

Automaatika ja automaatjuhtimine

Terminoloogia ja põhimõtted

AUTOMAATIKA

AUTOMAATJUHTIMINE - inimese vahetu osavõtuta juhtimine

Closed-loop

Süsteemi struktuuri järgi eristatakse avatud ja tagasisidestatud (suletud) struktuuriga automaatjuhtimist

Automaatreguleerimine - juhttoime sõltub ainult veasignaalist =>

Juhtseade = Regulaator

Nõuete ajaliste omaduste järgi eristatakse nt

Stabiliseerimine - seadesuurus püsib muutumatuna.

Järgivjuhtimine - juhtimine väliselt muudetava seadesuurusega.

<https://youtu.be/bl06lujiD7E>

AUTOMAATKONTROLL

jälgimine (seire),

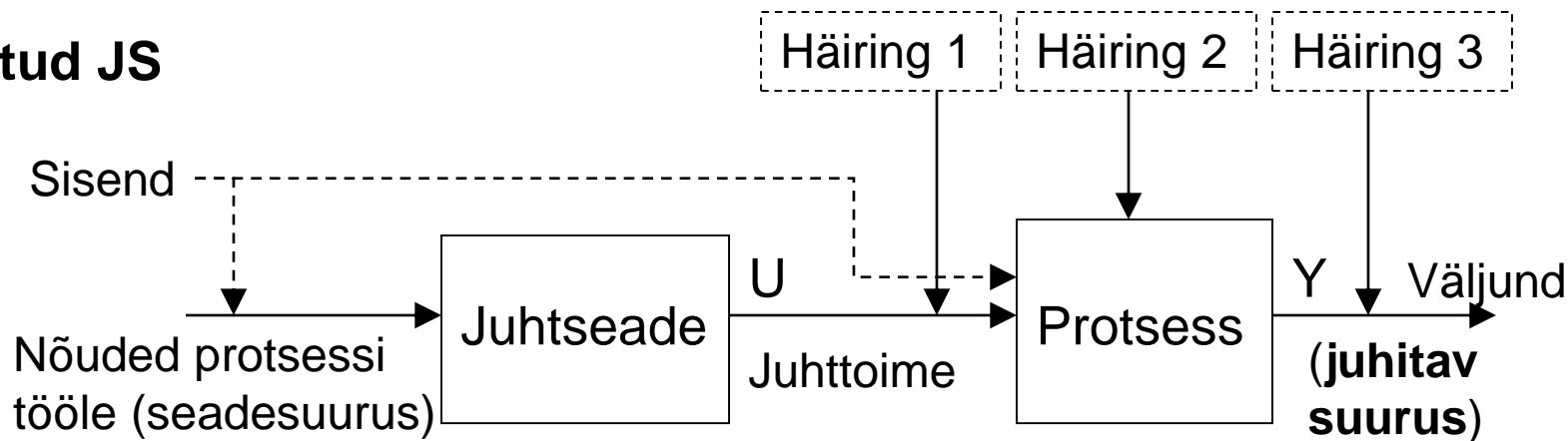
registreerimine (mõõtmine),

erandolukordade avastamine (signalisatsioon)

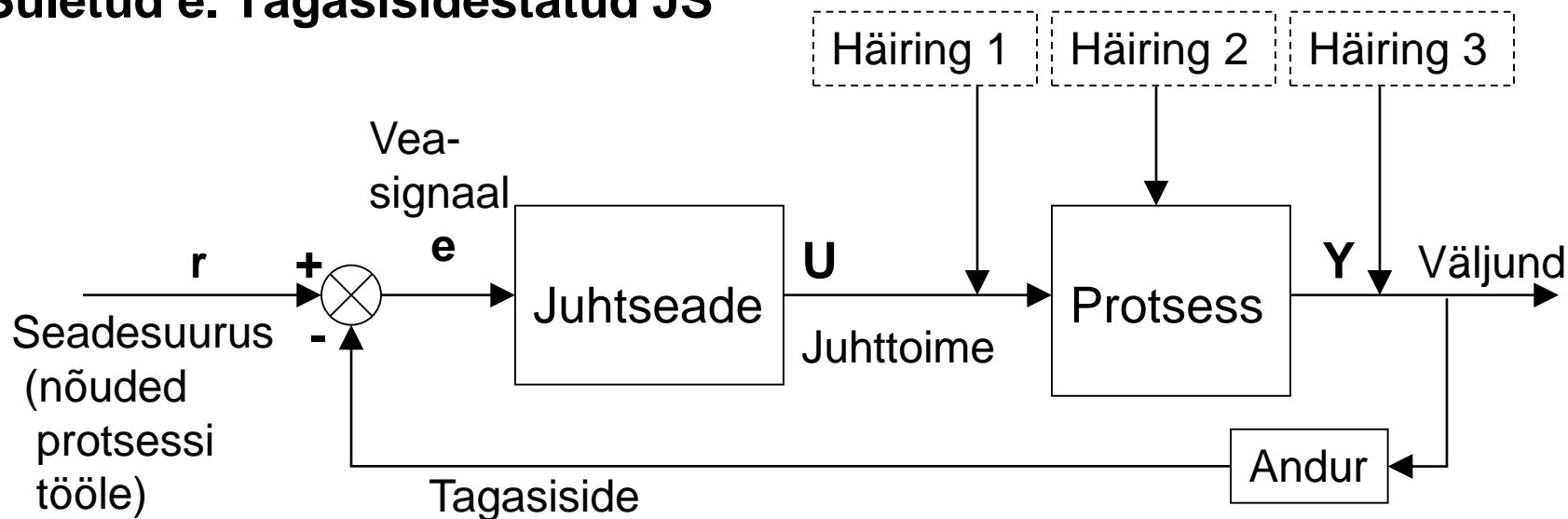
Automaatkaitse (ebanorm. olukordade vältimine)

A. JUHTIMISSÜSTEEMIDE(JS) struktuurid

Avatud JS



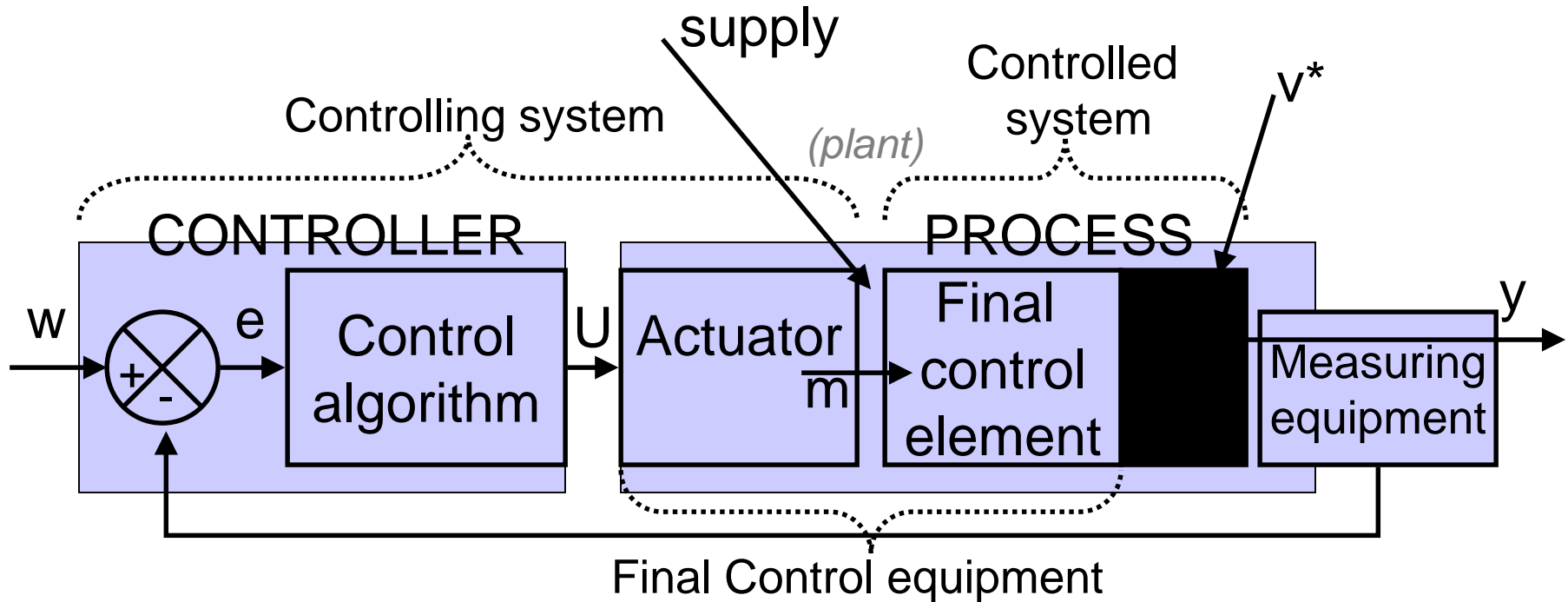
Suletud e. Tagasisidestatud JS



Control loop

Vt. terminite
sõnastikku

http://www.ttu.ee/public/i/infotehnoloogia-teaduskond/Instituudid/automaatikainstituut/oppeained/Automaatika_alused/Automaatikasonastik.pdf



w^* - reference (desired) value (also *setpoint*, SP)

e - error signal*, $e = w - \hat{y}$

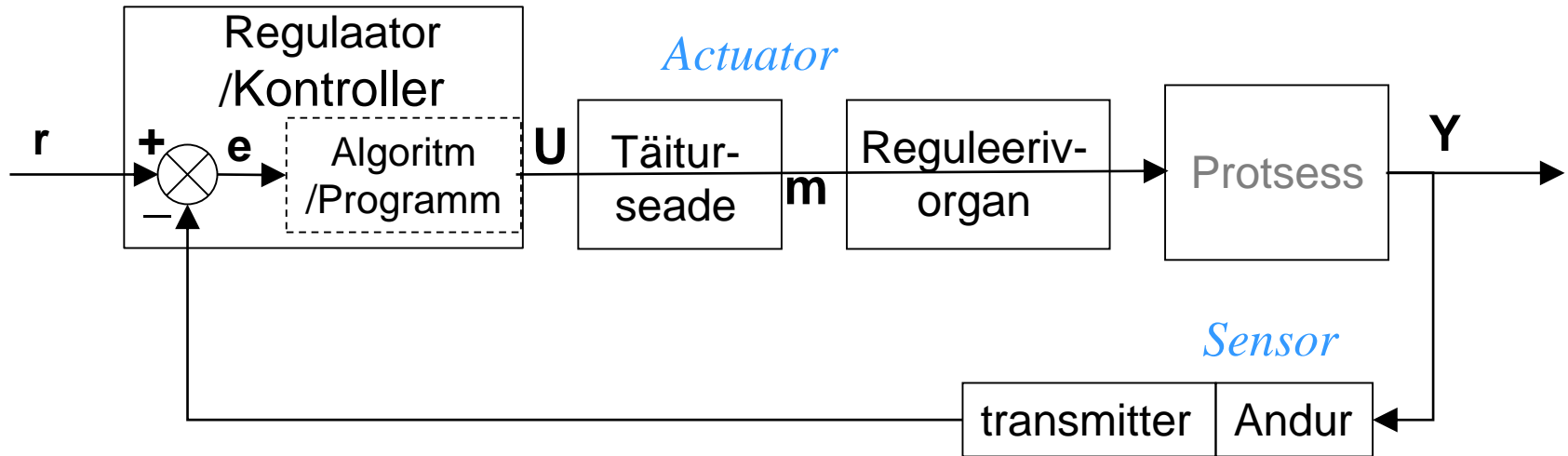
U - control signal (low power, information)

m - **manipulated variable***

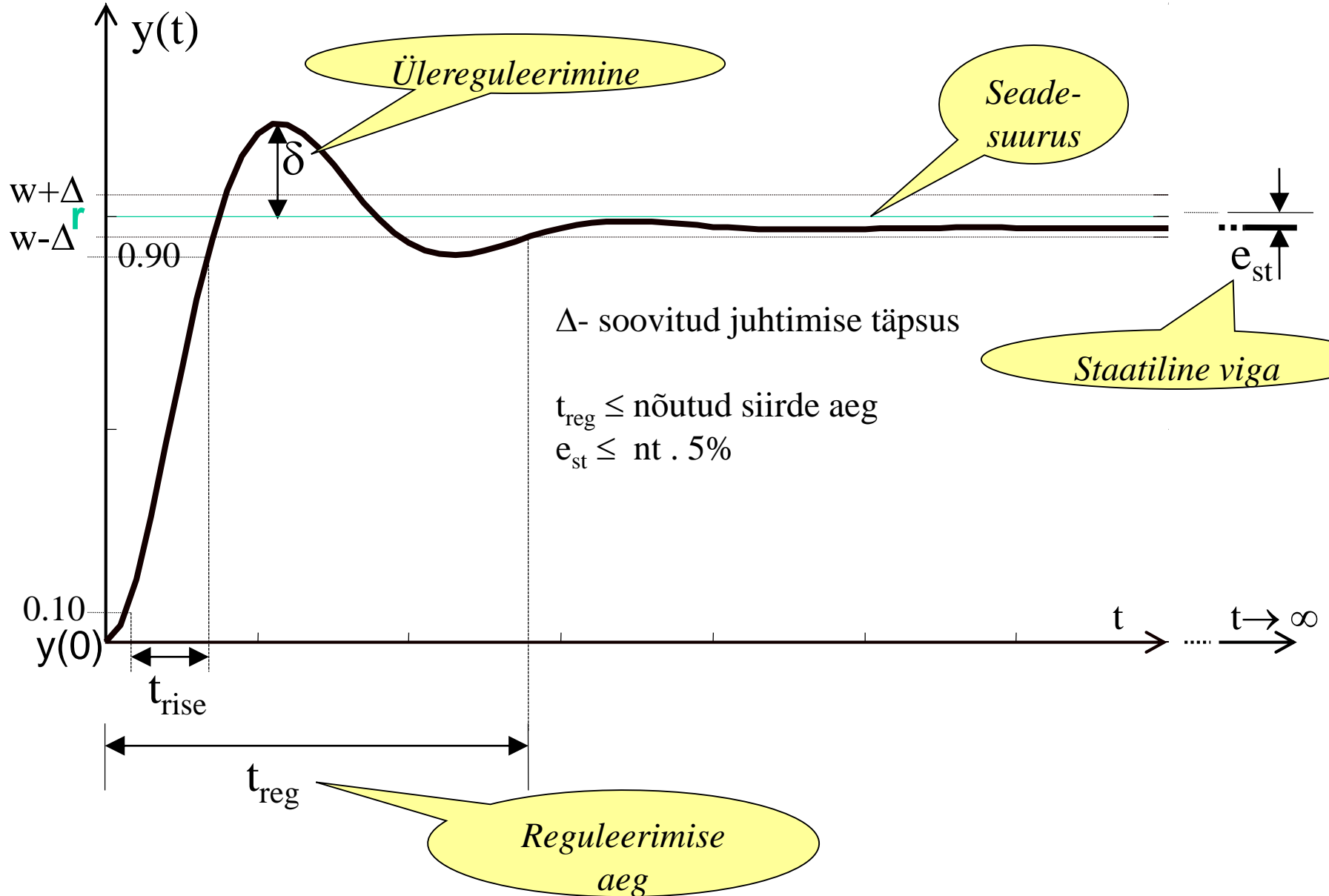
y - controlled variable (actual value, PV)*

