



TAMPEREEN TEKNILLINEN YLIOPISTO

HEIKKI PALOMÄKI

PAINEAKKUJEN TESTILAITTEISTON SUUNNITTELU

Diplomityö

Tarkastaja: professori Jari Rinkinen
Tarkastaja ja aihe hyväksytty
Automaatio-, kone- ja
materiaalitekniikan
tiedekuntaneuvoston
kokouksessa 15. elokuuta 2012

TIIVISTELMÄ

TAMPEREEN TEKNILLINEN YLIOPISTO

Konetekniikan koulutusohjelma

PALOMÄKI, HEIKKI: Paineakkujen testilaitteiston suunnittelu

Diplomityö, 65 sivua, 14 liitesivua

Syyskuu 2012

Pääaine: Hydrauliteknikka

Tarkastaja: professori Jari Rinkinen

Avainsanat: Paineakku, hydrauliakku, mäntäakku, elinkaaritestausta, testilaitteisto

Tässä diplomityössä tehtiin vaatimusmäärittely Hydroll Oy:n tarvitsemalle paineakkujen testauslaitteistolle, suunniteltiin testilaitteisto ja valmisteltiin tarjouspyyntö lähetettäväksi potentiaalisille testilaitteiston toimittajille. Vaatimusmäärittely tehtiin yhdessä muun henkilöstön kanssa ja taustatietoja varten haastateltiin useita Hydrollin asiakasyrityksiä.

Testilaitteisto tulee käyttöön yrityksen tuotantotiloihin Lapualle ja sen on tarkoitus toimia pääasiallisesti hydrauliakkujen tuotekehityksessä. Testilaitteistoa voi käyttää myös laadunvalvontaan ja markkinointimateriaalin tai -tiedon luomiseen. Diplomityön alueeseen ei kuulunut testilaitteiston koekäyttö tai testien suorittaminen paineakuille.

Työn alussa on käyty läpi yleistä teoriaa hydraulikuista, erilaiset akkutyypit ja esitelty Hydroll akkuvalmistajana lyhyesti. Akkuteorian jälkeen siirrytään testilaitteiston vaatimusmäärittelyyn. Vaatimusmäärittelyssä on esitelty ominaisuudet joita testilaitteistolta halutaan. Luvussa 3.3 hydrauliakkujen testisyklit esitetään esimerkkejä akuille ajettavista testisykleistä. Osa testisykleistä on todellisia käyttötilanteita vastaavia järjestelyjä ja osa on testejä akkujen yleisten ominaisuuksien mittaamiseksi.

Laitteistolle esitetyistä vaatimuksista edetään suunnitteluosioon. Suunnittelussa on laadittu alustava järjestelmä, jolle pyritään löytämään toimittaja. Suunnittelun lähtökohtana on käytetty testisyklejä joita laitteistolla halutaan ajaa. Luvussa mittaustulosten tulkitseminen käsitellään testituloksien epävarmuutta ja soveltamista. Luvussa kommentoidaan testituloksiin vaikuttavia tekijöitä, virheiden huomioon ottamista ja pienentämistä ja testituloksista saatavaa hyötyä tuotekehitykselle tai liiketoiminnalle. Luvussa tulosten tarkastelu ja jatkokehitysmahdollisuudet arvioidaan työn kulkua ja lopputulosta sekä kommentoidaan mahdollisuuksia kehittää testausta edelleen.

ABSTRACT

TAMPERE UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

Master's Degree Programme in Mechanical engineering

PALOMÄKI, HEIKKI: Design of test system for hydraulic accumulators

Master of Science Thesis, 65 pages, 14 Appendix pages

September 2012

Major: Fluid power

Examiner: Professor Jari Rinkinen

Keywords: Hydraulic accumulator, piston accumulator, lifespan test, test system

The purpose for this M.Sc. thesis was to define requirements for a test system for hydraulic accumulators, design a test system and make a request for offer to be sent for potential suppliers of the test system. Defining of requirements was done in collaboration with other personnel. Several client companies were interviewed for background information.

Test system will be located in Hydroll's factory at Lapua and it will be mainly used in development of new accumulators. Test system can also be used in quality control and for creating marketing information and material. This M.Sc. thesis does not include startup of the test system or actual test runs for accumulators.

Different accumulator types and theories about hydraulic accumulators are presented at the beginning of this document. Hydroll is introduced as accumulator manufacturer. After that requirements for test system are explained. In chapter 3.3 there are examples of the test cycles that will be performed on accumulators. Some of the test cycles are made in correspondence to real use situations and some are general test cycles for defining properties of accumulators.

Requirements for test system are used as a baseline for system planning. After planning test system's inaccuracy is analyzed and usability of test results are commented. Thereafter are evaluated progress and results of this work and commented potential continuation of development of testing of accumulators.

ALKUSANAT

Tämä diplomityö on tehty Hydroll Oy:lle. Työn tarkastajana toimi professori Jari Rinkinen ja ohjaajana Petri Virrankoski. Haluan kiittää edellä mainittuja ja kaikkia muita joilta olen saanut apua ja tukea tämän työn tekemisessä. Haluan kiittää koko Hydrollin väkeä ja osoittaa erityiskiitokset Seppo Alasaarelle ja Jussi Mannermaalle tuesta ja neuvoista sekä Seija Myllymäelle avusta käytännön järjestelyissä.

Tampereella 4.8.2012

Heikki Palomäki

SISÄLLYS

1. Johdanto	1
2. Hydrauliakut.....	3
2.1. Akut hydraulijärjestelmissä.....	5
2.2. Akkutyypit	7
2.2.1. Mäntäakut.....	7
2.2.2. Rakkoakut	8
2.2.3. Kalvoakut	9
2.3. Akkutyypien vertailu.....	9
2.4. Hydrauliakkujen ominaisuuksien mittaus.....	13
2.5. Hydroll akkuvalmistajana	14
3. Testilaitteiston vaatimusmäärittely	16
3.1. Yleiset vaatimukset	17
3.1.1. Mekaanisen rakenteen vaatimukset.....	18
3.1.2. Vaatimukset ohjauslogiikalle.....	19
3.2. Valvottavien toimintasuureiden mittaus	19
3.2.1. Paineen mittaus	20
3.2.2. Lämpötilan mittaus.....	21
3.2.3. Äänen mittaus.....	22
3.2.4. Tilavuuden mittaus.....	22
3.2.5. Öljyn kunnan mittaus.....	22
3.3. Hydrauliakkujen testisyklit	23
3.3.1. Energiateollisuuden testisyklit	25
3.3.2. Puomin liikkeidenkompensointi.....	26
3.3.3. Rakenteen väsymisestä	28
3.3.4. Liikkuvan työkoneen kauhan jousitus.....	29
3.3.5. Toistuva ja symmetrinen työkierto.....	30
3.3.6. Suurpainetesti	31
4. Testilaitteiston suunnittelu	33
4.1. Testilaitteiston mekaaninen rakenne.....	34
4.2. Hydraulikaavio ja toimintakuvaus	34
4.3. Lähtöarvot ja tehontarve	37
4.4. Komponenttien mitoitus.....	43
4.4.1. Pumput	43
4.4.2. Sähkömoottorit.....	45
4.4.3. Putkistot.....	46
4.4.4. Venttiilit	47
4.4.5. Anturit	47
4.4.6. Hydraulineste	48
4.4.7. Säiliö	48

4.4.8. Suodatin.....	48
4.4.9. Jäähdytin	49
4.5. Toiminta poikkeustilanteissa.....	49
4.6. Testilaitteiston simulointi.....	50
4.6.1. Simulointimalli.....	51
4.6.2. Simulointi	51
5. Mittaustulosten tulkitseminen	53
5.1. Testilaitteiston tarkkuus	53
5.2. Mittaustulosten analysointi	55
5.3. Testitulosten hyödyntäminen	56
6. Tulosten tarkastelu ja jatkokehitysmahdollisuudet	59
7. Yhteenveto	62
Lähteet.....	64
Liite 1: Hydraulijärjestelmän osaluettelo	66
Liite 2: Testilaitteiston tarjouspyyntö	67

TERMIT JA NIIDEN MÄÄRITELMÄT

Δp	Paineen muutos	[Pa]
Δp_{\max}	Suurin paineen muutos	[Pa]
ΔV	Tilavuuden muutos	[m ³]
η_{kok}	Kokonaishyötysuhde	
η_{vol}	Volumetrinen hyötysuhde	
ρ	Nesteen tiheys	[kg/m ³]
A_m	Männän pinta-ala	[m ²]
B_e	Tehollinen puristuskerroin	[Pa]
c	Paineaallon etenemisnopeus	[m/s]
d_s	Putken sisähalkaisija	[m]
k	Viipymäaika	[min]
l_m	Männän iskunpituus	[m]
n	Tilanmuutosnopeuden vakio	
n_k	Kierrosnopeus	[k/s], [k/min]
n_l	Lukumäärä	
p	Paine	[Pa]
p_e	Akun esitäyttöpaine	[Pa]
p_{\max}	Suurin paine	[Pa]
p_{\min}	Pienin paine	[Pa]
P_h	Hydraulinen teho	[W]
P_{sm}	Sähkömoottorin teho	[W]
Q	Tilavuusvirta	[m ³ /s]
Q_{av}	Keskimääräinen tilavuusvirta	[l/min]
Q_{tod}	Todellinen tilavuusvirta	[m ³ /s]
t_s	Sykli aika	[s]
v	Virtausnopeus	[m/s]
V	Tilavuus	[m ³]
V_k	Kierrotilavuus	[m ³]
V_{\max}	Suurin tilavuus	[m ³]
V_{\min}	Pienin tilavuus	[m ³]
V_n	Akun nimellistilavuus	[m ³]
V_s	Säiliön tilavuus	[l]

1. JOHDANTO

Hydroll Oy valmistaa erilaisia mäntäakkuja, joita käytetään monilla eri teollisuuden aloilla ympäri maailmaa. Käyttökohteita löytyy teollisuudesta, liikkuvista työkoneista ja uusiutuvan energian tuotannosta. Käyttötarkoitusten ja –olosuhteiden moninaisuus asettaa suuria haasteita suunnittelulle, valmistukselle ja testaukselle. Akkujen pitää kestää olosuhteista riippumatta pitkiäkin aikoja rankkaa ja vaihtelevaa kuormitusta.

Paineakkujen valmistus on tarkkaan säädeltyä ja valvottua toimintaa. Hydrollilla on testilaitteisto, jolla voidaan todeta akkujen toimintakyky ja turvallisuus. Olemassa oleva testilaitteisto pystyy suorittamaan joitakin testejä akuilla, mutta se on suunniteltu akkujen rakennetestiä varten. Nykyinen testilaitteisto on myös osa tehtaan tuotantolinjaa, joten sillä ei voi suorittaa pidempikestoisia testejä tuotannon häiriintymättä.

Akkujen testilaitteistolle on paljon tarvetta: olemassa olevista akuista pitäisi päästä mittaamaan ominaisuuksia aiempaa paremmin ja monipuolisemmin, uusia ratkaisuita pitää päästä testaamaan ja erilaisia komponentteja pitää päästä vertailemaan keskenään. Hydroll toimii komponenttivalmistajana monelle suurelle asiakasyritykselle ja usein asiakkaat ovat kiinnostuneita akkujen toiminnasta jossakin tietyssä tilanteessa, jossa akkuja pitäisi päästä testaamaan. Akkujen käyttöolosuhteet vaihtelevat suuresti, mutta useille asiakkaille toimitetaan paljon akkuja, joiden käyttöolosuhteet ja –syklit ovat toistuvia, jolloin akkuja voidaan tutkia testeillä, jotka vastaavat todellista käyttötilannetta.

Tämän työn tarkoituksena oli selvittää millaisen testilaitteiston Hydroll tarvitsee testatakseen akkuja asiakastarpeiden mukaisesti, kartoittaa millaisia käyttösyklejä akut tekevät ja millaisia testejä niille pitäisi ajaa, selvittää mitä testilaitteiston pitäisi testata ja miten tuloksia voidaan hyödyntää sekä tehdä tarjouspyyntö testilaitteistosta. Hydroll valmistaa ainoastaan mäntäakkuja, joten lopullinen testilaitteisto tilataan ulkopuoliselta toimittajalta. Testilaitteiston toimittajalle jätetään suhteellisen paljon vapauksia laitteiston ratkaisuiden suhteen ja vaatimusmäärittely käsittelee enemmän toiminnallisia ominaisuuksia.

Työn aikana haastateltiin useita tahoja, jotka pääsivät antamaan palautetta ja ideoita testilaitteiston vaatimuksista ja ominaisuuksista. Asiakkailta pyrittiin selvittämään akkujen käytön ohella, että mitä tietoja akuista halutaan valmistajalta. Hydrollin oma henkilöstö oli työn edetessä mukana projektissa ja erityisesti suunnitteluosasto antoi rakentavaa palautetta testilaitteistosta.

Luvussa 2 perehdytään paineakkuihin, niiden käyttöön ja ominaisuuksiin, vertaillaan akkutyyppejä keskenään ja esitellään Hydroll akkuvalmistajana. Luvussa 3 käsitellään testilaitteiston vaatimusmäärittelyä ja luvussa 4 keskitytään testilaitteiston suunnitteluun ja ominaisuuksiin. Luvussa 5 kerrotaan testitulosten analysoinnista, luotettavuudesta sekä tulosten hyödyntämisestä. Luvussa 6 kommentoidaan työn kulkua

ja tuloksia sekä esitetään mahdollisia parannuksia tulevaisuutta varten. Luvussa 7 on yhteenveto työstä.

2. HYDRAULIAKUT

Hydraulijärjestelmissä tehoa siirretään nesteen välityksellä. Mekaaninen teho muutetaan hydrauliseksi, tyypillisesti hydraulipumpulla, jonka jälkeen toimilaitteet eli hydraulisylinterit ja –moottorit muuttavat hydraulisen tehon taas mekaaniseksi. Hydraulinesteiden kokoonpuristuvuus on erittäin pientä joten nesteeseen ei voi varastoida energiaa. Jos hydraulijärjestelmän energiaa halutaan varastoida, pitää hydraulista tehoa käyttää ulkopuolisen energiavaraston lataamiseen. Energiaa voidaan varastoida potentiaalienergiaksi nostamalla jotakin massaa, puristamalla joustaa kasaan tai paine-energiaksi puristamalla kaasua pienempään tilavuuteen.

Muut ratkaisut ovat nykyään erittäin harvinaisia ja lähes kaikki energian talteenotto hydraulijärjestelmissä perustuu kaasun kokoonpuristuvuuteen. Lähes kaikkien hydrauliakkujen toiminta perustuu kaasun kokoonpuristuvuuteen. Useimmissa paineakuissa on kaasupuoli, nestepuoli ja eroelin. Kaasupuolelle on kaasuventtiilin kautta laitettu kaasua haluttuun esitäyttöpaineeseen. Kaasupuolen esitäyttöpaine valitaan pienemmäksi kuin järjestelmän alin käyttöpaine, jolloin akussa on aina järjestelmän toimiessa nestettä ja kaasu ei pääse painamaan eroelintä nesteliitintään kiinni.

Järjestelmän paineen kasvaessa hydraulineste virtaa akkuun ja kaasutilavuus pienenee nostaen kaasun painetta kunnes kaasu- ja nestepuolella on sama paine. Järjestelmän paineen laskiessa kaasutilavuus laajenee painaen nestettä takaisin järjestelmään vapauttaen kaasuun varastoitunutta energiaa.

Kaasuna akuissa käytetään lähes poikkeuksetta puhdasta typpikaasua. Typpi on passiivinen kaasu eikä aiheuta palo- tai räjähdysvaaraa ja tyyppiä on saatavilla ilmakehässä erittäin runsaasti. Typpikaasu käyttäytyy myös lähes ideaalikaasun tavoin, ainakin pienillä paineilla.

Ideaalikaasu on malli jolla pyritään selittämään todellisten kaasujen ominaisuuksia. Mallissa kaasua on yksinkertaistettu niin paljon että kaasun käyttäytymistä on helppo selvittää ja kaasun tilaa kuvaavia suureita on helppo laskea. Ideaalikaasulle pätee kaava (1).

$$pV^n = \text{vakio} \quad (1)$$

jossa n on tilanmuutosnopeudesta riippuva vakio, p on paine [Pa] ja V on kaasutilavuus [m^3].

Kaasun tilavuuden muuttuessa muuttuu myös kaasun paine ja lämpötila. Jos kaasun tila muuttuu niin hitaasti että kaasun ja ympäristön lämpötilaerot ehtivät tasoittua puhutaan isotermisestä tilanteesta. Isotermisessä tilanmuutoksessa $n = 1,0$. Adiabaattisessa tilanmuutoksessa muutos tapahtuu niin nopeasti, etteivät lämpötilaerot ehdi tasoittua kaasun ja ympäristön välillä. Adiabaattisessa muutoksessa $n = 1,4$. Polytrooppisessa tilanmuutoksessa lämpötilaerot ehtivät tasoittua osittain, jolloin $n = 1-1,4$. Kaavan (1) perusteella voidaan siis todeta, että mitä nopeammin paine puretaan akusta, sitä vähemmän siitä saadaan nestetilavuutta.

Paineakkaa valittaessa valintaan vaikuttaa lukuisia tekijöitä: akun nimelliskoko, akulta tarvittava tilavuusvirta, järjestelmän suurin ja pienin käyttöpaine, käyttöympäristö, järjestelmän dynamiikka ja akun sijoituspaikka. Akku mitoitetaan tarvittavan nimelliskoon mukaan käyttämällä kaavaa (2) tai valmiista käyrästä.

$$V_n = \frac{\Delta V}{\left[\left(\frac{p_e}{p_{min}} \right)^{\frac{1}{n}} - \left(\frac{p_e}{p_{max}} \right)^{\frac{1}{n}} \right]} \quad (2)$$

jossa V_n on akun nimellistilavuus [m^3], ΔV on kaasutilavuuden muutos [m^3], p_e on akun esitäyttöpaine [Pa], p_{min} on järjestelmän pienin käyttöpaine [Pa], p_{max} on järjestelmän suurin käyttöpaine [Pa] ja n on tilanmuutosnopeudesta riippuva vakio.

Ideaalikaasun mallissa kaasun ominaissisäenergia riippuu vain kaasun lämpötilasta. Mallin tarkkuus riittää yleensä kuvamaan typpikaasun käyttäytymistä noin 20 MPa-painetasoon asti. Suurilla paineilla kaasumolekyylien etäisyydet ovat pieniä ja molekyylit ovat jatkuvasti vuorovaikutuksessa toistensa kanssa. Molekyylien rakenne ja epälineaarinen liike, sähköiset vuorovaikutukset ja osittain kimmottomat törmäykset erottavat reaalikaasut ideaalikaasusta. Hydraulijärjestelmissä paine nousee usein yli 20 MPa, jolloin ideaalikaasun yhtälöitä ei voida suoraan käyttää laskennassa. Paineakulta saatava nestetilavuus voidaan laskea suurimman kaasutilavuuden V_{max} [m^3] ja pienimmän kaasutilavuuden V_{min} [m^3] erotuksena kaavalla (3). [1, s. 40]

$$\Delta V = V_{max} - V_{min} \quad (3)$$

Suurin ja pienin tilavuus ovat suurinta ja pienintä järjestelmän painetta vastaavat nestetilavuudet. Yli 20 MPa painetasoilla kaavalla (3) saatava tilavuuden muutos on vielä kerrottava korjauskertoimella. Korjauskertoimen vaikutus on sitä suurempi mitä korkeammilla painetasoilla akkaa käytetään, mitä lähempänä matalin käyttöpaine on suurinta käyttöpainetta ja mitä nopeampi kaasun tilanmuutos on. Korjauskertoimia on saatavilla valmiista taulukoista. [2, s. 162]

2.1. Akut hydraulijärjestelmissä

Paineakut ovat yleisiä komponentteja hydraulijärjestelmissä ja niitä käytetään lähes jokaisella teollisuuden alalla. Akkujen käyttötavat vaihtelevat, mutta akkujen käytöllä pyritään aina saavuttamaan tiettyjä hyötyjä:

- järjestelmän dynaamisten ominaisuuksien parantaminen
- kokonaishyötysuhteen parantaminen
- paineen ylläpito järjestelmässä
- järjestelmän toiminnan varmistaminen

Hydrauliakkujen käytöstä ei ole pelkästään hyötyä; pahimmillaan akut voivat huonontaa järjestelmän muita ominaisuuksia. Akut ja akkujen lisävarusteet voivat nostaa valmistuskustannuksia jos akuista saatava hyöty ei riitä kompensoimaan hankintamenoja. Yksittäisissä sovelluksissa akkujen hinta on harvoin kynnyskysymys, mutta sarjatuotannossa akuista aiheutuneet kustannukset voivat olla merkittäviä. Akut turvalaitteineen saattavat myös monimutkaistaa järjestelmää ja kytkentöjä. Teollisuushydrauliikassa koko ja paino harvoin asettavat rajoituksia toteutukselle, mutta liikkuvissa työkoneissa tilanne on toinen. Pienikin akku vaatii oman tilansa ja lisää järjestelmän painoa.

Paineiskuja syntyy hydraulijärjestelmissä, kun venttiili avautuu tai sulkeutuu nopeasti tai jos toimilaitteeseen kohdistuu äkillisiä ulkoisia voimia. Paineiskun seurauksena paine voi hetkellisesti kohota järjestelmässä yli suurimman sallitun käyttöpaineen ja komponentit saattavat vahingoittua nopeasti tai toistuvien paineiskujen seurauksena. Paineiskuja voidaan vaimentaa asentamalla järjestelmään paineakku. Kun paineakku liitetään mahdollisimman lähelle paineiskun syntypaikkaa, paineiskun vaikutus muihin komponentteihin pienenee merkittävästi.

Hydraulijärjestelmissä esiintyy luonnostaan pientä vaihtelua tilavuusvirrassa ja painetasossa, koska pumpun tuotto vaihtelee jaksottaisesti. Hydrauliakuilla voidaan tasata tilavuusvirran ja paineen vaihteluita. Kun akku kytketään järjestelmään, niin jaksottaisuus säilyy, mutta vaihtelun amplitudi pienenee.

Vakiotilavuuspumpua käytettäessä pumpun tuotto pitää mitoittaa suurimman tilavuusvirran tarpeen mukaisesti. Pelkkä vakiotilavuuspumppu toimii hyvin jos tilavuusvirran tarve on tasainen. Jos tilavuusvirran tarve on epätasainen, kannattaa vakiotilavuuspumpun lisäksi käyttää hydrauliakkua, jolloin pumppu voidaan mitoittaa keskimääräisen tilavuusvirran tarpeen mukaisesti. Hydrauliakkua käytetään pumpun rinnalla tilavuusvirran lähteenä, kun toimilaitteille tarvitaan suuria tilavuusvirtoja. Kun toimilaitteille ei tarvita tilavuusvirtaa, ohjataan pumpun tuotto akulle.

Paineakuilla voidaan ylläpitää painetta järjestelmässä ilman pumpun tuottoa. Ilman pumpun tuottoa paine katoaa järjestelmästä vuotojen takia. Jos toimilaitetta ei tarvitse liikuttaa, toimilaitteen yhteyteen liitetty paineakku riittää pitämään painetta yllä kompensoimalla järjestelmän vuotoja.

Nesteen lämpölaajenemista ei tarvitse normaalisti ottaa huomioon hydraulijärjestelmissä, koska lämpötilanmuutoksen aiheuttama paineenmuutos on pieni hydraulijärjestelmän muihin paineenmuutoksiin nähden ja hydraulijärjestelmän lämpötila tasaantuu, kun sitä käytetään jonkin aikaa. Jos järjestelmä tai sen osa on suljettu ja öljy ei vaihdu, lämpötilan muuttuessa öljyn tilavuus pyrkii muuttumaan aiheuttaen muutoksen painetasossa. Lämpenevän tai viilenevän osan puristuskerroin voi olla suuri, jolloin pienikin muutos lämpötilassa voi aiheuttaa suuria muutoksia paineessa. Järjestelmään asennettu paineakku tasaa muuttuvan lämpötilan aiheuttamia paineen vaihteluita. Akulta tuleva tai akkuun menevä tilavuus kompensoi lämpötilan muutokset pitäen järjestelmän paineen lähes vakiona.

Hydraulijärjestelmien kokonaishyötysuhde jää usein varsin huonoksi. Energiaa haaskataan aina, kun mekaanista tehoa muutetaan hydrauliseksi ja hydraulista tehoa muutetaan mekaaniseksi. Myös jokaisella komponentilla on oma hyötysuhteensa joka jää usein parhaimmillaankin vain melko hyväksi. Hydrauliakkujen käyttö mahdollistaa monissa sovelluksissa energian talteenoton toimilaitteilta ja talteen otetun energian uudelleen käyttämisen. Energian varastointi vähentää hukkatehoa ja parantaa järjestelmän energiatehokkuutta merkittävästi.

Hydrauliakkuja voidaan käyttää varolaitteina järjestelmissä. Esimerkiksi pumpun rikkoontuessa tai sähkökatkon aikana akkua voidaan käyttää tilavuusvirran lähteenä, jolla pidetään painetta järjestelmässä tai ajetaan työkierto turvalliseen vaiheeseen.

Akuttomaan hydraulijärjestelmään ei normaalisti varastoidu energiaa, joten järjestelmästä ei aiheudu vaaraa, kun se on poissa päältä. Järjestelmään liitettyyn hydrauliakkuun voidaan kuitenkin varastoida paljon energiaa, joka voi säilyä akussa ja pitää järjestelmän tai sen osan painetason korkealla silloinkin, kun järjestelmä on pois päältä. Hydrauliakkujen valmistus on tarkkaan valvottua toimintaa ja hydrauliakut täytyy koeponnistaa vähintään 1,43 kertaisella paineella suurimpaan käyttöpaineeseen nähden ennen käyttöönottoa [3]. Akkujen yhteyteen järjestelmässä täytyy liittää useita turvalaitteita. Nestepuolen paine pitää olla mitattavissa ja suurin paine pitää olla rajoitettuna. Jos nesteen virtausta akulta pumpulle ei ole rajoitettu, pitää akut voida sulkea järjestelmästä sulkuventtiileillä. Akkuihin varastoitunut energia pitää purkaa, jos järjestelmä sulkeutuu tai jos järjestelmä vikaantuu. Akku voidaan kuitenkin eristää muusta järjestelmästä, jos painetta tarvitaan myös järjestelmän sulkemisen jälkeen. [4]

Hydrauliakkujen testaus varmistaa akkujen rakenteen kestävyys ja turvalaitteet mahdollistavat akkujen vaarattoman käytön myös poikkeustilanteissa. Akkuvalmistaja toimittaa akkujen yhteydessä myös käyttöohjeet, joissa on määriteltä sallitut käyttöolosuhteet ja akkujen turvallinen käyttö. Hydraulijärjestelmän suunnittelijan pitäisi jo suunnitteluvaiheessa ottaa huomioon turvallisuusasiat. Poikkeustilanteessakin järjestelmän pitäisi toimia niin, että se ei aiheuta vaaraa kenellekään. Minkä tahansa komponentin vikaantuminen tai rikkoontuminen on mahdollista ja käyttäjät voivat aiheuttaa erilaisia vaaratilanteita. Hydraulijärjestelmä pitäisi suunnitella mahdollisuuksien mukaan niin, että edellytykset virheelliselle

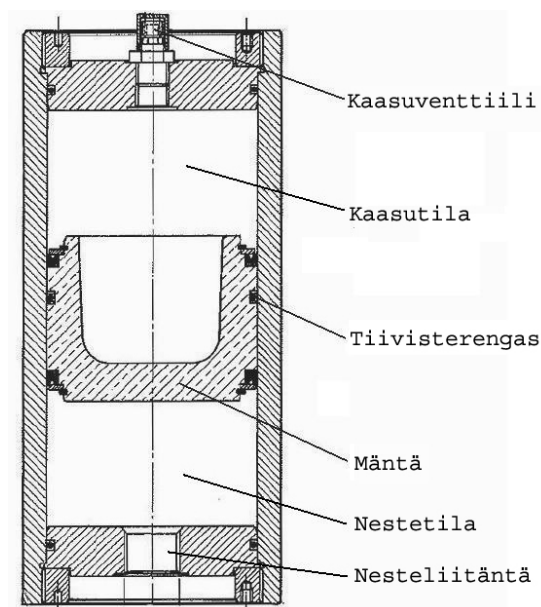
käytölle on poistettu tai estetty ja komponenttien vikaantuminen tai hajoaminen ei aiheuta vaaraa.

2.2. Akkutyypit

Hydrauliakkuja on pääsääntöisesti käytössä kolmea eri tyyppiä. Kaikkien näiden akkujen toiminta perustuu energian varastointiin kokoonpuristuvaan kaasuun. Eri akkutyypit ovat myös rakenteeltaan monella tapaa samanlaisia. Hydrauliakuissa on kaasuventtiili, kaasutila, nesteliitäntä, nestetila ja eroelin. Kaasuventtiilin kautta akku täytetään haluttuun esitäyttöpaineeseen. Kaasuventtiiliä käytetään myös kaasun poistamiseen akusta tarvittaessa. Nesteliitännän avulla akku yhdistetään hydraulijärjestelmään. Akkutyypit jaotellaan sillä perusteella, minkälaisia eroelimiä niissä käytetään erottamaan kaasupuoli nestepuolesta.

2.2.1. Mäntäakut

Mäntäakuissa kaasu- ja nestetilan erottaa toisistaan mäntä, kuva 2.1. Mäntä liikkuu sylinterin sisällä. Männen ympärillä on tiivistinrenkas joka estää virtauksen korkeamman paineen puolelta matalammalle. Tiivistinrenkas koskee sylinterin sisäseinään aiheuttaen liikettä vastustavaa kitkavoimaa, kun mäntä pyrkii siirtymään paine-eron vaikutuksesta.



Kuva 2.1. Mäntäakku. [5]

Männällä on oma hitausmassansa, joka vaikeuttaa männen liiketilän muuttamista. Liikkuvan männen pysäyttäminen on sitä vaikeampaa, mitä suurempi massa männällä

on ja vastaavasti paikallaan olevan männän saaminen liikkeeseen on sitä vaikeampaa, mitä suurempi on männän massa.

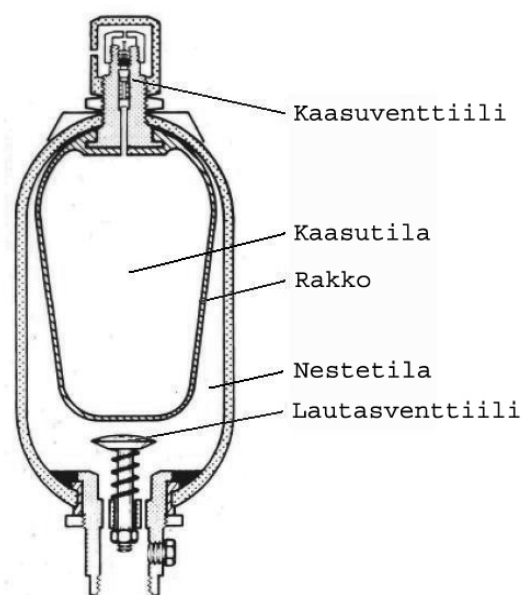
Männän tiivistimien kitkoista ja männän hitausmassasta johtuen mäntäakussa kaasupuolen paine ei seuraa nestepuolen painetta täydellisesti. Normaleissa käyttöolosuhteissa kitkan ja hitausmassan merkitys on vähäinen. Kaasu- ja nestepuolen paine-erosta johtuen mäntäakkua ei kannata käyttää järjestelmässä, jossa paine-erot normaalissa käytössä ovat hyvin pieniä. Mäntäakku ei välttämättä ole hyvä valinta järjestelmään, jossa paineakulla halutaan vaimentaa paineiskuja, koska mäntä ei hitausmassan takia ehdi seurata todella nopeita paineen muutoksia.

