

Opinnäytetyö AMK

Konetekniikka

Koneautomaatiotekniikka

2023

Niklas Timonen

Bucket position sensor

– Sandvik Mining and Rock Solutions



Opinnäytetyö AMK | Tiivistelmä

Turun ammattikorkeakoulu

Konetekniikka | Koneautomaatiotekniikka

2023 | 55 sivua

Niklas Timonen

Bucket position sensor

Tämän opinnäytetyön tarkoituksena oli löytää uusi anturiratkaisu kaivoslastauskoneen kauhan asennon tarkkailemiseen. Työn toimeksiantajana toimi Sandvik Mining and Rock Solutions Oy.

Työn teoriaosuudessa käydään läpi hydraulikan perusteita, sekä anturitekniikkaa ja erilaisia anturityyppejä. Pääpaino on antureissa. Varsinaisessa työssä käydään läpi teoriaosuudessa mainittuja antureita ja pohditaan niiden soveltuvuutta, sekä hyviä ja huonoja puolia lastauskoneen kauhan asennon tarkkailemisessa.

Työn tuloksena päädyttiin induktiiviseen lineaarianturiin, jonka toiminta täytyy vielä todentaa prototyyppiasennuksella ennen kuin anturia voidaan harkita käytettävän tämänhetkisen ratkaisun sijaan.

Asiasanat:

Anturitekniikka, hydraulikka, lastauskone, kauha

Bachelor's Thesis | Abstract

Turku University of Applied Sciences

Mechanical Engineering | Machine Automation

2023 | 55 pages

Niklas Timonen

Bucket position sensor

The purpose of this thesis was to find a new solution for monitoring the bucket position of a mining loader. Thesis was commissioned by Sandvik Mining and Rock Solutions Oy.

In the theory part of the work, the basics of hydraulics, as well as sensor technology and different types of sensors are reviewed. The main focus is on the sensors. In the actual work, the sensors mentioned in the theory part are reviewed and their applicability, as well as the advantages and disadvantages of monitoring the position of the loader's bucket are considered.

The result of the thesis was an inductive linear sensor the operation of which still needs to be verified with a prototype installation before the sensor can be considered to replace the current solution.

Keywords:

Sensor technology, hydraulics, loader, bucket

Sisältö

| | |
|--|-----------|
| 1 Johdanto | 8 |
| 2 Tausta | 9 |
| 2.1 Yritysesittely | 9 |
| 2.2 Lastauskoneet | 10 |
| 3 Hydrauliikka | 12 |
| 3.1 Sylinterien rakenne ja niiden toiminta | 13 |
| 3.1.1 Yksitoimiset sylinterit | 14 |
| 3.1.2 Kaksitoimiset sylinterit | 15 |
| 4 Anturitekniikka | 16 |
| 4.1 Yleistä | 16 |
| 4.2 Signaalityypit | 17 |
| 4.3 Mittaussignaalin käsittely | 18 |
| 4.4 Mekaaniset anturit | 20 |
| 4.5 Induktiiviset anturit | 21 |
| 4.6 Kapasitiiviset anturit | 23 |
| 4.7 Magneettiset anturit | 24 |
| 4.7.1 Reed-kytkin | 24 |
| 4.7.2 Hall-anturit | 25 |
| 4.7.3 Magnetostriktiivinen lineaarianturi | 27 |
| 4.8 Optiset anturit | 29 |
| 4.8.1 Vastaanotin periaate | 30 |
| 4.8.2 Lähetin-vastaanotin periaate | 30 |
| 4.8.3 Suoraan heijastava periaate | 31 |
| 4.8.4 V-heijastava periaate | 32 |
| 4.8.5 LIDAR | 34 |
| 4.9 Siirtymän ja kiertymiskulman mittaus | 35 |
| 4.9.1 Inkrementtianturit | 35 |
| 4.9.2 Absoluuttianturi | 38 |

| | |
|---|-----------|
| 4.9.3 Potentiometrianturi | 39 |
| 4.9.4 Induktiivinen liikeanturi eli differentiaalimuuntaja (LVDT) | 40 |
| 4.9.5 Vaijerivetoanturit | 42 |
| 5 Anturin valinta | 43 |
| 5.1 Nykyinen anturiratkaisu | 43 |
| 5.2 Absoluuttianturi | 45 |
| 5.3 Vaijerivetoanturi | 47 |
| 5.4 Induktiivinen lineaarianturi | 49 |
| 5.5 Lidar-anturi | 51 |
| 6 Yhteenveto/pohdinta | 52 |
| Lähteet | 53 |

Kuvat

| | |
|---|----|
| Kuva 1 Maanalainen Toro LH410-lastauskone (Sandvik 2023.) | 10 |
| Kuva 2 Maanalainen Toro TH551i-dumpperi (Sandvik 2023.) | 11 |
| Kuva 3 Hydraulisylinteri (Kajaste ym. 2008, 195.) | 13 |
| Kuva 4 Yksitoimisen sylinterin piirrosmerkki (Keinänen & Kärkkäinen 2009, 255.) | 14 |
| Kuva 5 Yksitoimisen juosipalautteisen sylinterin piirrosmerkki (Keinänen & Kärkkäinen 2009, 255.) | 14 |
| Kuva 6 Kaksitoimisen sylinterin piirrosmerkki. (Keinänen & Kärkkäinen 2009, 255.) | 15 |
| Kuva 7 Binäärisignaali (Keinänen & Sumujärvi 2019, 206.) | 17 |
| Kuva 8 Analoginen signaali (Keinänen & Sumujärvi 2019, 206.) | 17 |
| Kuva 9 Esimerkki analogisen signaalin muuttamisesta digitaalseksi 2-bittiseksi signaaliksi. (Keinänen & Sumujärvi 2019, 206.) | 18 |

| | |
|---|----|
| Kuva 10 Taulukko desimaaliluvun esittämisestä eri koodaustavoilla. (Keinänen & Sumujärvi 2019, 207.) | 19 |
| Kuva 11 Mekaaninen anturi, jossa on vipu ja rulla tunnistuselimenä. (Omron 2022.) | 20 |
| Kuva 12 Induktiivisen anturin toimintaperiaate. Kuvassa näkyy, kuinka tuntokelan (kuvassa LC-oskillaattori Käämi) ympärille alkaa muodostua pyörrevirtoja metallikappaleen tullessa magneettivuohon. Värähtelypiirin värähtely lakkaa ja anturi antaa signaalin tunnistuksesta. (Keinänen & Sumujärvi, 2019 209.) | 22 |
| Kuva 13 Kapasitiivisen anturin toimintaperiaate. (Keinänen & Sumujärvi 2019, 211.) | 23 |
| Kuva 14 Reed-kytkimen toiminta. (Pic 2022.) | 24 |
| Kuva 15 Hall-ilmio (Mouser 2022.) | 25 |
| Kuva 16 Hall-magneettikytkin (Keinänen & Sumujärvi 2019, 213.) | 26 |
| Kuva 17 Magnetostriktiivisen lineaarianturin toimintaperiaate. (Your electrical guide 2022.) | 28 |
| Kuva 18 Magnetostriktiivinen lineaarianturi. (Sensorola 2022.) | 28 |
| Kuva 19 Vastaanotin periaate (Metropolia 2022.) | 30 |
| Kuva 20 Lähetin-vastaanotin periaate (Metropolia 2022.) | 30 |
| Kuva 21 Yksi lähetin-vastaanotinparin sovelluskohteista on automaattisesti toimiva portti. Tätä voidaan esimerkiksi soveltaa siihen, että auton tullessa portin eteen, portti aukeaa tai sitten että portti ei voi sulkeutua, jos jokin/joku on portin välissä. (Keinänen & Sumujärvi 2019, 214.) | 31 |
| Kuva 22 Suoraan heijastava periaate (Metropolia 2022.) | 31 |
| Kuva 23 Esimerkkisovellus peiliheijasteisen anturin käytöstä kuljettimessa (Keinänen & Sumujärvi 2019, 215.) | 32 |
| Kuva 24 V-heijastava periaate (Metropolia 2022.) | 32 |
| Kuva 25 Esimerkkisovellus kohteesta heijastavasta anturista (Keinänen & Sumujärvi 2019, 216.) | 33 |
| Kuva 26 LIDAR-anturi. Tämäntyyppistä anturia voidaan käyttää esimerkiksi henkilömäärän laskemiseen lentokentillä tai automaattiseen ajoneuvon ohjaukseen. (Sick 2023.) | 34 |

| | |
|---|----|
| Kuva 27 Inkrementtianturin periaatekuva (Keinänen & Sumujärvi 2019, 221.) | 35 |
| Kuva 28 Tyypillinen inkrementtianturi (Keinänen & Sumujärvi 2019, 221.) | 36 |
| Kuva 29 Inkrementtianturin toimintaperiaate hilakiekolla, jossa on reikiä (Keinänen ym. 2007, 200.) | 37 |
| Kuva 30 Inkrementtianturin toimintaperiaate hilakiekolla, jossa on takaisin heijastavia ja takaisin heijastumattomia kohtia. (Keinänen ym. 2007, 200.) | 37 |
| Kuva 31 Gray koodattu absoluuttianturin koodikiekko (Keinänen & Sumujärvi 2019, 222.) | 38 |
| Kuva 32 Lineaaripotentiometri (Opkon 2022.) | 39 |
| Kuva 33 Induktiivisen liikeanturin (LVDT) toiminta. (Thomasnet 2023.) | 41 |
| Kuva 34 Induktiivinen liikeanturi (Megatron 2023.) | 41 |
| Kuva 35 Vaijerivetoanturi (Sick 2023.) | 42 |
| Kuva 36 Kuvassa LH514-lastauskone. Kippisylinteri on merkitty kuvaan nuolella. (Sandvik 2023.) | 43 |
| Kuva 37 Lastauskoneen kauha kuljetusasennossa. (Sandvik 2023.) | 44 |
| Kuva 38 Lastauskoneen kauha tyhjennysasennossa. (Sandvik 2023.) | 44 |
| Kuva 39 Poikkileikkaus vaijerivetoanturista, joka tulee sylinterin sisälle. Kuvassa Siko:n SGH10 vaijerivetoanturi. (Siko 2023.) | 48 |
| Kuva 40 Ulkoinen vaijerivetoanturi. Kuvassa Siko:n SG42 vaijerivetoanturi ja vaijerin päässä on kierretanko. (Siko 2023.) | 49 |

1 Johdanto

Opinnäytetyön tavoitteena on kartoittaa erilaisia anturivaihtoehtoja ja niiden soveltuvuutta Sandvikin automaattitoimisten lastauskoneiden kauhan asennon tarkkailussa nykyisen anturiratkaisun tilalle. Nykyisen anturiratkaisun ongelmia ovat anturin kallis hinta, sekä anturin hankala sijainti (anturin vaihtaminen vikaantuessa haastavaa). Lisäksi kustannuksia aiheutuu useamman nimikkeen varastoisemisesta ja siihen liittyvästä muusta logistiikasta. Sylinterikoodeja on tällä hetkellä kahta erilaista, eli anturoidun sylinterin koodi ja anturoimattoman sylinterin koodi. Yhden ja saman sylinterin käyttö alentaisi kustannuksia varastoinnin ja logistiikan suhteen, sekä samaa sylinteriä voitaisiin käyttää kaikissa saman kokoluokan lastauskoneissa. Uuden anturiratkaisun tulisi olla edullisempi ja/tai helpommin vaihdettavissa, sekä antaa reaaliaikainen kauhan asematieto mahdollisimman hyvällä tarkkuudella.

Opinnäytetyössä käydään läpi eri anturityyppien hyviä ja huonoja puolia, sekä pohditaan sopivatko ne haluttuun käyttötarkoitukseen hinnan, asennettavuuden (anturin vaihtamisen) sekä haastavien olosuhteiden asettamien vaatimusten, kuten kestävyys suhteen.

2 Tausta

Opinnäytetyö työ on tehty insinööritoimisto Comatec Oy:n asiakasyrityksen Sandvik Oy:n tarpeesta. Opinnäytetyötä tehdessä käytössä on Turun Comatecin tilat ja tietokone, jossa tarvittavat suunnitteluohjelmat, mutta opinnäytetyö tehdään Sandvik-konserniin kuuluvalla Sandvik Mining and Rock Solutions Oy:n Turun yksikölle. Yhteyshenkilöinä toimivat Turun Sandvikin puolesta tuotekehityspäällikkö Jussi Mikkola.

