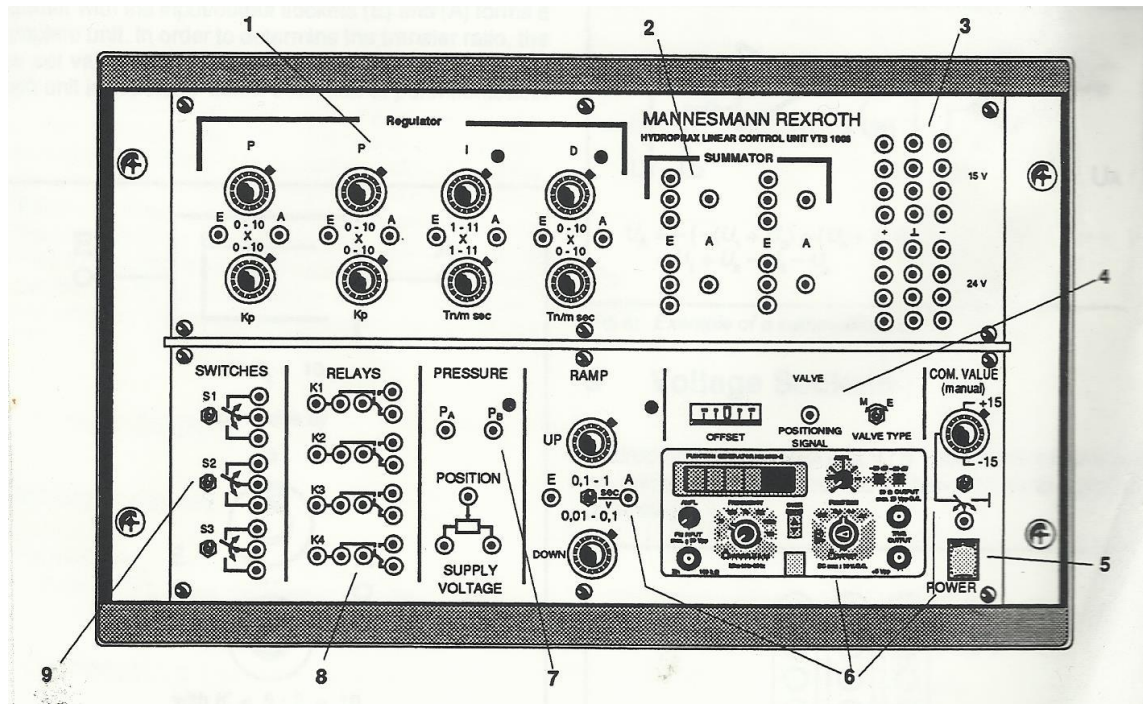
Laite toimii voimavirralla. Laitteessa on on/off-virtakytkin ja punainen hätä-seis-kytkin. Lisäksi laitteen liikkuvat osat, eli molemmat sylinterit on suojattu läpinäkyvällä pleksilaatikolla, jotta käyttäjä ei pääse litistämään sormiaan liikkuvien osien väliin.

Pääsylinteriä ajetaan Mannesmann Rexrothin 3/4-suuntaservoventtiilillä, joka on tyyppiä 4WS 2 E 10-40/45. Venttiili sijaitsee kuvan 2 keskellä ylimmäisenä. Häirintäsylinteriä voidaan operoida vipuohjatulla 3/4-suuntaventtiilillä, jonka alle on kytketty sekä painenrajoitusventtiili että painenalennusventtiili. Kuvassa vasemmalla on paineakku ja siihen liittyvä käsin pyöritettävä sulkuventtiili, jota avaamalla voidaan paineakku paineistaa.



Kuva 2. Venttiilit.

Toimiakseen laite tarvitsee ohjausyksikön, jolla voidaan antaa komentoja servoventtiilin ohjauskortille. Ohjausyksikkönä toimii Mannesmann Rexrothin valmistama hydroprax linear control unit vts 1008.



Kuva 3. Hydroprax linear control unit vts 1008. (Hydroprax Linear Control Unit VTS 1008. Tuotelehti.)

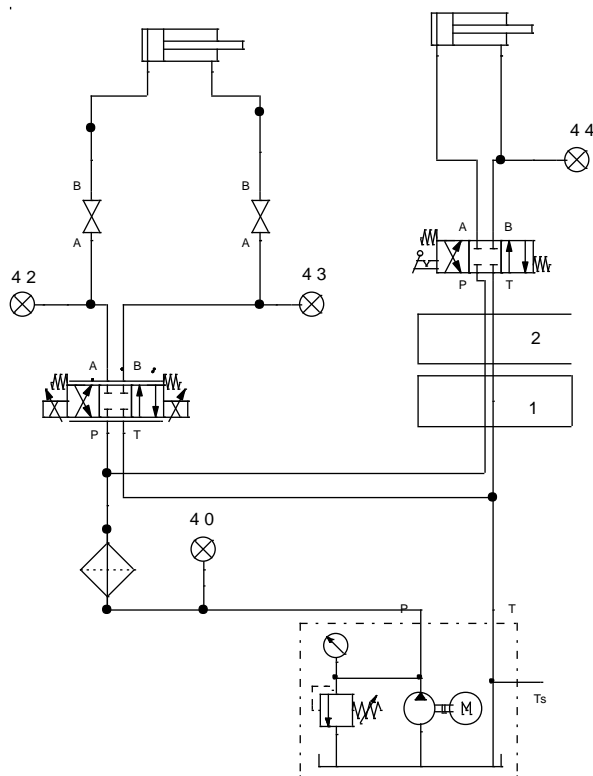
Kuvassa 3 esitetyn ohjausyksikön tärkeimmät elementit ovat PID-säädin (1), virtalähde (3), venttiililohko (4), virtakytkin (5) sekä funktio- ja ramppigeneraattori (6).

Ohjausyksikköä voi käyttää pääasiassa kolmella eri tavalla. Manuaalisesti, funktiogeneraattorin avulla tai PID-säätimen kautta.

Manuaalisesti voidaan käsin syöttää arvoja väliltä -15V ja +15V, jolloin servoventtiili ajaa sylinteriä eteen ja taakse. Funktiogeneraattorin avulla voidaan syöttää servoventtiilille sinimuotoista, askelmaista tai saha-aaltoista jännitettä. Ramppigeneraattorilla saadaan aikaan loivemmat tai jyrkemmät hidastukset, jolloin askelmaiset liikkeet tasoittuvat.

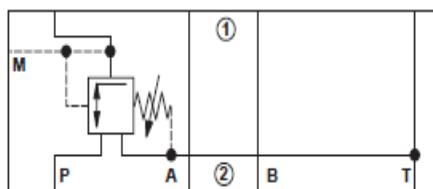
2.2 Hydraulikaavio

Koska FluidSIM hydraulikkakaavio piirrosohjelmalla ei voinut piirtää kaikkia hydraulikkakaavioon kuuluvia komponentteja, on hydraulikaavioon merkattu tyhjät laatikot 1 ja 2. Kuviossa 2 on esitetty paineenalennusventtiili ZDR 6 DP1 ja kuviossa 3 paineenrajoitusventtiili Z2DB 6 VC1. Painemittarit 40, 42, 43 ja 44 on numeroitu vastaamaan itse laitteesta löytyvää numerointia hydraulikkakaavion (Kuvio 1) lukemisen helpottamiseksi.



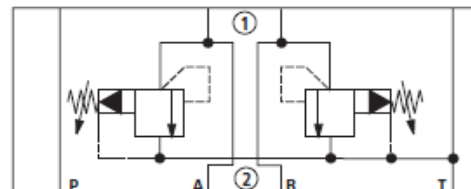
Kuvio 1. Hydraulikaavio.

1)



Kuvio 2. Paineenalennusventtiili.

2)



Kuvio 3. Paineenrajoitusventtiili

2.3 Komponenttiluettelo

Ohessa on komponenttiluettelo osista, joita käytetään servohydrauliikan opetuslaitteessa. Osat on numeroitu ja merkattu taulukkoon 1. Taulukosta käy selville osien määrä, osan nimi, valmistaja ja malli.

Taulukko1. Komponenttiluettelo.

Osa nr.	Kpl	Osa	Valmistaja	Malli
1	1	3/4-suuntaservoventtiili	Bosch Rexroth	4WSE 2 EM 10-40
2	1	3/4 vipuohjattu suuntaventtiili	Bosch Rexroth	4 WMM 6 E53/F
3	1	Paineenrajoitusventtiili	Bosch Rexroth	Z2DB 6 VC1-42/100V
4	1	Paineenalennusventtiili	Bosch Rexroth	ZDR 6 DP1-42/150 YM
5	2	Sulkuventtiili	Flutec	KH3-165R-L-1112
6	2	Hydraulisylinteri	Bosch Rexroth	CD 160E 32/22-0500
7	2	Paineanturi	Hydrotechnik	3129-10-85 33
8	1	Asema-anturi	Novotechnic	TLH 500
9	1	Hydraulisuodatin	Hydac	DF BHHC 6075

3 SÄHKÖHYDRAULISET VENTTIILIT

3.1 Jatkuvatoimiset venttiilit

Jatkuvatoimisilla venttiileillä tarkoitetaan proportionaali-, regel- ja servoventtiilejä. Jatkuvatoimiset, sähköhydrauliset venttiilit tarkoittavat laitteita, joissa muutettavissa oleva elektroninen ohjaussignaali muuttuu portaattomasti hydrauliseksi ulostulosignaaliksi. Verrattaessa eri venttiilityyppien konstruktioita on niiden tarkka rajaus eri luokkiin mahdotonta, koska eri valmistajat käyttävät erilaisia ratkaisuja. Kuitenkin venttiilit voidaan jakaa eri luokkiin niiden staattisten ja dynaamisten ominaisuuksien mukaan. (Götz 1993, 8)

Regel- ja proportionaaliventtiilit ovat rakenteellisesti hyvin samanlaisia, koska regelventtiilit ovat kehitetty proportionaaliventtiileistä. Regelventtiilit ovat edullisempi vaihtoehto korkealuokkaisille mutta myös likaherkille ja kalliille servoventtiileille. Servoventtiilit ovat hallinneet vuosikymmeniä säätöpiirien käyttäjiä, mutta kehitystyön tuloksena on regelventtiileihin saatu sellaiset staattiset ja dynaamiset ominaisuudet, jotka tuskin jäävät jälkeen servoventtiilien vastaavista ominaisuuksista. Regelventtiilien keskiasennon nollopeitto on tärkeä edellytys venttiilien käytölle suljetussa säätöpiirissä. Seuraavissa kappaleissa käydään lyhyesti läpi hydrauliiikan sähkötoimiset venttiilit. (Götz 1993, 8)

3.2 Kytkentäventtiilit

Kytkentäventtiilitekniikan järjestelmässä käytetään mm. mekaanisesti aseteltavia paine- ja virtaventtiilejä, painekytкимиä ja rajakatkaisijoita. Sähköohjaus toteutetaan joko reletekniikalla tai ohjelmoitavalla logiikalla. Tällaisessa ohjausjärjestelmässä tapahtuvat suunnan ja hydraulisten suureiden, kuten paineen ja tilavuusvirran muutokset useimmiten hyppäyksellisesti sähköohjauksen signaalin muutoksen jälkeen. Se johtaa iskumaisiin kytkentöihin ja painepiikkeihin, joka puolestaan aiheuttaa ennen aikaista laitteiston kulumista. Mekaanisten nokkien avulla ohjataan mm. nopeuden muutoksia, hidastuksia tai kiihdytyksiä. (Götz 1993, 6)

Hydrauliikka ja sähkötekniikka täydentävät toisiaan ja niiden välillä on selvä ero, mikä on otettava huomioon suunnitteluvaiheessa, käyttöönotossa ja vian etsinnässä.

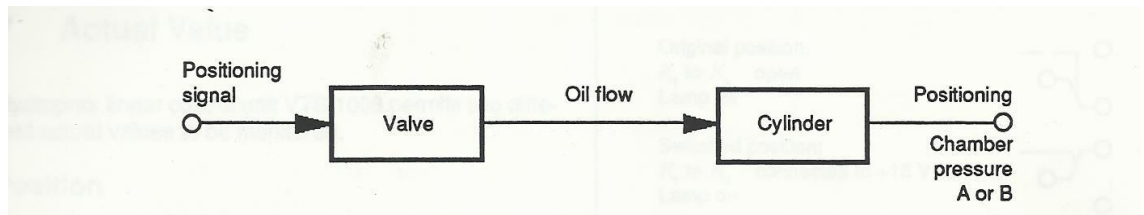
Nykyaikaisen sähköhydraulisen käyttötekniikan vaatimuksia ei useinkaan voida tyydyttävästi toteuttaa kytkentäteknikalla. Tällöin on kuitenkin seurattava molempia kytkentäkaavioita ja toimintaselostuksia yhtäaikaan. Kuvassa 4 on esimerkki sähköohjattusta suuntaventtiilistä. (Götz 1993, 6)



Kuva 4. 4/3 sähköohjattu suuntaventtiili (Salhydro 2012, hakupäivä 14.2013)

3.3 Proportioonaliventtiilit

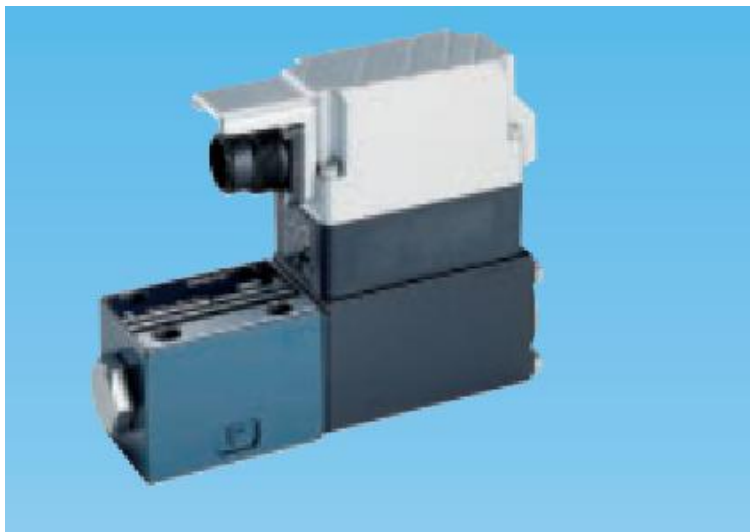
Proportioonaliventtiilitekniikassa käytetään tyypillisesti analogiaohjausta, proportioonaliventtiilejä ja niihin kuuluvia proportioonalivahvistimia. Paineen, tilavuusvirran ja suunnan ohjearvot annetaan analogisena signaalina eli jännitteinä. Muutokset ohjataan ramppigeneraattorin kautta. Ennakkoon valittu ohjearvo otetaan käyttöön koneen ohjausjärjestelmän ohjauksen mukaan. Tämä on nykyisin useasti toteutettu ohjelmoitavalla logiikalla. Tämän tekniikan avulla voidaan toteuttaa vaativia ohjauksia jolloin hidastukset ja jarrutukset voidaan tehdä optimaalisesti. Proportioonaliventtiilit toimivat pääsääntöisesti avoimen ohjauspiirin asetuseliminä (kuva 5). Avoimelle ohjauspiirille on ominaista se, että rakenneosien ja yksittäisten ohjausaskelten välillä ei ole takaisinkytkentää eikä korjausta. Toisin sanoin ulostulosignaalin ja ohjaussignaalin suhde toisiinsa on riippuvainen ohjausketjun yksittäisten osien tarkkuudesta eli siirtovasteesta. Erilaisia poikkeamia, joihin ei voi ohjaussignaalin avulla vaikuttaa, esiintyy kuitenkin. Tällaisia poikkeamia ovat esim. vuotovirtaukset, paineväliaineen kokoonpuristuminen, kitka, nollapisteen siirtymä, lineaarisuusvirhe ja kuluminen. Oleellisin häiriösuure sylinterien ja moottorien ohjauksissa johtuu kuormituksen vaihtelusta. Sitä voidaan osittain pienentää käyttämällä erillistä painevaakaventtiiliä, joka säätää venttiilien yli tapahtuvaa paine-eroa. (Götz 1993, 6)



Kuva 5. Kuva yksinkertaisesta avoimesta ohjauspiiristä. (Hydroprax Linear Control Unit VTS 1008. Tuotelehti.)