Mäntäakussa on vain yksi liikkuva osa ja normaalissa käytössä ainoastaan männän tiivistimet kuluvat. Symmetrinen rakenne ja lujat rakenneosat tekevät akuista erittäin kestäviä. Mäntäakut kestävät suuria paineita ja myös ulkoisia voimia.

Aihiona mäntäakussa toimii sylinterinputki. Kaikki mäntäakut ovat sylinterimäisiä, mutta muuten akkujen koot ja muodot vaihtelevat suuresti. Akkujen tilavuus voidaan valita mielivaltaisesti muuttamalla akun halkaisijaa ja pituutta. Mittojen valinnalla voidaan akku optimoida sijoituskohteen ja asennuspaikan mukaan.

2.2.2. Rakkoakut

Rakkoakussa kaasutilan ja nestetilan erottaa rakko. Rakko on valmistettu joustavasta materiaalista, jolloin se paisuu ja kutistuu järjestelmän paineen mukaisesti. Rakkoakun valmistuksessa rakko kiinnitetään kaasuventtiilin runkoon vulkanisoimalla. Rakon tunkeutuminen nesteliitintään estetään mekaanisesti peittämällä nesteliitintä lautasventtiilillä tai sihtimäisellä laatalla. Rakkoakun rakenne on esitetty kuvassa 2.2. [2, s. 156]

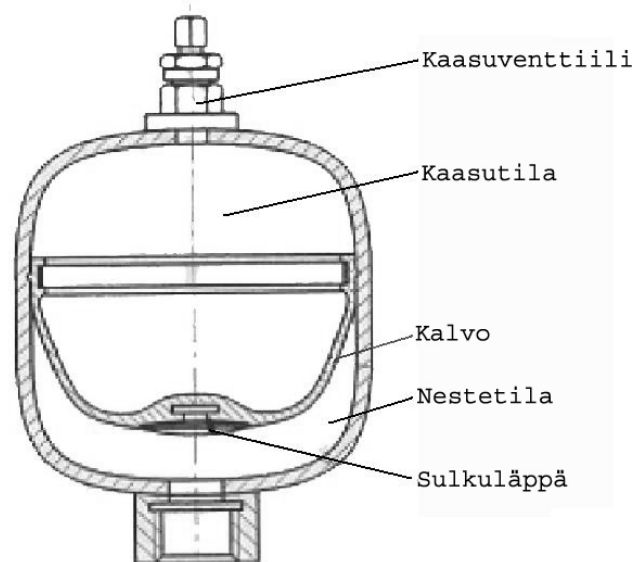


Kuva 2.2. Rakkoakku. [6]

Rakkoakku on yleiskäyttöinen hydrauliakku joita on lukumääräisesti käytössä eniten. Elastinen rakko pääsee muuttamaan muotoaan ja liikkumaan akun teräseinien sisällä vapaasti. Rakon vapaa liike ei vaadi voitelua, mikä mahdollistaa myös muiden nesteiden, kuin öljyn, käytön hydraulinesteenä. Rakkoakussa painovoima tekee akun toiminnasta epäsymmetristä, jos akku on asennettu muuten kuin pystyasentoon. Epäsymmetrinen liike voi johtaa siihen että osa nesteestä ei pääse purkautumaan akusta tai epäsymmetriset voimat voivat jopa vahingoittaa akkua, minkä vuoksi rakkoakku pitäisi asentaa pystysuoraan.

2.2.3. Kalvoakut

Kalvoakussa akun sisäseinämään kiinnitetty kalvo jakaa akun tilavuuden kaasu- ja nestetilaan, kuva 2.3. Kalvo liikkuu niin, että kaasutilan paine seuraa nestetilan painetta. Kalvon keskellä on sulkuläppä joka estää kalvoa tunkeutumasta nesteliitaintään.



Kuva 2.3. Kalvoakku. [6]

Kalvoakkuja käytetään järjestelmissä, joissa akulta tarvittava nestetilavuus on pieni. Kalvoakkuja valmistetaan vain pienissä kokoluokissa ja niiden markkinaosuus on huomattavasti rakkoakkuja pienempi. Toiminnallisilta ominaisuuksiltaan kalvoakut ovat hyvin samanlaisia kuin rakkoakut koska molempien käyttö perustuu elastiseen eroelimeen, joka on kiinnitetty pysyvästi akun runkoon.

2.3. Akkutyypin vertailu

Kaikki akkutyypit perustuvat kaasun kokoonpuristumiseen, jolloin eri akkutyypin toiminta on järjestelmän kannalta katsoen pääpiirteittäin samanlaista. Käytettäessä

samoja tilavuuksia ja esitäyttöpaineita ovat eri akkujen ominaiskäyrät lähellä toisiaan. Rakenteiden erilaisuus tulee kuitenkin esiin, jos käyttäytymistä tutkitaan riittäväällä tarkkuudella, pitkällä käyttöajalla tai jos tarkastelun kohteena ei ole pelkkä hydraulijärjestelmä.

Rakkoakun rakko ja kalvoakun kalvo eivät pysty laajenemaan ja supistumaan rajattomasti. Eroelimen muodonmuutoskyky asettaa rajat sille kuinka paljon painetaso saa vaihdella akun nestepuolella. Järjestelmän suurimman ja pienimmän käyttöpaineen osamäärää kutsutaan puristussuhteeksi. Rakko- ja kalvoakuilla puristussuhteeksi suositellaan suurimmillaan arvoa 4:1, eli suurin käyttöpaine saa olla vain 4 kertaa suurempi kuin matalin käyttöpaine [7]. Mäntäakuilla paine-ero aiheuttaa vain männän siirtymisen sylinterin sisällä, minkä ansiosta rakenne kestää paljon suurempia puristussuhteita kuin rakko- ja kalvoakuilla. Mäntäakun puristussuhde voi olla jopa 10:1 [8]. Käyttämällä suurempia puristussuhteita saadaan akusta enemmän nestetilavuutta hydraulijärjestelmään. Mäntäakulla puristussuhdetta voidaan nostaa korkeaksi, jolloin pienempi akku pystyy varastoimaan halutun nestetilavuuden.

Hydrauliakulta saatava suurin nestetilavuus riippuu akun nestetilavuudesta suurimmalla ja pienimmällä käyttöpaineella. Rakko- ja kalvoakua ei suositella tyhjennettäväksi kokonaan nesteestä, minkä vuoksi akkuun jää noin kymmenen prosentin kuollut tilavuus jota ei voida hyödyntää. Mäntäakun rakenne mahdollistaa männän ajamisen nesteliitäntään saakka, jolloin akusta on käytettävissä kaikki neste ja akun tyhjentämistä nesteestä ei tarvitse varoa.

Rakkoakun suurinta sallittua tilavuusvirtaa rajoittaa rakon kesto. Rakko voi vahingoittua, jos se pääsee laajenemaan liian nopeasti. Mäntäakussa tilavuusvirtaa rajoittava tekijä on männän tiivistimien suurin sallittu liikenopeus. Käyttämällä mäntäakkuja päästään suurempiin tilavuusvirtoihin. [9]

Männän hitausmassa ja männän ja sylinterin väliset kitkat kasvattavat mäntäakun vasteaikaa, minkä vuoksi mäntäakku ei ehdi reagoimaan nopeataajuuksiseen vaihteluun. Rakko- ja kalvoakussa on nopea vasteaika, jolloin akku mukautuu pieniinkin paine-eroihin nopeasti toisin kuin mäntäakku. Mäntäakku ei sovellu käytettäväksi sovelluksessa, jossa akulla pyritään vaimentamaan nopeataajuuksista sykintää tai pieniä paine-eroja. Jos järjestelmän paine värisee nopealla tahdilla voi mäntä liikahdella nopeassa tahdissa pieniä siirtymiä ilman kunnollista voittoa ja tiivistimet voivat vaurioitua. Rakko- ja kalvoakut kestävät värinää mäntäakkuja paremmin.

Elastiset eroelimet rakko- ja kalvoakkuihin valmistetaan kumista, joka ei kestä suuria vaihteluita lämpötilassa. Valmistusmateriaali rajoittaa akkujen korkeinta ja matalinta käyttölämpötilaa. Männän tiivistimet eivät kestä rajattomasti kylmää tai kuumaa, mutta mäntäakkujen käyttölämpötila-alue on hydrauliakkujen laajin.

Mäntäakussa männän tiivistimet ja sylinteri muodostavat liukupinnan. Männän ja sylinterin sisäseinän välitys on ahdas ja öljyssä mahdollisesti olevat pienetkin epäpuhtaudet voivat vahingoittaa akkua tai estää sen toiminnan. Rakko- ja kalvoakussa ei ole välyksiä joita hiukkaset voisivat tukkia, joten öljyn likaisuus ei vaikuta akkujen

toimintaan. Mäntäakun liukupari vaatii voitelua ja hydraulinesteenä ei voi käyttää normaalisti muuta kuin öljyä.

Mäntäakun tilavuuden määrää halkaisija ja pituus, jotka voidaan valita vapaasti. Mäntäakku voidaan optimoida ominaisuuksiltaan ja ulkomitoiltaan käyttökohteen mukaan. Rakko- ja kalvoakut valmistetaan vakioimitoihin, joista käyttäjä joutuu valitsemaan. Rakkoakun rakon valmistuksen vaikeuksista johtuen rakkoakkuja ei voi valmistaa rajoittamattoman kokoisina. Mäntäakkujen rakenne ei rajoita akun kapasiteettia.

Mäntäakku voidaan asentaa mihin asentoon tahansa. Symmetrisen rakenteen takia akku säilyttää ominaisuutensa eri asennusasunnoissa. Rakkoakun toiminta riippuu asennusasennosta. Jos rakkoakku asennetaan muuten kuin pystysuoraan ei rakko pysy akun keskellä ja akku ei toimi normaalilla tavalla.

Rakko- ja kalvoakkuja ei suositella varastoitaviksi pitkäksi aikaa. Pitkän varastoinnin aikana kuminen rakko tai kalvo saattaa heikentyä. Mäntäakkuja voidaan varastoida ilman haittaa. Ainoa ongelma mäntäakkujen varastoinnissa on ilman mukana sylinteriin pyrkivä kosteus, mutta ongelma on vältettävissä pitämällä akussa ylipainetta.

Mäntäakussa eroelin ja päätykappaleet tehdään metallista. Mäntäakku painaa huomattavasti enemmän kuin vastaavan tilavuuksinen rakkoakku. Teollisuushydrauliikassa akun paino harvoin on huomion arvoinen asia, mutta liikkuvissa työkoneissa kevyempi rakenne on tärkeä etu.

Mäntäakun kunto riippuu tiivistimien tilasta. Tiivistimet on vaihdettava kun akun hyötysuhde alkaa laskea. Tiivistimien vaihto on kuitenkin halpaa ja yksinkertaista. Uusilla tiivistimillä akku toimii taas alkuperäisellä tavallaan. Muiden akkutyypin eroelinten vaihtaminen on huomattavan paljon kalliimpaa ja työläämpää. Rakkoakun huoltaminen voi olla esitäyttöpaineen lisäämistä lukuun ottamatta mahdotonta.

Rakko- ja kalvoakuissa kaasu läpäisee hiljalleen kumin ja pakenee kaasutilasta. Esitäyttöpaineen väheneminen ajan kanssa on väistämätöntä ja akkujen esitäyttöpainetta on ajoittain lisättävä jos akkua käytetään pitkään. Mäntäakuilla kaasua pääsee männän tiivistimien kautta pakenemaan paljon vähemmän ja huoltoa tarvitaan harvemmin. [9]

Mäntäakussa männän asemaa ja esitäyttöpainetta voidaan anturoida. Männän asemasta voidaan laskea akussa olevaa nestetilavuutta reaaliajassa. Anturointia voidaan käyttää avuksi pumpun ohjauksessa, ongelmien havaitsemisessa, esitäyttöpaineen tarkistuksessa ja käytettävissä olevan nestetilavuuden havainnollistamisessa.

Mäntäakun toiminta riippuu sylinterin ja männän ominaisuuksista ja männän tiivistimistä. Koneistamalla voidaan täyttää erittäin korkeat laatuvaatimukset männän ja sylinterin valmistuksessa, mahdollistaen mäntäakun turvallisen käytön. Jos mäntäakku alkaa vaurioitua antaa se merkkejä vikaantumisestaan vuotoina, vasteajan kasvuna, hyötysuhteen heikentymisenä ja esitäyttöpaineen laskuna. Huomioimalla vikaantumisen merkit ja huoltamalla akun välttää suuremmat vaurioit järjestelmälle. Rakko- ja kalvoakun valmistuksessa kriittinen komponentti on eroelin. Rakon tai kalvon valmistuksessa on vaikeaa saada koostumus, sitkeys, paksuus ja virheettömyys luotettavasti oikein. Jos rakko tai kalvo hajoaa hydraulijärjestelmässä, siitä ei tule

ennakkovaroitusta hajoamisen tapahtuessa kerralla ja seurauksena voi olla vaaratilanne ja järjestelmän vaurioituminen.

Moniin sovelluksiin voi valita minkä tahansa akkutyypin. Useissa käyttökohteissa akun toimintaan vaikuttavat kuitenkin lukuiset tekijät. Yksikin järjestelmän tai ympäristön ominaisuus voi estää tietyn akkutyypin käytön kyseisessä sovelluksessa. Taulukkoihin 2.1. ja 2.2 on listattu akun valinnassa huomioon otettavia tekijöitä. Kalvoakkujen toiminnalliset ominaisuudet ovat samanlaisia kuin rakkoakkujen ja kalvoakkuja valmistetaan vain pienille tilavuuksille, joten seuraavaan listaan ei ole erikseen lueteltu kalvoakkujen ominaisuuksia.

Taulukko 2.1. *Hydrauliakun valintaan vaikuttavia tekijöitä, rakkoakut.*

Edut	Haitat
Keveys	Puristussuhde suurimmillaan 4:1 → suuret akut
Epäpuhtauksien ja muiden nesteiden kesto	Korjaukset epätaloudellisia
Nopea vasteaika	Huono kylmänkesto
Soveltuu korkeataajuuksiin käyttöihin	Äkillinen hajoaminen
	Anturointimahdollisuuksien rajallisuus
	Esitäyttöpaineen katoaminen → käyttöajan rajallisuus ja huollon tarve
	Rajallinen koko- ja muotovalikoima

Taulukko 2.2. *Hydrauliakun valintaan vaikuttavia tekijöitä, mäntäakut*

Edut	Haitat
Puristussuhde jopa 10:1 → pieni rakennekoko	Painava
Suuret tilavuusvirrat	Ei sovellu korkeataajuuksiin käyttöihin
Esitäyttöpaineen hidas katoaminen → pitkät huoltovälit	Ei sovellu järjestelmiin joissa paine-erot ovat hyvin pieniä
Halpa ja yksinkertainen huolto	Herkkä epäpuhtauksille
Ääriämpötilojen kesto	
Akun optimointi sovelluksen mukaan	
Rajoittamaton asennusasento	
Männän aseman ja esitäyttöpaineen anturointi mahdollista	
Asteittainen hajoaminen	

Suurimmassa osassa sovelluksia mikään tekijä ei kokonaan sulje pois mitään akkuvaihtoehtoa. Akun valinta on monen tekijän summa. Käyttökohteista riippuen eri ominaisuudet voivat muodostua tärkeimmiksi valintakriteereiksi.

Edellä on selitetty laajasti hydrauliakku­tyyppien eroista ja siitä miten ne vaikuttavat akkujen toimintaan ja valintaan. Rakenteelliset erot aiheuttavat samanlaisia ominaisuuksia saman tyyppisiin akkuihin. Ominaisuuksia on kuitenkin hieman yleistetty ja varsinkin erikoisilla, normaalista poikkeavilla, ratkaisuilla voidaan saavuttaa ominaisuuksia, jotka eivät täysin vastaa saman akkutyypin normaaleita ominaisuuksia.

2.4. Hydrauliakku­jen ominaisuuksien mittaus

Mittaaminen ja testaaminen ovat olennaisia toimenpiteitä tuotekehityksen ja tuotannon laadunvalvonnan kannalta. Ilman mittauksista saatavaa numeerista tietoa tuotteiden ja komponenttien laadusta ei ole varmuutta. Mittausdataa keräämällä voidaan pitää kirjaa tuotteista ja mitattavien suureiden kehityksestä.

Hydrauliakku­jen ominaisuuksien mittaamisessa on omat erityispiirteensä hydraulii­kan mittausten ominaispiirteiden lisäksi. Hydrauliakku­jen toiminta riippuu paljolti kaasun ominaisuuksista. Akkuja käytettäessä tai niiden ominaisuuksia mitattaessa toimitaan hydraulinesteen ja kaasun rajapinnassa, jossa molempien fluidien ominaisuudet määräävät yhdessä akun lopullisen käyttäytymisen.

Kaasun mukanaolo lisää hydraulii­kan yhteyteen useita vähemmän tunnettuja tekijöitä tehden mittaamisesta entistä monimutkaisempaa ja samalla tärkeämpää. Toimittaessa kahden aineen kanssa pitää ymmärtää molempia ja saada mittaustietoa, jotta akun toimintaa voidaan ymmärtää, selittää ja ennakoida. Kaasu lisää osaltaan mittaamiseen omia haasteita ja huomioon otettavia asioita. Esimerkiksi hydraulijärjestelmän dynamiikkaan vaikuttaa kokoonpuristuvuus voimakkaasti. Hydrauliakullisessa järjestelmässä akku joustaa, muut komponentit joustavat ja hydraulineste ja siihen liukenematon kaasu joustavat, jolloin järjestelmän dynaamista käyttäytymistä voi olla todella hankala ennustaa tarkasti.

Normaaleissa hydraulikomponenteissa liikkuvien osien välillä on väly, josta hydraulineste vuotaa korkeamman paineen puolelta matalamman paineen puolelle. Vuotovirtaus heikentää komponenttien volumetrasta hyötysuhdetta, mutta samalla se voitelee liukupintoja. Hydraulineste vaatii tuntevan välyksen päästäkseen puolelta toiselle, mutta kaasu saattaa siirtyä mikroskooppisen pienestä raosta nestepuolelle. Kaasun siirtyminen paineakun kaasupuolelta nestepuolelle vähentää akussa olevan kaasun määrää ja lisää hydraulinesteessä olevan kaasun määrää. Akussa olevan kaasun väheneminen pienentää akun käyttöikää, lisää kulumista, vähentää esitäyttöpainetta ja saattaa johtaa tilanteeseen jossa akku ei toimi halutulla tavalla. Nesteessä olevan kaasun määrän kasvaessa neste joutuu olemaan kauemman aikaa säiliössä, jotta siitä ehtisi erottua kaasut. Nesteeseen voi varastoitua kaasuja, jos neste ei ole riittävästi aikaa säiliössä tai jos neste ei kulje säiliön kautta, esimerkiksi suljetussa järjestelmässä. Nesteeseen liukenematon kaasu suurentaa nesteen kokoonpuristuvuutta ja aiheuttaa

hydrauliöljyn vanhentumista ja hapettumista. Suuri määrä kaasua aiheuttaa myös kavitaatiota, joka johtaa komponenttien kulumiseen. [2]

Normaalit hydraulikassa käytössä olevat komponentit eivät usein sovellu käytettäväksi akkujen kaasupuolella. Kaasu asettaa osille ja komponenteille nesteitä huomattavasti suuremmat tiiveysvaatimukset. Edes kaikki kaasukäyttöön valmistetut osat eivät toimi halutulla tavalla tai tasolla, ainakaan niin korkeissa paineissa joihin paineakut joutuvat.

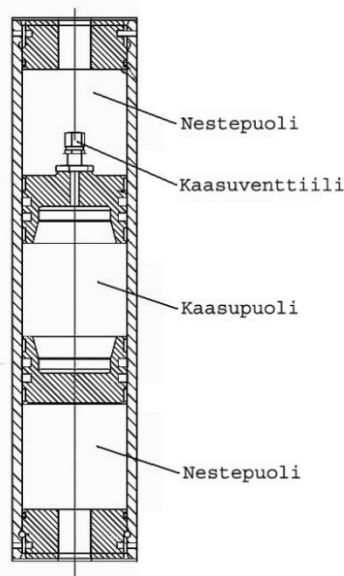
2.5. Hydroll akkuvalmistajana

Hydroll Oy on Lapualainen yritys joka valmistaa ja markkinoi mäntätoimisia painevaraajia. Yrityksen tuotevalikoimaan kuuluvat yksitoimiset mäntäpainevaraajat, Hydrollin patentoimat kaksoispainevaraajat ja painevaraajien lisävarusteet.

Hydroll Oy perustettiin vuonna 1998. Yritys on ollut osa Etola-yhtiöitä vuodesta 2004. Hydrollilla on Lapualla kaksi tuotantotilaa, joita kehitetään ja joihin investoidaan parhaillaan.

HPS-sarjan painevaraajat ovat erittäin kestäviä yksitoimisia mäntäakkuja, jotka on valmistettu kestäväksi arktisia olosuhteita kovimmissakin rasituksissa. HPS-sarjan painevaraajilla on erinomainen kaasunpitävyys ja ne soveltuvat kovaan, dynaamiseen kuormitukseen. Käyttökohteesta riippuen HPS-sarjan painevaraajia on valittavana viisi eri tyyppiä. Näillä akkutyypeillä on hieman toisistaan poikkeava rakenne, joilla on päästy vaihteleviin ominaisuuksiin ja jokaiseen käyttötarkoitukseen ja –tilanteeseen on valittavana sopiva akku. Akkujen paineluokat ovat 250, 350 ja 415 bar ja käyttölämpötila on $-40 - +100$ °C. Vakiona valmistettavien akkujen tilavuus on 0,1 – 80 litraa, mutta myös erikoiskokoja valmistetaan tilausten mukaan.

HPD-sarjan painevaraajissa yhteen akkukonstruktion on yhdistetty kaksi nesteliitäntää. Kaksoismäntäpainevaraajan rakenne on esitetty kuvassa 2.4.



Kuva 2.4. Kaksoismäntäpainevaraaja. [10]

Käyttämällä HPD-sarjan akkuja voidaan monissa sovelluksissa saavuttaa tila- ja kustannussäästöjä. HPD-sarjan akkuja valmistetaan kolmea eri tyyppiä erilaisiin sovelluksiin. Kaikkien kaksoispainevaraajien paineluokka on 250 bar ja käyttölämpötila -40 – +100 °C. Normaalien HPD-sarjan akkujen tilavuus on 0,4 – 1 litraa. Kaikki Hydrrollin painevaraajat täyttävät Euroopan painelaitedirektiivin PED (97/23/EY) vaatimukset.

Kaksoispainevaraajia käytetään useissa mobiilisovelluksissa paineiskujen ja –vaihteluiden tasaamiseen. Mobiilikäyttöissä kaksoispainevaraajien pieni koko ja paino ovat suuria etuja. HPS-sarjan painevaraajat ovat yleiskäyttöisiä ja niitä löytyy lukuisista tehtävistä erittäin monilta teollisuuden aloilta muun muassa kaivos-, metsäkone-, maatalous-, lastaus-, tuulivoima-, paperi- ja metalliteollisuudesta.

Hydrrollin koko liiketoiminta rakentuu mäntäpainevaraajien valmistamisen ja markkinoimisen ympärille. Keskittyminen ydinosamisalueeseen on johtanut erinomaisiin tuotteisiin ja uusiin tuoteinnovaatioihin. Vahvat tuotteet ovat vallanneet yritykselle yhä suurempaa markkina-asemaa ja nykyään Hydrroll on suuri akkujen toimittaja niin Suomessa kuin ulkomaillakin. Tuotannon ja markkinaosuuden kasvu on ollut voimakasta ja jatkuvaa ja nykyään akkuja valmistetaan kymmeniä tuhansia kappaleita vuosittain.

3. TESTILAITTEISTON VAATIMUSMÄÄRITTELY

Hydroll Oy:llä kaikki painevaraajiin käytettävät osat läpäisevät vähintään yhden tarkistuksen ennen kokoonpanoa. Joillekin osille tarkastus on silmämääräinen, mutta esimerkiksi mäntien mittoja tarkistetaan satunnaisotannalla. Tuotantolinjalla karsiutuvat pois lähes kaikki vialliset komponentit. Kokoonpanon jälkeen kaikki akut käyvät rakennetestissä, jossa ne paineistetaan viiden minuutin ajaksi 1,43 kertaiselle paineelle suurimpaan käyttöpaineeseensa nähden. Mäntäakkujen valmistus on erittäin tarkkaa toimintaa ja tuotteen voi pilata jopa niin pieni virhe, että virheen havaitseminen paljaalla silmällä on lähes mahdotonta. Testaamalla ja testilaitteella voidaan edelleen kehittää laadunvalvontaa. Testaamalla voidaan selvittää uusien akkujen ominaisuuksia, pitää kirjaa akkujen ominaisuuksista ja laadun kehittymisestä tai heikkenemisestä ja kokeilla miten erilaiset pienet viat tai valmistusvirheet vaikuttavat akkujen ominaisuuksiin.

Tuotekehityksessä on tarve akkujen testaamiselle ollut pitkään. Hyviä rakenteita ja ratkaisuita voidaan hakea laskemalla ja mallintamalla. Suunnittelun jälkeen pitäisi kuitenkin prototyyppejä päästä testaamaan. Teoriatasolla tapahtunut laskenta voi osoittautua käytännön mittauksissa vääräksi, etenkin jos lähtöarvoissa on jouduttu luottamaan valmistajan ilmoittamiin arvoihin tai valmistaja ei edes ilmoita kaikkia tarvittavia ominaisuuksia osistaan.

Testilaitteiston avulla pitäisi pystyä vaivattomasti kokeilemaan erilaisia ratkaisuja, esimerkiksi vaihtoehtoisia rakenteita ja materiaaleja tai eritoimittajien komponentteja. Mittaamalla saadaan numeerista tietoa jonka avulla päästään käsiksi ominaisuuksiin, parantamista tarvitseviin ominaisuuksiin ja muutoksen suuntaan. Kokeellisesti voidaan myös vertailla eri akkuja tai komponentteja. Tallennettua mittaustietoa voidaan myöhemmin käyttää apuna vastaavissa tilanteissa.

Hydrauliakkujen käyttösovelluksista, käyttötavoista ja käyttöympäristöstä riippuvat ominaisuudet, joita akuilta vaaditaan ja ominaisuudet, jotka määrittelevät akun hyvyyden. Akuilta halutaan sovelluksesta toiseen samoja ominaisuuksia, mutta ominaisuuksien kriittisyys vaihtelee ja se mikä riittää toisessa sovelluksessa ei välttämättä täytä toisen sovelluksen vaatimuksia.

Jotta saataisiin realistista tietoa paineakkujen käytöstä, tiedusteltiin akkujen käyttäjiltä tyypillisiä käyttöolosuhteita ja työkiertoja. Kun tiedetään millaisessa käytössä akku on asiakkailta, voidaan käyttötestejä tehdä samanlaisissa työkiertoissa tai samanlaisissa mutta kovennetuissa työkiertoissa. Todellista käyttötilannetta hyvin vastaavilla testeillä päästään optimoimaan rakennetta ja komponentteja käyttökohteen tai asiakkaan mukaan.

Mäntäakun tilaajat käyttävät akkua lähes aina järjestelmissä, joissa akuilta odotetaan pitkää käyttöikää. Työkiertoja saattaa tulla akulle erittäin paljon ja akun toiminta ei saisi muuttua pitkän käytön aikana. Asiakkaat odottavat akuiltaan paitsi pitkää elinkaarta, myös vähäistä huollon tarvetta. Jotta akuille voitaisiin luvata pienet elinkaarikustannukset ja suuri luotettavuus, on akuille ensin tehtävä elinkaaritestejä. Vanhat luotettavaksi todetut komponentit toimivat odotetulla tavalla, mutta suunniteltaessa ja valmistettaessa uusien kehitysasteiden akkuja on erittäin tärkeää päästä suorittamaan elinkaaritesteauksia uusille ratkaisuille.

Kasvaneet laatuvaatimukset ja kansainvälisillä markkinoilla toimiminen heijastuvat tuotantoketjussa alihankkijoille. Akuilta ei vaadita vain luotettavuutta ja hyviä ominaisuuksia, kasvavissa määrin asiakkaat haluavat tietoa akkujen toiminnasta ja näyttöjä tuotteiden luotettavuudesta. Asiakkaiden kanssa käytyjen keskustelujen aikana pyrittiin selvittämään mitä ominaisuuksia akuilta erityisesti halutaan ja millaista tietoa akuista kaivataan tilaajan näkökulmasta.

Selvittämällä mitkä ominaisuudet ovat tärkeitä akuissa voidaan akkujen kehityksessä keskittää huomiota erityisesti niihin ominaisuuksiin vaikuttaviin tekijöihin. Akkujen kaikkia ominaisuuksia kehitetään, mutta ilman testeistä saatavaa mittaustietoa ei erilaisten muutosten vaikutuksesta tai tarpeellisuudesta saada tietoa. Testilaitteistolla mitataan akkujen ominaisuuksia niin että eri ratkaisuista pystytään todentamaan muutosten suuruus ja suunta. Jos testilaitteistolla saadaan vertailukelpoista mittaustietoa, voidaan akkujen ominaisuuksia tilastoida ja pyrkiä optimoimaan akkujen rakennetta.

3.1. Yleiset vaatimukset

Testilaitteiston hankinta on ollut jo jonkin aikaa ennen tämän työn aloittamista Hydrollin tavoitteena, joten laitteiston vaatimuksista ja toteutuksesta oli valmiiksi mielipiteitä. Testilaitteiston ollessa kuitenkin ensimmäinen laatuaan aloitettiin vaatimusmäärittely alusta. Projektiin osallistunut henkilöstö pääsi esittämään mielipiteitään ja palautetta testilaitteiston ominaisuuksista ja mahdollisista toiminnoista. Vaatimusmäärittelyyn myös palattiin, kun uusia ajatuksia tuli esiin tai vanhoista ajatuksista luovuttiin.

Koska Hydroll Oy on mäntäakkuja valmistava yritys, oli alusta asti selvää ettei testilaitteistoa valmisteta itse, vaan se tilataan ulkopuoliselta toimittajalta. Työn tarkoitus oli selvittää mitä testilaitteistolta vaaditaan ja millainen sen olisi oltava, jotta Hydroll saisi testilaitteistosta suurimman mahdollisen hyödyn. Testilaitteistosta pitäisi laatia tarjouspyyntö, joka lähetettäisiin valituille mahdollisille laitteiston toimittajille.

Tarjouspyyntöön pitäisi laatia etenkin testilaitteiston toiminnalliset vaatimukset. Järjestelmän komponentit mitoitettiin, mutta jätettiin valitsematta. Näin annettiin toimittajille mahdollisuus valita omat komponenttinsa järjestelmään. Ohjauslogiikan toteutus jätettiin myös laitteiston toimittajan vastuulle.