2.1 Yritysesittely

Sandvik on kaivos- ja urakointiteollisuuteen, metallintyöstöön, sekä materiaalitekologiaan erikoistunut teollisuuskonserni, jolla oli vuonna 2021 noin 39 000 työntekijää, myyntiä 150 maassa ja 86 miljardia Ruotsin kruunua liikevaihto jatkuvissa toiminnoissa. Sandvikin pääkonttori sijaitsee Ruotsissa, Tukholmassa ja yritys on perustettu vuonna 1862. (Sandvik 2023.)

Sandvikin toiminta voidaan jakaa kolmeen eri osa-alueeseen: Sandvik Mining and Rock Solutions, Sandvik Rock Processing Solutions ja Sandvik Manufacturing and Machining Solutions. Sandvik Mining and Rock Solutions on maailman johtava kaivos- ja urakointiteollisuuden, kaluston, varaosien, palveluiden ja teknisten ratkaisuiden toimittaja, joiden käyttökohdealueita ovat esimerkiksi kallioporaus, jyrsintä, lastaus ja kuljetus, tunnelinteko ja louhintä. Sandvik Rock Processing Solutions on johtava kiven, mineraalien murskaus- ja seulontalaitteiden, kaluston, varaosien ja ratkaisujen toimittaja, jonka käyttökohdealueita ovat esimerkiksi murskaus, seulonta, rikotus ja purku. Sandvik Manufacturing and Machining Solutions on lastuavien työkalujen ja työkalujärjestelmien globaali markkinajohtaja. (Sandvik 2023.)

2.2 Lastauskoneet

Sandvikilla on kattava valikoima eri kokoluokan lastauskoneita kovan kiven kaivoskohteisiin. LH-lastauskoneet on suunniteltu lastaamaan malmia dumpperien kyytiin maanalaisissa ahtaissa ja matalissa kaivostunneleissa. Lastauskoneiden kantokyky vaihtelee pienimmän lastauskoneen LH202:n 3 tonnin kantokyvyn ja suurimman maanalaisen lastauskoneen LH621i:n 21 tonnin välillä. Monet lastauskoneista on myös älykkäillä ominaisuuksilla varustettu, kuten AutoMine-ominaisuudella. AutoMine mahdollistaa lastauskoneen valvonnan ja etäohjauksen valvomosta. Valvomosta lastauskoneeseen käyttäjä voi mukavasti ja turvallisesti ohjata ja valvoa samanaikaisesti useita eri lastauskoneita. AutoMine-ominaisuutta on myös hyödynnetty Sandvikin muihin maanalaisiin, sekä maanpäällisiin sovelluksiin. Kuvassa 1 on esitetty maanalainen lastauskone LH410 ja kuvassa 2 maanalainen dumpperi TH551i. (Sandvik 2023.)



Kuva 1 Maanalainen Toro LH410-lastauskone (Sandvik 2023.)



Kuva 2 Maanalainen Toro TH551i-dumpperi (Sandvik 2023.)

3 Hydrauliiikka

Hydrauliiikka tarkoittaa voimansiirtoa nesteen välityksellä. Fysikaalisesti hydrauliiikka perustuu nesteen kokoonpuristumattomuuteen ja paineen leviämiseen nesteissä tasaisesti. Tällöin hydraulisissa systeemeissä olevaan nesteeseen vaikuttaa vain puristus, jota kutsutaan nesteeseen kohdistuessa paineeksi. Hydraulisissa tehonsiirtojärjestelmissä mekaanisesti tuotettu energia muutetaan hydrauliseksi tehoksi, eli mekaaninen teho siirtyy hydrauliseksi paineeksi ja tilavuusvirraksi. Mekaaninen energia tuotetaan yleensä sähkö- tai polttomoottorilla. Työkohteen toimilaitteet, kuten hydraulisylinterit ja -moottorit muuttavat hydraulisen energian takaisin mekaaniseksi liikkeeksi. (Keinänen & Kärkkäinen 2009, 170–172.)

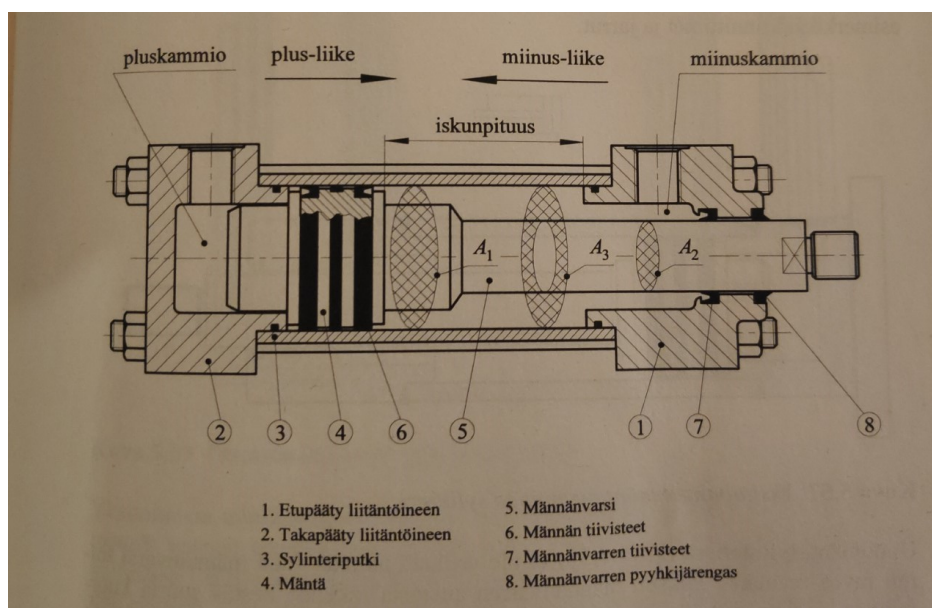
Hydrauliiikkaa käytetään yhä enemmän teollisuuden ja liikkuvan kaluston koneissa ja laitteissa. Liikkuvan kaluston hydraulisista koneista ja laitteista puhuttaessa käytetään termiä mobiilihydrauliiikka. Mobiilihydrauliiikkatekniikkaan perustuvia koneita ovat mm. maatalouskoneet ja kaivurit, sekä erilaiset nostimet. (Keinänen & Kärkkäinen 2009, 170–172.)

3.1 Sylinterien rakenne ja niiden toiminta

Sylinterit muuntavat hydraulisen energian mekaaniseksi energiaksi. Sylinterien tapauksessa tämä mekaaninen energia on suoraviivaista edestakaista liikettä. Toimintansa mukaan sylinterit voidaan jakaa kolmeen eri luokkaan:

- Yksitoimiset sylinterit
- Kaksitoimiset sylinterit
- Erikoissylinterit

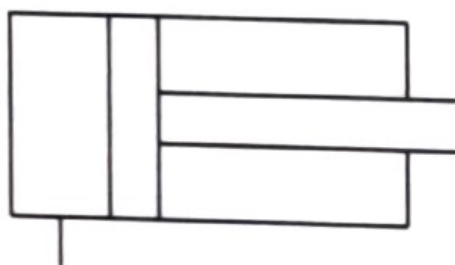
Erikoissylintereitä ovat esimerkiksi teleskooppisylinteri, differentiaalisylinterit ja uppomäntäsylinterit, mutta tässä työssä ei perehdytä sen tarkemmin erikoissylintereihin. Kuvassa 3 on esitetty hydraulisylinterin rakenne. (Keinänen & Kärkkäinen 2009, 255.)



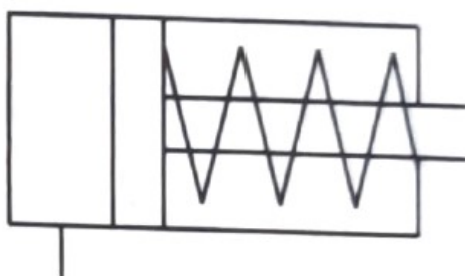
Kuva 3 Hydraulisylinteri (Kajaste ym. 2008, 195.)

3.1.1 Yksitoimiset sylinterit

Yksitoimiset sylinterit toimivat, eli tekevät työtä vain yhteen suuntaan. Paluuliike eli liike toiseen suuntaan tapahtuu ulkoisen kuorman tai jousen avulla. Kuvassa 4 on esitetty tavallisen yksitoimisen sylinterin piirrosmerkki ja kuvassa 5 on esitetty yksitoimisen jousipalautteisen sylinterin piirrosmerkki. (Keinänen & Kärkkäinen 2009, 255.)



Kuva 4 Yksitoimisen sylinterin piirrosmerkki (Keinänen & Kärkkäinen 2009, 255.)



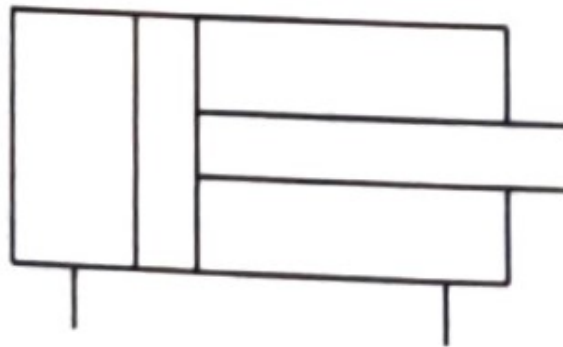
Kuva 5 Yksitoimisen jousipalautteisen sylinterin piirrosmerkki (Keinänen & Kärkkäinen 2009, 255.)

Varsinaiset yksitoimiset sylinterit ovat harvinaisia ja yleensä niiden tilalla käytetään vastaavaa kaksitoimista rakennetta yksisuuntaisena.

Sovelluskohteina ovat esimerkiksi jarrut ja kiinnittimet. (Kajaste ym. 2008, 196.)

3.1.2 Kaksitoimiset sylinterit

Kaksitoimisilla sylintereillä (kuva 6) voidaan tehdä työtä molempiin suuntiin, eli molemmat liikesuunnat tapahtuvat hydraulisesti. (Keinänen & Kärkkäinen 2009, 255.)



Kuva 6 Kaksitoimisen sylinterin piirrosmerkki. (Keinänen & Kärkkäinen 2009, 255.)

Kaksitoimisia sylintereitä käytetään paljon sekä teollisuuden että liikkuvan kaluston koneissa ja laitteissa. (Kajaste ym. 2008, 198.)

4 Anturitekniikka

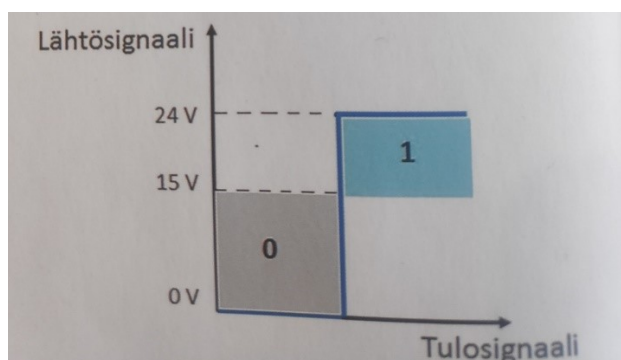
4.1 Yleistä

Anturit ovat mittalaitteita, jotka mittaavat tai tunnistavat fysikaalisen tai kemiallisen ilmiön ja muuttavat näin saadun tiedon käyttökelpoiseen muotoon, esimerkiksi sähköiseksi signaaliksi. Mittaavia antureita käytetään esimerkiksi prosessiteollisuudessa ja kiinteistöautomaatiossa, joissa mitattavasta kohteesta tarvitaan jatkuvaa tietoa ja kohteella voi olla useita eri arvoja mittausajan kuluessa. Mitattavan anturin tieto on yleensä analoginen signaali. (Keinänen & Sumujärvi 2019, 206.)

Tunnistavia antureita käytetään pääasiassa kappale tavara-automaatiossa esineiden ja koneen osien paikan tunnistamisessa. Yleisesti ottaen näistä antureista saadaan vain kaksi tietoa, eli anturi joko tunnistaa esineen (signaalin tila=1) tai ei tunnista esinettä (signaalin tila=0). Kosketuksettomasti tunnistavia antureita kutsutaan myös lähestymiskytkimiksi. (Keinänen & Sumujärvi 2019, 206.)