* - IEC chief symbol

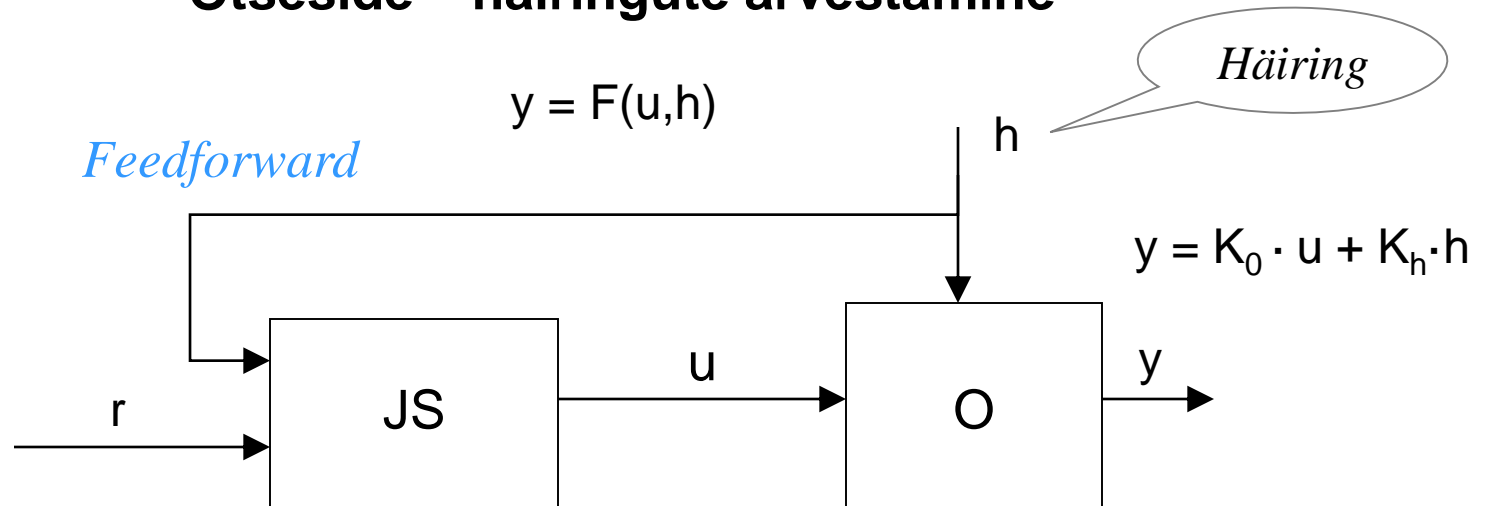
Automaatika juhtimiskontuuri seadmed



Peamised nõuded ja piirangud reguleerimise toimimisele. Dün. siire



Otseside – häiringute arvestamine



Häiringute suurust mõõtes on võimalik nende mõju vähendada

$$u = (y - K_h \cdot h) / K_0; \quad r == y \Rightarrow u = (r - K_h \cdot h) / K_0 = r / K_0 - K_h \cdot h / K_0$$

Probleemid:

- ebatäpsed mudelid (K_0 , K_h)
- mittemõõdetavad häiringud
- mittestabiilsed objektid
- kiired protsessid

https://youtu.be/FW_ay7K4jPE



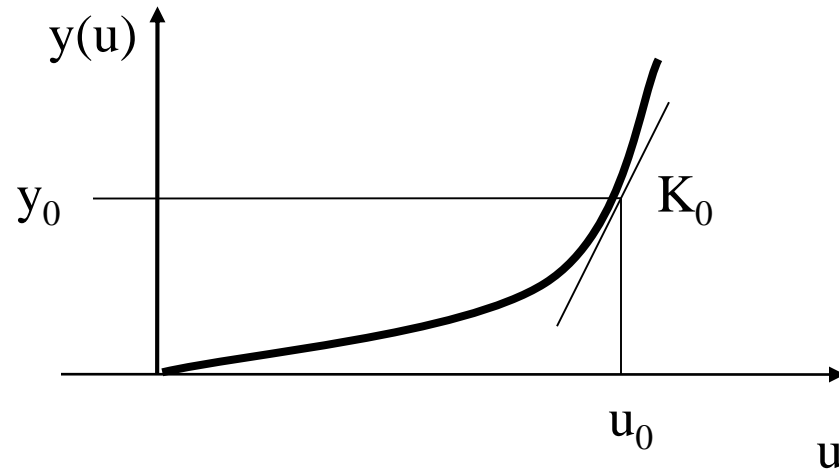
Süsteemi osade matemaatiline kirjeldamine

Juhitavate protsesside ja teiste süsteemi seadmete lihtsustatud mudelite esitusvormid. u – sisend, y – väljund, $y=f(u)$

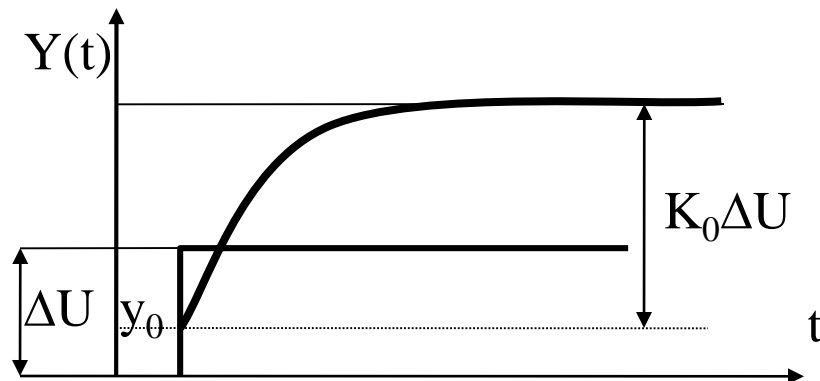
Steady-state

Staatiline karakteristik

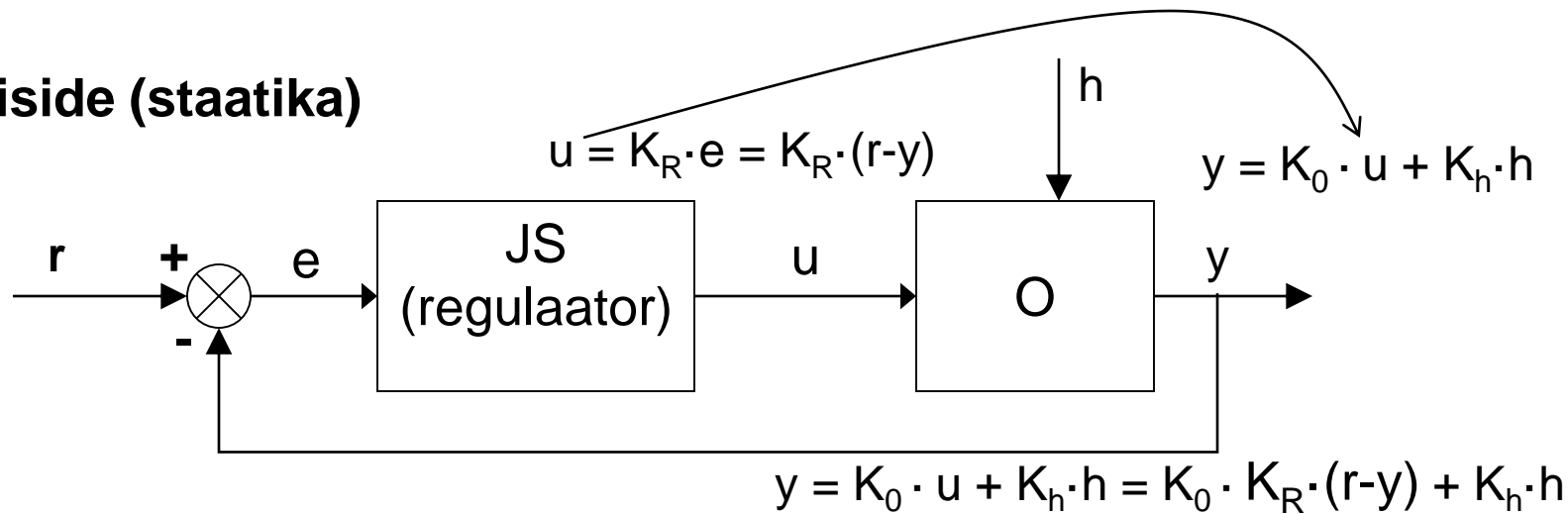
$$\frac{dy(t)}{dt} = \frac{du(t)}{dt} = 0 \Rightarrow$$



Dünaamiline karakteristik



Tagasiside (staatika)



$$y = \left(\frac{K_O \cdot K_R}{1 + K_O \cdot K_R} \right) \cdot r + \left(\frac{K_h}{1 + K_O \cdot K_R} \right) \cdot h$$

Mõisted:

TS ahela võimendus $L = K_O \cdot K_R$ $L \gg 1$

suletud süsteemi ülekanne ($r \rightarrow y$) $T \approx 1$

tundlikkus $S = 1 / (1 + L)$ $S \ll 1$

Loop transfer

$$T = L / (1 + L)$$

$$T + S = 1$$

$$y = T \cdot r + S \cdot K_h \cdot h$$

TS ☺

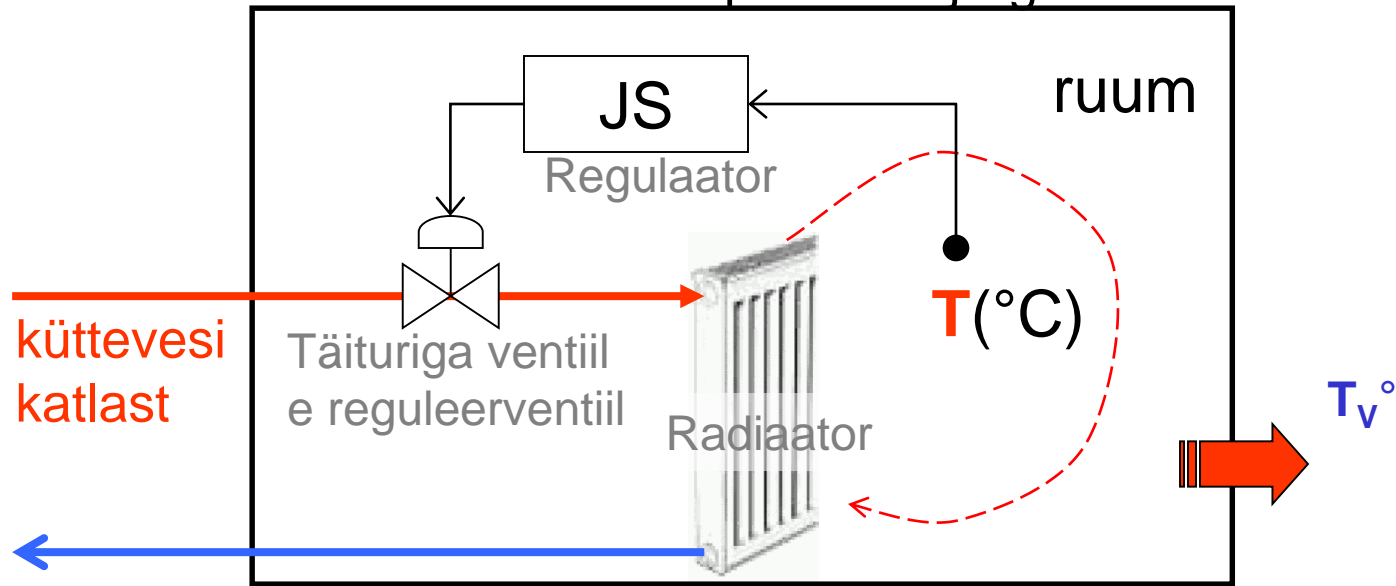
- + seadesuuruse täpne jälgimine
- sõltumata K_O ebatäpsusest
- + häiringute mõju vähendamine
- (pole vaja h mõõta, K_h teada)

TS ☹

- võimalik tekitada ebastabiilne s. (võnkumised)
- piiratud diapsoonis
- häiringu mõju avaldumisel

Näide (ruumi temperatuuri juhtimine)

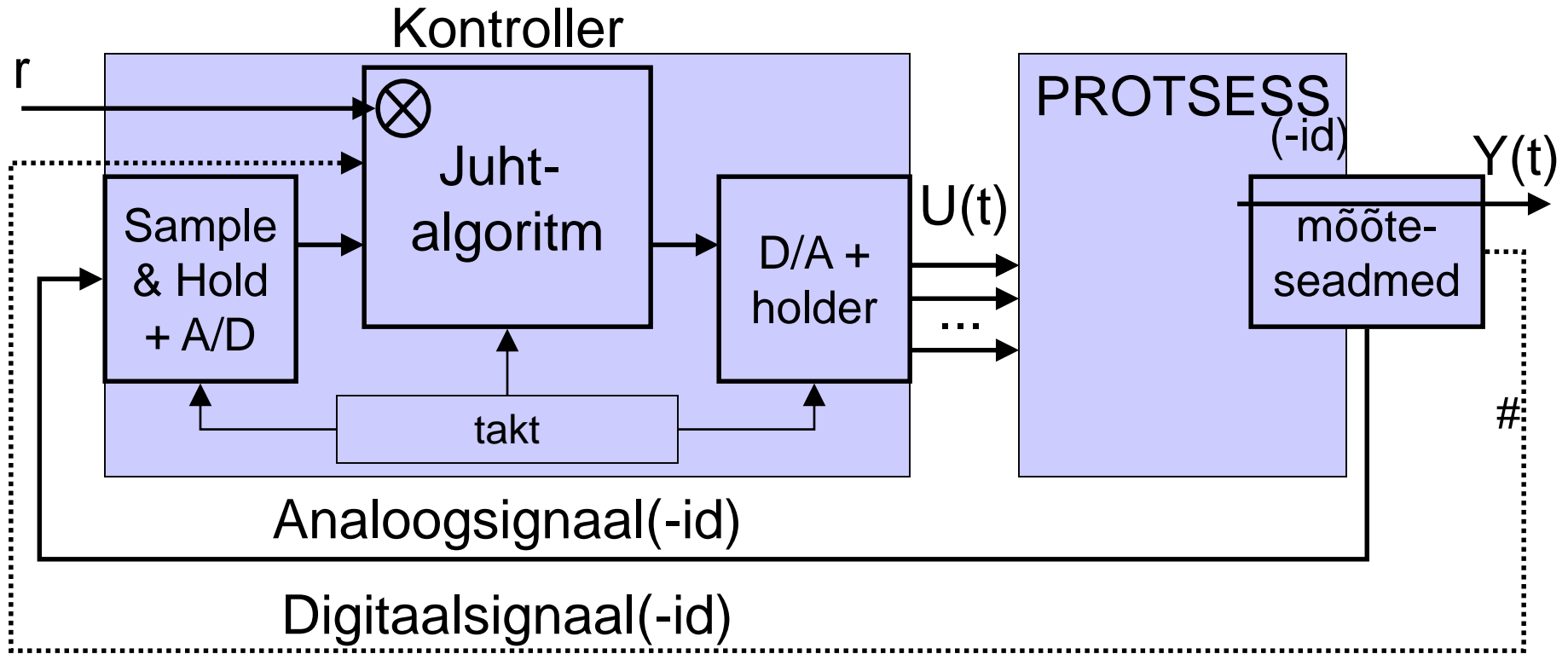
TS toatemperatuuri järgi



Saab arvestada kõiki T° -le mõjuvaid faktoreid:

- ruumis eralduv soojus (inimene, seadmed, jm)
- välisõhu temp. muutus
- tuul, päike
- kütteevee temp. muutus

Digitaalne automaatjuhtimissüsteem (DCS) (DDC – direct digital control)



A/D - analog / digital muundur

D/A - digital / analog muundur

Automatiseerimise
tasemed

“Automatiseerimine”

Automatiseerimise tasemed (pigem tootmise automatiseerimisel)

Kui hooneautomaatikas midagi “tasemeteks” lugeda, siis võiks need olla EL standardis 15232: toodud A, B, C klassid

Automaatjuhtimise meetodite suunad

Traditsioonilised e klassikalised: On/Off, PID

Matemaatilist mudelit kasutavad: optimaaljuhtimine LQR, robustne j. adaptiivjuhtimine, erinevad mittelineaarse juhtimise tehnikad, mudeliga ennustav juhtimine (MPC), *Generalized Predictive Control* (GPC),

Ilmutatud mudelita tehnikad: tehisnärvivõrkudega j.(ANN), hägusloogikaga j.(FLC), geneetilise algoritmiga (GA) häälestamine

Eelnevate erinevad hübriid variandid.

