

ELEC-C1230 Säättötekniikka (5 op), kevät 2024

Luennoitsija: Jukka-Pekka Humaloja (etunimi.sukunimi@aalto.fi)
Materiaalit: Kai Zenger

Assistentit: Amin Modabberian, Fernanda Jokinen, Eero Ketonen, Leo Peltoniemi, Oscar Sundell, Jussi Särkilähti

Pääassistentti Amin Modabberian (etunimi.sukunimi@aalto.fi)
Yhteyskanavat yleisesti: sähköposti ja kurssin MyCourses-sivujen keskustelukanava. Luennot, laskuharjoitukset, laskutuvat.

Luku 1: Esittely, johdanto, dynaamiset mallit ja rakenteet, lohko-kaaviot, säädön periaatteet

ELEC-C1230 Säättötekniikka (5 op)

- Sisältö
 - Analoginen (jatkuva-aikainen) säätö, dynaamiset järjestelmät, PID-, taajuus- ja tilasäätimet.
 - Digitaalinen (tietokone) säätö, digitaaliset järjestelmät, lyhyt johdatus diskreettiaikaisiin säätömenetelmiin ja säätimiin.
 - Säättäjien suunnittelu, viritys ja analyysi. Simulointi suunnittelun apuna.
- Kurssin luennot etänä (Zoom), muu opetus luokkaopetuksena.
- Luennot
 - Keskiviikkoisin klo 10.15-12.00 Zoomissa
 - Luennoitsija: Jukka-Pekka Humaloja (Technical University of Crete).
 - [jukka-pekka.humaloja\(at\)aalto.fi](mailto:jukka-pekka.humaloja@aalto.fi),
 - Luentokalvot tulevat kurssisivuille kurssin edetessä.

Laskarit, Laskutuvat, Tuntitehtävät (Quiz) ja Kotitehtävät (KT)

Laskuharjoitukset ja Laskutuvat:

Jokaiseen luentoon liittyy **laskuharjoitus, jota ei arvostella**: järjestetään torstaisin klo 14:15-16, sali AS2 sekä tiistaisin klo 12:15-14, D-Sali (Y122), kantitalo. Assistentin johdolla lasketaan tehtäviä. Näiden lisäksi kurssissa julkaistaan ylimääräisiä laskutehtäviä ratkaisuneen itsenäistä harjoittelua varten. Nämä tehtävät kuuluvat myös kurssimateriaaliin. Harjoitustehtävät ja malliratkaisut tulevat kurssisivuille.

Laskutuvat ovat tilaisuuksia, joissa saa apua kotitehtäviin mutta joissa voi myös kysyä laskuharjoituksista. Ne järjestetään torstaisin klo 16:15-19, salissa TU3 (1171-1172).

- Ensimmäinen laskuharjoitus on torstaina **11.1** klo 14:15-16 salissa AS2. Ensimmäinen laskutupa on torstaina **18.1** klo 16:15-19 salissa TU3.

Laskarit, Laskutuvat, Tuntitehtävät (Quiz) ja Kotitehtävät (KT)

- Tuntitehtävä (Quiz) ratkaistaan ja palautetaan portaaliin sähköisesti aikataulussa. **Arvostellaan**. Tuntitehtävä liittyy kunkin viikon luentoon. Quiz avautuu 20 tuntia ennen luennon alkua (tiistaisin klo 14) ja palautuksen aikaikkuna on 48 tuntia. **(Poikkeus: Ensimmäisen luennon 10.1. Quiz julkaistaan luennon jälkeen)**
- Kurssissa aikaisemmin käytettyä Slack-kanavaa ei enää käytetä. Opetustilaisuuksien lisäksi kysymyksiä voi esittää sähköpostitse sekä kurssin MC-sivujen keskustelukanavalla.

Laskarit, Laskutuvat, Tuntitehtävät (Quiz) ja Kotitehtävät (KT)

- Lisäksi **arvostellaan** erilliset kotitehtävät (KT), joita on kuusi kappaletta. Ne julkaistaan kurssisivuilla ja palautetaan sähköisesti aikataulussa. Näiden paino on aika suuri, ja ne ovat arvostelussa oleellisia (kts. tarkempi määrittely jäljempänä). Kurssin läpäiseminen pelkällä tentillä tai välikokeilla on mahdollista mutta vaikeaa, ja arvosana jää heikoksi. Ensimmäinen kotitehtävä julkaistaan toisella luentoviikolla.
- Quizzit ja kotitehtävät on palautettava MC-portaaliin annetun aikataulun puitteissa. **Järjestelmä ei hyväksy myöhästyneitä palautuksia. Niitä ei myöskään vastaanoteta eikä arvostella millään muilla palautusmenettelyillä jätettyinä (esim. sähköpostitse).**

ELEC-C1230 Säättötekniikka (5 op)

- Kurssin suorittaminen
 - Kahdella välikokeella (VK) tai tentillä (T), tuntitehtävillä (Quiz) ja kotitehtävillä (KT).
 - 1. välikoe torstaina 22.2.2024 klo 13:00-16:00, AS2, TU2. 2. välikoe ja kurssitentti torstaina 18.4.2024 klo 13:00-16:00, AS2, TU2.
 - 2. välikokeen yhteydessä voi tehtävät nähtyään valita tekeekö tentin vai välikokeen. Vain yhden kokeen voi koetilaisuudessa tehdä. Välikokeita ei voi uusia.
 - Rästitenttejä järjestetään myöhemmin ilmoitettavina aikoina. Rästitentteihin on ilmoitauduttava. Välikokeisiin (tai 2. välikokeen yhteydessä pidettävään tenttiin) ei tarvitse ilmoittautua.

ELEC-C1230 Säättötekniikka (5 op)

- Tuntitehtävistä (Quiz) voi saada max 1p. / luento. Max. 12 p.
- Kotitehtävistä (KT) voi saada max 6 p./kotitehtävä. Max. 36 p.
- Kummassakin välikokeessa (VK) on neljä tehtävää a 6 p. max. Yhteensä Max. 24+24 p.=48 p.
- Tentissä (T) on viisi tehtävää a 6 p. max. Yhteensä Max. 30 p.
- Arvosanan määräytymisen painot: Tentti/välikokeet = 50 %, kotitehtävät = 40 %, tuntitehtävät (Quiz) = 10%.
- Välikoe-, tunti- ja kotitehtäväpisteet ovat voimassa vuoden ajan, kunnes kurssin luennot alkavat seuraavan kerran.

ELEC-C1230 Säättötekniikka (5 op)

Arvostelu. Lasketaan suoritusprosentti

$$AS\% = \left\{ \frac{Quiz}{12} \cdot 10 + \frac{KT}{36} \cdot 40 + \max \left[\frac{VK1+VK2}{48} \cdot 50, \frac{T}{30} \cdot 50 \right] \right\}$$

(Kurssipalautteen antamisesta saa ylimääräisen bonuksen 3 AS%).