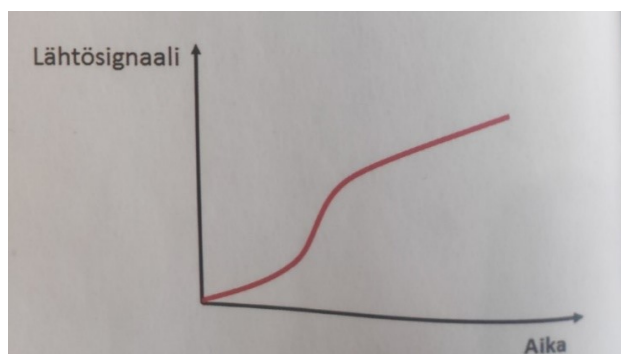
4.2 Signaalityypit

Kaksiarvoista mittaussignaalia kutsutaan binäärisignaaliksi (diskreettiseksi signaaliksi). Binäärisignaalilla on vain kaksi tilaa: "0" tai "1" eli tosi tai epätosi. Kuvassa 7 on esitetty binäärisignaalin toiminta, eli kuvan esimerkissä 0-15V välillä saadaan arvo nolla ja 15-24V välillä saadaan arvo yksi. (Keinänen & Sumujärvi 2019, 206.)



Kuva 7 Binäärisignaali (Keinänen & Sumujärvi 2019, 206.)

Analoginen signaali (kuva 8) muuttuu portaattomasti mittausjakson aikana, jos mitattavan ilmiön mitattava arvo, kuten pyörimisnopeus tai lämpötila, muuttuu mittausjakson aikana. Tavallisimpia teollisuudessa käytettäviä analogisia signaaleja ovat jännitesignaalit (0-10 VDC ja -10-+10 VDC) ja virtasignaalit (0–20 mA ja 4–20 mA). (Keinänen & Sumujärvi 2019, 206.)



Kuva 8 Analoginen signaali (Keinänen & Sumujärvi 2019, 206.)

4.3 Mittaussignaalin käsittely

Ohjelmoitavissa ohjauslaitteissa tietoja käsitellään digitaalisesti, joten analoginen signaali on niissä muutettava digitaalseksi signaaliksi. Tätä kutsutaan A/D muunnokseksi. Kuvassa 9 on esimerkki A/D muunnoksesta. (Keinänen & Sumujärvi 2019, 207.)

| Jännitealue 1–100 V | Bitti n:o 1 | Bitti n:o 2 | Digitaalinen signaali |
|------------------------|----------------|----------------|--------------------------|
| 1–25 V | 0 | 0 | 00 |
| 26–50 V | 0 | 1 | 01 |
| 51–75 V | 1 | 0 | 10 |
| 76–100 V | 1 | 1 | 11 |

Kuva 9 Esimerkki analogisen signaalin muuttamisesta digitaalseksi 2-bittiseksi signaaliksi. (Keinänen & Sumujärvi 2019, 206.)

Mittaussignaali voidaan esittää ja koodata usealla eri tavalla. Joissakin ohjaustehtävissä on järkevää käyttää lukujen esitykseen binäärilukujen sijasta 10-järjestelmää. Kymmenjärjestelmän lukujen koodaukseen käytetään BCD-koodausta (Binary Coded Decimal). BCD-koodaustapoja on monia, mutta NBCD (Natural BCD) -koodaus on yleisin ja sitä useimmiten kutsutaankin pelkäksi BCD-koodiksi. BCD-koodissa luvut koodataan numeroittain ja kaikki numerovaihtoehdot 0-9 voidaan esittää neljällä bitillä. Esimerkki desimaaliluvun 162 muuttamisesta NBCD-koodiksi ja sitä vastaava binääriluku:

$$162 = 0001\ 0110\ 0010_{\text{NBCD}} = 1010\ 0010_2$$

Heksadesimaalijärjestelmässä kantaluku on 16. Sitä käytetään esimerkiksi ohjelmoitavissa ohjausjärjestelmissä ja tietotekniikassa.

Heksadesimaalijärjestelmässä on numeroiden 0-9 lisäksi käytössä kirjainmerkit A, B, C, D, E. Heksadesimaaliluku voidaan muuntaa kymmenkantaiseen lukujärjestelmäänkertomalla luvun paikkaa vastaava numero vastaavalla potenssilla alkaen nolasta, joka on ensimmäinen paikka oikealla. Esimerkiksi luku "FE₁₆" muutetaan kymmenjärjestelmään seuraavasti:

$$16^1 \cdot 15 + 16^0 \cdot 14 = 254_{10}$$

Esimerkissä ilmenee, että yksi tavu (8 bittiä) voidaan esittää kahdella heksadesimaalijärjestelmän merkillä, $254_{10} = 1111\ 1110_2$

Gray-koodi on eräs koodaustapa, jolla pyritään eliminoimaan anturin virhetulkinnasta johtuva virhe mahdollisimman pieneksi. Vain yksi bitti muuttuu, kun siirrytään koodisanasta seuraavan koodisanaan. Joissakin antureissa signaali on Gray-koodattu, ja samaa koodaustapaa käytetään myös muuttuvien analogiasuureiden digitalisoinnissa. Kuvassa 10 on taulukko desimaaliluvun esittämisestä eri koodaustavoilla. (Keinänen & Sumujärvi 2019, 207.)

| Desimaaliluku | NBCD-koodi | Binäärikoodi | Gray-koodi |
|---------------|------------|--------------|------------|
| 0 | 0000 | 0000 | 0000 |
| 1 | 0001 | 0001 | 0001 |
| 2 | 0010 | 0010 | 0011 |
| 3 | 0011 | 0011 | 0010 |
| 4 | 0100 | 0100 | 0110 |
| 5 | 0101 | 0101 | 0111 |
| 6 | 0110 | 0110 | 0101 |
| 7 | 0111 | 0111 | 0100 |
| 8 | 1000 | 1000 | 1100 |

Kuva 10 Taulukko desimaaliluvun esittämisestä eri koodaustavoilla. (Keinänen & Sumujärvi 2019, 207.)

4.4 Mekaaniset anturit

Mekaanisien antureiden eli rajakytkimien käyttö on nykyään vähenemässä ja ne korvataan usein esimerkiksi induktiivisilla antureilla. Mekaanisia antureita on kuitenkin pakko käyttää joissain kohteissa, kuten hätä-seis-piireissä.

Mekaaninen anturin tunnistaa mekaanisella tunnistimella fyysisen kosketuksen perusteella, joten tunnistus ei ole kosketukseton, kuten induktiivisissa tai kapasitiivisissa antureissa. Mekaanisen anturin tunnistuselimenä voi toimia esimerkiksi:

- tappi
- tappi + rulla
- vipu + rulla
- teräs- tai muovisauva
- lenkki vaijerilla

Kuvassa 11 on esitetty mekaaninen anturi, jossa on vipu ja rulla tunnistuselimenä.

(Keinänen & Sumujärvi 2019, 212.)



Kuva 11 Mekaaninen anturi, jossa on vipu ja rulla tunnistuselimenä. (Omron 2022.)

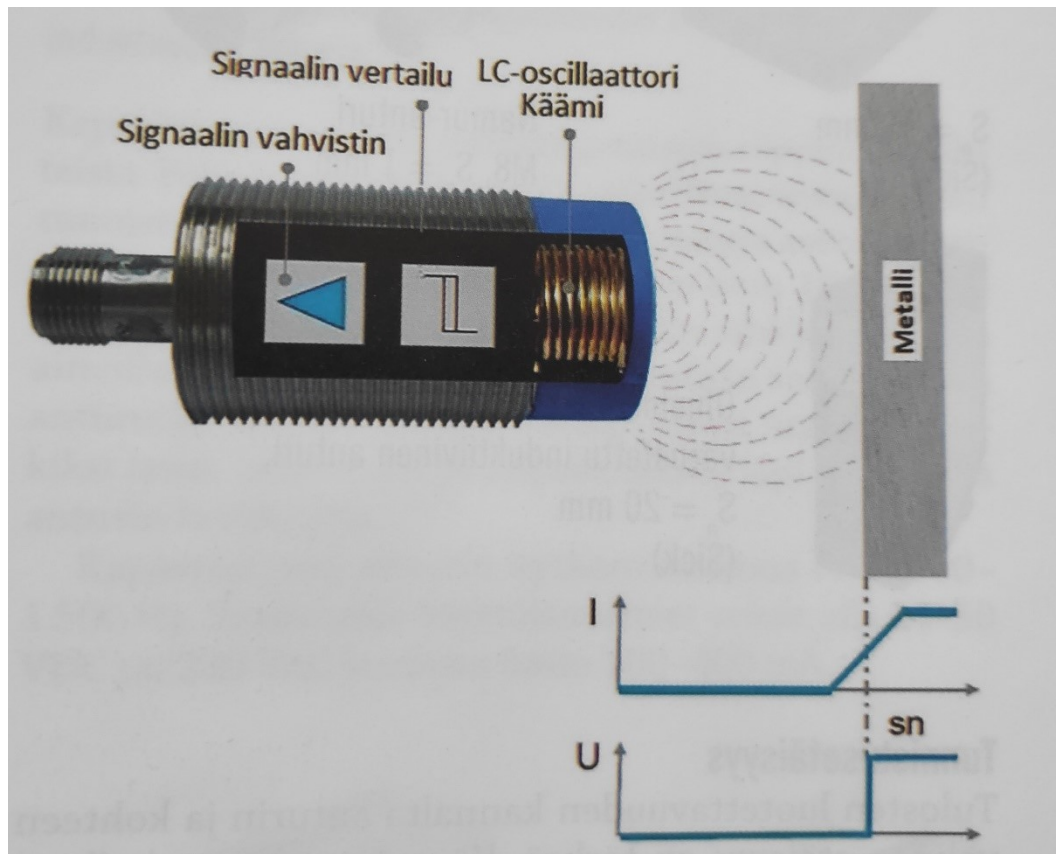
Mekaanisien anturin koskettimet voivat olla joku avautuvia tai sulkeutuvia. Kosketintoiminta voi tapahtua momentin avulla tai ilman. Anturi, jossa on kosketintoiminta ilman momenttia, voidaan käyttää vain sellaiseen tunnistukseen, jossa liikenopeudet ovat riittävän suuria, yleensä yli 1 mm/s. Jos liikenopeudet ovat alle 1 mm/s luokkaa voi aiheutua kipinöintiä kontaktien välillä ja kiinni palamista. Momentilla varustetuissa mekaanisissa antureissa varmistetaan jousivoiman avulla koskettimien riittävä nopeus. (Keinänen & Sumujärvi 2019, 212.)

Mekaanisista antureista on olemassa versioita, joita kutsutaan turvarajoiksi. Turvarajoissa koskettimet avutuvat pakko-ohjatusti, vaikka ne olisivat palaneet yhteen. Turvarajojen käyttökohteita ovat esimerkiksi hissit. (Keinänen & Sumujärvi 2019, 212.)

4.5 Induktiiviset anturit

Induktiivinen anturi on teollisuudessa nykyään käytetyin anturi ja se on syrjäyttänyt mekaaniset rajakytkimet lähes kokonaan. Induktiivinen anturi tunnistaa metalliesineitä ja tunnistusetäisyys on tavallisesti 2–20 mm. On olemassa myös induktiivisia antureita, joissa tunnistusetäisyys on useampia kymmeniä millimetrejä. (Keinänen & Sumujärvi 2019, 209.)

Induktiivisen anturin toiminta perustuu tuntokelaan, joka on osana värähtelypiiriä. Piirin värähdelleessä tuntokela muodostaa ympärilleen magneettivuon. Kun metalliesine tulee magneettivuon vaikutuspiiriin, metallikappaleeseen syntyy pyörrevirtoja, mikä kuormittaa värähtelypiiriä. Kuormituksen kasvaessa värähtely pysähtyy ja pysähdyksestä saadaan tieto tunnistuksesta. Kuvassa 12 esitetty induktiivisen anturin toimintaperiaate. (Keinänen & Sumujärvi 2019, 209.)



