

Anturit hydrauliiikan mittauksissa

Raportti VALB417

Risto Parikka, Jyrki Tervo

Espoo, 2.12.1999

Sisällysluettelo

1 JOHDANTO	4
2 PAINE.....	4
2.1 Paineen mittausvälineet	4
2.2 Mittausmenetelmän valinta	8
2.3 Esimerkkejä kaupallisista paineantureista ja niiden toimittajista.....	8
3 TILAVUUSVIRTA	9
3.1 Tilavuusvirran mittausvälineet	9
3.2 Vuotojen mittaus	11
3.3 Virtauksen mittausmenetelmän valinta	11
3.3. Esimerkkejä kaupallisista virtausantureista ja niiden toimittajista.....	12
4 LÄMPÖTILA.....	13
4.1 Lämpötilan mittausmenetelmät	13
4.2 Lämpötilanmittausmenetelmän valinta	15
4.3 Esimerkkejä kaupallisista lämpötila-antureista ja niiden toimittajista	16
5 VÄRÄHTELY JA MELU	16
5.1 Värähtelyn mittaaminen	16
5.2 Melun mittaaminen.....	19
5.3 Esimerkkejä kaupallisista kiihtyvyy- ja ääniantureista ja niiden toimittajista	19
6 HYDRAULINESTEEN EPÄPUHTAUS- JA KUNTOANALYYSIT	20
6.1 Kiintoainehiukkasten mittaus	20
6.1.1 Öljynäytteiden tarkastusmenetelmien kuvauksia [10]	21
6.2 Kemialliset mittaukset [19]	22
6.3 Kaupallisia öljyn kunnonvalvonta-antureita ja toimilaitteita	22
7 TEHON KULUTUKSEN JA MUIDEN SUORITUSARVOJEN SEURANTA.....	25
8 SÄÄTÖJÄRJESTELMÄSTÄ SAATAVA INFORMAATIO.....	25
9 KÄYTÄNNÖN ESIMERKKEJÄ HYDRAULIIKAN DIAGNOSTIIKASTA	26
10 YHTEENVETO	27

1 JOHDANTO

Käynnissä olevasta hydraulijärjestelmästä voidaan mitata monia erilaisia suureita, joiden avulla hydraulisen järjestelmän tilasta on mahdollista muodostaa johtopäätöksiä. Eniten hydraulikasta mitataan painetta, tilavuusvirtaa, vuotoja ja öljyn lämpöä. Sähköiset mittaukset, joista tyypillisimpiä ovat sähkömoottoreiden ja erilaisten anturien sekä magneettiventtiilien kelojen mittaukset, ovat yleistyneet servo- ja proportionaaliventtiilien käytön lisääntyessä. Muita hydraulikan mittauksia ovat edellisten lisäksi öljyn puhtausasteen, viskositeetin, värähtelyn, melun, voiman, sylinterin iskunopeuden ja moottorin akselin pyörimisnopeuden mittaukset. Tavoitteet, joihin hydraulikan mittauksilla pyritään, ovat pääasiassa seuraavat: vian nopea paikallistaminen, vian aiheuttamien tuotantokatkosten ennaltaehkäiseminen sekä komponenttien korjausten ja testausten oikea ja asianmukainen suorittaminen.

Nopeasti kehittynyt elektroniikka tarjoaa laajat mahdollisuudet automaattisten koneiden toteutuksessa. Koneen ohjauksessa olennaisen osan muodostavat anturit, jotka mittaavat koneen toiminnan kannalta tarpeellisia suureita ja muuttavat mittaustulokset ohjauksjärjestelmän ymmärtämään muotoon. Tässä raportissa selostetaan tärkeimpien antureiden ja mittausten menetelmien periaatteita ja ominaisuuksia erityisesti hydraulikan monitoroinnin ja diagnostiikan kannalta.

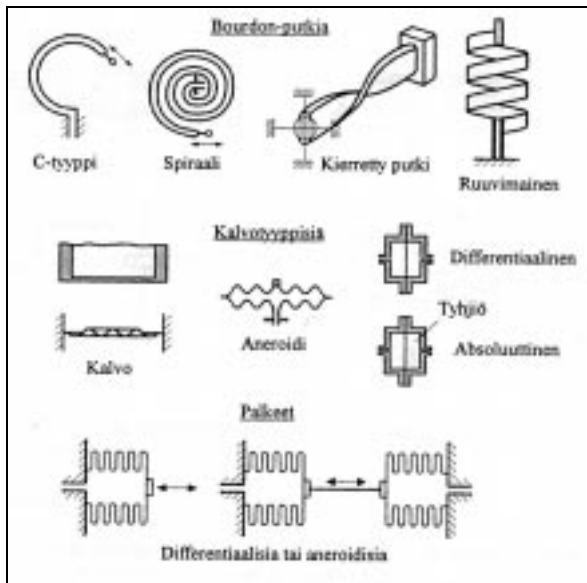
2 PAINE

Paine on hydraulijärjestelmän peruselementti, jota ei sinällään voida käyttää yksittäisen komponentin tarkkailuun. Sen sijaan paine kertoo koko järjestelmän tilasta ja toiminnasta. Painetta hydrauliseen järjestelmään muodostuu silloin, kun pumpun kehittämää tilavuusvirtaa vastustetaan joko kuorman avulla tai kuristamalla. Liian korkea paine järjestelmässä voi aiheuttaa öljyn lämpenemistä, ja tästä syystä paine tulee säätää mahdollisimman lähelle käyttöpainetta. Erilaisissa vuototilanteissa taas paine yleensä laskee alle normaalien rajojen. Jatkuva paineen vaihtelu on usein merkinä järjestelmän arvojen värähtelystä, mikä on tavallista säätötilavuuspumpuissa. Paineiskut, jotka eivät välttämättä näy painemittareissa, rasittavat järjestelmää ja voivat aiheuttaa ennaltaehkäisemättä vaurioita. Muita paineenmittauksen sovelluksia ovat mm. dynaamisen paineen mittauksen käyttö hydraulisen järjestelmän värähtelyn mittauksessa sekä säiliöiden pinnankorkeuden määrittäminen paineenmittauksen avulla.

2.1 Paineen mittausvälineet

Mekaaniset paineanturit [1] [2]

Mekaanisten painemittareiden tuntoelimenä on kimmoisa putki tai rasia, jonka muoto muuttuu paineen muuttuessa. Tuntoelimessä kiinni oleva vipu välittää muodonmuutoksen osoittimeen. Sähköinen mittari muuntaa sen tarvittaessa sähköiseksi signaaliksi. Nestevakautuksella varustettu putkijousi-tyyppinen painemittari lienee edelleen yleisin mittausväline hydraulikan mittauksissa. Kuvassa 1 on esitetty erilaisia mekaanisia paineantureita.



Kuva 1. Mekaanisia paineantureita [1].

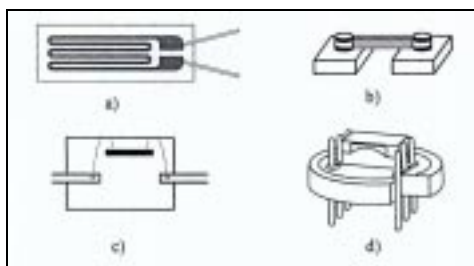
Paine-eromittarit [3]

Paine-eromittareita käytetään jonkin verran myös hydraulikassa. Mittareissa on kaksi mittausjärjestelmää, joissa kummassakin on oma koneistonsa. Toimintaperiaate on sama kuin vakiomittareissa. Paine-eromittarien etuna on se, että yhdellä mittarilla saadaan mitattua esimerkiksi venttiilin paine-ero.

Sähköiset paineanturit [2], [4]

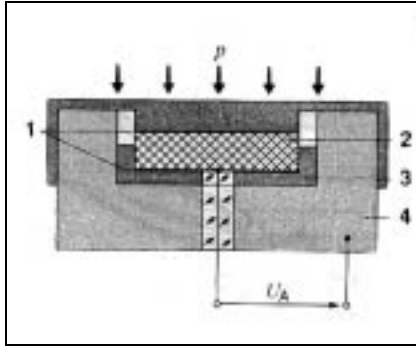
Sähköisissä paineantureissa muuttuva paine aiheuttaa jonkin sähköisen ilmiön, kuten resistanssin, induktanssin tai kapasitanssin muutoksen. Sähköiset menetelmät sallivat mittaustuloksen siirtämisen mittauskojeesta kaukana olevaan osoitinkojeeseen.

Resistiivisissä paineantureissa (kuva 2) muuttuva paine aiheuttaa tuntoelimen resistanssin muutoksen. Haittapuolena resistiivisissä antureissa on suuri lämpötilariippuvuus, jota pyritään pienentämään kompensoivalla siltakytkennällä.



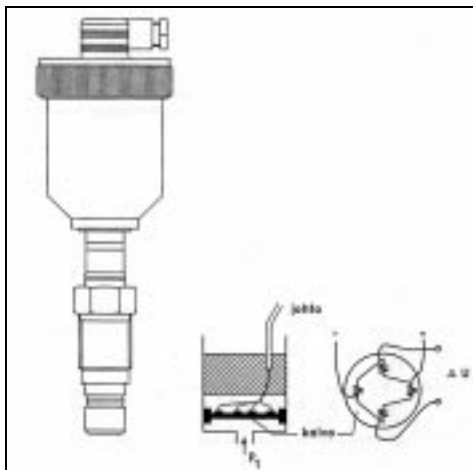
Kuva 2. Resistiivisiä paineantureita: a) venymäliuska-anturi, b) venymälanka-anturi, c) ohutkalvoanturi, d) puolijohdeanturi [2].

Pietsosähköisessä anturissa pietsokiteen kidepintojen sähkövaraus muuttuu kuormitettaessa. Pietsosähköiset anturit eivät sovi staattisen paineen mittaukseen, koska vuotovirrat kompensoivat kidepintojen varaukset. Pietsosähköisten anturien hyviä puolia ovat pieni koko, kestävyys sekä suuri ominaistajuus ja ulostulosignaali. Anturit ovat lämpötilaherkkiä ja vaativat vahvistimen. Lämpötila-alue on laaja, jopa -200 °C - $+300\text{ °C}$. Kuvassa 3 on esitetty pietsosähköisen paineanturin periaatekuva.



Kuva 3. Pietsosähköinen paineanturi [4].