3.4 Regelventtiilit

Regelventtiilitekniikasta puhutaan, kun ohjausjärjestelmässä käytetään regelventtiilejä (servoventtiilejä), jatkuvatoimisia antureita, joista saadaan oloarvo, sekä elektronisia säätövahvistimia. Säättöpiirissä valvotaan jatkuvasti anturin oloarvoa ja sitä verrataan koko ajan ohjearvoon. Tätä olo- ja ohjearvojen eroa kutsutaan säätöpoikkeamaksi eli erosuureeksi. Sitä käsitellään erovahvistimessa, joka tuottaa uuden ohjearvon toimilaitteelle, joten säätöpoikkeamaa korjataan jatkuvasti. Suljetun säätöpiirin asetuselemelle asetetut vaatimukset ovat niin suuria, että yleisimmin käytetäänkin regel- tai servoventtiilejä. Proportionaaliventtiilit eivät normaalisti sovellu käytettäväksi suljetuissa säätöpiireissä. Regelventtiileissä on sisäinen karantakaisinkytkentä, jonka ansiosta hystereesi pienenee ja toiminta on lineaarisempaa. Regelventtiilit ovat nopeampia kuin proportionaaliventtiilit, mutta hitaampia kuin servoventtiilit. Kuvassa 6 on esimerkki regelventtiilistä. (Götz 1993, 7)



Kuva 6. Regelventtiili. (Bosch Rexrothin www-sivut, hakupäivä 14.2.2013)

3.5 Servoventtiilit

Servoventtiili on sähköisesti ohjattava hydraulinen vahvistin. Sitä käytetään pääasiassa suljetuissa säätöpiireissä. Tämä tarkoittaa, että sähköistä tulosignaalia ei vain muuteta vastaavaksi tilavuusvirraksi, vaan säädetty nopeus tai asema mitataan sähköisesti ja servoventtiili suorittaa tarvittavan korjauksen. Servoventtiilit on kehitetty teollisuusventtiileiksi ja niiden ominaisuudet on suunniteltu vastaamaan teollisuuden tarpeita. Servoventtiilien ominaisuuksia ovat luotettavuus, vaihtokelpoisuus ja helppo huollettavuus. Huonoina puolina voidaan mainita korkea hinta, likaherkkyys ja kallis vahvistintekniikka. Kuvassa 7 on esimerkki servoventtiilistä ja sen ohjauskortista. (Edwald, Hutter, Kretz, Liedhegener, Schenkel, Schmitt & Reik 1988, 141)

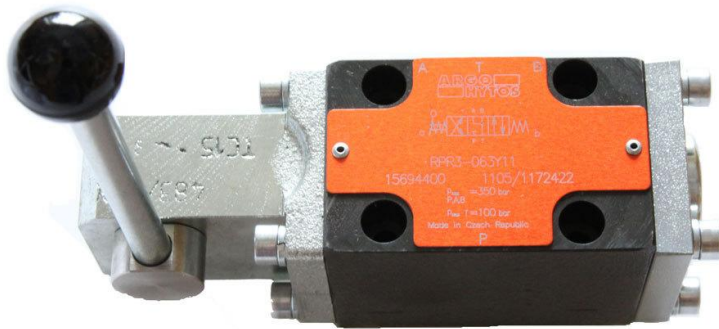


Kuva 7. Servoventtiili 4 WSE 2E ja sen ohjauskortti. (Bosch Rexrothin [www-sivut](http://www.boschrexroth.com), hakupäivä 14.2.2013)

3.6 Suuntaventtiilit

Suuntaventtiilin tehtävänä on tilavuusvirran ohjaaminen toimilaitteille, lisäksi niillä voidaan suorittaa käynnistyksiä ja pysäytyksiä. Suuntaventtiilit voidaan jakaa luistiventtiileihin ja istukkaventtiileihin. Molemmat voivat olla joko suoraanohjattuja tai esiohjattuja. Luistiventtiilit ovat yleisimmin käytettyjä niiden parempien ominaisuuksien vuoksi. (Exner, Freitag, Ing, Geis, Lang, Oppolzer, Schwab & Sumpf 1991, 189)

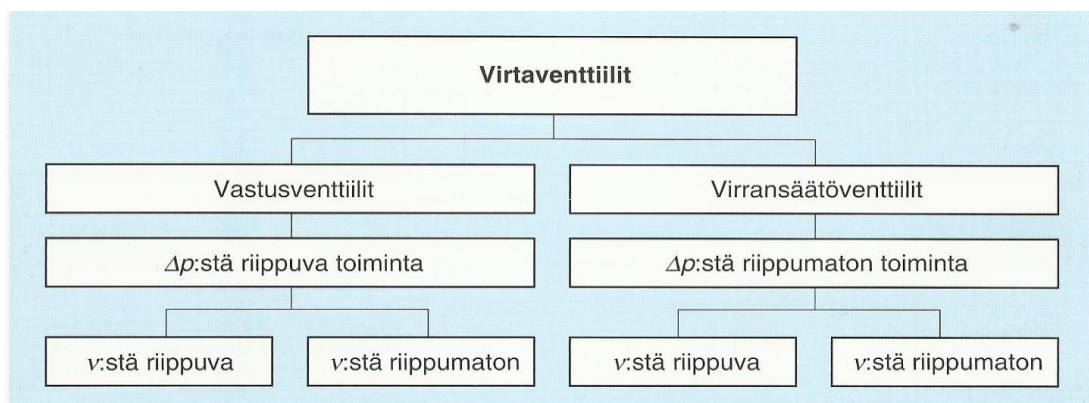
Luistiventtiilin etuja ovat sen yksinkertainen rakenne, suuri ohjausteho, pienet häviöt ja useat ohjausmahdollisuudet. Haittapuolena kyseisessä venttiilissä ovat vuodot, joita esiintyy etenkin suurilla, noin 200 - 350 baarin paineilla. Vuodot johtuvat luistin ja rungon pienestä välyksestä. Esiohjattua, eli sähköhydraulisesti ohjattua suuntaventtiiliä voidaan käyttää jopa maksimipaineella 350bar tilavuusvirran ollessa 4000l/min. Luistiventtiilit ovat yleensä joko käsi-, sähkö- tai sähköhydraulisesti ohjattuja. Kuvassa 8 on esimerkki yksinkertaisesta vipuohjatusta jousipalautteisesta 4/3-suuntaventtiilistä. (Exner ym. 1991, 189)



Kuva 8. Vipuohjattu jousipalautteinen 4/3-suuntaventtiili. (Salhydron www-sivut, hakupäivä 18.2.2013)

3.7 Virtaventtiilit

Virtaventtiileillä ohjataan toimilaitteen nopeutta kuristamalla nesteen virtauspoikkipinta-alaa. Virtaventtiilit voidaan jakaa virransäätö- ja vastusventtiileihin. Lisäksi on olemassa virranjakoventtiili, joka jakaa tilavuusvirran kahteen tai useampaan osaan. Yleisimpiä kuitenkin virtaventtiilit, jotka voidaan jaotella kuvan 9 mukaisesti:



Kuva 9. Virtaventtiilien jaottelu. (Exner ym. 1991, 241)

Vastusventtiileissä tilavuusvirta riippuu kuristuskohdan paine-erosta. Suurentamalla paine-eroa saadaan suurempi tilavuusvirta. Vastusventtiileitä käytetään kun vastustava kuormitus on vakio tai vaihtelevan kuormituksen aiheuttamalla nopeuden muuttumisella ei ole merkitystä. Vastuventtiileillä ylin käyttöpainne 350bar tilavuusvirran ollessa 350l/min. (Exner ym. 1991, 247)

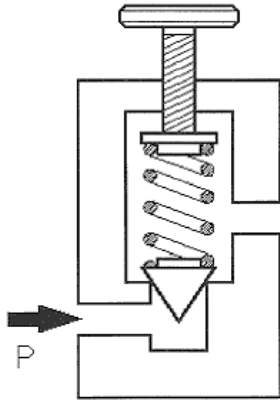
Virransäätöventtiilin tehtävänä taas on pitää tilavuusvirta vakiona painevaihteluista huolimatta. Tämä onnistuu säädettävän kuristuksen lisäksi olevalla liikkuvalla kuristimella, joka toimii säätökuristimena eli painekompensaattorina. Virransäätöventtiileillä ylin käyttöpainne voi olla 315bar tilavuusvirran ollessa 160l/min. Kuvassa 10 on esimerkkejä virransäätöventtiileistä. (Exner ym. 1991, 250)



Kuva 10. Virransäätöventtiileitä. (Exner ym. 1991, 250)

3.8 Paineventtiilit

Paineventtiilien tehtävänä on vaikuttaa järjestelmän tai sen osan paineeseen ennalta määrättyllä tavalla. Tehtävinä voi olla esimerkiksi järjestelmän ylikuormitussuojana toimiminen tai järjestelmän maksimipaineen määrittäminen. Paineenrajoitusventtiilit ovat usein proportionaaliventtiileitä. Vaikuttaminen tapahtuu muuttamalla kuristuspinnoja mekaanisella, hydraulisella, pneumaattisella tai sähköisellä asetuselimellä. Venttiilit voivat olla joko suoraan - tai esiohjattuja. Paineventtiileitä ovat paineenrajoitusventtiilit, painesekvenssiventtiilit, vapaakiertoventtiilit ja paineenalennusventtiilit. Kuvassa 11 on esitetty esimerkkinä suoraanohjatun paineenrajoitusventtiilin läpileikkaus. (Exner ym. 1991, 213)



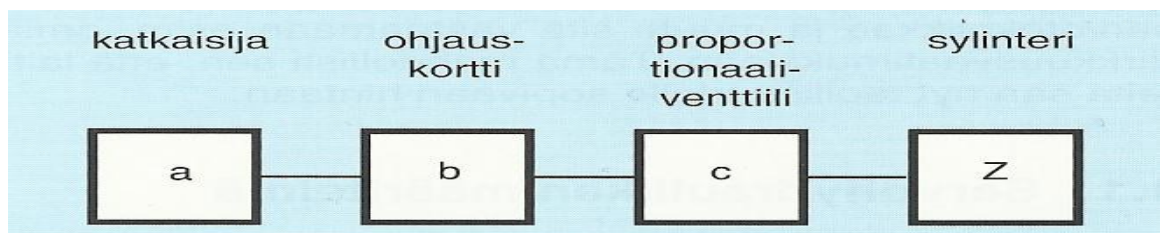
Kuva 11. Suoraanohjattu paineenrajoitusventtiili. (Wiki Metropolian www-sivut, hakupäivä 15.2.2013)

4 HYDRAULIIKAN SÄHKÖINEN OHJAUS

4.1 Avoin ohjauspiiri

Avoimessa ohjauspiirissä ei ole takaisinkytkentää kuten suljetussa säätöpiirissä. Ohjauspiirissä käyttäjä antaa käskyarvon, johon proportionaaliventtiili pyrkii toimilaitetta ajamaan. Johtuen erilaisista muuttujista kuten painehäviöistä ja muista systeemiin vaikuttavista häiriötekijöistä, käskyarvoon ei päästä täydellisesti. (Edwald ym. 1988, 132)

Suljettaessa katkaisijan a, ohjauskortti b antaa proportionaaliventtiilille c käskyarvoon verrannollisen signaalin. Venttiili avautuu ja antaa tilavuusvirran, jolloin sylinterin Z mäntä liikkuu. Kuva 12. (Edwald 1988, 132)



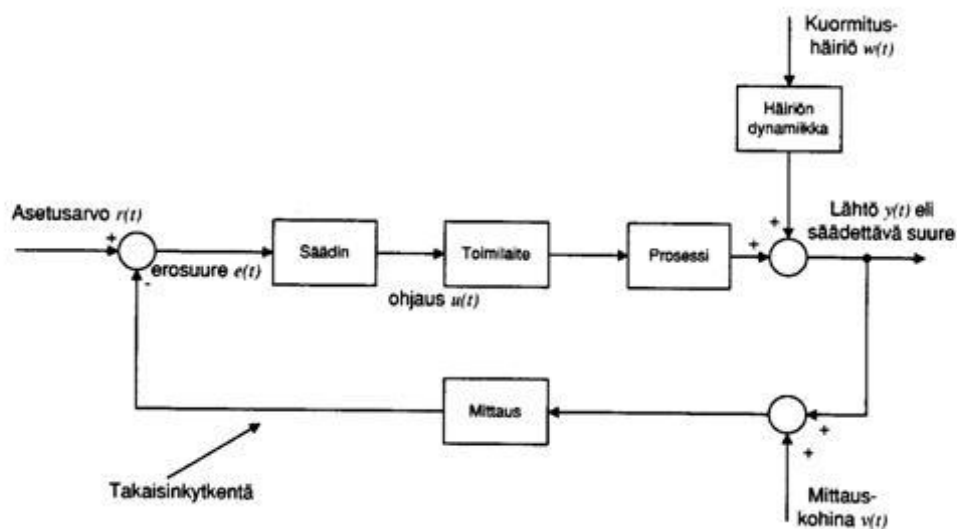
Kuva 12. Avoimen ohjauspiirin lohkokkaavio. (Edwald ym. 1988, 132)

Avoimen ohjauspiirin toistotarkkuus on vain rajallinen. Järjestelmään vaikuttaa useita eri häiriötekijöitä, jotka aiheuttavat avoimessa ohjauspiirissä lopputulokseen. Yleisimpiä häiriötekijöitä ovat putkistohäviöt, paine-erot, ja kitka. (Edwald ym. 1988, 132)