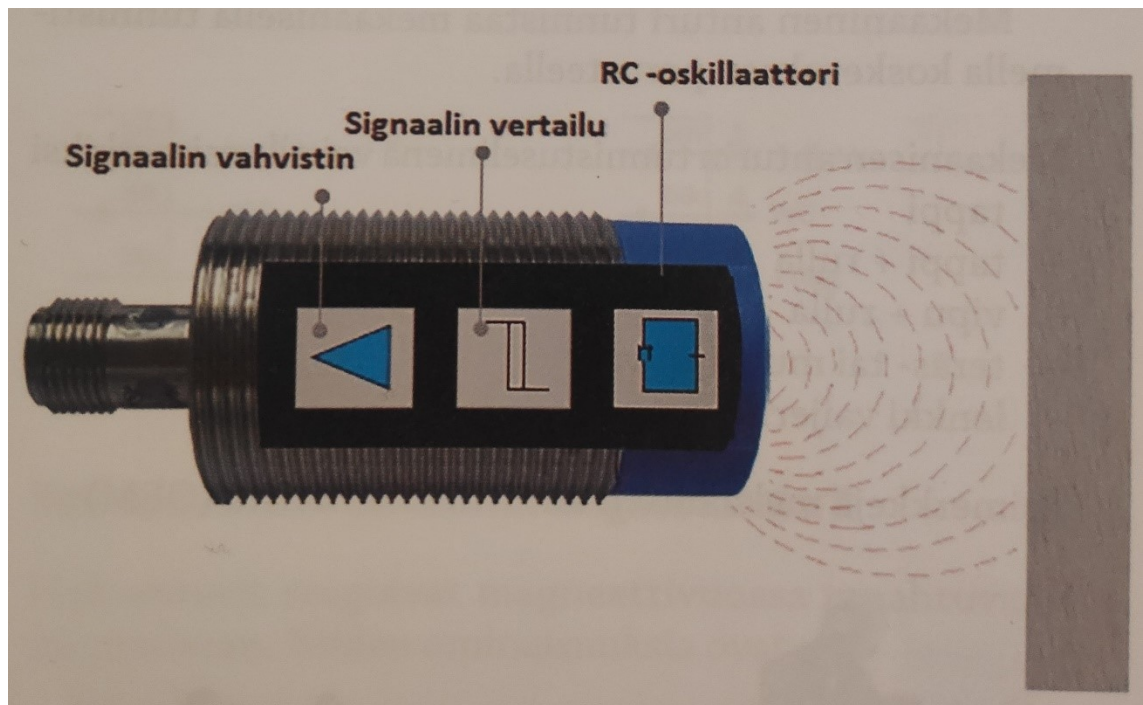
Kuva 12 Induktiivisen anturin toimintaperiaate. Kuvassa näkyy, kuinka tuntokelan (kuvassa LC-oscillaattori Käämi) ympärille alkaa muodostua pyörrevirtoja metallikappaleen tullessa magneettivuohon. Värähtelypiirin värähtely lakkaa ja anturi antaa signaalin tunnistuksesta. (Keinänen & Sumujärvi, 2019 209.)

Induktiivinen anturi voi toimia kahdella tavalla: tasajännitteellä 12–50 VDC (DC-tyyppi) tai vaihtosähköllä 230 VAC (AC-tyyppi). AC-tyypin antureilla voidaan suoraan ohjata 230 VAC toimivia toimilaitteita, ja tästä syystä ne soveltuvat 230 VAC:n jännitteellä toimiviin releohjausjärjestelmiin. (Keinänen & Sumujärvi 2019, 209.)

Analogisia induktiivisia antureita voidaan käyttää pienten osien, kuten ruuvien, tunnistamiseen ja lajitteluun. Analoginen anturi soveltuu myös kartionmuotoisen kohteen lineaarimittaukseen, sillä anturi tuottaa kappaleen koon mukaan erilaisen ulostulosignaalin. Tätä ominaisuutta hyödynnetään työkalujen, kuten poranterien, tunnistuksessa ja mittauksessa (Keinänen & Sumujärvi 2019, 209.)

4.6 Kapasitiiviset anturit

Kapasitiivisia antureita käytetään, kun tunnistettava asia/esine ei ole metallia. Rakenteeltaan kapasitiiviset anturit muistuttavat induktiivisia antureita, mutta niiden tunnistuseliimenä on avattu kondensaattori. Kuvassa 13 on esitetty kapasitiivisen anturin toiminta. (Keinänen & Sumujärvi 2019, 211.)



Kuva 13 Kapasitiivisen anturin toimintaperiaate. (Keinänen & Sumujärvi 2019, 211.)

Kapasitiivinen anturin hyvänä ja huonona puolena on nimenomaan se, että se tunnistaa kosketuksetta lähes kaikenlaiset materiaalit, jolloin se voi antaa virheellisestä tietoa. Kapasitiivinen anturi voi esimerkiksi tunnistaa lian tai kosteuden, jolloin se ei tunnistaa itse haluttua kohdetta. Induktiivisen anturin tapaan, kapasitiivisesta anturista on myös omat versiot sekä vaihto- että tasasähkölle. (Keinänen ym. 2007, 194–195.)

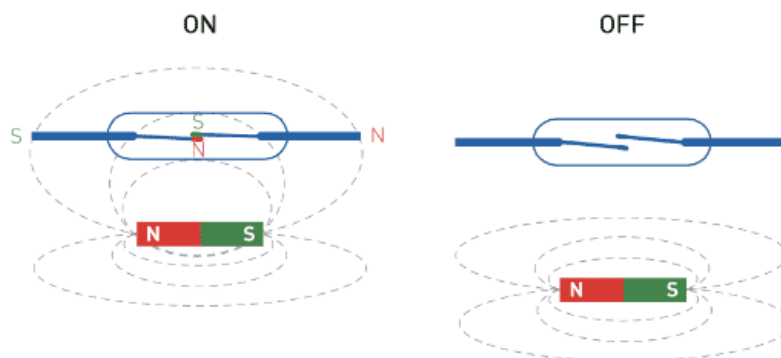
4.7 Magneettiset anturit

Magneettisia antureita käytetään havaitsemaan häiriöt sekä muutokset magneettikentässä, esimerkiksi voiman, suunnan ja magneettivuon suhteen. Magneettiset anturit tarvitsevat siis nimensä mukaisesti magneetin tai magneettikentän toimiakseen. (Elprocus 2022.)

4.7.1 Reed-kytkin

Reed-kytkimen toiminta perustuu tuntokohteessa olevan kestopagneetin vaikutukseen. Toiminnallisessa osassa on kielikytkin, jonka kosketin sulkeutuu, kun magneettikentän voimakkuus kasvaa riittävän suureksi. Kytkeäetäisyys (kosketin sulkeutuu) on 5–10 mm ja katkaisuetäisyys (kosketin aukeaa) on 10–15 mm. Tyypillisiä käyttökohteita Reed-kytkimille on esimerkiksi pneumatiikkasyylinterien päätyasentojen tunnistus. (Keinänen ym. 2007, 198.)

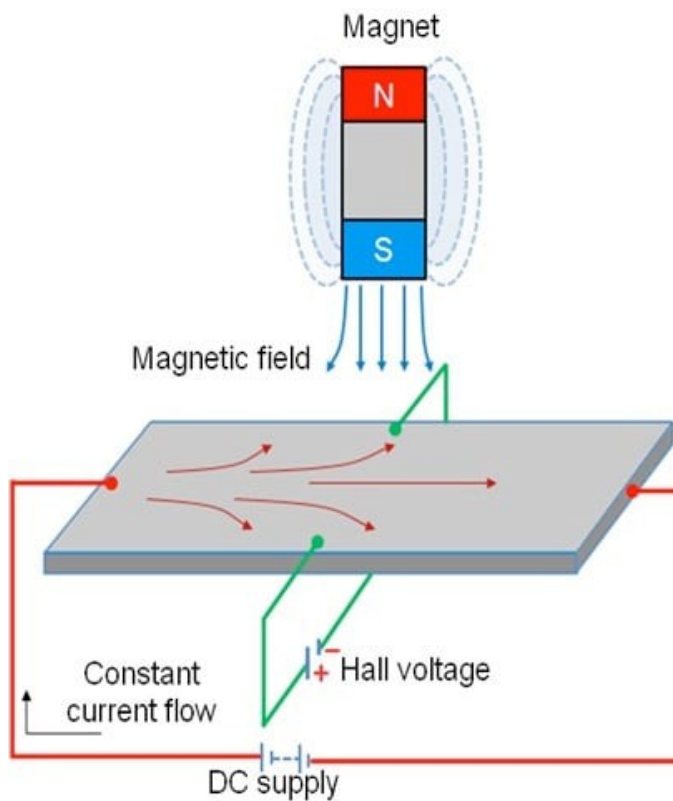
Reed-kytkimet ovat halpoja, mutta mekaanisen toiminnan takia niiden kestoikä on huonompi kuin muiden lähestymiskytkinten. Kytkeytymisaika on myös pidempi esimerkiksi induktiivisiin antureihin verrattuna, minkä takia niitä ei voi käyttää suurilla liikenopeuksilla tapahtuvissa väliasentotunnistuksissa. Reed-kytkin ei siis sovellu esimerkiksi pneumatiikkasyylinterin asennon reaaliaikaiseen tarkkailuun. Kuvassa 14 on esitetty Reed-kytkimen toiminta. (Keinänen ym. 2007, 198.)



Kuva 14 Reed-kytkimen toiminta. (Pic 2022.)

4.7.2 Hall-anturit

Hall-anturien toiminta perustuu Hall-ilmiöön. Hall-ilmiö voidaan havainnollistaa, kun tasavirtalähteestä johdetaan ohuen johdinlevyn läpi virtaa (kuva 15). Kun johdinlevyn lähelle tuodaan magneettikenttä, syntyy johdinlevyn vastakkaisiin päihin positiivinen ja negatiivinen varaus. Johdinlevyn päiden välille syntyy jännite ja tätä jännitettä voidaan mitata. Ilmiö, miten saadaan tämä mitattava jännite aikaiseksi, kutsutaan Hall-ilmiöksi. (Howtomechatronics 2022)



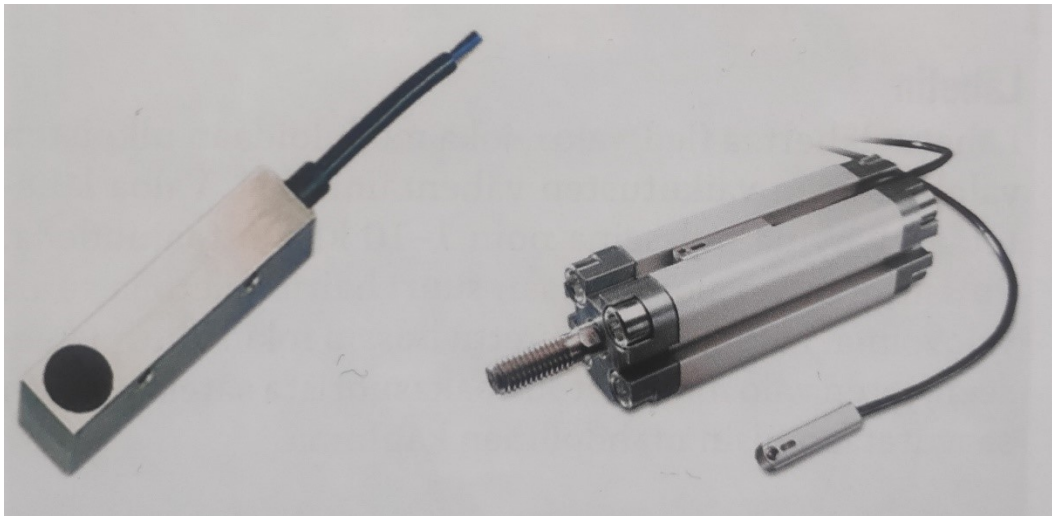
Kuva 15 Hall-ilmiö (Mouser 2022.)

Hall-antureita käytetään esimerkiksi pneumatiikkasynterien asentojen tunnistukseen. Anturi voidaan asentaa synterin kylkeen ja se tunnistaa synterin asennot mäntään kiinnitetyn magneettirenkaan avulla.

Hall-kytkimissä on kolme eri rakennevaihtoehtoa:

- Kytkenä tapahtuu ulkoisen magneettikentän ohjaamana.
- Kytken ja magneetti ovat hahlon sisällä. Hahlossa liikkuva metalli hoitaa magneettikentän "siirron".
- Kytkenä on mekaaninen kytken, jossa vipu liikuttaa magneettia Hall-anturin luona.

Kuvassa 16 on esitetty Hall-magneettikytkin. (Keinänen & Sumujärvi 2019, 213.)



Kuva 16 Hall-magneettikytkin (Keinänen & Sumujärvi 2019, 213.)

