
AS-74.2111 Analoginen säätö

Luento 1: Johdanto, dynaamiset mallit ja rakenteet, lohkokaaaviot, säädön periaatteet



Mitä säätötekniikka on?

- Control Systems Engineering

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

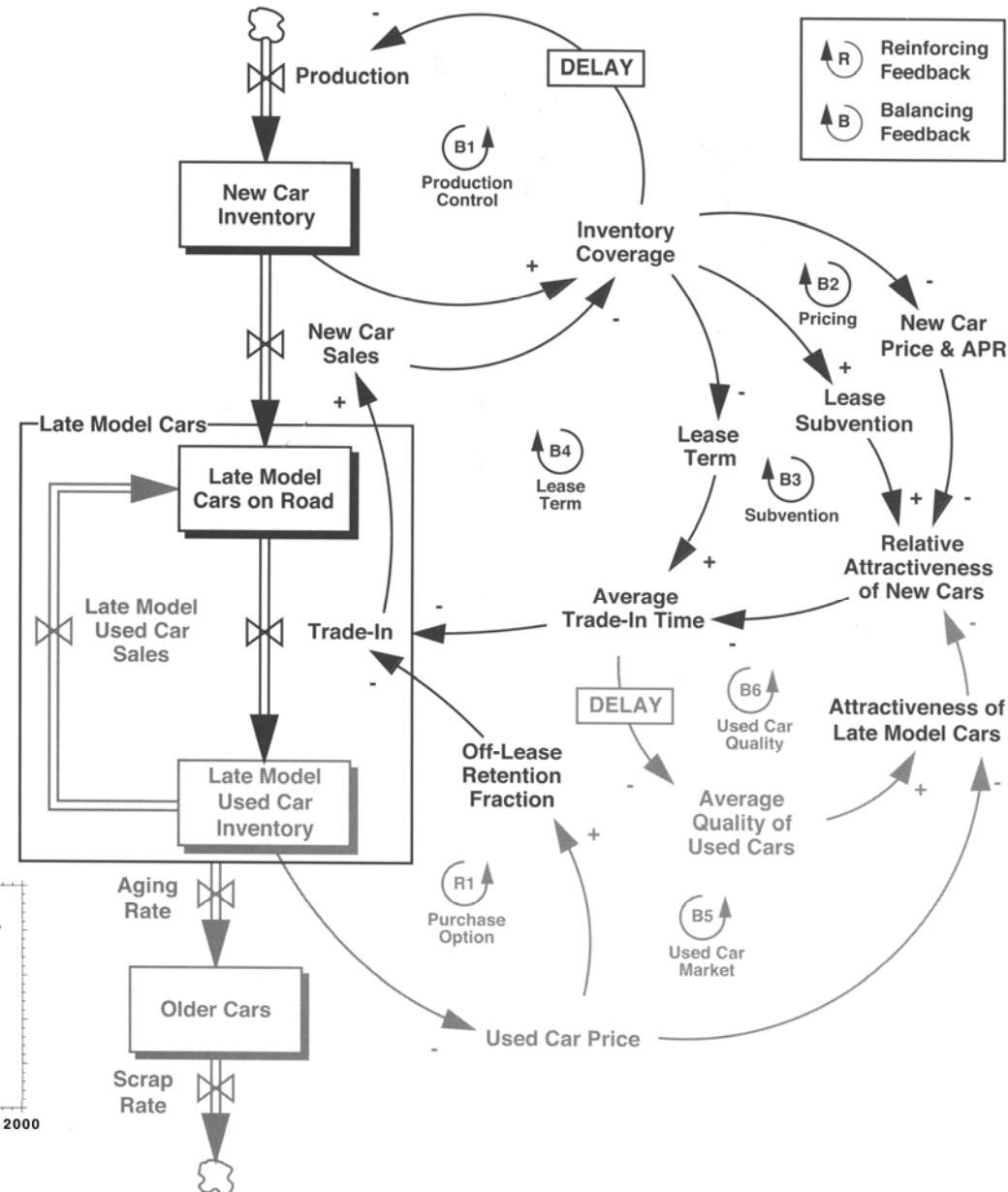
- Systemi

- "Any definable set of components." (Maturana and Varela, 1979)
- Järjestelmä, joka määrittää suureiden väliset riippuvuudet

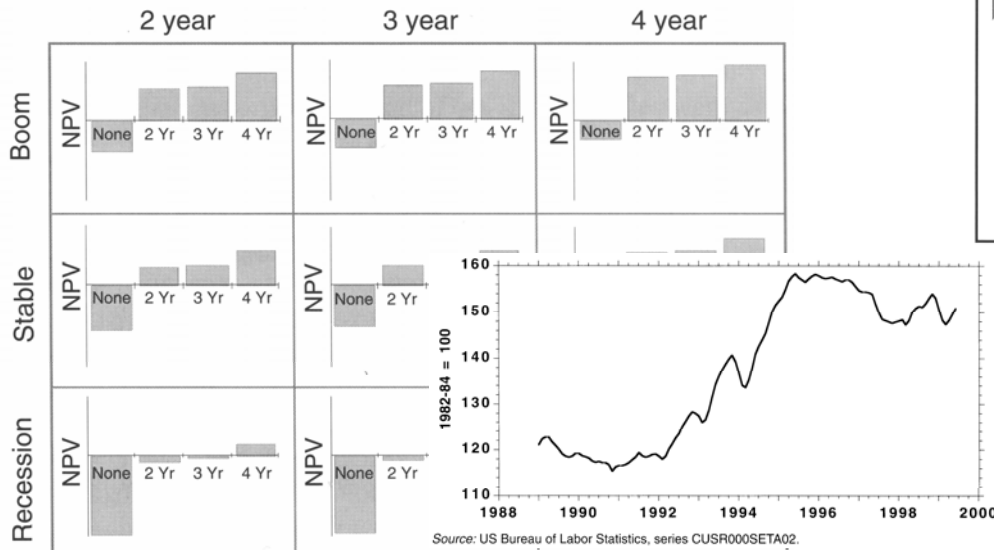


Taloudelliset ja tuotannolliset mallit

- Säättö- ja systeemitekniikan soveltamista taloudellisiin ja tuotannollisiin systeemeihin kutsutaan termeillä "system dynamics" ja "business dynamics"
- Kurssi : AS-74.2400 Systeemidynamiikka

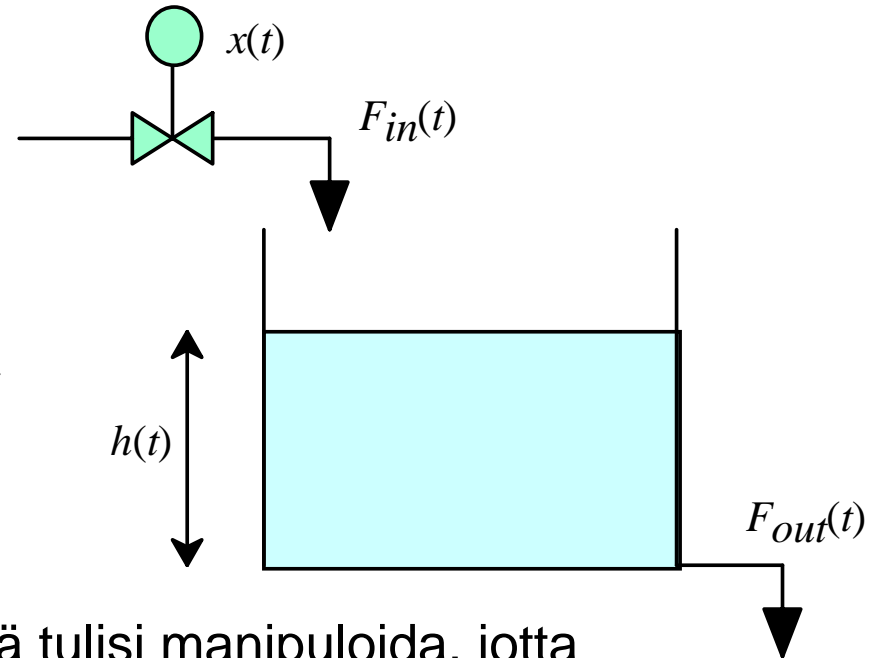


Competitor Lease Term

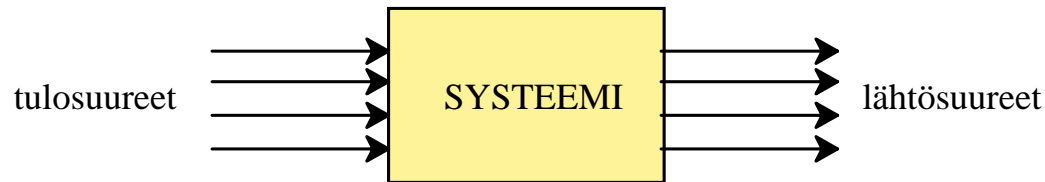


Esimerkki 1.

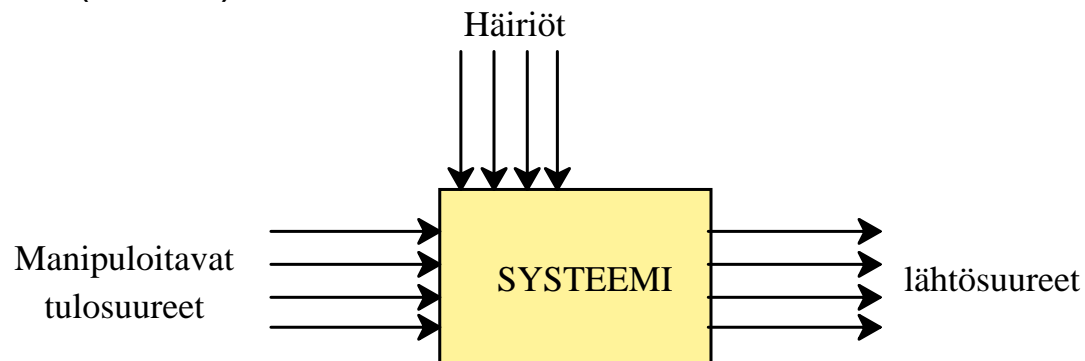
- Tarkastellaan vesisäiliön pinnankorkeuden hallintaa
 - säiliön tuloventtiiliä x avataan tai suljetaan, jolloin tulovirtaus F_{in} vastaavasti kasvaa tai pienenee
 - tavoitteena on, että pinnankorkeus h käyttäytyisi halutulla tavalla
 - säiliön poistovirtaus F_{out} on tuntematon häiriö
- Säättötekniikka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