Avoimen piirin ohjaukset tarkoittavat lyhyesti sanottuna, että oloarvoa ei mitata eikä sitä näin ollen voi verrata annettuun käskyarvoon. Näissä järjestelmissä ulkoiset häiriöt vaikuttavat tulokseen. Ulkopuolisten häiriöiden kompensointi on mahdollista siirryttäessä suljettuun säätöpiiriin, jossa olo- ja käskyarvoa verrataan toisiinsa ja suoritetaan korjaus säätimen avulla. (Edwald ym. 1988, 157)

4.2 Suljettu säätöpiiri

Suljetun säätöpiirin ideana on, että annettua käskyarvoa verrataan oloarvoon. Näiden erotuksesta saadaan suljetun säätöpiirin erosignaali. Virhe vahvistetaan vahvistimessa ja sitä pyritään korjaamaan. Tästä saadaan selvä etu verrattuna avoimeen ohjauspiiriin. Avointa ohjauspiiriä häiritsevät tekijät eivät pääse vaikuttamaan suljetussa säätöpiirissä lopputulokseen juuri ollenkaan virheiden korjausten jälkeen. Kuvassa 13 on esitetty suljetun säätöpiirin lohkokaavio. (Edwald ym. 1988, 133)



Kuva 13. Suljetun säätöpiirin lohkokaavio. (Oulun seudun ammattikorkeakoulun www-sivut 2009, hakupäivä 10.3.2013)

Vahvistimen sisääntulossa muodostetaan käsky- ja oloarvojen erotus, mikä on suljetun säätöpiirin virhesignaali. Eroa käsitellään vahvistimessa, joka ohjaa servoventtiiliä. Servoventtiili reagoi ja sylinterin mäntä liikkuu. Tällöin myös potentiometrin asema muuttuu ja oloarvojännitteen suuruus lähenee käskyjännitettä, kunnes arvot ovat samat saavutettaessa haluttu asema. Tapahtuman aikana virhe pienenee jatkuvasti, ja huolimatta vahvistuksesta servoventtiilin kela saa yhä vähemmän virtaa. Tämän takia servoventtiili sulkeutuu vähittäin ja pienentää sylinterin männän liikenopeutta. Asemasäädössä ja paikoituksessa halutun aseman saavutettua, on ero nolla ja servoventtiili kiinni. (Edwald ym. 1988, 133)

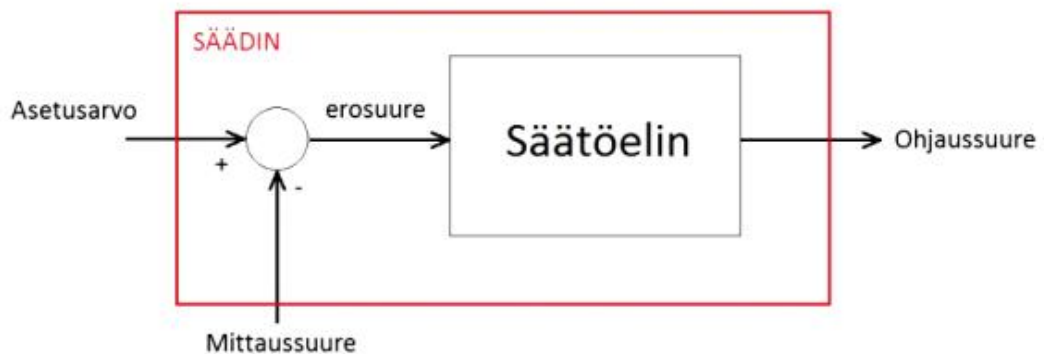
4.3 PID-säädin

PID-säädin koostuu kolmesta elimestä: vertoelimestä, integroivasta elimestä ja derivoivasta elimestä. Niitä kutsutaan P-, I- ja D -elimiksi. Lisäksi on olemassa kuolleen ajan elin T. Näitä yhdistelemällä saadaan aikaan erilaisia siirtoelimiiä. Tärkeimmät siirtoelimet ovat siis: P, PT, I, D ja T-elin. (Edwald ym. 1988, 175)

Suljetun säätöpiirin tärkeimmät tehtävät ovat ulkoisten häiriöiden eliminointi ja oloarvon säätäminen käskyarvoa vastaavaksi. Näiden elinten tehtävä on täyttää nämä tarpeet. (Edwald ym. 1988, 175)

4.3.1 Eroelin

Erosuureella tarkoitetaan yksinkertaisesti käyttäjän asettaman käskyarvon ja mitatun oloarvon erotusta. Eroelin muodostaa näistä arvoista erosuureen, jonka mukaan säädin korjaa ohjausarvoa (lähtösuuretta) siten, että mitta-arvo olisi mahdollisimman lähellä käyttäjän valitsemaa käskyarvoa. Kuvassa 14 on esitetty eroelintä havainnollistava kuva. (Edwald ym. 1988, 161)

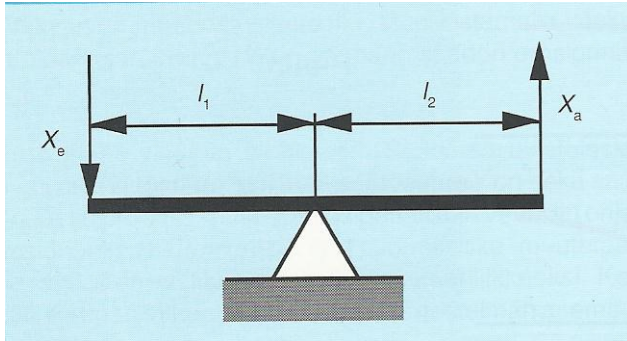


Kuva 14. Säätimen toiminta ja erosuureen muodostuminen. (Mäkinen 2010, Hakupäivä 12.3.2013)

On hyvä ymmärtää, että seuraavissa kappaleissa esiteltävät P-, I- ja -D-elimet operoivat juuri tätä erosuuretta, josta muodostuu säätimessä ohjaussuure eli lähtösignaali.

4.3.2 P-elin (vertoelin)

P-säädin on yksinkertainen säätömuoto, jota voidaan kutsua suhteelliseksi säätimeksi. Siinä lähtösignaali on suorassa suhteessa tulosignaaliin. Tulosuureen X_e askelmaisella muutoksella myös lähtösuure X_a muuttuu askelmaisesti kuvan 15 havainnollistamalla tavalla. (Edwald ym. 1988, 164)



Kuva 15. Havainnollistava keinulautakuva P-säätimestä. (Edwald ym. 1988, 164)

Lähtösuure on:

$$X_a = \frac{X_e * l_2}{l_1} = K * X_e \quad (1)$$

missä

X_e on ero-suure

X_a on lähtösuure

K on vertoelimen vahvistuskerroin

l_1 ja l_2 on etäisyys keinulaudan keskikohdasta

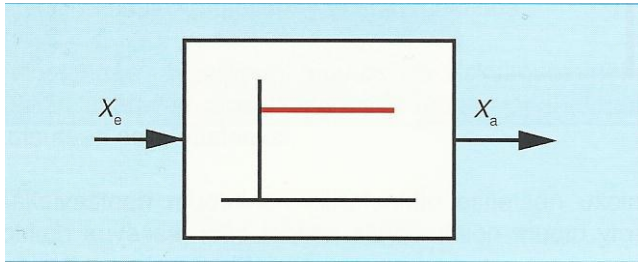
Tällöin vertoelimen vahvistuskerroin (siirtofunktion vakio) on:

$$K = \frac{l_2}{l_1} \quad (2)$$

Toisin sanottuna X_a ja X_e ovat toisiinsa nähden verrannollisia. Tätä kutsutaan suhteelliseksi säätöominaisuudeksi. (Edwald ym. 1988, 164)

P-säätimen hyviä puolia ovat sen yksinkertainen rakenne, helppo viritys ja sen nopea reagointi säädettävän suureen muutoksiin. P-säätimellä ei kuitenkaan saada säädettävää suuretta aivan samaksi kuin käskyarvo. Järjestelmään jää aina vahvistuskertoimesta riippuva virhe. P-säädin vaatii toimiakseen säätöpoikkeaman, koska jos

säätöpoikkeama on nolla, niin P-säätimen lähtö on myös nolla. Kuvassa 16 on esitetty P-elimien symboli. (Edwald ym. 1988, 171)



Kuva 16. P-elimien symboli. (Edwald ym. 1988, 164)

4.3.3 I-elin (integraoiva elin)

Nimensä mukaistesti I-elin eli integraoiva elin muodostaa sisääntulosuureen aikaintegraalin.

Integroivassa elimessä lähtösignaali kasvaa lineaarisesti ajan t funktiona.

$$X_a = K * \int X_e(t) * dt \quad (3)$$

missä

X_a on lähtösuure

K on I-elimien vahvistuskerroin

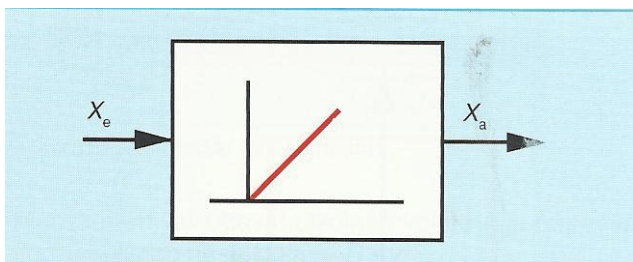
X_e on tulosuure

t on integroimisaika

Siirtofunktion vakioa K kutsutaan myös I-elimien vahvistuskertoimeksi.

I-säätimessä ulostulosuureen muutos ajan suhteen on verrannollinen säätöpoikkeamaan.

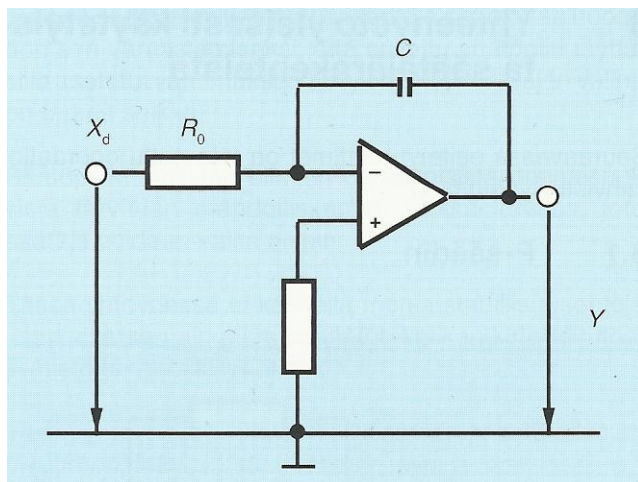
Kuvassa 17 on esitetty I-elimien symboli. (Edwald ym. 1988, 165)



Kuva 17. I-elimien symboli. (Edwald ym. 1988, 165)

Ajan kuluessa pieninkin erosuure kasvaa suureksi lähtösignaaliksi, ja näin ollen integroiva säädin eliminoi periaatteessa täysin kaikki suljetun säätöpiirin virheet. Kuitenkin I-säädin reagoi melko hitaasti säädettävän suureen muutoksiin. Tästä seuraavat pitkät asettumisajat ja lisäksi järjestelmässä voi esiintyä säädettävän suureen suuriakin yliheilahduksia. (Edwald ym. 1988, 172)

I-elimien erityispiirteenä on ulostulosuureen muuttuminen niin kauan, kun tulosuure on muu kuin nolla. Lähtöjännite ei muutu, kun tulojännitteen arvo on nolla. Piirin rakenteen mukaan ulostulojännitteen merkki käännetään tarvittaessa. Askelmainen tulojännitteen muutos aiheuttaa ajan funktiona lineaarisesti kasvavan lähtöjännitteen. I-säätimen ominaispiirre on integrointiaikavakio. Se on aika, minkä integraattori tarvitsee ulostulojännitteen X_a muodostamiseksi, kun X_e on askelmainen tulojännite. Kuvassa 18 on esitetty operaatiovahvistimella toteutettu integraattori. (Edwald ym. 1988, 172)



Kuva 18. Operaatiovahvistimella toteutettu integraattori. (Edwald ym. 1988, 172)

Integrointiaikavakioksi sanotaan sitä aikaa, jonka I-säädin tarvitsee ulostulojännitteen muodostamiseksi.

Integrointiaikavakio on:

$$T_I = R_0 * C \quad (4)$$

missä

T_I on integroimisaika

R_0 on resistanssi

C on kapasitanssi

Tai sen käänteisluku:

$$K_I = \frac{1}{T_I} \quad (5)$$

missä

K_I on integroimisaikavakio

T_I on integroimisaika

Tulojännite X_e on suljetun piirin virhe (erosuure):

$$X_e = W - X \quad (6)$$

missä

W on käskyarvo

X on mittausarvo

X_e on erosuure

Lähtöjännite on käskyarvo.

$$Y(t) = U_a(t) = \frac{-1}{T_I} \int_0^t X_a(t) dt \quad (7)$$

missä

Y on ulostulosuure

U_a on ulostulojännite

X_e on erosuure

T_I on integroimisaika

(Edwald ym. 1988, 172)

4.3.4 D-elin (derivoiva elin)

Derivoiva säädin toimii muutosnopeuden mukaan. Säädintä ei voi yksinään käyttää suljetussa säätöpiirissä, mutta D-säädintä voidaan yhdistellä muiden säätimien kanssa, jolloin saadaan aikaan esimerkiksi PD- tai PID-säädin. (Edwald ym. 1988, 174)

Lähtösignaalin X_a suuruus on riippuvainen tulosignaalin X_e muutosnopeudesta.

$$X_a = K * dX_e \quad (8)$$

$$\dot{X}_e = \frac{dX_e}{dt}$$

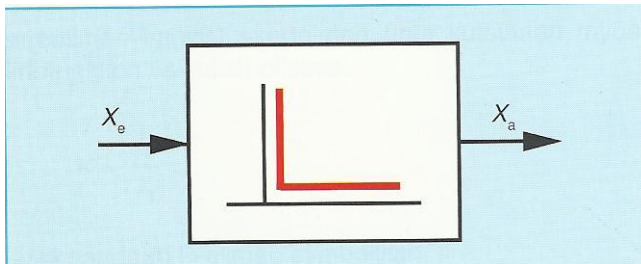
missä

X_a on lähtösignaali

X_e on tulosignaali

K on derivoinnin vahvistuskerroin

Kuvassa 19 on esitetty D-elimien symboli. (Edwald ym. 1988, 166)



Kuva 19. D-elimien symboli. (Edwald ym. 1988, 166)

Derivoivan elimen ulostulosuure Y on verrannollinen tulosuureen X_d muutosnopeuteen.