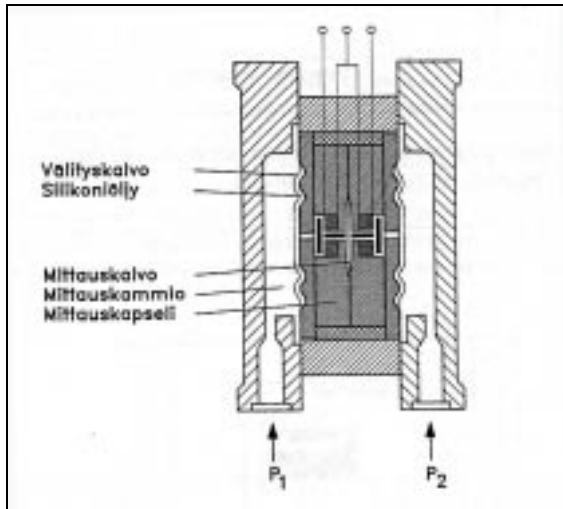
Pietsoresistiivistä anturia sanotaan myös puolivenymäliuska-anturiksi. Anturin resistanssi muuttuu jännityksen vaikutuksesta. Pietsoresistiivisillä antureilla päästään erinomaisiin hystereesi- ja lineaarisuusarvoihin. Antureita valmistetaan painealueelle 100 kPa - 200 MPa, ja käyttölämpötilan maksimiarvo on noin 125 °C. Pietsoresistiivinen anturi on tätä nykyä yksi merkityksellisimmistä paineanturityypeistä hydrauliiikan mittauksissa; Suomessa edustettuja merkkejä ovat mm. Kyowa, Danfoss ja Parker. Kuvassa 4 on esitetty pietsoresistiivisen paine-eroanturin periaatekuva.



Kuva 4. Pietsoresistiivinen paine-eroanturi [2].

Induktiivisissa antureissa paineen muutos aiheuttaa geometrian muutoksen kondensaattorissa, mikä ilmenee kapasitanssin muutoksena. Menetelmän hyviä puolia ovat ylikurmituksen kesto, hyvä erotuskyky ja suuri jännitesignaali. Antureita käytetään pääasiassa ± 20 MPa:n painealueella.

Kapasitiivisessa anturissa differentiaalikonkondensaattorin kiinteät levyt on tehty paine-erokammion seinämiin, ja liikkuvan levyn muodostaa kalvo, joka on painekammion välissä. Kalvon liikkeet ovat hyvin pieniä ja kapasitanssin muutokset ovat sen mukaisia. Anturi tarvitsee aina lisäelektroniikkaa siirtokelpoisen viestin aikaansaamiseksi. Kuvassa 5 on esitetty kapasitiivisen paine-eroanturin periaatekuva.



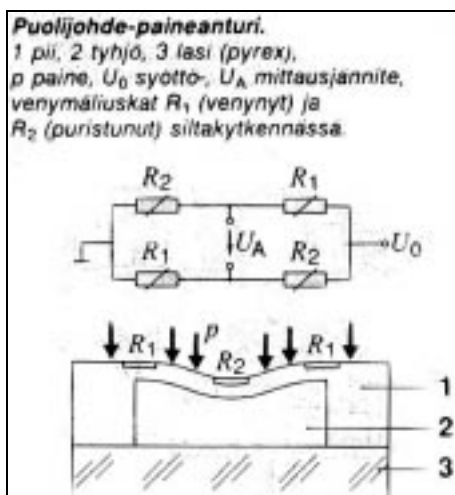
Kuva 5. Kapasitiivinen paine-eroanturi [2].

Painelähettimet [3]

Painelähettimissä muunnetaan mitatut paineet sähköviesteiksi. Sähköiset kaukolähetinyksiköt sijoitetaan painemittariin tai sen taakse. Painelähettimillä voidaan mitata myös paineenvaihte-luita, paineiskuja ja paineen sykkimistä. Voimakas pulsaatio aiheuttaa väsyttävää kuormitusta putkistossa.

Mikromekaaniset anturit [4], [5]

Puolijohdepaineanturissa paine vaikuttaa mikromekaniikan keinoin valmistettuun piikalvoon, jonka sähkövastus on riippuvainen paineesta (kuva 6). Anturi ja kytkentähybridi signaalin esikäsitteilyyn ovat samassa kotelossa. Tulevaisuuden anturoinneissa mikromekaaniset anturit tulevat lisääntymään valmistussarjojen kasvaessa ja hintojen laskiessa. VTT Valmistus-tekniikka on tutkinut mikromekaanisia antureita "Käyttövarmuus kilpailutekijänä" -teknologiaohjelmaan kuuluvassa MEMS-anturit -hankkeessa.



Kuva 6. Puolijohde-paineanturi [4].

2.2 Mittausmenetelmän valinta

Paineenmittausmenetelmä ja -anturit valitaan kohdekohtaisesti. Apuna valinnassa voidaan käyttää valintataulukkoita, josta on esimerkki taulukossa 1.

Taulukko 1. Paineenmittausmenetelmien vertailua [6].

Method	Range (Examples)	Accuracy (Examples)	Comments
Bourdon dial gauge	From 1.5 kPa to 800 MPa	from $\pm 5\%$ FS to $\pm 1\%$	10 MPa over-pressure possible. Test gauges to a higher accuracy, e.g. to better than $\pm 0.1\%$.
Bellows (or diaphragm)	To 35 MPa or higher	to $\pm 0.2\%$ FS hysteresis & repeatability	Diaphragm movement may be detected by an inductive or capacitance change. Mainly process systems. Long term stability.
Foil gauge sensor	0 to 50 MPa	to $\pm 0.25\%$ FS linearity & hysteresis	High stability. Low output.
Manometer	Low pressures only	$\pm 0.5\%$ to $\pm 0.2\%$ of reading	Glass may be a hazard.
Strain/Force detector – bonded strain gauge	0 to 70 MPa	to $\pm 0.1\%$ FS linearity, hysteresis & repeatability	Gradually being superseded by the types shown below. Not suitable above 120 °C.
Strain/Force detector – piezoelectric sensor	0 to 170 MPa	to $\pm 0.05\%$ FS linearity & hysteresis	High stability. High accuracy. Resists shock. Requires charge amplifier.
Strain/Force detector – piezoresistive sensor	0 to 170 MPa	to $\pm 0.05\%$ FS linearity & hysteresis	Detects both alternating and steady pressures. High output

2.3 Esimerkkejä kaupallisista paineantureista ja niiden toimittajista

Danfoss MBS 2050, 3050 4050 ja 5050 -painelähtetimet on suunniteltu erityisesti hydraulisia järjestelmiä varten [7]. Paineantureita on varustettu vaimentimella, joka suojaa anturia kavitaation aiheuttamilta vaurioilta. Kyseisiä piezoresistiviseen anturiin perustuvia paineantureita tuo maahan Oy Danfoss Ab. Muita paineantureita ovat mm. Honeywell Oy:n maahantuoma Kyowa ja Mespek Oy:n edustama Entran.

Taulukkoon 2 on koottu yrityksiä, jotka oman ilmoituksensa mukaan myyvät paineenmittaukseen soveltuvia antureita Suomessa.

Taulukko 2. Paineantureiden edustajia [8].

Yritys	Puhelinnumero	Edustettu merkki
Aseko Oy	(09) 221011	DS-Europe, IC, Maywood, Kulite
Aspecs Oy	(09) 5306030	Sensor Technics
Oy Danfoss Ab	(09) 80281	Danfoss
Dosesoft Oy	(019) 871131	PCB Piezotronics
Dosmar Oy	(09) 8870230	FGB Instrumentation
Eiab Finland Oy	(09) 8733416	Scimarec Co.
Eklöw Electronics Oy	(02) 2507940	Copal Electronics
Oy Farnell Ab	(09) 345 5400	Useita valmistajia
Finn Metric Oy	(09) 4761600	Kistler
Oy Flinkenberg Ab	(09) 859 911	Matsushita Automation Controls
Future Electronics Oy	(09) 5259950	Useita valmistajia
Jacob Hatteland Electronic Oy	(09) 350 8570	Siemens
Honeywell Oy	(09) 3480101	Honeywell, Kyowa
Into-Yhtiöt	(09) 755950	Data Instruments, Lucas
JoR Ab	(018) 342820	SI Pressure Instruments
Mespek Oy	(09) 3511800	Entran
OEM-Automation Oy	(02) 4120400	Bailey & Mackey
Perel Oy	(019) 87111	Sunx Ltd
Oy Tavron Ab	(09) 4761615	Silicon Microstructures
Vaisala Oyj	(09) 89491	
VTI Hamlin Oy	(09) 871181	
Stig Wahlström Oy	(09) 502 4400	Dwyer, Gems Sensors
Yliselektroniikka Oyj	(09) 452621	Honeywell

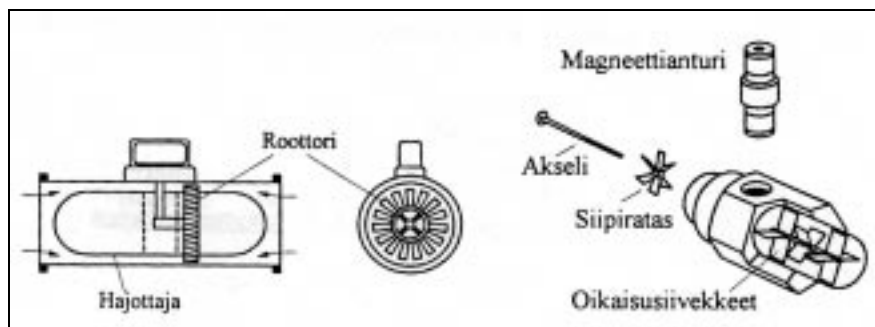
3 TILAVUUSVIRTA

Virtaus on toinen hydrauliiikan perusparametri, jota voidaan käyttää järjestelmän monitorointiin. Sähköisellä signaaliulostulolla varustettuja tilavuusantureita voidaan käyttää aseman ohjaukseen. Aksiaalimäntäpumpun kulumista on pystytty diagnosoimaan ohivirtauksen lisääntymisen perusteella [9]. Koko järjestelmän ohivirtausta tai vuotoja voidaan seurata mittaamalla lähtevä virtaus ja paluuvirtaus. Pitkän aikavälin trendeistä voidaan havaita järjestelmän ohivirtauksen tai vuotojen lisääntyminen, joka indikoi komponenttien kulumista. Nopeista muutoksista voidaan päätellä äkilliset vauriot esimerkiksi putkistoissa. Vuotoa voidaan mitata erilaisilla virtausmittareilla tai epäsuorasti mittaamalla nesteen lämpötilamuutoksia ohivirtaus- tai vuotokanavassa [9], [10].

3.1 Tilavuusvirran mittausvälineet

Turbiinanturit [1], [3]

Turbiinanturissa on putkeen sijoitettu lähes kitkattomasti laakeroitu moottori, jonka pyörimisnopeus on verrannollinen läpivirtaavan öljyn keskimääräiseen virtausmäärään. Roottorin pyörimisnopeutta mitataan sähköisellä anturilla. Sähköisen viestin taajuus on verrannollinen pyörimisnopeuteen ja sitä kautta tilavuusvirtaan. Turbiinanturit kattavat suurimman osan hydrauliikkasovelluksista, sillä mitta-alue on laaja (0,03 - 60000 l/min) ja työskentelypaine voi olla jopa 3000 bar. Turbiinanturien periaatteita on esitetty kuvassa 7.