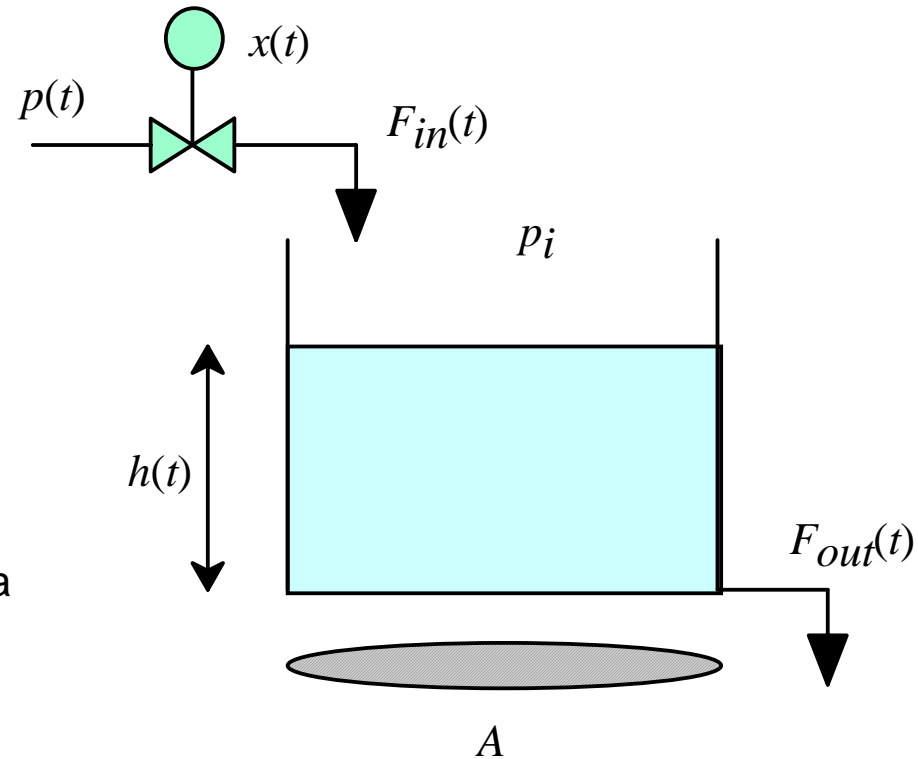


- Nuolissa kulkevat informaatio signaalit ja lohkoissa prosessoidaan informaatio toiseksi informaatioksi
- Lohkoon tulevia signaalit ovat herätteitä (tulosuureita) kun taas lohkoista lähtevät signaalit ovat vasteita (tai lähtösuureita)
- Lohkokaavioista selviää systeemin kausaliteetti eli syy-seuraussuhteet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



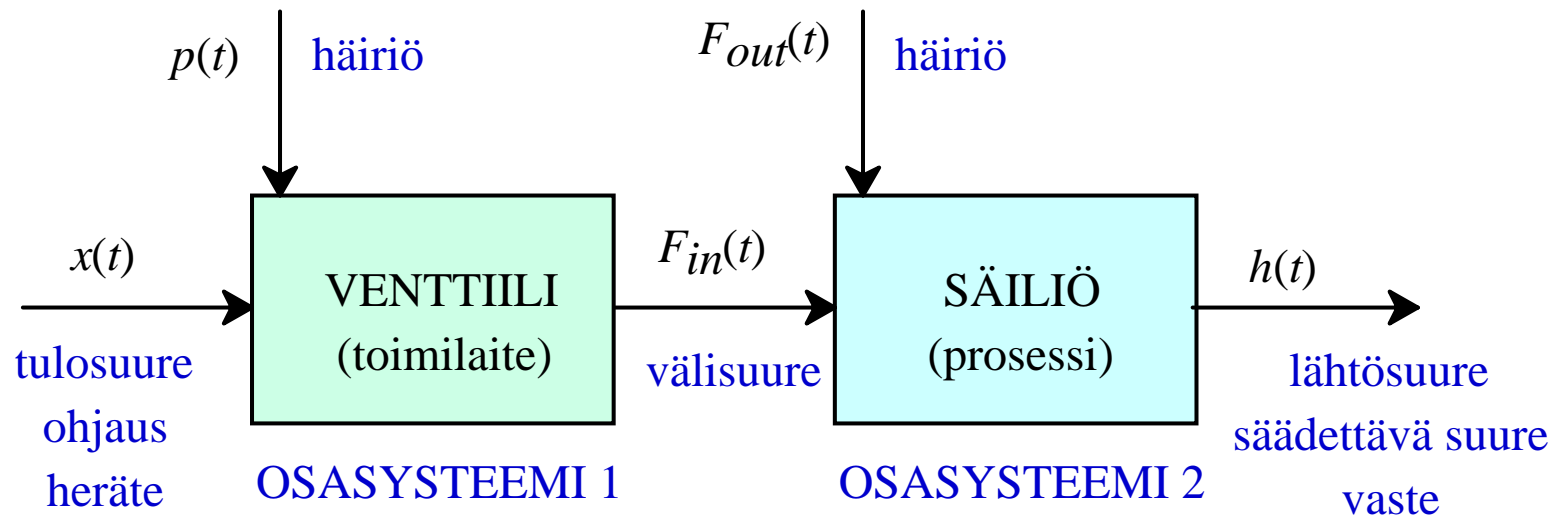
Esimerkki 1.

- Tehdään lohkokaavio edelliselle esimerkille seuraavilla oletuksilla
 - Oletetaan venttiilille yksinkertainen staattinen malli (virtaus on suoraan verrannollinen paine-eron neliöjuureen ja venttiiliin avaumaan)
 - Virtaukset F_i ovat tilavuusvirtauksia
 - Tulovirtaus purkautuu ilmanpaineeseen p_i (vakio)
 - Säiliö on suoraseinäinen (poikkipinta-ala on A)
 - Syöttöpaineen p vaihtelut ovat häiriöitä
 - 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 venttiilin 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

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

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

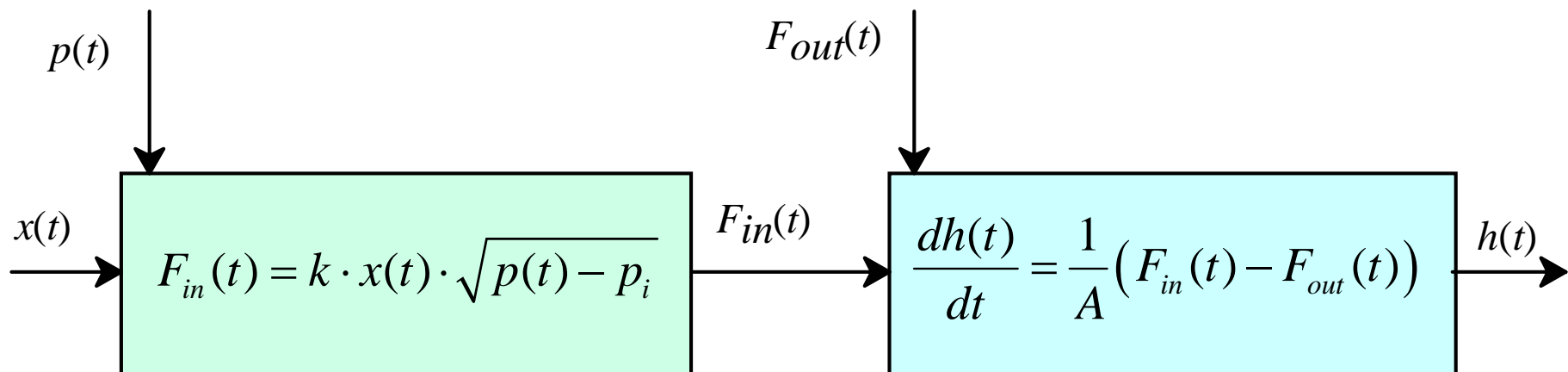


Esimerkki 1. -jatkoa

- Venttiilille saadaan yksinkertainen staattinen riippuvuus

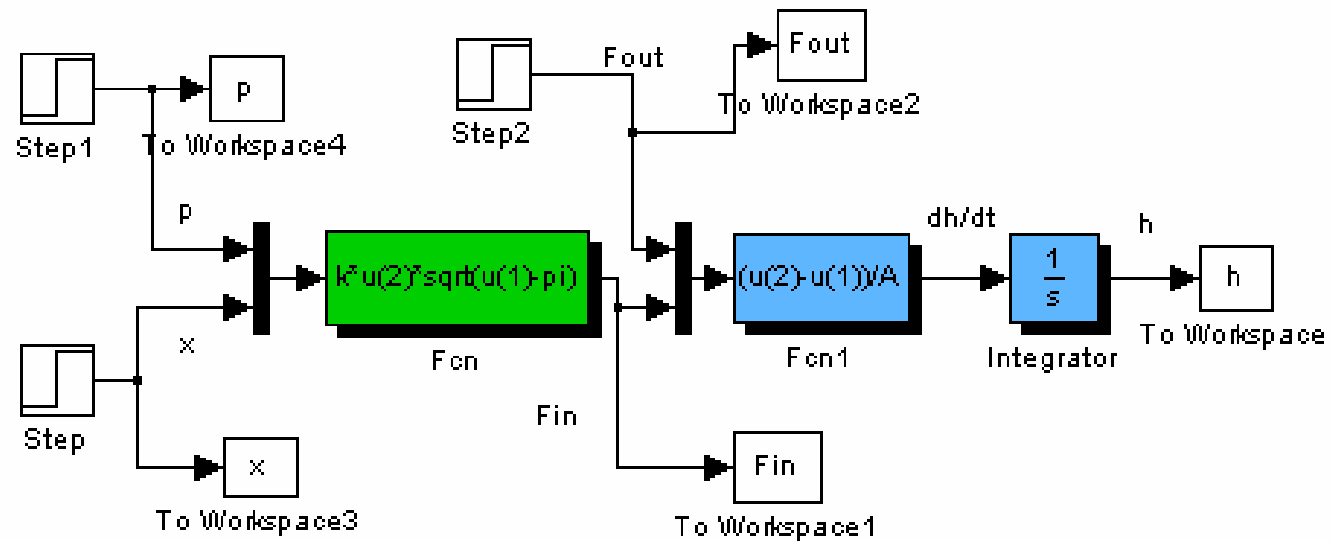
$$F_{in}(t) = k \cdot x(t) \cdot \sqrt{p(t) - p_i}$$