$$Y(t) = \frac{\Delta X_d}{\Delta t} \quad (9)$$

$$Y(t) = K_d * \frac{dX_d(t)}{dt} = -T_D \frac{dX_d(t)}{dt}$$

missä

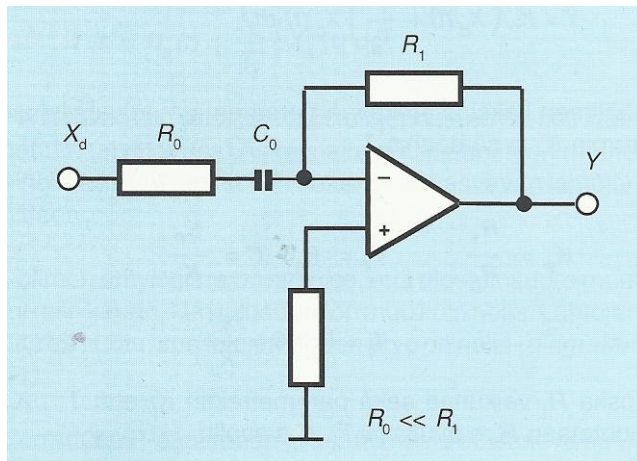
K_d on derivoinnin vahvistuskerroin

T_D on derivointiaikavakio

X_d on tulosuure

Y on ulostulosuure

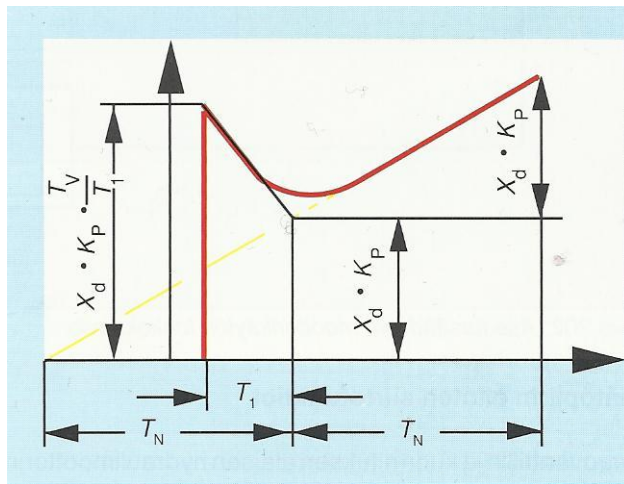
Kuvassa 20 on esitetty operaatiovahvistimella toteutettu derivaattori. (Edwald ym. 1988, 166)



Kuva 20. Operaatiovahvistimella toteutettu derivaattori. (Edwald ym. 1988, 174)

4.3.5 PID-säädin

Kolmen säätimen yhdistelmä, jonka parametreja voidaan muuttaa, pystytään virittämään lähes mihin tahansa säätöjärjestelmään. PID-säätimen hyvien dynaamisten ominaisuuksien lisäksi saadaan järjestelmän staattinen säätövirhe poistettua. Kuvassa 21 on esitelty PID-säätimen toimintaa havainnollistava kuva. (Edwald ym. 1988, 175)



Kuva 21. PID-säätimen toimintaa havainnollistava diagrammi. (Edwald ym. 1988, 175)

Lähtösuure Y on yhdistelmä P-, I- ja D-säätimien ulostuloista.

$$Y = K_p * X_d(t) + K_I \int X_d(t)dt + K_D \frac{dX_d(t)}{dt} \quad (10)$$

$$Y = K_p \left(X_d(t) + \frac{K_I}{K_p} \int X_d(t)dt + \frac{K_D}{K_p} \frac{dX_d(t)}{dt} \right)$$

missä

Y on ulostulosuure

K_p on P-elimien vahvistuserroin

K_I on I-elimien vahvistuserroin

K_D on D-elimien vahvistuserroin

X_d on erosuure

5 SERVOHYDRAULIIKAN OPETUSLAITTEEN KÄYTTÖSOVELLUKSET

Seuraavissa kappaleissa esitellään servohydrauliikan opetuslaitteen mahdollistamia opetussisältöjä tehtävien muodossa.

5.1 Asema-anturin kalibrointi ja toiminta

Tehtävän tarkoituksena on tutustua asema-anturin toimintaan ja kalibrointiin. Käytössä oleva asema-anturi, eli potentiometri, on Novotechnic TLH 500.

Oppimistavoitteet:

- asema-anturin toiminta ja kalibrointi
- asema-anturin sijainti järjestelmässä
- asema-anturin antamien paikkatietojen lukeminen ja niiden käyttäminen sylinterin paikoituksessa.

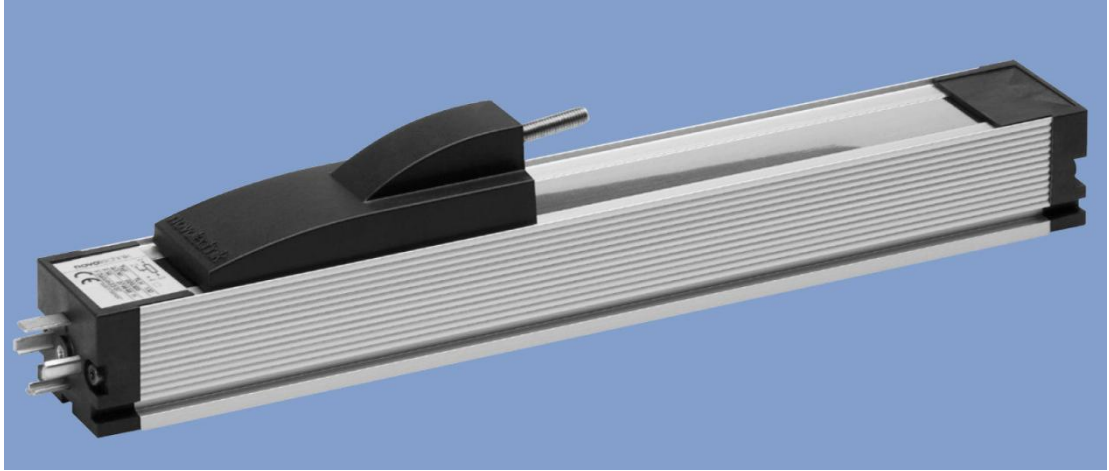
Kuvaus käytännön harjoituksesta:

- koelaitteen käynnistäminen, keskeiset säädöt ja turvallisuusnäkökohdat
- ohjausyksikön käynnistäminen ja toimintojen sijainti
- asema-anturin käyttöön ottoon tarvittavat kytkennät ja tuloksien lukeminen yleismittarilla
- sylinterin paikoitus asema-anturin avulla.

Harjoituksen jälkeen opiskelija osaa kalibroida asema-anturin, tehdä tarvittavat kytkennät ja tulkita asema-anturin antamia paikkatietoja yleismittarilla.

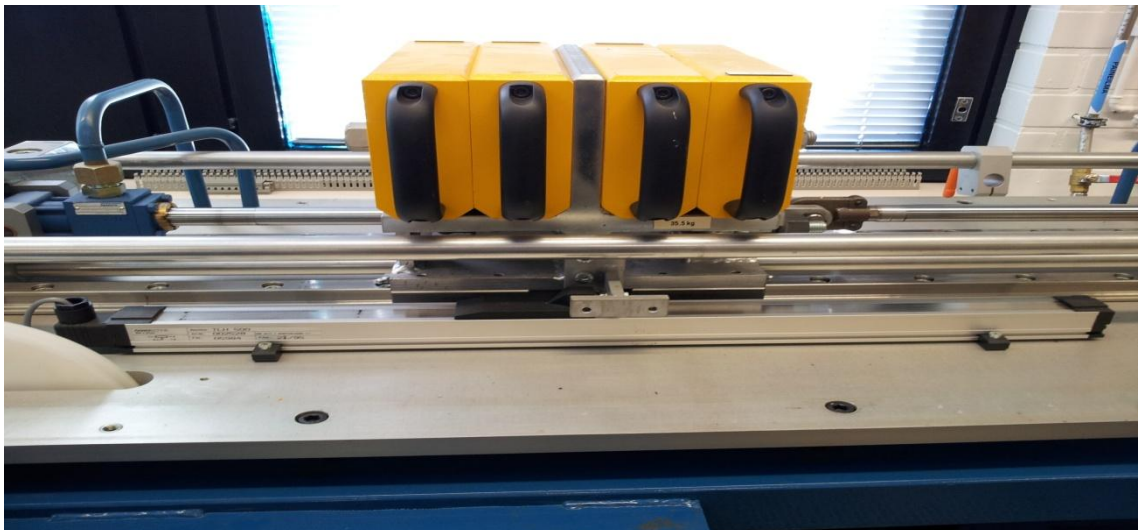
Tehtävään käytettävä aikamäärä teoriaosuudelle 1h ja käytäntöön 1h. Tehtävän materiaalina toimivat asema-anturin tuotelehti, koelaitteen ohjausyksikön käyttöohje ja tämä opinnäytetyö.

Asema-anturina toimii siis Novotechnic TLH 500. Asema-anturia voidaan kutsua myös potentiometriksi. Potentiometrin tehtävänä on mitata sylinterin tai muun toimilaitteen paikkatietoa. Potentiometri on yksi suljetun piirin tärkeimmistä osista. Kuvassa 22 Novotechnic:n TLH-sarjan asema-anturi.



Kuva 22. Novotechnic TLH 500 asema-anturi. (Novotechnic:n www-sivut, hakupäivä 23.3.2013)

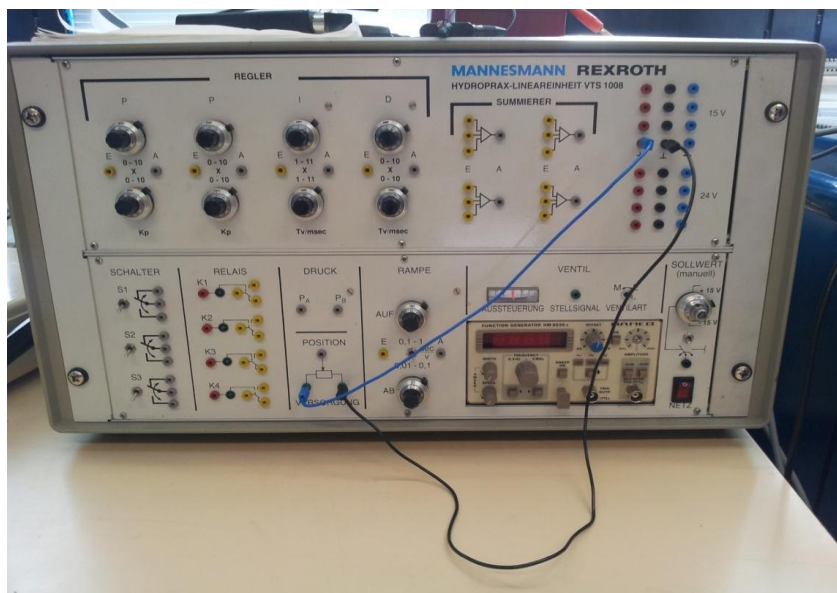
Novotechnic TLH 500 asema-anturin tarkkuus on luokkaa 0.01mm ja anturin pituus on 500mm. Anturi lukee servoventtiilillä ajettavan pääsylinterin liikkeitä reaaliaikaisesti, jolloin suljetun säätöpiirin ehdot täyttyvät ja voidaan muodostaa käskyarvon ja todellisen arvon välinen eroarvo.



Kuva 23. Asema-anturin sijainti hydraulikoneikossa.

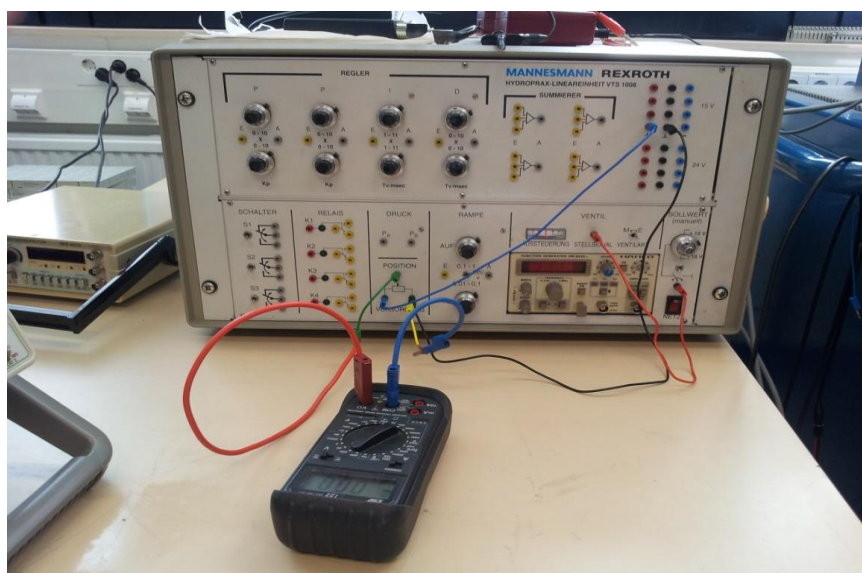
Asema-anturin sijainti on pääsylinterin männänvarren vieressä, jossa se mittaa sylinterillä ajettavan massan sijaintia (Kuva 23).

Asema-anturin ulostuloliitäntä sijaitsee ohjausyksikön keskellä alalaidassa kohdassa POSITION. Asema-anturin lukemisen aloittamiseksi anturiin täytyy kytkeä maa ja +15V kuvan 24 mukaisella kytkennällä.



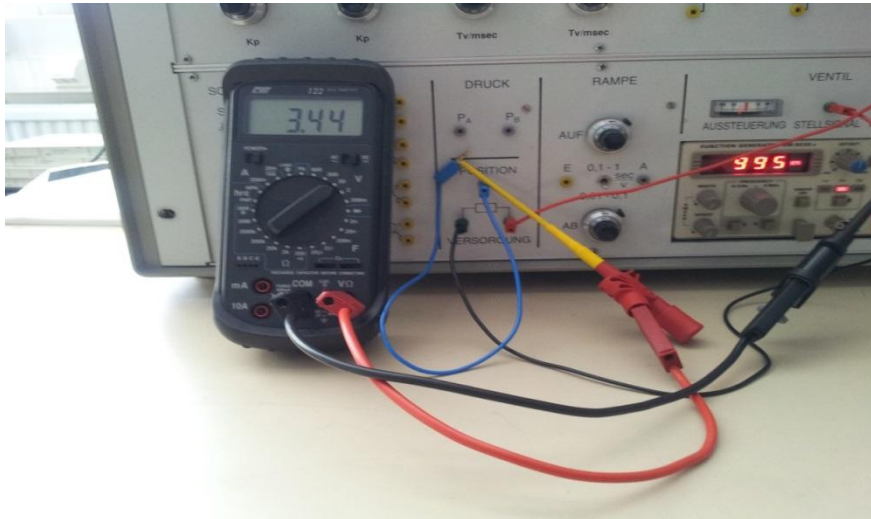
Kuva 24. Asema-anturin kytkeminen (vaihe 1).

Asema-anturin antamaa dataa on järkevin lukea yleismittarilla. Vaiheen 1 jälkeen kytketään yleismittarin plusjohto kohtaan POSITION ja maajohto (COM) kytketään maahan kuvan 25 mukaisesti. Lisäksi, jotta sylinteriä voidaan liikuttaa, kytketään venttiiliin käsiajo (manuell) päälle (kuva 32).