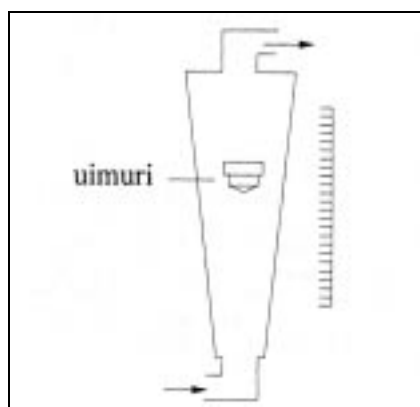
Kuva 7. Turbiinianturien periaatteita [1].

Hammaspyöräanturit [1], [3]

Hammaspyöräanturi muodostuu hammaspyöräparista ja hammaspyörän aseman tunnistavasta anturista. Virtaava öljy pyörittää hammaspyöriä, joiden pyörimisnopeus riippuu niiden läpi virtaavasta öljymäärästä. Mittauksessa käytetään usein induktiivista anturia, jolloin yhden hammasvälin tilavuuden suuruisen nestemäärän siirtyminen antaa yhden ulostulopulssin. Hammaspyöräantureilla voidaan mitata 0,95 - 1000 litran minuuttituottoja. Maksimikäyttöpaine vaihtelee 315 - 600 barin välillä. Hammaspyöräanturin etuna on mm. se, että tilavuusvirran suunta voi olla mielivaltainen.

Rotametrit [1], [2], [3]

Rotametri on yleisin muuttuva-aukkoinen virtausmittari. Rotametrin rakenne on esitetty kuvassa 8. Rotametrin sisään rakennettu kartiokuula nousee virtausvoiman vaikutuksesta ylöspäin. Tämä liike kalibroidaan tilavuusvirran näyttämäksi. Rotametri on halpa, mutta se ei sovellu kovin tarkkoihin mittauksiin. Parhaiten rotametrit soveltuvat tilavuusvirran toteamiseen, toimilaitteiden nopeuksien karkeaan asetukseen ja ohjausvirtojen ja vuotojen toteamiseen. Rotametri on herkkä viskositeetin muutoksille.



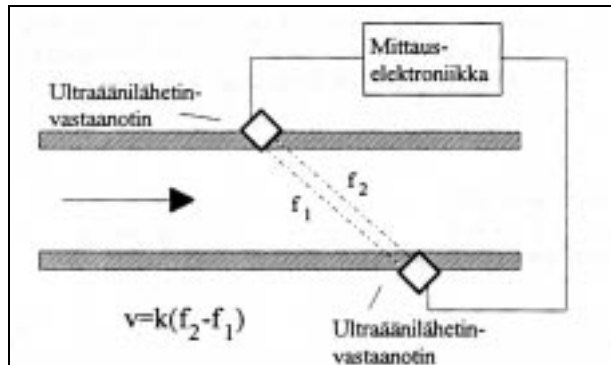
Kuva 8. Rotametrin toimintaperiaate [2].

Magneettiset virtausmittarit [2]

Magneettisen virtausmittarin toiminta perustuu sähkötekniikasta tunnettuun induktioperiaatteeseen. Käytettäessä magneettista virtausmittausta virtaavan aineen tulee olla sähköä johtavaa nestettä (sähkönjohtokyky 2 - 5 $\mu\text{s/m}$). Öljyjalosteet eivät näin ollen yleensä ole riittävästi sähköä johtavia. Magneettinen virtausmittaus on riippumaton nesteen tiheyden, viskositeetin, paineen ja lämpötilan vaikutuksista.

Ultraäänimenetelmät [1], [2]

Äänellä on kussakin väliaineessa tietty kulkunopeus, joka riippuu aineen lisäksi sen lämpötilasta. Ääni etenee myötävirtaan nopeammin kuin vastavirtaan. Kuvassa 9 on esitetty periaatekuva menetelmästä, jossa suoritetaan kulku-aikamittaus kahdella virtauskanavan vastakkaisille puolille sijoitetulla ultraäänivastaanottimella.



Kuva 9. Ultraäänimittauksen periaate [1].

Doppler-menetelmässä liikkuvaan kohteeseen suunnattu ääni heijastuu takaisin, jolloin sen taajuus muuttuu. Loittoneva kohde aiheuttaa taajuuden pienenemisen. Menetelmän soveltaminen nesteiden virtausmittauksiin edellyttää, että nesteessä on sopivasti epähomogeenisuuksia, sillä heijastumista ei tapahdu tasajakoisessa nesteessä. Ultraäänien asemesta voidaan käyttää lasersädettä, jonka taajuus muuttuu Doppler-ilmiön vaikutuksesta.

3.2 Vuotojen mittaus

Vuotoja voidaan mitata useimmilla tavanomaisilla tilavuusvirran mittausmenetelmillä, joita ovat mm. hammaspyörä- ja turbiinanturit. Virtausta mittaamalla voidaan todeta mm.

- suuntaventtiilien välisvuodot
- pumppujen ja moottorien volymetriset hyötysuhteet
- paineventtiilien vuodot.

Vuotojen mittausta on selostettu laajemmin mm. lähteessä [3].

3.3 Virtauksen mittausmenetelmän valinta

Menetelmiä virtauksen mittaukseen on olemassa lukuisia, joista edellisissä luvuissa on esitetty esimerkkejä vain yleisimmistä menetelmistä. Laajempia selvityksiä virtauksen mittauksesta on mm. lähteissä [6], [1], [2]. Lähteessä [6] on selvitetty menetelmien ja anturien soveltuvuutta erilaisiin kohteisiin. Taulukossa 3. on esitetty virtausmittausmenetelmien valintataulukko.

Taulukko 3. Virtauksen mittausten menetelmien valintataulukko [6].

Method	Range (samples only)	Accuracy (%)		Comments	Method	Range (samples only)	Accuracy (%)		Comments
		At reading	At full scale				At reading	At full scale	
Coriolis mass (vibrating tube) (Fig. 7.53)	100:1 1 to 80000 kg/h ¹	0.15 to 0.5		Virtually unaffected by other physical parameters No ρ_m restrictions Good for process fluids and food industry Disadvantage: air may cause problems	Piston wheel (Hall effect)	10:1 1 to 2000 L/min ¹ to 20000 L/min ¹	0.3		Best for ultralow flows Variable advantage: non-linear
Differential pressure – orifice plate	3:1		1 or 2	Good for low viscosity fluids Variable advantage: can be improved with quality differential pressure transmitters, e.g. up to 10:1 range	Piston (PD)	1000:1 1.0 to 1.0 m ³ /s upwards	0.1		Good for viscous fluids Very accurate at low flow for petrol
Differential pressure – averaging pipe (Fig. 7.56)	5:1		1 to 1	Simple insertion fitting Low cost High pressures and temperatures Variable advantage: only measures flow at pilot hole; an array is fitted to provide an average flow profile	Rotating vane (FD)	Up to 75mm diameter pipe	0.15		Very high accuracy Petrol pumps and aircraft
Electromagnetic (Fig. 7.54)	100:1 or more True flow volume from 0.1 m ³ to 100 m ³ full scale values	0.5%, i.e. ±0.001 m ³	0.05%, i.e. both percentages apply	Ultralow to ultrahigh flows Variable advantage: conducting fluid only	Turbine (DE, magnet or Hall effect detection) (Fig. 7.56)	6 mm to 600 mm diameter	0.5		Low viscosities preferable Fixed meter Disadvantage: damaged by particles >100µm, and needs a strainer
Gear (FD)	100:1 1 ml/min ¹ to 3000 L/min ¹ and above	0.15		Good for viscous liquids	Ultrasonic – clamp on (Doppler)	Velocity from 0.02 m/s ¹ upwards	1		Easy to clamp onto pipe Disadvantage: fluid needs bubbles or particles >30µm
Helical screw (FD)	100:1 0.5 to 2000 L/min ¹	0.15		Excellent for viscous liquids Up to 250mm diameter pipe	Ultrasonic – clamp on (transit time) (Fig. 7.57)	Almost zero to >15 m/s ¹	2		Independent of conductivity Can be retrofitted Variable advantage: best with flows above 0.1 m/s ¹ ; temperature and pressure may affect the result
Mixing disc (PD)	10 to 300 L/min ¹	2		Low cost Good for water batching	Ultrasonic – dedicated	See above	1		See above
Oval gear wheel (FD)	300:1 16000 L/min ¹	0.15		Excellent meter for chemicals and batching	Variable area (rotameter)	10:1 0.2 m ³ /min ¹ to 750 L/min ¹ To 75 mm bore		1-5	Low cost for small bore pipes (up to 75mm)
Paddle wheel	10:1 Velocity from 0.1 to 15 m/s ¹		2	Low cost insertion type Tolerant of particles Variable advantage: measures flow velocity in region of wheel	Vertex shedding	10:1 5 L/min ¹ upwards 20mm to 0.6m full bore, but can be inserted	1		Good repeatability High pressures No moving parts Variable advantages: pressure drop may be low but with relatively clean, low viscosity fluids $\rho_m > 800$

PD, positive displacement.

3.3. Esimerkkejä kaupallisista virtausantureista ja niiden toimittajista

Kytölä Oy valmistaa itse nestevirtausten mittaamiseen mittareita, joista osa on varustettu hälyttimellä tai rajakytkimellä. Yritys tuo maahan myös saksalaisen KEM:n valmistamia hammaspyöräantureita suuriviskositeettisten ja suuripaineisten nestevirtausten mittaukseen. Lisäksi yritys valmistaa turbiini- ja soikioratasantureita [11]. Oy Danfoss Ab tuo maahan elektronisia Sonoflo-virtausmittareita, joissa lähettimet on rakennettu anturirunkoon, jolloin tiivistet eivät ole kosketuksissa mitattavaan nesteeseen. Kyseiset mittarit mittaavat tilavuusvirtaa myös sähköä johtamattomista nesteistä [7]. Muita virtausantureiden edustajia on lueteltu taulukossa 4.

Taulukko 4. Virtausantureiden edustajia [8].

Yritys	Puhelinnumero	Edustettu merkki
Oy Danfoss Ab	(09) 80281	Danfoss
Oy Farnell Ab	(09) 345 5400	Useita valmistajia
Honeywell Oy	(09) 3480101	Honeywell
Ifm Electronic Oy	(09) 75177700	
Into-Yhtiöt	(09) 755950	Weber Sensors
Kubler Suomi Oy	(09) 8700960	Honsberg
Kytölä Oy	(014) 631499	KEM, Kytölä
Stig Wahlström Oy	(09) 502 4400	Gems

4 LÄMPÖTILA

Hydraulinesteen lämpötilan tarkkaileminen ja säätäminen on tärkeää nesteen eliniän kannalta. Korkeat lämpötilat johtavat erityisesti öljyperäisten nesteiden nopeaan ja ennenaikaiseen vanhenemiseen. Esimerkiksi pumpun hyötysuhteen muuttumista voidaan tarkkailla mittaamalla hydraulinesteen lämpötilan muutosta pumpun yli. Lämpötilan mittaamisessa on huomioitava ympäristön lämpötilan vaihtelu ja mahdollisesti muitakin parametreja, kuten massavirrat eri suuntiin, sekä lämmön johtuminen ja säteily.