4.7.3 Magnetrostriktiivinen lineaarianturi

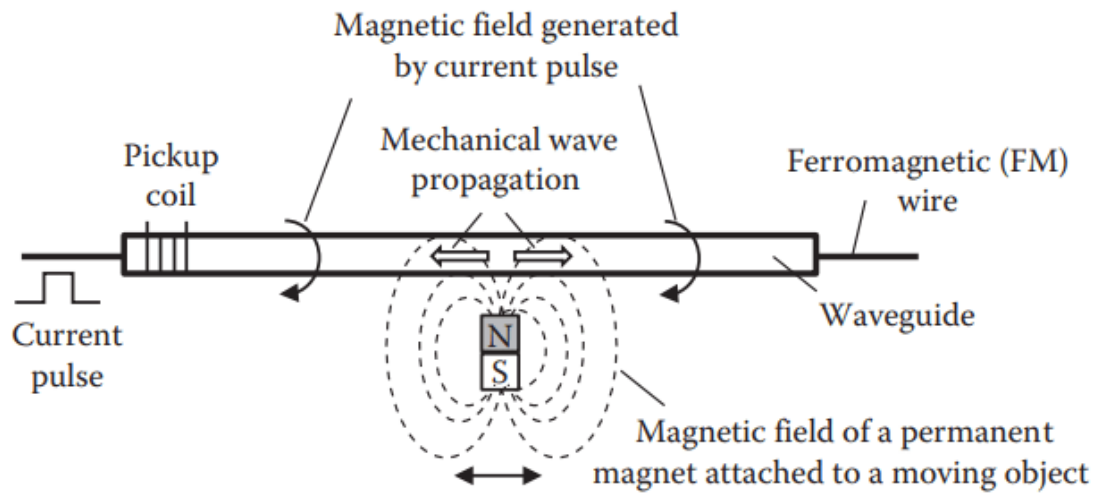
Magnetrostriktiivisella toimintaperiaatteella toimivat anturit voi perustua tunnettuihin Joule-, Villari-, Wiedemann ja Matteuci-ilmiöihin.

Magnetrostriktiivinen lineaarianturi koostuu yleensä magnetrostriktiivisesta johtimesta ("aaltojohdin", joka toimii tunnustuselimenä), kestopagneetista ja anturikelasta (muuntaa mekaanisen pulssin sähköiseksi signaaliksi). Virtapulssi johdetaan magnetrostriktiiviseen johtimeen, jolloin johtimen ympärille syntyy kiertävä magneettikenttä. Kestomagneetti (neliön tai renkaan mallinen) kiinnitetään liikkuvaan kohteeseen, jonka liikettä halutaan tarkastella, kuten hydraulikkasynterin mäntään. (Your electrical guide 2022.)

Kestomagneetin magneettikenttä reagoi virtapulssiin, aiheuttaen elastisen muodonmuutoksen aaltojohtimessa mekaanisen pulssin muodossa. Tämä aalto liikkuu aaltojohtimen molempiin päihin äänen nopeudella. (Your electrical guide 2022.)

Aaltojohtimen päässä anturikela aistii aallon ja muuttaa aaltojohtimen kiertymän sähköiseksi signaaliksi tai magneettikentän muutokseksi. Aaltojohtimen toisen päähän tullut käyttämätön pulssi vaimennetaan heijastusten välttämiseksi, ettei tule mittahäiriöitä. Kestomagneetin paikka voidaan laskea, kun lasketaan kulunut aika sähköpulssin lähettämisestä, kiertymäaallon (mekaaninen pulssi) saapumisesta anturikelaan. (Your electrical guide 2022.)

Magnetrostriktiiviseen lineaarianturiin voidaan laittaa myös useampia kestopagneetteja, joiden sijaintia voidaan tarkkailla samaan aikaan ja anturilla voidaan mitata yli viiden metrin iskunpituuksia yhden millin resoluutiolla (tarkkuudella). Kuvassa 17 on esitetty magnetrostriktiivisen lineaarianturin toimintaperiaate ja kuvassa 18 magnetrostriktiivinen lineaarianturi. (Your electrical guide 2022.)



Kuva 17 Magnetostriktiivisen lineaarianturin toimintaperiaate. (Your electrical guide 2022.)



Kuva 18 Magnetostriktiivinen lineaarianturi. (Sensorola 2022.)

4.8 Optiset anturit

Optisen anturin toiminta perustuu tunnistettavan kappaleen aiheuttamista muutoksista anturin valonsäteeseen. Optiset anturit voidaan jakaa toimintansa mukaan neljään eri ryhmään:

- Vastaanotin periaate
- Lähetin-vastaanotin periaate
- Suoraan heijastava periaate
- V-heijastava periaate

(Metropolia 2022.)

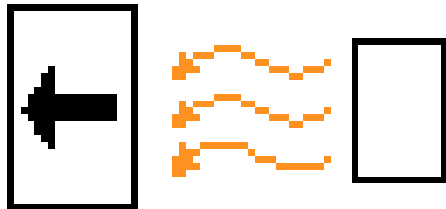
Optisten antureiden valaisimet ja vastaanottimet toimivat tietyllä aallonpituudelle moduloidulla infrapunavalolla, ympäristöstä heijastuvan valon häiriöiden välttämiseksi. Optiset anturit tunnistavat kappaleen materiaalista riippumatta, kunhan kappale vaikuttaa valonsäteeseen valitun periaatteen mukaisella tavalla. (Metropolia 2022.)

Optiset anturit kestävät hyvin tärinää ja muita häiriöitä, mutta valaisimen, vastaanottimen linssien tai heijastimen likaantuminen voi aiheuttaa ongelmia. Hankalissa ja likaisissa ympäristöissä optiset anturit voidaan joutua varustamaan pesujärjestelmällä häiriöttömän valonsäteen kulun varmistamiseksi. (Metropolia 2022.)

Optisilla antureilla voidaan tunnistaa kappaleita pitkienkin matkojen päästä (jopa 8 m). Valon välittämiseen voidaan käyttää myös valokuituja, valaisimien ja peilien lisäksi. Valokuidulla päästään suurempaan tarkkuuteen, jolla voidaan havaita hyvinkin ohuita kappaleita esimerkiksi 0.03 mm paksua kuparilankaa. (Metropolia 2022.)

4.8.1 Vastaanotin periaate

Vastaanotin periaatteessa (kuva 19) tunnistettava kappale toimii itse lähettimenä. Esimerkiksi kuuma metalli säteilee infrapuna aallonpituudella ja anturi havaitsee tämän infrapunasäteilyn. (Metropolia 2022.)



Kuva 19 Vastaanotin periaate (Metropolia 2022.)

4.8.2 Lähetin-vastaanotin periaate

Lähetin-vastaanotin periaatteessa (kuva 20) kappale katkaisee anturin lähettimen ja vastaanottimen välisen valonsäteen, jolloin tunnistus tapahtuu. (Metropolia 2022.)



Kuva 20 Lähetin-vastaanotin periaate (Metropolia 2022.)

Lähetin-vastaanotinpari on optisista antureista varmatoimisin. Lähetin-vastaanotinpari sietää ulkopuolisia häiriöitä ja esimerkiksi pölyä ja likaa optisista antureista parhaiten. Huonona puolena kuitenkin on sen hinta, sillä toimiakseen se tarvitsee kaksi erillistä komponenttia (lähettimen ja vastaanottimen), josta tulee suuremmat hinta- ja asennuskustannukset. Kuvassa 21 on esitetty eräs lähetin-vastaanotinparin sovellus. (Keinänen & Sumujärvi 2019, 214.)



Kuva 21 Yksi lähetin-vastaanotinparin sovelluskohteista on automaattisesti toimiva portti. Tätä voidaan esimerkiksi soveltaa siihen, että auton tullessa portin eteen, portti aukeaa tai sitten että portti ei voi sulkeutua, jos jokin/joku on portin välissä. (Keinänen & Sumujärvi 2019, 214.

4.8.3 Suoraan heijastava periaate

Suoraan heijastavassa periaatteessa (kuva 22) kappaleen takana on heijastin (esimerkiksi peili), josta heijastuvan valonsäteen kappale katkaisee, jolloin tunnistus tapahtuu. (Metropolia 2022.)



Kuva 22 Suoraan heijastava periaate (Metropolia 2022.)

Peiliheijasteiset ovat käytetyimpiä optisia antureita. Peilit ovat halpoja ja niitä voidaan asentaa ahtaisiin paikkoihin. Ongelmallisia tunnistettavia kappaleita ovat esineet, jotka voivat heijastaa valonsäteet takaisin, jolloin tunnistamisen varmuus voi heikentyä. Nykyisissä antureissa tämä ongelma on poistettu

polarisaation avulla. Valonlähteenä voi toimia esimerkiksi laser. Kuvassa 23 on esitetty esimerkkisovellus peiliheijasteisen anturin käytöstä kuljettimessa.

(Keinänen & Sumujärvi 2019, 215.)



Kuva 23 Esimerkkisovellus peiliheijasteisen anturin käytöstä kuljettimessa

(Keinänen & Sumujärvi 2019, 215.)

4.8.4 V-heijastava periaate

V-heijastavassa periaatteessa (kuva 24) tutkittava kappale heijastaa valonsäteen takaisin anturiin, jolloin tunnistus tapahtuu. (Metropolia 2022.)



Kuva 24 V-heijastava periaate (Metropolia 2022.)

V-heijastavaa periaatetta käyttävät hyväkseen kohdeheijasteiset optiset anturit. Tunnistettavien kohteiden heijastuskyky on yleensä peilejä huonompi, joten

kohdeheijasteisien optisten antureiden tunnistusetäisyys on lyhyempi peiliheijasteisiin antureihin verrattuna. Kohdeheijasteisia antureita voidaan käyttää myös esimerkiksi syvyyserojen tunnistamiseen, jos anturissa pystytään säätämään takaisin heijastumisen etäisyyttä. On myös olemassa kohteesta heijastavia laserantureita, joilla voidaan saada jopa useampien metrien tunnistusetäisyys. Kuvassa 25 on esitetty esimerkkisovellus kohteesta heijastavasta anturista. (Keinänen & Sumujärvi 2019, 216.)



Kuva 25 Esimerkkisovellus kohteesta heijastavasta anturista (Keinänen & Sumujärvi 2019, 216.)

4.8.5 LIDAR

LIDAR (light detection and ranging tai laser imaging, detection and ranging) eli valotutka, on valoon perustuva, tutkan tapaan toimiva laite, joka toimii näkyvän valon, lähi-infran tai ultravioletin alueella. Sen avulla voidaan määrittää etäisyyksiä kohdistamalla laseri kohteeseen tai pintaan ja mittaamalla aika, joka heijastuneella valolla kestää palata takaisin vastaanottimeen. LIDARia kutsutaankin joskus 3D-laserskannaukseksi. LIDARilla on maanpäällisiä, ilma- ja mobiilisovelluksia, sekä nykyään yhä enemmän LIDARia hyödynnetään autonomisten autojen ohjauksessa ja navigoinnissa. Kuvassa 26 on esitetty LIDAR-anturi. (Wikipedia 2023.)



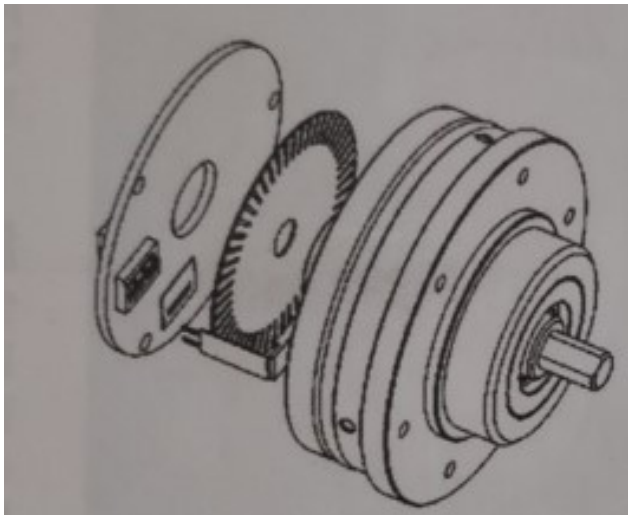
Kuva 26 LIDAR-anturi. Tämän tyyppistä anturia voidaan käyttää esimerkiksi henkilömäärän laskemiseen lentokentillä tai automaattiseen ajoneuvon ohjaukseen. (Sick 2023.)