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



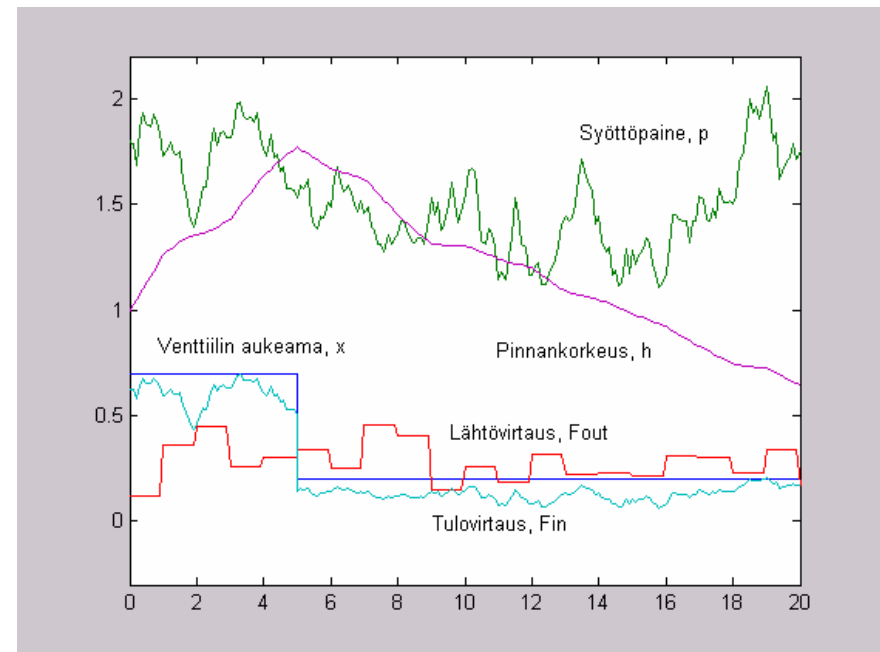
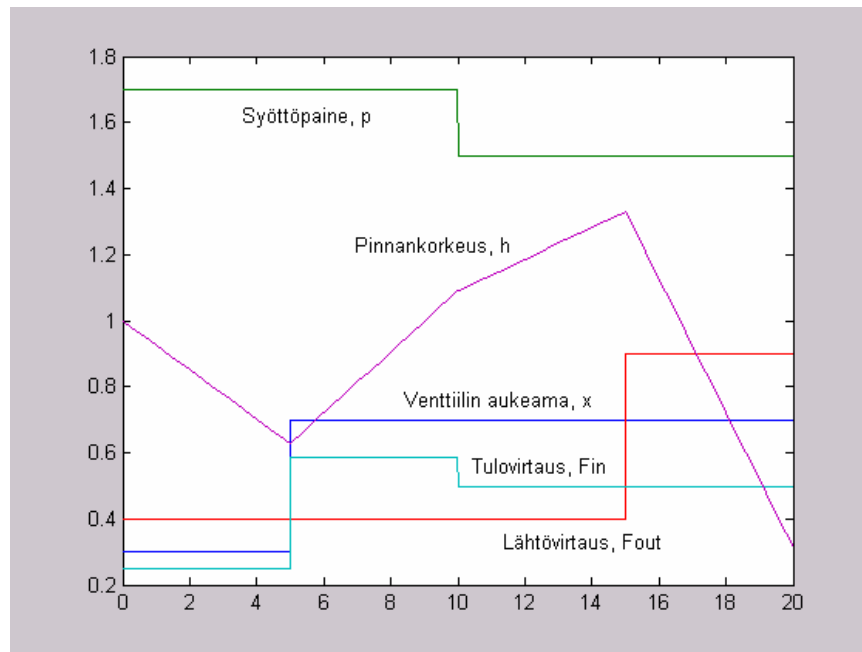
Esimerkki 1. -jatkoa

- 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



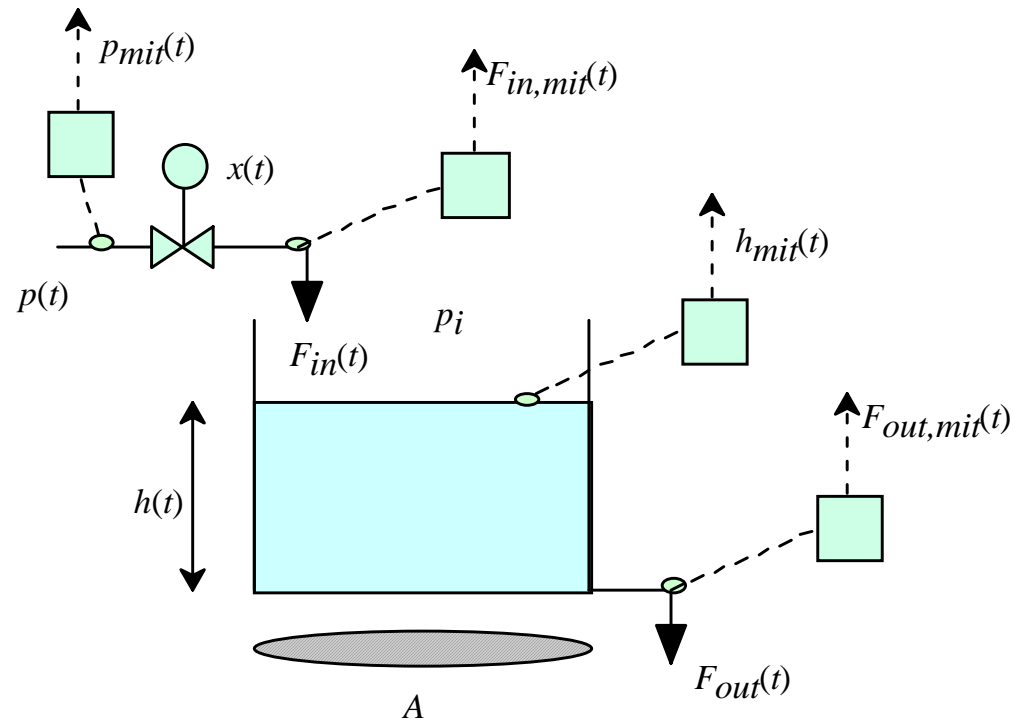
Lähtösuureen hallintastrategiat

- Lähtösuureen hallintamekanismit jaetaan tavallisesti kolmeen perusluokkaan
 - Avoin ohjaus
 - kompensointi eli (negatiivinen) 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 mekanismeja esimerkin avulla



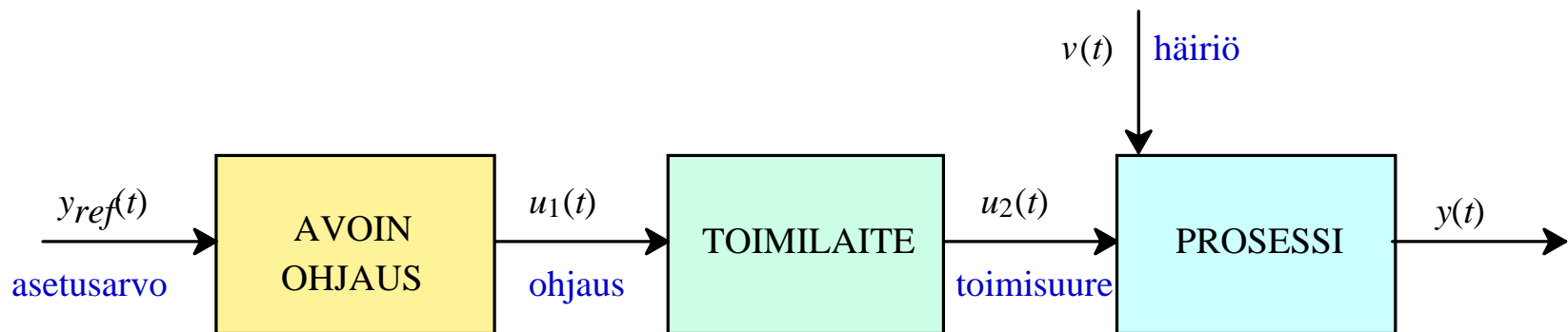
Esimerkki 1. -jatkoa

- 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.

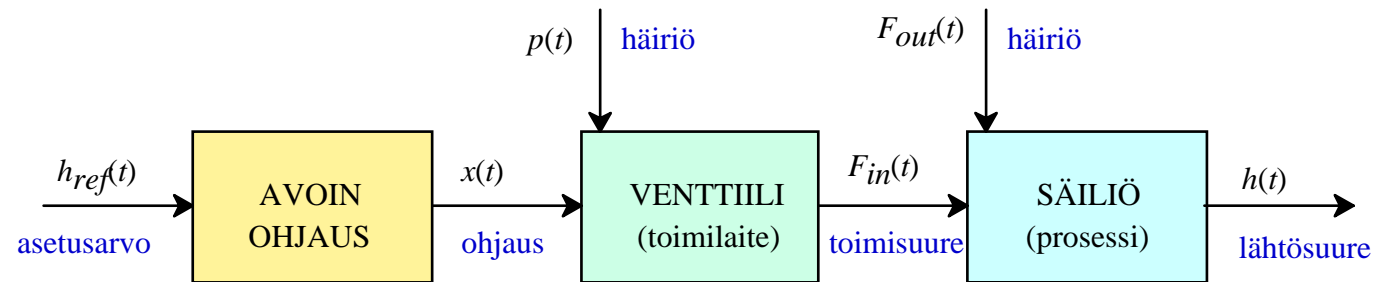


Avoin ohjaus

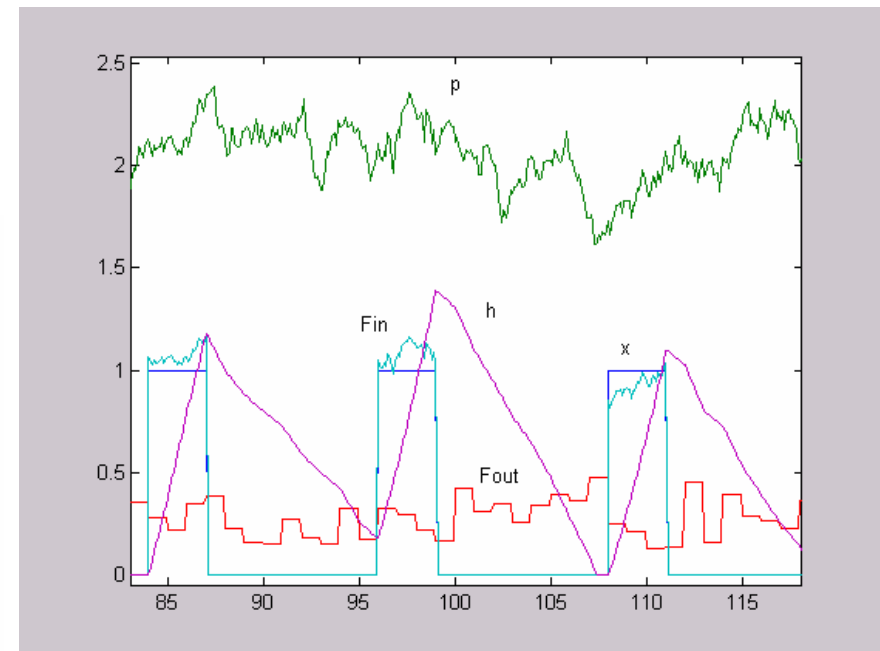
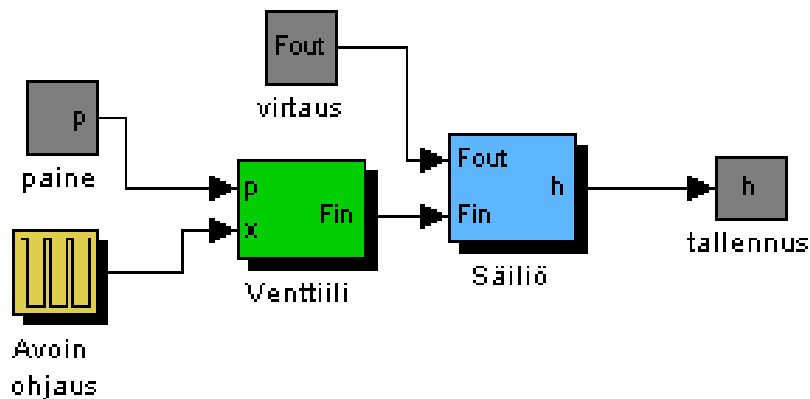
- Avointa ohjausta käyttämällä hallittavaa lähtösuuretta ei seurata lainkaan
 - Tyypillisesti komentosekvenssi
 - Ei edellytä mittauksia ... edullinen
 - Käytetään:
 - panosprosesseissa ja reseptipohjaisessa ajossa
 - systeemien hallituissa ylös- ja alasajoissa
 - Laajoissa, stabiileissa järjestelmissä kehittyneempien hallintamekanismien lomassa