Arvostelu: 48% =1, 60% =2, 70%=3, 80% =4, 90% =5.

ELEC-C1230 Säättötekniikka (5 op)

Luentoja ja niihin liittyviä Quiz-tehtäviä on 12 kpl.

- Tavallisia laskuharjoituksia, joihin ei sisälly palautuksia ja joita ei arvostella, on samoin 12 kpl.
- Erikseen julkaistavia kotitehtäviä on 6 kpl., ja kustakin voi saada maksimissaan 6 p. Kotitehtäviä voi ratkaista **yksin tai ryhmässä**, ihan miten haluaa. **Jokainen kirjoittaa kuitenkin oman ratkaisudokumentin ja palauttaa sen MyCoursesiin.** Tarkat ohjeet löytyvät kotitehtävän tehtäväpaperista. Kotitehtävän julkaiseminen ilmoitetaan aina kurssin tiedotuksessa (MyCourses).
- Kahden välikokeen summa tai tentti huomioidaan edellisellä sivulla olevan kaavan mukaan siten, että parempi suoritus aina otetaan huomioon. Jos on esimerkiksi suorittanut vain yhden välikokeen ja ei tenttiä, niin yllä oleva kaava antaa silti arvostelun. Minimisuoritusvaadetta ei siis missään kohdassa ole.

ELEC-C1230 Säättötekniikka (5 op)

Opintomateriaalia oman tarpeen ja kiinnostuksen mukaan

- Kirja: R.C.Dorf, R.H. Bishop: Modern Control Systems, Pearson Education International, mieluiten 12. – 14. painos. (Ainakin painokset 12 ja 13 löytyvät vapaasti netissä).
- Luentokalvot ja laskuharjoitukset ratkaisuineen löytyvät kurssin kotisivulta
- Huom. Luentokalvot ovat suhteellisen laajat ja omatoimiseen opiskeluun soveltuvat. Luennoilla niitä ei käydä kaikkia läpi, vaan keskitytään tärkeimpiin asioihin ("punainen lanka"). Dorf, Bishop on erinomainen oppikirja, mutta laaja ja sisältää paljon sellaista, mitä kurssilla ei käydä läpi. Kirjan lukeminen luku luvulta vaatii paljon aikaa. Kirjaa suositellaan käytettäväksi apuna oman kiinnostuksen mukaan. Kannattaa lukea ne kohdat, jotka luennoilla on käsitelty, sillä tämä kattaa kurssin sisällön.

ELEC-C1230 Säättötekniikka (5 op)

- The lectures and exercises will take place in Finnish, but the course can be done in English also:

- The course book is in English (R.C.Dorf, R.H. Bishop: Modern Control Systems, Pearson Education International, preferably 12th - 14th edition). At least eds. 12 and 13 are freely available in the net.
- The homework problems, mid-term exams and full exams will be available in English – if you contact the lecturer one week before the release date (exam date) and ask for English versions.
- Both the lecturer and the teaching assistants can be contacted – should you require assistance.

Lukuohje

Kalvomateriaali on laaja ja itseopiskeluun soveltuva. Kaiken tarkkaan lukemiseen ja omaksumiseen voi kuitenkin mennä melkoisesti aikaa, samoin kuin oppikirjan (Dorf ja Bishop) lukemiseen. Lukuohjeessa annetaan ohjeita siitä, mikä kussakin luvussa on keskeistä materiaalia.

Johdanto_Luku1_ ja_2:

- Tutustu kurssin mekanismiin (opetus, palautukset, kokeet, arvosteluperiaatteet). Suunnittele oma ajankäyttösi ja aikataulusi kurssin vaatimuksiin nähden.
- Käy kursorisesti läpi johdantona oleva säiliön pinnankorkeuden säätöesimerkki; tee selväksi itsellesi ohjauksen ja takaisinkytketyn säädön välinen ero. Huom. esimerkki on erittäin opettavainen, mutta kokonaisuudessaan aika laaja ja voit huoletta sivuuttaa sen loppuosan ilman, että siitä olisi haittaa myöhemmin.
- Tutustu hieman historiallisiin säätimiin, esimerkiksi Wattin kuvernööriin ja vesikelloon.
- Katsele kurssisivulla olevat Matlab/Simulink-ohjelmiston opetusvideot. Ohjelmistoa käytetään erityisesti kotitehtävissä – jo ensimmäisestä lähtien.

Kurssin oleellinen sisältö, viittaukset (suuntaa-antavia): Dorf, Bishop, Modern Control Systems, 12th ed.)

- Dynaamiset ja staattiset mallit (2.1-2.3)
- Laplace-muunnos (2.4)
- Siirtofunktio, tilaesitys, mallien väliset yhteydet (2.5-2.6, 3.1-3.7)
- Lohkokaavioalgebra, suljettu säätöpiiri, säätöpiirin suorituskyky (2.6), (5.1-5.6)
- Tila- ja tulo-lähtöstabiilisuus, Routhin kaavio (6.1-6.4)
- PID-säädin (7.6)
- Tilamenetelmät: saavutettavuus, tarkkailtavuus, tilatakaisinkytketty säätö, tilatarkkailija (11.1-11.6)
- Taajuustason esitys, Boden ja Nyquistin diagrammit (8.1-8.5)
- Vahvistus- ja vaihevarat, Nyquistin stabiilisuuslause (9.1-9.5)
- Suorituskyvyn mitat, taajuuskompensaattorit (10.1-10.4, 10.8)
- Johdatus digitaalisäätöön eli diskreettiaikaiseen säätöön (13.1-13.3)
- Z-muunnos, (pulssin)siirtofunktio (13.4)
- Diskreetin järjestelmän stabiilisuus
- Näytteenotto, jatkuvien säädinten diskreetit approksimaatiot

Mitä säätötekniikka on?

• Control Systems Engineering

- Laaja näkemys:
 - Systeemien sekä niiden hallintamekanismien ja -rakenteiden analysointia, suunnittelua ja toteuttamista
- Suppea näkemys:
 - Negatiivisen takaisinkytkennän (säätösilmukan) tutkimus

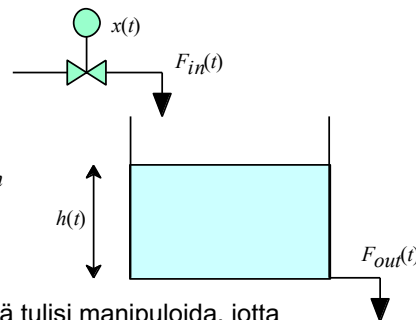
• Systemi

- "Any definable set of components."
- Järjestelmä, joka määrittää suureiden väliset riippuvuudet

Esimerkki 1.