Testattavista paineakuista haluttiin laitteiston sopivan erityisesti noin 20 litran akuille. 20-litraisten akkujen muodostaessa tärkeimmän kohderyhmän testeille myös pienempiä ja suurempia akkuja haluttiin testattavaksi vähäisemmissä määrin. Tehon ja tilavuusvirran tarve vaihtelee testeissä suuresti akkujen koon ja halutun testiohjelman mukaan. Tavoite oli kuitenkin saada useita akkuja testattavaksi samaan aikaan. Testattaessa useaa akkua samanaikaisesti voidaan vertailla rinnakkaisista akuista saatavia lukemia ja myöhemmin akut avattaessa myös kulumista. Pitkäkestoista testiä tehtäessä säästetään myös paljon aikaa testaamalla useaa akkua samanaikaisesti.

Testilaitteistosta haluttiin myös mahdollisimman joustava, jotta ei suljettaisi pois mahdollisia myöhemmin tehtäviä jälkiasennuksia tai muutoksia. Esimerkiksi mittauksen kohteissa tai mittauksen tarkkuudessa saattaa myöhemmin tulla lisäyksiä tai täsmennyksiä. Laitteistolla voi testata minkä tahansa tyyppisiä tai kokoisia hydrauliakkuja jos pelkkä nesteliitäntä riittää eikä akkua tarvitse kiinnittää testikehikkoon. Anturit ovat myös helposti vaihdettavissa toisiin tarpeen mukaan. Vähemmän joustavan testijärjestelmän kanssa ongelmia saattaisi tulla todennäköisemmin rajallisista mittauskanavista tai järjestelmän ohjauksen jäykästä ohjelmoinnista.

3.1.1. Mekaanisen rakenteen vaatimukset

Testikehikossa haluttiin olevan paikka vähintään neljälle 25-litraiselle paineakulle. Suurempien akkujen testitarve on paljon vähäisempi ja ne voidaan testata ilman kehikossa olevaa valmista paikkaa. Ajettaessa testejä pienemmillä akuilla tai testejä joissa tilavuusvirran tarve on muuten vähäinen, pystyy koneikko tuottamaan riittävästi tilavuusvirtaa useammallekin akulle. Testilaitteistoon haluttiin asentaa valmiiksi liitännät joihin saisi testattavaksi suurimmillaan kahdeksan akkua samaan aikaan.

Mäntäakuilla mitat vaihtelevat pituuden ja halkaisijan mukaan. Pisimmät testattavat akut ovat alle 2500 mm pitkiä. Testattavien akkujen halkaisija vaihtelee välillä 100–230 mm. Suurin massa akulla voi olla jopa 300 kg.

Hydrauliakut asennetaan normaalisti pystysuoraan. Pystysuoraan olevassa akussa epäpuhtaudet ja voimat ovat symmetrisesti jakaantuneet. Jos akku on vaakatasossa niin raskaammat ainesosat pyrkivät akun pohjalle ja kevyemmät akun yläosiin. Öljyä kevyempiä komponentteja ovat kaasut ja raskaampia aineita ovat vesi ja kiinteät epäpuhtaudet. Pystyasento estää epäpuhtauskeskittymiä, akkujen ruostumista ja männän ja tiivistimien epätasaista rasitusta. Ongelmat näkyvät lähinnä jos akut pysyvät pitkään samassa asennossa ja jos akkuja ei aktiivisesti käytetä, asennon vaikutus riippuu hyvin paljon öljyn laadusta. Vaaka-asento aiheuttaa paljon todennäköisemmin ongelmia jos öljyssä on paljon epäpuhtauksia. Normaalisti akkuja testataan samassa asennossa kuin käytetään, eli pystyssä.

Joissakin käyttösovelluksissa hydrauliakkuja ei kuitenkaan voida asentaa pystyyn tai akkujen asento vaihtelee työkierron mukana tai epäsäännöllisesti. Akkujen

asento vaikuttaa hieman joihinkin ominaisuuksiin. Jotta päästäisiin mittaamaan asennon vaikutusta akun toimintaan, haluttiin testikehikon asennon olevan säädettävissä.

Hydrollin mäntäakut valmistetaan kestäväksi arktista käyttöä. Akkujen luvataan toimivan jopa -40 celsiusasteessa. Akkujen pakkaskestävyyttä testataan erillisissä pakkahuoneissa tai -konteissa. Testilaitteiston pitää olla siirrettävissä haluttuun paikkaan pyörien avulla tai trukilla. Koneikkoa ei ole järkevää sijoittaa pakkasteisiin, joten koneikon ja testikehikon pitää olla erilliset.

3.1.2. Vaatimukset ohjauslogiikalle

Ohjauslogiikan haluttiin ajavan itsenäisesti käyttäjän valitsemaa testiohjelmia. Testit saattavat olla pitkäkestoisia ohjelmia, joissa akkua rasitetaan toistuvilla painealoilla. Logiikan pitää ajaa tarvittaessa testiä ilman käyttäjää sen jälkeen kun haluttu testiohjelma on valittu. Testiohjelmissa halutaan akkujen paineen vaihtelevan ennalta määrättyllä tavalla ajan funktiona. Ohjelman pitää ohjata järjestelmän toimintaa, jotta haluttu testisykli saavutetaan.

Ohjauslogiikan käyttöliittymän pitää olla helppokäyttöinen ja mahdollistaa että testaja voi muuttaa testejä ja asetuksia. Valmiiden testisykliä lisäksi ohjelmaan pitää voida syöttää ja tallentaa mielivaltaisia painealoja halutun kokoisille akuille. Suurin osa halutuista testeistä on pitkäkestoisia ja syklimäärät käyttäjä saa valita vapaasti.

Ohjelmiston pitää tallentaa kaikki mittaustieto käyttäjää varten. Testitulosten analysointi jää ihmiselle, mutta ohjelman pitää tehdä jokaisesta testistä tiedosto johon on kerätty kaikki mitattu tieto kuvaajina ajan suhteen ja mittauspisteet. Luonnollisesti ohjelman pitää mahdollistaa testilaitteiston turvallinen käyttö. Poikkeustilanteessa ohjelman on ajettava järjestelmä vaarattomaan tilaan.

3.2. Valvottavien toimintasuureiden mittaus

Testilaitteiston tehtävä on mittaamalla selvittää hydrauliakkujen ominaisuuksia. Kaikki ominaisuudet eivät ole suoraan tai edes välillisesti mitattavissa. Akun hinta, ulkonäkö ja asennettavuus ovat esimerkkejä ominaisuuksista, jotka eivät selviä yksinkertaisesti mittaamalla, kun taas hyötysuhde ja huoltoväli ovat esimerkkejä ominaisuuksista, jotka voidaan laskea mittausten perusteella. Testilaitteistolla on tarkoitus tehdä mittauksia, joista selviää tärkeitä ominaisuuksia akuista ja joiden avulla voidaan päätellä tai laskea muita ominaisuuksia.

Testilaitteistolla on tarkoitus testata useita paineakkuja samanaikaisesti. Jotta testilaitteisto toimisi tasaisesti ja tulokset olisivat vertailukelpoisia, pitää akkujen olla mieluiten samaa kokoluokkaa ja mahdollisimman symmetrisiä. Akkuja voidaan testata myös yksittäin, mutta useiden akkujen samanaikaisella testaamisella saavutetaan aikasäästöä ja saadaan vertailukelpoisia tuloksia.

Paineakuille halutaan mahdollisuus suorittaa pitotestejä, eli pitää akkuja paineistettuna ja seurata mahdollisia muutoksia paineessa, kun akut ovat suljetut hydraulijärjestelmästä. Luistiventtiileillä tapahtuu välyksien kautta aina pientä vuotovirtausta korkeamman paineen puolelta matalamman paineen puolelle. Vuotovirtaus estää pitotestin suorittamisen, joten akkujen ja muun järjestelmän välissä olevien venttiileiden on oltava istukkatyypisiä.

Useissa sovelluksissa paineakkujen halutaan tasaavan paineiskuja. Akkujen käyttö paineiskujen tasauksessa on erittäin tavallista esimerkiksi liikkuvien työkoneiden hydraulijärjestelmissä. Akkujen käyttäytymisen tutkimiseksi paineiskujen tapahtuessa haluttiin järjestelmään mahdollisuus tuottaa paineiskuja akuille.

Järjestelmän hyvä ja turvallinen toiminta asettaa vaatimuksia laitteistossa käytettäville komponenteille. Jokaisen yksittäisen komponentin pitää olla luotettava ja turvallinen. Järjestelmän korkea painetaso vaatii myös komponenteilta suurta paineen kestoja. Jotta testilaitteistolla saataisiin mahdollisimman luotettavia ja tarkkoja tuloksia, on komponenttien toimittava hyvällä hyötysuhteella, ja järjestelmän joustojen oltava mahdollisimman pieniä. Hydraulijärjestelmän joustoihin vaikuttaa erityisesti öljyyn liukenematon kaasu ja järjestelmässä olevat letkut. Joustojen minimoimiseksi letkuja haluttiin käyttää mahdollisimman vähän ja säiliöstä haluttiin riittävän suuri jotta kaasut ehtisivät poistua öljystä säiliössä olon aikana.

3.2.1. Paineen mittaus

Tärkein yksittäinen mitattava suure hydrauliakkuja testattaessa on paine. Asentamalla painelähetin akun nesteliitäntään tai sen välittömään läheisyyteen, saadaan seurattua akun nestepuolen painetasoa ja sen muutoksia. Mittaamalla myös kaasupuolen painetta nähdään kaasupuolen paineenvaihtelut ja yhdistämällä neste- ja kaasupuolelta saadut painetiedot päästään käsiksi männän yli kullakin hetkellä vallitsevaan paine-eroon. Kaasupuolen painetta mittaamalla voidaan myös seurata esitäyttöpaineen kehittymistä. Pitkän ajan kuluessa esitäyttöpaine laskee akussa. Mittaamalla kaasupuolen painetta saadaan selville kuinka nopeaa kaasun poistuminen akusta on ja kuinka kauan kestää että esitäyttöpainetta on lisättävä akkuun.

Seuraamalla männän eri puolilla olevaa paine-eroa ja paineen käyttäytymistä voidaan määrittää monia mäntäakun kannalta olennaisia ominaisuuksia. Männän liikeherkkyys kuvaa kuinka pienellä paine-erolla mäntä lähtee liikkeelle. Liikutettaessa mäntää tasaisella nopeudella paine-ero kertoo männän tiivistimien kitkojen suuruuden. Liikeherkkyys ja kitkojen suuruus ovat riippuvaisia männän tiivistimistä ja männästä, joten mittaamalla paine-eroa voidaan vertailla erilaisia mäntiä ja tiivistimiä keskenään.

Paineen mittaus asettaa suuria haasteita painelähettimille. Näytteenottovälin pitäisi olla lyhyt jotta päästäisiin seuraamaan nopeasti tapahtuvia ilmiöitä, kuten paineiskuja. Painelähettimen pitäisi pystyä myös mittaamaan suuria paineita mahdollisimman tarkasti. Digitaalista painelähetintä käytettäessä tapahtuu kvantisointi,

eli analoginen tieto muutetaan digitaaliseksi tietokoneelle tallentamista varten. A/D-muunnoksessa paine, jonka arvot ovat jatkuvia, muutetaan diskreettiin muotoon ja osa tiedosta katoaa. Koska painetasot ovat niin korkeita, saattaa muunnoksessa tulla suurikin virhe, jollei A/D-muunnin käytä riittävän montaa bittiä.

3.2.2. Lämpötilan mittaus

Hydraulikomponenttien toimintaan vaikuttaa oleellisesti nesteen lämpötila. Nesteen viskositeetti riippuu erittäin paljon lämpötilasta ja viskositeetti taas vaikuttaa voimakkaasti mm. painehäviöihin, vuotovirtauksiin ja voiteluun. Liian kuumalla öljyllä on pieni viskositeetti ja se ei kykene voitelemaan kunnolla. Öljyn ollessa liian kylmää viskositeetti kasvaa ja painehäviöt lisääntyvät, paineiskut kasvavat ja järjestelmän toiminta hidastuu. Mittaamalla nesteen lämpötilaa voidaan varmistaa säilyykö viskositeetti sopivana. Vaihtelemalla hydraulinesteen lämpötilaa jäähdytystä muuttamalla ja mittaamalla öljyn lämpötilaa voidaan testata öljyn lämpötilan vaikutusta hydrauliakun toimintaan. Pakkastestillä voidaan testata kylmien ympäristöolojen vaikutusta akun toimintaan ja päästään mittaamaan järjestelmän lämpötiloja. Testijärjestelmä ei aseta nesteen lämpötilan mittaukselle erityisiä vaatimuksia.

Kaasupuolen lämpötilan mittaaminen on nestepuolta vaativampaa. Nesteen lämpötilaa voi mitata nestepuolen ulkopuolelta, kaasun lämpötila muuttuu kuristuksessa voimakkaammin. Typpikaasulla on suurempi ominaislämpökapasiteetti kuin monilla kiinteillä aineilla, kaasun lämpötila muuttuu kuitenkin nopeammin ja helpommin kuin nesteen pienemmän tiheyden ansiosta [11]. Kaasun lämpötilan mittaaminen vaatii nopeaa näytteenottotaajuutta.

Mäntää liikutettaessa lähtee akussa liikkeelle paineaalto, jonka mukana kaasun lämpötila vaihtelee. Tämän lämpöaallon käyttäytymisen oletetaan olevan kiinni akun asennosta. Säättämällä akkujen asentoa ja mittaamalla kaasupuolen lämpötilan muutoksia voidaan selvittää lämpöaallon käytöstä.

Mittaamalla lämpötilaa kaasupuolen päästä saadaan mittaustietoa lämpöaallon osumisesta akun päähän ja mahdollisesta heijastumisesta. Lämpöaallon kunnollinen mittaaminen vaatisi männän liikesuunnassa vähintään kahdesta eri kohdasta tapahtuvaa lämpötilan mittausta. Kahta mittauspistettä ei voi helposti asettaa akkuun, joten mittaamiseen käytetään vain yhtä pistettä.

Etäisyys männästä akun päähän on suurimmillaan noin kaksi metriä. Lämpöaalto liikkuu paineen mukana, jolloin voidaan olettaa sen liikkuvan äänen nopeudella. Äänen nopeus typpikaasussa on noin 350 m/s [12], [13]. Lämpöaallon taajuudeksi lämpöanturilla saataisiin tällöin 175 Hz. Otettaessa näytteitä korkeataajuuksisesta ilmiöstä liian matalalla näytteenottotaajuudella tapahtuu laskostumisilmiö, jossa ilmiö näyttää mittaustulosten perusteella pienempitaajuuksiselta kuin se todellisuudessa on. Suurin taajuus, josta näytteitä voidaan ottaa ilman laskostumista, on puolet näytteenottotaajuudesta. Jotta lämpöaaltoa voitaisiin mitata

ilman laskostumisilmiötä, pitäisi lämpötila-anturin näytteenottotaajuuden olla siis 350 Hz. [14, s. 63]

Hydrauliakun energian varastoinnin kannalta on erittäin suuri merkitys sillä tapahtuuko akun lataaminen ja latauksen purkaminen isotermisesti tai adiabaattisesti tai kuinka lähellä toista vaihtoehtoa ollaan. Mittaamalla kaasun lämpötilaa voidaan selvittää lämpötilan muutosta ja muutoksen nopeutta. Tilanmuutoksesta saatavien tietojen avulla selviää akkujen energianvarastointikyky erilaisissa tilanteissa ja mahdollisesti erilaisten akkurakenteiden vaikutus tilanmuutokseen.

3.2.3. Äänen mittaus

Liikkuvista koneista lähtee aina ääntä. Ääni syntyy liikkeen aiheuttamasta värähtelystä. Voimakas tai epätavallinen ääni kertoo usein laitteen viallisuudesta. Laitteen aiheuttamaa ääntä mittaamalla voidaan havaita vikoja. Vastaavasti, jos laite toimii toivotulla tavalla, sen ei yleensä haluta aiheuttavan juurikaan ääntä. Jotkut mäntien tiivistimet ovat saaneet mäntäakuissa aikaan suhteellisen voimakkaan äänen mäntää liikuttaessa tietyillä nopeuksilla. Testilaitteistoon liitetään laite, joka mittaa äänenpainetta. Testituloksista on siten tarkasteltavissa akkujen tuottaman melun määrä. Anturi kiinnitetään testikehikkoon tai yksittäisen akun ulkopintaan. Anturi saa häiriötä muista laitteista ja ympäristöstä, mutta vaatimus mittaustarkkuuden suhteen on vähäinen.

3.2.4. Tilavuuden mittaus

Männän asemasta voidaan laskea mäntäakulta saatava nestetilavuus. Männän asemaa voidaan anturoida suoraan ja saada sen kautta tieto akussa olevasta nestetilavuudesta. Männän asemasta voidaan myös tarkastella esitäyttöpainetta, kun tiedetään nestepuolen paine. Männän aseman tietäminen helpottaa männän liikeherkkyuden tutkimista ja männän tiivistimien kitkojen selvittämistä. Kun akulta saatava nestetilavuus on mielenkiinnon kohteena, ei mikään estä testilaitteistossa mittaamasta suoraan tilavuutta. Tilavuusmittarilla saadaan tarkka arvo akulta tulevalle nestemäärälle ja nestemäärän avulla voidaan laskea männän asema ennen akun tyhjentämistä. Tilavuusmittarin käyttö vaatii öljyn ohjaamisen tilavuusmittarin kautta pois akulta, mikä on helposti toteutettavissa erikseen suuntaventtiilin avulla.

3.2.5. Öljyn kunnon mittaus

Mäntäakkujen eräs huono puoli muihin akkutyyppeihin verrattuna on herkkyys epäpuhtauksille. Epäpuhtauksia on kaikissa hydraulijärjestelmissä. Järjestelmään tulee epäpuhtauksia komponenttien mukana, valmistuksen ja asennuksen yhteydessä, ilman kautta ja hydraulijärjestelmän käytön seurauksena.

Epäpuhtauden öljyssä aiheuttavat toimintahäiriöitä ja nopeuttavat komponenttien kulumista huomattavasti. Hydraulioöljyssä olevat epäpuhtaudet ovat yleisin syy järjestelmän vikaantumiseen. Jopa 80–90 prosenttia hydraulijärjestelmien vioista aiheutuu epäpuhtauksista [15]. Mäntäakuissa kiinteät epäpuhtaudet vahingoittavat männän tiivistimiä ja pahimmillaan suurempi hiukkanen voi jopa kiilautua männän ja sylinterin väliin estäen akun toiminnan kokonaan. Mäntäakuilla toleranssit ovat varsin pieniä, koska typpikaasu ei saa karata kaasupuolelta nestepuolelle. Tiivistimet eivät saisi vahingoittua ja hiukkaset eivät saisi raapia sylinterin seinämiin naarmuja.

Mäntäakut ovat useita muita hydraulikomponentteja herkempiä öljyssä olevien hiukasten suhteen. Korkeapaineinen typpikaasu vuotaa pienimmästäkin raosta nestepuolelle. Akkujen luotettavuusvaatimuksia korostavat akkujen usein hankalat sijainnit huollon kannalta esimerkiksi avomerikäyttöissä tai tuulivoimaloissa ja akkujen käyttö turva- ja varolaitteissa.

Käytännössä kaikkia hydraulijärjestelmiä pyritään suodattamaan. Suodattamalla saadaan järjestelmästä poistettua suurimmat hiukkaset, mutta kaikkia epäpuhtauksia ei saada pois mitenkään. Järjestelmässä oleva suodatin tai suodattimet keräävät epäpuhtauksia, mutta järjestelmää käytettäessä pitkään epäpuhtauksia kertyy järjestelmään. Epäpuhtauksien määrä järjestelmässä myös vaihtelee jaksottaisesti esimerkiksi työkierron vaiheen tai käytön mukaan.

Hiukkaslaskuri mittaa öljyssä olevia epäpuhtauksia. Normaalisissa hydraulijärjestelmässä hiukkaslaskuri kertoo öljyn tilasta ja mahdollisesta tarpeesta vaihtaa suodatin tai järjestelmän öljy. Käyttämällä hiukkaslaskuria testijärjestelmässä saadaan jatkuvasti tietoa öljyn kunnosta. Hydraulioöljy pyritään pitämään niin puhtaana, etteivät siinä olevat hiukkaset, ilma ja vesi vaikuttaisi järjestelmän toimintaan. Mittaamalla öljyn puhtautta ja vertaamalla sitä siihen kuinka usein mäntäakusta on vaihdettava tiivistimet saadaan tärkeää tietoa akun huoltovälistä. Jos esimerkiksi akun huoltoväli laskee eksponentiaalisesti epäpuhtauksien määrän kasvaessa, voidaan määrittää rajoja, joissa hydraulioöljyn puhtauden suositellaan olevan mäntäakkuja käytettäessä. Mittaamalla voidaan selvittää tarvittava öljyn puhtaus, jolloin sitä suurempi hiukkasmäärä pitää välttää. Vaikka öljy on pidettävä puhtaana, liian korkeita puhtausvaatimuksia ei pidä asettaa, koska se aiheuttaisi vain turhia kustannuksia suodatukselle ja huollolle.

3.3. Hydrauliakkujen testisyklit

Asiakkaiden kanssa käytyjen keskustelujen yhteydessä pyrittiin selvittämään paineakkujen kohtaamia tyypillisiä ja raskaimpia työkiertoja. Testaamalla akkuja todellisia käyttöolosuhteita vastaavissa testeissä, saadaan akuista tietoa, joka on hyödyllistä sekä Hydrollille että sen asiakkaille. Hyvä testi mittaa akun ominaisuuksia realistisissa olosuhteissa tai olosuhteissa, jotka ovat akulle hieman todellista käyttöä

vaativimmat. Todenmukaisilla testeillä saadaan hyödyllistä tietoa akkujen vikaantumisesta, huollon tarpeesta ja kehittämiskohteista.

Lyhytkestoisilla testeillä voidaan testata hydrauliakkujen dynaamista käytöstä tai jotain tiettyä yksittäistä ominaisuutta, esimerkiksi akun käyttäytymistä paineiskun kanssa tai männän liikeherkkyyttä. Useat akun ominaisuudet tulevat esille vasta monen syklin jälkeen. Pidempään testattaessa akulle tulee paljon syklejä ja ajettaessa tiettyä sykliä uudestaan ja uudestaan päästään staattiseen tilanteeseen jossa akun ja järjestelmän ominaisuudet toistuvat jokaisessa syklistä samanlaisena. Elinkaaritesteissä akkua rasitetaan pitkään ja komponentit alkavat kulua. Mäntäakussa ainut suuresti kuluva osa on männän tiivistin. Elinkaaritestissä akkua voidaan rasittaa jatkuvasti tarvittaessa männän tiivistimet vaihtaen. Todella pitkään kestävässä testissä akun esitäyttöpaine saattaa laskea selvästi. Esitäyttöpaine uudelleen asettamalla ja männän tiivistimet vaihtamalla akulle saadaan tehtyä normaali huolto, jonka jälkeen akku on taas valmis testattavaksi tai muuten käytettäväksi.

Hydrollin mäntäakkuja on käytössä lukuisilla eri teollisuudenaloilla monissa eri tehtävissä. Työkiertoja ja käyttöympäristöjä on lähes yhtä paljon kuin käyttäjiäkin. Useissa käytöissä samat rasitukset kuitenkin toistuvat ja akkujen vikaantumismekanismit pysyvät samanlaisina. Hydraulikomponenttien kesto on usein riippuvainen painetasosta ja paineistettujen ajanjaksojen pituuksista ja lukumääristä. Normaalien hydraulikomponenttien keston vaikuttavien tekijöiden lisäksi mäntäakkujen keston vaikuttaa paineistuksien ja paineen pudotusten nopeus, koska nopeudet vaikuttavat männän liikkeeseen.

Testattavia paineakkuja on runsaasti erilaisia. Akkuja on montaa eri tyyppiä ja kokoa. Todellisista käyttötilanteista yksinkertaistetut ja voimistetut testisyklit mahdollistavat erilaisten akkujen mielekkään testaamisen. Testilaitteiston toimittajan pitäisi esiohjelmoida järjestelmän käyttöön vaadittavia testisyklejä, joiden toteutus laitteistolla pitäisi onnistua. Käyttäjän pitäisi pystyä myöhemmin ohjelmoimaan lisää haluamiaan testiohjelmiä.

Teollisuushydrauliikassa paineakkujen käyttö on usein hyvin säännöllistä. Järjestelmällä on tietty työkierto tai laitteella suoritetaan yhdenlaisia toimintoja. Kummassakin tapauksessa akun kuormitus on samanlaisena toistuvaa. Työsyklit ja rasituksen raskaus vaihtelevat suuresti käyttökohteittain.

Liikkuvien työkoneiden yhteydessä paineakkujen käyttö on usein säännöllisen epäsäännöllistä. Työkierrot vaihtelevat täysin toimialoittain, mutta yhdellä toimialalla toistuu yleensä samanlaiset kuormitukset. Mobile-käytössä on paineakuilla teollisuuskäyttöä suurempi todennäköisyys kohdata suuria paineiskuja tai muuta epäsäännöllistä käyttöä. Teollisuushydrauliikassa toimilaitteiden liikeratoja tai –nopeuksia on usein rajoitettu. Liikuvissa työkoneissa toimilaitteet ovat vapaina ja laitteen ohjaaja itse varmistaa laitteen turvallisen käytön.

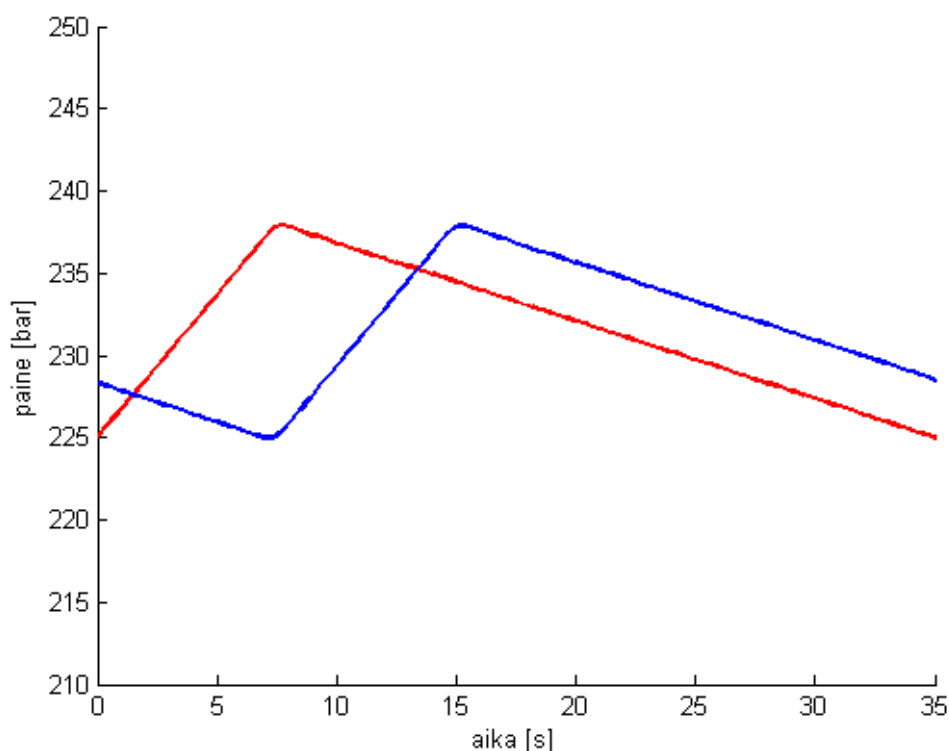
Testilaitteiston käyttäjä voi ajaa haluamaansa sykliä testattavilla paineakuilla. Erilaisilla testisykleillä voidaan hakea vaihtelevia rasituksia akuille. Akkua voidaan ajaa nopeilla liikkeillä, hitailla liikkeillä, suurilla paineilla, pienillä paineilla, painetta hitaasti

tai nopeasti vaihdellen tai millä tahansa yhdistelmällä tai muulla tavalla, jota halutaan testata. Männän tiivistimille on epäedullista ajaa mäntää todella hitaasti tai todella kovaa. Hitaasti liikkussa männän tiivistin etenee nykyksittään niin sanotun stick-slip -ilmiön mukaisesti ja nopeasti liikkussa männän tiivistimen voitelu jää huonoksi ja tiivistin pääsee lämpenemään liikaa. Korkeat paineet taas saattavat aiheuttaa tiivistimiin normaalia suurempia voimia. Testeillä voidaan kokeilla esimerkiksi männän tiivistimien vaikutusta esitäyttöpaineen säilymiseen tai kaasun lämpötilan vaikutusta esitäyttöpaineen säilymiseen.

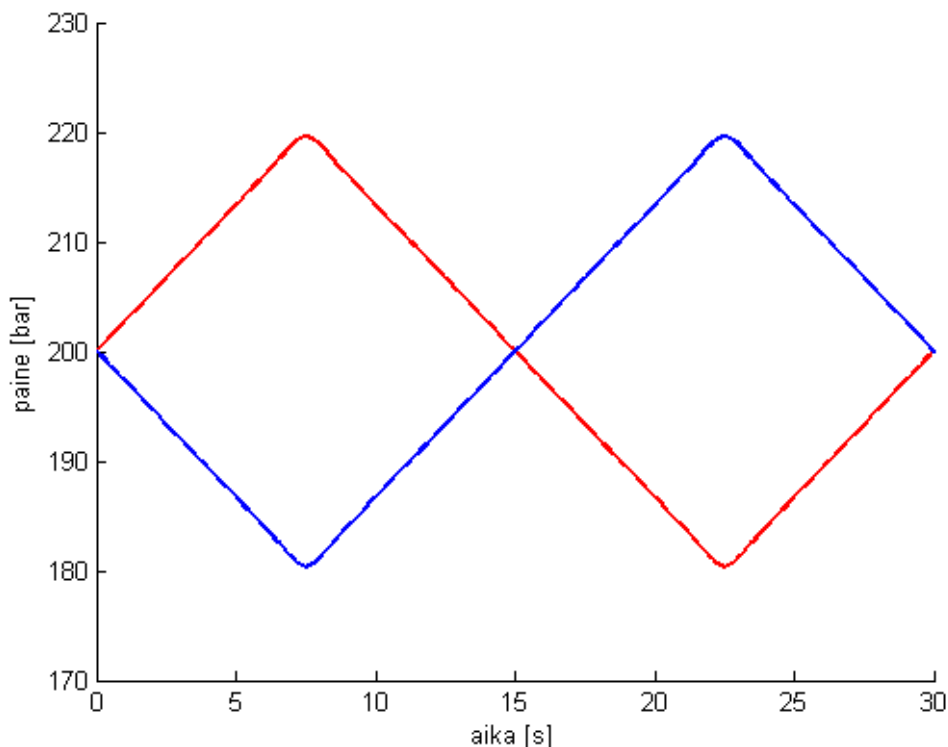
Seuraavissa aliluvuissa on esitelty esimerkkejä testilaitteistolla ajettavista testisykleistä. Monet syklit perustuvat asiakkailta saatuihin mitattuihin työsykleihin. Mukana on myös teoreettisia työsyklejä joilla voidaan kehittää akkujen ominaisuuksia tai tietoja akkujen toiminnasta ja käyttäytymisestä.