BMS, *(Total) Building Management System*

TBM (Integreeritud) hoone haldus-|juhtimissüsteem

EN 16947-1:2017 EPB, BMS*

TBM *Technical Building Management*

osa BM-st; hoone kasutuse ja tehnosüsteemide haldus (k.a EM) ning hooldus *maintenance*

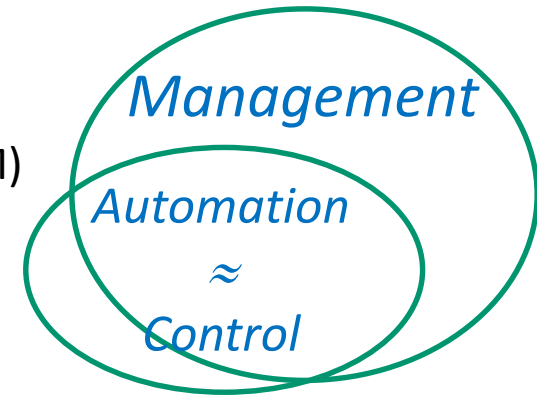
= **BACS,** =Tech Building System M10*
Building Automation and Control System

BAS Hooneautomaatika (ja ~~kontroll~~) süsteem

(automaatika = automaatjuhtimine + automaatkontroll) +HMI + optimeerimine

EMS, *Energy Management System*

BEMS energia haldus-|juhtimissüsteem



EN 15232-1:2017, *Energy performance of buildings - Part 1: Impact of Building Automation, Controls and Building Management* - Modules M10-4,5,6,7,8,9,10

Hoonete energiatõhusus. Osa 1: Hoone automaatika, juhtseadmete ja hoonehalduse toime.

vt. „Madal- ja liginullenergiahooned“ RKAS, TTÜ 2012 pt 5.5 Hooneautomaatika

Building services – (Infrastructural, Financial and) **Technical:**

EM, ACS, Valgust. ^{M9}, HVAC ^{M3-M7}, DHW, Safety and Security,

Facility Management – äriprotsessid; (*+*Building Management*) **Information Management**

vara, hanked, hooldus, tarbimine/jõudlus, organisatsioon, inimesed (kliendid, töötajad)

Energy Performance of Buildings Directive EPBD 2002/91/EC, recast 2010/31/EU
EN15232 (...2017) Impact of BACS functions on energy efficiency

(<https://ec.europa.eu/energy/en/topics/energy-efficiency/buildings>)

CEN/TC 247

ISO/TC 205

EN ISO 16484 Standard (2003, ... ,2017)

BACS - Building Automation and Control System

1. Overview, Terms and definitions
2. Hardware (& hardware requirements)
3. Functions, BACS functions, software requirements
4. Applications (Room automation, optimization)
5. **Protocol** (BACnet w Mapping to KNX) c 1320 p-s.
6. Test of Conformity
7. **Project Implementation** (design, system integration, execution)
Under development; ISO 16484 -Part 7: The contribution of BACS to energy performance of buildings

Hooneautomaatika hierarhia

e. Seadmete hierarhia

<http://www.eubac.org>

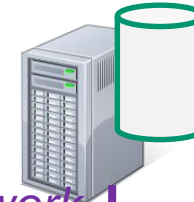
--> Publications

Management Layer

Automation Layer

Field Layer

Operaatorjaamad
(HMI, monitooring), serverid

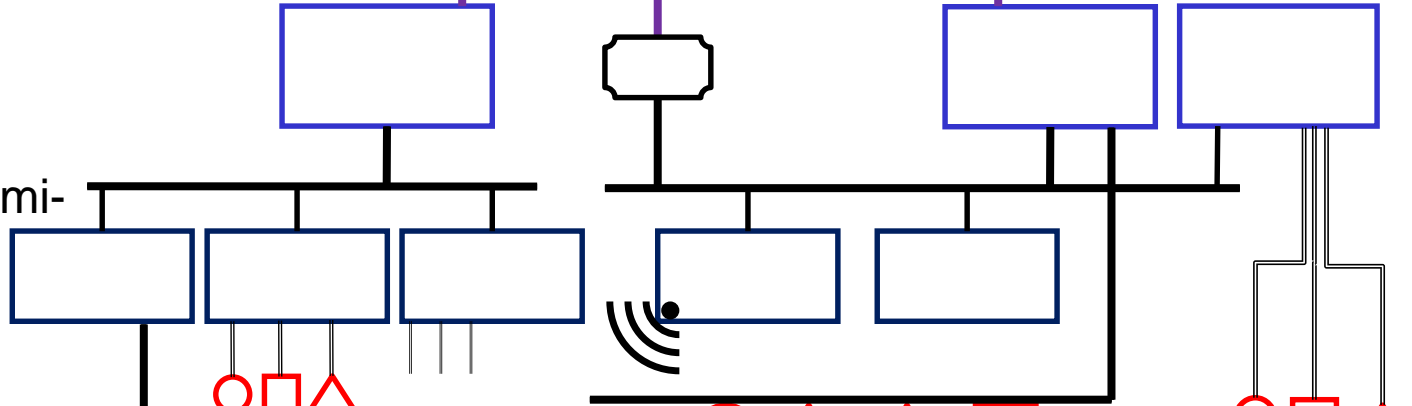


backbone network

Juhtarvutid, DDC
(PLC'd)

≈ alakeskused

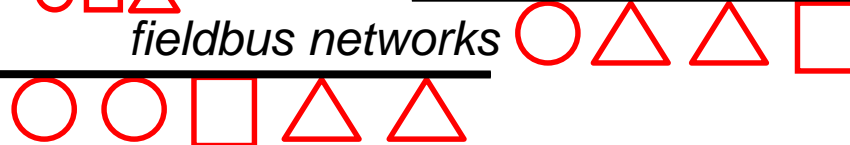
Tsooni-, ja süsteemi-
kontrollerid



Andurid ja täiturid



fieldbus networks



Hooneautomaatikasüsteemi seadmed

Management (haldus/juhtim./monitooring/jms.) ja operaator tööjaamad (*MS - management stations, OW - operator workstations*) jm. *HMI* vahendid
≈ järelvalvekeskus

Automatiseerimise tööjaamad (*BAS - building automation stations,*)

Vabaprogrammiga kontrollid (*programmable controllers, network control units*)

Lokaalvõrk (*LAN*) + Võrgu laiendusseadmed (*network expansion units*)

Rakendusspetsiifilised kontrollid (*ASC - application specific controllers*)

- (*IAC - intelligent access controller*)
- (*IFC - intelligent fire controller*)
- (*ILC - intelligent lighting controller*)
- (*AHU - air handling unit controller*)
- (*VAV - variable air volume box controller*)
- (*heat pump unit controller*)
- (*unitary equipment controller*)
- ...

<http://www.eubaccert.eu/> **EN15500**

Madalama e. “välja” taseme seadmed (*SFD - specific field devices*); andurid, täiturid jms.



Operaatorliides /"kasutajaliides"



EN ISO 16484-3

Standardized structure of functions in BACS

Operator functions



Operation



Alarming



Reporting

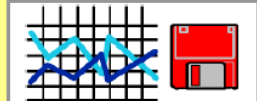


Help

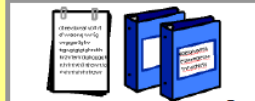


Paging

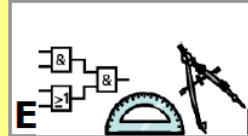
Management functions



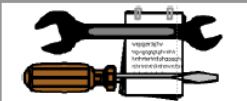
Data analyses



Documentation



E



Maintenance



Networking

Processing functions



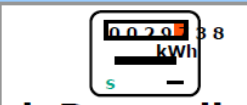
Techn. alarm



Safety alarm



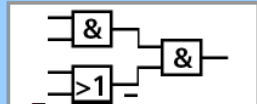
Backup power control



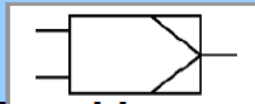
Peak Power limit



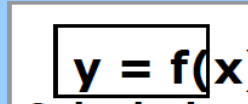
Time program



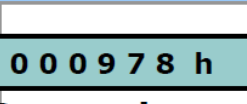
Interlocks



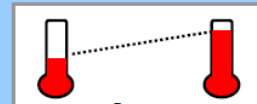
Closed loop ctrl.



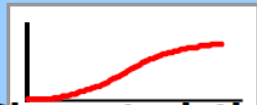
Calculation



Operat.hours



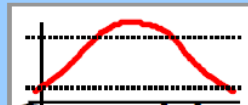
Set point range



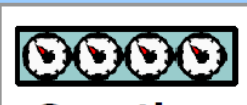
Characteristics



Recording



Supervision



Counting



Man. operation

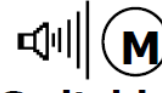
I/O functions (field devices)



Measuring



Binary State



Switching



Positioning

BAS peamised elementaarfunktsioonid kontrollerites ja tööjaamades

- Operaatori funktsioonid; visualiseerimine, dünaamiline kuva, graafikud/trendid, skeemid, sõnumid, alarmide haldus
- Management*; ajaloo AB, statistika, EM ja globaalne optimeerimine, hoolduse korraldus, dokumentatsioon
- Monitooring; piirväärtuste seadmine, töötundide summeerimine, sündmuste loendus
- Arvutamine ja optimeerimine; ajakavad (*schedules*), sündmuste lülitamine, optimaalne start/stopp, öine jahutamine, seadesuuruste piiramine, varutoide, koormuse piiramine, energia tariifi järgi lülitamine.
- Interlocks* (vastandlike režiimide välistamine) protsessi juhtimisel, ohuolukordade ja külmumiste vältimisel.
- Tagasidestatud juhtimine; P, PI/PID, seadesuuruse/ juhitava suuruse piiramine, kahepositsiooniline ja PWM juhtimine
- Sidestatus andurite ja täituritega (otse kontrollerisse või hajutatud distantspöördus) ; binaarne I/O (*state, counting, switching/positioning*)
analog I/O (*totalized value/ measuring/positioning*)



Arukate hoonete lahendused (= B | A klass)

Hooneautomaatika ja juhtimissüsteemide funktsioonide mõju hoonete energiatõhususele. EL standardi 15232: 2007, 2012, 2017 tõlgendamine ja kasutamine eu.bac tootesertifikaat

1.# Ruumide küte (va tsentraalsed küttesüsteemid)

D	C	B	A
Ainult keskne automaatjuhtimine (katlaautomaatika) või automaatjuhtimine puudub.	Lisaks võimalikule keskele automaatjuhtimisele ruumi tasemel autonoomne juhtimine (ruumi-termostaat ei suhtle maja süsteemidega) võib olla sh kontrollerisse salvestatud ajaprofiiliga juhitud.	Ruumipõhine juhtimine, ruumikontrollerid suhtlevad hoone keske automaatikasüsteemiga, mis võib ajaprofiilide muutmisega sekkuda.	Ruumipõhine terviksüsteemist (sh akende uste, kardinade olekust) lähtuv nõudlust (kohalolu ja/või küttevajadust) arvestav juhtimine.

3.# Jahutus

D	C	B	A
Ainult keske jahutusseadme automaatjuhtimine või automaatjuhtimine puudub.	-"- Kütte ja jahutuse samaaegne toimimine piiratud.	-"- Kütte ja jahutuse samaaegne toimimine piiratud.	-"- Kütte ja jahutuse samaaegne toimimine välistatud.

Arukate hoonete lahendused (= B | A klass)

4.# Ventilatsioon

D	C	B	A
Juhtimine puudub või käsitsi püsikiirusega	Ajakavaga juhtimine, vabajahutus (otse välisõhk tuppa aktiivseadmeid kasutamata) ainult väljaspool hoone kasutusaega.	Ajakavaga juhtimine, vabajahutus (välisõhu segamine siseõhuga lähtuvalt temperatuuridest aktiivse jahutuse vähendamiseks).	Kohalolekut ja/või reaalsel ventileerimise vajadust (CO ₂ , RH jne) arvestav juhtimine. Vabajahutus (välisõhu segamine siseõhuga lähtuvalt temperatuuridest ja niiskusest (entalpiast) aktiivse jahutuse vähendamiseks)

5.# Valgustus

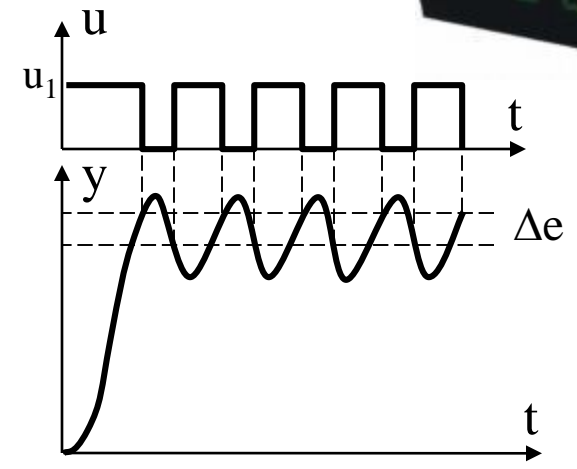
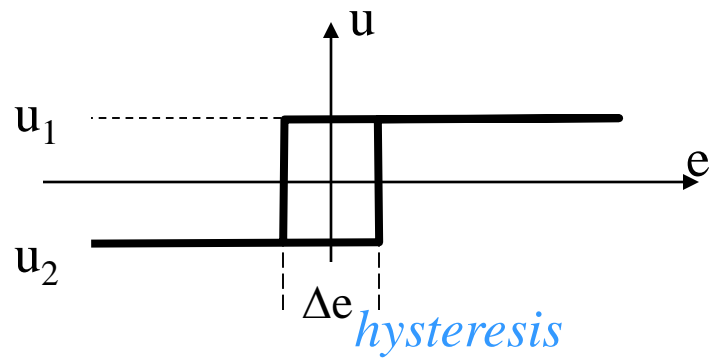
D	C	B	A
Käsitsi juhtimine.	Käsitsi sisse, regulaarselt vähemalt üks kord ööpäevas automaatne väljalülitamine.	Automaatne kohalolekut arvestav juhtimine.	Automaatne kohalolekut arvestav juhtimine, valgustuse astmelisel või sujuval juhtimisel võetakse arvesse päevalgustaset.