• Tarkastellaan vesisäiliön pinnankorkeuden hallintaa

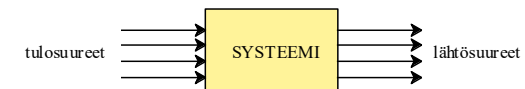
- säiliön tuloventtiiliä x avataan tai suljetaan, jolloin tulovirtaus F_{in} vastaavasti kasvaa tai pienenee
- tavoitteena on, että pinnankorkeus h käyttäytyisi halutulla tavalla
- säiliön poistovirtaus F_{out} on tuntematon häiriö



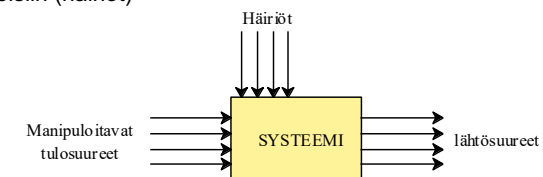
• Säätötekniikka kertoo, miten venttiiliä tulisi manipuloida, jotta pinnankorkeus käyttäytyisi halutusti jokaisella ajanhetkellä – vaikka säiliöön vaikuttaa merkittäviä häiriöitä.

- Perussäännöt ovat:
 - Kun pinnankorkeus on liian alhainen niin tuloventtiiliä avataan
 - Kun pinnankorkeus on liian korkea niin tuloventtiiliä suljetaan

Lohkokaaviot



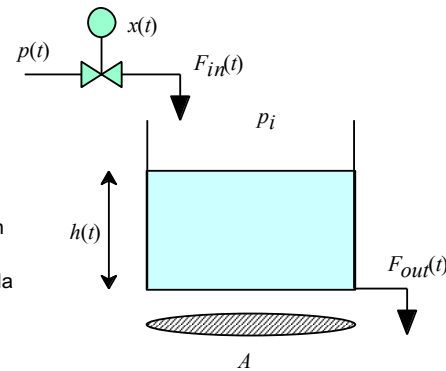
- Nuolissa kulkevat informaati signaalit ja lohkoissa prosessoidaan informaatio toiseksi informaatioksi
- Lohkoon tulevia signaalit ovat heräitteitä (tulosuureita) kun taas lohkoista lähtevät signaalit ovat vasteita (tai lähtösuureita)
- Lohkokaavioista selviää systeemin kausaliteetti eli syy-seuraussuhteet
- Lohkojen tulosuureet jaetaan usein manipuloitaviin ja ei-manipuloitaviin suureisiin (häiriöt)



Esimerkki 1.

- Tehdään lohkokaavio edelliselle esimerkille seuraavilla oletamuksilla

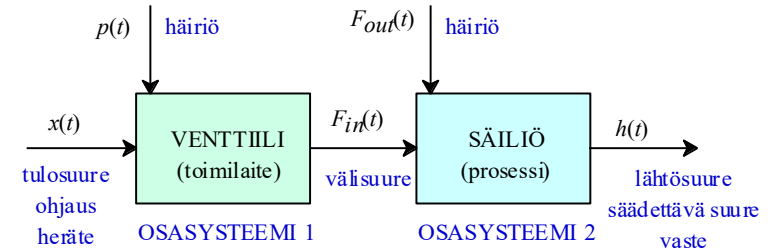
- Oletetaan venttiilille yksinkertainen staattinen malli (virtaus on suoraan verrannollinen paine-eron neliöjuureen ja venttiin avaamaan)
- Virtaukset F_i ovat tilavuusvirtauksia
- Tulovirtaus purkautuu ilmanpaineeseen p_i (vakio)
- Säiliö on suoraseinäinen (poikkipinta-ala on A)
- Syöttöpaineen p vaihtelut ovat häiriötä
- Säiliö sisältää puhdasta vettä (kokoonpuristumaton neste – ei tiheysvaihteluita)



Esimerkki 1. -jatkoa

- Selvitetään aluksi muuttujien välinen kausaliteetti – eli mitkä muuttujat ovat tulo- ja mitkä lähtösuureita

- Lähtösuure on pinnankorkeus h , johon kaikki muuttujat vaikuttavat
- Pinnankorkeuteen vaikuttaa suoraan tulo- ja lähtövirtaukset F_{in} ja F_{out} sekä tulovirtauksen F_{in} kautta välillisesti venttiin aukeama x ja syöttöpaine p .



Esimerkki 1. -jatkoa

- Tarkastellaan, mitä lohkot sisältävät

- Massatase: Varastoituva massa = tuleva massavirta – lähtevä massavirta
- Vakiotiheyksisillä systeemeillä massatase yksinkertaistuu tilavuustaseeksi

$$\frac{dm(t)}{dt} = Q_{in}(t) - Q_{out}(t), \quad \begin{cases} m(t) = \rho \cdot V(t) \\ Q(t) = \rho \cdot F(t) \end{cases}$$

$$\Rightarrow \rho \cdot \frac{dV(t)}{dt} = \rho \cdot F_{in}(t) - \rho \cdot F_{out}(t) \Rightarrow \frac{dV(t)}{dt} = F_{in}(t) - F_{out}(t)$$

- Tilavuudesta päästään helposti pinnankorkeuteen, ottamalla säiliön poikkipinta-ala huomioon

$$V(t) = A \cdot h(t)$$

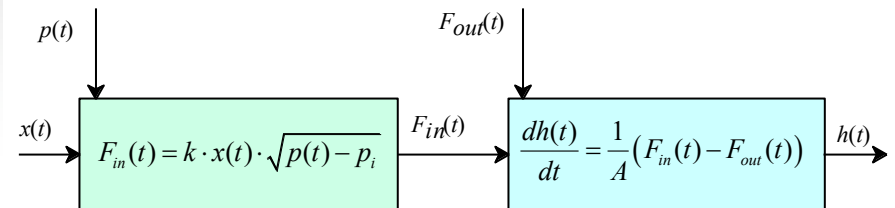
$$A \frac{dh(t)}{dt} = F_{in}(t) - F_{out}(t) \Rightarrow \frac{dh(t)}{dt} = \frac{1}{A} (F_{in}(t) - F_{out}(t))$$

Esimerkki 1. -jatkoa

- Venttiilille saadaan yksinkertainen staattinen riippuvuus

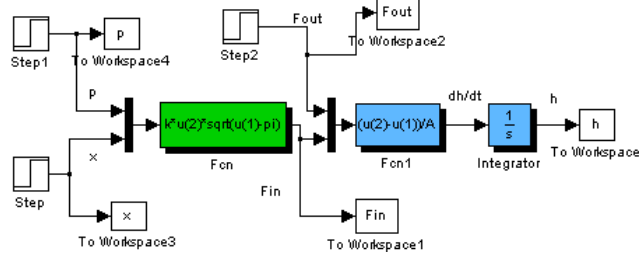
$$F_{in}(t) = k \cdot x(t) \cdot \sqrt{p(t) - p_i}$$

- k on purkauskerroin, joka määrittelee virtauksen riippuvuuden paine-eroon ja venttiin avautumaan nähden
- Kokonaislohkokaavioksi saadaan