3.3.1. Energiateollisuuden testisyklit

Energiateollisuuden testisykleissä painevaihtelut ovat erittäin hitaita ja säännöllisiä. Esimerkit testisykleistä ovat kuvissa 3.1. ja 3.2. Painetasot ovat kohtalaisen korkeita, 180 – 240 bar. Hitaat painevaihtelut aiheuttavat hitaan männän liikkeen, mikä saattaa rasittaa männän tiivistimiä.



Kuva 3.1. Energiateollisuuden testisykli 1, jossa paine muuttuu ajan funktiona kahdella akkuryhmällä.



Kuva 3.2. *Energiateollisuuden testisykli 2, jossa paine muuttuu ajan funktiona kahdella akkuryhmällä.*

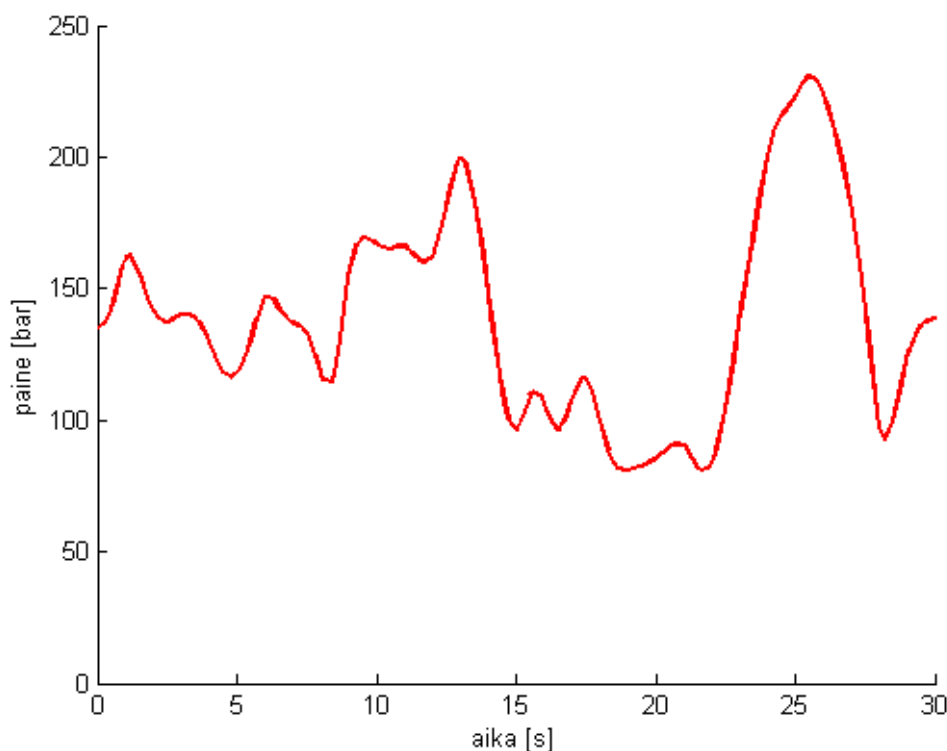
Toinen testisykli on täysin symmetrinen ja ensimmäinenkin osittain. Käyttämällä testissä parillista määrää hydrauliakkuja tai akkuryhmiä voidaan osa akkuihin varastoituneesta energiasta käyttää hyödyksi toista akkuryhmää ladattaessa jolloin pumpulta ei tarvita niin paljoa tuottoa. Syklillä voi testata mielivaltaisen kokoisia akkuja, mutta energiateollisuuden akut ovat yleensä isoja, eli ne tarvitsevat paljon tilavuutta männän liikuttamiseen tasapainoasemaan. Näissä testeissä painevaihtelut ovat kuitenkin hyvin pieniä ja syklijat pitkiä, joten tehon tarve on pieni ja akkuja voidaan testata monia samaan aikaan pienelläkin käyttöteholla.

Yksi testisykli kestää 30 tai 35 sekuntia. Kun akun esitäyttöpaine on 100 bar, männän liikematka on alle 2 cm painevaihtelun ollessa 226 – 238 bar. Esitäyttöpaineen ollessa 165 bar, tilanne on lähes sama. Männän alkuasema muuttuu hieman esitäyttöpaineen myötä ja männän liike on edelleen alle 2 cm. Energiateollisuuden työkierrassa öljyn lämpötila on 30 – 50 celsiusastetta ja öljyn puhtausluokka on vähintään ISO 14/12/10.

3.3.2. Puomin liikkeidenkompensointi

Liikkuvan työkoneen puomi voi aiheuttaa hydraulijärjestelmälle monenlaisia painevaihteluita. Puomiston jousituksen testisyklille on ominaista pienet tilavuusvirrat ja nopeat painevaihtelut. Mäntätoiminen painevaraaja ei pysty

vastaamaan paineenvaihteluihin kovin herkästi, koska männän ja sylinterin seinämävälillä on kitkaa ja männällä on hitausmassa. Testisyklillä voikin tarkkailla männän liikeherkkyyttä joka vaikuttaa olennaisesti akun kykyyn vaimentaa nopeita painevaihteluita, tiivistimien aiheuttamaa kitkaa ja tiivistimien kykyä kestää männän liikettä ja liikesuunnan vaihteluita. Testisykli on kuvassa 3.3. Jatkuva testaus vastaa todellista käyttöä myös siinä mielessä, että rasitus on jatkuvaa ja epätasaista.



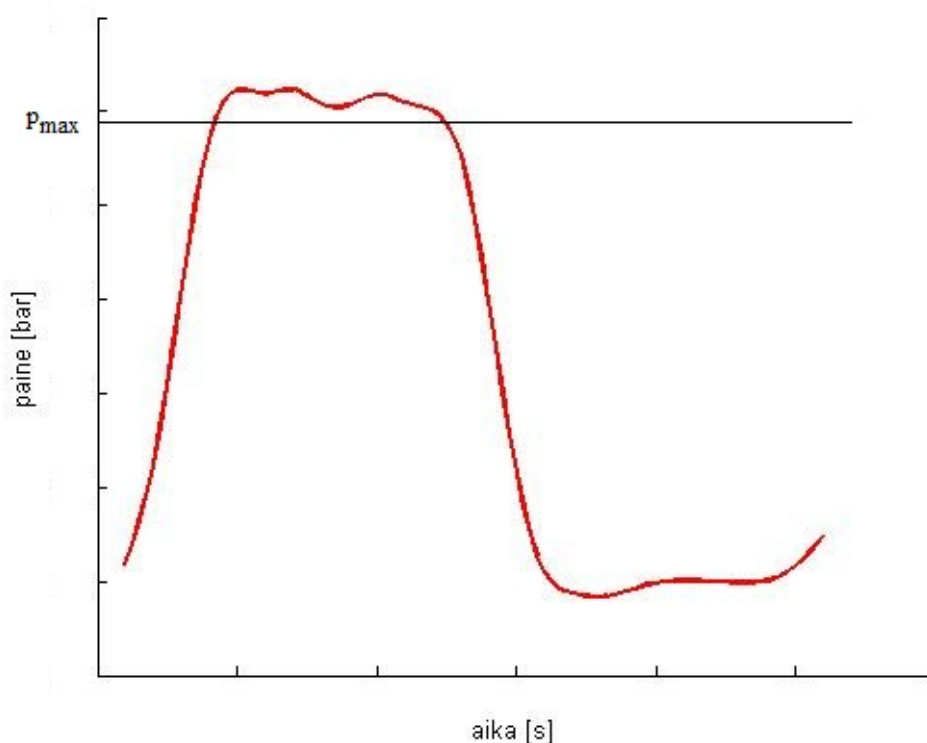
Kuva 3.3. Testisykli puomin liikkeiden kompensointiin.

Testisyklin lähtökohtana on käytetty edustavaa otosta mittausdatasta, joka on yksinkertaistettu. Puolen minuutin syklissä on paljon pientä paineenvaihtelua ja muutama suurempi muutos painetasossa. Esitäyttöpaine akuilla on alle 80 bar.

Testissä hydrauliakkujen tarvitsema tilavuusvirta on täysin epäsäännöllinen, jolloin akkuihin varastoitunutta energiaa ei voi käyttää toisen akkuryhmän akkujen lataukseen, vaan neste on päästettävä akuista säiliöön paineen laskiessa. Akut ovat kuitenkin tilavuudeltaan vain yhden litran kokoisia, eli pumpulta tarvittava tilavuusvirta on vähäinen, vaikka samaan aikaan testattaisiin useita akkuja. Mobile-käytöissä pieniä akkuja ei yleensä käytetä energian takaisinsaannin ja hyötysuhteen parantamisen vuoksi, vaan muiden komponenttien suojaamiseksi paineiskuilta ja dynaamisten ominaisuuksien parantamiseksi.

3.3.3. Rakenteen väsymistesti

Paineakut pyritään mitoittamaan siten että teräsrakenteet kestävät normaaleja paineistuksia äärettömän määrän. Rakenteen väsymistestillä mitataan paineakun kestävyyttä väsymisen suhteen. Väsymistesti on standardien ISO 10771-1 ja SFS-EN 14359 mukainen ja testissä akkuja rasitetaan normaaleja käyttöpaineita suuremmilla paineilla, jolloin ajettaessa testisyklejä standardin vaatima lukumäärä, $10^5 - 10^7$ akkujen rakenne väsy. Testiä jatketaan akun väsymiseen saakka. Väsymisvaurio on todettavissa, jos väsyminen aiheuttaa hydraulinesteen vuotoa akusta tai jos materiaali alkaa haljeta. Testissä käytettävä paine vaihtelee testattavan akun mukaan. Väsymistestin painealto on esitetty kuvassa 3.4.



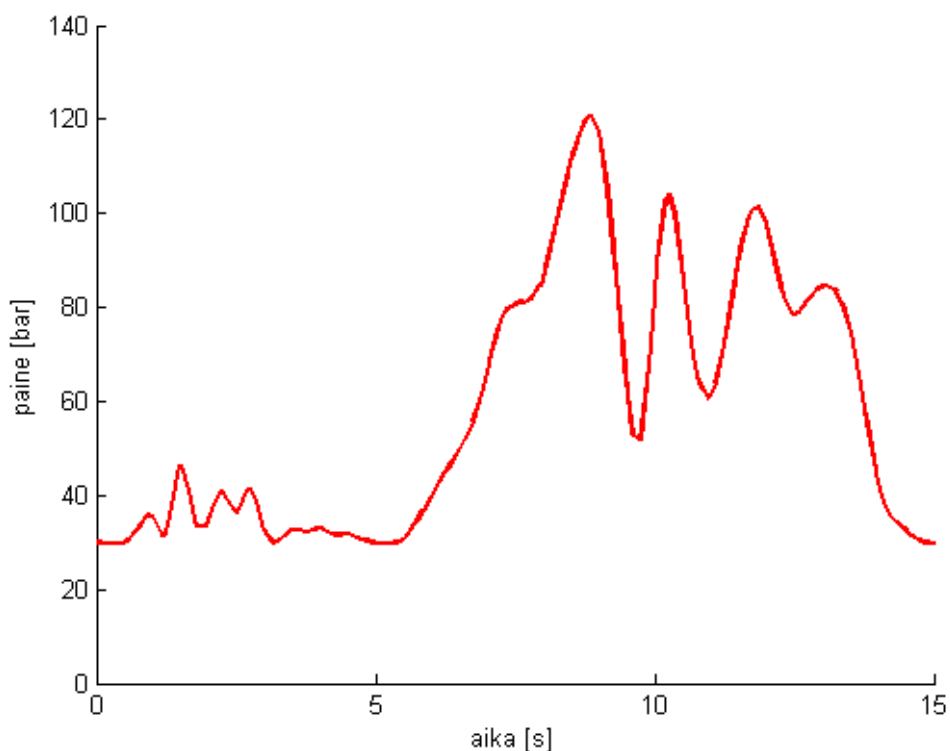
Kuva 3.4. Paineakun väsymistestin testisykli.

Väsymistestissä mäntäakku testataan ilman mäntää ja koko akku täytetään hydraulineesteellä. Testi vaatii suuren määrän paineistuksia, mutta testisykliä voidaan ajaa suhteellisen nopealla taajuudella kun tilavuuden muutokset ovat erittäin pieniä. Testitaajuus ei saa kuitenkaan olla suurempi kuin 3 Hz [16].

Väsymistestillä saadaan tietoa akkujen väsymiskestävydestä. Metallin väsyminen on hankalasti ennustettava asia ja väsymistä käsitellään sen takia tilastollisena ilmiönä. Testaamalla samanlaisia akkuja eri painetasoilla voidaan määrittää akkujen väsymiskestävyys. Riittävän tilastollisen aineiston keräämiseksi jokaisella painetasolla pitää testata vähintään viisi akkua [17].

3.3.4. Liikkuvan työkoneen kauhan jousitus

Kauhan jousituksen testisykli perustuu liikkuvan työkoneen tyypilliseen työkiertoon, jossa hydrauliakulla tasataan kauhan ja kuorman massan heilahteluiden aiheuttamia painevaihteluita. Kierrolle ovat ominaista nopeat paineen vaihtelut ja matala painetaso. Nopeat ja toistuvat painevaihtelut rasittavat tiivistimiä männän ollessa jatkuvasti liikkeessä ja suunnan vaihtuessa usein. Alkuperäisessä käytössä matalan ja korkean paineen jaksot kestävät pidempään ja välissä saattaa olla pitkiäkin lähes tasaisia jaksoja. Testisykli on esitetty kuvassa 3.5. Akut kohtaavat muissa työkoneissa lähes vastaavan näköisiä paineaaltoja. Matalimmat painetasot pysyvät vähintään kuvassa esitetyllä tasolla, mutta vaihtelevissa käyttökohteissa painetasot ja -vaihtelut saattavat olla erilaisia. Haluttaessa testata akkujen toimintaa saman teollisuudenalan muihin vastaaviin työkoneisiin voidaan käyttää samanlaista testisykliä johon vaihdetaan tilanteenmukaiset painetasot.



Kuva 3.5. Testisykli kauhan jousitukseen.

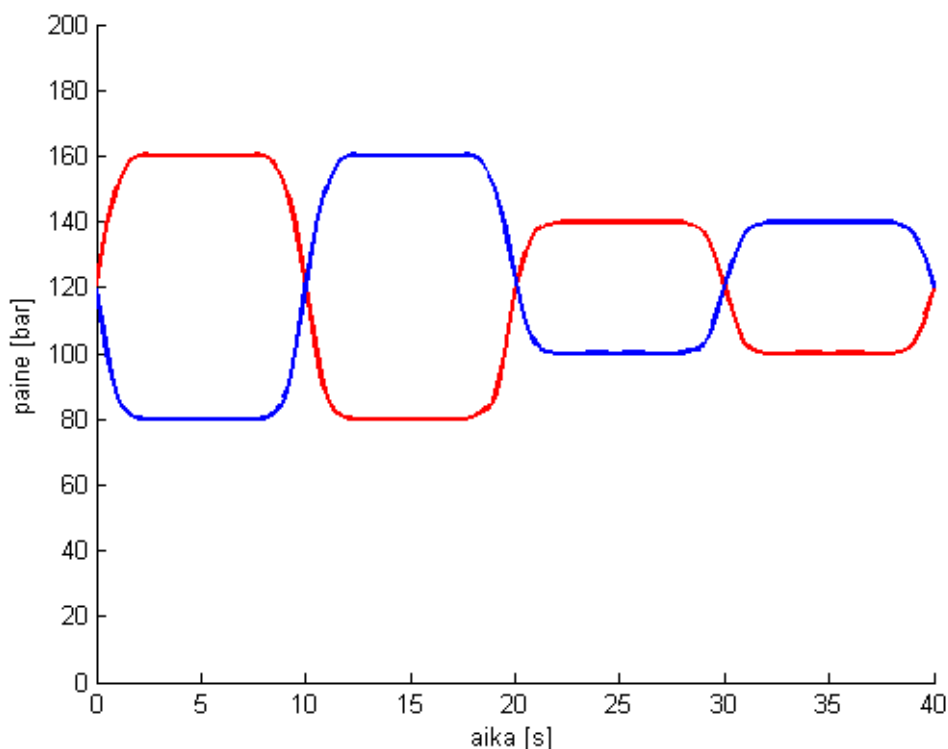
Paineakkujen tilavuusvirran tarve on täysin satunnainen, joten akkuihin varastoitunutta energiaa ei voi käyttää lataamaan muita akkuja. Sovelluksessa käytetään kuitenkin pieniä akkuja, joiden tilavuus on vain yksi litra. Akkujen esitäyttöpaine on varsin alhainen, jolloin mäntä tekee pitkiä liikkeitä suhteessa akun pituuteen. Akkujen tilavuus on kuitenkin niin pieni, että tarvittava tilavuusvirta jää alhaiseksi ja vielä painetason pysyessä matalana testisyklin tehontarpeet ovat pieniä.

Sovelluksessa paineakkuja käytetään paineiskujen ehkäisemiseksi ja paine- ja tilavuusvirtavaihteluiden tasaamiseksi. Vertaamalla kaasupuolen painevaihteluita nestepuolen painevaihteluihin saadaan mittaustietoa männän reagoinnista paineiskuihin. Vaimennuskäytössä on männän liikeherkkyys olennaisessa osassa, ja tällä testisyklillä voidaan vastaavien akkujen mäntien liikeherkkyyttä tutkia. Testiä voi käyttää millaisten akkujen tutkimiseen halutaan, mutta todellisessa työkoneessa on kaksi erillistä akkua, joilla on eri esitäyttöpaineet: 30 ja 15 bar. Matalilla esitäyttöpaineilla akut joustavat reilusti, mutta kyky ottaa vastaan suuria paineiskuja on varsin rajallinen.

Hydraulijärjestelmän painetason ollessa pieni hydrauliakunpainevaihtelut ovat itseisarvoltaan pieniä, mutta nopeataajuuksisia. Akkuun ei kohdistu juurikaan voimia ja silti mäntä on jatkuvassa pienessä liikkeessä. Suuremmilla paineilla värähtelyn taajuus on pienempää ja painevaihtelut suurempia. Testisyklin pituus on noin 15 sekuntia ja korkeimmillaan paine nousee vain 100 bariin asti.

3.3.5. Toistuva ja symmetrinen työkierto

Toistuvan työkierron testisyklissä on hieman yksinkertaistettu painevaihtelu, jossa työkierto on hyvin symmetrinen. Liikkuvalle työkoneelle tulee samanlaisia työkiertoja, kun samaa liikettä toistetaan useasti peräkkäin ja hydrauliakkuja käytetään liikkeiden tasaamiseen ja energian varastointiin. Akut tekevät saman tyyppisiä työkiertoja myös useissa teollisuussovelluksissa. Testisykli on esitetty kuvassa 3.6.



Kuva 3.6. Symmetrinen testisykli kahdella rinnakkaisella akkuryhmällä.

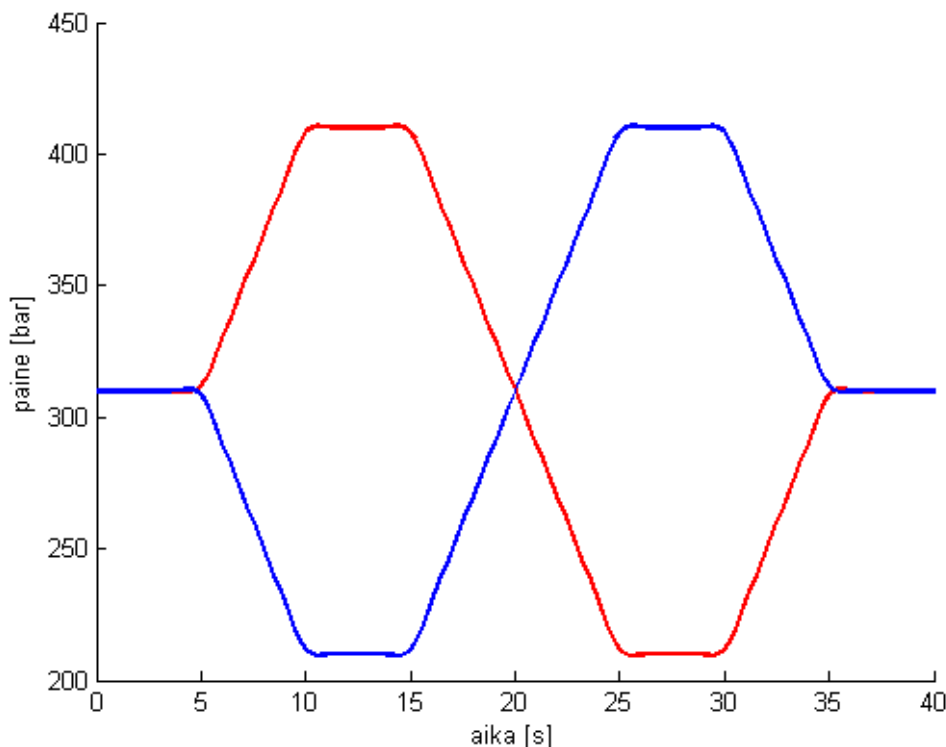
Painetasot eivät ole erityisen korkeat tai matalat testisyklissä, mutta paineenvaihteluita on hyvin vähän. Mäntä tekee yhden työkierron aikana vain neljä liikettä ja pysyy muuten paikallaan. Painevaihteluiden aikanakin männän liike on suhteellisen tasaista. Testi vastaa kohtuullisesti myös monia muita tilanteita, joihin akut joutuvat. Yleensä järjestelmissä paineenvaihtelut tulevat nopeampaan tahtiin ja epäsäännöllisemmin. Painetasot ovat kuitenkin hyvin tyypillisiä monessa käytössä, kuten myös paineen muutoksen nopeus ja paineistuksen kesto. Monissa sovelluksissa painevaihtelut ovat säännöllisiä ja toistuvia.

Paineiden pysyessä kohtalaisissa rajoissa ja männän liikkeiden ollessa vähäisiä ja tasaisia voidaan olettaa hydrauliakun kestävänsä käyttöä hyvin ja vaativan vain vähän huoltoa. Käytön ollessa tasaista ja säännöllistä voidaan halutessa perehtyä huollon tarpeen määrittämiseen tai muita tekijöitä tutkimalla voidaan pyrkiä määrittämään esimerkiksi järjestelmän epäpuhtauksien vaikutusta akun keston ja huollon tarpeeseen. Vaihtelemalla suodatuksen tarkkuutta ja ajamalla samaa yksinkertaista testisykliä eri akuille, voidaan päätellä hiukkasten määrän vaikutusta männän tiivistimien kulumiseen.

Testisykli on kohtalaisen pitkä yhden kierron kestäessä 40 sekuntia. Paine pysyy pienimmillään 80 barissa ja nousee suurimmillaan 160 barin asti. Testijärjestelyllä voidaan testata mielivaltaista määrää halutun kokoisia akkuja vaihtelevilla esitäyttöpaineilla. Käytettäessä parillista määrää akkuja voidaan tilavuusvirtaa ohjata akkuryhmältä toiselle, jolloin saadaan osa energiasta käytettyä toisen ryhmän paineistamiseen. Energiaa säästyy, kun kaikkea tehoa ei tarvitse ottaa pumpulta.

3.3.6. Suurpainetesti

Suurpainetestissä paineakkuja rasitetaan sallittuihin painerajoihin saakka tai lähelle maksimipaineita, kuva 3.7. Normaalikäytössä akut mitoitetaan siten, että toiminta-alue on selvästi maksimipainetta pienempi ja maksimipaineet saavutetaan vain hetkellisesti tai poikkeustilanteessa. Akkujen pitää kuitenkin kestää huomattavasti suurempia paineita kuin maksimipaineiksi ilmoitetaan. Testaamalla akkuja suurilla paineilla saadaan tietoa akkujen kestävyydestä ja toiminnasta kovassa rasituksessa.



Kuva 3.7. Suurpainetestin testisykli.

Pientämällä paineita voidaan testisyklillä testata myös vähemmän painetta kestäviä hydrauliakkuja tai tehdä pidempiä rasitustestejä akuille. Painetasoja voidaan muuttaa vastaamaan haluttua tilannetta. Painetason lisäksi voidaan testiä muunnella vaihtamalla paineen muutosnopeutta tai aikaa kuinka kauan akut ovat paineistettuina.

Suurpainetestissä paine pysyy koko testisyklin ajan yli 200 bar paineessa ja korkeimmillaan paine on yli 400 bar. Pienet paineakut menevät yleensä sovelluksiin, joissa suuria paineita on korkeintaan hetkellisesti paineiskujen yhteydessä. Suurpainetestiä voi käyttää mille tahansa akulle, kunhan suurimmat sallitut käyttöpaineet eivät ylity, mutta se on tarkoitettu noin 20 – 25 -litraisille akuille. Akkujen esitäyttöpaineet täytyy asettaa suhteellisen korkeiksi, jotta nesteen paine ei työntäisi mäntää koko testin ajan syvälle akkuun ja mäntä pääsisi liikkumaan pitkän matkaa sylinterin sisällä.

Paineakkujen tilavuusvirrat ovat täysin symmetrisiä, jolloin akkuja vuorotellen paineistetamalla voidaan nestettä ohjata akulta toiselle. Akkujen ollessa isoja ja painetasojen korkeita vaatii testi paljon hydraulista tehoa. Käyttämällä akkuja vuorotellen energianlähteenä toiselle akulle säästetään tuntuvasti pumpun tehontarpeessa.

4. TESTILAITTEISTON SUUNNITTELU

Uutta hydraulijärjestelmää suunniteltaessa suurin huomio pitää keskittyä järjestelmän kykyyn täyttää sille asetetut tehtävät ja vaatimukset. Järjestelmän tarkoituksenmukaisuus on tärkein prioriteetti, mutta monia muitakin asioita pitää ottaa suunnittelussa huomioon. Turvallisuus pitää ottaa jo suunnitteluvaiheessa huomioon siten, että järjestelmä on turvallinen käyttäjille ja huoltohenkilöstölle. Järjestelmän pitää olla toimivuuden lisäksi myös luotettava, taloudellinen ja huollettavissa. Komponenttien valinnassa tulee myös ottaa huomioon monta asiaa. Komponenttien pitää olla turvallisia, kohtuuhintaisia, yhteensopivia ja saatavilla olevia. Järjestelmän toiminnan kannalta kokonaisyötysuhteeseen pitää kiinnittää erityistä huomiota. Komponenttien pitää olla järjestelmään sopivia ja oikein asennettuja. [18]

Erityistä huomiota testilaitteiston suunnittelussa on käytetty luotettavuuteen ja turvallisuuteen. Laitteiston on tarkoitus toimia pitkään ja usein myös ilman ihmisen välitöntä valvontaa. Turvallisuusnäkökulma on tärkeä, kun järjestelmän painetasot saattavat nousta erittäin korkeiksi ja paineakuille saatetaan ajaa testejä, jotka jatkuvat kunnes akun osat alkavat kulua. Järjestelmän energiatehokkuus on otettu suunnittelussa huomioon alusta lähtien. Elinkaaritestauksessa testilaitteisto saattaa olla käynnissä pitkään yhtäjaksoisesti, jolloin huono energiatehokkuus aiheuttaisi turhia kustannuksia.

Tämä suunnitelma on testilaitteiston alustava suunnitelma ja sitä käytetään tarjouspyynnön pohjana. Testilaitte tilataan erilliseltä toimittajalta, joka on vapaa esittämään mahdollisia muutoksia suunnitelmaan, eli lopullinen testilaitte saattaa erota tässä esitetystä. Laitteiston toimittajalle jää suunnitteluvapauksia, ja myös vastuu, kunhan järjestelmälle asetettuihin vaatimuksiin päästään.

Suunnittelun alussa on testilaitteistolle esitettyjen vaatimusten perusteella määritetty järjestelmän tehontarvetta. Tehontarpeen jälkeen siirrytään järjestelmän hydraulikaavioon ja järjestelmän toiminnan kuvaukseen. Järjestelmään on kaavion perusteella mitoitettu tarvittavat komponentit. Komponentit on mitoitettu, mutta lopullisia valintoja komponenteiksi ei ole tehty. Testilaitteiston toimittaja on vapaa valitsemaan omat komponenttinsa järjestelmään, kunhan vaatimukset tulee täytettyä. Komponenttien valinnan jälkeen järjestelmän suunnittelussa pitäisi laskemalla varmistaa vaatimusten täyttyminen ja todelliset toimintapisteet. Koska lopullisia komponentteja ei tässä ole valittu, jää tarkistuslaskelmien tekeminen järjestelmän toimittajan vastuulle. Lopuksi järjestelmän toimintaa on mallinnettu simulink-ohjelmistolla.

4.1. Testilaitteiston mekaaninen rakenne

Testilaitteistolla testataan erilaisia paineakkuja. Suurin osa laitteistolla testattavista akuista on 20 – 25 -litraisia mäntäakkuja, mutta myös muun kokoisia ja tyyppisiä akkuja pitää laitteistolla päästä testaamaan. Testikehikkoon laitetaan valmiiksi neljä paikkaa mäntäakuille, joiden halkaisija on 230 mm tai vähemmän. Suurempia tai reilusti pienempiä mäntäakkuja ja muun tyyppisiä akkuja testataan erillisissä telineissään. Liitännät asennetaan valmiiksi kahdeksan akun yhtäaikaista testaamista varten.

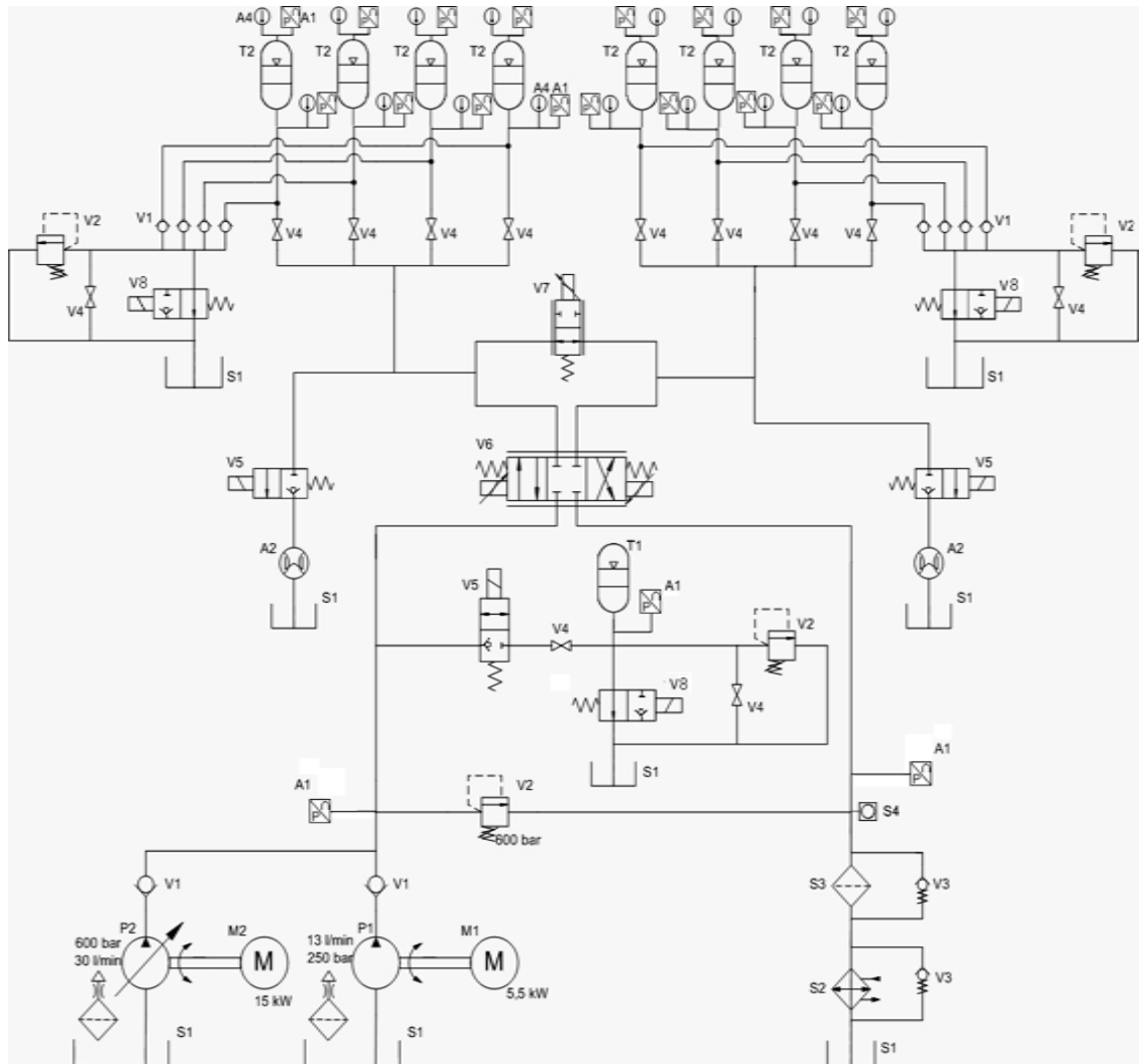
Testikehikon asento on käännettävissä siten että akkujen asentoa saadaan vaihtaa haluttuun kulmaan. Normaalisti akkuja testataan pystyssä, mutta kehikon käännettävyys mahdollistaa mielivaltaiset kulmat akuille. Testikehikkoa ei ole jäykästi kiinnitetty koneikkoon, jolloin kehikko voidaan asettaa erilliseen tilaan esimerkiksi pakkastestin ajaksi.