Esimerkki 1. –jatkoa – Avoin ohjaus

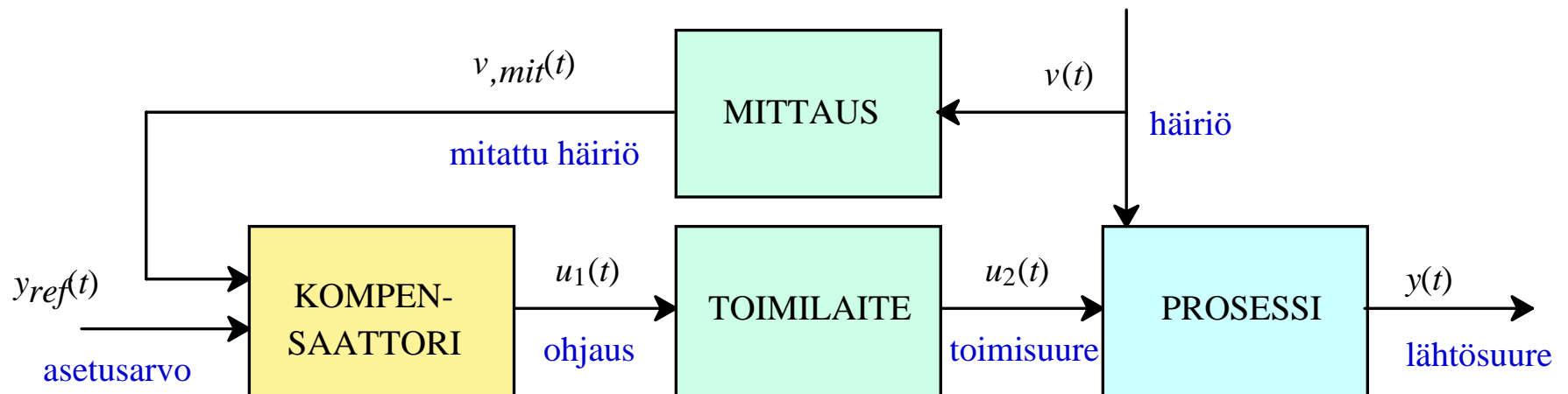


- Venttiili avataan joka kahdestoista tunti kolmen tunnin ajaksi
- Joskus säiliö ennättää tyhjentyä täyttöjen välillä - joskus ei



Kompensointi eli myötäkytkentä

- 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

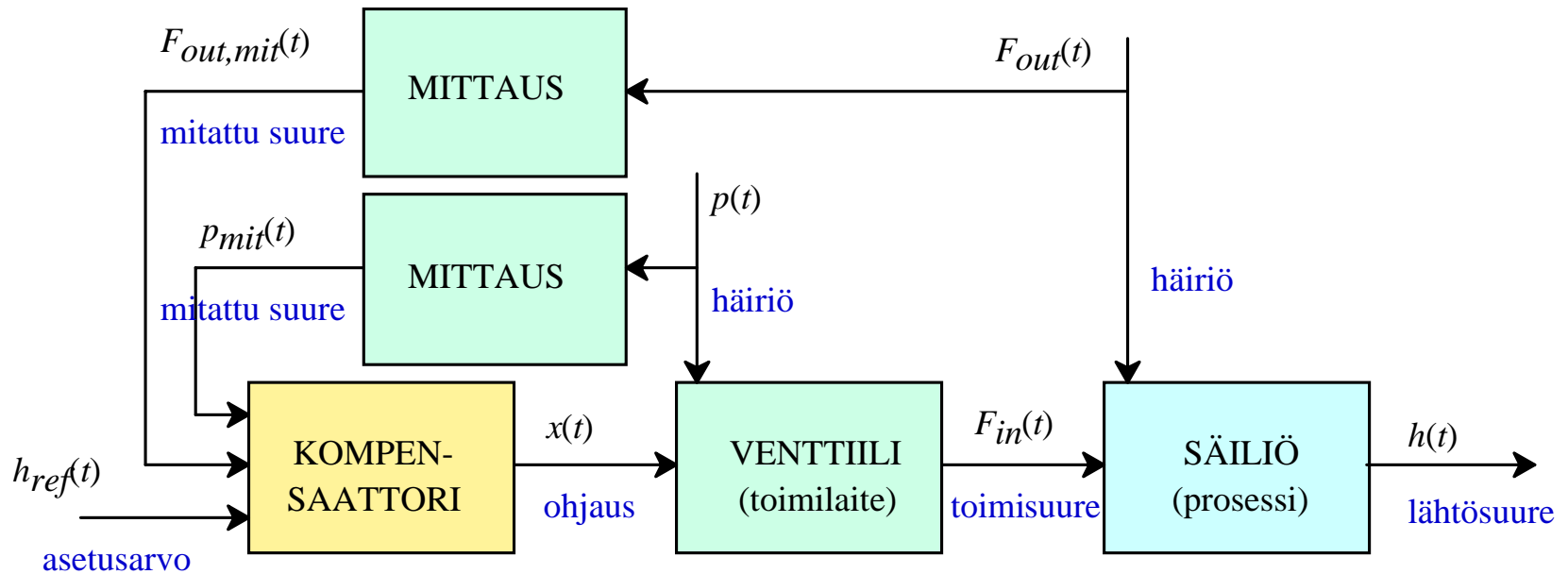


Esimerkki 1. -jatkoa - Kompensointi

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

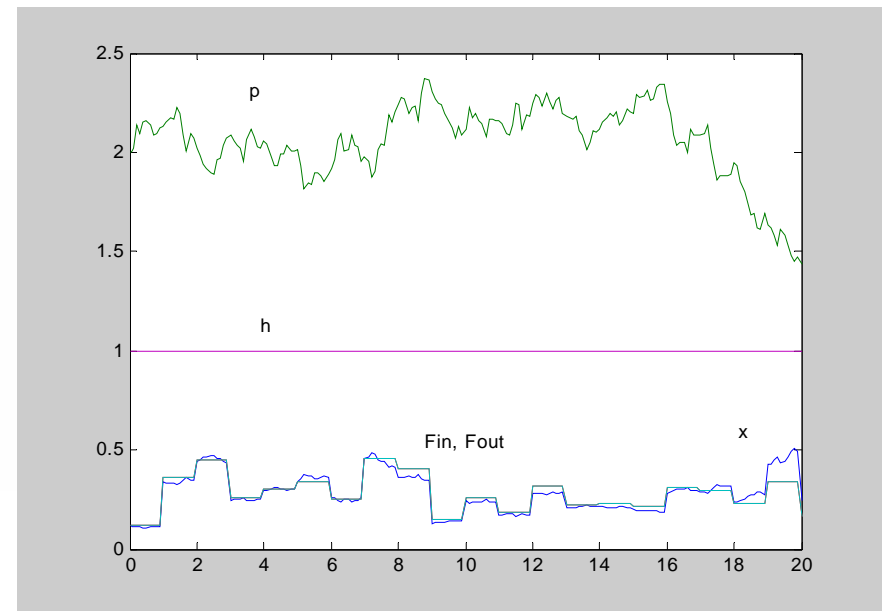
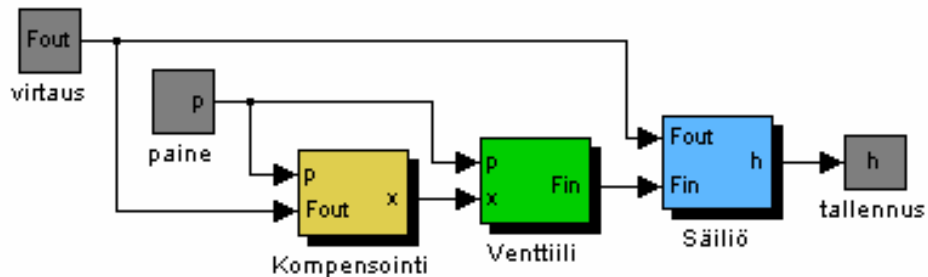
$$\frac{dh(t)}{dt} = \frac{1}{A} (F_{in}(t) - F_{out}(t)) = 0 \Rightarrow F_{in}(t) = F_{out}(t)$$

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



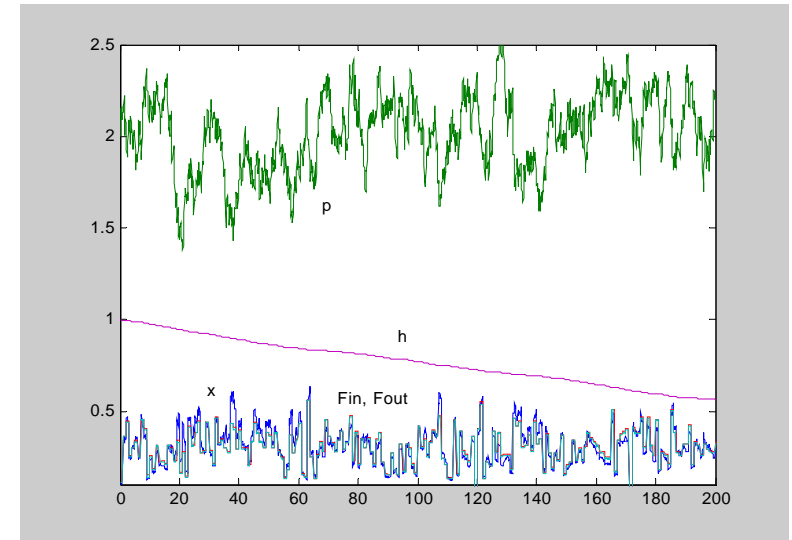
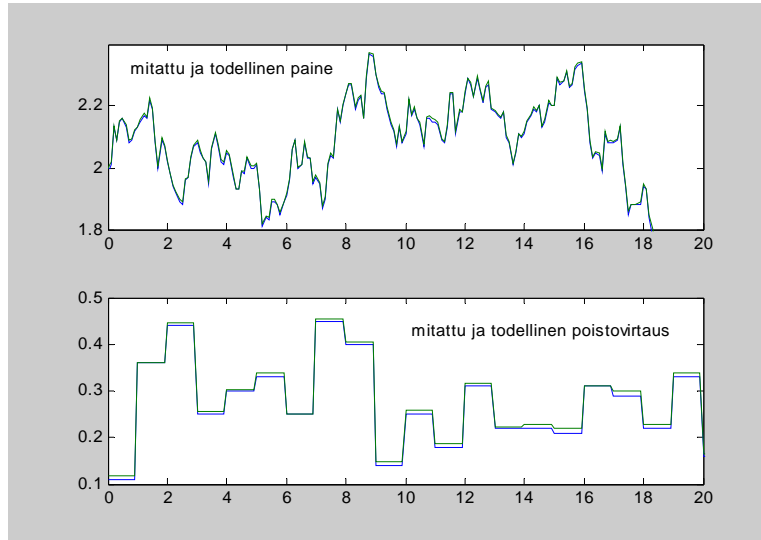
Esimerkki 1. -jatkoa - Kompensointi