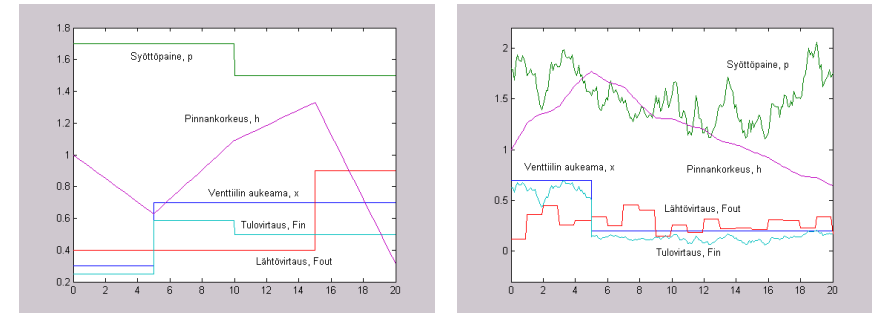
Esimerkki 1. -jatkoa

- Kehitetty lohkokaavio sopii hyvin esimerkiksi simulointiin. Tehdään MATLAB/Simulink-malli ja tutkitaan miten säiliön pinnankorkeus käyttäytyy eri tulosuureilla ja parametreilla
 - Oletetaan, että parametreille pätee: $A = 2\text{m}^2$, $k = 1\text{m}^3\text{h}^{-1}\text{atm}^{-0.5}$, $p_i = 1\text{atm}$
 - Kokeillaan aluksi askelmaisia tulosuureiden muutoksia



Esimerkki 1. -jatkoa

- Askelherätteiden jälkeen kokeillaan realistisempia, kohinaisia herätteitä
 - Syöttöpaineen vaihtelut ovat ryömivää kohinaa ja lähtövirtaus muuttuu satunnaisesti tunnin välein

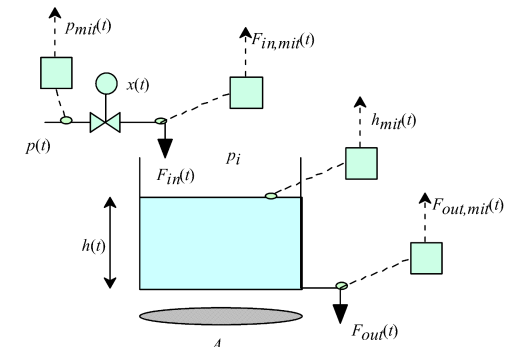


Lähtösuureen hallintastrategiat

- Lähtösuureen hallintamekanismit jaetaan tavallisesti kolmeen perusluokkaan
 - Avoin ohjaus
 - kompensointi eli myötäkytkentä
 - varsinainen säätö eli (negatiivinen) takaisinkytkentä
- Näiden kolmen perusstrategian lisäksi käytetään runsaasti eri hallintamekanismien yhdistelmiä
 - Sekvenssissä eli vaihtelemalla hallintamekanismia tilanteen mukaan
 - Samanaikaisesti
 - Rinnakkain samalla hierarkiatasolla
 - Sisäkkäin eri hierarkiatasoilla
- Tarkastellaan eri mekanismeista esimerkin avulla

Esimerkki 1. -jatkoa

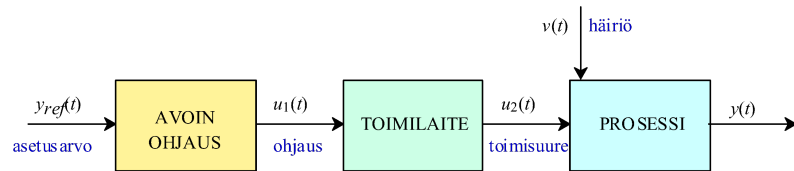
- Kokeillaan, miten edellä esitetyt lähtösuureen hallintastrategiat sopivat esimerkkiprosessille
 - Kompensointi edellyttää mittausta syöttöpaineesta ja poistovirtauksesta
 - Takaisinkytketty säätö edellyttää mittausta pinnankorkeudesta
- Laitetaan mittarit paikoilleen
 - Tässä yhteydessä ei puututa mittauslohkojen sisältöön - todetaan vain että mittauslohkojen tulona on todellinen mitattava suure ja lähtönä mittarin ilmoittama approksimaatio todellisesta suureesta.



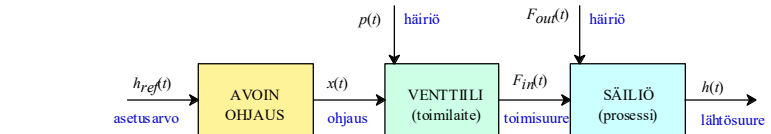
Avoim ohjaus

- Avointa ohjausta käyttämällä hallittavaa lähtösuuretta ei seurata lainkaan

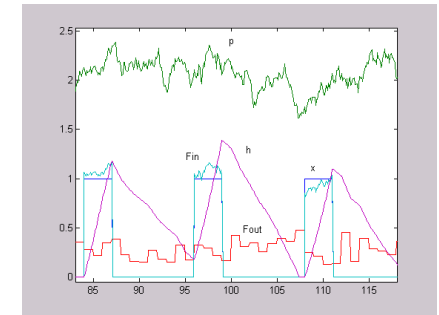
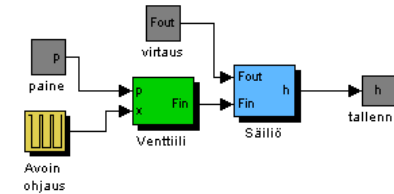
- Tyypillisesti komentosekvenssi
- Ei edellytä mittauksia ... edullinen
- Käytetään:
 - panosprosesseissa ja reseptipohjaisessa ajossa
 - systeemien hallituissa ylös- ja alasajoissa
 - Laajoissa, stabiileissa järjestelmissä kehittyneempien hallintamekanismien lomassa



Esimerkki 1. -jatkoa – Avoim ohjaus



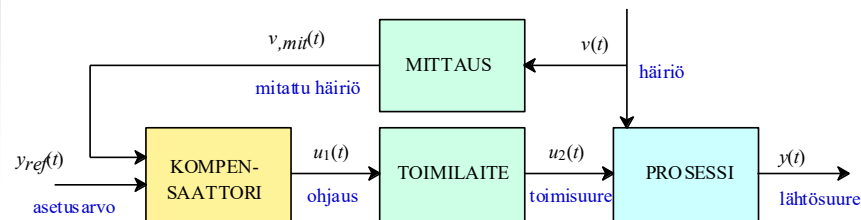
- Venttiili avataan joka kahdestoista tunti kolmen tunnin ajaksi
- Joskus säiliö ennättää tyhjentyä täyttöjen välillä - joskus ei



Kompensointi eli myötäkyytkentä

- Kompensoinnilla pyritään poistamaan mitattavien häiriöiden vaikutukset jo ennen kuin ne näkyvät lähtösuureessa