Automatreguleerimise tüüp algoritmid

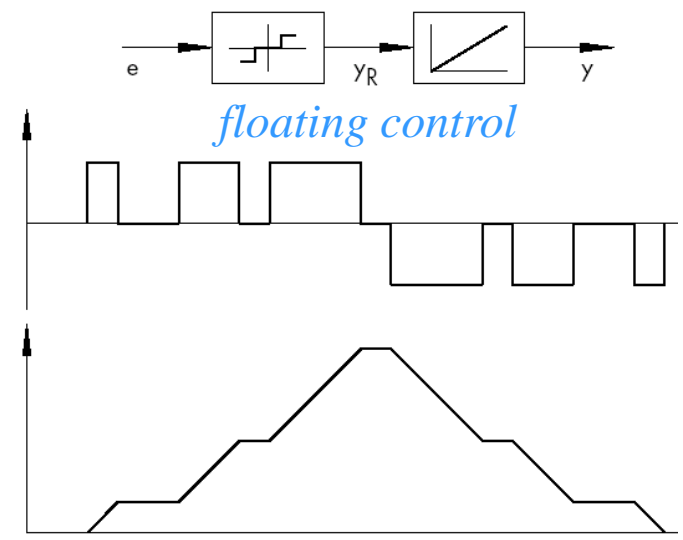
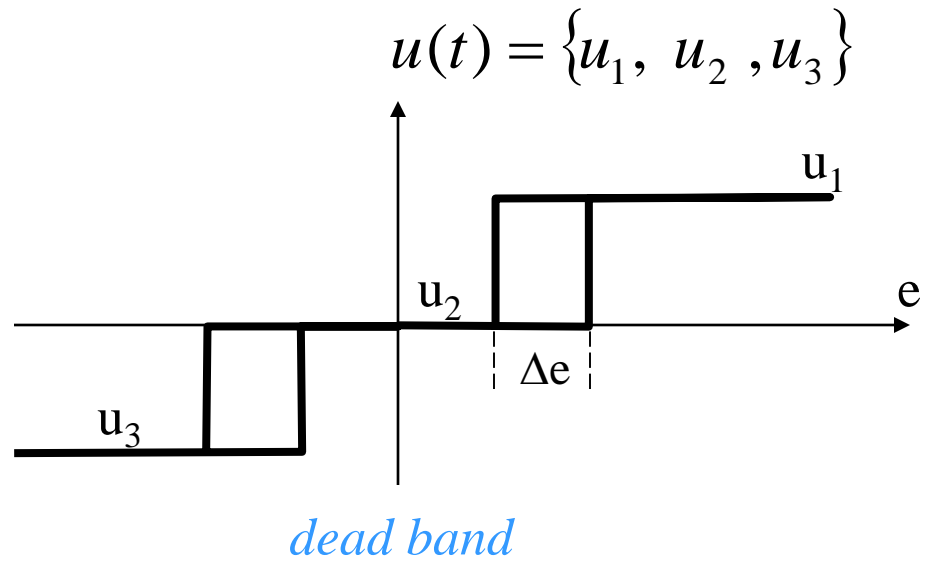
Positsiooniregulaatorid (*step control, switching*)



1) Kahepositsiooniline (*on-off control*)

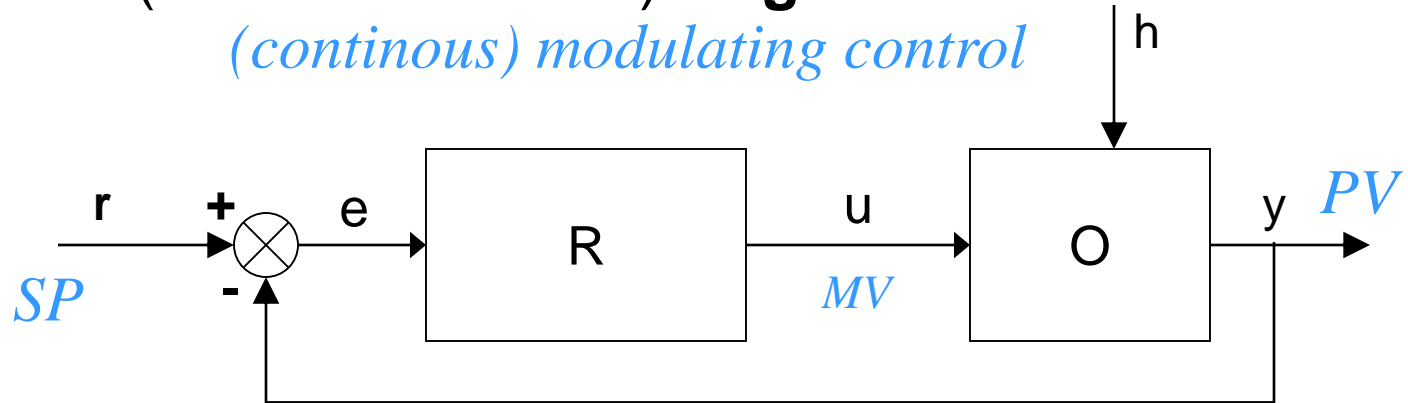


2) kolmepositsiooniline



(Pidevatoimelised) Regulaatorid

(continuous) modulating control



Antud: objekt (O) + nõuded (staatika, dünaamika)

Leida: regulaator (R) (tüüp, häälestus)

Võimalik? Kuidas? Parim häälestus?

Ülesanded:

1) maks. täpselt jälgida seadesuurust r

$$y \approx r$$

2) min. tundlikkus häiringutele h

$$y = T \cdot r + S \cdot K_h \cdot h,$$

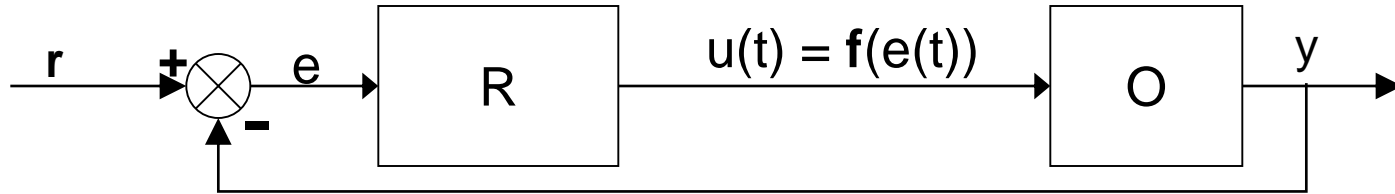
$$T \approx 1, S \ll 1$$

Probleem: ülekanded $r \rightarrow y$ ja $h \rightarrow y$ võivad oluliselt erineda, regulaator projekteeritakse ühele ülesandele

PID regulaator

(continuous) modulating control

kasutamise lihtsus, robustsus (töötab ka kehva häällestusega) \Rightarrow levinud

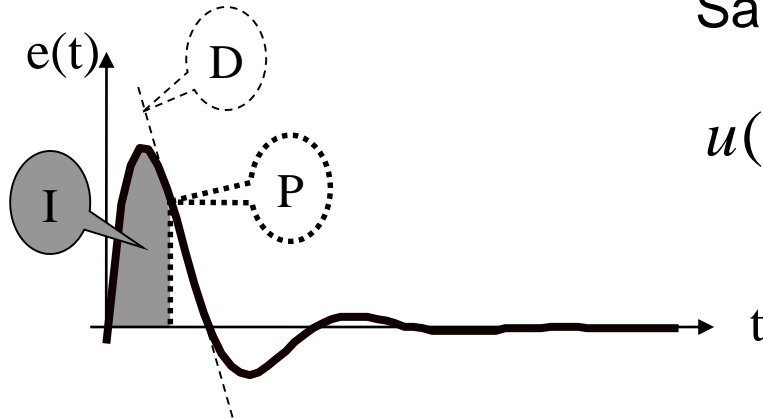


$$u(t) = \underbrace{K_p \cdot e(t)}_{\text{P}} + \underbrace{K_i \int e(t) dt}_{\text{I}} + \underbrace{K_d \frac{de(t)}{dt}}_{\text{D}} - \text{komponendid}$$

parameetrid $\{ K_p, K_i, K_d \}$

Regulaatori väljund (juhttoime) formeerub veasignaali e olevikust, minevikust ja tulevikust:

Sama ajaliste parameetritega: $\{ T_i, T_d \}$



$$u(t) = K_p \left(e(t) + \frac{1}{T_i} \int e(t) dt + T_d \frac{de(t)}{dt} \right)$$

ideal non-interacting PID algorithm

$$K_i = K_p / T_i, \quad K_d = K_p T_d$$

Kui viga väheneb kiiresti ($de/dt < 0$) ei ole vaja suurt juhttoimet

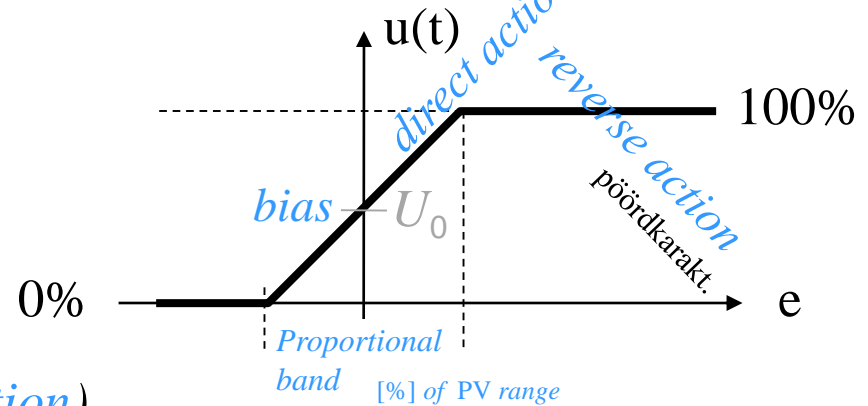
PID regulaatori komponendid

P - regulaator (*proportional*)

lihtne, kiire, jätab staatilise vea (*offset*)

<https://youtu.be/2Nrgms0cKs4>

$$u(t) = K_p \cdot e(t) + U_0$$



I - komponent (*integral control, reset action*)

staatiline täpsus, suurem võnkuvus

$$du/dt = K_i \cdot e \quad u = \text{const kui } e = 0$$

$$u \neq \text{const kui } e \neq 0 \quad \Rightarrow e \rightarrow 0 \text{ (sõltumata } K_i \text{ väärtusest)}$$

$$u(t) = K_i \cdot \int e(t) dt$$

(T_i - *reset time*)

D - komponent (*derivative, rate action*)

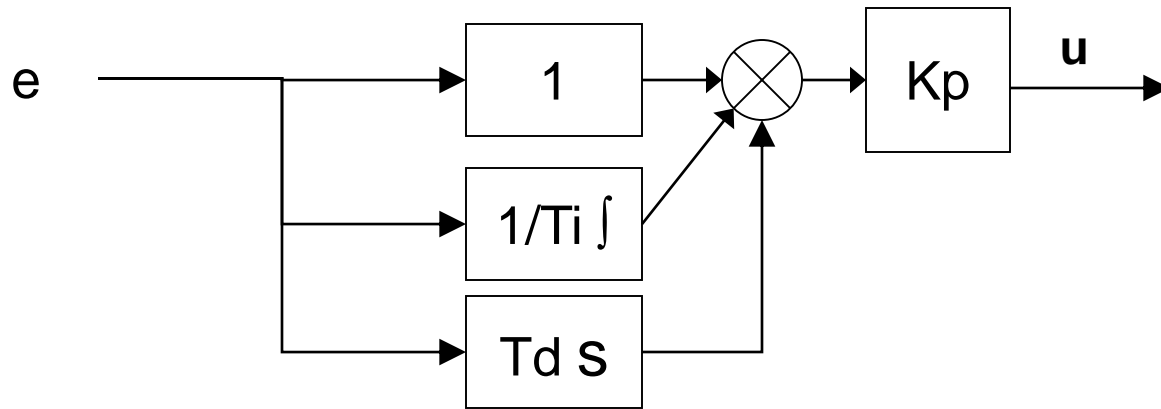
$$u(t) = K_d \cdot \frac{de(t)}{dt}$$

arvestab vea muutumise kiirust; kasutatakse koos teiste komponentidega; parandab siirde kiiruslikke omadusi (kasulik suurte ajakonstantidega objektidel) võimaldab suurendada K_p ja K_i väärtust (PID)

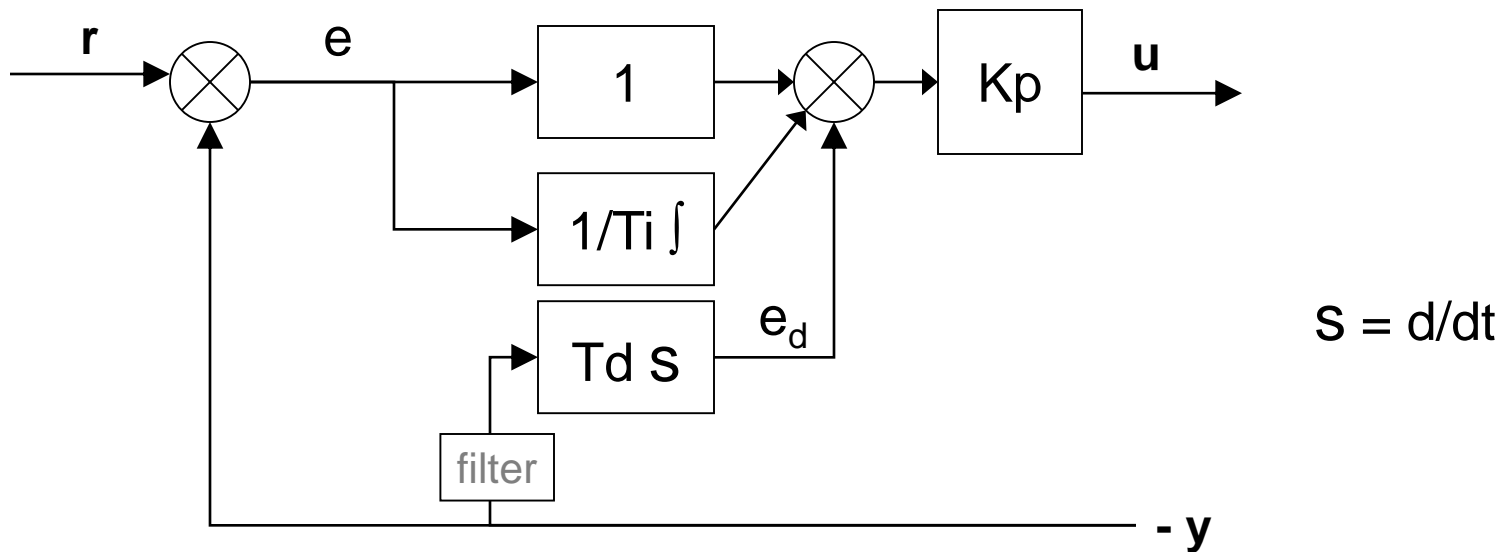
(T_d - *rate time*)

PID regulaatori struktuurid

parameetrid $\{K_p, T_i, T_d\}$



komponentide erinevad sisendid (enamikel tööstuslikel nii)