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



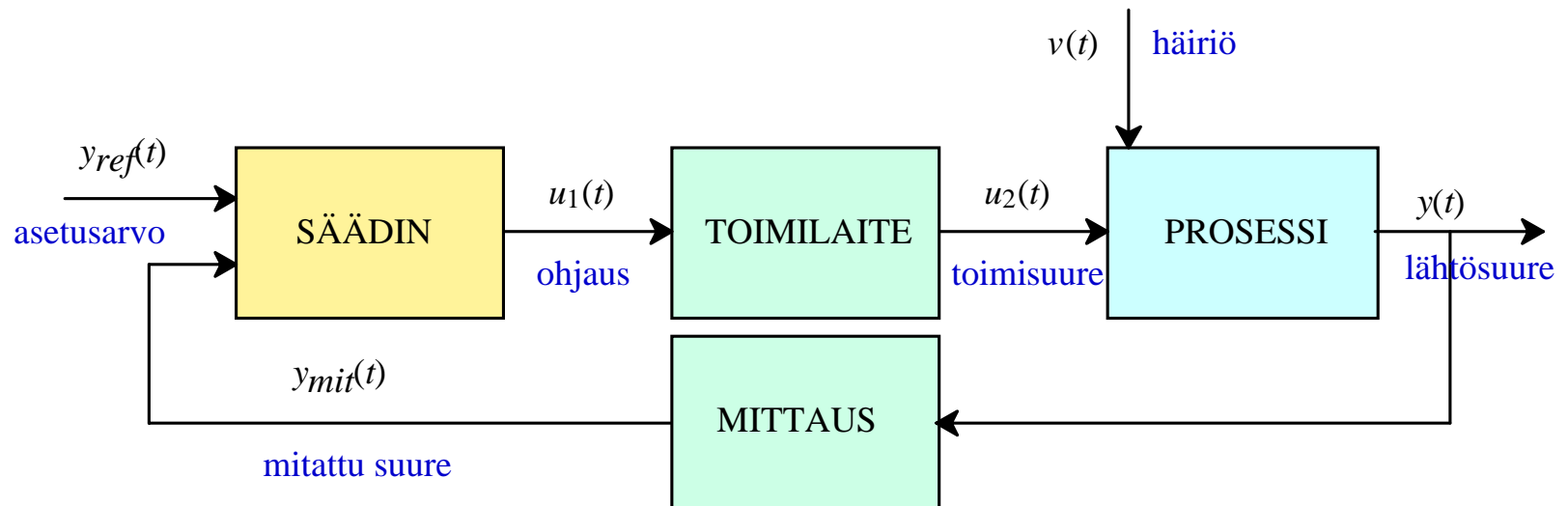
Esimerkki 1. -jatkoa - Kompensointi

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



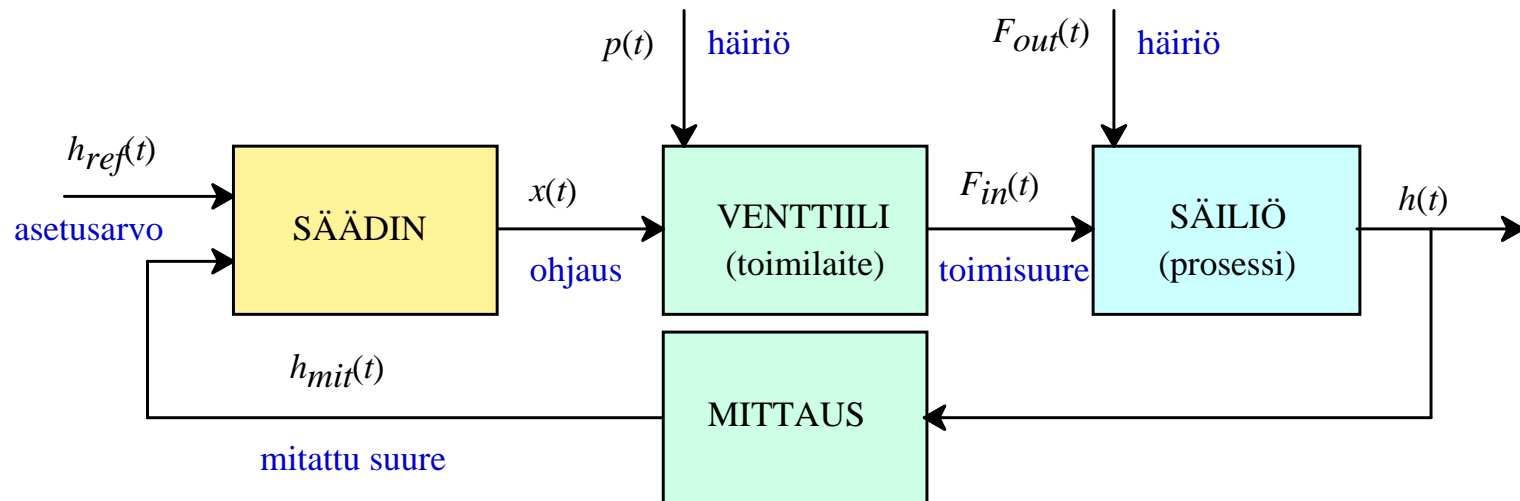
Säätö eli takaisinkytkentä

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



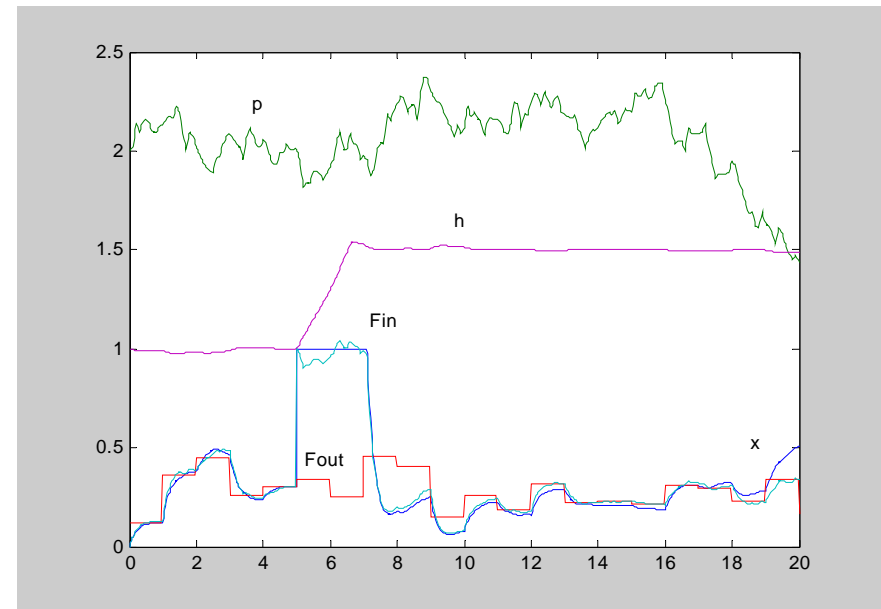
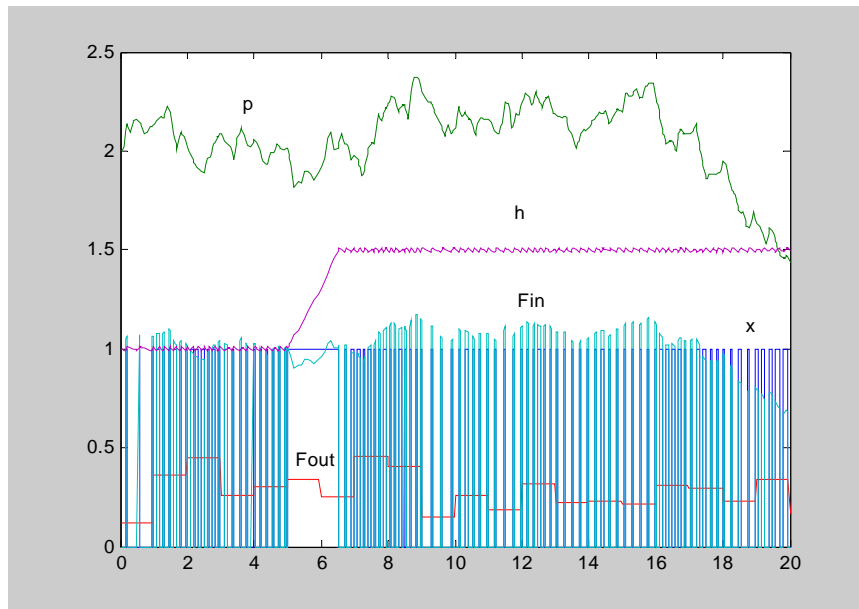
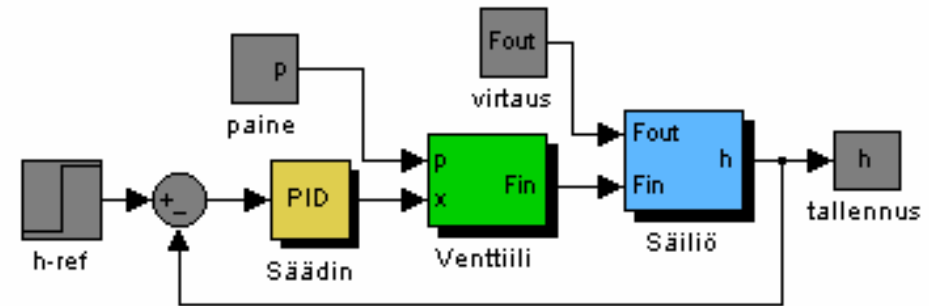
Esimerkki 1. -jatkoa - Takaisinkytkentä

- 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)