- Edellyttää mittauksia kompensoitavista häiriöistä
- Edellyttää häiriöiden vaikutusten hyvää ymmärtämistä eli mallin tuntemista
- Luonteeltaan ennakoiva

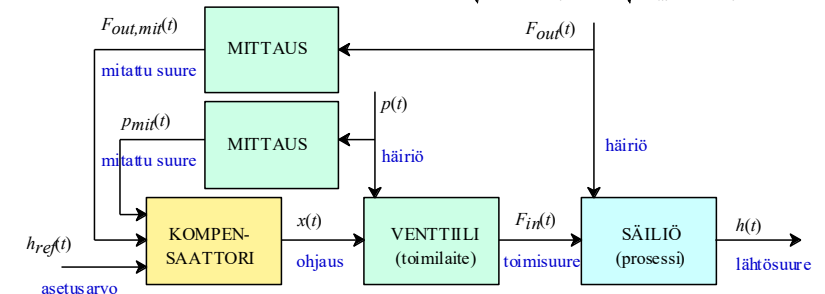


Esimerkki 1. -jatkoa - Kompensointi

- Pinnankorkeus ei muutu (vaikka siihen vaikuttaa häiriöitä), jos tulovirtaus on jokaisella ajanhetkellä yhtä suuri kuin lähtövirtaus

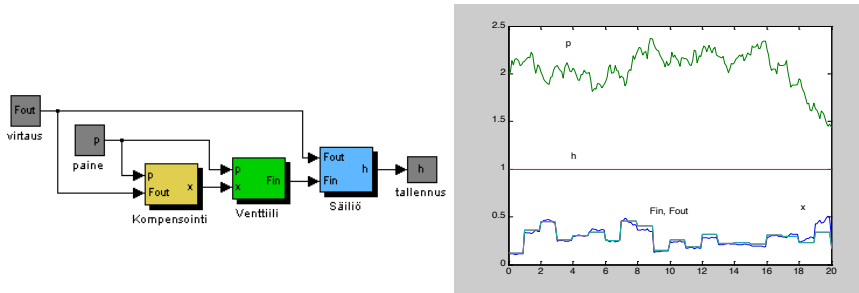
$$\frac{dh(t)}{dt} = \frac{1}{A}(F_{in}(t) - F_{out}(t)) = 0 \Rightarrow F_{in}(t) = F_{out}(t)$$

$$\Rightarrow k \cdot x(t) \cdot \sqrt{p(t) - p_i} = F_{out}(t) \Rightarrow x(t) = \frac{F_{out}(t)}{k \cdot \sqrt{p(t) - p_i}} \approx \frac{F_{out,mit}(t)}{k \cdot \sqrt{p_{mit}(t) - p_i}}$$



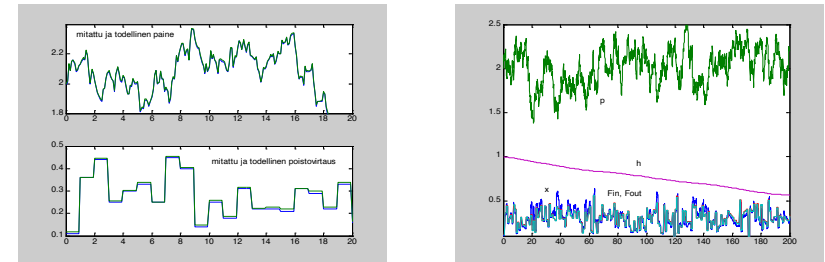
Esimerkki 1. -jatkoa - Kompensointi

- Venttiiliä ohjataan nyt kompensoinnilla
 - Tehdään myötäkkyntä sekä poistovirtauksen että syöttöpaineen mittauksista
 - Kompensaattori kompensoi kaikki häiriöt ennen kuin pinnankorkeudessa nähdään niiden vaikutuksia



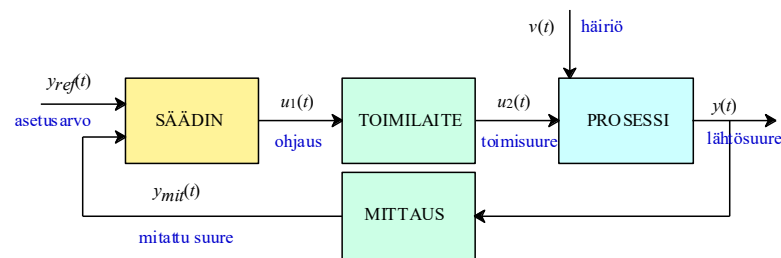
Esimerkki 1. -jatkoa - Kompensointi

- Oletetaan nyt, että paineen ja virtauksen mittauksissa on pyöristysvirheitä
 - Mitatuissa arvoissa on vain kaksi desimaalia
 - Pyöristysvirheiden johdosta pinnankorkeus ryömiä hallitsemattomasti – sitä ei mitata, joten ryömintää ei havaita
 - Tämän tyyppinen kompensointi ei toimi yksin ainoana hallintajärjestelmänä



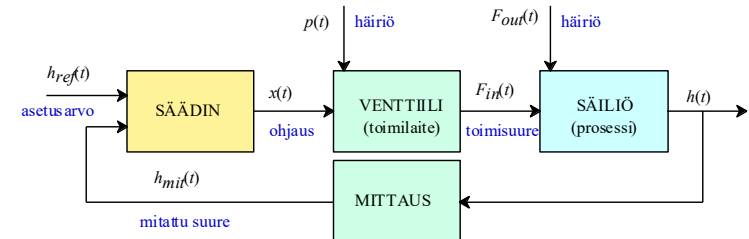
Säätö eli takaisinkytkentä

- Takaisinkytketyllä säädöllä korjataan lähtösuureessa olevat poikkeamat
 - Edellyttää mittauksia lähtösuureesta
 - Voi korjata häiriön vasta kun sen vaikutukset näkyvät lähtösuureessa
 - Stabiiloiva
 - Ei edellytä tarkan mallin tuntemista



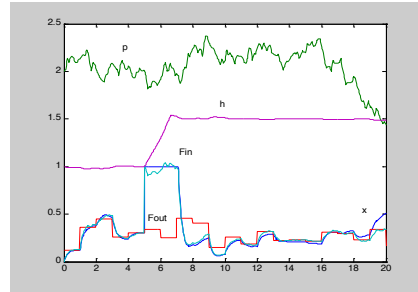
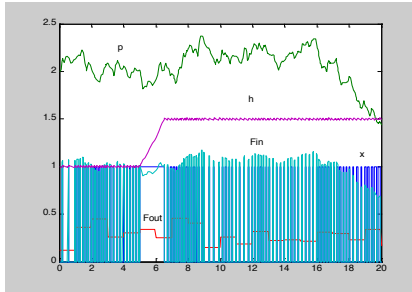
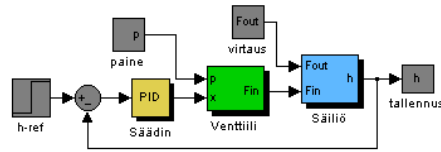
Esimerkki 1. -jatkoa - Takaisinkytkentä