Lämpötilan mittaaminen soveltuu sellaisten kohteiden tai komponenttien tarkkailuun, jotka paljastavat suuria energiahäviöitä, kuten pumppujen vuotoputket ja paineenrajoitusventtiilit. Näissä kohteissa vikaantumisen aiheuttama lämpötilan nousu on havaittavissa ilman monimutkaisia termodynaamisia laskelmia [10].

4.1 Lämpötilan mittausmenetelmät

Lämpötilan mittaamiseksi käytössä olevat mittarit ja anturit voidaan jaotella esimerkiksi seuraavasti [1]:

- ainemäärän tilavuuden, pituuden tai paineen mittauksiin perustuvat mekaaniset neste-, kaasu-, höyrynpaine- ja bimetallilämpömittarit
- sähköisen suureen muuttumiseen perustuvat sähköiset metallivastusmittarit, termistorit ja termoelementit
- säteilyn mittaamiseen perustuvat optiset pyrometrit
- puolijohdeteknologiaan perustuvat, esimerkiksi IC-lämpömittarit
- aineen olomuodon ja värin muutoksiin perustuvat lämpömittarit

Mekaaniset lämpömittarit [1], [2], [3]

Nestepatsaslämpömittarien käyttölämpötila-alue on erilaisilla neste- ja lasityyppien yhdistelmillä jopa -200 °C - $+750\text{ °C}$. Teollisuuden automaatioissa nestepatsaslämpömittariin voidaan yhdistää valosähköinen kytkin tai voidaan käyttää elohopeapatsasta kytkimenä, jolloin pinnan noustessa elohopean pinta koskettaa ohutta metallilankaa ja saa aikaan hälytyksen.

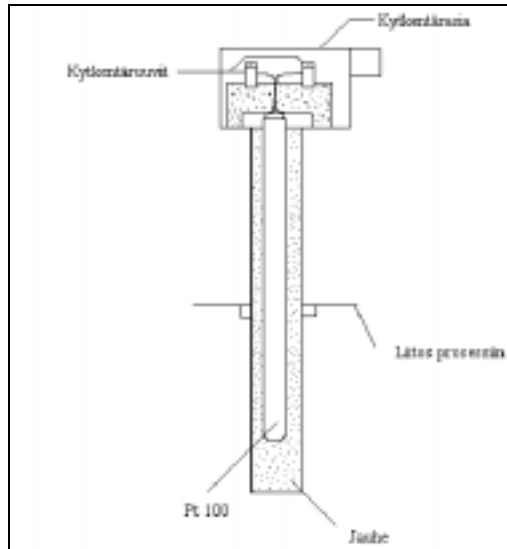
Kapillaarilämpömittari muodostuu anturina toimivasta säiliöstä, mittarista ja niitä yhdistävässä ohuesta kapillaariputkesta. Mittausalueen laajuus on samaa luokkaa kuin nestepatsasmittareilla. Kapillaarimittareilla voidaan kapillaariputkesta saada riittävä voima esimerkiksi prosessin säätöön. Mittaria voidaan käyttää lisäksi verraten pitkällä mittausetäisyyksillä (jopa 60 metriä).

Metallin lämpölaajenemiseen perustuvaa bimetallilämpömittaria käytetään paljon termostaateissa eli laitteissa, jotka ohjaavat sähkökoskettimen kiinni ja auki tietyissä lämpötiloissa. Lämpötila-alue on noin -70 °C - $+500\text{ °C}$. Teollisuudessa mittaria käytetään kohteissa, joille ei aseteta suuria tarkkuusvaatimuksia.

Metallivastusanturit [2]

Metalleilla on positiivinen resistanssin lämpötilakerroin, eli metallin vastuksen resistanssi kasvaa lämpötilan noustessa. Ilmiötä käytetään yleisesti lämpötilan mittaamiseen. Tavallisesti käytetään platinavastusta, jonka resistanssi on 0 °C lämpötilassa 100 Ohmia . Tällaista anturia

sanotaan Pt 100 -anturiksi (kuva 10). Platinan metallin jalouden ansiosta anturin ominaisuudet säilyvät hyvin korkeissakin lämpötiloissa. Tavanomaisessa anturissa vastuslanka on päällystetty keraamisella aineella tai lasilla ja suljettu jaloteräs- tai nikkeli-putkeen. Putki on täytetty keramiikkajauheella, jotta lämpö siirtyisi nopeasti metalliputken läpi vastuslankaan. Platinan mitta-alue on jopa $-250\text{ }^{\circ}\text{C}$ - $+962\text{ }^{\circ}\text{C}$.



Kuva 10. PT 100 -anturin rakenne [2].

Anturi kytketään yleensä kaksijohdinkytkennällä automaatioprosessiin, jolloin prosessin liityntäyksikkö syöttää jännitettä vastusanturille ja vastaanottaa jännitteen ja virran, joka on muodostunut anturissa jännitteen resistanssiarvon mukaan (4...20 mA). Jos matka vastusanturilta liityntäyksikölle on pitkä, voidaan käyttää ns. kolmijohdinkytkentää, joka kompensoi mittajohtimien lämpötilan muuttumisesta aiheutuvan resistanssin vaihtelun.

Termistorit [1]

Termistorit ovat puolijohteista valmistettuja lämpötila-antureita, joiden resistanssi riippuu voimakkaasti lämpötilasta. Termistorit sopivat näin ollen hyvin kapeille mitta-alueille ja pienten lämpötilaerojen mittaukseen.

Termoparimittaukset [1], [2]

Termoparin toiminta perustuu niinsanottuun lämpösähköilmiöön. Kun kaksi eri metallista valmistettua metallilankaa yhdistetään toisesta päästään (kuumapää), lankojen toisten päiden (kylmäpää) välille syntyy kuuma- ja kylmäpään lämpötilaeroon verrannollinen tasajännite. Termopari mittaa mitta-alueella ja vertailuliitoksessa syntyvien jännitteiden erotusta. Termopari on halvempi ja yksinkertaisempi kuin vastusanturi ja termopari soveltuu laajalle lämpötila-alueelle, mutta tarkkuus on yleensä heikompi. Termojännite mitataan useimmiten elektronisella lämpötilalähettimellä, joka muuttaa jännitteen analogiaviestiksi, joka johdetaan osoitinkojeelle tai tietokoneelle.

Optiset menetelmät [1], [2]

Eryityisesti korkeiden lämpötilojen mittaukseen voidaan käyttää myös säteilypyrometrejä. Pyrometrejä käytetään etenkin silloin, kun lämpötila on niin korkea, ettei muita menetelmiä voida käyttää, kohde on kaukana tai se on liikkuva. Nykyään pyrometriä mitta-alue on jopa $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ - $+4000\text{ }^{\circ}\text{C}$. Absoluuttisen nollapisteen yläpuolella kaikki kappaleet lähettävät sähkömagneettista säteilyä, joka tulee noin $+700\text{ }^{\circ}\text{C}$ lämpötilassa näkyväksi, jolloin lämpötila voidaan arvioida hehkuvan kappaleen värin avulla.

Termografia [12]

Termografia, eli lämpösäteilyn havaitsevilla kameralla kuvaaminen on menetelmä, jolla pystytään paikantamaan vikaantuneita komponentteja laajastakin järjestelmästä, sekä myös sellaisia kohtia, joissa tapahtuu hydraulinesteen kuumenemistä. Lämpökamerakuvat voidaan siirtää tietokoneelle, jolla voidaan suorittaa kuvien analysointi. Suomessa lämpökameroita myyvät mm. MACI Oy, Infra Dex Oy ja Dielectric Oy. Merkkiniimiä ovat mm. IRCON, Inframetrics ja NEC. Laitteiden hinnat vaihtelevat noin 90 000 markasta useisiin satoihin tuhansiin.

Muita menetelmiä [5]

Mikroelektroniiikan kehittyminen on mahdollistanut lämpötila-anturien ja signaalinkäsittelyelektroniiikan valmistamisen samaan IC-piiriin. Myös puolijohdekomponentti voi toimia anturina. VTT Valmistustekniikka on tutkinut mikroelektroniiikan käyttöä anturoinnissa "Käyttövarmuus kilpailutekijänä" -teknologiaohjelmaan kuuluvassa MEMS-anturit -hankkeessa.

4.2 Lämpötilanmittausmenetelmän valinta

Lämpötilanmittausmenetelmää ja anturia valittaessa otetaan huomioon kohde ja käyttötarkoitus. Taulukossa 5. esitetään vertailua hydrauliiikan mittauksissa käytettyjen eri anturointi- ja mittausmenetelmien välillä.

Taulukko 5. Lämpötilanmittausmenetelmien vertailua [6].

Method	Range	Comments	
		Positive	Negative
Mercury in glass	-30°C to +500°C	Good visual indication. High accuracy.	Fragile. Not suited for remote monitoring.
Mercury in steel	-40°C to 650°C	Suitable in hazardous areas	Distance between sensor and actuator < 2 m.
Thermocouple	-250°C to +2000°C and even higher in some cases.	Widest temperature range. Simple application. Robust. Low cost and small size.	Needs a temperature reference. Not easily suited to high accuracy except for < 100°C difference between cold and hot junctions. Special extension cables need for long runs. Susceptible to shock.
Resistance - Wire wound platinum	-230°C to +850°C	High accuracy is possible. Simple installation. Copper cable only needed.	Needs energising source. Careful handling needed. Larger than thermocouples. Slower response than thermocouples and thermistors.
Resistance -Platinum film on ceramic substrate	Up to 500°C	Cheaper than wire wound. Good thermal contact with flat surfaces. Vibration resistant.	Upper temperature limitations. Needs protection from environment.
Thermistor	-40°C to +300°C	High accuracy over small range, due to high output. Changes as small as 0.0005°C can be detected with accuracy of ± 0.2°C. Shock proof. Small size	Limited range.
Infrared (radiation pyrometry)	-55°C to +1350°C although band may only be 400°C	Remote (up to 40 m)	Surface emissivity needs to be known. Narrow acceptance angle required
Bimetal	-70°C to +540°C	Low cost and robust. Safe in hazardous areas.	General purpose only. Limited accuracy and slow response. Best for liquids.

4.3 Esimerkkejä kaupallisista lämpötila-antureista ja niiden toimittajista

Taulukossa 6. on lueteltu lämpötila-antureiden maahantuojia ja heidän edustamiaan lämpötila-anturien valmistajia tai merkkiniimiä. Esimerkiksi metallivastusantureita ja niihin liittyviä lähettämiä ja oheiskomponentteja myyvät hyvin monet yritykset, mm. Oy Farnell Ab ja Wexon Oy.