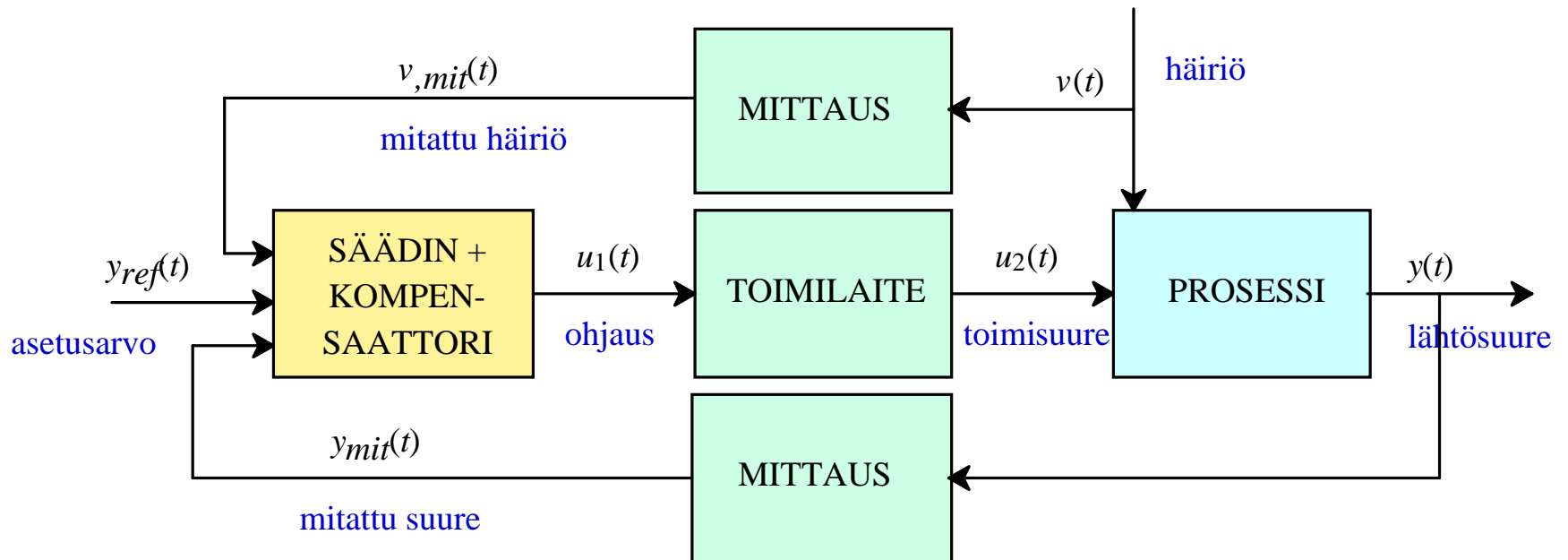
Esimerkki 1. -jatkoa - Takaisinkytkentä

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



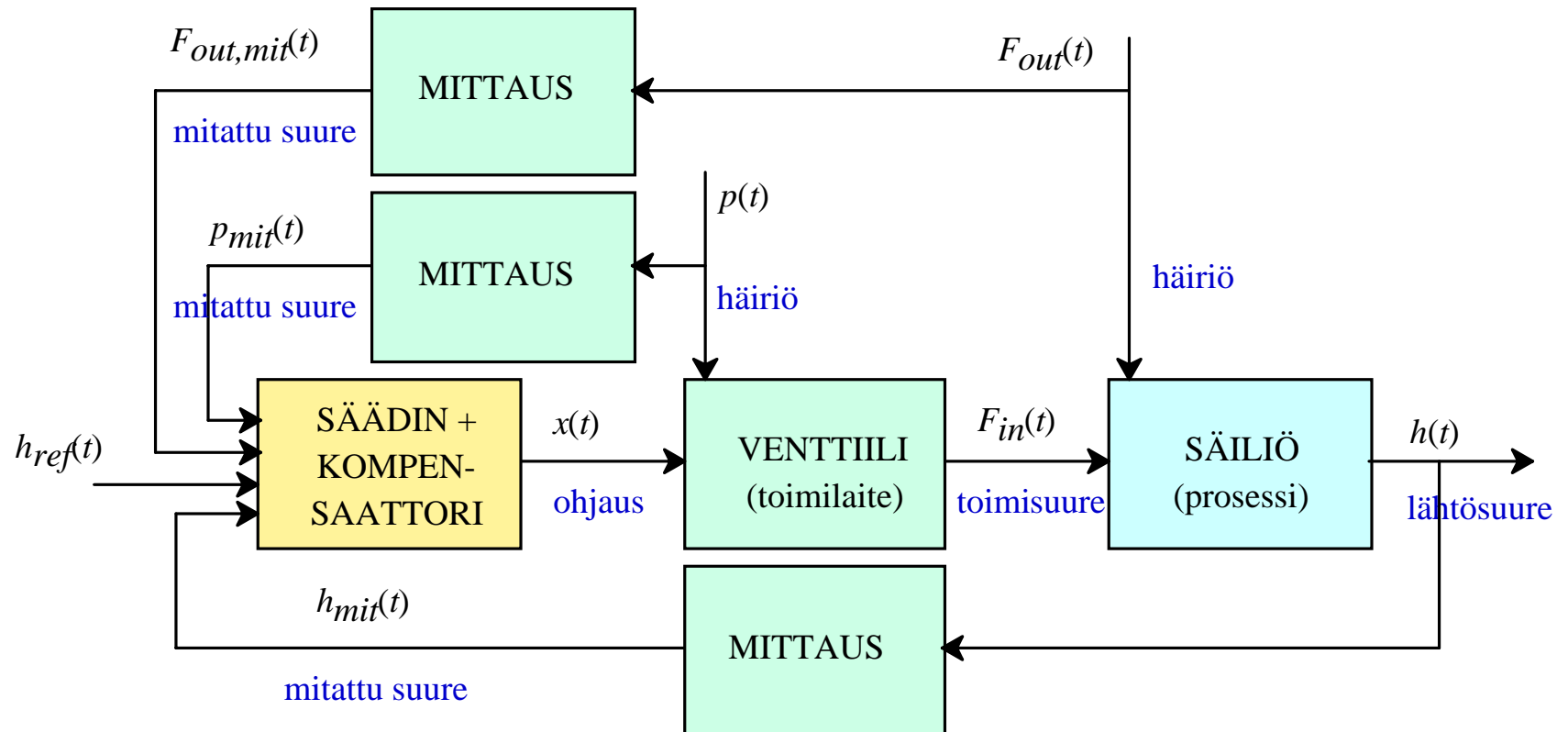
Yhdistetyt strategiat

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



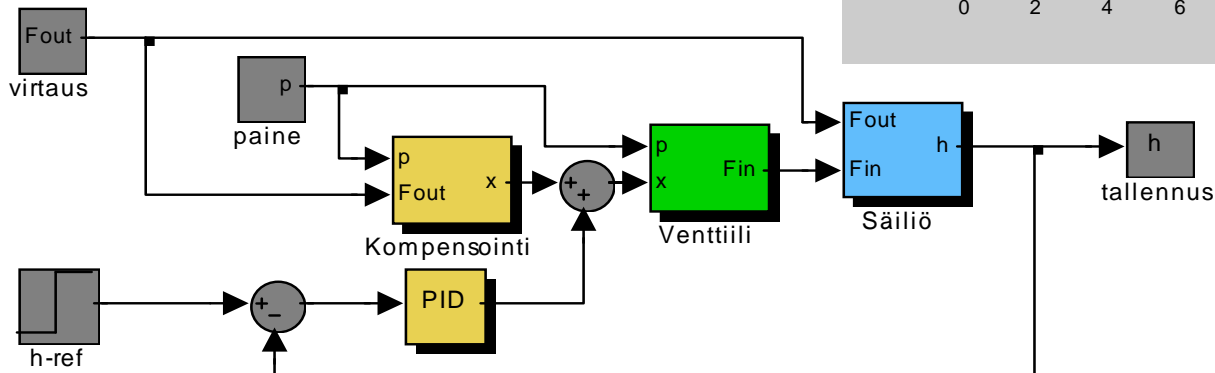
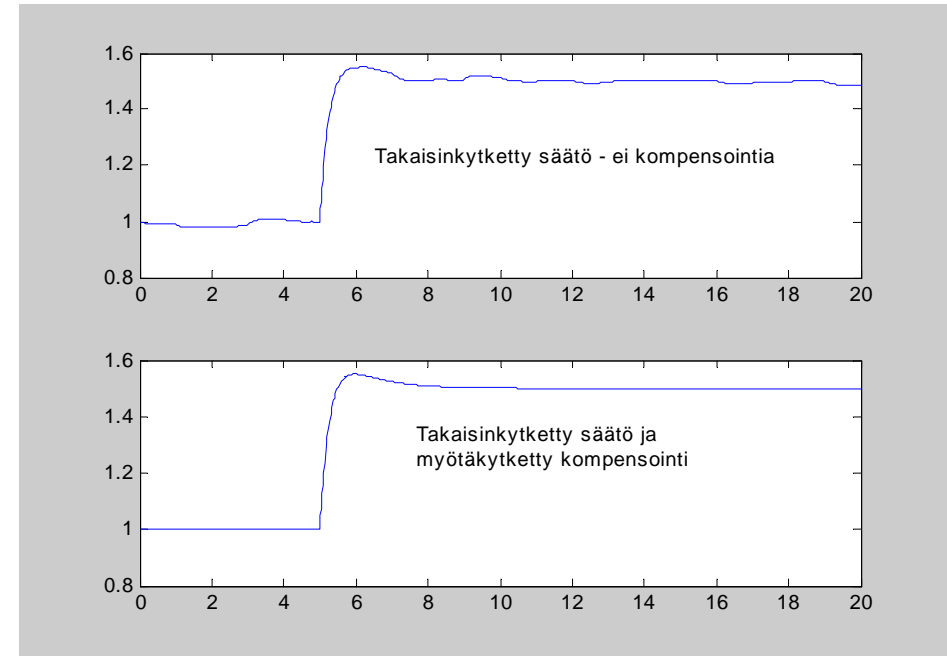
Esimerkki 1. -jatkoa - Yhdistetyt strategiat

- Takaisinkytkennän ja myötäkytkennän yhdistäminen
 - Edellyttää mittauksia lähtösuureesta



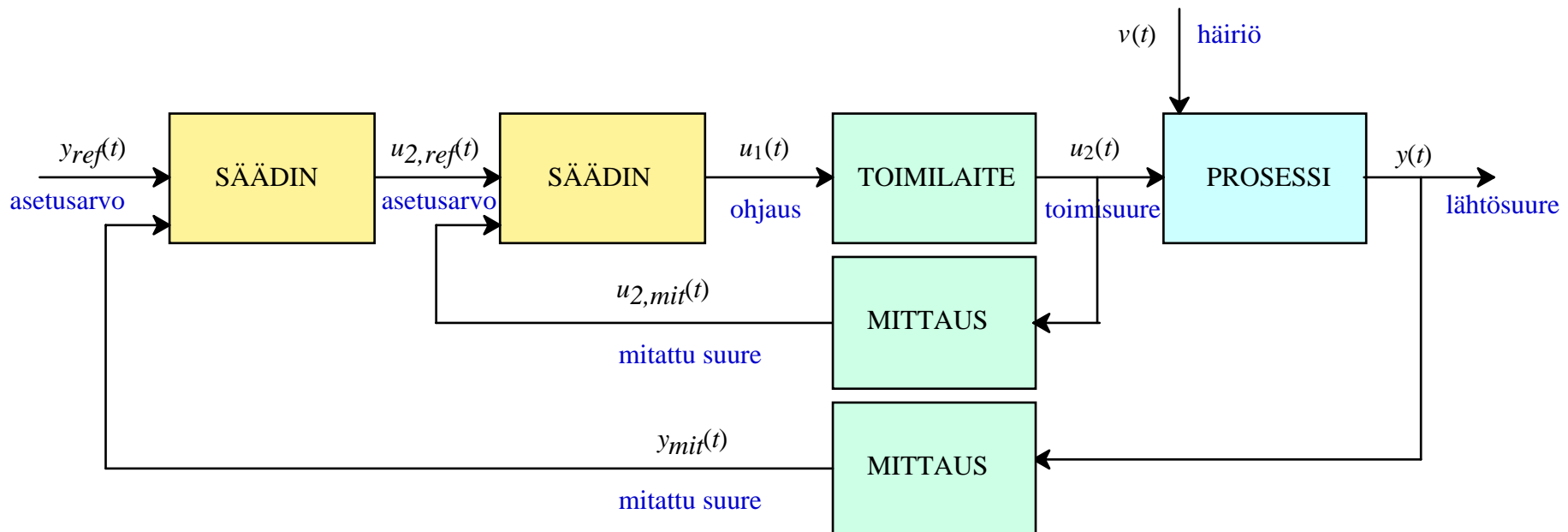
Esimerkki 1. -jatkoa - Yhdistetyt strategiat