- Tässä tapauksessa säätimeksi voidaan valita esimerkiksi
 - Relesäädin
 - Heti kun pinnankorkeus ylittää sovitun yläraja-arvon, niin venttiili lyödään täysin kiinni ja heti kun alaraja-arvo alitetaan, niin venttiili avataan täysin auki
 - PID-säädin
 - Pehmeä ohjaussignaali (PID-säädin käsitellään kurssilla myöhemmin)



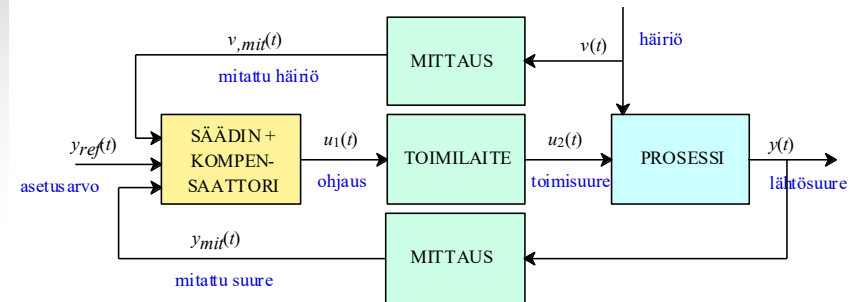
Esimerkki 1. -jatkoa - Takaisinkytkentä

- Tehdään takaisinkytkentä pinnankorkeuden mittauksesta
- Säädetään pinnankorkeus arvosta 1 arvoon 1.5 ajanhetkellä 5h
- Relesäädöllä (vas.) systeemi jää värähtelemään – PID:llä (oik.) ei



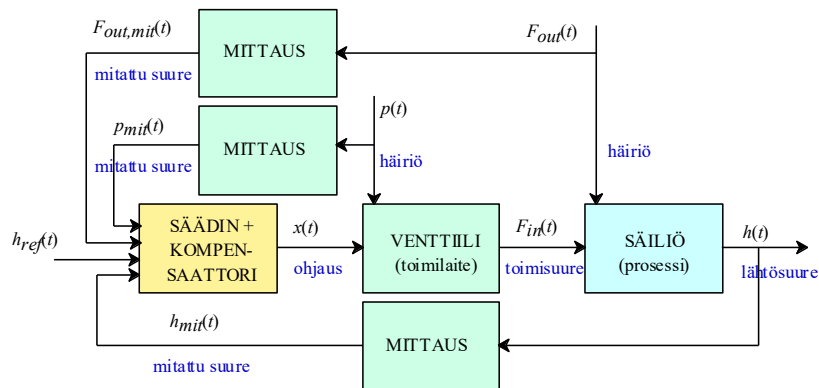
Yhdistetyt strategiat

- Takaisinkytkennän ja myötäkytkennän yhdistäminen
 - Myötäkytketty häiriön kompensointi pyrkii ennakoimaan ja toimii jo ennen kuin häiriö vaikuttaa säädettyyn suureen
 - Takaisinkytketty säätö korjaa tilanteen, mikäli lähtösuure poikkeaa kompensoinnista huolimatta halutusta arvosta



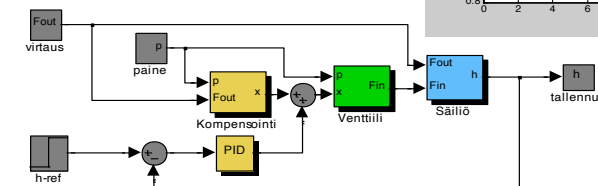
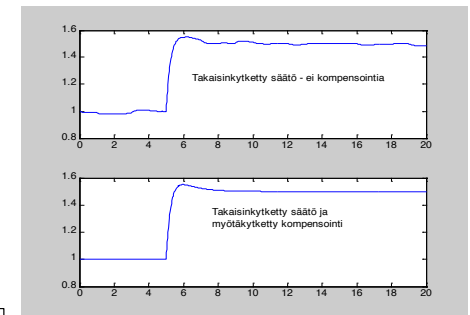
Esimerkki 1. -jatkoa - Yhdistetyt strategiat

- Takaisinkytkennän ja myötäkytkennän yhdistäminen
 - Edellyttää mittauksia lähtösuureesta



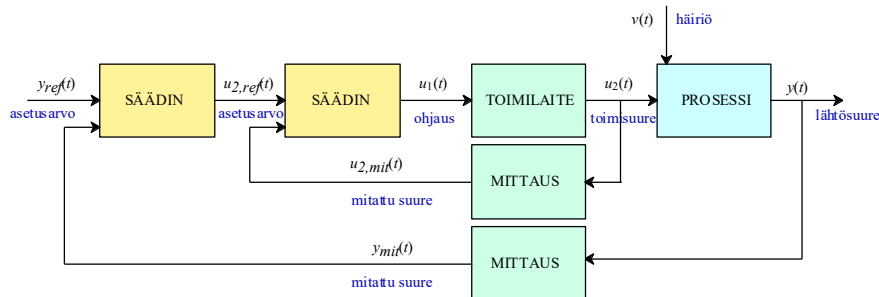
Esimerkki 1. -jatkoa - Yhdistetyt strategiat

- Tehdään takaisinkytkentä pinnankorkeuden mittauksesta ja samanaikainen kompensointi syöttöpaineesta ja poistovirtauksesta
- Säädetään pinnankorkeus arvosta 1 arvoon 1.5 ajanhetkellä 5h



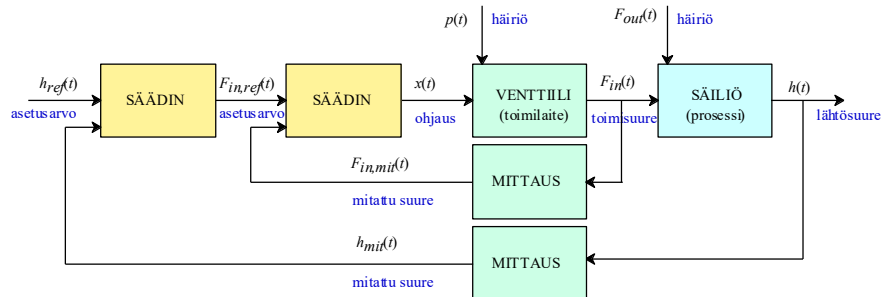
Yhdistetyt strategiat

- Kaksi takaisinkytkettyä säädintä sisäkkäin, kaskadisäättö
 - Edellyttää mittauksia lähtösuureesta
 - Jotta kaskadisäädöstä olisi hyötyä, niin sisemmän silmukan olisi oltava huomattavan nopea ja siihen olisi tultava merkittäviä häiriöitä - verrattuna ulompaan silmukkaan