Regulaatori valik

	Staatiline viga	Seades.ümberrhäälest.	Reakts. kiirus
P	eksisteerib	vajalik	kiire
PD	eksisteerib	vajalik	väga kiire
(I)	pole	pole vaja	aeglane*
PI	pole	pole vaja	kiire*
PID	pole	pole vaja	väga kiire*

* - vajalik *anti windup* lisafunktsioon

Interactive Learning Modules for PID Control

<https://calerga.com/contrib/>

<https://youtu.be/YLGLrEwEiTQ>

P, PI, PID regulaatori häälestamine

Ziegler-Nicholsi meetod (stabiilse avatud süsteemi katsest)

Chien, Hrones, Reswick

Vt. nt *Control Engineering, A guide for beginners. Ch.4.5 Optimization*

Analüütiline (arvutuslik) meetod (teadaolevale mudelile)

Häälestuse arvutamine suletud süsteemi katsest
(Ziegler-Nicholsi, Aström-Hägglundi meetod)

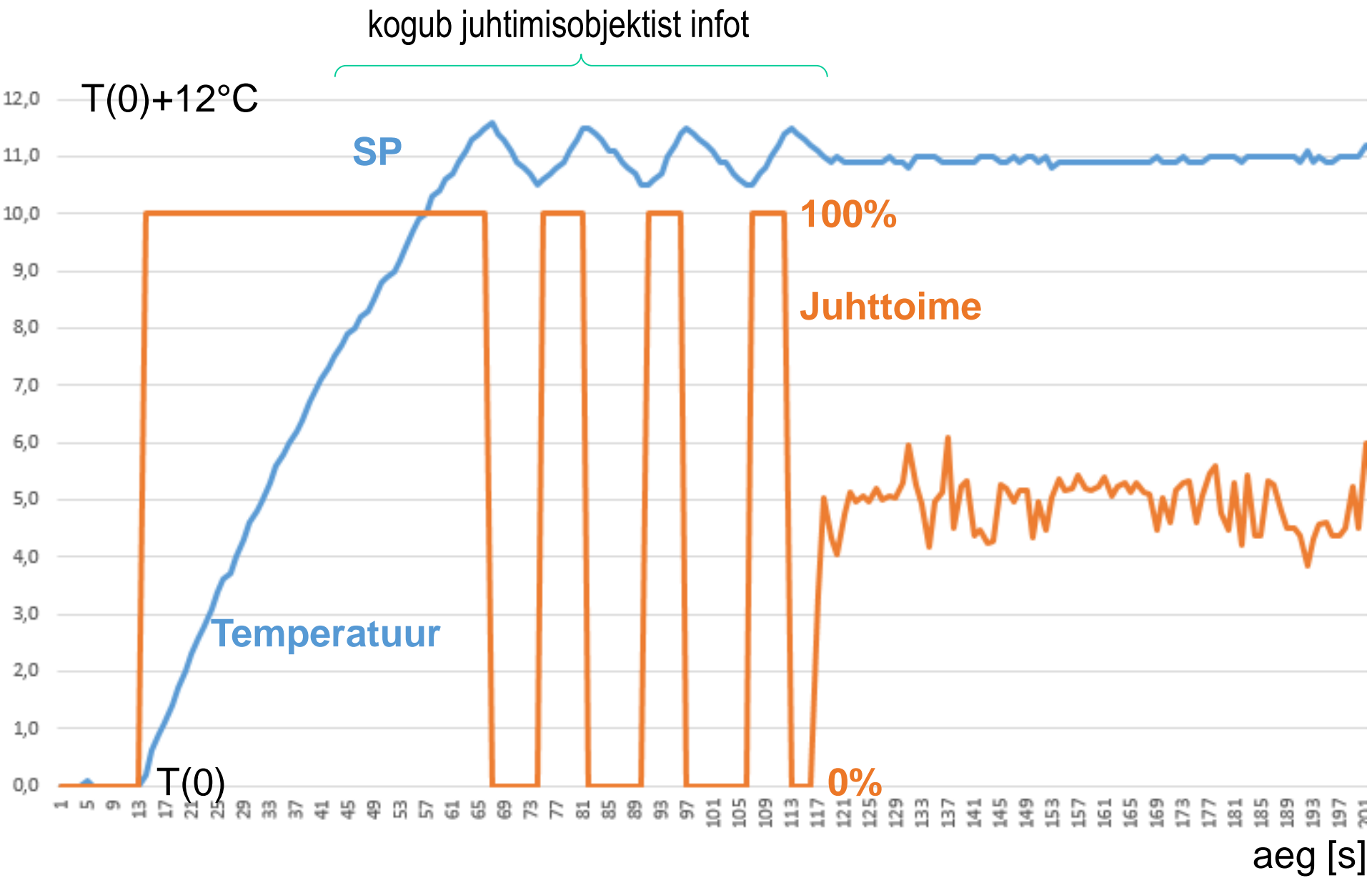
<https://scilabdotninja.wordpress.com/scilab-control-engineering-basics/module-4-pid-control/>

+ Katse-eksitusmeetodil häälestamine

+ Isehäälestuvad regulaatorid (*Self-tuning, Auto-tuning*)

<https://se.mathworks.com/videos/pid-controller-tuning-based-on-measured-input-output-data-89348.html>

PID Auto-Tune



PID regulaator diskreetajas

Diskreettaeg toob sisse hilistumise => väheneb stabiilsusvaru ja kasvab ülereguleerimine

$$u(k) = Kp \cdot e(k) + Ki \sum_{j=0}^k e(j) + Kd [y(k) - y(k-1)]$$



parameetrid { Kp, Ki, Kd }

Inkrementaalne lahendus (*velocity (incremental) mode*)

$$u(k) = u(k-1) + \Delta u(k)$$

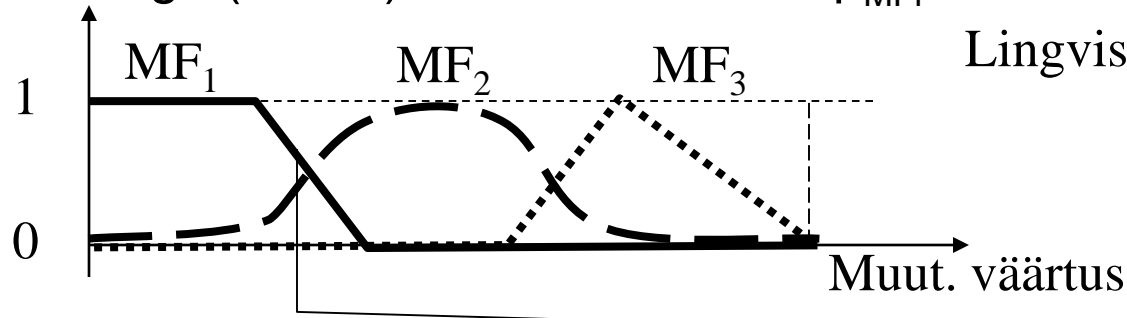
Erinevad algoritmid tuletise diskreetajas aproksimeerimiseks annavad erinevad tulemused(kuju)

<https://scilabdotninja.wordpress.com/archive/> → Digital PID

+ Alarmide haldus

Hägasloogika regulaatorid (*fuzzy control*)

Muutuja kuulub hägasasse hulka liikmesfunktsiooni (*membership funct. - MF*) väärtusega (0 ... 1) määratud määral μ_{MF_i} .



Lingvistilised märgendid

nt "külm", "jahe", "leige", "soe"
"lühike", "keskmine", "pikk"

$$\mu_{MF_1}=0.7 \quad \mu_{MF_2}=0.4 \quad \mu_{MF_3}=0$$

Hägasad reeglid: IF-(AND/OR)-THEN

Mamdani tüüpi: Kui T1="külm" ja T2="leige" Siis Y1="Küta kõvasti"
Kui T1="..."

Sugeno tüüpi: Kui T1="külm" ja T2="leige" Siis $Y1=a_{11} * T1 + a_{12} * T2$

Reeglibaasi väljundi ligikaudne järeldamine:

1. Leida iga reegli kehtivus- (tabamis-) määr
2. Leida iga reegli väljund
3. Koondada kõikide reeglite väljundid üheks süsteemi väljundiks

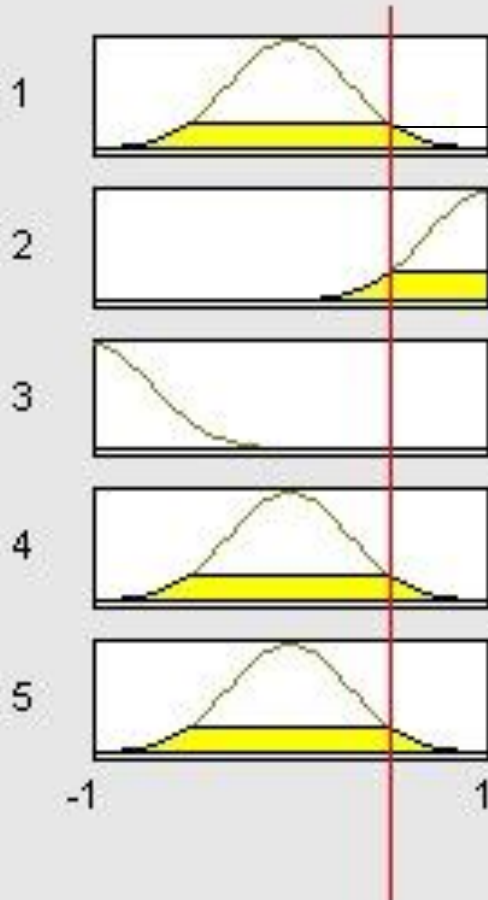
Häguärastamine

Hägasloogika regulaatoris

Nt. Hägasad reeglid 1 ... 5

Sisend 1

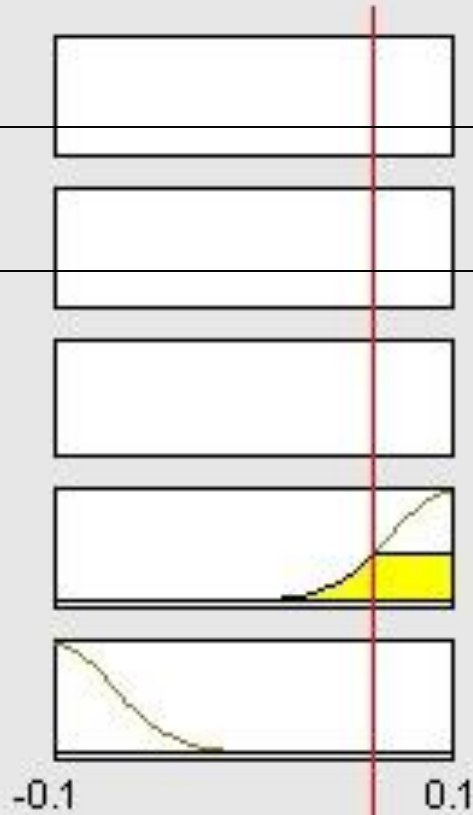
level = 0.514



Sisend 2

rate = 0.0609

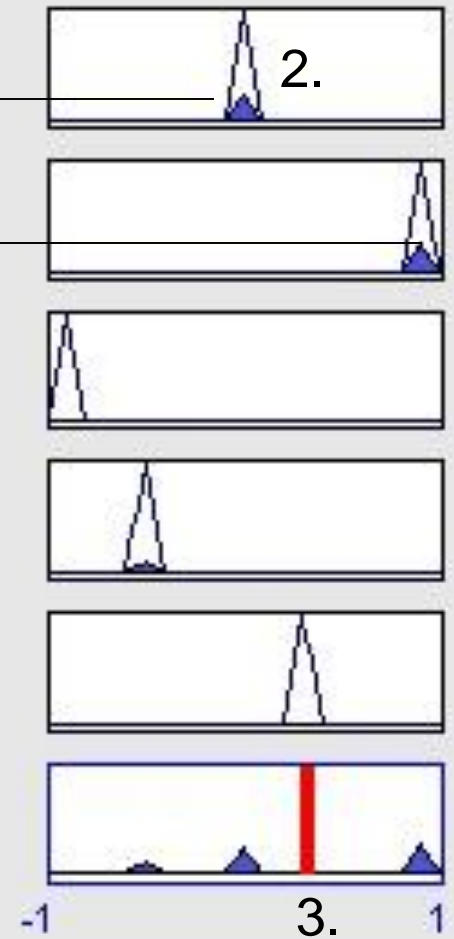
1.



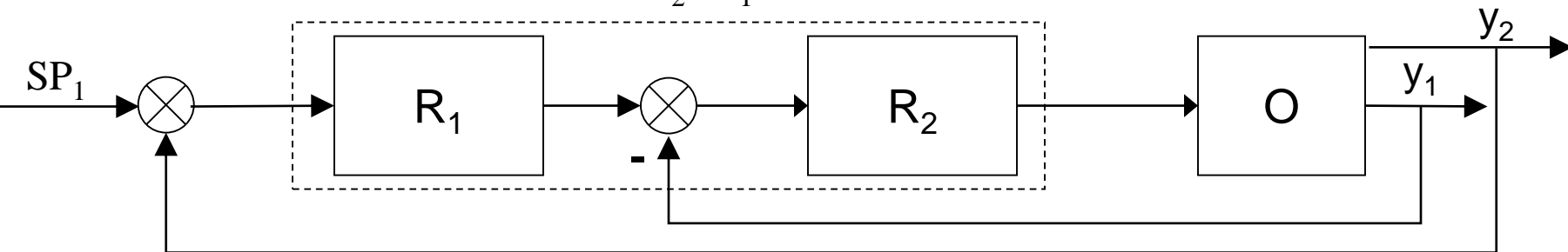
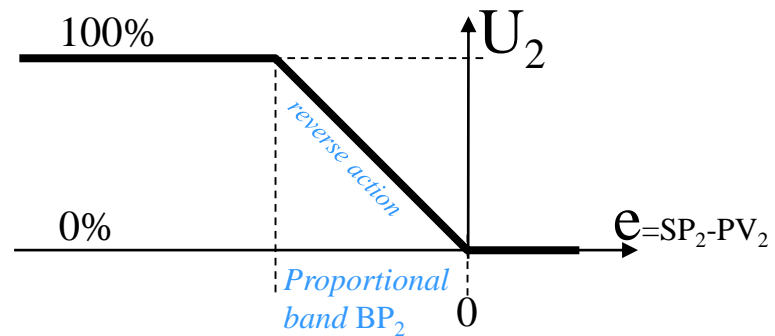
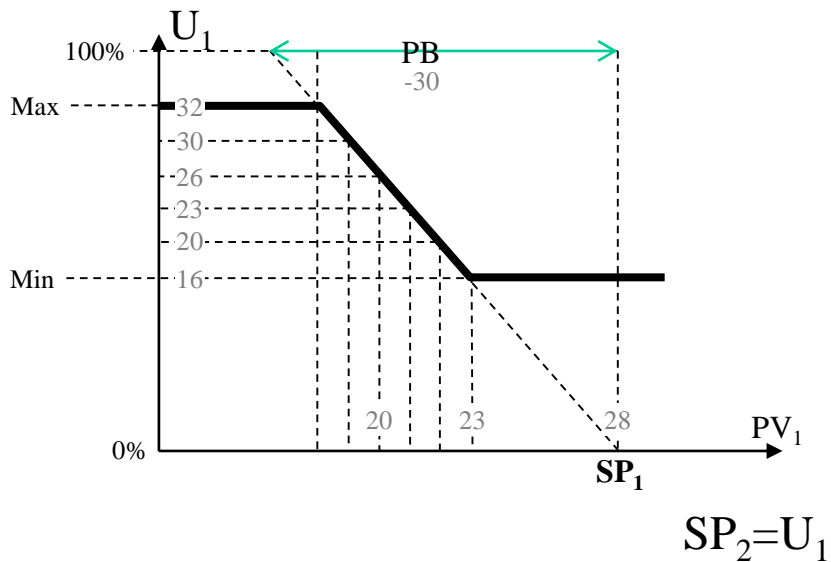
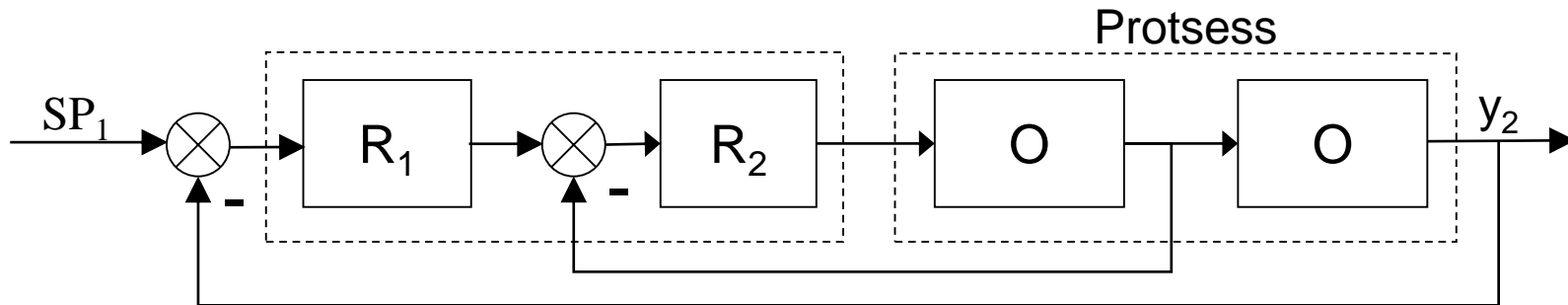
Väljund