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



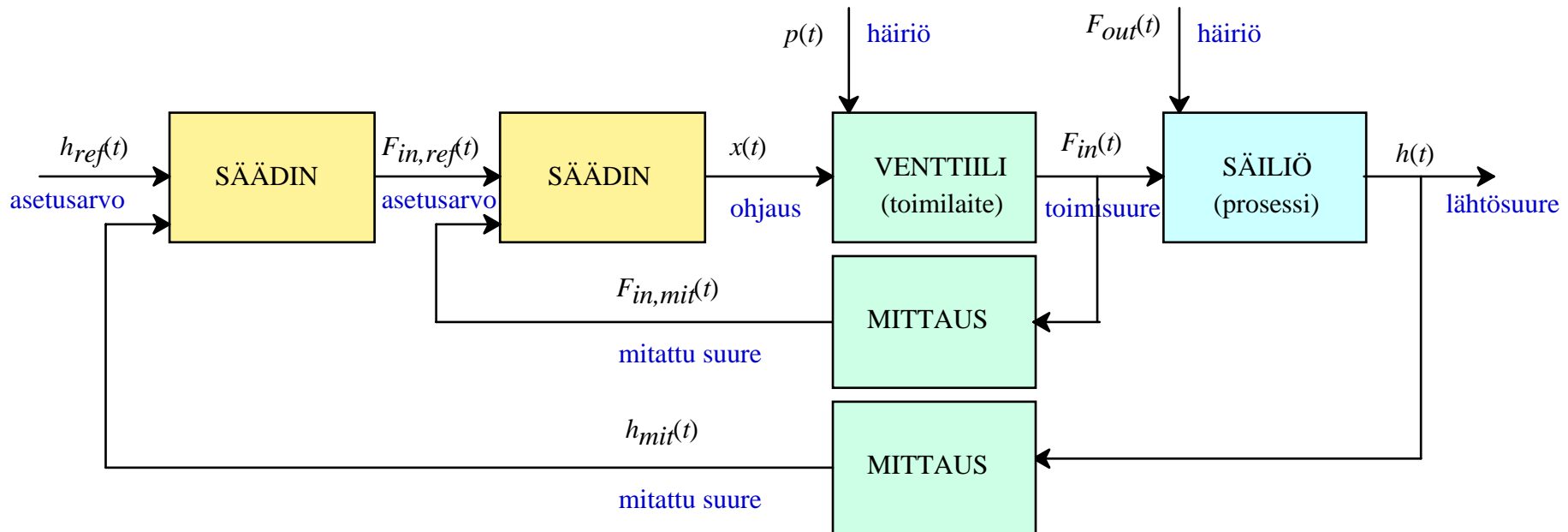
Yhdistetyt strategiat

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



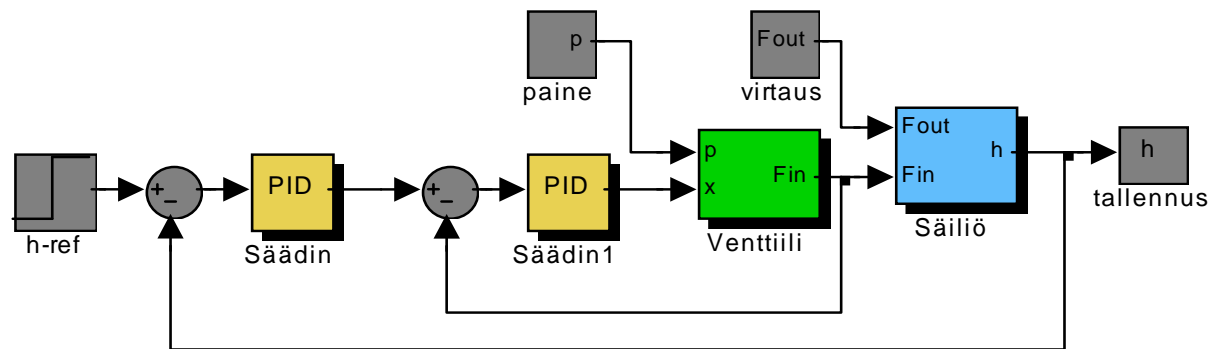
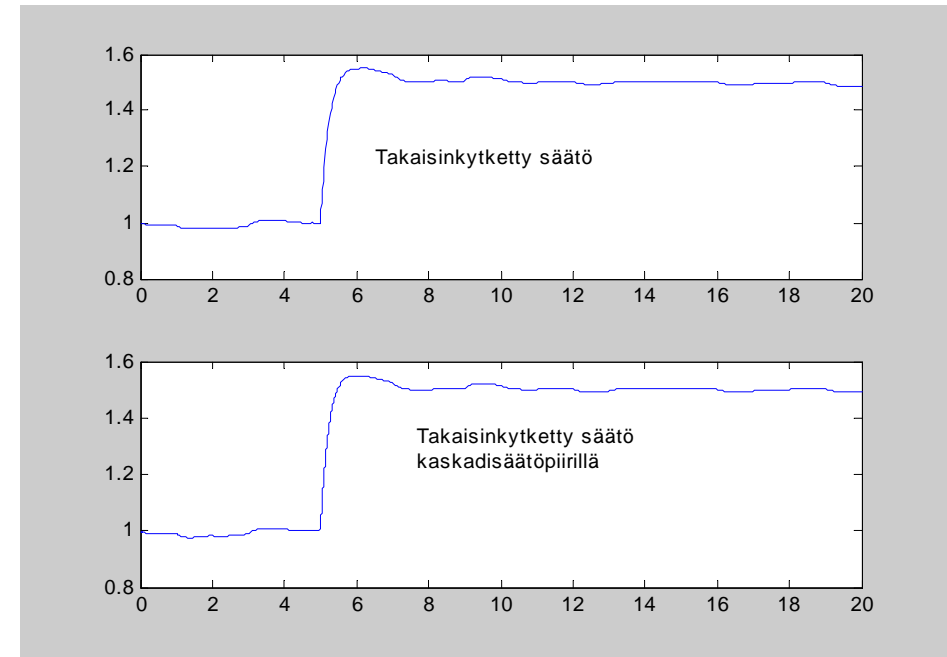
Esimerkki 1. -jatkoa - Yhdistetyt strategiat

- 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 poistovirtauksesta
- 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 sukkula osaisi kutoa ja plektra soittaa lyyraa 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.)

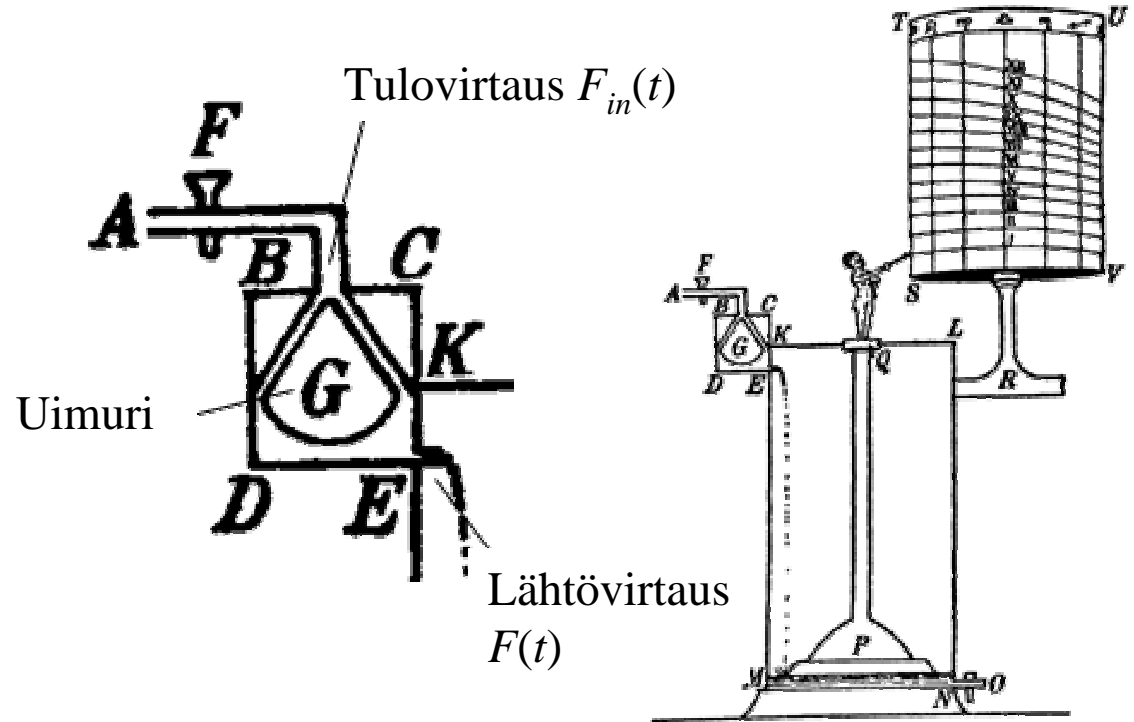
- Alexandriassa asunut kreikkalainen keksijä ja parturi
- Teki keksintöjään mm. Arsinoelle (Ptolemy II Philadelphosin sisar ja vaimo)
- Rakensi ilma- ja vesikäyttöisiä koneita (katapultti, urut, pumppu, kello)
- Vain pieniä osia kirjoituksista on jäljellä.