4.9 Siirtymän ja kiertymiskulman mittaus

Inkerementti- tai absoluuttiantureilla voidaan mitata siirtymää ja kiertymäkulmaa. Myös nopeuden mittaaminen on mahdollista. Inkrementtianturi mittaa siirtymää siirtymän lähtöpisteestä lähtien, eli jos inkrementtianturia käytetään paikoitukseen, lähtöpiste on haettava aina sijainnin määrittämiseksi. Tämä on huono asia esimerkiksi sähkökatkon tullessa, jolloin sijaintitieto menetetään ja joudutaan menemään takaisin referenssipisteeseen. Absoluuttianturi ilmoittaa aina absoluuttisen tiedon paikasta, sähkökatkonkin jälkeen. (Keinänen & Sumujärvi 2019, 221.)

4.9.1 Inkrementtianturit

Inkrementtianturi on pyörivä kääntymiskulman osoittava anturi. Anturi koostuu valoa lähettävästä ledistä, valoa vastaanottavasta diodista, sekä niiden välissä olevasta optisesta pulssiekokosta, joka on akseliin kiinnitetty. Kuvassa 27 on esitetty inkrementtianturin periaatekuva ja kuvassa 28 inkrementtianturi. (Keinänen & Sumujärvi 2019, 221.)

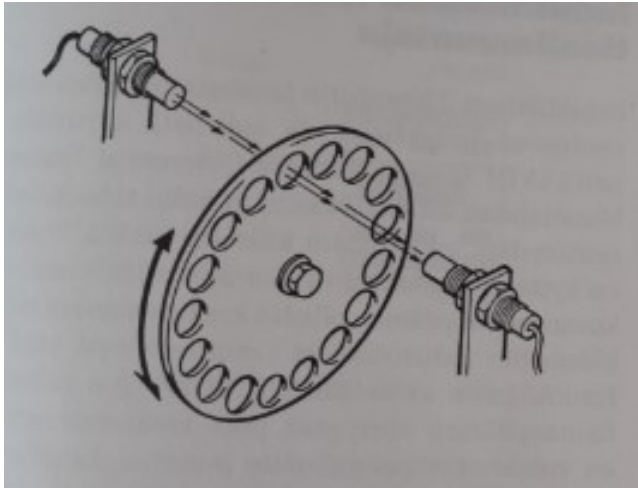


Kuva 27 Inkrementtianturin periaatekuva (Keinänen & Sumujärvi 2019, 221.)

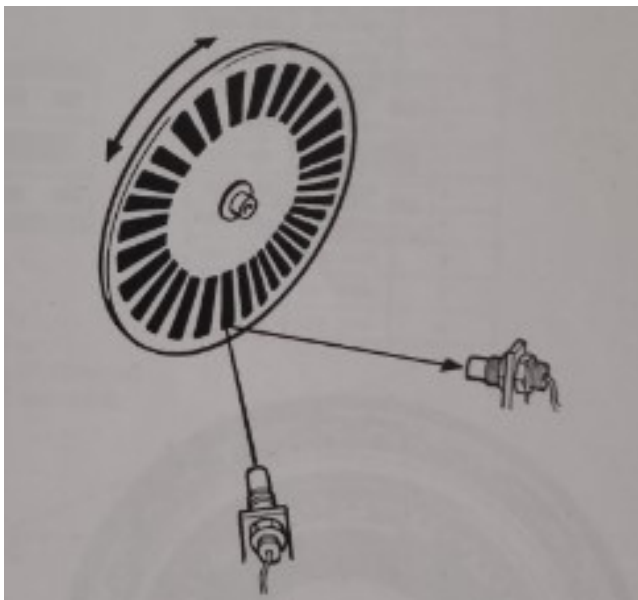


Kuva 28 Tyypillinen inkrementtianturi (Keinänen & Sumujärvi 2019, 221.)

Inkrementtianturin toiminta perustuu siihen, että pulssikiekossa (hilakiekossa) on määrävälein valoa läpäiseviä, että valoa läpäisemättömiä sektoreita. Pulssikiekko on sijoitettu valolähteen (led) ja valokennon (diodi) välille. Mitä enemmän sektoreita pulssikiekossa on, sitä tarkempi kiertymänmittaus saadaan aikaiseksi. Yleisesti ottaen erottelutarkkuudet vaihtelevat välillä 10–5000 pulssia/kierros. Todellisuudessa pulssikiekko on jaettu erillisiin rengaskehiin, joita luetaan vähintään kolmelta valokennolta. Kolmen valokennon avulla saadaan nollapulssi ja pyörimissuunta voidaan tunnistaa. Kuvissa 29 ja 30 on esitetty inkrementtianturin toimintaperiaate kahdella eri tavalla. (Keinänen ym. 2007, 200.)



Kuva 29 Inkrementtianturin toimintaperiaate hilakiekkolla, jossa on reikiä
(Keinänen ym. 2007, 200.)



Kuva 30 Inkrementtianturin toimintaperiaate hilakiekkolla, jossa on takaisin heijastavia ja takaisin heijastumattomia kohtia. (Keinänen ym. 2007, 200.)

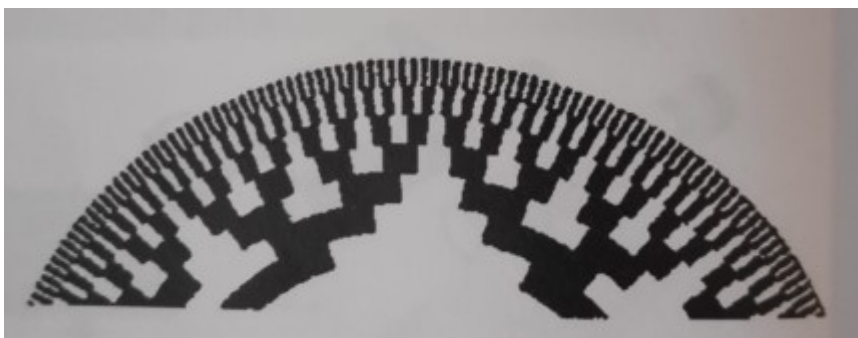
4.9.2 Absoluuttianturi

Absoluuttianturi pystyy lukemaan sijaintitietonsa koko ajan pulssikiekolta myös sähkökatkoksen jälkeenkin. Anturin toiminta perustuu pulssikiekkoon, johon on värjätty useille sisäkkäisille vyöhykkeille asentoa ilmaiseva binäärikoodi.

Vyöhykkeitä voi olla 6-20kpl. Koodaukseen voidaan käyttää luonnollista binäärikoodia, binäärikoodattua desimaalilukua (BCD) tai Gray-koodia.

(Keinänen & Sumujärvi 2019, 222.)

Voidaan puhua esimerkiksi 12-bittisestä absoluuttianturista ja tämä tarkoittaa, että anturi pystyy erottelemaan 4096 (2^{12}) kulma-asentoa. Kuvassa 31 on esitetty Gray koodattu koodikiekko. (Keinänen ym. 2007, 201.)



Kuva 31 Gray koodattu absoluuttianturin koodikiekko (Keinänen & Sumujärvi 2019, 222.)

Toimintatapansa mukaan absoluuttianturit voidaan jakaa yksikierrosantureihin ja monikierrosantureihin. On myös olemassa kenttäväyläantureita, jotka voidaan ohjelmallisesti muuttaa yksikierroksisiksi tai monikierroksisiksi. (Keinänen & Sumujärvi 2019, 222.)

Yksikierrosantureita käytetään kääntymiskulman mittaamiseen. Anturin akselin pyörähtäessä yhden kierroksen, koodi alkaa jälleen nollasta. Yksikierroksissa antureissa siirrettävä tietomäärä on pieni ja anturisignaalin siirrossa voidaan käyttää myös rinnakkaismuotoista tiedonsiirtoa, esimerkiksi 13 bittistä. (Keinänen & Sumujärvi 2019, 222.)

Monikierrosantureiden signaalissa on mukana myös kierrosten laskenta, eli esimerkiksi 13-bittisen resoluution lisäksi on vielä 12 bittiä kierrosten laskemiseksi. Tässä anturityypissä tiedonsiirron määrä on suuri anturilta ohjauslaitteelle ja siihen käytetään sarjamuotoista tiedonsiirtoa tai tiedonsiirto tapahtuu kenttäväylän välityksellä. (Keinänen & Sumujärvi 2019, 222.)

4.9.3 Potentiometrianturi

Potentiometrianturi koostuu resistiivisestä vastuselementistä ja mittakärkeen kiinnitetystä liukukoskettimesta. Potentiometrillä voidaan mitata liikematkaa tai kiertymäkulmaa ja niitä voidaan käyttää sekä tasa- että vaihtojännitteellä. Ne on myös helppo liittää muihin analogiakomponentteihin. Potentiometrin huonona puolena on sen mekaaninen kosketus vastuspinnan ja liukukoskettimen välillä, mikä aiheuttaa kulumista ja epätarkkuutta, sekä rajoittaa anturin käyttöikä. Potentiometreja voidaan käyttää esimerkiksi työstökoneiden mittalaitteiden mittasauvoissa. Kuvassa 32 on esitetty lineaaripotentiometri. (Keinänen ym. 2007, 202.)

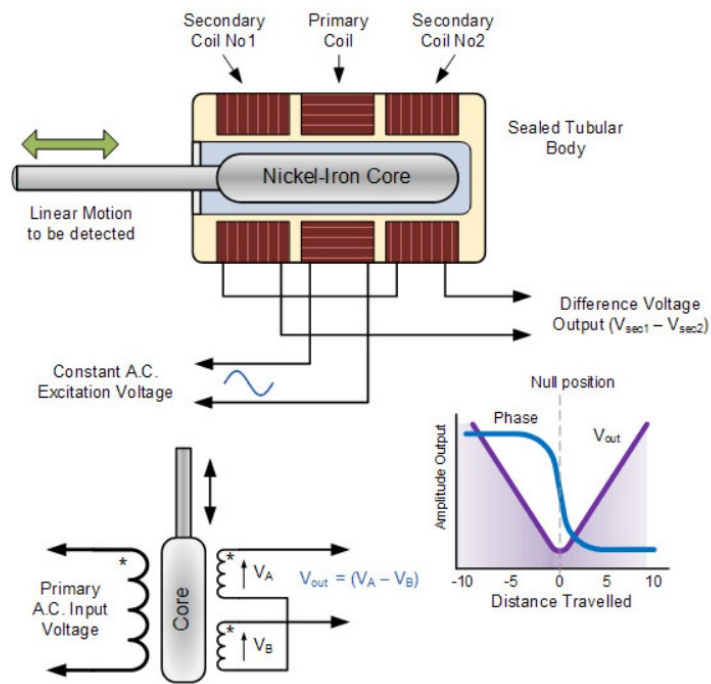


Kuva 32 Lineaaripotentiometri (Opkon 2022.)

4.9.4 Induktiivinen liikeanturi eli differentiaalimuuntaja (LVDT)

Induktiivisen liikeanturin toiminta perustuu sähkömagneettisen induktion. Anturista käytetään yleensä lyhennettä LVDT (Linear Variable Differential Transformer). Muuntajassa on ensiökäämi ja kaksi toisiokäämiä sekä rautasydän, joka liikkuu käämien sisällä ontossa putkessa. Käämit on kytketty sähköisesti sarjaan, mutta toisiokäämien vaihe-ero on 180° . Rautasydän on ontion putken sisällä ja se on kiinnitetty mitattavaan kohteeseen. Ensiökäämiin syötetään viritysjännitesignaali, joka indusoi sähkömagneettikentän toisiokäämeihin. Mittaamalla toisiokäämien jännite-ero, voidaan määrittää rautasydämen paikka ja täten myös mitattavan kohteen, johon rautasydän on kiinnitetty. Kun rautasydän liikkuu nolla-asentoon, jännite ja sen napaisuus muuttuvat. Siksi jännitteen amplitudi ja sen vaihekulma kertoo liikkeen suuruuden keskiasennosta (nolla-asennosta) poispäin, sekä liikkeen suunnan. (Thomasnet 2023.)

Induktiiviset liikeantureilla on hyvä tarkkuus, suuri resoluutio, korkea herkkyys, sekä niillä on hyvä lineaarisuus koko niiden tunnistusalueella. Ne ovat myös kitkattomia ja ne voidaan eristää käytettäväksi olosuhteisiin, joissa voi olla altistumista ulkoisille tekijöille. Kuvassa 33 on esitetty induktiivisen liikeanturin toiminta ja kuvassa 34 on induktiivinen liikeanturi. (Thomasnet 2023.)