valve = 0.322

2.



Kaskaad-regulaatorid (*cascade*)



Mudelid automaatikas

Mudelite kasutamine automaatjuhtimise algoritmi
tuletamisel

Mudelid juhtimisalgoritmi sünteesi jaoks

Vaja teada juhitava protsessi dünaamikat (dünaamilist mudelit)

Protsess ei pruugi olla ennetavalt andmete kogumiseks olemas.

Andmete saamine võib olla ajamahukas/ kallis / ohtlik.

Mudeliga saaks varajases faasis ennetavalt erinevaid juhtimise variante analüüsida.

Juhtimisalgoritmi saaks optimeerida enne rakendamist.

Lihtsam mudel juhtalgoritmi sünteesiks

vähem (oleku)muutujaid 2...20;
peamise dünaamika kirjeldus
(lihtsustustega);
katab kogu töörežiimide piirkonna;
parameetrid peaksid olema
füüsikalise sisuga;
nt. olekumudeli üldkuju või lineaarne
esitus;

Detailsem mudel süsteemi simulatsiooniks

saadud mudeldamist kiirendavate
tarkvaradega;
suur olekumuutujate (10-500) ja
parameetrite arv (100-10000).
nt. mitelineaarsed diferentsiaalvõrrandid;

Protsesside dünaamika

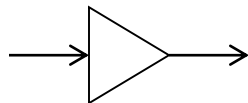


📖 [Basic Process Engineering Control. 2014. Chp. 4](#)

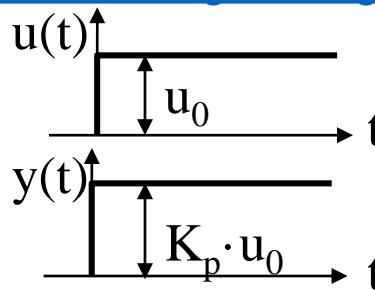
Elementaarsed protsessid:

- Proportsionaalne element (võimendi)

$$y(t) = K_p \cdot u(t)$$

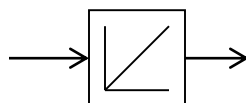


võimendustegur $K_p = y/u$



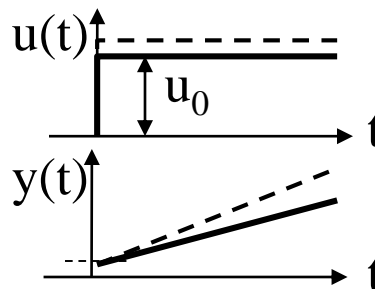
- Integraalne element

$$\frac{dy(t)}{dt} = K_i \cdot u(t)$$



integreerimisaeg $T_i = 1/K_i$

lahend $\rightarrow y(t) = y_0 + K_i \int u \cdot dt$



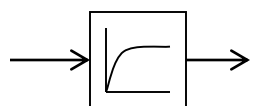
$$\Delta y = \frac{t}{T_i} \cdot u_0$$

- 1. järku aperiiodiline (LAG) element (isereguleerimisega)

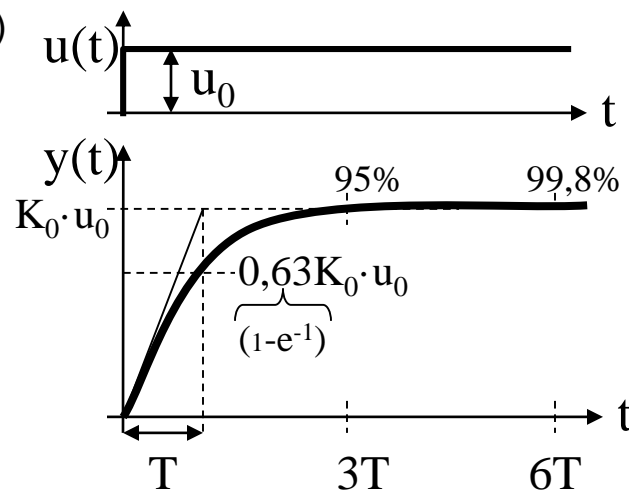
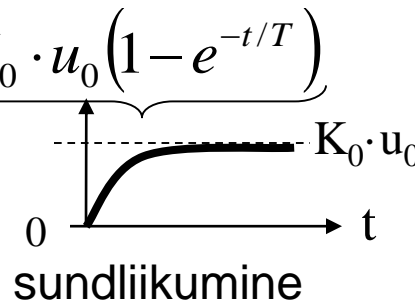
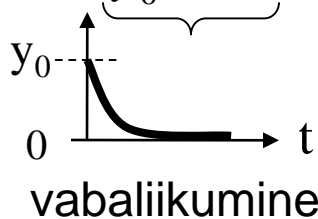
$$T \frac{dy(t)}{dt} = K_0 \cdot u(t) - y(t)$$

võimendustegur K_0
ajakonstant T

lahend $\rightarrow y(t) = y_0 \cdot e^{-t/T} + K_0 \cdot u_0 (1 - e^{-t/T})$



$t = 0 \rightarrow e^0 = 1$
 $t = \infty \rightarrow e^{-\infty} = 0$



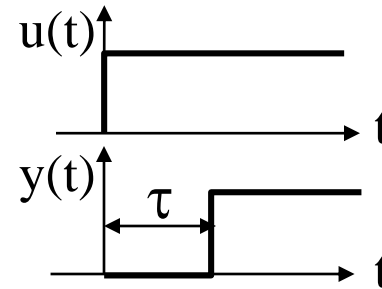
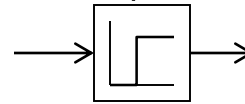
Protsesside dünaamika

Elementaarsed protsessid^{jätk}:

- hilistuv element (transporthilistumine)

$$y(t) = u(t - \tau)$$

hilist. ajakonstant τ



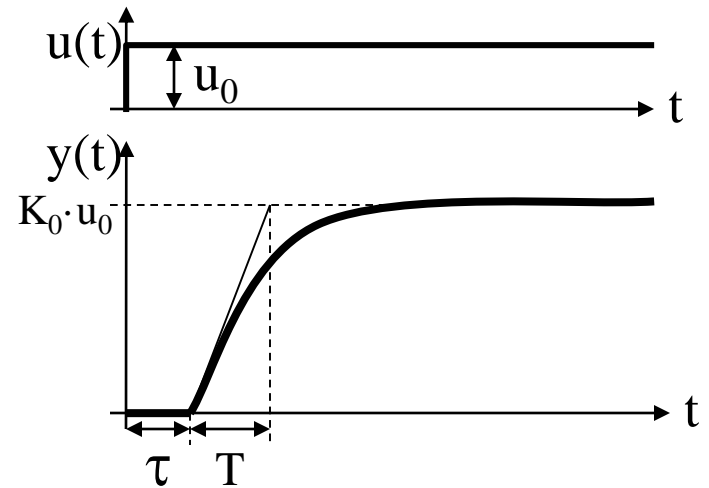
- 1. järku hilistumisega element

$$T \frac{dy(t)}{dt} = K_0 \cdot u(t - \tau) - y(t)$$

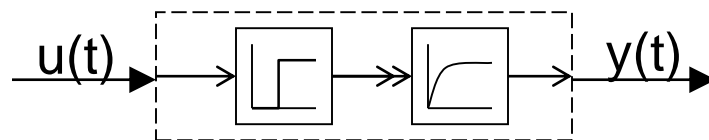
võimendustegur K_0

ajakonstant T

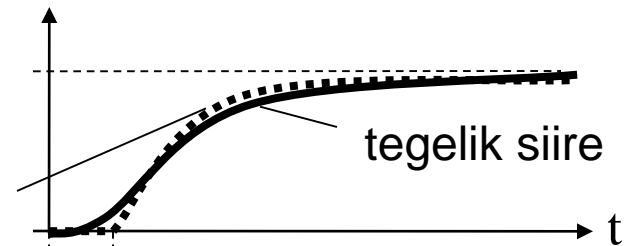
hilist. ajakonstant τ



Saab kasutada siirdeprotsesside aproksimeerimisel lihtsa mudelina



aproksimatsioon



Sisekliima dünaamika arvutusmeetodid

Õhuvoogude ja temperatuuri jaoks:

Computational Fluid Dynamics (CFD) method

ESP-r

CFD lihtsustused: madalamat järku esitusega protsess, mudeli esitus tsoonidega (*multi-zones*),

Olekumudeli esitusega MIMO (*multi-input multi-output*) süsteemide jaoks.

+ lisaks juhtimiseks mõõdetud (väljund-)muutujatele saab kasutada ka siseolekute hinnanguid juhtimise parandamiseks;

+ olekumudel on alus MPC (*Model Predictive Control*) juhtimisalgoritmi sünteesi jaoks.

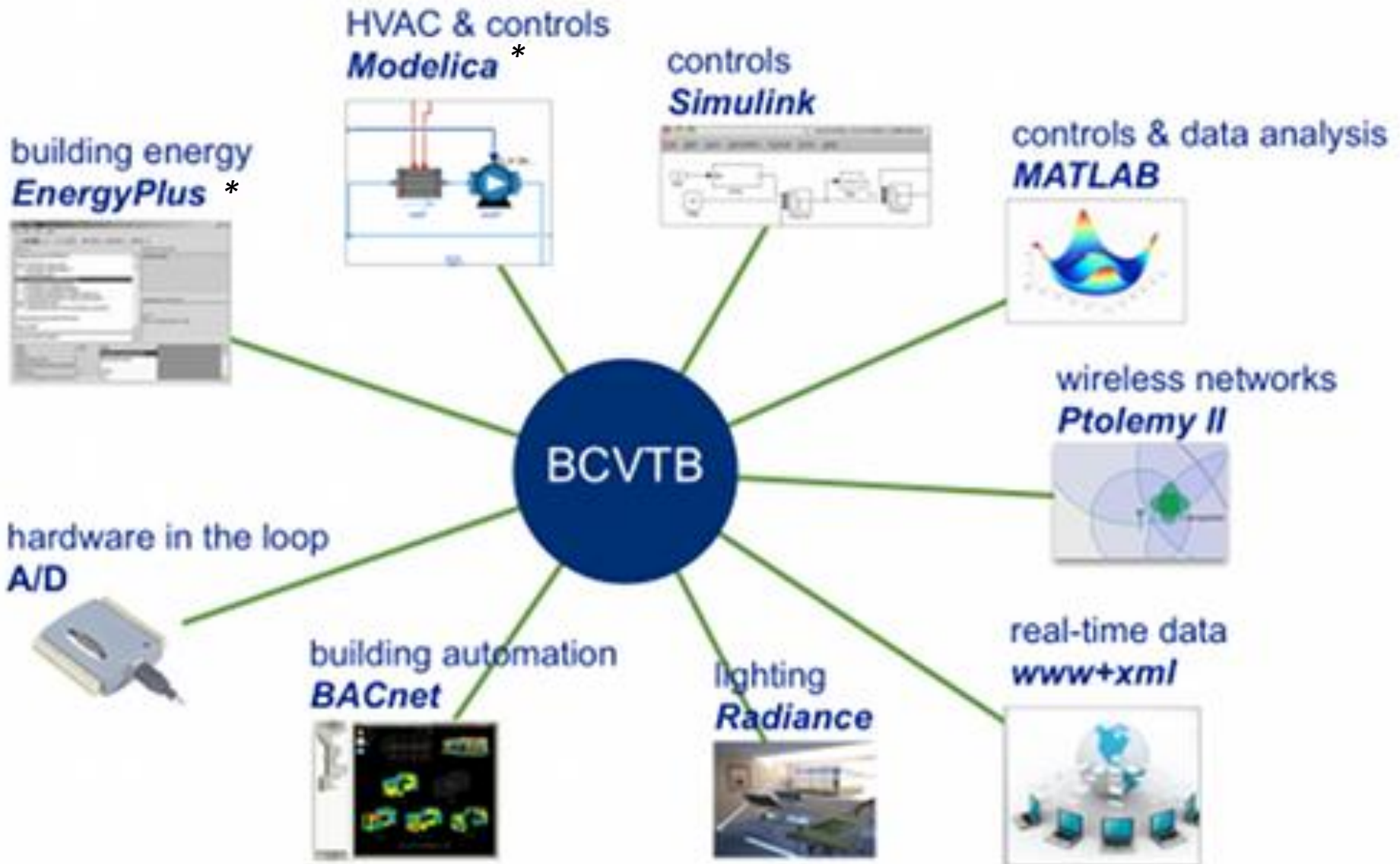
 *Smart Connected Buildings Design Automation: Foundations and Trends*. UC Berkley 2015

Chen Q, Peng X, van Paassen AHC. Prediction of room thermal response by CFD technique with conjugate heat transfer and radiation models. ASHRAE Transactions 1995 (I*)

Building Controls Virtual Test Bed (BCVTB)