Taulukko 6. Lämpötila-antureiden edustajia [8].

Yritys	Puhelinnumero	Edustettu merkki
Amestec Oy	(09) 767700	Kane-May
Amitra Oy	(03) 7341401	Heraeus sensor
Aseko Oy	(09) 221011	DS-Europe, IC, Maywood, Kulite
Aspecs Oy	(09) 5306030	HDK/TAMA/OS
Berendsen Components	(09) 4130800	Midwest Components
BFI-Ibexsa Nordic Ab	(08) 6269900	Hycal Engineering
Damsel Finland Oy	(02)2813520	Ins Enterprise
Elgood Oy	(09) 3514900	Sensotherm GmbH
Oy Farnell Ab	(09) 345 5400	Useita valmistajia
Finn Metric Oy	(09) 4761600	A J Thermosensors
Future Electronics Oy	(09) 5259950	Useita valmistajia
Jacob Hatteland Electronic Oy	(09) 350 8570	Siemens, Analog Devices, Philips
Honeywell Oy	(09) 3480101	Honeywell
Into-Yhtiöt	(09) 755950	Minco Products
Kontram Oy	(09) 6154300	Metrawatt
Kvartselektronik Oy	(09) 45206700	Nippon Ceramic
Kubler Suomi Oy	(09) 8700960	JUMO
Memec Finland Oy	(09) 3508880	Dallas Semiconductor
Mespek Oy	(09) 3511800	Entran
NC-Point Oy	(09) 274 6720	Grölle & Löbach
Noretron Yhtiöt	(09) 5259330	Thermo Electric International BV
OEM-Automation Oy	(02) 4120400	CAL
Orbis Oy	(09) 478830	Eirelec
Perel Oy	(019) 87111	Jenway Ltd
SKS-Automaatio Oy	(09) 852661	SKS-Tekniikka
Stig Wahlström Oy	(09) 502 4400	Dwyer, Gems Sensors
Wexon Oy	(09) 290440	Useita merkkejä
Yliselektronikka Oyj	(09) 452621	Honeywell

5 VÄRÄHTELY JA MELU

5.1 Värähtelyn mittaaminen

Värähtelymittauksen käyttämistä hydraulipumpun vaurioiden diagnosoinnissa on tutkittu laajalti erilaisilla mäntä- ja siipipumpuilla. Tutkimuksissa on mitattu värähtelyä kiihtyvyyss-anturilla pumpun kuoresta sekä myös painevärähtelyjä pumpun lähtövirtauksesta, mutta tulokset ovat olleet vaihtelevia. Hydraulijärjestelmän diagnosointia värähtelysignaalin perusteella vaikeuttavat nesteiden vaimentava vaikutus ja värähtelyn herätteiden epämääräisyys. Värähtely soveltuu parhaiten sellaisten kohteiden monitorointiin, joiden vikaantumisten

aiheuttamat tyypillisimmät herätetaajuudet ovat tiedossa. Näitä ovat vierintälaakerit ja hammasvaihteet. Värähtelymittauksin on mm. pystytty toteamaan kavitaatio siipipumpussa ja pumpun laakerivaurio [9].

Paineen mittauksen käyttö värähtelyn tutkimisessa

Värähtelyssä esiintyvien voimien vaikutus ilmenee nesteen painevaihteluna, jonka vaikutuksesta myös ympäröivä rakenne värähtelee. Dynaamisen paineen mittamiseen on käytetty erityisesti seuraavia anturirakenteita, joiden periaatteita on esitetty aiemmin paineen mittaukseen käytettävien menetelmien yhteydessä [13]:

- venymäanturit, kuten tavallinen venymäliuska-anturi ja pietsoresistiivinen puolijohdeanturi
- pietsosähköinen paineanturi.

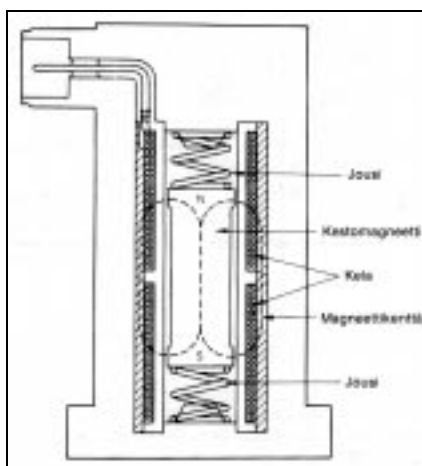
Värähtelyn mittaamiseen paineanturilla tulee käyttää dynaamista painetta mittaavaa anturia, joka kykenee rekisteröimään paineen korkeataajuisen vaihtelun. Mittaussignaalia käsitellään värähtelymittaussignaalien analyyseissä käytettävillä menetelmillä. Erityisen hyvin dynaamisen paineen mittaus sopii pumpuissa tai niiden moottoreissa tapahtuneiden muutosten havaitsemiseen [10].

Asema-, nopeus- ja kiihtyvyyssanturit

Laitteiston värähtelyjä voidaan mitata asema-, nopeus ja kiihtyvyyssantureilla. Tärkeätä on valita oikea mittaus suure, jolla saadaan parhaiten tutkittavan ilmiön taajuudet esille. Esimerkiksi vesiturbiinien tärkein taajuusalue on noin 1 - 1000 Hz, ja se tulee parhaiten esiin nopeutta mitattaessa. Yleisesti voidaan todeta, että [13]

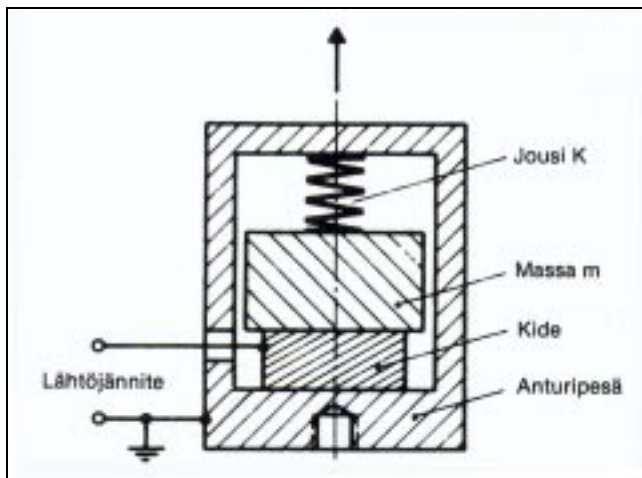
- poikkeamamittaukset soveltuvat alhaisille taajuuksille
- kiihtyvyyttä kannattaa mitata korkeilla taajuuksilla
- nopeus on käyttökelpoisin laajalla mittausalueella.

Värähtelymittaukseen käytettävän nopeusanturin periaatekuva on esitetty kuvassa 11. Anturi koostuu tavallisimmin kelasta ja jousien varassa olevasta kestopagneetista. Tärinän liikuttaessa anturin runkoa magneetti pyrkii massansa ansiosta pysymään paikallaan, jolloin kelan ja magneetin välille syntyy suhteellinen liike, ja kelaan indusoituu liikenopeuteen verrattava jännite.



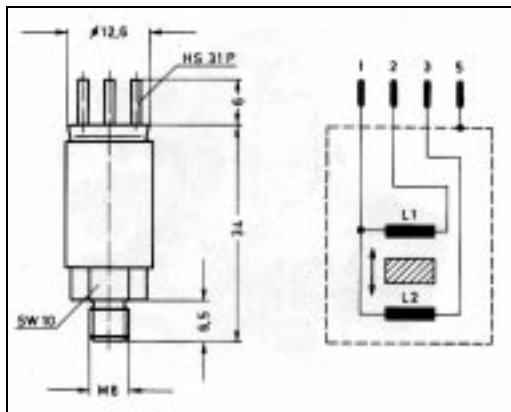
Kuva 11. Värähtelymittaukseen käytettävä nopeusanturi [14].

Kiihtyvyyttä mitataan tavallisimmin pietsosähköisillä antureilla, mutta myös induktiivisia, kapasitiivisia ja venymäliuska-antureita käytetään. Kuvassa 12 on esitetty pietsosähköisen kiihtyvyyssanturin periaatekuva.



Kuva 12. Pietsosähköinen kiihtyvyyssanturi [14].

Useimmat kiihtyvyyssanturit on tarkoitettu verraten pienitaajuisen värähtelyn mittaukseen. Esimerkiksi tyypilliset induktiivisilla kiihtyvyyssantureilla (kuva 13) mitattavat taajuudet ovat alle 1 kHz ja venymäliuska-antureilla korkeintaan 500 Hz luokkaa. Pietsosähköisillä antureilla pystytään mittaamaan korkeimpia taajuuksia, jotka maksimissaan ovat useiden kymmenien kilohertsien suuruisia. Teollisuuskäyttöön tarkoitettujen pietsosähköisten kiihtyvyyssanturien taajuusalueeksi riittää yleensä 1 - 5000 Hz. Teknisesti on mahdollista valmistaa ko. mittausalueelle myös kapasitiivisia antureita, mutta vakiotuotannossa olevat kapasitiiviset kiihtyvyyssanturit toimivat yleisimmin 2g - 3g kiihtyvyyssalueella.



Kuva 13. Induktiivisen kiihtyvyyssanturin periaatekuva [14].

Pietsosähköisten anturien anturisignaalia ei voi suoraan käyttää ohjausjärjestelmässä, vaan signaalin muokkaamiseen tarvitaan varausvahvistin. Varausvahvistin voi olla erillinen tai anturin sisään integroitu. Erillisen varausvahvistimen tarvitsevat yleensä kaikkein suurimman lähtöimpedanssin omaavat anturit, joiden herkkyys ilmoitetaan tavallisesti yksikössä pC/g (muissa mV/g). Näiden anturien haittapuolena on mm. lyhyt siirtomatka, hinta ja erikoiskaapelien ja -liittimien tarve. Kohteissa, joissa mittauksen taajuusalue on laaja ja lämpötila korkea, on käytännössä pakko käyttää erillisellä varausvahvistimella varustettua anturia. Taulukossa 7 on esitetty erään pietsosähköisen kiihtyvyyssanturin (Kistler 8704B500) ominaisuuksia.

Taulukko 7. Erään pietsosähköisen kiihtyvyyssanturin (Kistler 8704B500) ominaisuuksia [15].

Mitta-alue	-500...+500 g
Herkkyys	10 mV/g (-5...+5 %)
Maksimikiihtyvyyden (shokki) kesto	5000 g
Kynnysarvo	0.01 g
Taajuusalue	1...10 kHz (-5...+5 % raja) 0.6...12 kHz (-10...+10 % raja)
Resonanssitaajuus	50 kHz

5.2 Melun mittaaminen

Melu ei ole äänen fysikaalinen ominaisuus, vaan se määritellään yleensä ei-toivotuksi ääneksi. Kuulemisen yläraja on yleensä nuorilla ihmisillä noin 20 kHz. Tätä korkeampi aaltoliikkeen taajuus on ominaista ultraäänelle.