Testilaitteisto rakennetaan alustalle, joka on siirrettävissä pyörien tai trukin avulla myös asennuksen jälkeen. Siirrettävyyttä tarvitaan esimerkiksi silloin, kun paineakkuja halutaan viedä pakkastestehin muualle. Testilaitteisto sijoitetaan omaan, sille varattuun, tilaansa. Ihmisten ei tarvitse olla testilaitteiston välittömässä läheisyydessä kuin akkuja irrottaessa ja kiinnitettäessä. Järjestelmän korkean painetason takia kuitenkin letkujen käyttöä pyritään välttämään turvallisuuden ja luotettavuuden parantamiseksi. Letkujen käytön välttäminen myös vähentää järjestelmän joustoja.

4.2. Hydraulikaavio ja toimintakuvaus

Hydraulijärjestelmä suunnitellaan siten että se kykenee suoriutumaan sille esitetyistä tehtävistä turvallisesti, tehokkaasti ja taloudellisesti. Suunnittelustandardit ja järjestelmällä ajettavat työkierrot asettavat vähimmäisvaatimukset järjestelmälle. Turvallisuus- ja huoltokomponenttien pitää mahdollistaa järjestelmän turvallinen käyttö myös järjestelmän vikaantuessa.

Testilaitteiston tarkoitus on ajaa testisyklejä 1–8 hydrauliakulle. Järjestelmässä ei siis ole varsinaisia toimilaitteita ollenkaan. Pumpun tuottama hydraulinen teho ohjataan hydrauliakuille suuntaventtiileiden kautta. Paineistuksen jälkeen öljy ohjataan akuilta pois venttiileiden avulla. Järjestelmän hydraulikaavio on esitetty kuvassa 4.1.



Kuva 4.1. Testilaitteiston hydraulikaavio.

Hydraulikaavioon on merkitty kaikki järjestelmän komponentit. Lopulliset komponenttivalinnat jäävät testilaitteiston toimittajan tehtäväksi. Liitteessä 1 on hydraulijärjestelmän osaluettelo, jossa on kuitenkin lueteltu järjestelmään tulevat komponentit.

Hydraulista tehoa järjestelmään tuotetaan hydraulipumpuilla. Suurin osa testeistä ei vaadi erityisen korkeaa painetta ja tilavuusvirrantarve on vaihteleva testien välillä, joten järjestelmään on laitettu kaksi pumppua P1 ja P2. P1 on vakio-tilavuuspumppu, jolla voidaan tuottaa riittävä tilavuusvirta moniin testeihin. Vakio-tilavuuspumppua P1 ei voi kuitenkaan käyttää testeissä, joissa paine kohoaa erittäin korkeaksi. Säättötilavuuspumppu P2 voi tuottaa korkeita paineita joita jotkin testit vaativat. Säättötilavuuspumppu mahdollistaa sopivan tilavuusvirran valinnan testien mukaan. Kun järjestelmässä tarvitaan suurta tilavuusvirtaa ja paine on normaalien käyttöpainoiden alueella, voidaan molempia pumppuja käyttää samaan aikaan, jolloin suuriakin akkuja voidaan täyttää nopeasti. Pumppujen jälkeiset vastaventtiilit V1 sallivat virtauksen vain pumpuilta pois päin ja suojaavat näin pumppuja.

Testilaitteisto tulee tehdastiloihin, joten tehonlähteiksi valitaan sähkömoottorit, M1 ja M2. Kumpikin sähkömoottori on omalla akselillaan pumppuparinsa kanssa, joten toinen sähkömoottori voidaan kytkeä pois päältä kun testiä ajetaan toisella sähkömoottorilla.

Testikehikossa on mittausyhteet painelähettä A1 ja lämpötila-antureita A4 varten. Mittausyhteet löytyvät myös paine- ja paluulinjasta ja apuakulta. Mittausyhteet helpottavat mahdollista vianetsintää ja lisäävät käyttöturvallisuutta.

Suurin osa testisykleistä tarvitsee epätasaisesti tilavuusvirtaa. Käyttämällä apuakkuja T1 voidaan pumppua käyttää keskimääräisen tilavuusvirran tarpeen mukaan. Apuakku varastoi nestettä kun testattavat akut T2 eivät tarvitse tilavuutta ja vapauttaa tilavuutta kun testattaville akuille taas tarvitaan enemmän tilavuutta. Apuakku voidaan vaihtaa tarpeen mukaan, kun testattavien akkujen koko ja määrä vaihtelevat tai kun apuakku tarvitsee huoltoa.

Järjestelmässä on kolme erillistä paineakkuryhmää. Apuakku T1 ja kaksi neljän testiakun T2 ryhmää. Paineakuilla on oltava hydraulijärjestelmissä monia varolaitteita, jotka kuvataan standardissa PSK 6705 [19]. Sulkuventtiilit V4 mahdollistavat paineen päästön akuista tankkiin manuaalisesti. Paineenrajoitusventtiilit V2 estävät painetta nousemasta liian kovaksi akkupiirissä. Ilman paineenrajoitusventtiiliä tankista irti kytketyssä järjestelmän osassa voisi paine kohota yli sallittujen rajojen lämpötilan kohoamisen myötä. Suuntaventtiilillä V5 voidaan paine päästää tankkiin sähköisesti. Jos järjestelmältä katkeaa sähkö, palauttavat jouset suuntaventtiilit sellaiseen asentoon, että paine pääsee purkautumaan akuilta tankkilinjaan. Akkujen yhteydessä oleva paineyhde mahdollistaa akkujen painetason tarkastamisen.

Proportionaaliventtiili V6 säätelee virtausta sekä pumpuilta ja apuakulta testiakuille että testiakuilta tankkiin. Proportionaaliventtiiliä ohjataan niin että kuristusreunoilla aikaansaadaan halutun testisyklin mukainen paineaalto testiakuilla.

Proportionaaliventtiili V7 säätelee virtausta testiakkuryhmältä toiselle. Ajettaessa symmetrisiä testisyklejä akkuryhmät ovat vastakkaisissa vaiheissa, jolloin toisessa akkuryhmässä on korkea paine ja paljon nestettä, kun toisessa ryhmässä on matala paine ja vähän nestettä. Kun paineet kääntyvät päinvastoin, voidaan korkean paineen puolelta ohjata tilavuusvirtaa proportionaaliventtiilin läpi matalan paineen puolelle. Proportionaaliventtiiliä ohjaamalla päästään testisyklin mukaiseen paineaaltoon. Akkuryhmien paineiden lähestyessä toisiaan katkaisee proportionaaliventtiili V7 akkuryhmien välisen yhteyden ja venttiili V6 ohjaa loput tilavuudet toiselta akkuryhmältä tankkiin ja pumpulta toiselle akkuryhmälle.

Kumpikin testiakkuryhmä on yhteydessä tilavuusmittariin A2. Normaalisti neste ohjataan venttiilin V6 läpi tankkiin, kun akkujen paine vapautetaan. Nestetilavuus voidaan kuitenkin ohjata venttiilin V5 läpi tilavuusmittarille, jolloin saadaan mitattua akuilta tuleva nestetilavuus. Neste voidaan ohjata kulkemaan tilavuusmittarin läpi halutuissa testin vaiheissa tai käyttäjä voi manuaalisesti ohjata nesteen tilavuusmittarille. Käyttämällä tilavuusmittaria saadaan suhteellisen tarkka tieto siitä

kuinka paljon akuilta tuli nestettä. Akkujen lukumäärästä ja männän pinta-alasta voidaan helposti laskea männän alkuperäinen asema.

Testattavien akkujen yhteydessä olevat sulkuventtiilit V4 toimivat sekä turvallisuusventtiileinä että mittauksen apuna. Sulkuventtiileillä akut voidaan eristää muusta järjestelmästä tai paine voidaan laskea tankkiin tarvittaessa. Sulkemalla sulkuventtiilit akut voidaan eristää vuodottomasti muusta järjestelmästä, kun varoventtiileinä on käytetty istukkaventtiileitä. Akut voidaan eristää järjestelmästä jotta nähtäisiin painetasojen säilyminen lyhyellä tai pitkällä aikavälillä akuissa.

Hiukkaslaskuri S4 valvoo öljyn epäpuhtaustasoa reaaliaikaisesti. Paluusuodatin S3 pitää öljyn riittävän puhtaana jatkuvaa käyttöä varten. Paluusuodatin sijaitsee virtaussuunnassa ennen jäähdytintä, jotta öljyn viskositeetti olisi pienempi ja paine-ero ei kasvaisi liian suureksi suodattimen yli. Jäähdytin S2 pitää öljyn lämpötilan halutulla tasolla. Jäähdyttimen ja suodattimen rinnalla ovat jousikuormitteiset vastaventtiilit V3, joiden kautta öljy pääsee tankkiin jos suodatin tai jäähdytin tukkeutuu.

4.3. Lähtöarvot ja tehontarve

Hydrauliikassa hydraulipumppu muuttaa sähkö- tai polttomoottorin tuottamaa mekaanista tehoa hydrauliseksi tehoksi. Pumppu tuottaa järjestelmään tilavuusvirtaa. Paine nousee, kun tilavuusvirran liikettä vastustetaan. Hydraulinen teho lasketaan kaavalla (4), jossa P_h on hydraulinen teho [W], Q on tilavuusvirta [m^3/s] ja Δp on paineen muutos [Pa].

$$P_h = Q\Delta p \quad (4)$$

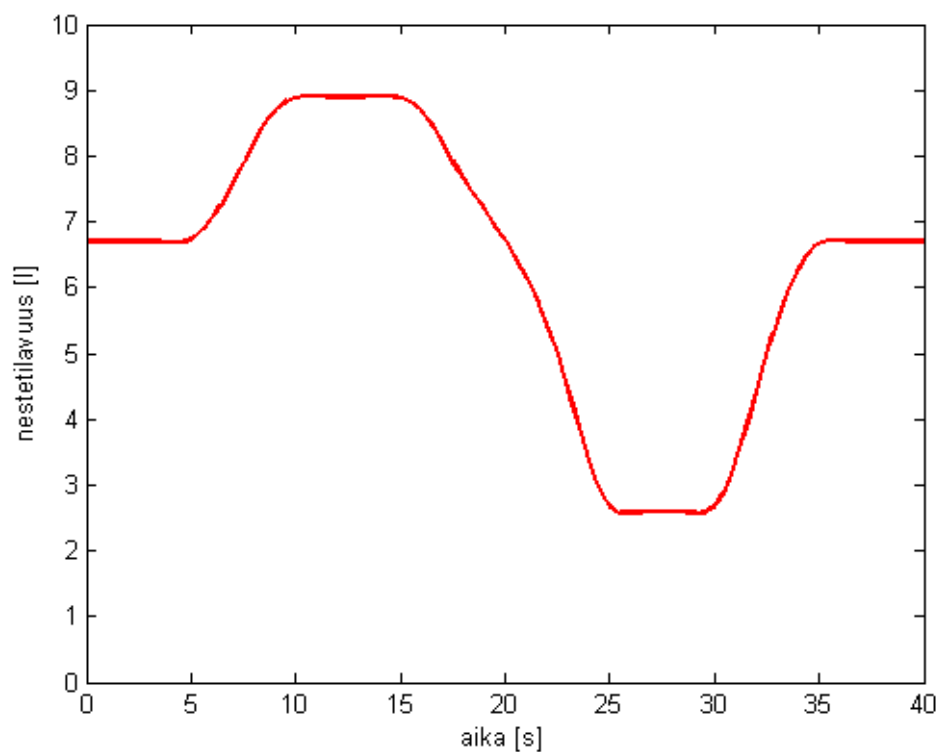
Pumpun tarvitseman teoreettisen tehontarpeen määrittämistä varten pitää siis selvittää paineen muutos ja suurin pumpulta tarvittava tilavuusvirta. Käyttämällä testisykliä tietoja voidaan nyt määrittää järjestelmän tehontarve. Monissa testeissä voidaan testata kahta akkuryhmää samanaikaisesti, jolloin kumpaakin akkuryhmää voidaan käyttää vuorotellen osittaisena tilavuusvirtalähteenä toisen akkuryhmän paineistuksessa.

Testisyklin tarvitsema hydraulinen teho riippuu siis siitä kuinka paljon tilavuutta akkuihin on ajettava, kuinka usein ja kuinka suuri on painevaihtelu. Mäntäakun nestetilavuus riippuu lineaarisesti männän asemasta, jolloin testisyklin tarvitsema hydraulinen teho voidaan laskea kaavalla (5).

$$P_h = \frac{l_m \cdot A_m \cdot \Delta p \cdot n_l}{t_s} \quad (5)$$

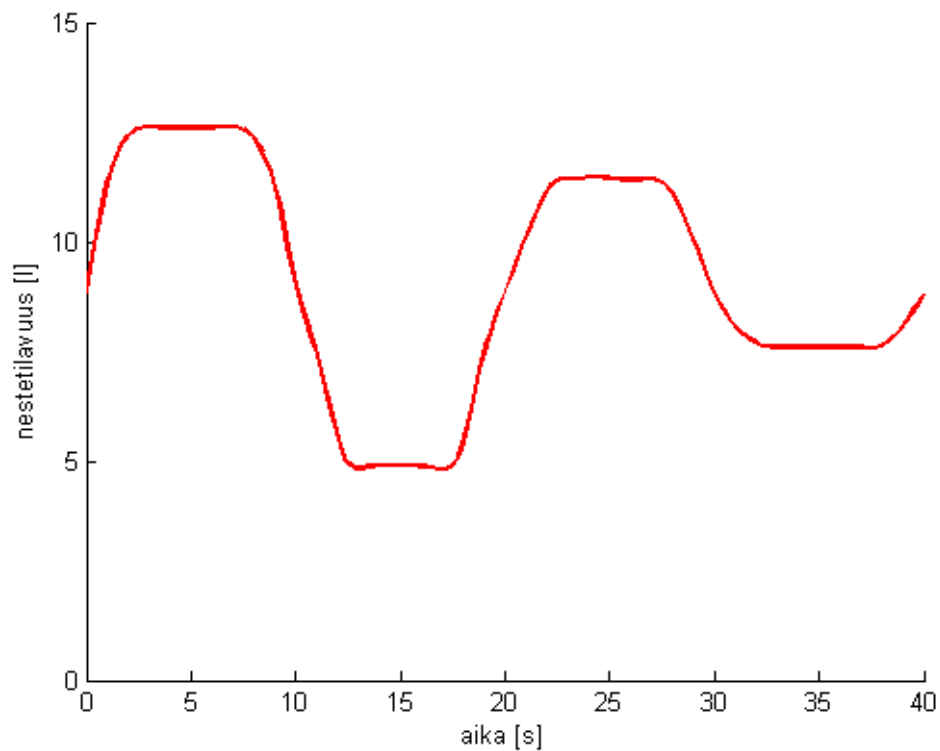
jossa l_m on männän liikematka [m], A_m on männän pinta-ala [m^2], n_l on testattavien akkujen lukumäärä ja t_s on sykliin kuluva aika [s].

Kun tiedetään testisykleihin kuuluvat ajat ja syklien painevaihtelut, voidaan kaavalla (2) laskea akkujen nestetilavuuden muutos syklien aikana. Käyttämällä riittävän suurta apuakkua, voidaan testisykliä tilavuusvirrantarve mitoittaa pumpulle tasaiseksi koko syklin ajalta. Laskemalla akkujen nestetilavuuden muutokset yhteen ja jakamalla ne syklin kestolla, saadaan syklin tarvitsema tilavuusvirta. Testiakkujen tarvitsema tilavuusvirta riippuu testisyklin pituudesta ja akkujen lukumääränä lisäksi akkujen nimelliskoosta, esitäyttöpaineesta ja tilanmuutoksen nopeudesta. Jotta testien tilavuusvirran- ja tehontarpeita voisi käyttää hydraulijärjestelmän mitoituksen lähtökohdaksi, oletetaan testattavien akkujen ominaisuuksiksi yleisimmät arvot tai arvot joilla tilavuusvirta ja teho ovat suurimmillaan. Akkujen nestetilavuuksien muutokset ovat esitetty kuvissa 4.2– 4.7.



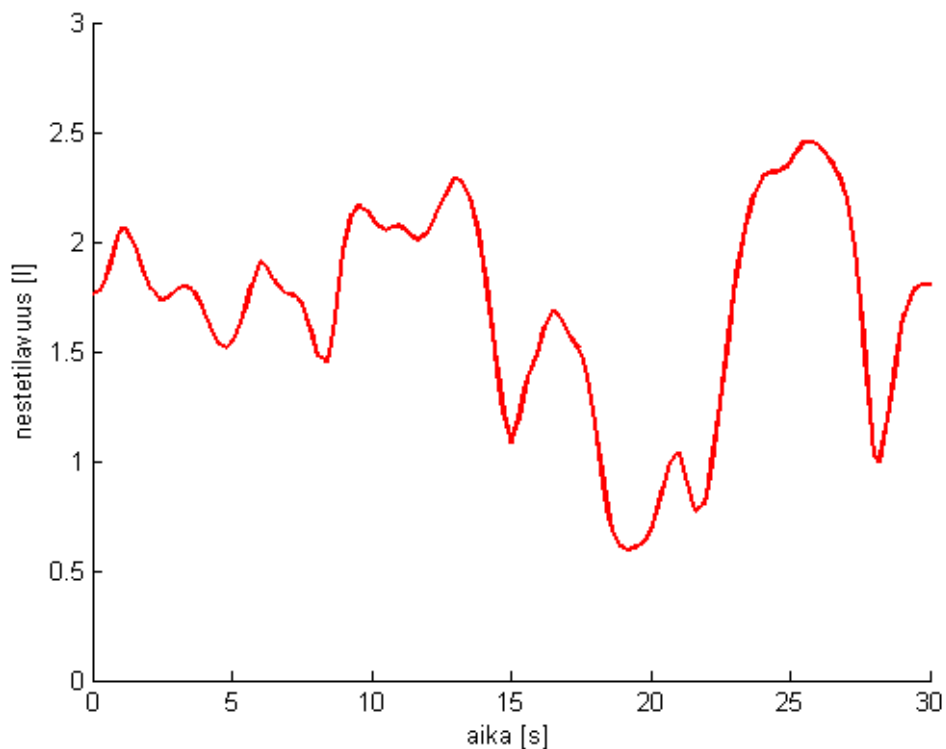
Kuva 4.2. Nestetilavuuden muutos suurpainetestissä.

Suurpainetestissä testataan kahta paineakkua, joiden nimellistilavuudet ovat 20 litraa. Täydellisen symmetrisen testin ansiosta voidaan säästää melkein puolet pumpulta tulevasta tilavuusvirrasta, ohjaamalla tilavuutta akuilta toisille. Syklien aika on 40 sekuntia, akkujen toiminta adiabaattista ja esitäyttöpaine akuissa on 180 bar.



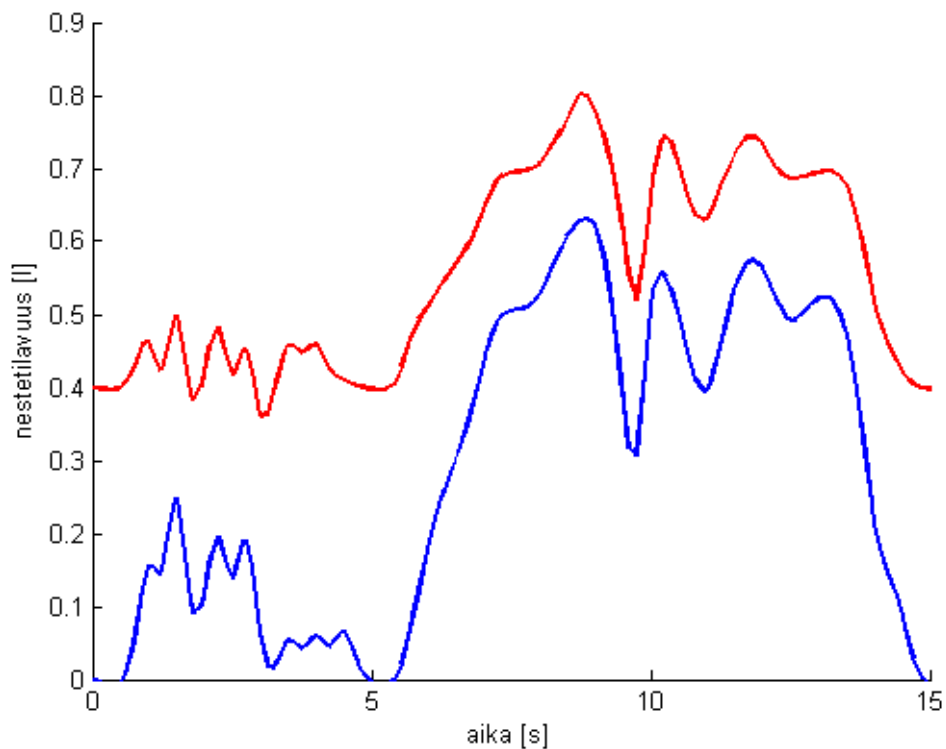
Kuva 4.3. Nestetilavuuden muutos symmetrisessä testissä.

Symmetrisessä testissä testataan kahta akkua, joiden nimellistilavuudet ovat 25 litraa. Symmetrisyyden ansiosta tilavuutta voidaan ohjata akuilta toiselle, säästäten pumpun tuottovaatimuksissa. Sykلياika on 40 sekuntia, akkujen toiminta adiabaattista ja esitäyttöpaine on 60 bar.



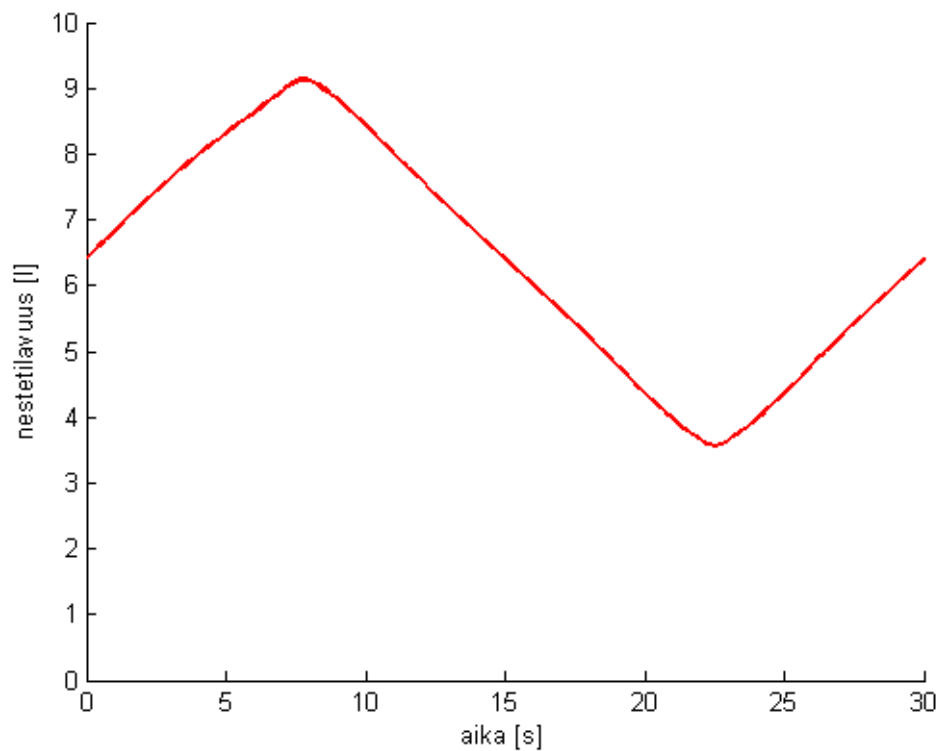
Kuva 4.4. Nestetilavuuden muutos puomin liikkeiden kompensoinnissa.

Puomin jousituksen testissä testataan neljää akkua, joiden nimellistilavuudet ovat 1 litra. Akkujen toiminta on adiabaattista. Sykliaika on 30 sekuntia ja esitäyttöpaine on 60 bar.



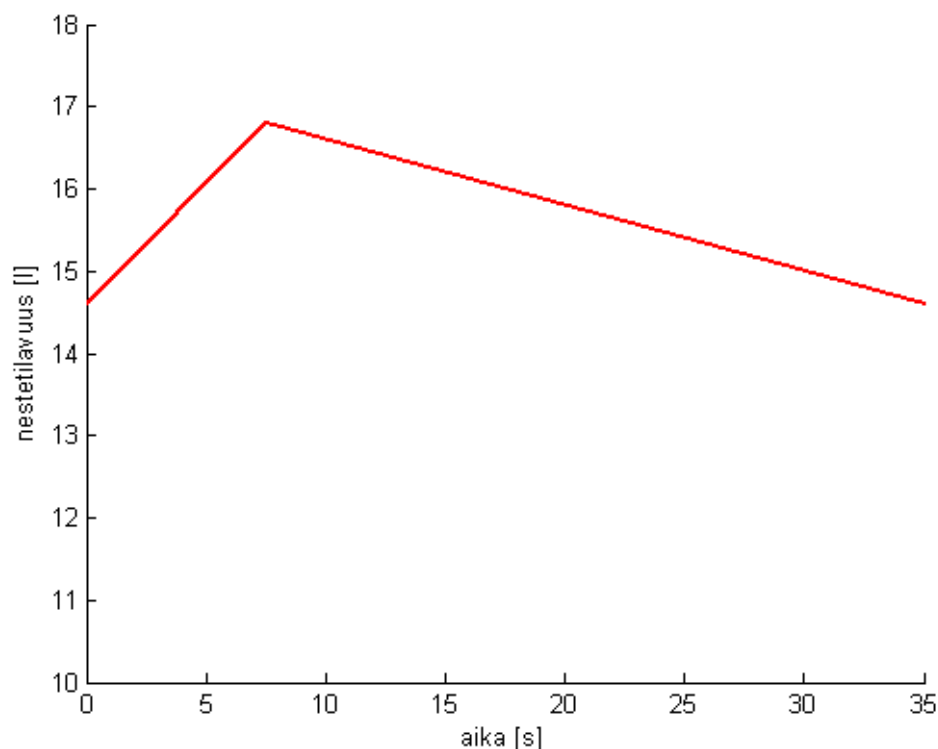
Kuva 4.5. Nestetilavuuden muutokset kauhan jousituksessa.

Kauhan jousituksen testauksessa käytetään kahta akkua, joiden nimellistilavuudet ovat 1 litra. Sykli aika on 15 sekuntia ja akkujen toiminta on adiabaattista. Toisen akun esitäyttöpaine on 30 bar ja toisen 15 bar.



Kuva 4.6. Nestetilavuuden muutos energiateollisuuden testisyklissä 2.

Energiateollisuuden testisyklissä testataan neljää paineakkua, joiden nimellistilavuudet ovat 25 litraa. Täydellisen symmetrisen testin ansiosta voidaan säästää melkein puolet pumpulta tulevasta tilavuusvirrasta, ohjaamalla tilavuutta akuilta toisille. Sykli aika on 30 sekuntia, akkujen toiminta adiabaattista ja esitäyttöpaine akuissa on 165 bar.



Kuva 4.7. Nestetilavuuden muutos energiateollisuuden testisyklissä 1.

Energiateollisuuden testisyklissä testataan kuutta paineakkua, joiden nimellistilavuudet ovat 25 litraa. Sykلياika on 35 sekuntia. Akkujen toiminta on adiabaattista ja esitäyttöpaine akuissa on 165 bar.

Taulukossa 4.1. on esitetty testisykliin pumpulta tarvitsemat tilavuusvirrat. Yhdistämällä tulokset nestetilavuuden muutoksesta muiden testisykliin ominaisuuksien kanssa, voidaan kaavalla 5 laskea syklien tarvitsema hydraulinen teho.

Taulukko 4.1. Testisykliin tilavuusvirrantarpeet pumpulta.

Testi	Tilavuusvirran tarve [l/min]
Puomin liikkeiden kompensointi	8
Kauhan jousitus	12
Symmetrinen testisykli	16
Energiateollisuuden testisykli 1	10
Energiateollisuuden testisykli 2	13
Suurpainetestti	10

Taulukkoon 4.2. on laskettu eri testisykliin tarvitsemia tehoja. Symmetrisissä testeissä on mahdollisuus säästää jopa neljännes tilavuusvirran tarpeesta kun ajetaan tilavuutta hydraulikuilta toisille. Tehontarpeet on laskettu suurimman normaalin testitilanteen mukaan siten että akkuja mahdollisuuksien mukaan käytetään energianlähteinä. Suuritehoisissa testeissä erityisesti säästetään paljon energiaa käyttämällä kahta

akkuryhmää ja käyttämällä akkuja energianlähteinä. Hydraulijärjestelmässä oleva apuakku varastoi nestettä testien epätasaisen tilavuudentarpeen aikana ja pienentää suurinta pumpulta tarvittavaa tilavuusvirran tarvetta.

Taulukko 4.2. Testisyklien tehontarpeet.