**an open-source*

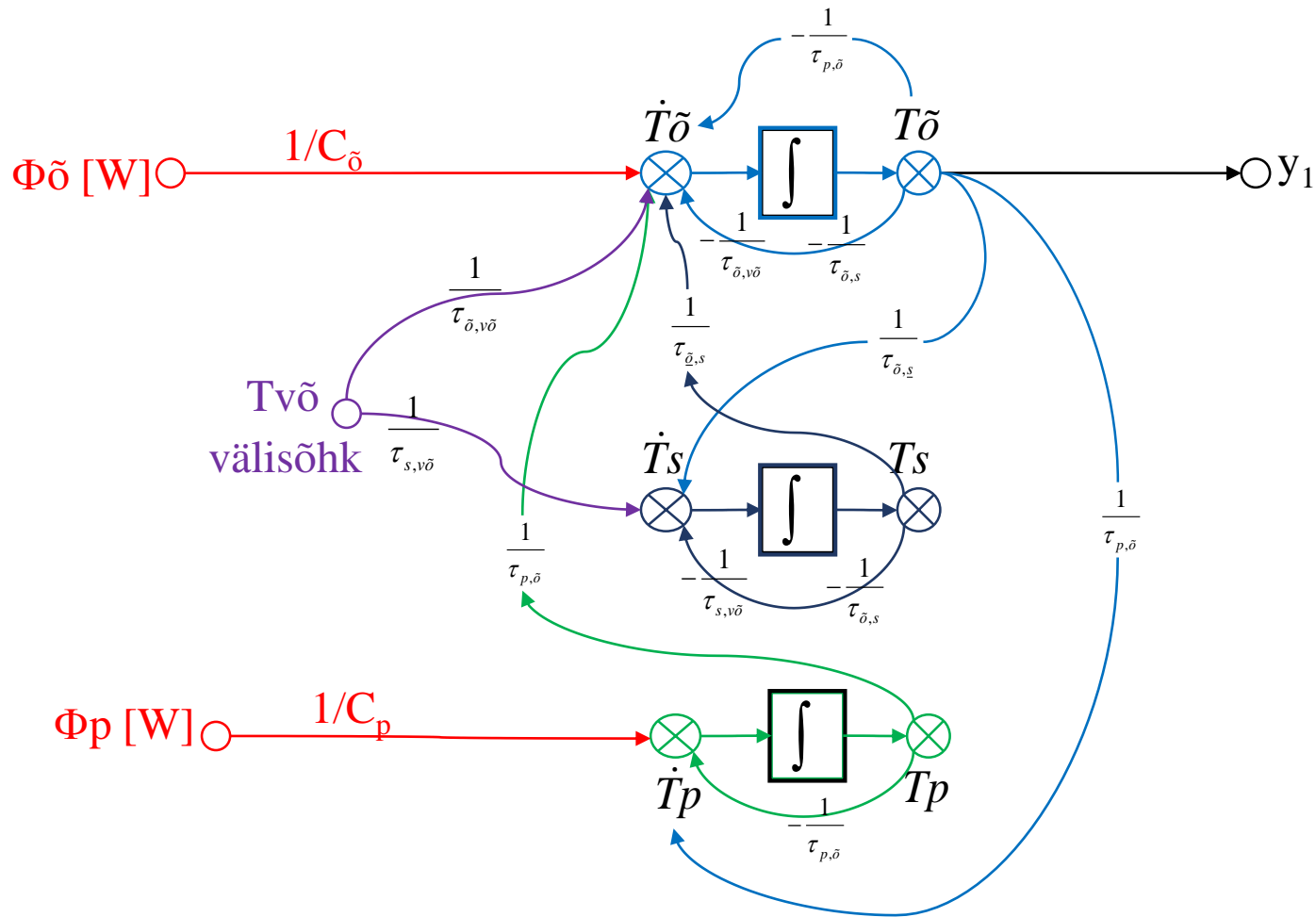
<https://simulationresearch.lbl.gov/bcvtb>



Picture: <https://simulationresearch.lbl.gov/>

Vt. <https://www.buildup.eu/en/learn/tools>

Nt soojusvahetus (põrand-õhk-sein)



C - soojusmahtuvus *heat capacity* [J/K]

c - erisoojus *specific heat* [J/(kgK)]

1. järku

$$\begin{cases} m_{\bar{o}}c_{\bar{o}} \frac{dT_{\bar{o}}}{dt} = \Phi_{\bar{o}} + UA_{\bar{o},v\bar{o}}(T_{v\bar{o}} - T_{\bar{o}}) + UA_{\bar{o},s}(T_s - T_{\bar{o}}) + UA_{p,\bar{o}}(T_p - T_{\bar{o}}) \\ m_s c_s \frac{dT_s}{dt} = UA_{s,v\bar{o}}(T_{v\bar{o}} - T_s) + UA_{\bar{o},s}(T_{\bar{o}} - T_s) \\ m_p c_p \frac{dT_p}{dt} = \Phi_p + UA_{p,\bar{o}}(T_{\bar{o}} - T_p) \end{cases}$$

olekumuutujad: $T_{\bar{o}}$ - õhk
 T_s - sein
 T_p - põrand
 häiring: $T_{v\bar{o}}$ - välisõhk

olekuvõrrandid:

$$\begin{cases} \frac{dT_{\bar{o}}}{dt} = \frac{1}{m_{\bar{o}}c_{\bar{o}}} \Phi_{\bar{o}} + \frac{UA_{\bar{o},v\bar{o}}}{m_{\bar{o}}c_{\bar{o}}} (T_{v\bar{o}} - T_{\bar{o}}) + \frac{UA_{\bar{o},s}}{m_{\bar{o}}c_{\bar{o}}} (T_s - T_{\bar{o}}) + \frac{UA_{p,\bar{o}}}{m_{\bar{o}}c_{\bar{o}}} (T_p - T_{\bar{o}}) \\ \frac{dT_s}{dt} = \frac{UA_{s,v\bar{o}}}{m_s c_s} (T_{v\bar{o}} - T_s) + \frac{UA_{\bar{o},s}}{m_s c_s} (T_{\bar{o}} - T_s) \\ \frac{dT_p}{dt} = \frac{1}{m_p c_p} \Phi_p + \frac{UA_{p,\bar{o}}}{m_p c_p} (T_{\bar{o}} - T_p) \end{cases}$$

$\left[\frac{1}{(J/K)} \cdot \frac{J}{s} \right] = \left[\frac{K}{J} \cdot \frac{J}{s} \right] = [K/s]$
 $\left[\frac{(W/K)}{(J/K)} \cdot K \right] = \left[\frac{J}{sK} \cdot \frac{K}{J} \cdot K \right] = [K/s]$

$$\begin{cases} \frac{dT_{\bar{o}}}{dt} = \frac{1}{C_{\bar{o}}} \Phi_{\bar{o}} - \frac{1}{\tau_{\bar{o},v\bar{o}}} (T_{\bar{o}} - T_{v\bar{o}}) - \frac{1}{\tau_{\bar{o},s}} (T_{\bar{o}} - T_s) + \frac{1}{\tau_{p,\bar{o}}} (T_p - T_{\bar{o}}) \\ \frac{dT_s}{dt} = -\frac{1}{\tau_{s,v\bar{o}}} (T_s - T_{v\bar{o}}) + \frac{1}{\tau_{\bar{o},s}} (T_{\bar{o}} - T_s) \\ \frac{dT_p}{dt} = \frac{1}{C_p} \Phi_p - \frac{1}{\tau_{p,\bar{o}}} (T_p - T_{\bar{o}}) \end{cases}$$

Analoogia 1. järku üldkujuga

$$\tau \frac{dy(t)}{dt} = K_0 \cdot u(t) - y(t)$$

$$\boxed{C/UA} \frac{dT(t)}{dt} = \boxed{\frac{1}{UA}} \cdot u(t) - T(t)$$

Soojusvahetus (põrand-õhk-sein) olekumudeliks

Olekuvõrrandid:

$$\frac{dT_{\bar{o}}}{dt} = \frac{1}{m_{\bar{o}}c_{\bar{o}}} \Phi_{\bar{o}} + \frac{UA_{\bar{o},v\bar{o}}}{m_{\bar{o}}c_{\bar{o}}} (T_{v\bar{o}} - T_{\bar{o}}) + \frac{UA_{\bar{o},s}}{m_{\bar{o}}c_{\bar{o}}} (T_s - T_{\bar{o}}) + \frac{UA_{p,\bar{o}}}{m_{\bar{o}}c_{\bar{o}}} (T_p - T_{\bar{o}})$$

$$\frac{dT_s}{dt} = \frac{UA_{s,v\bar{o}}}{m_s c_s} (T_{v\bar{o}} - T_s) + \frac{UA_{\bar{o},s}}{m_s c_s} (T_{\bar{o}} - T_s)$$

$$\frac{dT_p}{dt} = \frac{1}{m_p c_p} \Phi_p + \frac{UA_{p,\bar{o}}}{m_p c_p} (T_{\bar{o}} - T_p)$$

Olekumuutujate $[T_{\bar{o}} \ T_s \ T_p]$ ja sisendmuutujate kaupa sorteeritud:

$$\frac{dT_{\bar{o}}}{dt} = \left(-\frac{UA_{\bar{o},v\bar{o}}}{m_{\bar{o}}c_{\bar{o}}} - \frac{UA_{\bar{o},s}}{m_{\bar{o}}c_{\bar{o}}} - \frac{UA_{p,\bar{o}}}{m_{\bar{o}}c_{\bar{o}}} \right) T_{\bar{o}} + \frac{UA_{\bar{o},s}}{m_{\bar{o}}c_{\bar{o}}} T_s + \frac{UA_{p,\bar{o}}}{m_{\bar{o}}c_{\bar{o}}} T_p + \frac{1}{m_{\bar{o}}c_{\bar{o}}} \Phi_{\bar{o}} + \frac{UA_{\bar{o},v\bar{o}}}{m_{\bar{o}}c_{\bar{o}}} T_{v\bar{o}}$$

$$\frac{dT_s}{dt} = \frac{UA_{\bar{o},s}}{m_s c_s} T_{\bar{o}} + \left(-\frac{UA_{s,v\bar{o}}}{m_s c_s} - \frac{UA_{\bar{o},s}}{m_s c_s} \right) T_s + \frac{UA_{s,v\bar{o}}}{m_s c_s} T_{v\bar{o}}$$

$$\frac{dT_p}{dt} = \frac{UA_{p,\bar{o}}}{m_p c_p} T_{\bar{o}} - \frac{UA_{p,\bar{o}}}{m_p c_p} T_p + \frac{1}{m_p c_p} \Phi_p$$

$$A = \begin{bmatrix} \frac{-UA_{\bar{o},v\bar{o}} - UA_{\bar{o},s} - UA_{p,\bar{o}}}{m_{\bar{o}}c_{\bar{o}}} & \frac{UA_{\bar{o},s}}{m_{\bar{o}}c_{\bar{o}}} & \frac{UA_{p,\bar{o}}}{m_{\bar{o}}c_{\bar{o}}} \\ \frac{UA_{\bar{o},s}}{m_s c_s} & \frac{-UA_{s,v\bar{o}} - UA_{\bar{o},s}}{m_s c_s} & 0 \\ \frac{UA_{p,\bar{o}}}{m_p c_p} & 0 & \frac{-UA_{p,\bar{o}}}{m_p c_p} \end{bmatrix} \quad B = \begin{bmatrix} \frac{1}{m_{\bar{o}}c_{\bar{o}}} & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{m_p c_p} \end{bmatrix} \quad G = \begin{bmatrix} \frac{UA_{\bar{o},v\bar{o}}}{m_{\bar{o}}c_{\bar{o}}} \\ \frac{UA_{s,v\bar{o}}}{m_s c_s} \\ 0 \end{bmatrix}$$

$$C = [1 \quad 0 \quad 0]$$

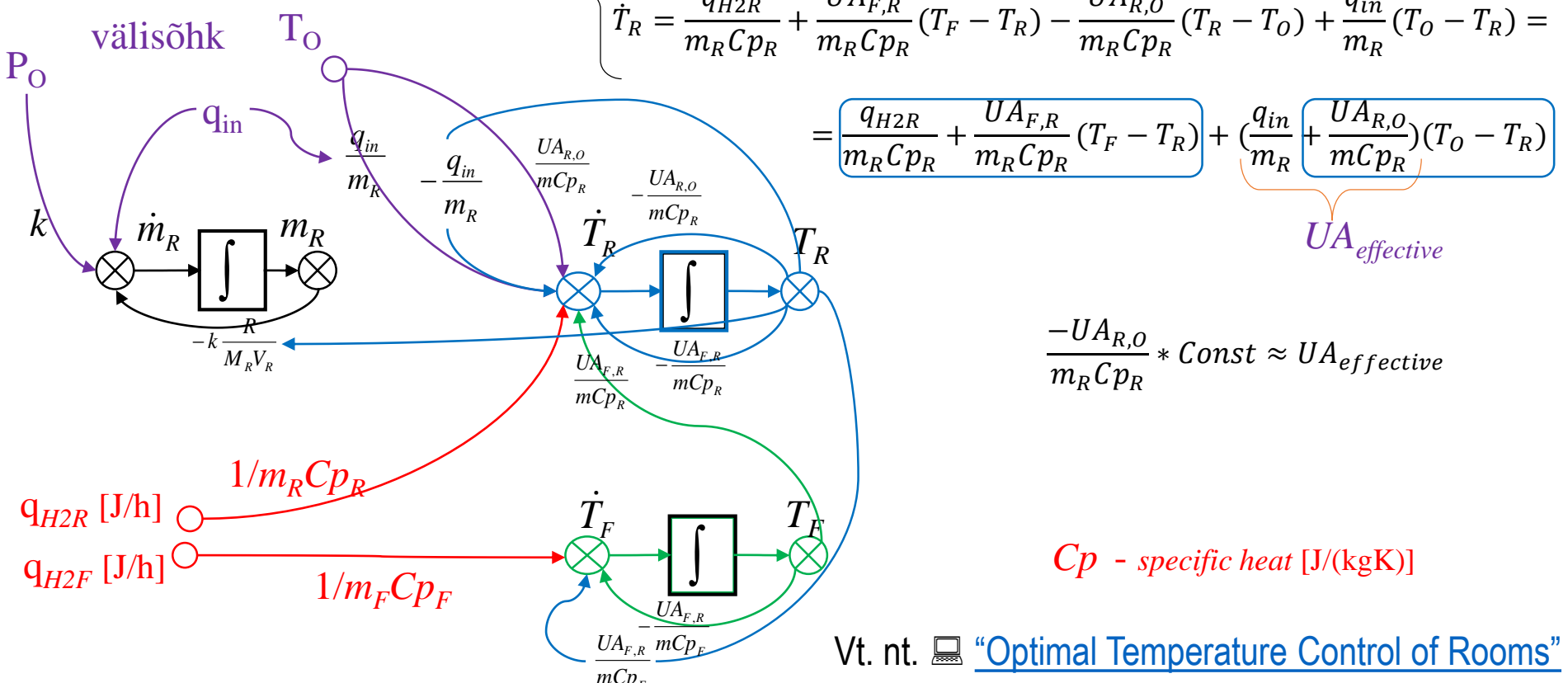
Nt Ruumi mudel (Heater->Floor-Room-Outside)

$$\begin{aligned}
 m_F C p_F \frac{dT_F}{dt} &= q_{H2F} - q_{F2R} = q_{H2F} - U A_{F,R} (T_F - T_R) \\
 m_R C p_R \frac{dT_R}{dt} &= q_{H2R} + q_{F2R} - q_{R2O} \quad \color{red}{q - \text{heat transport [J/h]}} \\
 &= q_{H2R} + U A_{F,R} (T_F - T_R) - U A_{R,O} (T_R - T_O)
 \end{aligned}
 \left\{ \begin{aligned}
 \dot{T}_F &= \frac{q_{H2F}}{m_F C p_F} - \frac{U A_{F,R}}{m_F C p_F} (T_F - T_R) \\
 \dot{T}_R &= \frac{q_{H2R}}{m_R C p_R} + \frac{U A_{F,R}}{m_R C p_R} (T_F - T_R) - \frac{U A_{R,O}}{m_R C p_R} (T_R - T_O)
 \end{aligned} \right.$$

lisades õhuliikumise (sõltub rõhkude P_R ja P_O vahest):

$$\begin{aligned}
 C p_R (m_R \frac{dT_R}{dt} + T_R \frac{dm_R}{dt}) &= q_{H2R} + q_{F2R} - q_{R2O} + q_{in} C p_O T_O - q_{out} C p_R T_R \\
 m_F C p_F \frac{dT_F}{dt} &= q_{H2F} - q_{F2R} = q_{H2F} - U A_{F,R} (T_F - T_R)
 \end{aligned}
 \quad \frac{dm_R}{dt} = q_{in} - q_{out}, \quad q_{out} = k(P_R - P_O), \quad P_R^* = \frac{NRT_R}{V_R} = \frac{m_R RT_R}{M_R V_R}$$

$$\left\{ \begin{aligned}
 \dot{T}_F &= \frac{q_{H2F}}{m C p_F} - \frac{U A_{F,R}}{m C p_F} (T_F - T_R) \\
 \dot{T}_R &= \frac{q_{H2R}}{m_R C p_R} + \frac{U A_{F,R}}{m_R C p_R} (T_F - T_R) - \frac{U A_{R,O}}{m_R C p_R} (T_R - T_O) + \frac{q_{in}}{m_R} (T_O - T_R) =
 \end{aligned} \right.$$