Kuva 25. Asema-anturin kytkeminen (vaihe 2).

Asema-anturi voidaan kalibroida, kun edellä mainitut kytkennät on tehty. Asema-anturin kalibrointi tapahtuu siten, että ajetaan sylinteri vuoron perään molempiin ääripäihin, jolloin voidaan lukea näyttönä toimivasta yleismittarista sylinterin asemaan verrannollinen jännite. Lisäksi otetaan muutama piste väliltä, jolloin saadaan piirrettyä asema-anturista kuvaaja. Kuvaajan avulla saadaan selville kulmakerroin, jonka avulla voidaan suorittaa servoventtiilillä asemapaikoitus.

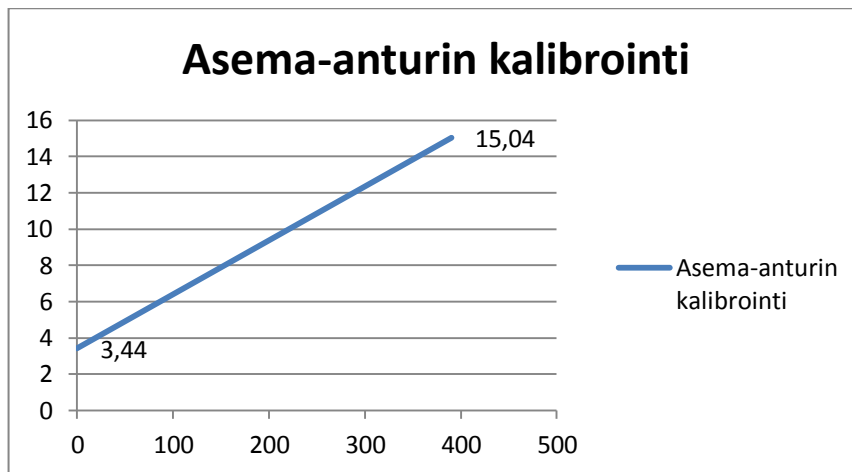


Kuva 26. Sylinteri ajettu täysin vasempaan laitaan.

Sylinteri ajetaan täysin sisään, jolloin sylinterin iskun pituus on 0mm. Tällöin voidaan havaita, että yleismittarissa sitä vastaava lukema on 3,44V (Kuva 26). Tämän jälkeen sylinteri ajetaan täysin oikeaan laitaan ja havaitaan, että yleismittari antaa lukemaksi 15,04V sylinterin iskun ollessa 390mm, kuten kuvassa 27.



Kuva 27. Sylinteri ajettuna täysin oikeaan laitaan.



Kuvio 4. Asema-anturin kalibrointi ja kulmakertoimen määrittäminen.

Kuviossa 4 on esitetty potentiometrin lineaarisuus.

Suoran yhtälön kaavasta:

$$Y = kx + B \quad (11)$$

Saadaan:

$$U = kS + U_0,$$

missä

U on jännite

S on sylinterin iskun pituus

U_a on jännite, kun sylinteri on ajettu täysin sisään

k on yhtälön kulmakerroin

Koska kulmakerroin k on muotoa:

$$k = \frac{y_2 - y_1}{x_2 - x_1} = \frac{U - U_0}{S - S_0} = \frac{15,04V - 3,44V}{390mm - 0mm} \quad (12)$$

$$k = 0,0297 \frac{V}{mm}$$

tällöin suoran yhtälön kaavasta johtamalla saadaan aseman paikoittamisen mahdollistava kaava muotoon:

$$U = kS + U_0, \text{ eli}$$

$$U = 0,0297 \frac{V}{mm} * S + 3,44V .$$

Nyt, kun halutaan ajaa sylinteri tiettyyn asemaan S , sijoitetaan sylinterin iskun pituus kaavaan S :n paikalle, jolloin saadaan kyseistä asemaa vastaava jännite U .

Esimerkiksi: Halutaan ajaa sylinteri asemaan $S = 100\text{mm}$

$$U = 0,0297 \frac{V}{mm} * S + 3,44V$$

$$U = 0,0297 \frac{V}{mm} * 100\text{mm} + 3,44V$$

jolloin

$$U = 6,41V$$

Tällöin tehdään ylempänä mainitut kytkennät ja käytetään yleismittaria näyttönä. Käsiäjolla nupikasta käännetään kunnes yleismittari antaa jännitteeksi $6,41V$ ja sylinteri on silloin asemassa $S = 100\text{mm}$.

5.2 Servoventtiilin rakenne ja toiminta

Tehtävän tarkoituksena on tutustua servoventtiilin rakenteeseen ja toimintaan. Servoventtiilinä käytetään Bosch Rexroth:n valmistamaa suuntaservoventtiiliä 4WS E 10-40/45.

Oppimistavoitteet:

- servoventtiilin rakenne ja toiminta
- venttiilin suora ohjaus ulkoisella jännitteellä
- venttiilin tuottama vaste (virtaus, hydraulisynterinin liike).

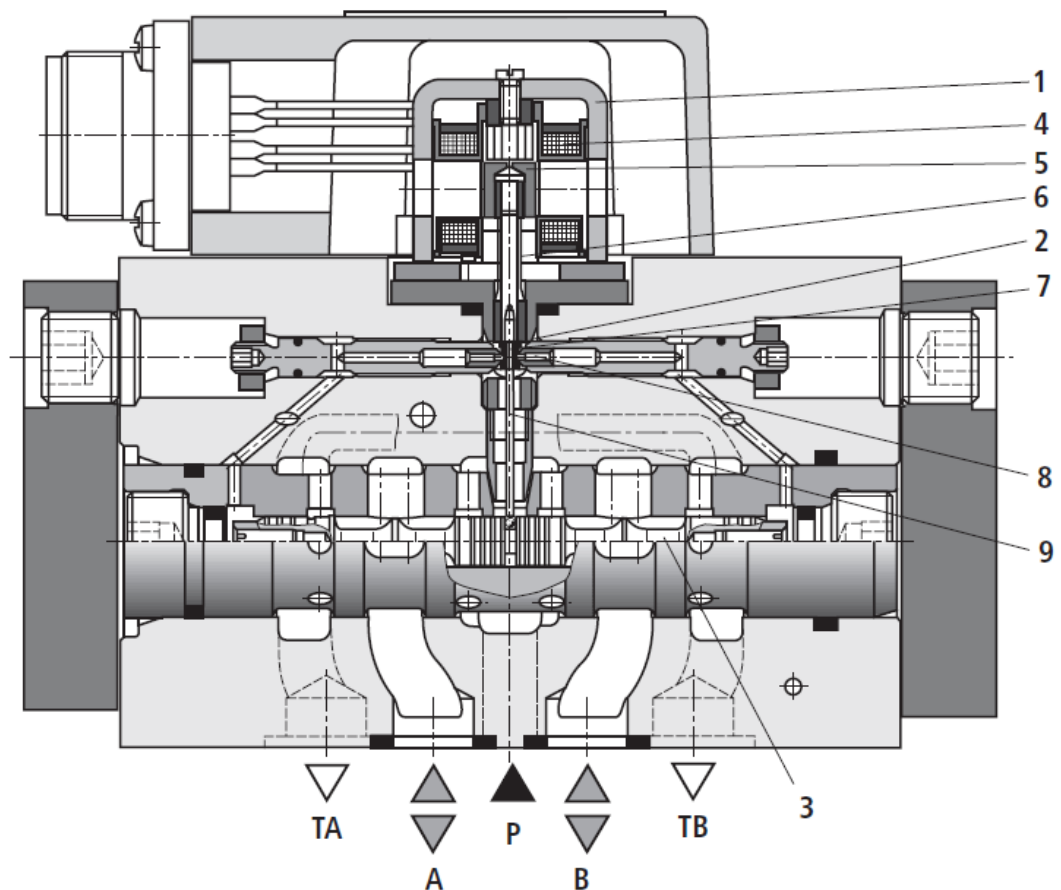
Kuvaus käytännön harjoituksesta:

- koelaitteen käynnistäminen, keskeiset säädöt ja turvallisuusnäkökohdat
- ohjausyksikön käynnistäminen ja toimintojen sijainti
- jänniteohjauksen muodostaminen servoventtiiliä varten manuaalisesti
- jänniteohjauksen muodostaminen servoventtiiliä varten funktiogeneraattorilla
- sylinterin liikkeen havainnointi.

Harjoituksen jälkeen opiskelija osaa ottaa käyttöön hydraulisen laitteen ja ohjausyksikön, ohjata sylinteriä eteen ja taakse sekä manuaalisesti että funktiogeneraattorilla ja osaa havainnoida sylinterin liikettä asema-anturin avulla.

Tehtävään käytettävä aikamäärä teoriaosuudelle 1,5h ja käytäntöön 1,5h. Tehtävän materiaalina toimivat venttiilin tuotelehti, koelaitteen ohjausyksikön käyttöohje ja tämä opinnäytetyö.

Venttiilityyppi 4WS E 10-40/45 on sähköisesti ohjattu 2-asteinen suuntaservoventtiili. Näitä venttiilejä käytetään yleensä suljetuissa säätöpiireissä ohjaamaan asemaa, voimaa/painetta ja nopeutta. Venttiilin ylin sallittu käyttöpaine on 315bar ja sen suurin tilavuusvirta on 40-45l/min.



Kuva 28. 3/4 suuntaservoventtiili. (Mannesmann Rexroth 4WS 2E. Tuotelehti.)

Kuvassa 28 on suuntaservoventtiilin poikkileikkauskuva. Servoventtiilin tärkeimmät osat ovat vääntömoottori (1), hydraulinen vahvistin (2), ohjausluisti (3),

vääntömoottorin käämit (4), ankkuri (5), vääntöputki (6), läppä (7), säätösuuttimet (8) ja mekaanisena palautuksena toimiva jousi (9).

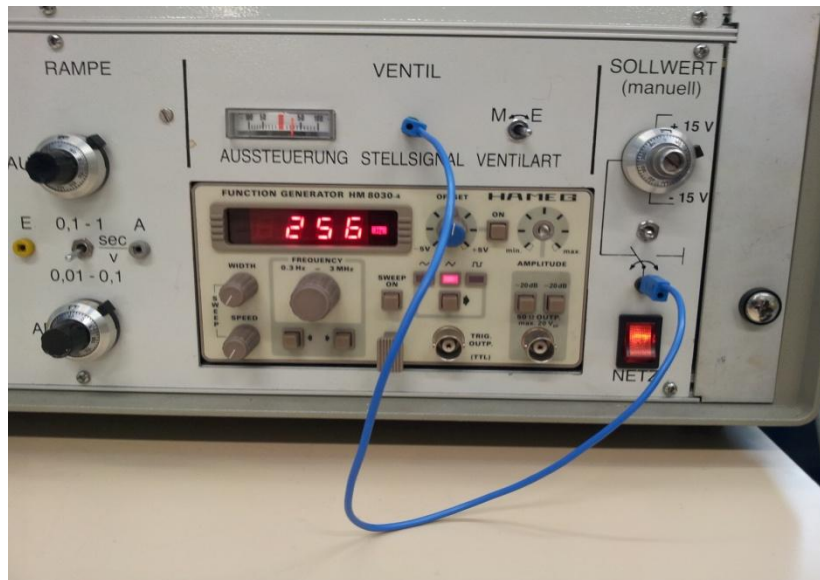
Lisäksi venttiili tarvitsee toimiakseen sähköisen ohjaukseen, jolle syötetään käskyjä erillisellä ohjausyksiköllä.

Hydrauliikkakoneikko kytketään toimintavalmiuteen kääntämällä kuvassa 29 näkyvästä punaisesta virtakytkimestä virrat päälle, tarkistetaan, ettei turvakytkin ole pohjassa ja painetaan vihreästä napista virta päälle, jolloin hydrauliikka käynnistyy.



Kuva 29. Hydrauliikkakoneikko.

Servoventtiilin suora ohjaus ulkoisella jännitteellä onnistuu ohjausyksikön avulla kuvan 30 mukaisesti.

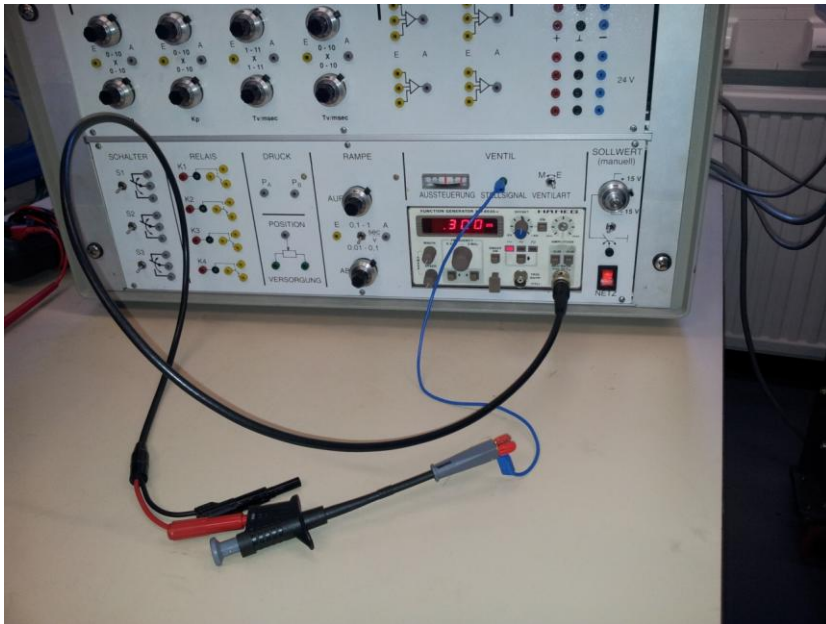


Kuva 30. Servoventtiilin suora ohjauskytkentä.

Servoventtiilin suora ohjauskytkentä saadaan aikaan kytkemällä johto SOLLWERT (manuell) ja VENTIL (venttiililohko) välille. Virtakytkin sijaitsee ohjausyksikön oikeassa alalaidassa. Tällä kytkennällä voidaan sylinteriä ajaa eteen ja taakse säätämällä jännitettä manuaalisesti -15V ja +15V välillä. Venttiili on keskiasennossa, kun ohjausnappi on asennossa $5,0 = 0V$ ja muutos on 3V yhdellä säätönupin kierroksella.

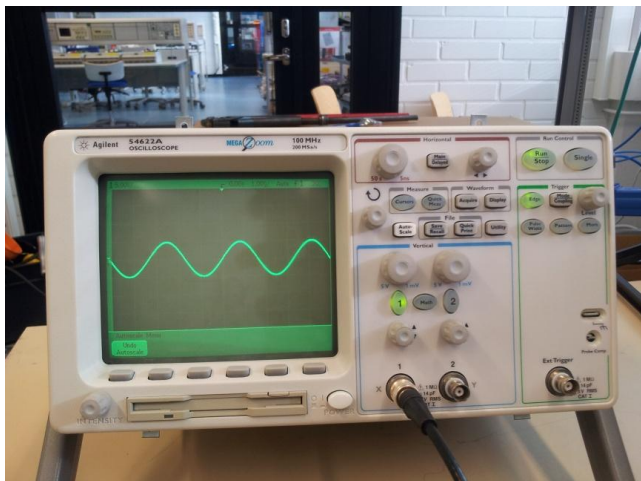
Servoventtiiliä voidaan ajaa myös funktiogeneraattorilla. Funktiogeneraattorilla voidaan venttiilille syöttää sinimuotoista, askelmaista tai sahalaitaista jännitettä.