Testi	Tehon tarve [kW]
Puomin liikkeiden kompensointi	3,1
Kauhan jousitus	2,4
Symmetrinen testisykli	4,2
Energiateollisuuden testisykli 1	3,8
Energiateollisuuden testisykli 2	4,7
Suurpainetesti	7,0

Tehontarve on kaikilla testisykleillä suhteellisen pieni. Yleensä paineakuille tarvitaan vain pieniä tilavuusvirtoja. Käyttämällä toista akkuryhmää osittaisena tilavuuslähteenä pienenee pumpun tuottaman tilavuusvirran tarve entisestään. Useimmiten jos tilavuusvirtaa tarvitaan enemmän, on vastaavasti paine-erot pienempiä ja tehontarve säilyy alhaisena. Yleensä todellisia käyttötilanteita vastaavissa testeissä akkuja ei tyhjenetä kovin tyhjiksi ja akkujen nimelliskoot ovat pieniä, jolloin tehontarve ei pääse kasvamaan kovin suureksi.

4.4. Komponenttien mitoitus

Mäntäakkuja valmistetaan erittäin korkeille paineille asti ja testilaitteiston pitää pystyä testaamaan akkuja vieläkin suuremmilla paineilla. Testilaitteistolla pitää pystyä myös suorittamaan akuille painelaitedirektiivin mukainen rakennettestaus, eli nostaa paine 1,43-kertaiseksi suurimpaan käyttöpaineeseen verrattuna viiden minuutin ajaksi. Testijärjestelmän painetaso on korkeimmillaan 600 bar. Erittäin korkeat painetasot asettavat tiukkoja vaatimuksia järjestelmään käytettävien komponenttien kestolle ja luotettavuudelle.

Komponenttien mitoituksen jälkeen valitaan komponentit olemassa olevista vaihtoehdoista ja lasketaan järjestelmän toimintapisteet. Komponenttien lopullinen valinta jää testilaitteiston toimittajan suoritettavaksi, joten toimittajan on tehtävä varmistuslaskelmat ja selvitettävä että järjestelmä vastaa annettuja vaatimuksia valituilla komponenteilla.

4.4.1. Pumput

Järjestelmällä ajetaan hyvin vaihtelevia testisyklejä paineakuille. Joissakin testeissä vaaditaan suuria paineita, mutta monissa testeissä painetaso ei nouse erityisen korkealle.

Tilavuusvirran tarve vaihtelee vähemmän testeittäin, mutta testattavien akkujen määrän vaihdellaessa muuttuu myös tilavuusvirran tarve. Pumpulta saatava todellinen tilavuusvirta voidaan laskea kaavalla (6).

$$Q_{tod} = \eta_{vol} V_k n_k \quad (6)$$

jossa Q_{tod} on todellinen pumpulta saatava tilavuusvirta [m^3/s], η_{vol} on pumpun volumetrinen hyötysuhde, V_k on pumpun kierrostilavuus [m^3] ja n_k on pumpun kierrosnopeus [k/s].

Hydraulijärjestelmän painepuolella on imupuolta suurempi paine. Neste pyrkii matalamman paineen puolelle ja osa nesteestä pääsee virtaamaan pumpun ohi imupuolelle. Vuotovirtaus otetaan huomioon pumpun tuottoa laskettaessa volumetrisella hyötysuhteella. Volumetrisen hyötysuhteen arvo riippuu pääasiassa paine-erosta ja hyötysuhde vaihtelee paine-eron mukana. Arvioidaan volumetrisen hyötysuhteen arvoksi 0,95. Tilavuusvirta 13 l/min riittää tyydyttämään tilavuusvirtatarpeen kaikissa paitsi yhdessä testisyklissä, joten valitaan vakiotilavuuspumpun iskuilavuus siten, että pumppu tuottaa tilavuusvirtaa 13 l/min kun pumppua ajetaan tyypillisellä sähkömoottorin kierrosnopeusalueella $n_k = 1450 - 1500$ k/min. Kierrostilavuuden ollessa 9 cm^3 pumpun tuottama tilavuusvirta jää hieman alle 13 l/min, joten valitaan pumpun kierrostilavuudeksi 10 cm^3 .

Järjestelmän suurin painetaso on jopa 600 bar, mutta yleensä järjestelmän paine pysyy selvästi pienempänä. Muiden komponenttien pitää kestää suurimmatkin käyttöpainet, mutta vakiotilavuuspumppua suojaa vastaventtiili. Pumppu voidaan valita sen mukaan, mikä järjestelmän normaali painetaso on. Korkeimmat painet tuotetaan kuitenkin säätötilavuuspumpulla. Valitsemalla vakiotilavuuspumppu normaaleiden käyttöpainetien mukaan varmistetaan pumpun toimiminen hyvällä hyötysuhdealueella. Pienempi tarvittava painenkesto mahdollistaa myös valinnan tekemisen useampien pumpputyypin joukosta. Esimerkiksi hammaspyöräpumput ovat yleensä edullisia ja kestävät epäpuhtauksia hyvin, mutta niiden suurin sallittu käyttöpainet on rajallinen. Kun valitaan vakiotilavuuspumppu, jonka suurin sallittu käyttöpainet on 250 bar, voidaan sillä tuottaa tilavuusvirtaa mihin tahansa muuhun valmiiseen testisykliin paitsi suurpainetestiin.

Säätötilavuuspumpulla pitää voida suorittaa kaikki halutut testit. Vakiotilavuuspumppua voidaan käyttää säätötilavuuspumpun rinnalla tilavuusvirtalähteenä alle 250 barin paineissa, mutta suuremmilla paineilla koko tilavuusvirran tuotto jää säätötilavuuspumpun tehtäväksi. Pumpun pitää voida tuottaa järjestelmään 600 bar paine. Säätötilavuuspumpuksi tarvitaan mäntäpumppu, koska painet ovat erittäin suuria ja pumpun kierrostilavuutta pitää päästä säätämään.

Suunnittelutapaa, jossa komponenteiksi valitaan hieman todellista tarvetta suuremmat komponentit, sanotaan ylimitoitukseksi. Ylimitoitus on harvoin taloudellisesti järkevää järjestelmän suunnittelussa. Turhan isot komponentit maksavat

enemmän ja toimivat keskimäärin huonommalla hyötysuhteella. Testilaitteiston säätötilavuuspumpun osittaista ylimitoittamista puoltaa kuitenkin muutama asia:

- epävarmuus tulevaisuuden testien tilavuusvirran tarpeesta
- paineakkujen tilavuuksien kasvu ja mahdollisuus ajaa testejä myös suurilla tilavuuksilla
- vakio-tilavuuspumpun käyttö pienitehoisissa testeissä
- paineistamattomien hydrauliakkujen nopeampi paineistaminen järjestelmään liitettäessä tai akun tyhjentämisen jälkeen
- mahdollisuus monen akun rinnakkaiseen testaamiseen, jolloin voidaan hyödyntää koko pumpun tilavuusvirta lisäämällä testattavien akkujen määrää

Mitoitetaan säätötilavuuspumpun tuotoksi noin 30 l/min. Oletetaan sähkömoottorin kierrosnopeudeksi edelleen $n_k = 1450 - 1500$ k/min. Kaavalla (6) saadaan säätötilavuuspumpun kierrostilavuudeksi 20 cm^3 .

4.4.2. Sähkömoottorit

Sähkömoottori pyörittää hydraulipumppua muuttaen sähköistä energiaa mekaaniseksi, jonka hydraulipumppu muuttaa hydrauliseksi. Sähkömoottorin teho rajoittaa hydraulipumpulta saatavaa tehoa. Sähkömoottori mitoitetaan siten, että moottorilta saatava teho on vähintään yhtä suuri kuin suurin pumpun tarvitsema teho. Sähkömoottorilta tarvittava teho voidaan laskea yhtälöllä (7).

$$P_{sm} = \frac{Q\Delta p}{\eta_{kok}} \quad (7)$$

jossa P_{sm} on sähkömoottorin teho [W], Q on tilavuusvirta [m^3/s], Δp on paine-ero [Pa] ja η_{kok} on pumpun kokonaishyötysuhde.

Sähkömoottorin teho mitoitetaan suurimman pumpulta tarvittavan hydraulisen tehon mukaan. Pumpun häviöiden huomioon ottamiseksi sähkömoottorin teho pitää vielä kertoa pumpun kokonaishyötysuhteen käänteisluvulla. Hydraulinen teho lasketaan tilavuusvirran ja paine-eron tulona. Sähkömoottoria ei kuitenkaan kannata mitoittaa suurimman tarvittavan tilavuusvirran ja suurimman paine-eron mukaan. Yleensä pumpulta tarvitaan joko suurta tilavuusvirtaa tai suurta painetta, ei molempia samaan aikaan.

Taulukossa 4.2. on listattuna testisykliä todellisia tehontarpeita. Käyttämällä kaavaa (7) voidaan vakio-tilavuuspumpun sähkömoottorin tehontarpeeksi laskea 6 kW. Taulukon 4.2. perusteella voidaan todeta pienemmänkin tehon riittävän testien suorittamiseen. Suurpainetestin suorittaminen vaatisi enemmän tehoa, mutta pumppu ei kuitenkaan voi tuottaa niin korkeaa painetta. Valitsemalla olemassa olevista sähkömoottoreiden kokovaihtoehdoista sähkömoottorin tehoksi 5,5 kW pumppua

voidaan käyttää normaaleissa testeissä. Viiden ja puolen kilowatin tehoisella sähkömoottorilla vakioilavuuspumppu voi tuottaa lähes suurinta tilavuusvirtaansa korkeimpaan painetasoonsa saakka.

Säätötilavuuspumpun pyörittäminen täydellä kierrostilavuudella suurimmalla painetasolla vaatisi yli 30 kW:n sähkömoottorin. Suurimmat testisyklien tehontarpeet ovat selvästi alle 30 kW. Säätötilavuuspumpun koko on hieman ylimitoitettu. Valitsemalla hieman nykyistä tarvetta tehokkaamman sähkömoottorin voidaan testilaitteistolla ajaa tulevaisuudessa testejä, joiden tehontarve on nykyistä suurempi. Mitoittamalla sähkömoottori samassa suhteessa nykyisen tehontarpeen yli, kuin tilavuusvirran ylimitoitus, voidaan akkuja lisätä myös testattavaksi rinnakkain ja ajaa tehontarpeeltaan suurempia testejä myös suuremmilla akkumäärillä. Kun valitaan 15 kW sähkömoottori, säätötilavuuspumppu voi tuottaa vielä 600 bar paineessa yli 13 l/min tilavuusvirtaa.

4.4.3. Putkistot

Hydraulipumppu muuttaa mekaanista energiaa hydrauliseksi ja teho välitetään nesteen avulla. Hydraulijärjestelmän komponentit saattavat sijaita fyysisesti kaukana pumpusta. Neste kulkee pumpulta muille komponenteille putkia ja letkuja pitkin.

Hydraulinesteen siirtäminen putkistoa pitkin aiheuttaa tehohäviöitä. Putkiston pituus, putken sisäpinnan pinnanlaatu sekä putkistossa olevat mutkat ja liitokset aiheuttavat tehohäviöitä. Tehohäviöiden minimoimiseksi kannattaa putkistosta tehdä mahdollisimman lyhyt, sileä ja mutkaton. Edellä mainitut seikat ovat usein, ainakin jossain määrin, suunnittelijan hallitsemattomissa. Suunnittelulla voi kuitenkin vähentää virtaushäviöitä mitoittamalla putkien halkaisijat oikein. Kapeissa putkissa nesteen virtausnopeus on liian kova ja virtaushäviöt suuria. Putkistojen mitoitus tehdään standardien mukaan. Putkiston mitoitukseen käytetään kaavaa (8).

$$d_s = \sqrt{\frac{Q \cdot 4}{v \cdot \pi}} \quad (8)$$

jossa d_s on putken sisähalkaisija [m], Q on tilavuusvirta [m^3/s] ja v on virtausnopeus [m/s].

Käytetään standardia PSK 6706 sopivien virtausnopeuksien määrittämiseen. Paluuputken virtausnopeuden tulee olla 1–3 m/s. Imuputken virtausnopeuden tulee olla alle 1,3 m/s. Paineakanavan virtausnopeuden tulee olla suurintaan 6 m/s. [20]

Lasketaan paineakanavan sisähalkaisija kun virtausnopeus on 5 m/s ja kummatkin pumput tuottavat suurinta mahdollista tilavuusvirtaa. Kaavalla (8) saadaan paineakanavan sisähalkaisijaksi 14 mm. Lasketaan kummallekin pumpulle imuputken sisähalkaisija kun pumppu tuottaa suurinta tilavuusvirtaa ja virtausnopeus on 0,4 m/s

säätötilavuuspumpulla ja 0,7 m/s vakiotilavuuspumpulla. Vakiotilavuuspumpun imuputken sisähalkaisija on 20 mm ja säätötilavuuspumpun imuputken sisähalkaisija on 40 mm. Paluukanavan tilavuusvirta riippuu yleensä testiakulta tulevasta virtauksesta. Proportionaaliventtiili kuristaa paluuvirtausta testisykliä aikana, mutta ajoittain akuilta saattaa purkautua hetkellisesti suuria tilavuusvirtoja. Mitoitetaan paluuputken sisähalkaisija pumppujen suurimman tuoton mukaan ja käytetään virtausnopeudelle arvoa 1 m/s jolloin suuremmatkaan paluuvirtaukset eivät aiheuta ongelmia. Paluuputken sisähalkaisija on 30 mm. Taulukkoon 4.3. on kerätty putkien halkaisijat.

Taulukko 4.3. Putkien sisähalkaisijat.

Putki	Sisähalkaisija [mm]
Painekanava	14
Paluukanava	30
Vakiotilavuuspumpun imukanava	20
Säätötilavuuspumpun imukanava	40

Tilavuusvirrat ovat suhteellisen pieniä, joten sisähalkaisijat pysyvät pieninä. Mäntäpumpun imukanavassa pitää olla hidas virtausnopeus, jonka seurauksena imukanavan halkaisija on hieman muita suurempi.

4.4.4. Venttiilit

Järjestelmän toimintaa ohjataan on/off-venttiileillä ja kahdella proportionaaliventtiilillä. Kahden suuntaventtiilin täytyy olla säädettävissä, jotta haluttuja testisyklejä voidaan ajaa. Suuntaventtiileistä haluttiin proportionaalisia, eikä servotoimisia, jotta järjestelmän luotettavuus säilyisi. Servoventtiileiden likaherkkyys olisi saattanut olla ongelmallista pitkien testien aikana.

Testiakkujen varoventtiileinä olevien on/off-venttiileiden täytyy olla istukkatyyppisiä, jotta akut voidaan eristää järjestelmästä tiiviisti. Monilla järjestelmävalmistajilla on omia venttiileitä, joten akkujen valinnan toteuttaa testilaitteiston toimittaja.

4.4.5. Anturit

Hiukkaslaskuriksi haluttiin samanlainen kuin yrityksen toisessakin testilaitteessa on. Samaa mallia ei enää valmisteta. Valitsemalla saman valmistajan uuden tuotteen pysyy käyttöliittymä yleensä suhteellisen tuttuna ja tulosten vertailukelpoisuuden voidaan olettaa olevan mittauslaitteiden välillä melko hyvä. Hiukkaslaskurin pitää olla Parkerin valmistama.

Lämpötila-antureilla pitää olla mahdollisimman lyhyt näytteenottoväli ja niiden pitää pystyä mittaamaan kaasun ja nesteen lämpötilaa. Painelähettimeiden pitää mitata vähintään 600 bar asti ja näytteenottoväli saa olla suurintaan 5 ms.

4.4.6. Hydraulineneste

Hydraulineneste välittää tehoa pumpulta toimilaitteille. Pääasiallisen tehtävänsä lisäksi hydraulineneste suorittaa monia muitakin tehtäviä. Öljy voitelee monia komponentteja, jäähdyyttää, suojaa korroosiolta ja ruosteelta sekä kuljettaa epäpuhtauksia muilta komponenteilta suodattimelle ja säiliöön [2].

Järjestelmää käytetään sisätiloissa ja sen lämpötilan pitäisi olla suhteellisen vakaa. Kun valitaan hydraulioöljy, jonka viskositeetti on 32 cSt 40 celsiusasteen lämpötilassa, varmistetaan komponenttien sopiva voitelu ja öljyn riittävä liikkuvuus. Öljyksi sopii esimerkiksi Mobil DTE10 Exxon 32.

4.4.7. Säiliö

Öljysäiliön pitää olla riittävän iso, jotta kaasu ehtii erkaantua paluuöljystä säiliössä olon aikana. Myös kiinteillä epäpuhtauksilla, jotka eivät ole jääneet suodattimeen, kuluu aikaa vajota säiliön pohjalle. Öljyn lämpötila laskee säiliössä olon aikana. Mitä kauemmin öljy on säiliössä, sitä vähemmän tehoa tarvitsee käyttää aktiiviseen jäähdyyttämiseen. Järjestelmän koko öljytilavuus pitää mahtua tarvittaessa säiliöön. Säiliöön pitää jättää myös pieni ilmatila. Suurimmillaan järjestelmään pitäisi tarvita jonkin verran yli 100 litraa öljyä. Jos järjestelmän suurin öljytilavuus ei jää määrääväksi tekijäksi, niin säiliö mitoitetetaan kaavaa (9) käyttäen. [21]

$$V_s = Q_{av}k \quad (9)$$

jossa V_s on säiliön tilavuus [l], Q_{av} on keskimääräinen säiliöön palaava tilavuusvirta [l/min] ja k on viipymäaika [min].

Käyttämällä viipymäaikana arvoa 5 min säiliön tilavuus, yhtälöllä (9) laskettuna, jää silti pienemmäksi kuin suurin öljytilavuus. Valitaan säiliön tilavuudeksi 150 litraa.

4.4.8. Suodatin

Järjestelmässä on paluusuodatus. Suurten paineiden takia painelinjaa on vaikea suodattaa. Suodatus pitää valita herkimpien järjestelmässä olevien komponenttien mukaan. Testijärjestelmässä on proportionaaliventtiileitä ja mäntäakkuja. Mäntäakut ovat herkkiä epäpuhtauksille, mutta proportionaaliventtiilien toiminta ohjaa koko järjestelmää ja venttiilit voivat mennä epäkuuntoon epäpuhtauksien takia. Järjestelmän

haluttu puhtausluokka on 20/15/12 (ISO 4406:1999). Paluusuodattimen suodatusasteeksi valitaan 10 μm . [2]

4.4.9. Jäähdytin

Hydraulijärjestelmissä hukkateho muuttuu lähes kokonaan lämmöksi. Öljy viilentää komponentteja ja kuljettaa lämpöä joka puolelle järjestelmää. Ympäristö on lähes poikkeuksetta hydraulijärjestelmää viileämpi ja lämpöä siirtyy ympäristöön erityisesti säiliössä olevasta öljystä. Jos passiivinen jäähdytys ei riitä pitämään järjestelmän lämpötilaa riittävän matalana, tarvitsee järjestelmään asentaa jäähdytin.

Normaalissa hydraulijärjestelmässä sähkö- tai polttomoottorin järjestelmään tekemän työn ja järjestelmästä toimilaitteiden kautta pois saadun työn erotus on häviöenergia, joka on järjestelmässä muuttunut lämpöenergiaksi. Testijärjestelmässä ei ole toimilaitteita joiden avulla voisi energiaa ottaa talteen. Kaikki järjestelmän hydraulien energia käytetään akkujen paineistamiseen. Tehty työ muuttuu siis hyvin suurissa määrin lämmöksi. Osa lämmöstä syntyy komponenteissa, osa kaasun puristamisessa ja osa nesteessä. Järjestelmä jäähdyttää itseään passiivisesti, mutta myös aktiivinen jäähdytin tarvitaan.

Säteily poistaa hydraulisäiliöstä lämpöä 4–5 $\text{W}/\text{m}^2\text{C}$ [18]. Järjestelmän ollessa kuumimmillaan siitä poistuu lämpöä passiivisesti melkein 1 kW. Järjestelmä lämpenee eniten pitkällä aikavälillä suurpainetestissä, jossa lämpötehoa on 7 kW. Järjestelmään tarvitaan siis 6 kW jäähdytin.

4.5. Toiminta poikkeustilanteissa

Turvallisuuskohdat pitää aina ottaa huomioon koneensuunnittelussa. Testilaitteisto kanssa turvallisuusasiat korostuvat, kun paine nousee järjestelmässä suurimmillaan jopa 600 bar asti ja laitteiston toiminta on pitkälti automatisoitu ohjausohjelmiston varaan. Hydrauliakkuja testattaessa akkuja rasitetaan kovaa ja pitkään, jolloin mahdolliset viat voivat aiheuttaa vaurioita. Turvallisuusasiat täytyy pitää mielessä suunnittelun aikana alusta loppuun. Turvallisuus otetaan huomioon jo hydraulikaaviossa, kun järjestelmään valitaan varolaitteita. Suunnittelun osalta viimeisenä tulee toimittajan kanssa käyty riskianalyysi.

Testilaitteistolla voidaan testata useita hydrauliakkuja samanaikaisesti. Pienet, hyvin suuret ja muun kuin mäntätyyppiset akut testataan omissa telineissään. Laitteistossa on valmiit paikat normaalikokoisille mäntäakuille. Testikehikossa akut eivät pääse liikkumaan ja ne ovat suojassa. Öljyn vuotaessa järjestelmästä öljy valuu laitteiston vuotokaukaloon. Testilaitteisto on tarkoitettu sijoittamaan tehtaan pommisuojaan. Pommisuojaan testilaitteisto saa toimia vapaasti, eikä ihmisiä ole sen lähellä. Mahdollisissa vaaratilanteissa pommisuoja suojaa ulkopuolella olevia ihmisiä sen sisäpuolella olevalta testilaitteistolta. Erillisen tilan takia myöskään laitteiston

aiheuttama melu ei häiritse. Pommisuojassa on myös hyvä ilmanvaihto, jolloin lämpötila pysyy tasaisena.

Järjestelmässä on kolmessa paikassa hydrauliakkuja, ja jokainen akkuryhmä on yhdistetty turvalaitteisiin. Jokaisella akulla on paineyhde, joka mahdollistaa paineen mittaamisen. Mittaamalla voidaan varmistaa esimerkiksi ettei akussa ole painetta ennen akun irrottamista järjestelmästä. Paineenrajoitusventtiilit estävät painetta nousemasta missään tilanteessa korkeammalle kuin suurin sallittu käyttöpaine. Paineenrajoitusventtiili on akkuryhmien lisäksi myös pumppulinjassa. Jokaiselle akulle on myös sulkuventtiili, jolla voidaan estää nestettä siirtymästä järjestelmästä akkuun tai akusta järjestelmään. Jokaisessa akkuryhmässä on myös jousiohjattu on/off-venttiili, jonka jousi palauttaa aukinaiseen asentoon ohjausjännitteen kadotessa. Esimerkiksi sähkökatkoksen aikana on/off-venttiilit päästävät automaattisesti akuista paineen tankkiin.

4.6. Testilaitteiston simulointi

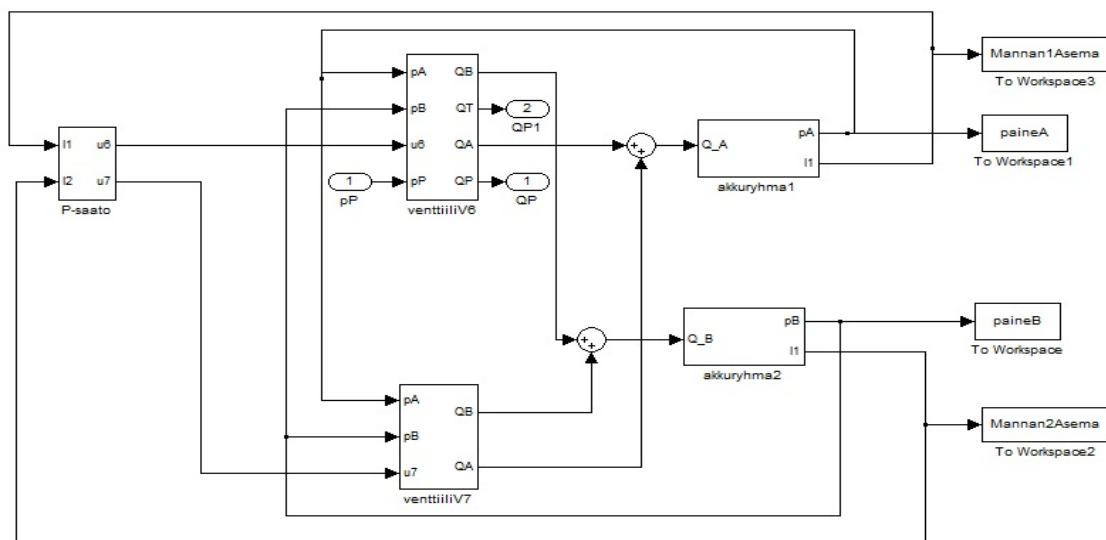
Testijärjestelmästä tehtiin simulointimalli järjestelmän ominaisuuksien tutkimiseksi. Simulointi tehtiin Simulink-ohjelmistoa käyttäen. Järjestelmän ominaisuuksia selvitettiin laskemalla, mutta dynaamisten ominaisuuksien tarkastelu laskennalla on työlästä. Ensimmäisen asteen matemaattisilla yhtälöillä voidaan selvittää helposti järjestelmän lopputila muutostilanteesta. Jos halutaan tietää miten lopputilaan päästiin, on tietokonepohjainen simulointi paljon helpompi ratkaisu. Simulointimalli ratkaisee järjestelmää kuvaavia differentiaaliyhtälöitä numeerisesti. Malli lähtee alkutilasta ja päättyy lopputilaan selvittämällä kaikki järjestelmän välivaiheet.

Simuloinnin toteuttamiseksi tarvitaan lähtötietoja. Järjestelmän alkuarvot on helppo määrittää, koska ne saa valita testijärjestelmälle melko vapaasti. Järjestelmää kuvaavat yhtälöt liitettiin simulointimalliin. Järjestelmän syötteet valittiin simulointeihin haluttujen testisykliin mukaan. Järjestelmän parametrien numeroarvot olivat hankalimmat lähtötiedot määrittää. Paljon arvoja jouduttiin arvioimaan, ja mallia ei voinut vielä todentaa, joten malli pidettiin mahdollisimman yksinkertaisena ja luotettavana. Tuloksien haluttiin olevan myös mahdollisimman luotettavia, jotta niillä voitaisiin todentaa laskelmia ja mitoitusta, kokeilla erilaisia komponentteja sekä tarkastella testisyklejä.

Simuloimalla saadaan vain suuntaa antavaa tietoa ja pahimmillaan täysin väärää tietoa. Malli voi antaa virheellisiä tuloksia jos malli on virheellinen, parametrien arvot ovat väärin tai mallilla testataan asioita mallin pätevyysalueen ulkopuolelta. [22]

4.6.1. Simulointimalli

Testilaitteiston hydraulijärjestelmästä tehtiin simulointimalli, kuva 4.8. Simulointimallilla pystyttiin hahmottelemaan akkuryhmältä toiselle siirtyvää nestetilavuutta ja testaamaan virransäätöventtiileiden ohjausta.



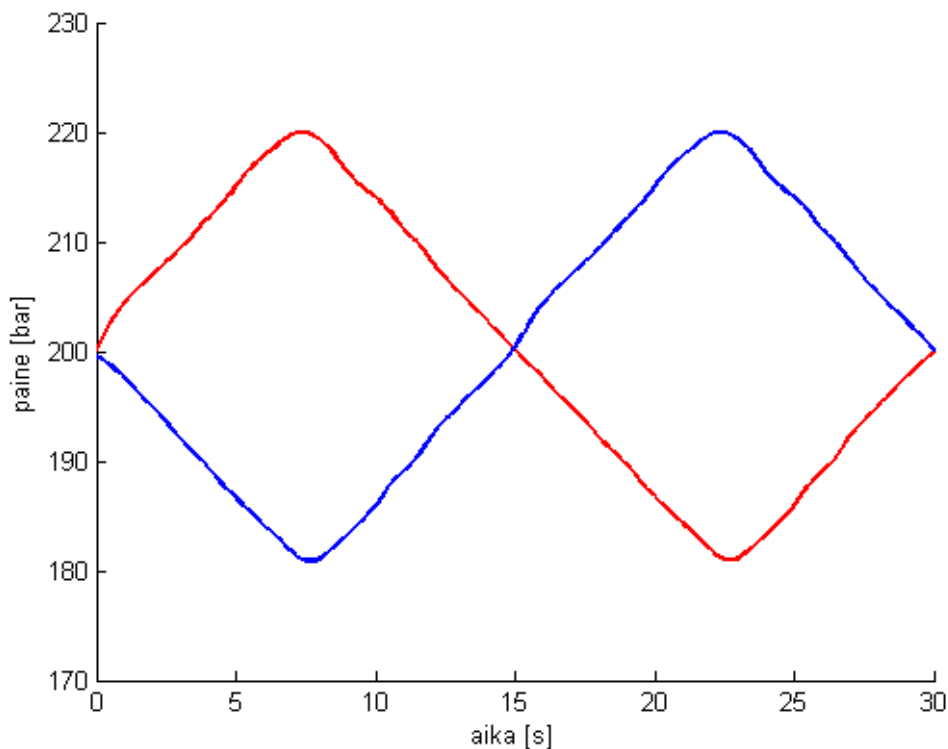
Kuva 4.8. Simulointimallin ylin taso.

Simulointimalli on pyritty pitämään mahdollisimman yksinkertaisena. Pumpun ja apuakun tuotto on yhdistetty yhteen inputtiin, jonka arvo määritetään parametritiedostossa. Paluulinjassa on oletettu olevan vakiona pysyvä minimaalinen paine.

Proportionaaliventtiileistä on tehty omat alimallinsa. Venttiileitä ohjaa säädön alimalli. Sääto saa lähtöarvoiksi mäntäakun männän aseman, josta riippuvainen akussa oleva nestetilavuus on. Akkuryhmät on mallinnettu omina alimalleinaan. Akkuryhmiin on tarkoitus asentaa vain yhdenlaisia akkuja, joten akkuryhmien alimalleissa akut oletetaan identtisiksi.

4.6.2. Simulointi

Simulointimalliin annettiin lähtöarvoja, joilla pyrittiin simuloimaan testisyklejä. Mallissa testisyklien erilaisuus näkyy lähinnä eroina ohjauksessa. Mallin antamista tuloksista ei löytynyt ongelmia mallin tai järjestelmän suhteen, kunhan pumppujen tuotto ja venttiileiden ohjaus oli sopivasti asetettu. Nestetilavuutta pystyttiin ohjaamaan akuilta toisille ja virtausta pystyttiin kuristamaan proportionaaliventtiilillä. Kuvaaja paineiden käyttäytymisestä ajan funktiona energiateollisuuden testisykliin simuloinnissa on esitetty kuvassa 4.9.



Kuva 4.9. Simulointitulokset energiateollisuuden testisyklistä 2.

Testisykleistä energiateollisuuden testisykli 2 on hyvä esimerkki simuloinnin kannalta. Halutussa testisyklissä on kaksi akkuryhmää käytössä ja liikkeet ovat symmetrisiä. Virtauksia kuristamalla painekuvaajan muoto ja suuruus saatiin varsin hyvin halutunlaiseksi. Painevaihtelut tapahtuvat hieman epäsäännöllisesti, mutta tasaisesti.

Todellisessa testijärjestelmässä venttiileiden ohjaus on erittäin tärkeää testisykliä ajamisen kannalta. Sama näkyy myös simulointimallissa. Säätöä muuttamalla muuttuu järjestelmän toiminta voimakkaasti. Säädön avulla ohjataan venttiileiden kuristusreunoja, jotka ohjaavat akuille tulevaa ja akuilta lähtevää tilavuusvirtaa.