Karkeasti ottaen valtaosa hydrauliiikan äänestä muodostuu pumppuyksiköstä, johon kuuluu pumppu, sähkömoottori ja kytkin. Loput hydrauliiikan äänistä aiheuttaa virtaus, paineiskut sekä toimilaitteiden ja niiden kuormien väliset kytkennät. Poikkeuksia tavanomaiseen ääneen saavat aikaan mm. kavitoiminen, ilmavuoto, laakerivauriot, voimakkaat kulumiset, istukoiden värähtelyt, putkien huono tuenta, virtauksen nopeat suunnan muutokset, liian suuri paine ja voimakas sisäinen vuoto [13].

Äänen ja ultraäänien mittaukseen käytetään mikrofoneja, joilla mitataan ääntä eri taajuusalueilta. Mikrofoneja on erilaisille taajuusalueille, esimerkiksi 7 Hz - 8 kHz tai 6,5 Hz - 140 kHz. Vedestä tai erittäin kosteista tiloista melua mitataan hydrofonilla.

5.3 Esimerkkejä kaupallisista kiihtyvyyss- ja ääniantureista ja niiden toimittajista

Kiihtyvyyssantureita myyvät lukuisat laitetoimittajat, taulukko 8. Suomessa edustetuista merkeistä mainittakoon Monitran, Endevco, Isotron, ICS, Entran, Kistler, Kyowa ja Wilcoxon.

Taulukko 8. Värähtely- ja ääniantureita myyviä yrityksiä [8].

	Yrityksen edustamat anturit				
	Värähtely	AE	Ääni	Ultraääni	Muut
A-Com Oy	*		*		*
Amitra Oy	*				*
Arrow-Field Oy					*
Aseko Oy	*				*
Dosmar Oy	*				*
Electronor Oy					*
Elektro-Tukku Oy					*
Farnell Oy	*		*		*

Finn Metric Oy	*	*	*		*
Honeywell Oy	*				*
IFM Electronic Oy					*
Into-yhtiöt	*		*	*	*
Jacop Hatteland Oy					*
Kvartselektronik Oy	*				*
Mespek Oy	*				*
Murrelektronik Oy					*
NC-Point Oy	*	*	*		*
OEM Automatic Oy					*
Omron Electronis Oy					*
Oxxo Oy	*				*
Sensorola Oy					*
Sick Optio-Electronic Oy					*
SKS-automaatio Oy					*
Specel Oy	*	*			*
Tavron Oy	*				*
VTI Hamlin Oy	*	*			*

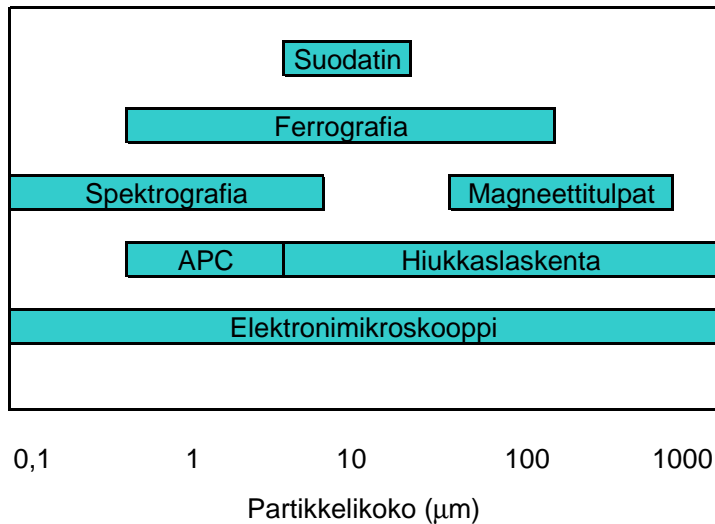
Mikrofonit

Suomessa mittauskäyttöön tarkoitettuja mikrofoneja myyvät vain muutamat yritykset. Finn Metric Oy:n edustamat, japanilaisen Ono Sokki Co:n valmistamat MI-mikrofonit sopivat maksimissaan 20 kHz taajuisen äänen mittaukseen. Näiden mikrofonien lämpötila-alue on -10 °C - +50 °C. Into-yhtiöiden myymien B & K -mikrofonien taajuusalueet yltyvät suurimmillaan 140 kHz:iin saakka. Lisäksi mikrofonit tarvitsevat esivahvistimen ja 200 voltin jännitteen syöttölaitteen, jotka saattavat moninkertaistaa kustannukset [16]. Markkinoilla on myös äänitehomittareita, jotka ilmaisevat suoraan äänitehon.

6 HYDRAULINESTEEN EPÄPUHTAUS- JA KUNTOANALYYSIT

6.1 Kiintoainehiukkasten mittaus

Hydrauliikassa on erityisen tärkeää säilyttää nesteen puhtauden taso, jolla järjestelmä on suunniteltu toimimaan. Esimerkiksi servoventtiilin luistin välys rungossa on tyypillisesti 3 µm luokkaa. Nesteen epäpuhtauksien määrä pidetään alhaisena tehokkaalla suodatuksella ja sitä tarkkaillaan säännöllisin tai jatkuvin öljyanalyysin. Alle 5 µm hiukkasten tunnistamiseen voidaan käyttää elektronimikroskopiaa, automatisoituja hiukkaslaskimia, spektrografiaa ja magneettisia hiukkasantureita (kuva 14). Öljyn ja hydraulinesteiden epäpuhtausanalyysistä on laajempia esityksiä, esimerkiksi lähteessä [17].



Kuva 14. Hydraulinesteen epäpuhtauden monitorointiin käytettävissä olevat menetelmät ja niiden sovellusalueet partikkelikoon mukaan. APC = automaattinen hiukkaslaskuri [10].

6.1.1 Öljynäytteiden tarkastusmenetelmien kuvauksia [10]

Optinen laskenta

Optinen laskenta mikroskoopin avulla perustuu mikroskoopilla tapahtuvaan näytteiden tarkasteluun näytelevyllä. Menetelmä on tarkka ja sen sovellusalue on laaja, mutta sen heikkoutena on valtava työmäärä. Kuvankäsittelyohjelmiston avulla tapahtuva tarkastelu on periaatteessa sama menetelmä, mutta on toteutettu tietokoneen avulla.

Automaattiset hiukkaslaskimet

Automaattiset hiukkaslaskimet perustuvat siihen, että öljy virtaa valolähteen ja herkän anturin välistä, joka varjojen koon avulla määrittää hiukkasten kokojakauman.

Elektronimikroskopia

SEM-elektronimikroskopiamenetelmällä kyetään tarkastelemaan varsin pieniä hiukkasia, mutta laitteisto on kallis ja käyttö vaatii suuren työmäärän. Tulosten tulkitsemiseen on kehitetty ohjelmistoja.

Jakauma-analysaattorit

Laserdifraktioon perustuvia jakauma-analysaattoreita on käytetty erityisesti dieselmoottorien voiteluöljyjen tarkastelussa. Tavanomaiset menetelmät soveltuvat kyseiseen kohteeseen huonosti johtuen öljyssä olevista palamistuotteista.

Reikälevyt

Reikälevyjen toiminta perustuu tietyn kokoisten reikien kykyyn pysäyttää tietyn kokoiset hiukkaset. Menetelmää voidaan hyödyntää sekä jatkuvatoimisena että tarkasteltaessa erillisiä näytteitä. Menetelmän rajoituksena on tarkasteltavaksi sopivan hiukkaskokojakauman suppeus.

Vertailumenetelmät

Vertailumenetelmissä näytelevylle otettua näytettä verrataan vastaavaan näytteeseen tai valitaan lähinnä samankaltainen näytelevy.

Painovoimaan perustuvat menetelmät

Painovoimaan perustuvissa menetelmissä suodatetaan öljynäytteestä hiukkaset suodattimeen ja suoritetaan punnitus ilman hiukkasia ja hiukkasten kanssa. Menetelmän haittapuolena on suhteellisen vaatimaton tarkkuus.

Magneettiset menetelmät

Magneettisilla menetelmillä määritetään magneettisten hiukkasten määrä näytteessä. Näitä menetelmiä on käytetty hyvällä menestyksellä erityisesti voimansiirtojärjestelmien voiteluaineiden tarkasteluun.

Kulumishiukkasten ominaispiirteiden määrittäminen

Edellä kuvattujen menetelmien ohella on olemassa joukko menetelmiä, joilla voidaan määrittää öljyssä olevien kulumishiukkasten ominaispiirteitä. Näitä menetelmiä ovat mm.

- optinen ja elektronimikroskoopi
- ferrografia
- röntgensädeanalyysi
- spektrometria
- infrapuna-analyysi.

Erialaisten kulumistapahtuen tuottamien erityyppisten kulumishiukkasten muotoja on selostettu esimerkiksi lähteessä [18].

6.2 Kemialliset mittaukset [19]

Vesipitoisuuden online-mittaus

On-line-mittaukseen soveltuvat vesipitoisuuden mittalaitteet poikkeavat toisistaan toimintatavoiltaan. Osa vesipitoisuusanalysaattoreista toimii infrapuna- ja laserperustuen. Osa analysaattoreista toimii vedenhöyrynpaineen mittaukseen perustuen siten, että öljyssä oleva sekä vapaa että liuenneet vesi höyrystyy pois öljyn joukosta ja muodostunut höyrynpaine mitataan tarkalla paineanturilla.

TAN-titraus

TAN-luvulla kuvataan sitä emäksen määrää, joka tarvitaan neutraloimaan öljyssä olevat happamat aineosat. TAN-arvo suurenee öljyn vanhentuuessa. Käytännössä titraus suoritetaan siten, että öljynäyte lisätään tolueneen ja isopropanolia sisältävään liuottimeen ja titrataan vedettömään isopropanoliin liotetulla KOH:lla. Kone määrittää päätepisteen potentiometrisesti.

Karl Fisher -titraus

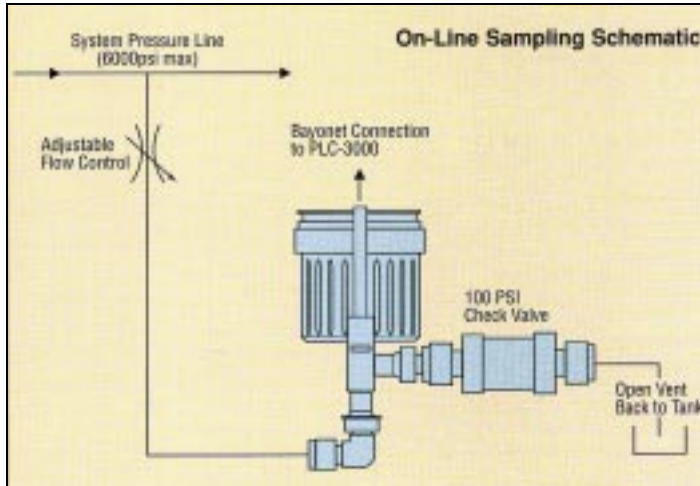
Karl Fisher -titrausta käytetään öljyn vesipitoisuuden määrittämiseen pullonäytteestä yleensä alle 0,5 % vesipitoisuuksilla. Suurempia pitoisuuksia voidaan määrittää ksyleenitislauksella. Titrauksiin voidaan käyttää myös automaattisia titrauslaitteita, joissa titraus perustuu elektrodien välisen potentiaalieron mittaamiselle.