Sylinterin liikkeistä pystyy kyllä havaitsemaan erimuotoisten jännitteiden aiheuttaman tuloksen, mutta asian todentamiseen on järkevä käyttää oskilloskooppia, jolla nähdään parhaiten syötetyn jännitteen muoto.

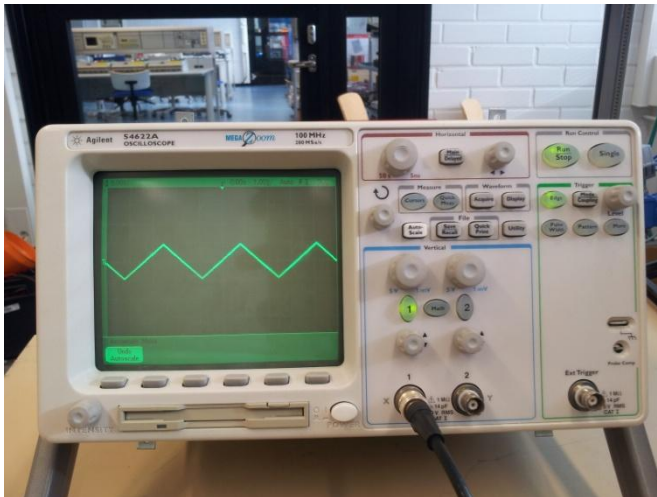


Kuva 31. Sylinterin ajaminen funktiogeneraattorin avulla.

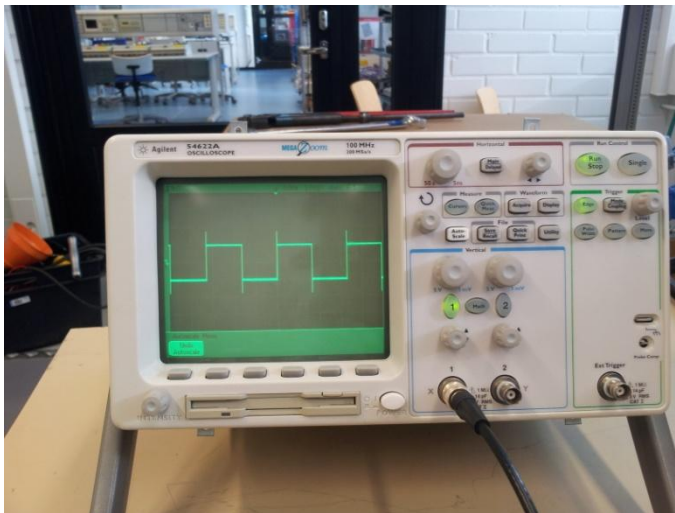
Funktiogeneraattorilla syötetään jännitettä venttiilille kuvan 31 mukaisella kytkennällä. Jännitettä voidaan muokata säätämällä taajuutta (frequency), amplitudia tai offsettia. Oskiloskoopista voidaan helposti havaita muutokset. Kuvista 32, 33 ja 34 selviää, miltä näyttävät funktiogeneraattorilla syötetyt jännitteet siniaalto, saha-aalto ja askelmainen jännite.



Kuva 32. Funktiogeneraattorilla syötettyä sinimuotoista jännitettä.



Kuva 33. Funktiogeneraattorilla syötettyä sahalaista jännitettä.



Kuva 34. Funktiogeneraattorilla syötettyä askelmaista jännitettä.

5.3 PID-säätimen elinten toiminta ja käyttäytyminen

Tehtävän tarkoituksena on tutustua PID-säätimen toimintaan ja virittämiseen. Käytössä oleva PID-säädin löytyy sähköisestä ohjausboksista, jokainen elin omana operaattorinaan.

Oppimistavoitteet:

- P-, I- ja -D säädinten toiminta ja käyttäytyminen
- Servoventtiilin ajaminen PID-säätimellä

Kuvaus käytännön harjoituksesta:

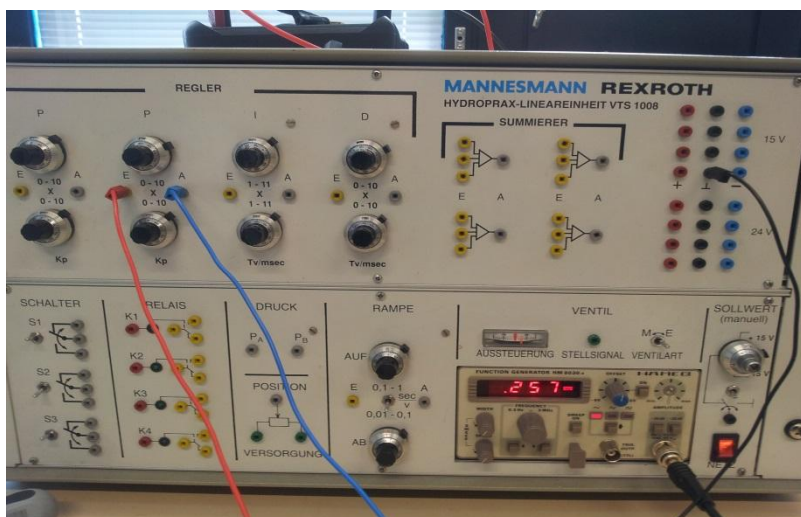
- Koelaitteen käynnistäminen, keskeiset säädöt ja turvallisuusnäkökohdat
- Ohjausyksikön käynnistäminen ja toimintojen sijainti
- PID-säätimen käyttöönotto ja tarvittavat kytkennät
- Eri toimintojen kokeileminen ja toiminnan todentaminen

Harjoituksen jälkeen opiskelija osaa tehdä tarvittavat kytkennät PID-säätimen käyttöönttamiseksi ja tietää, mistä kyseinen säädin löytyy itse ohjausyksiköstä.

Tehtävään käytettävä aikamäärä teoriaosuudelle 2h ja käytäntöön 1,5h. Tehtävän materiaalina toimivat koelaitteen ohjausyksikön käyttöohje ja tämän opinnäytetyön kappale numero 4, josta löytyy PID-säätimen teoria sekä asiaa suljetusta ja avoimesta piiristä.

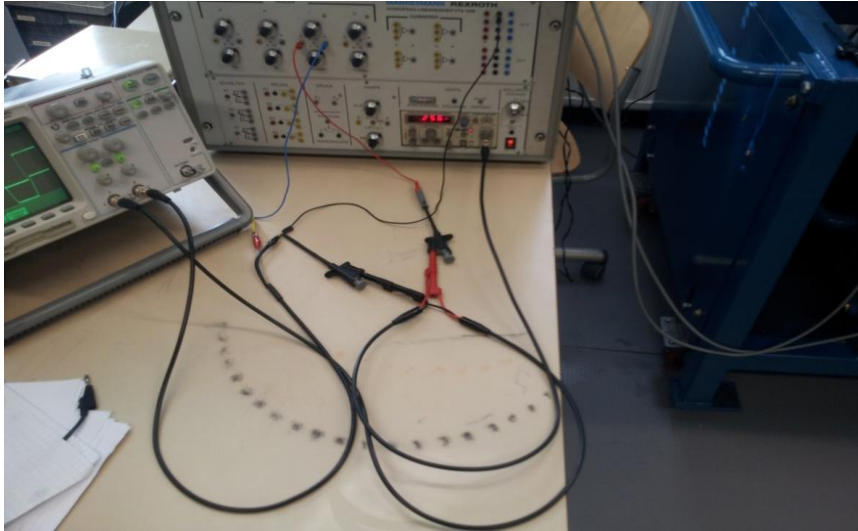
P-säätimen toiminnan toteaminen:

PID-säätimen toimintaan tutustuminen on järkevintä toteuttaa siten, että funktiogeneraattorilla viedään säätimelle jännite ja säätimen molemmille puolin kytketään oskilloskooppi, jonka näytöltä voidaan havaita kunkin operaattorin vaikutus signaaliin. Kuvassa 35 on esitelty P-säätimen käyttöönttaminen.



Kuva 35. P-säätimen käyttöönttaminen.

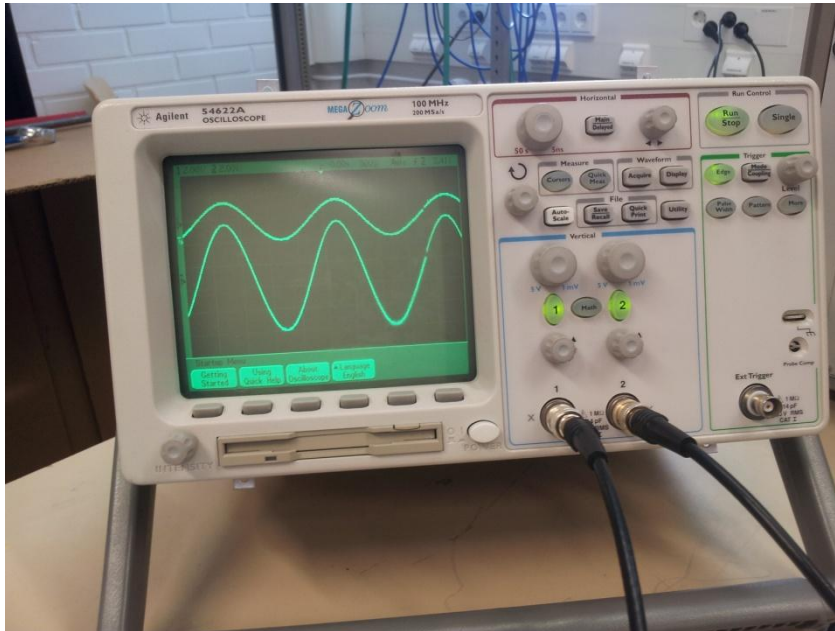
Funktiogeneraattorilta viedään jännite P-säätimen kanavaan E. Samaan johtoon kytketään myös oskilloskooppi kanavaan 1. P-säätimen kanavasta A viedään P-säätimen vahvistama jännite oskilloskoopin kanavaan 2. Tämän lisäksi vielä maadoitetaan kytkentä samaan maajohtoon. Kuva 36.



Kuva 36. P-säätimen kytkeminen.

Viedään P-säätimelle sinimuotoinen aalto:

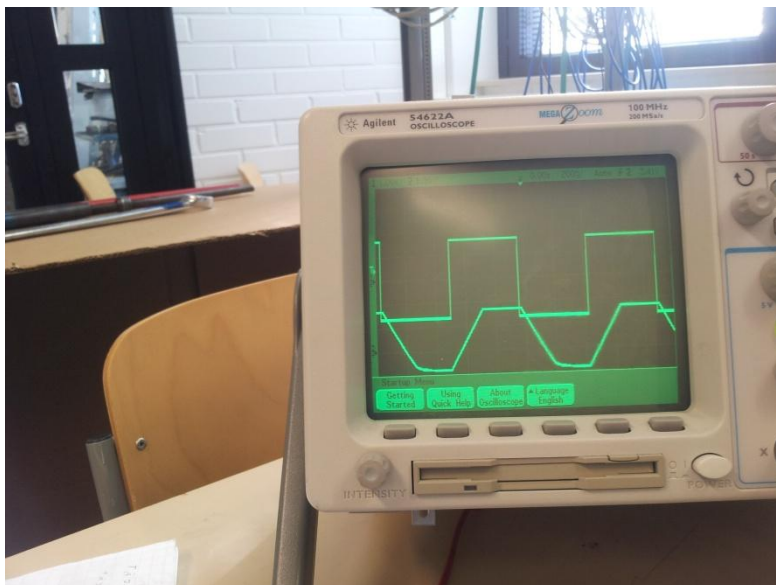
Parhaiten P-säätimen vaikutuksen näkee sinimuotoisesta aallosta. P-säädin on niin sanottu suhdesäädin, eli säädin vahvistaa signaalin. Kuvassa 37 nähdään, kuinka P-säädin vahvistaa siniaallon kolminkertaiseksi, vahvistuskertoimen ollessa 3. Näin ollen voimme todeta, että P-säädin toimii niin kuin pitääkin. Mikäli P-säätimen kertoimen säätää liian isolle, alkaa säätöpiiri värähdellä ja tilanteesta tulee epästabiili.



Kuva 37. P-säätimen vahvistama siniaalto.

I-säätimen toiminnan toteaminen:

I-säädin otetaan käyttöön kuten P-säädinkin, mutta johdot kytketään I-säätimen E- ja A-kanaviin. Silloin oskilloskoopin kanavassa 1 näkyy säätimelle viety jännite sellaisenaan ja kanavasta 2 voidaan seurata kuinka I-säädin toimii.



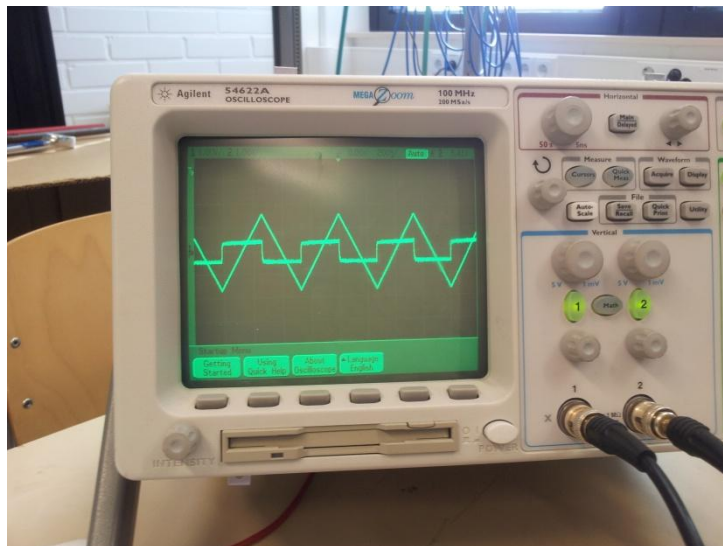
Kuva 38. I-säätimen integroima askelmainen jännite.

I-säädin toimii, kun signaali vaihtelee 0-tason molemmin puolin mahdollisimman tasaisesti siten, että 0-taso on signaalin puolivälissä. Signaalia säädetään offsettiä

muuttamalla. Parhaiten I-säätimen vaikutuksen näkee joko siniaallosta, joka integroituu negatiiviseksi cosiniaalloksi, tai sitten askelmaisesta aallosta kuten kuvassa 38. I-säädin lähtee nostamaan askeleen nousun kohdalla kertoimen mukaisesti jännitettä kohti käskyarvoa ja laskun kohdalla laskemaan kohti käskyarvoa. Näin muodostuu ramppi, jonka kulmaa voidaan loiventaa tai jyrkentää kertoimia muuttamalla. Nyt voidaan todeta, että I-säädin toimii niinkuin pitääkin.