5. MITTAUSTULOSTEN TULKITSEMINEN

Mittaukset ovat tärkeä osa teollista liiketoimintaa ja sen merkitys on ollut jatkuvassa kasvussa. Mittaamalla voidaan hankkia tietoa lähes kaikista suureista joita halutaan tutkia. Mittaustulokset ovat tietoa joka on helppo tallentaa ja ottaa myöhemmin uudestaan käyttöön tarvittaessa. Erilaisia tuotteita tai ratkaisuita voi olla hankala verrata keskenään, mutta olennaisten ominaisuuksien mittaaminen ja vertailu yleensä onnistuu.

Olennaista mittauksissa ja testauksessa ei ole mittaaminen mittaamisen vuoksi. Tärkeää on ymmärtää mittaustuloksia ja osata tulkita niitä oikein. Esimerkiksi mittauksessa oleva systemaattinen virhe jää todennäköisesti havaitsematta, jos mittaja ei ymmärrä mittausta. Asiaan perehtynyt henkilö voi havaita testilaitteistossa olevia ongelmia tai huomata mittaustulosten poikkeavan odotuksista tai mittauksen kohteesta. Mittausta miettivä henkilö tulee myös ajatelleeksi mittauksen kohdetta melko kokonaisvaltaisesti, jos hän käy läpi mittauksien tarpeellisuuden ja hyödyllisyyden.

Kun ymmärtää mittaamista ja mittauksen kohteena olevaa kappaletta tai prosessia, pystyy päättämään mitä tietoa aiheesta tarvitaan ja miten sitä voi saada. Hyvä mittaus tai testi antaa hyödyllistä tietoa kohteen tärkeistä ominaisuuksista. Tulkitsemalla edellisen mittauksen tuloksia voi selvittää myös muita suureita, joista tarvitaan lisää tietoa. Jos kappaleen tai prosessin kannalta kriittisiä ominaisuuksia ei tiedetä, saattavat ne selvittää mittaamalla. Esimerkiksi paineistamalla hydrauliakku suurinta sallittua käyttöpainettaan suurempaan paineeseen saatetaan saada selville, mikä on akun paineenkestävyyden kannalta kriittisin kohta tai ominaisuus.

Mittauksista saatava tietoa voi tutkia yksityiskohtaisesti käymällä läpi tuloksia tai vertailemalla niitä muihin tuloksiin. Jos mittausdataa on paljon, voidaan sitä analysoida tilastollisesti. Tilastollinen tarkastelu vaatii paljon vertailukelpoista tietoa. Mittauksen luonne vaikuttaa tulosten hajontaan, mutta yleisesti tilastollinen tarkastelu vaatii vähintään kymmeniä mittaustuloksia.

5.1. Testilaitteiston tarkkuus

Mittaustarkkuus ja -epävarmuus liittyvät olennaisesti testaamiseen. Kaikkea epävarmuutta ei voida poistaa ja mittaustarkkuus ei ole ikinä täydellinen: mitään ei voi ikinä mitata äärettömän tarkasti. Olennaista mittaamisessa ja testaamisessa ei olekaan saada mahdollisimman tarkkoja tuloksia, vaan ymmärtää mitä pitää mitata, kuinka tarkkoja tuloksia tarvitaan, mitkä tekijät vaikuttavat mittausepävarmuuteen ja mitä mittaustulos kertoo kohteestaan.

Mittausvirheet jaetaan kolmeen luokkaan. Karkeat virheet ovat virheitä, jotka johtuvat inhimillisestä virheestä tai laitteiden virhetoiminnoista. Karkea virhe on yleensä helppo havaita ja se mitätöi mittauksen. Satunnaiset virheet aiheutuvat pienistä, toisistaan riippumattomista asioista, jotka aiheuttavat mittaustuloksiin vaihtelua. Satunnaisvirheet lähestyvät normaalijakaumaa kun mittauspisteitä lisätään. Systemaattinen virhe on mittauksessa toistuva eli järjestelmällinen virhe. Systemaattista virhettä ei voi pienentää mittauspisteitä lisäämällä, vaan sen vaikutus on aina samanlainen. Systemaattisen virheen suuruus voi vaihdella jos virhe muuttuu mittausravon mukana. [14]

Kun hydrauliakkuja testataan suuria määriä pitkällä aikavälillä, voidaan akkujen ominaisuuksia ja luotettavuutta tarkastella tilastollisesti. Satunnaisvirheet noudattavat normaalijakaumaa, joten runsaalla mittaussaineistolla voidaan akkujen ominaisuuksia tutkia suhteellisen tarkasti jos laitteiston mittaustarkkuus on kohtuullinen eikä mittauksissa ole systemaattista virhettä. Toistamalla samaa testisykliä saadaan akuista lukuisia mittauksia. Vertailtaessa akkuja toisiinsa tilastollinen tarkastelu edellyttäisi saman testin ajamista lukuisille akuille, mikä saattaa kestää kauan vaikka akkuja testattaisiin rinnakkain.

Testituloksia käytetään omaan tuotekehitykseen, laadunvalvontaan ja markkinointitietona. Tuotekehitys tarvitsee kohtalaisen tarkkoja tuloksia testeistä. Asiakkaille riittää testaustiedoksi yleensä paljon vähäisempi, jopa tieto siitä että ne on testattu. Akkujen elinkaaritestaus ei ole muutenkaan täysin tarkkaa ja hallittua toimintaa. Todellisessa käytössä akkujen rasitukset vaihtelevat paljon testiolosuhteita enemmän. Akut saattavat altistua monille vuodenaikojen vaihtelulle ja käyttökohteiden vaihdoille jne, joiden aikana akkujen koko toimintaympäristö muuttuu. Asiakas pohjaiset testisyklit noudattavat asiakkailta saatua käyttökokemusta melko hyvin, mutta ne ovat vain esimerkinomaisia syklejä, joihin akut saattavat joutua.

Jos hydrauliakkujen testituloksia verrataan laskennallisiin tuloksiin, niin eroja saattaa ilmetä. Akkujen käyttöön liittyy usein voimakasta epävarmuutta yksityiskohtaisesta toiminnasta. Akkujen tilanmuutosnopeutta tai sen vaikutusta ei usein tiedetä käytössä. Usein prosessi oletetaan isotermiseksi tai adiabaattiseksi, mutta todellisuudessa suurin osa prosesseista on polytrooppisia. Tilanmuutostavan arviointiin on useita summittaisia tapoja, mutta todellisuudessa muutosnopeuden vaikutukseen vaikuttavat esimerkiksi lämpötilaerot, akun koko ja muoto, pintamateriaali, akun sijainti jne.

Testilaitteiston mittaustarkkuuteen vaikuttaa moni asia. Yhdistetty mittaasepävarmuus saataisiin summaamalla epävarmuuskomponenttien varianssit. Yhdistetty mittaasepävarmuus määräytyy siis siten, että jokainen tekijä, jolla on suuri mittaasepävarmuus, vaikuttaa kokonaisepävarmuuteen erittäin voimakkaasti. Parantamalla epävarmimpien tekijöiden mittaamista voidaan kokonaisvarmuutta parantaa huomattavasti.

Mittausvälineet vaikuttavat mittauksen epävarmuuteen erittäin voimakkaasti. Normaalin anturin suurimmat epävarmuutta aiheuttavat tekijät ovat tuntoelimen

epälineaarisuus ja häiriöiden vaikutus. Ulkoisista häiriöistä merkittävimmät ovat lämpötilan muutos ja sähköiset häiriöt. Antureiden hystereesi vaikuttaa mittaustuloksiin vaihtelevasti. Hystereesi kuvaa mittaustulosten eroa, kun liikutaan mitta-alueella nousevaan tai laskevaan suuntaan. [14]

Tietokonepohjainen mittaus asettaa myös mittalaitteistolle vaatimuksia ja luo epävarmuutta. Muutettaessa analogista mittaustietoa digitaaliseen, diskreettiin muotoon katoaa osa tiedosta. Jos mittaustulokset tulevat pieninä bittimäärinä ja mitattavan suuren arvot vaihtelevat paljon, saattaa A/D-muunnoksessa tulla merkittäviä pyöristysvirheitä.

Hydraulijärjestelmän dynaamiseen käyttäytymiseen vaikuttaa erittäin voimakkaasti järjestelmän joustot. Hydraulijärjestelmä voidaan staattisissa laskuissa olettaa kohtalaisella tarkkuudella jäykäksi, mutta dynaamisissa tilanteissa joustojen vaikutus näkyy selvästi. Kaikki komponentit joustavat vähän, mutta toisten komponenttien jousto on selvästi suurempaa kuin toisten. Hydrauliletkuilla on selvästi muita komponentteja pienempi puristuskerroin, eli letku laajenee, kun paine nousee. Hydraulineeste joustaa myös jonkin verran paineen vaikutuksesta. Hydraulineesteessä ei ole normaalisti kovin paljoa liukenemattomia kaasuja. Liukenemattomat kaasut lisäävät nesteen joustoa erittäin paljon. Järjestelmän muiden osien jousto vaikeuttaa akkujen testaamista, varsinkin jos akkujen tilavuutta haluttaisiin muuttaa nopeasti. Apuakun ominaisuudet vaikuttavat myös testituloksiin. Apuakku voidaan huoltaa pitkän testin aikana tai akku voidaan vaihtaa toiseen. Pumpulta ja apuakulta tulevaa virtausta kuristava proportionaaliventtiili teoriassa poistaa apuakun vaikutuksen testituloksiin. Proportionaaliventtiiliä ei voida kuitenkaan ohjata ideaalisesti, jolloin testiakulle tuleva tilavuusvirta voi vaihdella hieman tavoitteesta.

Testilaitteisto sijaitsee sisätiloissa, joissa ympäristön lämpötila pysyy melko vakaana. Ulkolämpötila vaikuttaa joihinkin mittaustuloksiin. Esimerkiksi kaasun esitäyttöpaine on erittäin tärkeä arvo mittausten kannalta. Esitäyttöpaine vaihtelee kuitenkin kaasun lämpötilan vaihdellessa.

5.2. Mittaustulosten analysointi

Testilaitteistolla mitataan hydrauliakkujen kaasupuolen painetta ja lämpötilaa, nestepuolen painetta ja lämpötilaa, öljyn puhtautta ja välillä akuilta poistuvaa tilavuutta. Männän asemaa voidaan mitata myös suoraan. Männän aseman mittaaminen vaatii kuitenkin erityisiä järjestelyjä.

Akkujen kaasupuolen lämpötila vaihtelee lämpöaallon liikkua akussa. Mittaustarkkuuden rajoissa lämpötilan muutoksista voidaan päätellä lämpöaallon nopeus, lämpötilaerot ja kuinka kauan kestää lämpötilan tasaantuminen kaasupuolella. Verrattaessa kaasutilan lämpötilaa ympäristön lämpötilaan, nestepuolen lämpötilaan ja akun pinnan lämpötilaan voidaan kokeellisesti määrittää lämmön johtumisnopeuksia akuissa.

Kaasupuolen painetta mittaamalla voidaan määrittää männän liikeherkkyys tarkkailemalla millä paine-eron arvolla mäntä lähtee liikkeelle paine-eron kasvaessa männän yli. Jos akkua kuormitetaan nopeataajuuksisella paineallolla, mäntä ei välttämättä ehdi reagoida paineen muutoksiin. Mittaamalla kaasupuolen painetta voidaan selvittää miten mäntä reagoi.

Öljyn puhtautta mittaamalla saadaan selville miten järjestelmän puhtaustaso vaihtelee testisykliä aikana. Tietyn työvaiheen jälkeinen poistovirtauksen likaisuus ei ole helposti jäljitettävissä yksittäiseen komponenttiin. Mittaamalla hiukkaskaskurilla eri hiukkaskokoja määrien lisäksi, saadaan tietoa järjestelmän suodatuksen toimivuudesta ja puhtaustasosta. Eri suodatusta käyttämällä voidaan järjestää järjestelmään vaihtelevia hiukkasmääriä eri hiukkaskoilla. Vertaamalla hiukkasten määriä vaurioituneisiin akkuihin tai vaihtoa tarvitseviin tiivistimiin, saadaan tietoa akkujen kestosta erilaisia hiukkaskokoja vastaan.

Käyttämällä tilavuusmittaria mäntien sijaintien määrittämiseen voidaan selvittää kuinka paljon akuille menee milloinkin nestetilavuutta. Akkujen nestetilavuuden muutos ei riipu pelkästään paineista ja tilavuudesta, vaan myös tilanmuutoksen tyypistä. Mittaamalla tilavuuksia voidaan selvittää prosessien adiabaattisuutta tai isotermisyyttä.

5.3. Testitulosten hyödyntäminen

Testilaitteistolla pystytään tuottamaan monenlaista mittaustietoa mitä vaihtelevimmista tilanteista ja kuormituksista. Tähän lukuun on kerätty erilaisia tapoja hyödyntää testilaitteistoa tekemällä testejä tuotekehityksen tai asiakassuhteiden vuoksi. Suuri osa tuloksista saadaan normaaleista testisykleistä, mutta osa vaatii erityisiä testejä.

Komponenttien vikaantuminen aiheuttaa usein suuriakin kustannuksia ja niitä pyritään välttämään. Erityisen kallista komponenttien vikaantuminen on, jos vikaa ei päästä helposti korjaamaan. Tämä tilanne toteutuu esimerkiksi tuulivoimaloissa tai merellä. Vikaantunut komponentti vähintään heikentää järjestelmän toimintaa tai usein estää koko järjestelmän toiminnan. Vikaantuminen saattaa aiheuttaa jopa vaaratilanteita. Komponentteja pitää testata, jotta saadaan selville komponenttien kesto ja voidaan karsia vialliset kappaleet ennen myyntiä.

Asiakkaita kiinnostaa usein paineakkujen elinikä ja huollon tarve. Testilaitteistolla akuille voidaan ajaa kiihdytettyjä elinkaaritestejä ja siten selvittää asiakkaiden haluamia tietoja. Mäntäakut kestävät pitkään ja huollon osuus kokonaiskustannuksista saattaa olla suuri. Valmiilla tiedoilla huoltoväleistä voidaan elinkaaren kokonaiskustannuksia laskea etukäteen ja mitoittaa huollot ennalta. Huoltokustannukset ovat joissain sovelluksissa suuret ja ennakoimattomat huoltokatkot voivat maksaa todella paljon. Monet mäntäakun ostajat ovat tietoisia mäntäakkujen matalista elinkaarikustannuksista ja ovat kiinnostuneita huoltotarpeesta.

Mittaamalla öljyn puhtautta ja erikokoisten hiukkasten määrää voidaan laskea myös kuinka kauan akku kestää missäkin järjestelmässä ilman huoltoa. Keräämällä

mittaustietoa öljyn epäpuhtauksien vaikutuksesta tiivistimien kestoon voidaan myös öljyn puhtaudelle esittää suosituksia akkujen kannalta. Tiivistimen vaihtotarpeesta ennakoi myös esitäyttöpaineen lasku. Ajamalla testeissä akkuja yli suositeltavien tiivistimien vaihtovälien voidaan myös tarkkailla esitäyttöpaineen muutoksen suhdetta tiivistimen vaihtotarpeeseen.

Mäntäakkujen huonoihin puoliin luetaan männän ja sylinterin väliset kitkat, jotka aiheuttavat häviöitä. Muhin hydraulijärjestelmän häviöihin verrattuna männän kitka on aika pieni. Liikuttamalla mäntää tasaisella liikenopeudella nähdään paine-eroa kitkavoiman suuruus. Männän kitka on riippuvainen tiivistimestä, joten testillä voidaan verrata erilaisia tiivistinvaihtoehtoja. Tiivistimien kestoa voidaan myös tutkia ajamalla elinkaaritestejä. Hydrauliakuissa tulee muita häviöitä kaasun sisäisistä häviöistä. Testaamalla voidaan selvittää kuinka paljon mäntäakuissa kuluu tehoa kitkavoimiin ja kuinka suuri osuus se on akun häviöistä. Mittaamalla akkujen häviöitä voidaan määrittää myös akkujen hyötysuhteet.

Eri hydrauliakutyyppejä voidaan testata samalla laitteistolla. Testaamalla mäntä- rakko- ja kalvoakkuja rinnan tai peräkkäin saadaan vertailukelpoista tietoa akkujen ominaisuuksista. Ominaisuuksia vertailemalla ja ajamalla pidempiä testejä voidaan perustella myös eri akkutyypin paremmuutta tietyissä sovelluskohteissa tai käyttötarkoituksissa.

Männän liikeherkkyys ja mäntäakun kyky vaimentaa nopeaa sykintää ovat erittäin tärkeitä ominaisuuksia, joita voidaan selvittää. Näissä ominaisuuksissa mäntäakku on selvästi rakko- ja kalvoakku heikompi. Liikeherkkyys selviää mittaamalla paine-eroa, jolla mäntä lähtee liikkeelle. Värähtelyn vaimennuskyky on riippuvainen siitä kuinka nopeataajuuksiseen värähtelyyn mäntä ehtii reagoida. Testaamalla voidaan selvittää kuinka suuria eroja akkujen välillä on. Mäntäakkujen ominaisuuksia voidaan myös kehittää ja mitata testilaitteistolla. Männän liikettä mitatessa voidaan tutkia myös stick-slip -ilmiötä, joka esiintyy hitailla liikenopeuksilla kun mäntä vuorotellen tarttuu paikalleen ja nytkähtää eteenpäin.

Mäntäakulta saatava tilavuusvirta on selvästi suurempi kuin mitä rakkoakuilta voidaan ottaa. Testilaitteistolla pystytään selvittämään akkujen todellisia tilavuusvirtoja. Jos kohteisiin halutaan erityisen suurta tilavuusvirtaa, mahdollistaa testaaminen sopivan akun valitsemisen tai kehittämisen.

Pitotesteillä voidaan testata akkujen kykyä säilyttää paine ja esitäyttöpaine. Hieman kaasua karkaa kaikista akuista pitkän ajan kuluessa. Pitotesteillä voidaan vertailla erilaisten akkujen esitäyttöpaineen karkaamisen nopeutta. Pitotestillä voidaan kokeilla myös erilaisten tiivistimien vaikutusta esitäyttöpaineen säilymiseen.

Vaahtouttamalla säiliön paluuvirtausta voitaisiin testata öljyyn liukenemattoman kaasun vaikutusta akkujen toimintaan. Öljyyn liukenematon kaasu kuitenkin aiheuttaa kavitaatioa, vahingoittaa komponenttija ja vanhentaa öljyä. Normaaleissa testeissä kaasu on poistunut öljystä säiliössä ennen öljyn ajamista järjestelmään.

Tilanmuutostapaa kuvaavat käyrästöt on luotu kokeellisten arvojen pohjalta. Mittaamalla kaasun painetta ja lämpötilaa voidaan testilaitteistolla määrittää omat

käyrästöt. Itse suoritetuilla testeillä voidaan selvittää nopeuksia, joilla lämmöt siirtyvät ja tehohäviöitä, jotka kaasussa muodostuvat. Kaasun ominaisuuksia voidaan verrata myös ideaalikaasun ominaisuuksiin halutuilla painetasoilla. Akkujen täyttämiseen käytetyn kaasun ominaisuuksia voidaan selvittää, esimerkiksi typen puhtauden vaikutusta akkujen käyttäytymiseen.

Paineakun rakenteen kesto voidaan testata esimerkiksi standardin mukaisella väsymistestillä. Suurille painetasoille tarkoitettut akut kestävät todennäköisesti suurimmatkin järjestelmän paineet. Pienemmille paineille tarkoitettut akut voidaan kuitenkin laittaa paineisiin, jotka aiheuttavat plastisia muodonmuutoksia. Rakenteen kesto koettelemalla voidaan selvittää miten akkujen mahdollinen vaurioituminen tapahtuu ja mitkä kohdat akussa ovat keston kannalta kriittisimpiä.

Kun testilaitteisto on siirrettävä, voidaan sillä suorittaa pakkastestejä. Akkuja käytetään myös arktisissa olosuhteissa esimerkiksi metsäkoneissa, tuulivoimaloissa ja offshore-teollisuudessa, joten on erittäin tärkeää tietää miten akku käyttäytyy äärimmäisissä käyttöolosuhteissa. Pakkastesteillä voidaan määrittää akkutyypeille matalimpia käyttölämpötiloja, tutkia komponenttien ja rakenteiden kestävyyttä ja soveltuvuutta, tarkastella akkujen käyttäytymistä ja vertailla erilaisia hydraulinesteitä laajalla lämpötila-alueella.

Normaalisti hydraulijärjestelmä pyrkii pitämään itsensä sopivalla lämpötila-alueella. Kuumassa tilassa tai aktiivisessa käytössä hydraulineste kuljettaa lämpöä pois komponenteilta ja lämpöenergia siirtyy hydraulinesteestä ympäristöön jäähdyttimen ja öljysäiliön seinien kautta. Kylmää järjestelmää käytettäessä kitkat nostavat komponenttien ja hydraulinesteen lämpötilaa ja hydraulineste kuljettaa lämpöenergiaa kuumemmilta komponenteilta ja mahdolliselta lämmittimeltä kylmemmille komponenteille. Akut toimivat vaihtelevissa tehtävissä hydraulijärjestelmissä ja vaikka hydraulijärjestelmä olisi muuten aktiivisessa käytössä, saattaa akku pysyä lähes liikkumattomana pitkiäkin aikoja. Akun ollessa liikkumattomana lähestyy sen lämpötila ympäristön lämpötilaa, jolloin mäntäakun ja sen tiivistimien lämpötila saattaa olla erittäin matala. Kylmätesteillä voidaan selvittää akkujen käyttäytymistä matalissa lämpötiloissa.

Akkuvalmistajan pitäisi päästä selvittämään osien ominaisuuksia ja vertailemaan niitä keskenään. Tärkeimpiä komponentteja on esimerkiksi männäntiivistin, josta ilman testaamista ei tiedetä kuin valmistajan ilmoittamat arvot. Männäntiivistin on tärkeä komponentti; sen tiiveys vaikuttaa typen säilyvyyteen kaasupuolella, liukuominaisuudet vaikuttavat hyötysuhteeseen ja männän liikeherkkyyteen ja kestävyys vaikuttaa akun kestävyys ja huoltoväliin.

Tallennetuille testituloksille voidaan tehdä analyyskejä. Analyysien perusteella voidaan kehittää akkuja. Testitulokset parantavat myös omaa tuotetietoutta, antavat pohjaa asiakkaiden kysymyksiin vastaamiseen, osoittaa ongelmia ja kehityskohteita sekä tuottaa mahdollista markkinointimateriaalia.

6. TULOSTEN TARKASTELU JA JATKOKEHITYSMÄHDOLLISUUDET

Tämän työn tärkein tavoite oli selvittää minkälaisen testilaitteiston Hydroll tarvitsee paineakkujen testaamiseen ja tehdä tarjouspyyntö lähetettäväksi potentiaalisille testilaitteiston toimittajille. Lisäksi haluttiin selvittää mitä tietoja asiakkaat haluavat akuista tilaamista varten ja minkälaisia ominaisuuksia asiakkaat arvostavat.

Työn tekeminen aloitettiin tutustumalla yritykseen, tuotantoon ja tuotteisiin. Kun työtä varten oli saatu pohjatietoja omasta yrityksestä, selvitettiin asiakkaita ja yhteistyökumppaneita joista voisi olla apua työn kanssa. Yhteistyökumppaneita ja asiakkaita käytiin tapaamassa tai heihin oltiin muuten yhteydessä.

Asiakkailta pyrittiin selvittämään akkujen käyttötapoja ja -oloja. Hydrollin akkuja käytetään lukuisissa eri sovelluksissa ja erilaisia käyttötilanteita on valtava määrä. Asiakkailta saatiin tietoa akkujen käytöstä suhteellisen hyvin ja yksityiskohtaisesti, mutta hieman suppeasti. Haastatteluissa käytiin läpi akkujen kannalta rankimpia käyttäjiä. Testisyklit kehitettiin asiakkaiden todellisten käyttöolosuhteiden mukaan, jotta akkuja voitaisiin rasittaa ja kehittää todellisen tarpeen mukaan.

Yrityksessä on ollut jo pitkään tavoitteena hankkia testuslaitteisto hydrauliakuille, joten laitteesta oli valmiina ajatuksia. Muun henkilöstön kanssa käytiin läpi ominaisuuksia, joita laitteistolta haluttiin ja mahdollisia toteutuksia.

Testilaitteiston on tarkoitus tulla pääasiallisesti tuotekehityksen käyttöön. Tuotekehityksen tarpeista tärkeimpiä olivat uusien rakenteiden ja materiaalien testaus sekä akkujen kestotestaus. Muita haluttuja testauskohteita olivat mm. liikeherkkyyden tutkiminen, akkujen vertailu, paineiskujen vaimentaminen ja kaasun ominaisuuksien mittaaminen.

Testaustarpeen selvityksen jälkeen päästiin suunnittelemaan itse testilaitteistoa. Testilaitteistosta tehtiin alustava suunnitelma, joka liitettiin tarjouspyyntöön, liite 2. Tarjouspyyntöön määriteltiin vaatimukset testuslaitteistolle ja muut vaatimukset toimitukselle.

Erittäin korkeita paineita kestävien proportionaaliventtiileiden rajallisen kaupallisen saatavuuden johdosta osa potentiaalisista laitteiston toimittajista ilmoitti testilaitteiston toimittamisen muodostuvan kalliiksi tai jopa mahdottomaksi. Suurimpien painetasojen ollessa 420 bar halutuille testisykleille ruvettiin testilaitteiston hankkimisessa neuvottelemaan myös mahdollisesti matalammista painetasoista. Painetasoille 420 bar on kaupallisesti saatavilla proportionaaliventtiileitä, joten lopullisen testilaitteiston korkein käyttöpainne saatetaan laskea 420 bariin. Painetason

laskeminen ei haittaisi nykyisten testisykliä ajamista. Uudet akkumallit tulevat kuitenkin toimimaan nykyisiä akkumalleja korkeammilla painetasoilla, joten uusien akkujen testaaminen käyttötilanteiden äärirajoilla voi olla hankalaa tai mahdotonta. Painetason lasku estäisi myös testilaitteen käytön useiden akkujen rakennetestien suorittamiseen.

Testilaitteistolla pystytään ajamaan runsaasti erilaisia testisyklejä ja yksittäisiä testejä erilaisille akuille. Akkujen kykyä vaimentaa tai kestää paineiskuja laitteistolla on vaikea testata, mutta kaikki muut alun perin testauslaitteistolta halutut testit pystytään suorittamaan.

Paineisku syntyy hydraulijärjestelmässä normaalisti kun venttiili suljetaan nopeasti tai toimilaitteeseen kohdistuu iskumainen kuormitus. Testilaitteistossa ei ole kuormitettavia toimilaitteita. Testilaitteistossa on akkujen yhteydessä on/off-venttiileitä, joita sulkemalla voidaan tehdä järjestelmään paineiskuja. Testijärjestelmän painetaso on niin korkea, että jos paineiskuja tehdään matalammasta järjestelmän paineesta, niin komponenttien ei pitäisi vahingoittua. On/off-venttiileitä ei valittu kuitenkaan erityisen nopeiksi tai kestäviksi. Paineiskun vaikutus on sitä suurempi, mitä lähempänä komponentti on paineiskun syntypaikkaa. On/off-venttiilit ovat lähellä akkuja, joten suuren tilavuusvirran kulkiessa venttiilin läpi pitäisi syntyä akulle kohtalainen paineisku venttiilin sulkeutuessa. Paineiskun aiheuttama suurin mahdollinen paineen nousu voidaan laskea kaavalla (11). Paineiskun suuruuden määrittämistä varten pitää ensin kaavalla (10) laskea paineaallon etenemisnopeus.

$$c = \sqrt{\frac{B_e}{\rho}} \quad (10)$$

Jossa c on paineaallon etenemisnopeus [m/s], B_e on tehollinen puristuskerroin [Pa] ja ρ on nesteen tiheys [kg/m^3].

$$\Delta p_{max} = \rho c v \quad (11)$$

Jossa Δp_{max} on suurin paineisku ja v on nesteen nopeus [m/s] ennen venttiilin sulkemista.

Öljyn tiheyden ollessa 900 kg/m^3 , virtausnopeuden ollessa 6 m/s ja järjestelmän tehollisen puristuskertoimen ollessa 1500 MPa venttiilin äkillinen sulkeminen nostaa järjestelmän painetta 70 bar . Liittämällä järjestelmään paineakun voidaan tutkia paineakun kykyä vaimentaa paineiskua.

Paineiskujen tuottamista ei huomioitu laitteiston suunnittelussa, koska laitteistosta haluttiin mahdollisimman kestävä ja luotettava. Paineiskut nostavat järjestelmän paineen hetkellisesti ja ainakin paikallisesti erittäin korkeaksi. Komponentteja ei ole mitoitettu kestävään jatkuvaa iskumaista kuormitusta. Iskut

kuormittavat komponentteja ja järjestelmään irtoaa epäpuhtauksia heikentäen järjestelmän kestoja ja lisäten huollon tarvetta.

Jos paineiskuja halutaan erikseen tutkia, voidaan testijärjestelmään liittää myöhemmin osia tai tehdä testejä toisessa järjestelmässä. Paineiskun tuottamiseen ei tarvita kuin virtauskanavan äkillinen sulkeminen venttiilillä tai toimilaitteeseen kohdistuva iskumainen voima. Toimilaitteella tehtävästä paineiskusta voidaan tehdä erittäin voimakas ja tilanne vastaisi esimerkiksi liikkuvien työkoneiden käytössä syntyviä paineiskuja hyvin. Toimilaitteena voi toimia esimerkiksi hydraulisylinteri jota ajetaan vaimentamattomana päätyyn tai jotakin estettä päin.

Testilaitteiston todellista tarkoituksenmukaisuutta ja hyvyyttä voidaan arvioida vasta, kun sitä on käytetty jonkin aikaa. Edellisen testilaitteiston puuttuminen on kerryttänyt yritykseen testaustarvetta. Kun testaustuloksia saadaan, tulee todennäköisesti esiin myös uusia tarpeita jatkotestaukselle. Testilaitteistoon on mahdollista liittää uusia antureita tai ominaisuuksia. Uusia testisyklejä ja mittauksia voi kuitenkin asentaa vain tämän testilaitteiston asettamissa rajoissa.

7. YHTEENVETO

Tämän työn tarkoituksena oli selvittää millaisen testilaitteiston Hydroll Oy tarvitsee hydrauliakkujen dynaamiseen testaamiseen ja tehdä suunnitelma järjestelmästä, minkä perusteella testilaitteiston potentiaaliset toimittajat voivat vastata tarjouspyyntöön. Tarjouspyyntö tehtiin ennen työn valmistumista ja se lähetettiin valituille järjestelmätoimittajille.

Testijärjestelmälle tehtiin työn alkuvaiheessa vaatimusmäärittely, jota tarkennettiin ja oikaistiin tarvittaessa myöhemmin. Vaatimusmäärittelyä varten kerättiin tietoa ja mielipiteitä muulta henkilöstöltä, asiakkailta ja yhteistyökumppaneilta. Testijärjestelmän suunnittelemista varten selvitettiin millaisia tarpeita testilaitteistolle on suoraan Hydrollin omassa liiketoiminnassa ja millaista tietoa testilaitteistolta pitäisi saada asiakkaita varten. Osa testaustarpeista oli ehdottomia testilaitteistolle. Lisäksi oli useita asioita, joiden mittaaminen ja testaaminen koettiin hyödylliseksi, muttei millään tavalla välttämättömäksi.