Ktesibioksen vesikello

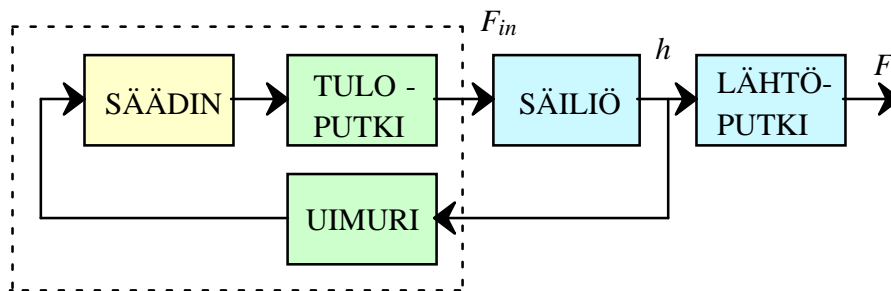
- Ensimmäinen dokumentoitu takaisinkytkentä
 - Pinnankorkeuden säätö syöttösäiliössä kartiomaisen uimurin avulla (pinnan noustessa uimuri tukkii tuloputken ja pinnan laskiessa uimuri laskee avaten tuloputken)
 - Veden virtaus kelloon ($F(t)$) riippuu syöttösäiliön pinnankorkeudesta ($h(t)$)

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



Ktesibioksen kello

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



Uimuri + kartio + tuloputken aukko



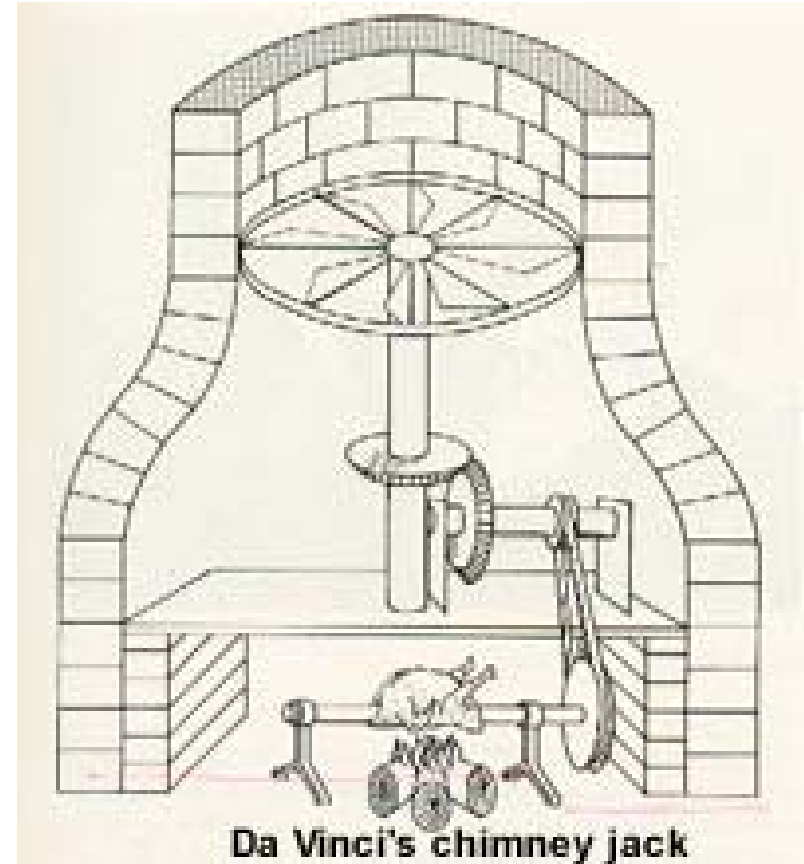
Leonardo Da Vinci (1452-1519)

- 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)



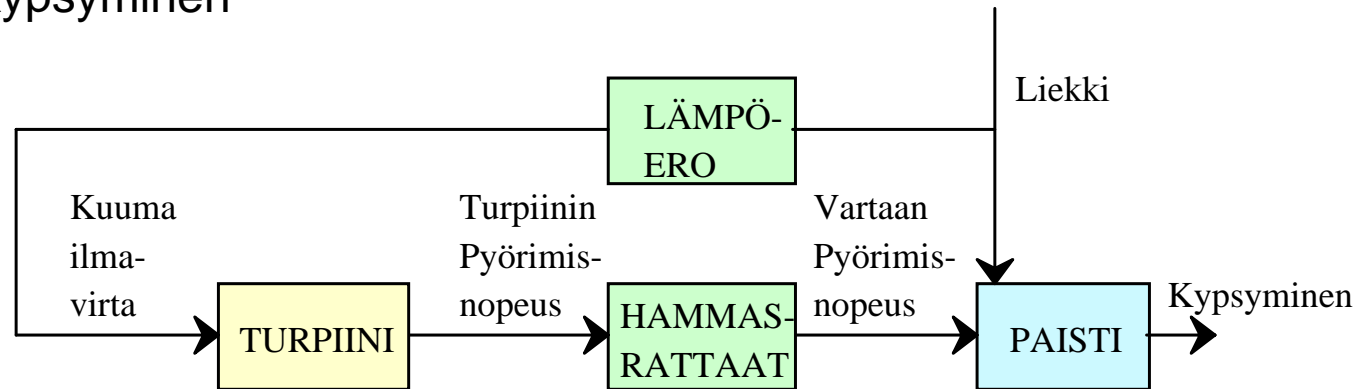
Da Vincin paistiautomaatti

- 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



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 negatiivisella myötäkytkennällä: Suuri liekki -> nopea kuuma ilmavirta -> nopea turpiinisiivistön pyöräminen -> nopea paistin pyöräminen -> hidas paistin paikallinen kypsyminen



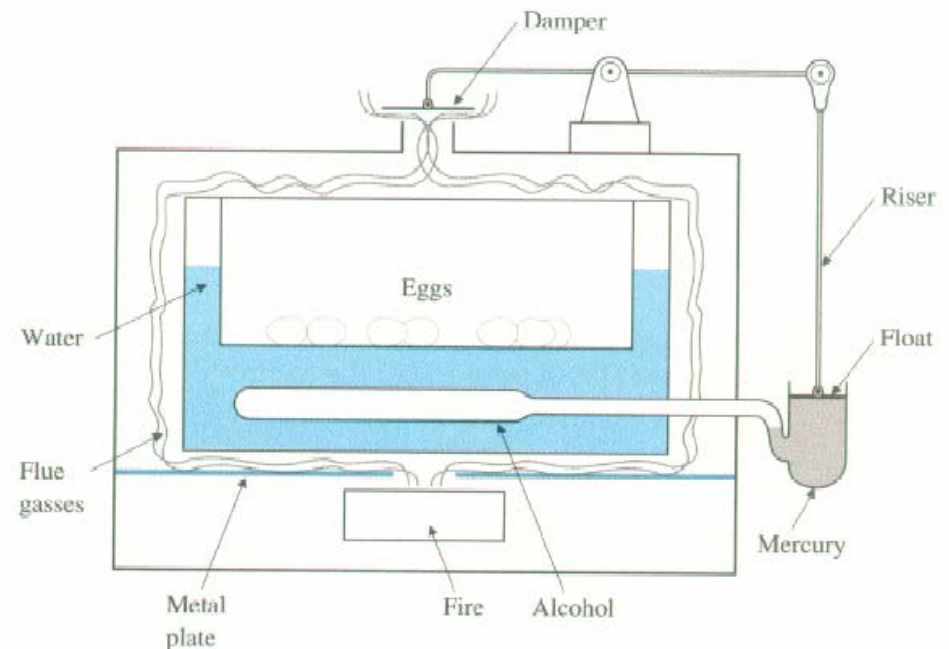
Cornelius Drebbel (1572-1633)

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



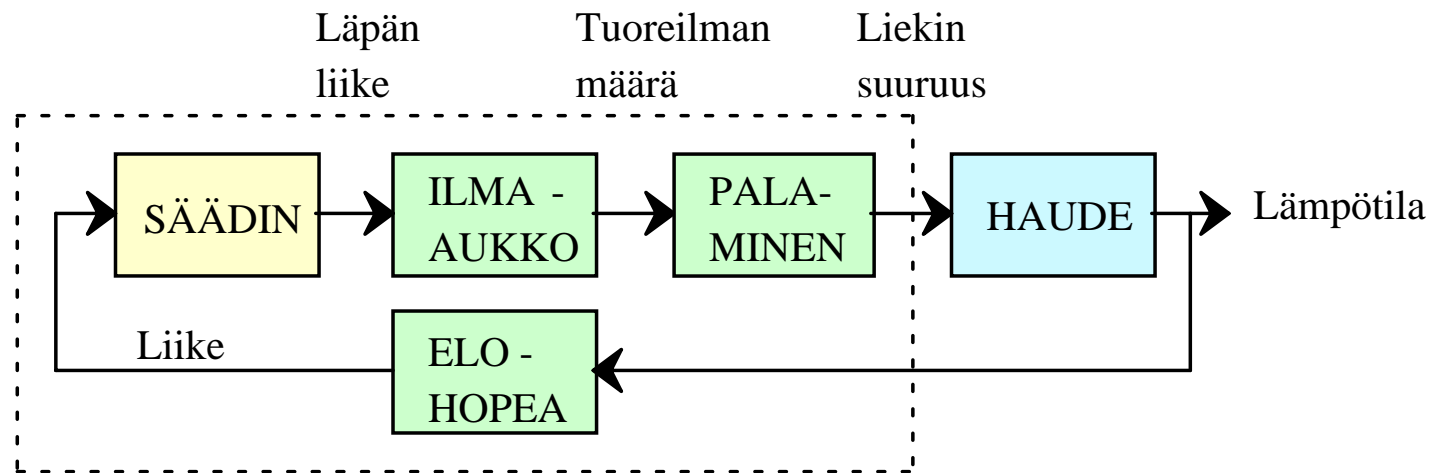
Drebbelin termostaatti

- 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



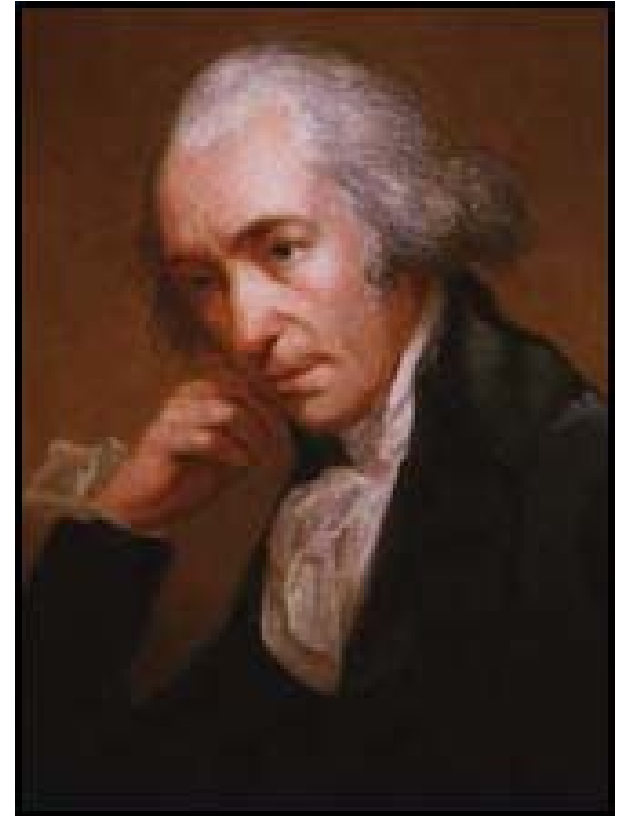
Drebbelin termostaatti

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



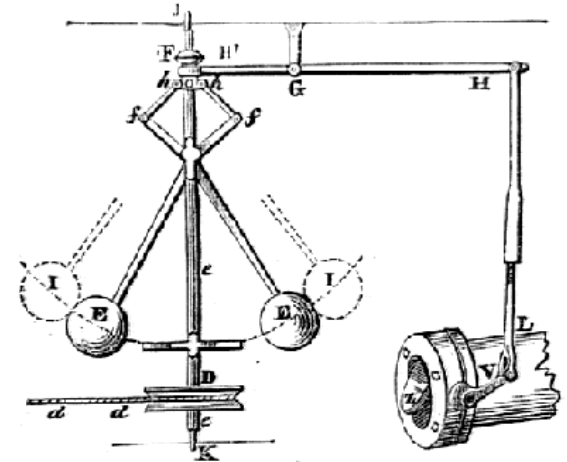
James Watt (1736-1819)

- Skotlantilaisen (Greenock) kauppiaan poika
- Opiskeli matemaatikko-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 venttiin kuristukseksi - venttiin 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