Kuva 33 Induktiivisen liikeanturin (LVDT) toiminta. (Thomasnet 2023.)



Kuva 34 Induktiivinen liikeanturi (Megatron 2023.)

4.9.5 Vaijerivetoanturit

Lineaariliikkeen mittaus vaijerivetoanturilla (kuva 35) perustuu pyöriväliikkeisen anturin (kuten absoluuttianturi) kytkentään vaijerivetolaitteeseen. Vaijerianturilla voidaan mitata pitkiä liikemattoja, jopa kymmeniä metrejä. Sovelluksia ovat esimerkiksi nosturit ja varastoautomaatiikka. Nykyään on myös olemassa sovelluksia, joilla voidaan mitata erilaisten sylinterien liikettä. (Keinänen & Sumujärvi 2019, 224.)

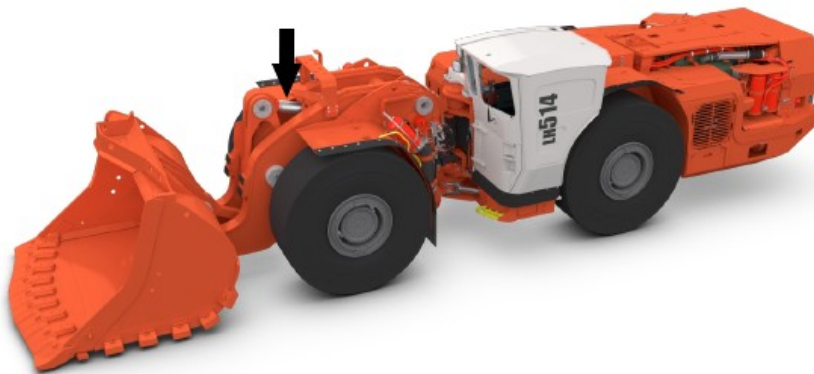


Kuva 35 Vaijerivetoanturi (Sick 2023.)

5 Anturin valinta

5.1 Nykyinen anturiratkaisu

Tämänhetkinen anturiratkaisu on magnetostriktiivinen lineaarianturi, joka tarkkailee kippisylinterin männän asemaa. Kippisylinteri on siis sylinteri, jonka liikkeestä lastauskoneen kauhan asento muuttuu siinä olevan nivelpisteen suhteen. Kun kippisylinterin mäntä on täysin ulos työntynyt, kauha on kuljetusasennossa (kuva 37) ja vastaavasti, kun kippisylinterin mäntä on toisessa ääripäässä eli sisään vetäytynyt, on kauha tyhjennysasennossa (kuva 38). Nykyisessä ratkaisussa saadaan reaaliaikainen tieto kippisylinterin männän asemasta ja tätä kautta saadaan tieto kauhan kulmasta. Iso osa lastauskoneista Sandvikilla on nykyään etäohjattuja ja automaatiotoimisia, joten reaaliaikaisen anturitiedon saaminen kauhan asemasta on tärkeää. Lastauskonetta ei voi etäohjata kunnolla, jos ei tiedetä missä asennossa kauha on. Tällaista ongelmaa ei tietenkään ole perinteisimmissä manuaalisesti ohjattavissa lastauskoneissa, jossa ihminen fyysisesti näkee lastauskoneen ohjaamosta, missä asennossa kauha on. Kuvassa 36 on esitetty LH514-lastauskone ja kippisylinterin sijainti.



Kuva 36 Kuvassa LH514-lastauskone. Kippisylinteri on merkitty kuvaan nuolella. (Sandvik 2023.)



Kuva 37 Lastauskoneen kauha kuljetusasennossa. (Sandvik 2023.)



Kuva 38 Lastauskoneen kauha tyhjennysasennossa. (Sandvik 2023.)

Nykyisen anturiratkaisun ongelmia ovat sen kallis hinta ja hankala paikka (kippisylinterin sisällä). Anturin vaihtaminen on hankalaa ja hidasta, jos anturi vikaantuu tai siitä menee esimerkiksi jokin kaapeli poikki. Lastauskoneet ovat kalliita koneita ja mitä kauemmin ne ovat poissa tuottavasta työstä, sitä suuremmat ovat siitä aiheutuvat kustannukset. Toisaalta anturi on kippisylinterin sisällä erittäin hyvässä suojassa ulkoisilta tekijöiltä, kuten lialta ja kolhuilta.

Yksi anturin hintaa tai itse asiassa sylinterin hintaa kasvattava tekijä on reikä, joka tarvitsee porata männänvarteen, jotta anturi saadaan asennettua sylinterin sisään. Reiän pituuden tulee olla yhtä pitkä kuin itse anturi ja anturin tuntoelimen tulee olla yhtä pitkä kuin männän iskunpituus, jotta voidaan tarkkailla männän liikettä koko matkalta. Iskunpituus ja sylinterin koot vaihtelevat tietenkin lastauskoneen koon mukaan ja suurimmissa lastauskoneissa iskunpituus voi olla lähemmäs metrin luokkaa. Tämä tarkoittaa, että joudutaan sylinteriin poraamaan/koneistamaan pahimmassa tapauksessa melkein metrin pituinen reikä, joka tietenkin kasvattaa kustannuksia, sekä heikentää männän rakennetta.

5.2 Absoluuttianturi

Absoluuttianturilla pystyttäisiin tarkkailemaan suoraan kauhan kulmaa. Nykyinen ratkaisuhan tarkkailee kippisylinterin asemaa, joka joudutaan muuntamaan kulmatiedoksi, joten absoluuttianturi voisi antaa periaatteessa tarkemman kulmatiedon kuin nykyinen anturi. Absoluuttianturin etuina ovat sen suhteellisen halpa hinta ja se, että anturin paikka olisi muualla, kuin kippisylinterin sisällä, eli anturi olisi melko helppo vaihtaa anturin vikaantuessa tai anturi tulisi ainakin suunnitella siten, että se on helppo vaihtaa. Lisäksi kippisylinteriin ei tarvitse tällöin porata minkäänlaisia reikiä anturia varten ja koneeseen voitaisiin laittaa aivan tavallinen sylinteri anturoidun sylinterin sijaan. Anturoituun sylinteriin on jouduttu mittatilaustyönä koneistamaan tarvittavat reiät, jotta nykyinen anturi saadaan sylinterin sisään ja tämä tietysti maksaa. Lastauskoneen koosta riippuen anturoidun sylinterin hinta on noin 1,4–2 kertaa kalliimpi kuin anturoimattoman sylinterin.

Kulmaa tarkkailevan anturin on oltava absoluuttianturi, koska anturin tulee säilyttää paikkatietonsa sähkökatkon tapahtuessa, eli inkrementtianturia ei voida käyttää. Lisäksi anturi tulee haastaviin olosuhteisiin, joten sen tulee olla hyvin suojattu lialta ja muilta ulkoisilta tekijöiltä. Esimerkiksi kiviä voi lentää lastatessa anturia päin ja tämä voi rikkoa anturin. Lisäksi anturin kaapelointi

tulee toteuttaa siten, että se on suojassa ulkoisilta tekijöiltä. Kaapelit tulisi laittaa esimerkiksi hydraulikkaletkun sisään ja kaapelit eivät silti välttämättä kestä.

Lähdimme tutkimaan erään laitetoimittajan (OEM) kanssa, miten voitaisiin implementoida absoluuttianturi kauhan aseman tarkkailuun. Ensin lähdettiin liikkeelle anturin teknisistä tiedoista ja mahdollisista sijoituspaikoista. Päädyttiin tarkastelemaan kahta eri paikkaa eli toinen paikka oli kauhan tappi ja toinen paikka niin sanottu poikatappi.

Kauhan tapilla absoluuttianturista saataisiin suoraan tieto kauhan kulmasta. Ongelmia/huomioitavia asioita tässä on kuitenkin monia. Ajateltiin, että anturi integroitaisiin kauhan tappiin tai anturi laitettaisiin tarkkailemaan tapin asentoa esimerkiksi erilaisten vipujen avulla, mutta ongelmana tulivat tilan puute, tapin rakenne ja se, että tappeja vaihdetaan suhteellisen usein. Tapit siis irrotetaan aina kun kauha vaihdetaan, eli karkeasti noin 6000–8000 tunnin jälkeen, riippuen kaivoksesta ja malmin kuluttavuudesta. Totesimme, että paikka, johon anturin laittaisi on aivan liian ahdas absoluuttianturille ja se olisi niin ahtaaseen paikkaan myös hankala asentaa. Lisäksi tapin rakenne on sellainen, että se ei liiku samassa suhteessa kauhan kanssa, vaan tappi ikään kuin ”kelluu” vapaasti. Perinteinen tappi taas lukitaan laipalla puomiin ja kauha liikkuu suhteessa tappiin, josta voitaisiin kulmatietoa tarkastella. Joten, jotta anturin voisi laittaa kauhan tapille, tulisi tapin rakenne muuttua. Tapin rakenne on ”kelluva/uiva” kulumisen takia, eli tapin käyttöikä on pidempi tällaisen rakenteen avulla.

Toinen potentiaalinen paikka, johon absoluuttianturi ajateltiin laittaa, osoittautui myös haasteelliseksi. Jos anturin laittaisi poikatapille tulee huomioida se, että kauhan kulma muuttuu, kun kauhaa nostetaan lineaarisesti ylös tai alas (eli puomi liikkuu ylös tai alas). Puomin kulman muutos vaikuttaa siis myös kauhan kulmaan. Tämä tulee ottaa huomioon, koska muuten kauhan kulmatieto ei pidä paikkaansa (anturi näyttää, että kauhan kulma muuttuu, vaikka kauhaa nostettiin vain lineaarisesti ylös tai alas), jos ei kompensoida puomin kulman muutoksen vaikutusta kauhan kulmaan. Puomin kulmaa tarkkaillaan jo tällä hetkellä kulma-anturilla, joten sieltä saatava tieto voidaan ottaa huomioon

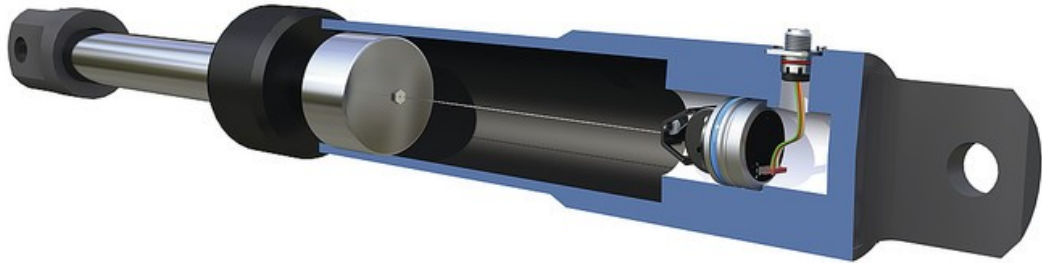
poikatapilla olevaan anturiin. Tästä aiheutuu kuitenkin kahden anturin antamat mittavirheet, epätarkkuudet, välykset ja toleranssit kauhan asemamittauksessa. Poikatapilla oleva anturi antaa periaatteessa saman tiedon, kuin nykyinen anturiratkaisu, mutta se antaa tiedon suoraan asteina. Tässäkin anturin paikassa on osittain samat ongelmat, kuin kauhan tapissakin, eli ongelmina ovat tilan puute ja tapin rakenne. Poikatapin rakenne ei ole täysin samanlainen kuin kauhan tapin rakenne, mutta tästäkään tapista ei saa kulmatietoa nykyisellä rakenteella tarkasteltua. Poikatappi ei liiku lainkaan. Tapin rakenne tulisi muuttaa, mutta tapin rakenteen täytyy olla joko nykyinen ratkaisu tai samanlainen ”kelluva/uiva” tappi kuin kauhassa ja tästäkään ei saada kulmatietoa tarkkailtua. Keinuvipu liikkuu kuitenkin tappiin nähden ja näiden välistä kulmatieto voitaisiin tarkkailla, mutta todettiin ettei anturilla olisi tarpeeksi tilaa nostovarren ja keinuvivun välissä.

Lopputuloksena siis todettiin, ettei absoluuttianturin soveltaminen onnistu kauhan aseman tarkkailuun, vaikka sillä olisikin melko paljon potentiaalia.