Asiakkailta saatujen akkujen rasitustietojen perusteella luotiin testilaitteistolle valmiiksi edustavia testisyklejä, joilla voidaan tutkia akkujen käyttäytymistä ja kestoja todellista käyttötilannetta vastaavissa olosuhteissa. Testisyklejä voitiin käyttää raja-arvoina testilaitteiston suunnittelulle. Hydraulijärjestelmän suunnittelussa käytettiin lähtötietoina osittain asiakaslähtöisiä rasitustietoja ja osittain pyrittiin arvioimaan mahdollista tulevaa tarvetta järjestelmän käytölle.

Järjestelmän toimintakuvaukseen selitettiin miten ohjauslogiikan pitäisi toimia järjestelmän eri tilanteissa. Ohjauslogiikan suunnittelu ei sisällytynyt tähän työhön. Järjestelmän suunnittelussa mitoitettiin komponentit, mutta jätettiin valitsematta varsinaiset tuotteet, jolloin järjestelmän toimittajalle jäi vapaus käyttää omia tuotteitaan. Lopullisten komponenttivalintojen puuttuessa järjestelmän tarkistuslaskentaa ei voitu tehdä, vaan se jäi toimittajan tehtäväksi.

Hydroll Oy toimii komponenttivalmistajana. Asiakkaat tilaavat hydrauliakkuja omien näkemystensä mukaan. Tuotteiden sopivuus asiakkaalle riippuu pitkälti asiakkaan käyttöolosuhteista, mutta tieto akkujen suoriutumisesta ja käyttöolosuhteista, joihin akut joutuvat, ei päädy takaisin Hydrollille. Osa tästä työstä saatavasta hyödystä on selvitys asiakkaiden tarpeista ja akkujen käytöstä loppukäyttäjällä. Työn aikana selvitettiin myös millaisista tiedoista asiakkaat ovat kiinnostuneita akkuja valitessaan ja tilatessaan.

Hydrauliakkujen mittaamiseen liittyy monia suureita ja tekijöitä. Työssä käytiin läpi laitteiston toimintaan liittyvää mittausepävarmuutta ja tulosten luotettavuutta. Testitulosten hyödyntämistä ja soveltamisesta käsiteltiin erikseen. Akuille tehtävät testit

vaihtelevat monella tapaa. Testitulosten hyödyntämistä eriteltiin käymällä läpi testejä ja niistä saatavia mittaustuloksia sekä mittaustulosten tulkitsemista. Työhön ei kuulunut testilaitteiston käyttöönotto eikä laitteistolla suoritettavia testejä.

Hydrollilla on ollut testilaitteistolle tarve jo pitkään ja tarve on voimistunut ajan kanssa. Tämä testilaitteisto tulee ensimmäiseksi ja yksittäiseksi akkujen dynaamiseen testaukseen tarkoitetuksi laitteeksi yritykseen. Todennäköisesti aktiivisen testitoiminnan käynnistyttyä selviää uusia asioita, joita akuista halutaan tutkia. Osa uusista testauksista on todennäköisesti tehtävissä testilaitteella, mutta osan suorittaminen saattaisi vaatia laitteiston muokkaamista. Testilaitteeseen on mahdollista tehdä muutoksia ja lisäyksiä uusien testaustarpeiden paljastuessa. Laitteistosta saatava hyöty selviää vasta asteittain aktiivisen testaustoiminnan käynnistyttyä ja tietojen kertyessä hydraulikuista.

LÄHTEET

- [1] Lampinen, M. 2010. Termodynamiikan perusteet. 5. Painos. Helsinki, Hakapaino Oy. 182 s.
- [2] Kauranne, H., Kajaste, J. & Vilenius, M. 2004. Hydraulitekniiikan perusteet. 5. Painos. Vantaa, Dark Oy. 354 s.
- [3] Painelaitedirektiivi 97/23/EY. 1997. 60 s.
- [4] SFS-EN 14359. 2006. Gas-loaded accumulators for fluid power applications. Helsinki, Suomen standardoimisliitto. 100 s.
- [5] Prospero Oy. 2010. Paineakut. [WWW]. Viitattu 28.5.2012. Saatavissa: http://www.prospero.fi/bollhoff_pdf/0701_paineakut.pdf
- [6] Lappeenrannan teknillinen yliopisto. 2011. Hydraulitekniiikka. [Verkojulkaisu]. 17 s. Viitattu 28.5.2012. Saatavissa: <https://noppa.lut.fi/noppa/opintojakso/bk60a0100/luennot>
- [7] Epoll. Advantages of the piston accumulator. [WWW]. Viitattu 9.2.2012. Saatavissa: <http://www.epeitaliana.it/ENG/pdf/02.pdf>
- [8] Hydroll Oy. 2012. Selection of hydraulic accumulator. Sisäinen koulutusmateriaali. 7 s.
- [9] ParkerHannifincorporation. 2009. When to use a piston or bladder accumulator. White paper. 4 s.
- [10] Hydroll Oy. 2012. HPD-sarja. [WWW]. Viitattu 28.5.2012. Saatavissa: <http://www.hydroll.com/fin/hpd22fin.htm>
- [11] Seppänen, R., Parkkila, I., Karkela, L., Meriläinen, P., Kervinen, M. 2005. MAOL-taulukkokirja. 2005. 167 s.
- [12] Wikipedia. Nitrogen. [WWW]. Viitattu 15.5.2012. Saatavissa: <http://en.wikipedia.org/wiki/Nitrogen>
- [13] Wikipedia. Äänen nopeus. [WWW]. Viitattu 15.5.2012. Saatavissa: http://fi.wikipedia.org/wiki/%C3%84%C3%A4nen_nopeus
- [14] Ellman, A. 2002. Hydrauliiikan ja koneautomaation mittaukset. [Opetusmoniste]. Tampere. 134 s.
- [15] Elo, L. 2011. Kunnonvalvonnan mittauksista ja mittaamisesta. [Opetusmoniste]. Tampere. 24 s.

- [16] ISO 10771-1. 2002. Hydraulic fluid power – Fatigue pressure testing of metal pressure-containing envelopes – Part 1: Test method. Geneve, ISO copyright office.22 s.
- [17] SFS-EN 14359+A1. 2010. Gas-loaded accumulators for fluid power applications. Bryssel. 103 s.
- [18] Fonselius, J., Rinkinen, J. & Vilenius, M. 2008. Hydrauliiikka II. 3. painos. Tampere, Tampereen yliopistopaino.226 s.
- [19] PSK 6705. 2006. Teollisuushydraulijärjestelmän suunnittelu ja hankinta. Järjestelmän komponentit. 16 s.
- [20] PSK 6706. 2006. Teollisuushydraulijärjestelmän suunnittelu ja hankinta. Putkistot ja letkustot. 10 s.
- [21] PSK 6704. 2006. Teollisuushydraulijärjestelmän suunnittelu ja hankinta. Järjestelmän perussuunnittelu. 7 s.
- [22] Hydraulijärjestelmien mallinnus ja simulointi. 2011. [Opetusmoniste]. 20 s.

LIITE 1: HYDRAULIJÄRJESTELMÄN OSALUETTELO

Osaluettelo		
Osanumero	Komponentti	Lukumäärä
A1	Painelähetin (0 – 600 bar, 5 ms)	10
A2	Tilavuusmittari (16 l/min)	2
A4	Lämpötila-anturi (0 – 120 °C, 3 ms)	8
M1	Sähkömoottori (6 kW)	1
M2	Sähkömoottori (15 kW)	1
P1	Vakiotilavuuspumppu (10 cm ³)	1
P2	Säätötilavuuspumppu (20 cm ³)	1
S1	Säiliö (150 l)	1
S2	Jäähdytin (6 kW)	1
S3	Suodatin (10 µm)	1
S4	Hiukkaslaskuri	1
T1	Mäntäakku	1
T2	Testiakut	8
V1	Vastaventtiili	10
V2	Paineenrajoitusventtiili	4
V3	Jousikuormitettu vastaventtiili	2
V4	Sulkuventtiili	12
V5	2/2-suuntaventtiili	3
V6	Proportionaaliventtiili	1
V7	Proportionaaliventtiili	1
V8	2/2-suuntaventtiili	3

LIITE 2: TESTILAITTEISTON TARJOUSPYYNTÖ



Request for offer

Hydroll Oy is inquiring for a hydraulic test bench. Our need is for a test bench for cyclic testing of piston accumulators. A test bench shall be delivered at our factory in Lapua as a ready-to-use system, including control electronics and user interface. A test bench will run different test cycles for arbitrary time periods providing important information for our research and development and quality management purposes.

Design of the system is free as long as it meets our requirements. However below is schematic for a potential system.

At the end of this document there are test cycles that this test bench must be able to perform.

Correspondence

All correspondence related to this request for offer shall be addressed to Petri Virrankoski:

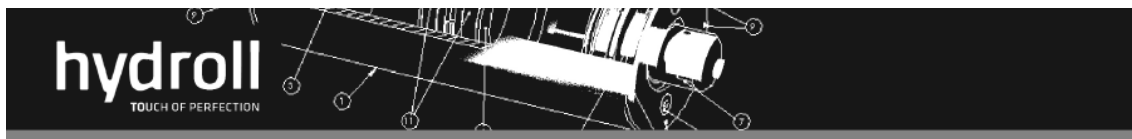
E-mail: petri.virrankoski@hydroll.com

Phone: +358 (0)40 553 2065

Quotation and attachments

Due date for submitting an offer is 18th June. An offer is to be sent via e-mail with all attachments. Documents must include:

- Schedule of delivery
- Budgeted cost
- Conditions of warranty
- Layout of the system
- Statistics (dimensions, weight, performance)
- Description of system's operation



Requirements for the test bench and delivery

Control

- Ready and easy to use interface for running test cycles
- Recording of all test information
- Ability to input new test cycles
- Autonomous operation after start

Documentation

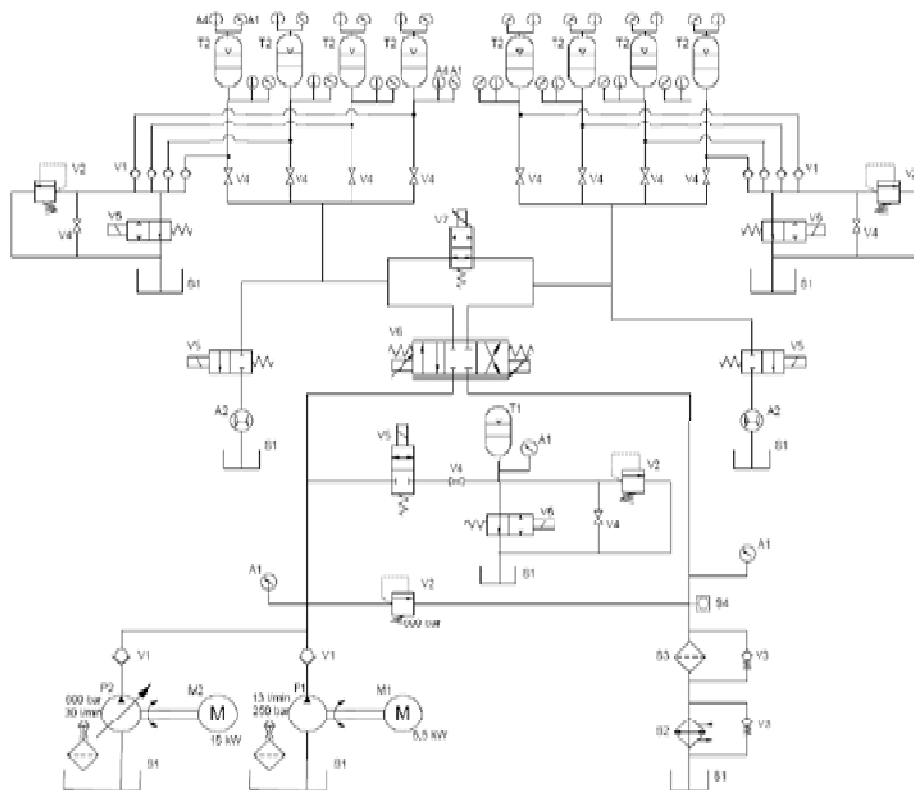
- Schematics of hydraulic systems, part list, operating manual, maintenance instructions, safety instructions, CE marking and risk analysis

Layout

- Preferably separate hydraulic power unit and test rig because test rig needs to be able to be put in an arctic test chamber (even at -40 Celsius)
- Movable by forklift or by wheels
- Adjustable angle for accumulators to be tested in

Delivery

- Shipment
- Start-up training



Example diagram of the hydraulic system



Part list		
Part number	Component	Quantity
A1	Pressure sensor	10
A2	Volume meter	2
A4	Thermometer	8
M1	Electric motor	1
M2	Electric motor	1
P1	Fixed displacement pump	1
P2	Variable displacement pump	1
S1	Reservoir	1
S2	Cooler	1
S3	Filter	1
S4	Particle counter	1
T1	Piston accumulator	1
T2	Position for accumulator	8
V1	Non-return valve	10
V2	Pressure relief valve	4
V3	Non-return valve with spring	2
V4	Shut-off valve	12
V5	2/2-Directional control valve	6
V6	Proportional directional control valve	1
V7	Proportional directional control valve	1



Specifics of the components

- A1: Pressure range up to 600 bar. High frequency sample rate. At the schematics all connectors for pressure sensors are marked by a symbol of pressure sensor but only 10 pressure sensors are needed altogether.
- A2: Volume meter. Flow rate and pressure difference are not high priorities but accuracy of volume measurement is.
- A4: Thermometer capable of measuring fluid and gas temperatures. High frequency sample rate. At the schematics all connectors for thermometers are marked by a symbol of thermometer but only 8 thermometers are needed altogether.
- M1: Electric motors of 5,5 kW with this layout
- M2: Electric motors of 15 kW with this layout
- P1: Fixed displacement pump for running low pressure tests. In this layout 13 l/min and 250 bar
- P2: Adjustable displacement pump for high pressure tests and additional displacement boost with P1. In this layout 600 bar and 30 l/min
- S1: Reservoir volume of at least 150 liters
- S2: Adjustable cooler or separate service circuit that activates according to the temperature of oil
- S4: Particle counter, preferably Parker
- T2: Connectors for accumulators. Number of accumulators to be tested varies between tests
- V2: Adjustable pressure relief valve. Set at 600 bar
- V5: 2/2-Directional control valve. For no leaking purposes on long hold tests use valves of poppet design.
- Hydraulic fluid: mineral oil with viscosity of 32 cSt



Specifics of the system

- All components must be reliable and safe
- All components must be able to withstand high pressure levels (600 bar)
- Components must operate at high efficiency and with minimal flexibility (minimal use of hoses)
- A test rig should also include an audio recorder of which data is recorded alongside data gathered by other sensors. A microphone is either to be in immediate proximity to accumulators or to be movable and attachable to a side of an accumulator.
- Accumulators are not to be included in order. Hydroll will provide accumulators.
- Largest accumulators to be tested have a capacity of 25 liters, length less than 2500 mm and diameter of 100... 230 mm. Highest weight of an accumulator to be tested is about 300 kg (when filled with hydraulic oil).
- Small accumulators do not need racks for testing as long as they can be connected to the test rig. Larger accumulators need to have racks to be tested in. A test bench must have at least 4 racks for larger accumulators (2 in both test groups).



Operation of the system

A fixed displacement pump (P1) is used for tests with lower pressure levels. An adjustable displacement pump (P2) is used for tests with high pressure levels. Both pumps can be used for achieving maximal flow rate.

Flow rate is usually uneven during tests so pump stores energy in accumulator (T1). Energy stored in accumulator (T1) can be transferred to accumulators being tested (T2) according to current test cycle.

Proportional control valve (V6) throttles flow to and from accumulators (T2) so desired test cycle can be achieved.

When running a symmetrical test cycle energy stored in accumulators can be transferred from an accumulator group to another via proportional control valve (V7). When testing accumulators in only one group all stored energy is released from accumulators and drained into a reservoir. With even numbers of accumulators used in two groups almost half of the energy stored in accumulators can be used to load accumulators in another group.

For both accumulator groups there are safety block consisting of a pressure relief valve (V2), a shut-off valve (V4) and a direction control valve (V5) which will release pressure from accumulators in case of emergency or blackout.

For both accumulator groups there are also a volume meter (A2). Volume meters should be able to be used to measure amount of oil reserved in accumulators when pressure is lowered below pre charge pressures of accumulators. Measuring oil amount is done at arbitrary time by user. Normally hydraulic oil returns to reservoir via control valve (V6) and control valve (V5) is activated only when user wants to measure oil released from accumulators.

Shut-off valves (V4) attached to accumulators (T2) act both for safety purpose and for separating accumulators from the system for a pressure hold tests.

Particle counter (S4) records quality of oil during use of the system.

Return filter (S3) filters particles from system. System is required to be clean for accumulators and proportional control valves to operate.

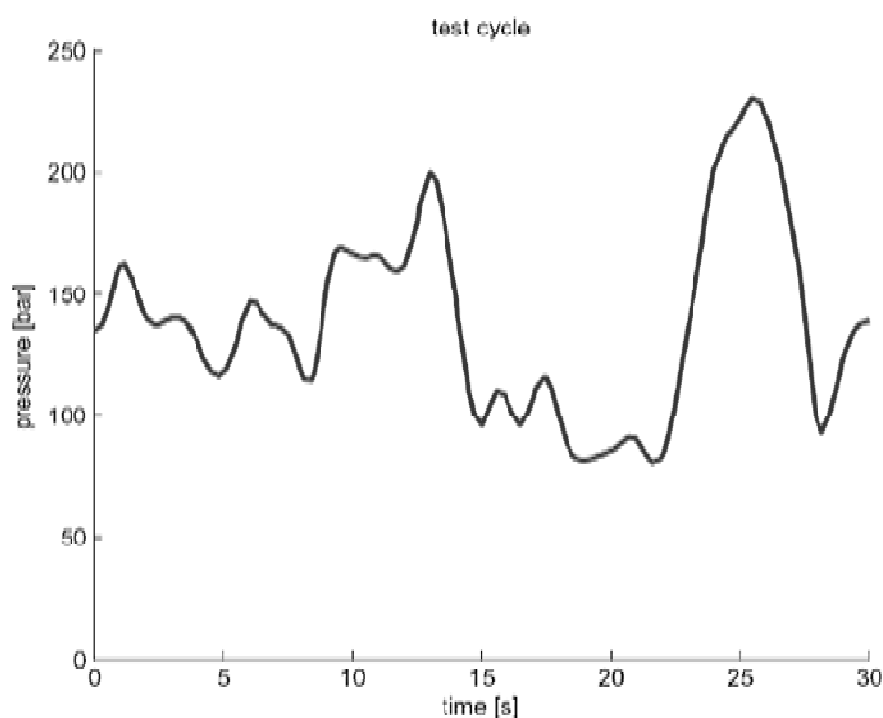
Cooler (S2) keeps oil temperature at wanted level during long cyclic testing.

Non return valves (S3) let oil past cooler and filter in case they are blocked.

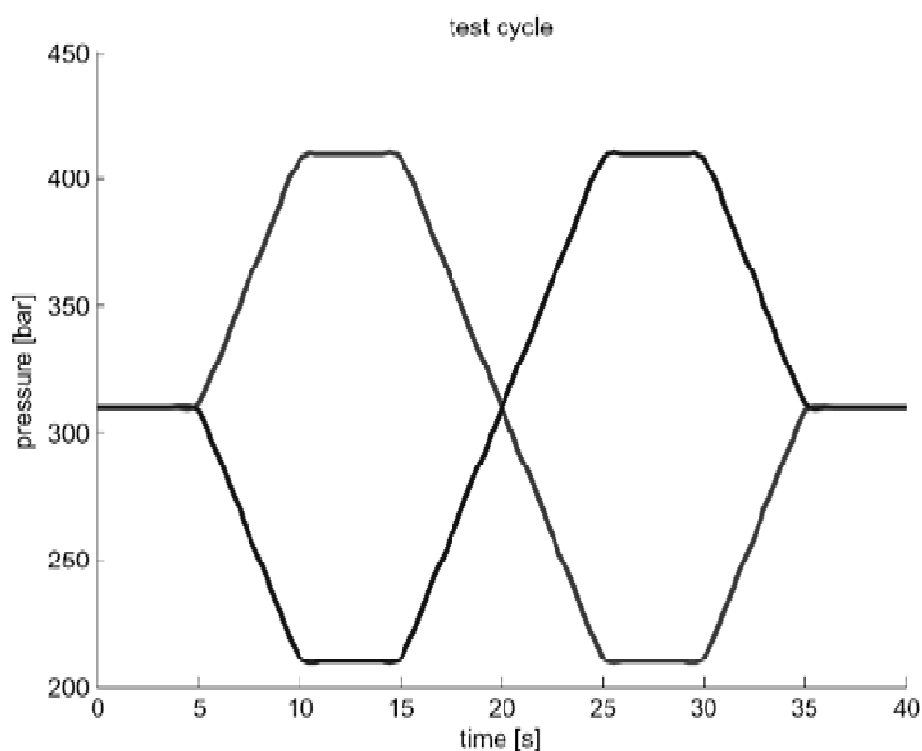


Test cycles for the test bench

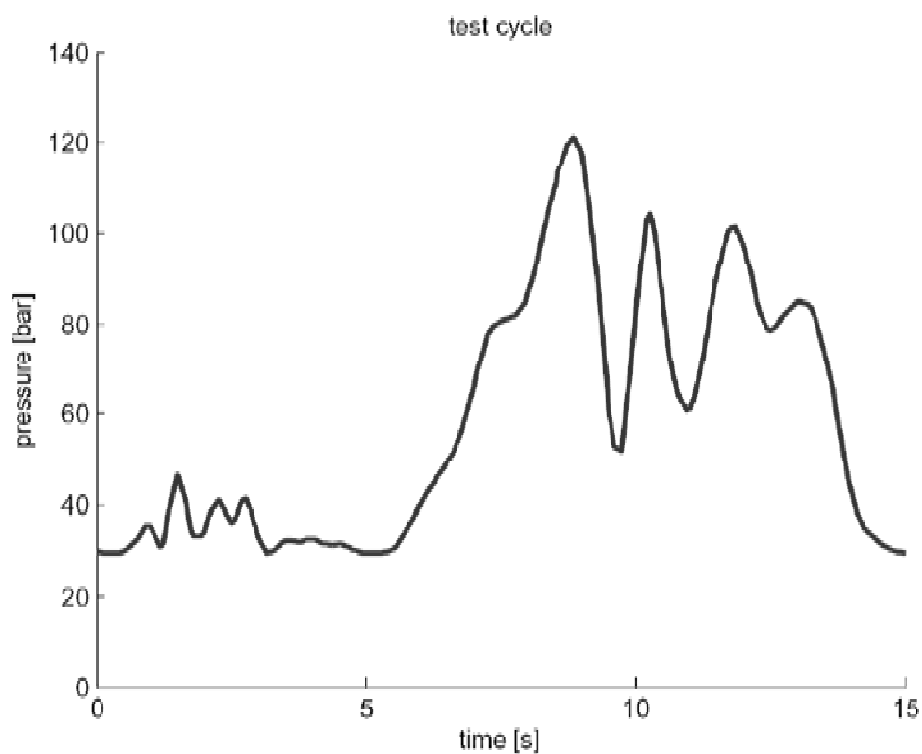
Control electronics must be pre-programmed to run different test cycles and operate the system. Below are illustrated required test cycles. User interface must enable inputting and saving of new test cycles.



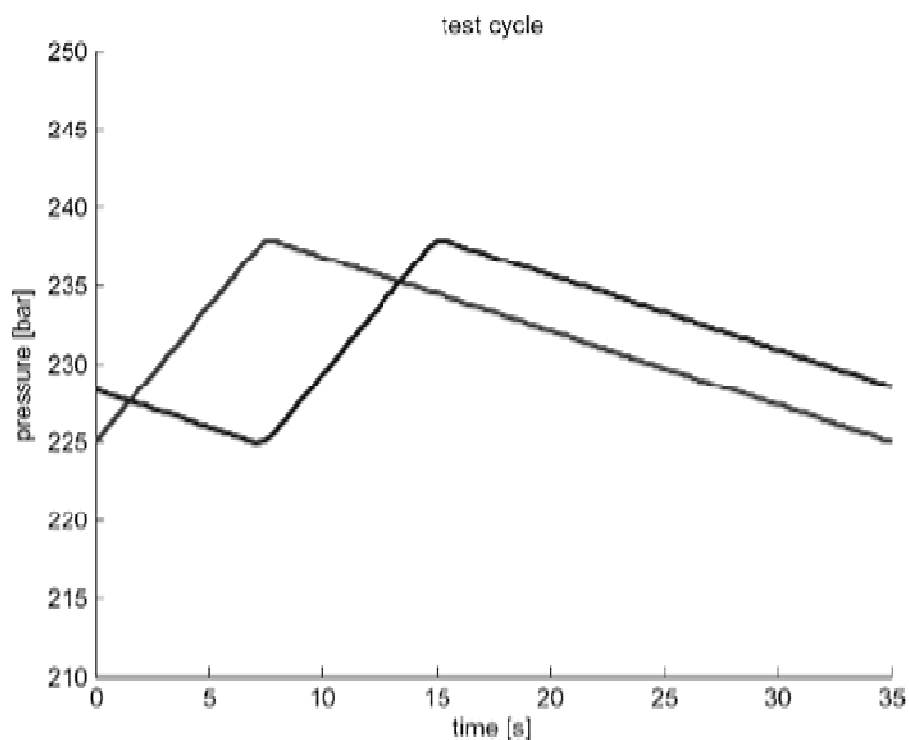
Irregular cycle so energy can't be transferred from an accumulator group to another. Accumulators are however quite small so flow rate is also small. This cycle is used to test one accumulator group, i.e. 4 accumulators, at one time. Accumulators are size of one liter. Pre charge pressure is less than 80 bars.



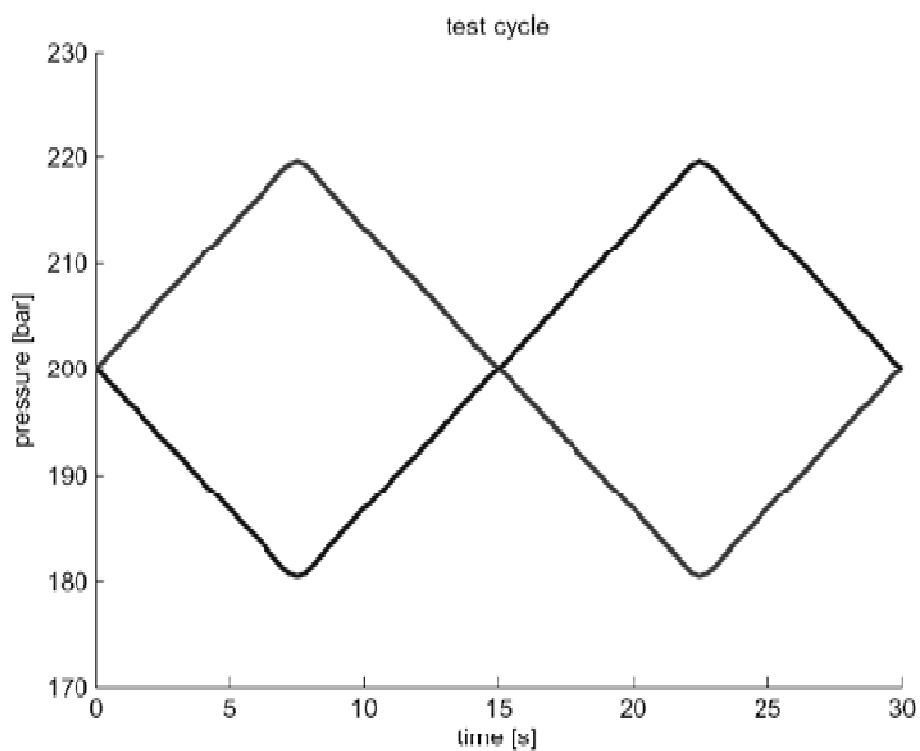
Test cycle for two or more accumulators. Use of symmetrical cycles allows energy to be transferred from an accumulator group to another. Accumulators used are usually 20 or 25 liters of capacity. Varying pre charge pressure.



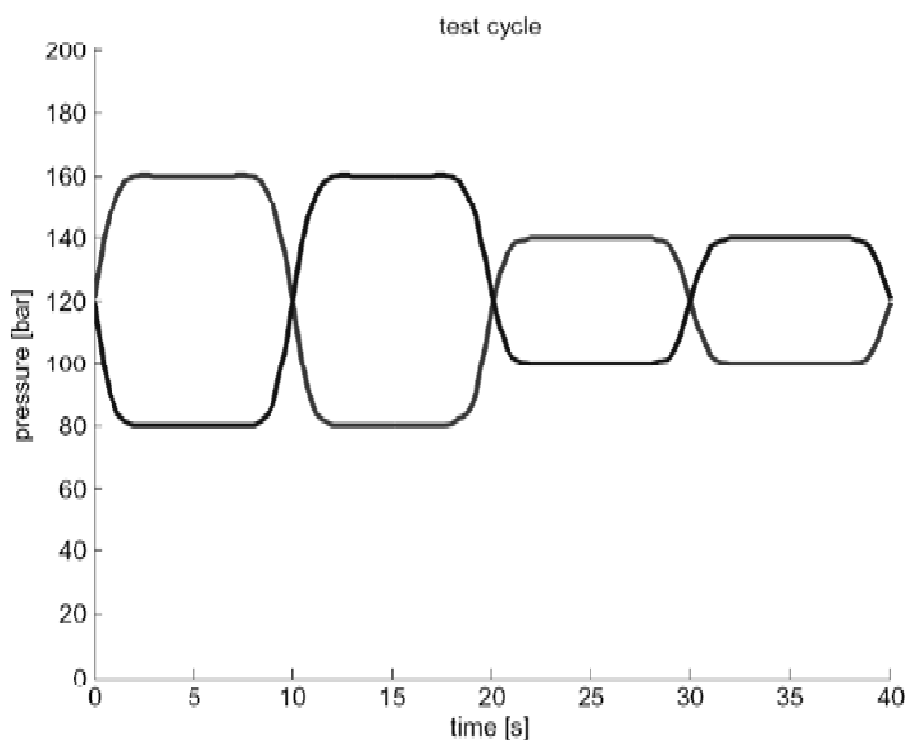
Irregular cycle so energy can't be transferred from an accumulator group to another. Accumulators are however quite small so flow rate is also small. This cycle is used to test one pair of accumulators with different pre charge pressures. Capacity of accumulators are 1 liter. Pre charge pressures are 30 and 15 bar.



Test cycle for an arbitrary number of accumulators. Use of semi symmetrical cycles allows some energy to be transferred from an accumulator group to another. Accumulators have varying capacity, largest are of 25 liters. Pre charge pressures are down from 165 bar.



Test cycle for an arbitrary number of accumulators. Use of symmetrical cycles allows energy to be transferred from an accumulator group to another. Accumulators have varying capacity, largest are of 25 liters. Pre charge pressures are down from 165 bar.



Test arrangement for an arbitrary number of accumulators. Use of symmetrical cycles allows energy to be transferred from an accumulator group to another. Varying sized accumulators. Varying pre charge pressure.