6.3 Kaupallisia öljyn kunnonvalvonta-antureita ja toimilaitteita

Kannettavat öljyanalysaattorit ja partikkelilaskurit

Markkinoille on viime vuosina tullut useita kannettavia öljyanalysaattoreita ja partikkelilaskureita. Öljyanalysaattorit ja partikkelilaskurit ovat yleensä optisia valonpeitto- tai valonsirontamenetelmään perustuvia laitteita, joissa näyteöljy johdetaan valolähteen ja anturin välisestä kapeasta raosta ja likapartikkelit aiheuttavat yksitellen anturille kokoonsa verrannollisen varjokuvan, mikä aiheuttaa pulssimaisen muutoksen fotosensorin jännitetasoon. Optisten laitteiden heikkoutena on yleensä se, ettei öljy saa sisältää liikaa ilmaa ja liukene-

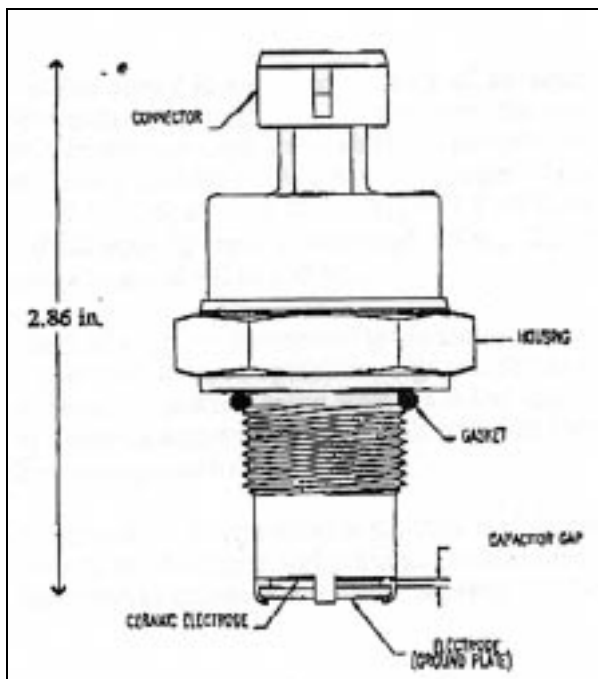
matonta vettä, koska ko. aineiden rajapinnat saavat aikaan virheellisen pulssin. Eräissä analysaattoreissa toiminta perustuu paine-eroon suodattimissa, jolloin menetelmä on tunteeton vedelle ja ilmalle. Esimerkkinä kannettavista on-line-öljyanalysaattoreista ja partikkelilaskimista voidaan mainita Hydac Oy:n maahantuoma Hydac 2110 sekä Finn-Filter Oy:n edustamat Parker PLC-3000 ja UCC 20.9021. On-line-partikkelilaskurin toimintaperiaate on esitetty kuvassa 15.



Kuva 15. On-line-partikkelilaskennan periaate [20].

Kavlico-anturi [21]

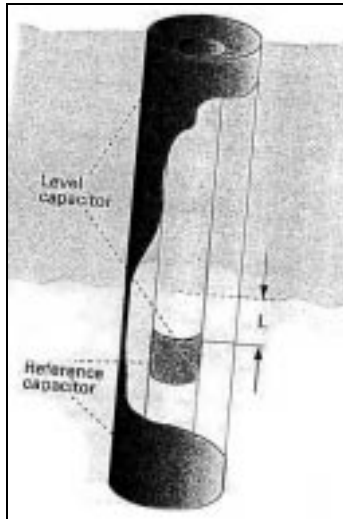
Öljyn tilan on-line-kunnonvalvontaan on kehitetty öljyn dielektrisyysvakiota mittaava kapasitiivinen anturi (Kavlico Corporation, USA). Dielektrisyysvakion arvo kasvaa öljyn vanhentuessa, ja se korreloi kokonaishappoluvun (TAN) kanssa. Kokonaishappoluku on hyvä öljyn huononemisen indikaattori. Esimerkiksi lähteen [19] mukaan öljy on syytä vaihtaa kun TAN-arvo kohoaa yli yhden. Kavlico-anturi on periaatteeltaan kondensaattori, jonka kapasitanssi lasketaan dielektrisyysvakion funktiona. Anturin periaatekuva on esitetty kuvassa 16.



Kuva 16. Kavlico-anturi [21].

TEMIC-anturi [22]

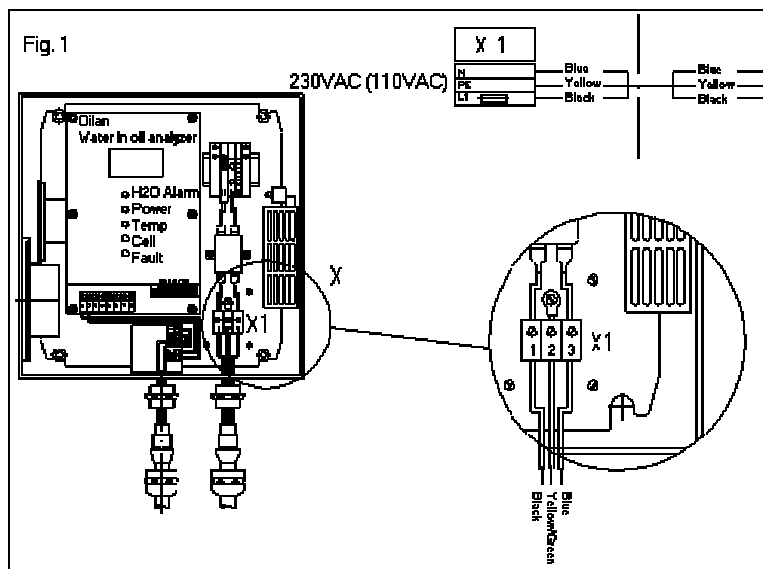
Toinen öljynvaihtojankohdan määrittämiseen kehitetty anturi on TEMIC QLT (quality-level-temperature), joka kahden kondensaattorin avulla mittaa kapasitanssia ottaen huomioon sekä dielektrisyuden että öljyn tason, ja mittaa lisäksi öljyn lämpötilan. Mercedes-Benz on ensimmäisenä autonvalmistajana ottanut käyttöön mittauksiin perustuvan öljyn vaihtovälin määrittämisen. TEMIC-anturin periaatekuva on esitetty kuvassa 17.



Kuva 17. TEMIC-anturi [22].

Oilan-vesipitoisuusanalysointilaite [11]

Kuvassa 18 on esitetty Kytölä Oy:n markkinoiman Oilan-vesipitoisuusanalysointilaitteen periaatekuva. Analysointilaite toimii infrapuna-ilmalämpömittauksella. Mittauskanavan intensiteetti vähenee öljyssä olevan irtoveden vaikutuksesta, jolloin mitattavien kanavien eroista saadaan mittausviesti vahvistettuna laitteen elektroniikkaosassa. Oilan-vesipitoisuusanalysointilaite sopii parhaiten pienten (0-0,1 %) vesipitoisuuksien mittaamiseen.



Kuva 18. Oilan-vesipitoisuusanalysointilaitteen periaatekuva [11].

7 TEHON KULUTUKSEN JA MUIDEN SUORITUSARVOJEN SEURANTA

Jos hydraulisen laitteen työkierto ja kuormitus pysyvät jatkuvasti samanlaisina, voidaan järjestelmän kuntoa arvioida sen tehonkulutuksen mukaan. Hydraulipainetta tuottavan pumpun virran mittaaminen antaa yhden suureen järjestelmän tehon kulutuksen tarkkailuun.

Toimilaitteiden liikeaikoja voidaan seurata, mutta tähän pätee sama kuin edellisessä kappaleessa, tehon kulutuksesta; kaikkien seurattavaan suureeseen vaikuttavien tekijöiden vaikutuksen suuruuden täytyy olla tiedossa.

8 SÄÄTÖJÄRJESTELMÄSTÄ SAATAVA INFORMAATIO

Servohydrauliikassa käytetään sähköisiä toimilaitteita liikuttamaan venttiilin luistia. Luistin asemasignaali ja luistin liikuttamiseen tarvittava virta ovat usein mitattavissa säätöpiiristä, jolloin näitä voidaan käyttää venttiilin toiminnan monitorointiin. Toimilaitteen toimintaa mittaavan anturin signaalia voidaan myös käyttää monitorointiin. Säätöjärjestelmän diagnostiikka edellyttää useimmiten piirin toiminnan analyttistä mallintamista tai jonkinlaisen sääntöpohjaisen asiantuntijajärjestelmän kehittämistä [23], [24].

Ohjausjärjestelmä tarjoaa lähteen [25] mukaan käytännössä viisi eri mahdollisuutta laitteen vikaantumisen havaitsemiseen:

1. Kytkimet: kytkinten asemia voidaan tarkkailla jatkuvasti. Kun laitteen kaikki mahdolliset toimintatilat ovat tiedossa ja lisäksi tiedetään, missä asennossa kunkin kytkimen kuuluu olla tietyssä toimintatilassa, voidaan poikkeavat kytketyymiset havaita.
2. Analogiset anturit: anturin lukemaa tarkkaillaan ja kun lukema ylittää asetetun rajan saadaan vikaindikaatio.
3. Määrät: määrät ovat lukemia, jotka laitteen ohjausjärjestelmä laskee tai muutoin tuottaa analogisten anturien lukemista ja kytkinten asemista. Näiden tarkkailuun pätee sama kuin analogisten anturienkin tarkkailuun.
4. Kestoajat: kestoajat ovat laitteen toimintasekvenssien pituuksia. Kun laite toimii normaalisti, jonkin toiminnon suorittamiseen kuluva aika pysyy hyvin stabiilina. Vikaantuminen, esimerkiksi kitkan lisääntyminen voi aiheuttaa toiminnon hidastumisen. Kestoajoja voidaan seurata trendien avulla ja niillekin voidaan asettaa hälytysrajoja.
5. Poikkeamatiheydet; laitteet sisältävät usein toimintoja, jotka kytkeytyvät päälle poikkeamatapauksissa ja virhetilanteissa. Poikkeamasekvenssien kytkeytymisten tiheyttä seurataan trendien avulla.

Tässä projektissa (Koneiden ja laitteiden kunnan ja käyttöolosuhteiden monitorointi ja diagnostiikka) on tutkittu säätöjärjestelmästä saatavan informaation hyödyntämistä diagnostiikassa, joka raportoidaan erillisessä tutkimusraportissa "Mallipohjainen diagnostiikka".