D-säätimen toiminnan toteaminen:

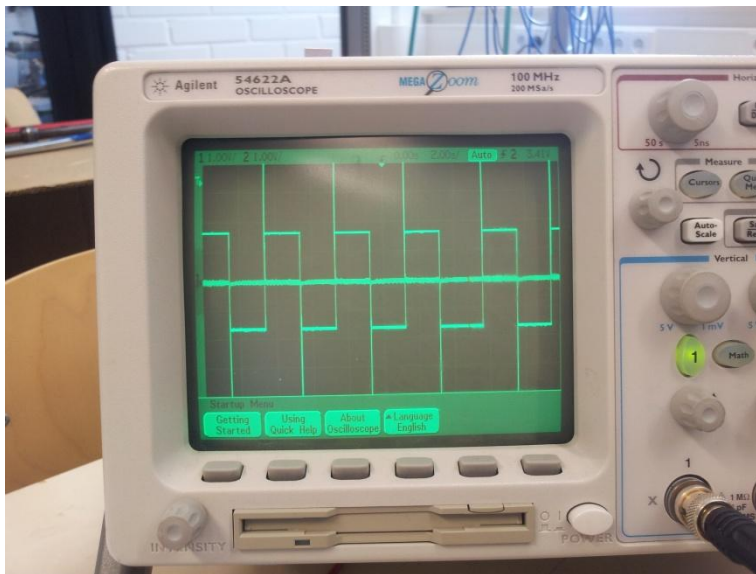
D-säädin otetaan käyttöön kuten P-säädinkin, mutta johdot kytketään D-säätimen E- ja A-kanaviin. Silloin oskilloskoopin kanavassa 1 näkyy säätimelle viety jännite sellaisenaan ja kanavasta 2 voidaan seurata kuinka D-säädin toimii.



Kuva 39. D-säätimen derivoimaa saha-aaltoa.

D-säätimen toiminnan voi parhaiten havaita, kun säätimelle syötetään saha-aaltoista jännitettä. Kuvassa 39 nähdään D-säätimen nopean reagoinnin aiheuttama askelmainen aalto. Saha-aallon lähtiessä nousuun derivaattori reagoi muutokseen välittömästi nostamalla jännitteen käskyarvoon, ja saha-aallon lähtiessä laskuun derivaattori laskee jännitteen välittömästi käskyarvoon. Lisäksi vahvistuskertoimia muuttamalla voidaan vaikuttaa signaalin voimakkuuteen. Siniaallosta D-säädin derivoi cosiniaaltoa 90° :n vaihe-erolla. Näin voidaan todeta, että säädin toimii oletetusti.

Derivaattorin käyttäytymisessä kannattaa huomioida myös, mitä tapahtuu kun sille syötetään askelmaista jännitettä. Askelmaisessa jännitteessä nousujen ja laskujen kohdalla derivaatta on äärettömän suuri. Silloin derivaattori antaa äärettömän suuria käskyjä venttiilille toimia. Todellisuudessa tällainen tilanne on kuitenkin käytännössä mahdoton. Kuvassa 40 nähdään, kuinka D-säädin käyttäytyy kyseessä olevassa tilanteessa.



Kuva 40. D-säätimen toiminta askelmaisella jännitteellä.

5.4 PID-säätimen virittäminen ja asemasäätö

Tehtävässä tutustutaan PID-säätimen virittämiseen ja säätimen käyttämiseen paikoituksessa eli asemasäädössä.

Oppimistavoitteet:

- erosuureen muodostaminen summainen avulla
- PID-säätimen viritys
- asemasäätö eli paikoitus.

Kuvaus käytännön harjoituksesta:

- koelaitteen käynnistäminen, keskeiset säädöt ja turvallisuusnäkökohdat
- ohjausyksikön käynnistäminen ja toimintojen sijainti

- erosuureen muodostaminen
- PID-säätimen virittäminen
- sylinterin paikoitus PID-säätimen avulla.

Harjoituksen jälkeen opiskelija osaa muodostaa erosuureen, virittää PID-säätimen, sekä käyttää säädintä paikoitukseen.

Tehtävään käytettävä aikamäärä teoriaosuudelle 2h ja käytäntöön 1,5h. Tehtävän materiaalina toimivat koelaitteen ohjausyksikön käyttöohje ja tämän opinnäytetyön kappale 4, josta löytyy PID-säätimen ja suljetun säätöpiirin teoriaosuudet.

5.4.1 Erosuureen muodostaminen

PID-säädin vaatii toimiakseen erosuureen, joka muodostetaan summainen avulla.



Kuva 41. Summain.

Ohjausyksikössä on 4 summainia ja yhdessä summainessa on kolme sisääntuloa ja yksi ulostulo (kuva 41). Summain laskee sisääntulevat jännitteet yhteen ja kääntää ulostulossa niiden merkin negatiiviseksi. Summain merkitsee ne sisääntulot nolliksi, joihin ei kytketä minkäänlaista jännitettä.

Erosuure X_d on asetusarvon W ja mitatun arvon X erotus. Paikoittamisen helpottamiseksi käskyarvona käytetään venttiilin käsiajoa ja mitattu arvo saadaan asema-anturilta. Jotta summainesta saadaan ulos erotusarvo X_d , viedään ensimmäiseen

summaimeen asetusarvo W , joka tulee ulos negatiivisena ($-W$). Negatiivinen asetusarvo $-W$ viedään summaimeen kaksi yhdessä mittaussuureen X kanssa. Summain laskee suuret yhteet ja kääntää niiden merkit, jolloin saadaan eroisuure.

X on mittaussuure

W on asetusarvo

X_d on eroisuure

Summain 1: Sisään W

ulos $-W$

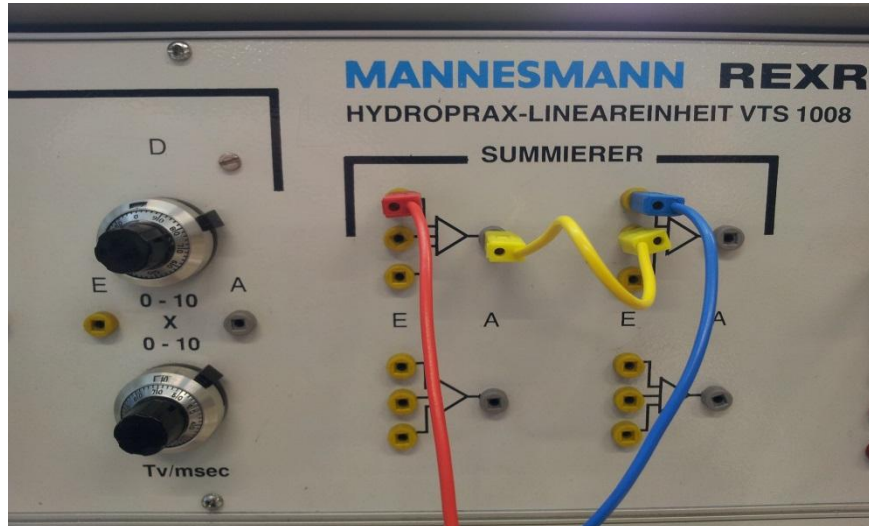
Summain 2: Sisään X ja $-W$

ulos $-(-W+X) = W-X$

$$X_d = W-X.$$

(13)

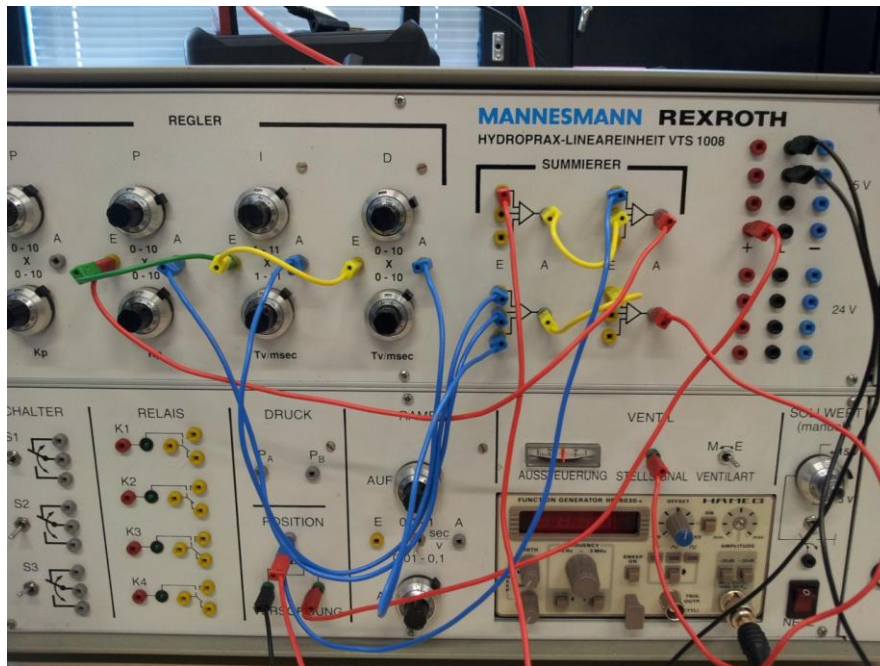
Kuvassa 42 yllä esitelty eroisuure on muodostettu summaimen avulla. Asetusarvo tuodaan punaisella johdolla funktiogeneraattorilta. Summaimen yksi ulostulosta viedään negatiiviseksi muuttunut asetusarvo summaimeen kaksi ja tuodaan samalla mittaussuure sinisellä johdolla asema-anturilta. Nyt summaimen kaksi ulostulosta saadaan eroisuure.



Kuva 42. Erosuureen muodostaminen.

5.4.2 PID-säätimen virittäminen

PID-säätimen käyttöön ottaminen tapahtuu kuvan 43 mukaisella kytkennällä.



Kuva 43. PID-säätimen kytkeminen.

Kuvassa 43 P-säätimen E-kanavaan tuodaan summaimella muodostettu erosuure punaisella johdolla. Edelleen samainen erosuure viedään vihreällä ja keltaisella johdolla I- ja D-säätimien E-kanaviin. Seuraavaksi täytyy kyseisten operaattoreiden muokkaamat signaalit summata yhteen, jotta saadaan aikaan PID-säädin. Viedään kunkin operaattorin A-kanavista sinisillä johdoilla summaimeen kolme, joka laskee signaalit yhteen ja kääntää niiden merkin negatiiviseksi. Keltaisella johdolla viedään summaimelta kolme summaimeen neljä, joka kääntää summan jälleen positiiviseksi. Lopuksi viedään signaali summaimen neljä ulostulosta punaisella johdolla venttiililohkoon (VENTIL).

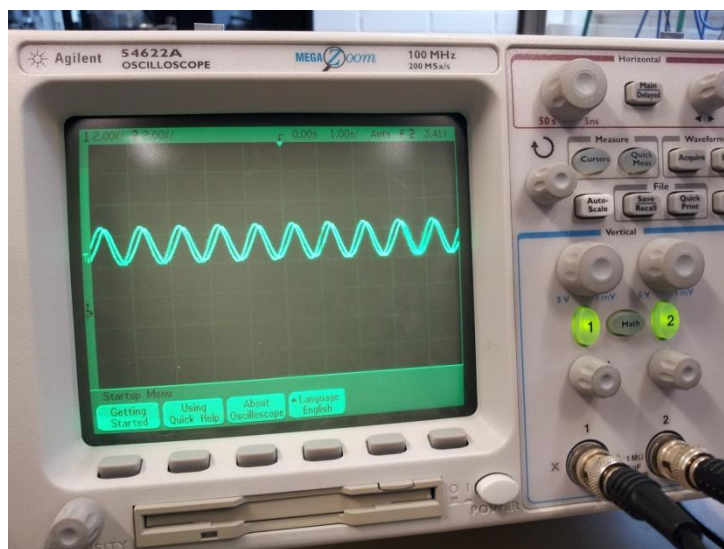
Kytkeä on näiltä osin valmis. PID-säätimen virittäminen onnistuu parhaiten, kun seurataan asetusarvon ja mittaussuureen signaaleja oskilloskoopilla. Kytetään oskilloskoopin kanavaan 1 funktiogeneraattorilta tuleva jännite ja kanavaan 2 asema-anturilta tuleva mittaussuure.

PID-säätimen virittäminen aloitetaan syöttämällä esimerkiksi siniaaltoa funktiogeneraattorilta. Oskilloskoopin avulla jännitealue säädetään asema-anturin toiminta-alueelle. Siniaallon sopiva värähtely alue on esimerkiksi kolmesta seitsemään volttia. Säätäminen tapahtuu kääntämällä funktiogeneraattorin offset-nuppia.

P-säädin viritetään mahdollisimman tasaiseksi sillä tavoin, ettei piirissä ole ylimääräistä värinää. Mikäli P-säätimen vahvistuskerroin on liian iso, alkaa piiri värähdellä

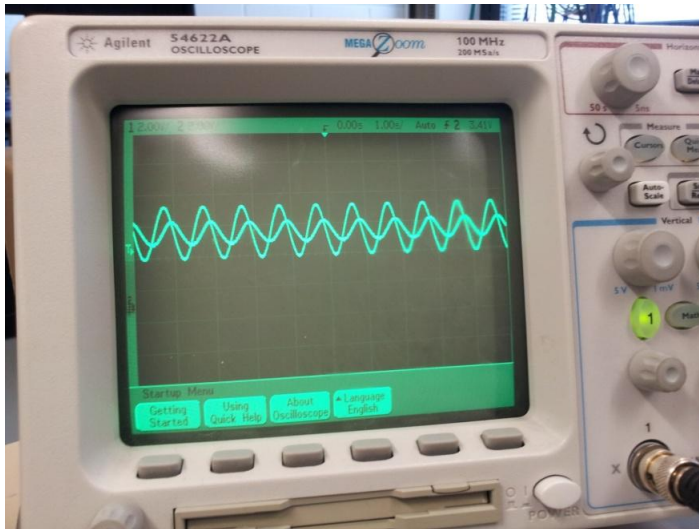
epästabiilisti. Isoilla taajuuksilla P-säädin ei pysy signaalin tahdissa, mutta pienemmillä taajuuksilla tämä onnistuu. Kuvassa 44 P-säädin on viritetty pienellä taajuudella mahdollisimman lähelle asetusarvoa. Kuvasta näkyy P-säätimen aina jäävä virhe. Tämä johtuu siitä, että P-säädin tarvitsee toimiakseen eroarvon. Mikäli eroarvo olisi nolla, niin P-säätimen lähtöarvo olisi myös nolla.