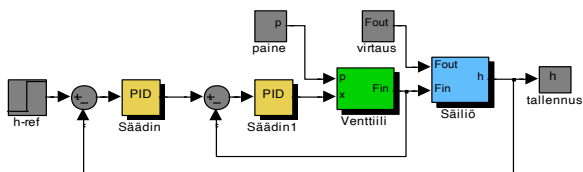
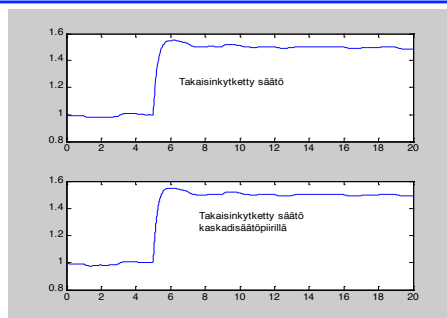
Esimerkki 1. -jatkoa - Yhdistetyt strategiat

- Esimerkkiprosessissa tehdään sisempään säätösilmukkaan takaisinkytkentä tulovirtauksesta ja ulompaan silmukkaan pinnankorkeudesta
 - Edellyttää mittauksia molemmista suureista



Esimerkki 1. -jatkoa - Yhdistetyt strategiat

- Tehdään takaisinkytkentä pinnankorkeuden mittauksesta ja sisempi takaisinkytkentä tulovirtauksesta
- Säädetään pinnankorkeus arvosta 1 arvoon 1.5 ajanhetkellä 5h
- Tässä prosessissa ei kaskadisäätimestä ole merkittävää hyötyä – hyöty saavutetaan suuremmilla häiriöillä ja pitemmillä viiveillä



Historiallisia automaatteja

"Jos jokainen instrumentti voisi tehdä itse oman työnsä, totellen ja ennakoiden muiden tahtoa... jos sukula osaisi kutoa ja plektra soittaa lyyräa ilman ohjaavaa kättä, päälliköt eivät tarvitsisi palvelijoita..." (Aristoteles)

- Ktesibioksen (n. 283-247eKr.) vesikello
 - Ensimmäinen dokumentoitu takaisinkytkentä
- Leonardo Da Vincin (1452-1519) paistiautomaatti
 - Häiriön kompensointi
- Cornelius Drebbelin (1572-1633) termostaatti
 - Ensimmäinen automaattinen lämmönsäätöjärjestelmä
- James Wattin (1736-1819) kuvernööri
 - Pyörimisnopeuden säätö

Ktesibios (n. 283-247eKr.)

- Alexandriassa asunut kreikkalainen keksijä ja parturi
- Teki keksintöjään mm. Arsinoelle (Ptolemy II Philadelphosin sisar ja vaimo)
- Rakensi ilma- ja vesikäyttöisiä koneita (katapultti, urut, pumppu, kello)
- Vain pieniä osia kirjoituksista on jäljellä.

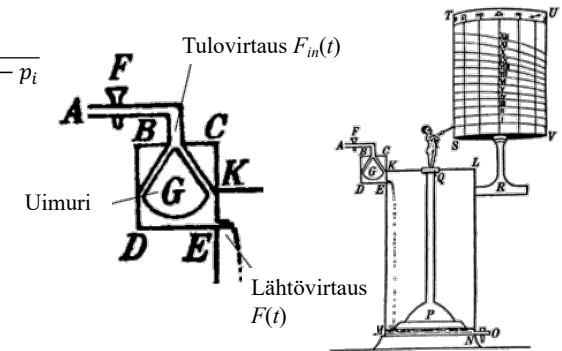


Ktesibioksen vesikello

Ensimmäinen dokumentoitu takaisinkytkentä

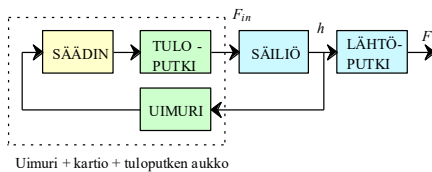
- Pinnankorkeuden säätö syöttösäiliössä kartiomaisen uimurin avulla (pinnan noustessa uimuri tukkii tuloputken ja pinnan laskiessa uimuri laskee avaten tuloputken)
- Veden virtaus kelloon ($F(t)$) riippuu syöttösäiliön pinnankorkeudesta ($h(t)$)

$$\begin{aligned}
 F(t) &= k \cdot x \cdot \sqrt{\Delta p(t)} \\
 &= k \cdot x \cdot \sqrt{(p_i + \rho \cdot g \cdot h(t)) - p_i} \\
 &= k \cdot x \cdot \sqrt{\rho \cdot g \cdot h(t)} \\
 &= (k \cdot x \cdot \sqrt{\rho \cdot g}) \cdot \sqrt{h(t)} \\
 &= K \cdot \sqrt{h(t)}
 \end{aligned}$$



Ktesibioksen kello

- Säätopiirissä mittaus (uimuri), säädin (kartion dimensiot) ja toimilaite (tuloputken aukko) on fuusioitu yhteen elementtiin



Uimuri + kartio + tuloputken aukko



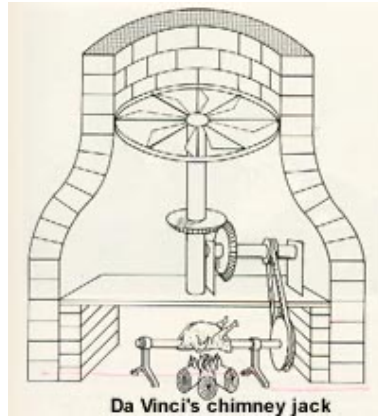
Leonardo Da Vinci (1452-1519)

- Syntyi Italiassa Firenzen lähistöllä
- Keksijä, taiteilija, tiedemies
- Astui Milanon herttuan palvelukseen 1482
 - Veistoksia ja maalauksia
 - Sota- ja muita koneita
 - Luonnontieteiden (anatomia) tutkimusta
- Monia keksintöjä (ilma- ja vesikäyttöisiä), hammasrattaita – useat jäivät suunnitelmien asteelle (lentokone)