9 KÄYTÄNNÖN ESIMERKKEJÄ HYDRAULIIKAN DIAGNOSTIIKASTA

Kaivoksen työkoneen diagnostiikka

US Bureau of mines on toteuttanut diagnostiikkaprojektia kaivoksessa käytettävälle työkoneelle. Hydraulikkajärjestelmän kuntoa seurataan koneeseen asennettujen antureiden avulla ja diagnoosin tuottamiseen käytetään itse ohjelmoitua tietämispohjaista asiantuntijajärjestelmää. Hydrauliohjauksen likaantumista tarkkaillaan suodattimen yhteyteen asennettujen painelähetinten kautta. Diagnostiikkaprojektista on kattava selvitys lähteessä [26], [27].

Servoventtiilien kunnonvalvonta [29]

Sulkuventtiilin erotetulla tilavuusvirtamittarilla mitatusta tilavuusvirtavahvistuskäyrästä (IQ-käyrä) voidaan lähteen [29] mukaan päätellä, onko venttiili toimintakunnossa vai ei, ja lisäksi jossain määrin mahdollisen häiriön laatua. Esimerkiksi nykäyksittäin etenevä käyrä on todennäköisesti oire epäpuhtaushiukkasista luistin ja pesän välillä. Huomattava hystereesin lisääntyminen ilman takertelua tai pienentynyt venttiilin maksimitilavuusvirta johtuneet puutteellisesta esiohjausöljyn virtauksesta. Käyrästä ilmenevä suuri vahvistus lähellä nolla-ohjausta antaa aiheen epäillä ohjausreunojen pyöristymistä. Muita tehokkaita servoventtiilin tilan mittaamenetelmiä ovat lähteen mukaan painevahvistuksen mittaaminen, askelvasteen mittaaminen, luistin päätykammioiden paineiden mittaaminen ja venttiilin ohjausvirran mittaaminen. Eri vikatyypin aiheuttamat muutokset servoventtiilin ominaisuuksiin on koottu taulukkoon 8.

Taulukko 8. Eri vikatyypin aikaansaamat muutokset servoventtiilin ominaiskäyriin [29].

vika	I-Q -käyrä	I-p -käyrä	askelvaste	muut vaikutukset
tukkeutuneet esiohjaus-suodattimet	pienentynyt Q_{max} , lisääntynyt hystereesi	lisääntynyt hystereesi, madaltunut K_p -arvo	erittäin hidus	
rikkoutunut tiiviste (paine-linjasta toimilinjaa)	toispuoleinen (nollapisteen siirtymän seurauksena)	lisääntynyt hystereesi, nollapiste siirtynyt	ei juurikaan vaikutusta	voimakas nollapisteen siirtymä
kuluneet ohjareunat	vahvistus lisääntyy pienillä ohj.arvoilla	lisääntynyt hystereesi, madaltunut K_p -arvo	ei juurikaan vaikutusta	luistille negatiiviset peitot
epäpuhtas öljy	askelmaisuus, lisääntynyt hystereesi	lisääntynyt hystereesi	ei juurikaan vaikutusta	pölyläisi jumittuu helposti keski-asentoonsa
tukos toisessa esiohjauslinjassa				pölyläisi siirtyy ääriasentoon, ei vastaa ohjaukseen
osittainen tukos toisessa esiohjauslinjassa	kuten rikkoutuneella tiivisteellä	nollapiste siirtynyt	toiseen suuntaan hyvin hidus vaste	nollapiste siirtynyt huomattavasti

On-line -mittausmenetelmien testaus

Lähteessä [28] on testattu kolme hydraulinesteen on-line -epäpuhtausanalyysiin soveltuvaa mittaamenetelmää. Automaattinen hiukkaslaskuri pystyi tunnistamaan ISO 4406 9/6 epäpuhtaustasoon ja suodattimen tukkeutumiseen perustuva epäpuhtausanalyysiaattori 14/11 -epäpuhtauden. Lähteessä korostetaan, että on-line -monitorointijärjestelmän kustannusten täytyy olla pienemmät kuin odottamattomista seisokeista aiheutuvien kustannusten, jotta monitorointi olisi perusteltua [28].

10 YHTEENVETO

Hydraulijärjestelmät ovat usein kriittisiä komponentteja yritysten tuotantojärjestelmissä. Tästä syystä hydraulijärjestelmän kunnan seuranta on järkevää ennakoivaa kunnossapitoa. Antureita on nykyään tarjolla eri sovelluksiin hyvin laaja valikoima.

Hydrauliöljyille asetetaan suuret vaatimukset, jotta ne pystyvät kunnolla täyttämään tehtävänsä. Öljyn kuntoa tarkkailemalla voidaan saada tietoa koko järjestelmän kunnosta. Hydrauliöljyistä mitattavia suureita ovat mm. kiintoainepitoisuus, viskositeetti, happamuus, lisäainepitoisuudet ja vesipitoisuus. Laitteistojen kehittyessä online-mittaus on tullut voimakkaasti esiin, ja tässä esityksessä on tarkasteltu näihin liittyviä mittalaitteita ja antureita.

Hydraulisten laitteiden kuntoa kannattaa seurata myös toiminnallisten parametrien kautta. Tällaisia ovat laitteiston suorituskykyä mittaavat suureet, kuten virtaus, paine ja lämpötila. Tässä esityksessä esitellään tavallisimmat kyseisten suureiden mittaukseen käytettävät mittausmenetelmät ja anturityypit.

Värähtely- ja äänimittaus sekä tässä esityksessä vähemmälle huomiolle jätetty akustinen emissio ovat myös hydraulilaitteistojen kunnanvalvontaan soveltuvia menetelmiä. Erityisesti näiden menetelmien käytön oletetaan tulevaisuudessa lisääntyvän öljyn kunnonseurannan tukena, jolloin vaurioiden kehittyminen voidaan havaita mahdollisimman varhaisessa vaiheessa.

Tässä raportissa on pyritty lisäksi esittelemään kaupallisia mittausantureita ja niiden toimittajia yhteystietoineen, joskin laajan tarjonnan vuoksi tarkemmin esiteltäviksi on voitu ottaa vain joitakin esimerkkejä. Koska aiheeseen liittyvä aineisto on muutenkin erittäin laaja, on raportissa laajojen selvitysten sijasta pyritty selkeisiin lähdeviitteisiin, joiden avulla on mahdollista perehtyä tarkemmin hydraulijärjestelmien monitorointiin ja diagnostiikkaan.

Kirjallisuusviitteet

1. Luukkainen J., Wallin P., Äijälä A. Anturitekniikan perusteita. Espoo: TKK, 1993. 217 s.
2. Pihkala, J., Prosessisuureiden mittaustekniikka. Opetushallitus, Helsinki, 1988. 148 s.
3. Väyrynen P., Hydrauliiikan mittaukset. Kunnossapitokoulu, Kunnossapito, No. 5, 1991.
4. Bauer, H., Cypra, A., Dinkler, F., Kunne, P., Röder, J., Bosch, R. Autoteknillinen taskukirja. Gummerus Oy, Jyväskylä, 1993. 797 s.
5. Halme, J., Mikromekaaniset MEMS-anturit ja niiden käytettävyys kunnanvalvonnassa. Espoo: Valtion teknillinen tutkimuskeskus, 1997. (Raportti VALB255) 40 s.
6. Hunt, T., Vaughan, N. Hydraulic handbook. Elsevier Science, 1996. 742 s.
7. Oy Danfoss Ab, Pressure transmitters and temperature sensors for hydraulic systems. Tuotesite, 1999.

8. Elkomit Ry., Elektroniikka osto-opas. Helsinki Media Company Oy, 1999.
9. Hunt, T. A review of condition monitoring systems applicable to fluid power systems. Teoksessa: Proceedings of the 7th International Fluid Power Symposium. Englanti, BHRA, 1986. s. 285-294
- 10 Rao B. (toim.). Handbook of condition monitoring. Elsevier Science LTD, 1996. 603 s.
11. Kytölä Oy, Kytölä-virtausmittarit. Tuote-esite, 1994.
12. Hunt, T. Condition monitoring of mechanical and hydraulic plant. Chapman & Hall, 1996. 270 s.
13. Rinkinen, J., Hydraulisen värähtelyn ja melun mittaaminen. Hydraulinen värähtely ja melu, täydennyskoulutuskurssi 16.-17.11.1983., Tampere: TTKK 1983. (Opetusmoniste 94)
14. Kuoppala, R., Nevala, K., Anturit koneautomaatiossa. Tekninen tiedotus, No 21, 1986. Metalliteollisuuden kustannus Oy, Helsinki. 88 s.
15. Aseko Oy, Tuote-esite, 1997.
16. Brüel & Kjaer, Sound & Vibration Catalogue. Tuote-esite, 1997.
17. Välttilä, J. Voitelu- ja hydraulioöljyjen epäpuhtausanalyysit. Espoo: Valtion teknillinen tutkimuskeskus, 1988. (VTT Tiedotteita 911)
18. Kurahashi, M., Applications of ferrography to iron- and steelmaking plant maintenance. Maintenance Management International, No. 5, 1985. s. 269-278.
19. Rinkinen, J., Kiiso, T., Ihanamäki, T. Öljyanalyysit hydraulijärjestelmien kunnonvalvonnassa. Kunnossapitokoulu, Kunnossapito. No 3, 1995.
20. Parker Filtration, PLC 3000. Tuote-esite, 1999.
21. Park, K., Low cost oil deterioration sensor for on-board diagnostics. Kavlico Corporation, USA.
22. Engine oil drain intervals could be maximised by on-board sampling. Paramins post, Winter 1998, s. 3-4.
23. Gertler, J. Survey of model-based failure detection and isolation in complex plants. Control Systems, 1988, vol 8. s. 3-11
24. Isermann, R. Supervision, fault detection and fault-diagnosis methods -an introduction. Control Engineering Practice, 1997, Vol. 5. s. 639-652
25. Kurki, M. Model-based fault diagnosis for mechatronic systems. Espoo, VTT, 1995. 116 p. (VTT Publications; 223)

26. Mitchell, J. Diagnostic expert system techniques for improving hydraulic maintenance of a continuous mining machine. Mining engineering, vol 43, N:o 4, 1991. s. 419-423.
27. Mitchell, J. Diagnostic Maintenance expert system for the hydraulic subsystem of a continuous miner. IEEE transactions on industry applications, Vol. 25, N:o 5, 1989. s. 841-845
28. Radzikowski, P. On-line monitoring of contamination level in hydraulic oils. Teoksessa: Holmberg, K., Folkeson, A. (toim.). Operational reliability and systematic maintenance. Elsevier Science, 1991. s. 199-221
29. Heinonen, M., Sähköhydraulisen servoventtiilin vikadiagnostiikka. Diplomityö, Tampereen teknillinen korkeakoulu, Konetekniikan osasto, 1994. 95 s.