P-säätimen virittäminen on helppoa ja nopeaa, mutta käytännössä koskaan ei päästä täydellisesti asetusarvoon. Pelkkä P-säädin sopii erittäin hyvin sellaisiin hitaisiin järjestelmiin, joissa pieni säätöpoikkeama voidaan hyväksyä. Mikäli kuitenkin tarvitaan täydellisempää säätöpoikkeaman eliminoimista, täytyy ottaa käyttöön PD- tai -PID-säädin.



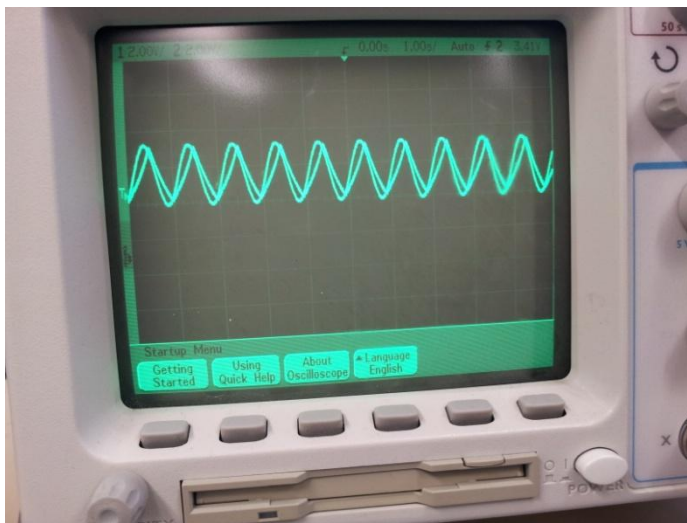
Kuva 44. Pienellä taajuudella säädetty P-säädin.

Kuvassa 45 siniaallon taajuus on säädetty suuremmaksi kuin kuvassa 45. P-säätimellä on viritetty järjestelmä mahdollisimman tasaiseksi. Kuvasta näkee hyvin, ettei P-säätimellä enää päästä asetusarvoon ja järjestelmään jää suurempi virhe. Mikäli nyt yritetään P-säätimen vahvistuskerrointa kasvattaa, alkaa järjestelmä värähtelemään epästabiilisti. I- ja D-elimillä on mahdollista tasoittaa säätöpoikkeamaa.



Kuva 45. P-säätimen virittäminen.

Seuraavaksi pyritään I- ja D-säätimien vahvistuskertoimia muuttamalla saamaan järjestelmä pysymään asetusarvona toimivan siniaallon tahdissa. Tämä ei ole niin helppoa kuin P-säätimellä. Havaitaan kuitenkin, että säätöpoikkeama pienenee huomattavasti I- ja D-säätimien vahvistuskertoimia muuttamalla (kuva 46).

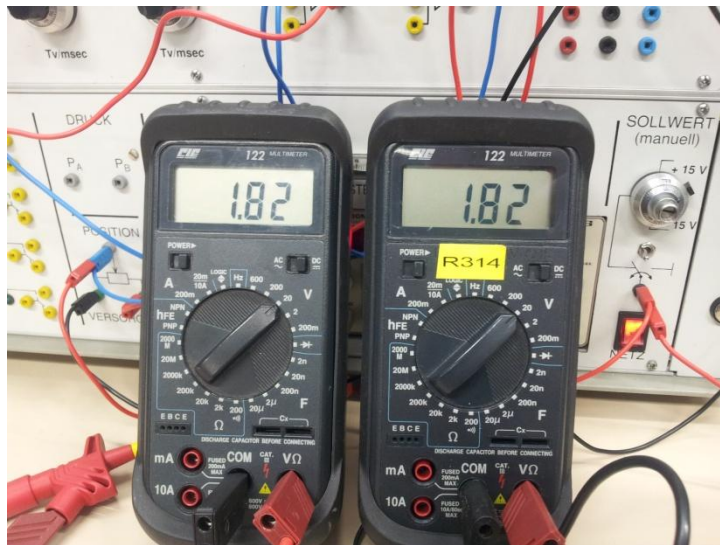


Kuva 46. PID-säätimen virittäminen.

5.4.3 Aemasäätö eli paikoitus

Paikoituksen aloittamiseksi käytetään käskyravona funktiogeneraattorilta syötettävää siniaaltoa. Erosuure muodostetaan summaimessa ja viedään PID-säätimelle. Paikkatietojen seuraamiseksi kytketään toinen yleismittari mittaamaan asetusarvoa ja toinen yleismittari asema-anturiin näyttämään sylinterin todellista sijaintia.

Ensimmäisenä kannattaa tarkistaa, että kytkentä toimii. Tarkistuksen voi tehdä vaihtamalla asetusarvoksi käsiajokytken ja ajamalla sylinteriä edes takaisin. Mikäli asema-anturin jännite vastaa asetusarvon jännitettä, kytkentä toimii. Huomataan myös, että sylinterin ollessa ajettuna täysin sisään iskun ollessa 0mm, ei jännitemittari näytäkään 3,44V kuten kappaleessa 5.2 todettiin. Tämä johtuu summaimesta, joka muuttaa jännitettä hieman. Tämän vuoksi asema-anturi on syytä kalibroida uudelleen asema-anturin jännitealueen tarkistamiseksi.



Kuva 47. Sylinteri ajettu täysin sisään, isku S on 0mm.

Kuvassa 47 on vasemman puoleinen yleismittari kytketty asema-anturiin ja oikean puoleinen yleismittari puolestaan asetusarvona toimivaan käsin säädettävään suureeseen. Kuvan kytkennällä voidaan todeta, että asema-anturin lukemaa seuraa asetusarvoa.

6 MODERNISOINTI JA KEHITTÄMINEN

6.1 Kehityspolku 1

Työn aikana mietittiin myös laitteen kehittämistä ja modernisointia. Laitteesta saatavan täyden hyödyn saamiseksi saatiin kolme eri kehityspolkuja. Kehittämisen kohteena on lähinnä laitteen ohjausyksikkö.

Halvin ja nopein vaihtoehto olisi laitteen ja laitteen ohjausyksikön säilyttäminen ennallaan ja pelkästään vikojen korjaaminen.

Laitteesta korjattavat viat:

- Paineantureilta ei saada tietoa ulos.
- Paineakku vuotaa liittimestä.
- Funktiogeneraattorissa amplitudin säätönuppi on vaihdettava.
- Häirintäsylinterille menevän paineputken tukevampi kiinnitys (heiluu ajossa).

Lisäksi opiskeluympäristöön tulisi kiinnittää huomiota. Laitteelle olisi järjestettävä hieman tilavampi paikka, jossa opiskelijaryhmä mahtuisi olemaan sekä järjestää paikalle 5-10 tuolia. Yksi hylly tavaroille, jotta kaikki johdot, yleismittarit, oskilloskooppi, ruuvimeisselit ynm tarvikkeet saataisiin pysymään järjestyksessä.

Tämä olisi kaikkein helpoin, nopein ja halvin kehityspolku. Kustannukset eivät pääse nousemaan juurikaan, koska suurin osa vioista ja hankinnoista ovat melko halpoja.

Hankinnat:

- 10 tuolia
- 1 hylly tavaroille
- paineantureiden vian tutkiminen
- heiluvan putken tukeminen ja paineakun liittimen vaihto.

Kustannusarvio on 1000e. Suurin osa kustannuksista koostuu työtunneista, koska hankinnat ovat verrattain halpoja. Paineantureiden toimintakuntoon saattaminen vie luultavasti eniten aikaa. Itse anturit ovat luultavasti kunnossa, tietoa ei vain saada ohjausyksiköstä ulos mitenkään.

6.2 Kehityspolku 2

Pidetään laite ja ohjausyksikkö sellaisenaan, korjataan viat. Kehitettäisiin ohjausyksikköä siihen suuntaan, että saataisiin se kytkettyä tietokoneeseen.

Ongelma numero yksi on siinä, että laitteella tehtyjen kokeiden ja testien jälkeen kaikki saatu informaatio on käyttäjän muistin ja muistiinpanojen varassa. Olisi hyödyllistä saada tallennettua ohjausyksiköstä saatavaa dataa. Tietokoneella pitäisi voida tallentaa asema-anturin ja paineantureiden tietoja. Tämä mahdollistaa sen, että kokeiden jälkeen voitaisiin luokassa käydä läpi juuri tehtyjen testien tuloksia oppilasryhmän kanssa ja tehdä niistä päätelmiä. Lisäksi asetusarvon luominen tietokoneella etukäteen helpottaisi opettamista.

Ideaalitilanne olisi se, että oppilaat voisivat etukäteen suunnitella ja luoda asetusarvon jonkin tehtävän pohjalta (esim. aseman paikoitus) ja sen jälkeen mennä laitteelle toteuttamaan tämän tehtävän. Lisäksi voitaisiin tehtävän jälkeen vielä luokassa käydä läpi tietokoneelle tallennettua dataa ja miettiä, onnistuttiinko tehtävässä.

Tähänkään kehityspolkuun suurempia hankintoja ei tarvitse tehdä. Yksi kannettava tietokone maksaa 700e, monitoimimittauskortti 500e, asennustarvikkeet ja signaalimuokkaimet maksavat n. 300e. Suurin osa kustannuksista syntyisi työtunneista. Täytyy keksiä keino, jolla tietokone saadaan kytkettyä ohjausyksikköön. Lisäksi täytyy luoda tietokoneohjelma, jolla asetus ja mittausarvoja voidaan käyttää sekä tallentaa. Tähän kuuluu aikaa koulun henkilöstöön kuuluvalta henkilöltä noin 2 viikkoa.

Karkeasti arvioiden laitteisto vie 20% kustannuksista ja loput 80% tulee töihin käytettävänä työtunteina.

6.3 Kehityspolku 3

Viimeinen ja kallein kehityspolku on ohjausyksikön modernisointi. Tehdään kohdissa 6.1 ja 6.3 esitetyt ja lisäksi rakennetaan PID-säädin tietokoneella. Tämä mahdollistaa venttiilin ajamisen tietokoneella ja samalla mittausarvojen lukemisen ja tallentamisen. Tällöin vanhasta ohjausyksiköstä säilytetään venttiililohko ja servoventtiilin ohjauskortti. Muu toiminta voidaan tehdä tietokoneella.

Tietokoneelle tulisi LabView-ohjelmalla toteutettu PID-säädin. Vahvistuskertoimia voisi säätää tietokoneella, sekä lukea venttiilin paikkatietoja ja seurata paineantureiden lukemia. Nykyinen ohjausyksikkö on vanhaa tekniikkaa. Näillä toimenpiteillä saadaan laitteesta irti paras mahdollinen opetuskäyttöön suuntautuva hyöty.

Tähän polkuun ei tarvitse tehdä enempää laite hankintoja kuin kohdissa 6.1 ja 6.2 on esitelty. Suurin osa kustannuksista koostuu jälleen työtunneista. Paras tilanne olisi, jos talon sisältä saataisiin irroitettua yksi mies kehittämään laitteistoa. Arvioitu aika uudistuksiin on noin yksi kuukausi.

7 POHDINTA

Tämän opinnäytetyön tarkoituksena oli selvittää servohydrauliikan opetuslaitteen toiminta opetuskäytössä, laitteen komponenttien kunto sekä pohtia kuinka laitetta voitaisiin kehittää ja modernisoida. Työ suoritettiin perehtymällä ensin PID-säätimen ja servohydrauliikan perusteisiin ja teoriaan. Teoriaosuuden jälkeen siirryttiin sujuvasti laitteen toimintakunnon ja opetuskäytön selvittämiseen.

Servohydrauliikan opetuslaitteesta ei ollut kirjallista materiaalia juuri lainkaan työtä aloittaessa. Oli ainoastaan yksi englanninkielinen tuotelehti, joka käsitteli laitteen ohjausyksikön käyttöä ja aiheeseen liittyvää teoriaa. Työn aikana huomattiin tarve suomenkielisille käyttöohjeille ja materiaalille.

Työn suorituksen aikana saatiin aikaiseksi paljon hyvää materiaalia servohydrauliikan opetuslaitteen käytön tueksi. Luotiin laitteen hydraulikaavio, komponenttiluettelo sekä selvitettiin laitteen opetuskäyttöön soveltuvia tehtäviä. Työn lopuksi tehtiin myös ehdotuksia laitteen kehittämiseen opetuskäytössä tulevaisuudessa.

Koin opinnäytetyön aiheen haasteellisena. Aihe oli minulle uusi ja lähdin avoimin mielin toteuttamaan tehtävää. Erityisesti PID-säätimen ja servohydrauliikan teoriaan tutustumisen tunsin olevan haastavaa, koska aihepiiri ei ole kuulunut kone- ja tuotantotekniikan koulutusohjelmaan. Aihe kuitenkin liittyy erittäin tiivistä tekniikan maailmaan ja mahdollisesti tulevaisuuden työtehtäviin. Opinnäytetyön myötä sain huomata, kuinka laaja konetekniikan ala on. Mielestäni työssä onnistuttiin hyvin ja olen tyytyväinen työn lopputuloksiin.

LÄHTEET

- Bosch Rexroth:n www-sivut. Hakupäivä 14.2.2013. <http://www.boschrexroth-us.com/country_units/america/united_states/en/index.jsp>
- Edwald & Hutter & Kretz & Liedhegener & Schenkel & Schmitt & Reik, 1989. Proportionaali- ja servoventtiilitekniikka.
- Exner & Freitag & Ing & Geis & Lang & Oppolzer & Schwab & Sumpf, 1978. Hydraulitekniikan perusteet ja komponentit.
- Götz, Werner 1993. Sähköhydraulinen proportionaali- ja säätötekniikka teoriassa ja käytännössä.
- Hietala, Tero 2009. Automaatiotekniikka 1. Luentomateriaali. Oulun seudun ammattikorkeakoulu, Oulu.
- Mannesmann Rexroth. Hydroprax Linear Control Unit VTS 1008. Tuotelehti.
- Mannesmann Rexroth. 4WS 2E. Tuotelehti.
- Mäkinen, Rauli 2010. Rakennusautomaatioprojektin toteutus automaatiojärjestelmällä. Opinnäytetyö. Tampereen ammattikorkeakoulu, Tampere.
- Novotechnikin www-sivut. Hakupäivä 23.3.2013. <<http://www.novotechnik.com/>>
- Salhydron www-sivut. Hakupäivä 18.2.2013. <<http://www.salhydro.fi/>>
- Wiki Metropolian www-sivut. hakupäivä 14.2013. <<https://wiki.metropolia.fi/display/koneautomaatio/8.+Venttiilit>>

LIITTEET

- Liite 1. Tuotelehti, DBDS 6. PDF-tiedosto.
- Liite 2. Tuotelehti, 4 WS 2 EM. PDF-tiedosto.
- Liite 3. Tuotelehti, 4 WMM 6. PDF-tiedosto.
- Liite 4. Tuotelehti, Z2DB 6 VC1. PDF-tiedosto.
- Liite 5. Tuotelehti, ZDR 6 DP1. PDF-tiedosto.
- Liite 5. Tuotelehti, Novotechnic TLH 500. PDF-tiedosto.