5.3 Vaijerivetoanturi

Eräs mahdollinen ratkaisu tarkkailla kippisylinterin männän asemaa on sylinterin sisälle tai ulkopuolelle laitettava vaijerivetoanturi. Jos vaijerivetoanturi laitetaan sylinterin sisään, tarvitsee männänperään tehdä vain kierre, johon vaijeri tulee kiinni. Toki itse anturille tarvitsee myös sylinteriin tehdä reikä/paikka.

Vaijerivetoanturin etuna magnetrokktiiviseen anturiin on se, että männänvarteen ei tarvitse porata reikää, joka kasvattaa kustannuksia, sekä heikentää männän rakennetta. Huonona puolena taas on anturin paineensietokyky. Anturin tulisi kestää noin 700 bar paineiskuja ja vaijerivetoanturi kestää vain 450 bar, joten anturia ei voida laittaa sylinterin sisälle.



Kuva 39 Poikkileikkaus vaijerivetoanturista, joka tulee sylinterin sisälle. Kuvassa Siko:n SGH10 vaijerivetoanturi. (Siko 2023.)

Ulkoinen ratkaisu taas olisi mahdollinen, sillä siellä ei rajoittaisi paine anturin käyttöä. Anturi kiinnitettäisiin esimerkiksi kippisylinterin alapuolelle ruuveilla ja itse vaijeria varten tarvitsee tehdä kierre sylinteriin tai sitten jonkinlainen kulmapala, johon vaijeri tulee kiinni. Vaijerin päässä on siis joko pätkä kierretankoa, peruke tai ruuvikiinnitys. Koko anturiratkaisu olisi täysin kippisylinterin ulkopuolella. Vaijeri liikkuu samalla sylinterin männän kanssa ja kertoisi tämän aseman. Ongelmana saattaa kuitenkin olla anturin kuluminen ja likaantuminen. Jos vaijeriin joutuu likaa tai roskaa, saattaa se rikkoa anturin, jumittaa kelan tai ainakin vähentää anturin käyttöikä. Anturi olisi kuitenkin helpompi vaihtaa, kuin tämänhetkinen ratkaisu.



Kuva 40 Ulkoinen vaijerivetoanturi. Kuvassa Siko:n SG42 vaijerivetoanturi ja vaijerin päässä on kierretanko. (Siko 2023.)

5.4 Induktiivinen lineaarianturi

Induktiivinen lineaarianturi olisi toinen tapa toteuttaa samanlainen männän liikkeen tarkastelu kuin ulkoisella vaijerivetoanturiratkaisulla. Lineaarianturi tulisi samaan paikkaan, eli kippisylinterin alapuolelle, jossa se olisi melko hyvässä suojassa ulkoisilta tekijöiltä, kuten kiviltä, joita saattaa lastatessa lentää. Lisäksi lineaarianturi ei olisi välttämättä yhtä altis likaantumiselle, kuin vaijerivetoanturi. Riittävän suojauksen takaamiseksi anturin ympärille voitaisiin suunnitella jonkinlainen suojakotelo.

Lineaarianturista saadaan halutessa analoginen 4–20 mA virtaviesti, joka on myös tämänhetkisessä ratkaisussa. Tämäkin anturi säilyttää asematietonsa sähkökatkon tapahtuessa, joten sen puolesta anturin pitäisi sopia kippisylinterin männän aseman tarkkailuun. Anturi voidaan kiinnittää kouralla/puristimella (clamp) tai nivelvarsi kiinnityksellä (heim joint/rose joint) ruuveilla. Nivelvarsi kiinnitys anturin molemmista päistä on oletettavasti turvallisempi tapa kiinnittää

anturi tärinän ja käyttöiän kannalta. Toinen tapa asentaa anturi on, että se on toisesta päästä kiinni ”clamp”-kiinnityksellä ja toisesta päästä nivelpöydällä, mutta tämä voi olla riskirakenne, sillä pienenkin asennuspoikkeaman jälkeen anturi saattaa mennä rikki nopeasti.

Anturin iskunpituus tulee olla sama, kuin kippisylinterillä. Anturi on ikään kuin toinen sylinteri, joka liikkuu kippisylinterin männän liikkuesssa ja kertoo täten männän aseman, josta saadaan sitten kauhan kulmatieto. Anturin vaihtaminen on yhtä helppoa, kuin vaijerivetoanturin vaihtaminen sekä selkeästi helpompaa, kuin nykyisen ratkaisun anturin vaihtaminen. Tässä anturissa on yhdistetty lineaaripotentimetrin ja induktiivisen liikeanturin hyvät puolet. Anturi näyttää aivan lineaaripotentimetrilta, mutta sen lukutekniikka on kosketukseton ja perustuu induktioon. Induktiivisessa lineaarianturissa on siis pidempi käyttöikä kuin lineaaripotentimetrilla, sillä mittaus ei perustuu mekaaniseen kosketukseen vastuspinnan ja liukukoskettimen välillä.

5.5 Lidar-anturi

Lidar-anturin avulla voitaisiin toteuttaa kauhan asennon tarkkailu. 2D tai 3D skanneri pystyttäisiin asentamaan esimerkiksi lastauskoneen etulokasuojaan, jossa skanneri luo 2D- tai 3D-kuvan kauhan asennosta. Tällä tavalla saataisiin melko tarkkakin kulmatieto. Tälläkin hetkellä hyödynnetään Lidar-anturia Sandvikin lastauskoneissa. Skanneria käytetään esimerkiksi kaivoksen seinämien tunnistuksessa, eli kun lastauskone liikkuu kaivoksissa automaattijolla, tunnistetaan missä kaivoksen seinämät sijaitsevat, ettei lastauskone törmää kaivoksen seinämiin. Samanlaista skanneria voitaisiin käyttää kauhan asennon tunnistuksessa, kuin mitä ympäristön skannaukseen käytetään tällä hetkellä. LIDAR-anturia on jo hyödynnetty ympäristön skannaukseen, mutta samalla anturilla ei onnistu kauhan asennon mittaus. Uusi erillinen anturi on kauhan asennon tarkkailuun liian kallis. Lisäksi toisen LIDAR-anturin käyttö veisi laskentatehoa pois jo käytössä olevalta skannerilta ja laskentatehon lisäys on kallista. Yksi ongelma on myös likaantuminen, eli linsskejä täytyy puhdistaa noin kerran vuorokaudessa. LIDARiin perustava kauhan asennon tarkkailu on teoriassa toimiva ratkaisu, mutta käytännössä aivan liian kallis. Tulevaisuudessa kuitenkin tämä saattaa olla toimiva ratkaisu, kun tekniikka menee eteenpäin ja jos anturin, sekä laskentatehon hinnat laskevat samalla.

6 Yhteenveto/pohdinta

Kauhan aseman tarkkailuun oli haastavaa keksiä uusi ratkaisu, joka olisi sekä halvempi, että parempi. Mitä enemmän anturi on suojassa, sitä haastavampi se on vaihtaa. Nykyisen anturin yksi suurimmista ongelmista on juuri anturin vaihtaminen vikaantuessa. Toisaalta, jos anturin taas laittaa muualle kuin kippisylinteriin, eli esimerkiksi absoluuttianturin laittaisi kauhan tapille tai poikatapille niin anturin vaihtaminen olisi helpompaa, mutta anturin (ja esimerkiksi sen johtojen) riittävä suojaaminen on haastavaa. Absoluuttianturit ovat taas suhteellisen halpoja. Absoluuttianturin tapauksessa oli toki muitakin ongelmia, kuten tappien rakenteet ja suunnitellun anturin paikan ahtaus. LIDAR:iin perustuva ratkaisu on taas hyvä esimerkki hyvin kalliista, mutta toimivasta ratkaisusta. Hinnan takia skannerin käyttämistä ei kannata tällä hetkellä edes harkita käytettävän kauhan aseman tarkkailussa. Ulkoinen vaijerivetoanturi ja induktiivinen lineaarianturi ovat mielestäni hyvä kompromissi hinnan ja vaihdettavuuden suhteen. Vaijerivetoanturi ja induktiivinen lineaarianturi saadaan melko hyvin suojattua, etenkin jos niihin suunnitellaan vielä jonkinlainen suojaus. Kyseiset anturit eivät myöskään ole älyttömän kalliita. Näistä kahdesta anturista ehdottaisin jatkojalostukseen induktiivista lineaarianturia. Induktiivinen lineaarianturi antaa käytännössä saman tiedon ja tulisi samaan paikkaan kuin ulkoinen vaijerivetoanturi, mutta vaikuttaisi olevan toimintavarmempi. Lisäksi Sandvikilla on samantyyppinen anturi jo käytössä, joten anturin implementoinnin pitäisi olla helpompaa. Induktiivisen lineaarianturin laitetoimittajana toimisi OEM ja valmistajana Positek. Mukana anturin valinnassa ja pohdinnassa on ollut Sandvikin anturipuolen asiantuntijoita, sekä sähkö- ja hydraulikkapuolen hankinta.

Seuraavaksi anturista tulisi tehdä prototyyppiasennus, jotta varmennetaan anturin toimivuus. Aikarajan puitteissa ei ollut mahdollista testata anturin toimivuutta tässä opinnäytetyössä. Muidenkaan esitettyjen anturivaihtoehtojen toimivuutta ei ole testattu prototyypin avulla.

Lähteet

Elprocus. Magnetic sensor working and its applications. Viitattu 26.10.2022
<https://www.elprocus.com/magnetic-sensor-working-and-its-applications/>

Howtomechatronics. What is Hall effect and how Hall effect sensors work.
Viitattu 28.10.2022
<https://howtomechatronics.com/how-it-works/electrical-engineering/hall-effect-hall-effect-sensors-work/>

Kajaste, J.; Kauranne, H. & Vilenius, M. 2008. Hydrauliiikkatekniikka. Helsinki: WSOY Oppimateriaalit.

Keinänen, T. & Kärkkäinen, P. 2009. Automaatiojärjestelmien hydraulikka ja pneumatiikka. Helsinki: WSOYpro.

Keinänen, T.; Kärkkäinen, P.; Lähetkangas, M. & Sumujärvi, M. 2007. Automaatiojärjestelmien logiikat ja ohjaustekniikat. Helsinki: WSOY Oppimateriaalit.

Keinänen, T. & Sumujärvi, M. 2019. Automaatiotekniikka. Helsinki: Sanoma Pro.

Megatron. Inductive linear transducer MDC. Viitattu 19.2.2023
<https://www.megatron.de/en/products/inductive-position-sensors/inductive-linear-transducer-mdc.html>

Mouser. Hall-Effect devices come on strong. Viitattu 31.10.2022

<https://www.mouser.fi/applications/selecting-sensors-for-motor-feedback/>

Omron. Products. 21.10.2022

<https://industrial.omron.fi/fi/products/d4n>

Opkon. Long stroke linear potentiometer. Viitattu 17.11.2022

<https://www.opkon.com.tr/en/products/linear-position-transducer-potentiometer/long-stroke>

Pic. Reed switches. Viitattu 27.10.2022

<https://www.pic-gmbh.com/en/reed-switches>

Sandvik. Sandvik kotisivut. Viitattu 2.4.2023

<https://www.home.sandvik.fi/tietoja-meist%C3%A4/yritys/>

Sensorola. Magnetostriktiivinen lineaarianturi. Viitattu 6.12.2022

<https://sensorola.fi/tuotteet/temposonics-magnetostriktiivinen-lineaarianturi-gb-sarja/>

Sick. Tuotevalikoima. Viitattu 8.1.2023 <https://www.sick.com/fi/fi/c/products>

Siko. Draw-wire encoder. Viitattu 13.2.2023

<https://www.siko-global.com/en-de/products/linearline-draw-wire-encoders/position-sensors-for-hydraulic-cylinders/sgh10>

Thomasnet. Inductive position sensors. Viitattu 19.2.2023

<https://www.thomasnet.com/articles/instruments-controls/all-about-position-sensors/>

Metropolia. Optiset anturit. Viitattu 31.10.2022

<https://wiki.metropolia.fi/display/koneautomaatio/Optiset>

Wikipedia. Lidar. Viitattu 5.3.2023

<https://en.wikipedia.org/wiki/Lidar>

Your electrical guide. Magnetostrictive sensor working principle & applications.

Viitattu 6.12.2022

<https://www.youelectricalguide.com/2022/03/magnetostrictive-sensor-working-principle-applications.html>