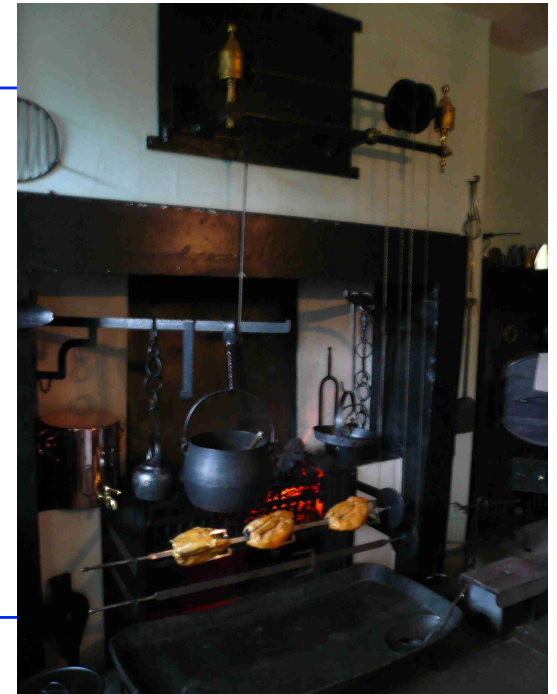
Da Vincin paistiautomaatti

- Liekki paistin alla saa aikaan kuuman ilmavirran, joka pyörittää turpiinisiivistöä savupiipussa. Turpiinin pyöräminen muutetaan hammasrattailla paistin pyörimiseksi
 - Kun liekki on suuri, niin paistia on käännettävä nopeasti, jottei se palaisi liikaa yhdestä kohdasta
 - Pienellä liekillä, paistia on käännettävä hitaasti, jotta se ennättäisi kypsyä



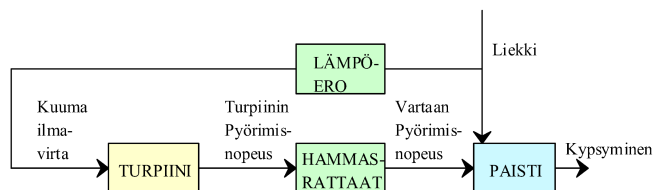
Paistiautomaatti

- Kuvassa esitetty paistiautomaatti on 1700-luvulta. Edinburghissa, New Townissa sijaitsevassa entisöidyssä Georgian Housessa.



Da Vincin paistiautomaatti

- Kyseessä on häiriön kompensointi
 - Liekin suuruus riippuu monesta ulkoisesta seikasta (kuten poltettavasta materiaalista) ja sen vaihtelut ovat systeemiin tulevia häiriöitä.
 - Paistin kypsyminen riippuu liekin suuruudesta ja ajasta, jonka se on liekin läheisyydessä (eli tässä tapauksessa pyörimisnopeudesta)
 - Liekki vaikuttaa suoraan positiivisesti kypsymiseen: Suuri liekki -> nopea paistin kypsyminen
 - Liekin vaihtelut myös kompensoidaan myötäkytkennällä: Suuri liekki -> nopea kuuma ilmavirta -> nopea turpiinisiivistön pyöräminen -> nopea paistin pyöräminen -> hidas paistin paikallinen kypsyminen



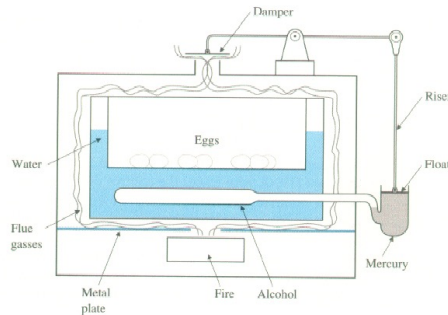
Cornelius Drebbel (1572-1633)

- Hollantilainen kaivertaja, alkemisti ja keksijä
- Kehitti sukellusveneen, pumpun ja kellon, jota ei tarvinnut koskaan vetää (perustui ilmanpaineen muutoksiin)
- Astui Kuningas Jaakon palvelukseen v. 1606 Lontoossa



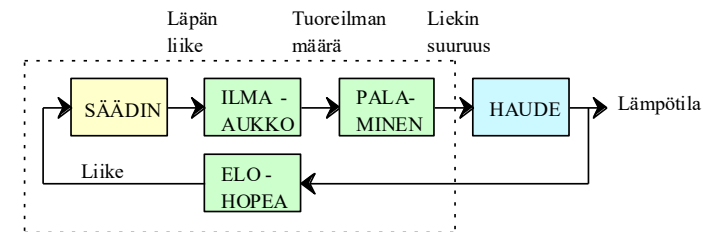
Drebbelin termostaatti

- Lämpötilan säätö takaisinkytkennällä
 - Liekki kuumentaa haudetta, jossa on lämpötilamittarina alkoholia ja elohopeaa putken sisällä
 - Nesteet laajenevat, mikä muuttuu erillisessä astiassa pystysuoraksi liikkeeksi
 - Pystysuora liike siirtää läpän tuoreilman syöttöaukon päälle ja pois
- Liian kuuma lämpötila sulkee aukon, jolloin liekki kuristuu ja liian alhainen lämpötila avaa aukon, jolloin liekki kasvaa



Drebbelin termostaatti

- Säädin koostuu liikkeenvälittimestä, jolla siirretään elohopean liike läpän liikkeeksi
 - Säädin voidaan virittää herkäsi siirtämällä välittimen tukipisteitä siten, että pienikin elohopean tilavuuden laajeneminen muuttuu suureksi läpän liikkeeksi



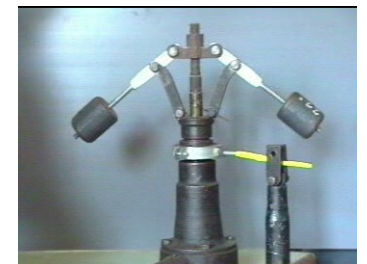
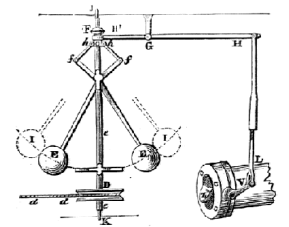
James Watt (1736-1819)

- Skotlantilaisen (Greenock) kauppiaan poika
- Opiskeli matemaattikko-instrumenttisuunnittelijaksi – eli insinööriksi.
- Paransi Saveryn ja Newcomen höyrykoneita ja sai patentoitua oman tehokkaamman mallinsa
- Kuvasi höyrykoneidensa tehoa hevosvoimissa (havainnollinen esimerkki asiakkaille, kuinka monta hevosta laitteella voidaan korvata)



Wattin kuvernööri

- Suunniteltiin höyrykoneen pyörimisnopeuden säätöön kuormitushäiriöissä
 - Alhaisilla pyörimisnopeuksilla painot ovat painovoiman johdosta tukivarren lähellä
 - Korkeilla pyörimisnopeuksilla keskipakovoima nostaa pallot (voittaa painovoiman), joka muuttuu pystysuoraksi liikkeeksi ja edelleen venttiilin kuristukseksi - venttiilin kuristamisesta seuraa vuorostaan pyörimisnopeuden laskeminen
 - Kyseessä on negatiivinen takaisinkytkentä



Wattin kuvernööri

- Kuormituksen tai höyryn paineen muuttuessa moottori ei kykene pitämään yllä samaa pyörimisnopeutta venttiilin pysyessä muuttumattomana
- Wattin kuvernöörissä säädin koostuu liikkeen välityksestä, jossa holkin pystysuora liike muuttuu höyryventtiilin liikkeeksi