Olekuvõrrandid ja -mudel

Olekumuutujad:
(valitakse mitmeti)

$$x_1(t) = y(t)$$

$$x_2(t) = \frac{dy(t)}{dt}$$

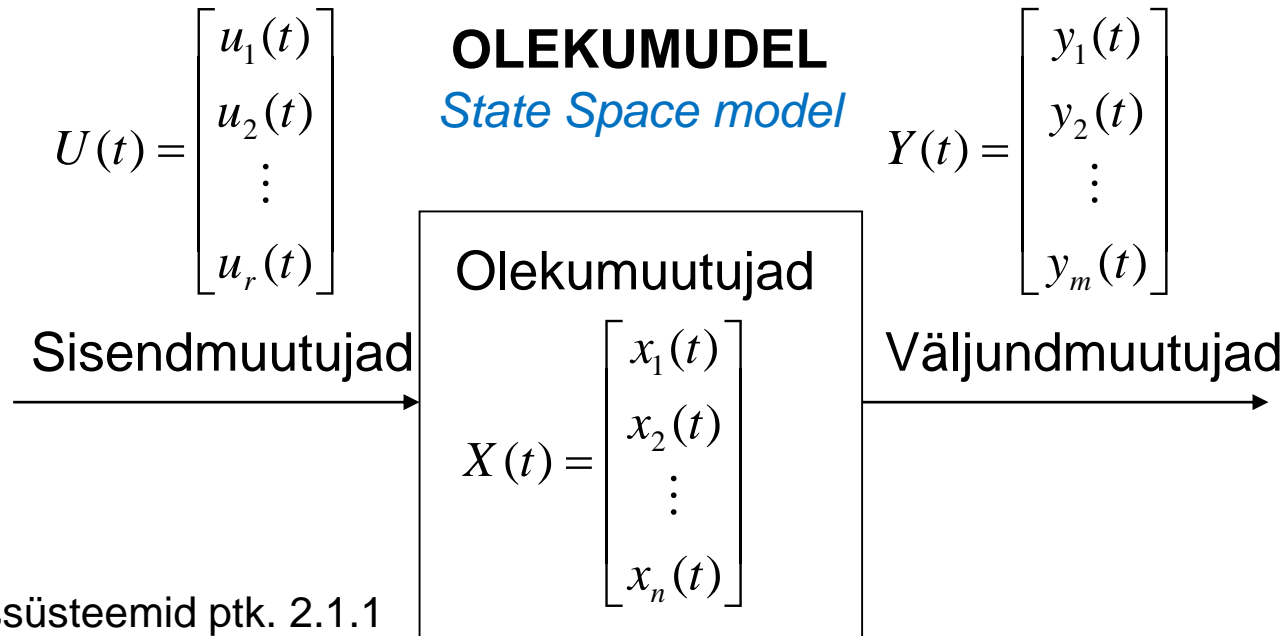
⋮

Olekumuutujad sisaldavad täielikku infot süsteemi seisundi ja eelneva käitumise kohta.

Olekuvõrrandid:
(esimest järku diferentsiaalvõrrandite süsteem) siin nt võnkelüli:

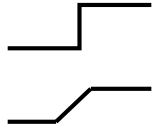
$$\frac{dx_1(t)}{dt} = x_2(t)$$

$$\frac{dx_2(t)}{dt} = -\frac{a_0}{a_2} x_1(t) - \frac{a_1}{a_2} x_2(t) - \dots + \frac{b_0}{a_2} u(t)$$

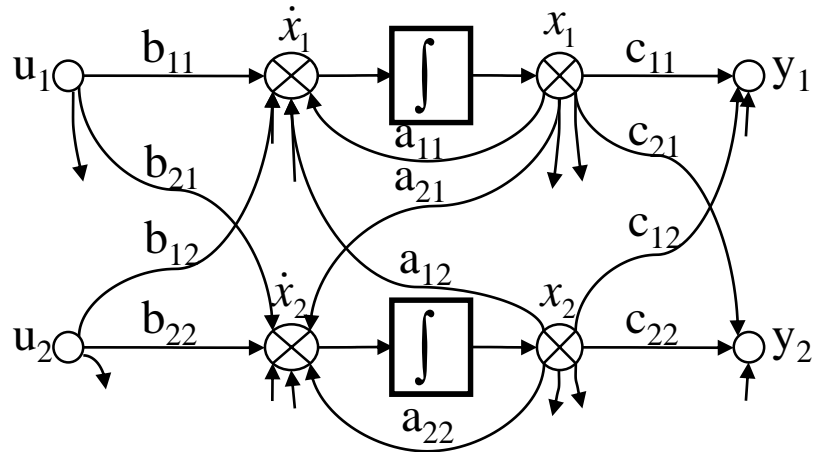


Olekumudel graafina

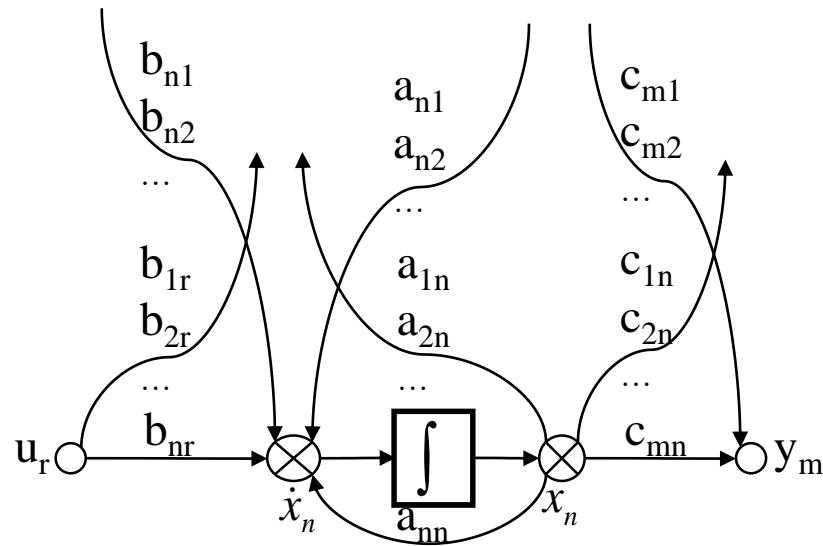
Põhjus/mõjutus
sisendis



sisemine muutus



Tagajärg
väljundis



OLEKUMUDEL

<https://youtu.be/W6AUOyj5bFA>

Lineaarse pideva statsionaarse (*LTI*) süsteemi olekumudel

$$\frac{dX(t)}{dt} = A \cdot X(t) + B \cdot U(t)$$

$$Y(t) = C \cdot X(t) + D \cdot U(t)$$

$A(n \times n)$ - olekumaatriks

$B(n \times r)$ - sisendmaatriks

$C(m \times n)$ - väljundmaatriks

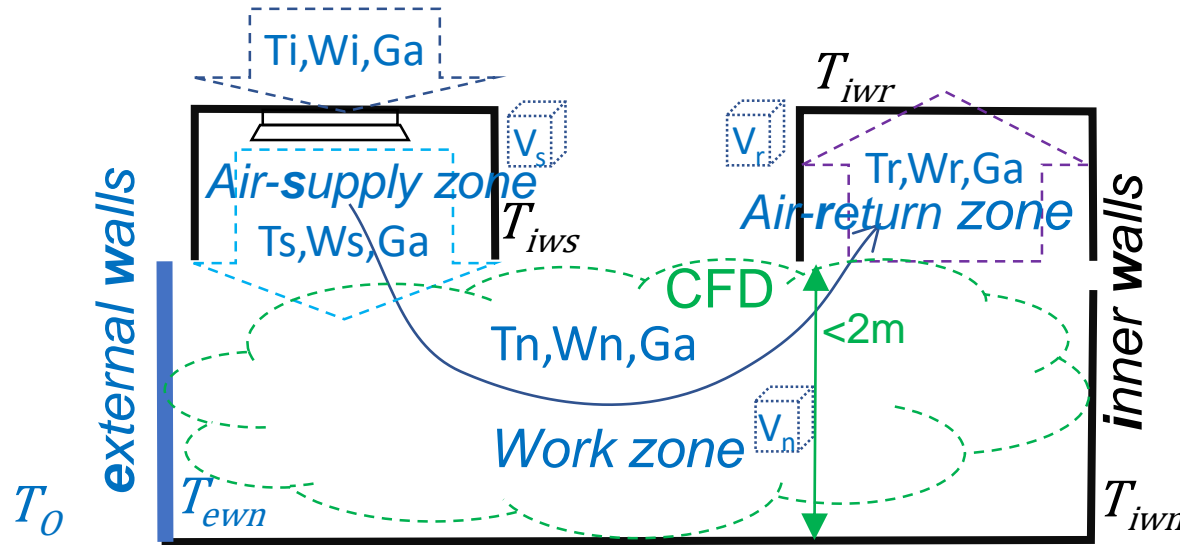
$D(m \times r)$ - otse(edasi)sidemaaatriks

Lineaarse diskreetaja süsteemi olekumudel

$$X(k+1) = A_d X(k) + B_d U(k)$$

$$Y(k) = C X(k) + D U(k)$$

Sisekliima dünaamika tsoonilise olekumudeliga



- W – niiskussisaldus [kg/kg]
- G – massivool [kg/s]
- ΔQ – soojusvool [J/s]
- h - entalpia [J/kg]
- α - konvekt. tegur [W/m²K]

Koondatud
parameetritega (*lumped*)
konstruktsioonid

$$\rho_a V_s \frac{dh_s}{dt} = G_a (h_i - h_s) + \alpha_{iws} A_{iws} (T_{iws} - T_s) + \Delta Q_s$$

$$\rho_a V_s \frac{dW_s}{dt} = G_a (W_i - W_s)$$

$$m_{iws} c_p \frac{dT_{iws}}{dt} = \alpha_{iws} A_{iws} (T_s - T_{iws})$$

$$\Delta Q_s = \alpha_{qs} A_{qs} (T_{qs} - T_s) + \alpha_{s-n} A_{s-n} (T_n - T_s)$$

$$\rho_a V_r \frac{dh_r}{dt} = G_a (h_n - h_r) + \alpha_{iwr} A_{iwr} (T_{iwr} - T_r) + \Delta Q_r$$

$$\rho_a V_r \frac{dW_r}{dt} = G_a (W_n - W_r)$$

$$m_{iwr} c_p \frac{dT_{iwr}}{dt} = \alpha_{iwr} A_{iwr} (T_r - T_{iwr})$$

$$\Delta Q_r = \alpha_{n-r} A_{n-r} (T_n - T_r)$$

vahekiht

vahekiht

$$\rho_a V_n \frac{dh_n}{dt} = G_a (h_s - h_n) + \alpha_{iwn} A_{iwn} (T_{iwn} - T_n) + \alpha_{ewn} A_{ewn} (T_{ewn} - T_n) + \Delta Q_n$$

$$\rho_a V_n \frac{dW_n}{dt} = G_a (W_s - W_n) + \Delta M_{Wn} \text{ Moisture gain rate [kg/s]}$$

$$m_{iwn} c_p \frac{dT_{iwn}}{dt} = \alpha_{iwn} A_{iwn} (T_n - T_{iwn})$$

$$m_{ewn} c_p \frac{dT_{ewn}}{dt} = \alpha_{ewn} A_{ewn} (T_n - T_{ewn}) + UA_{ewn} (T_{ow} - T_{ewn})$$

$$\Delta Q_n = \sum \alpha_{qn} A_{qn}^{(i)} (T_{qn}^{(i)} - T_n) + \alpha_{s-n} A_{s-n} (T_n - T_s) + \alpha_{n-r} A_{n-r} (T_r - T_n) + G_{ex} (h_{exnate} - h_n)$$

Sisekliima dünaamika tsoonilise olekumudeliga jätk

$$G_{ex}(h_{exhale} - h_n) \quad h_{exhale} - \text{väljahingatava õhu entalpia [J/kg]} \quad h_{exhale} = f(T_{exhale}, W_{exhale})$$

$$T_{exhale} = 32.6 + 0.066T_n + 32W_n$$

$$\text{väljahingatava õhu niiskussisaldus kui } W_n \text{ ühik on kg/kg}^* \quad W_{exhale} = 0.02933 + 0.2W_n$$

$$G_{ex} = K_{res}E_{body}A_{body} \quad - \text{ hingeõhu massivool [kg/s]}^* \quad K_{res} = 1.43 \cdot 10^{-6} \text{ kg/J}$$

E_{body} metaboolne energia voog [W/m²]

≈ 60 istumine, kirjutamine (1 met)*

≈ 70 seismine

≈ 120 kõnd, pakendamine (2 met)

$$A_{body} = 0.202m_{body}^{0.425}height_{body}^{0.725}$$

c 1.7...2 m²/inimene

$$\Delta M_{Wn} = G_{ex}(W_{exhale} - W_n) \quad W_n = \frac{0.622p_n}{(p_t - p_n)} \quad p_n - \text{aururõhk [kPa]}^*$$

kg_{H2O}/kg*

$$h_- = c_a T_- + \overbrace{(2.5 \cdot 10^6 + c_w T_-)}^{\text{latent heat}} W_- \approx c_a T_- + 2.5 \cdot 10^6 W_-$$

kuiva õhu
erisoojusmahtuvus
1005J/kgK

vee
aurustumissoojus
2454kJ/kg (20°C)

auru
soojusmahtuvus
1840J/kgK

Sisekliima dünaamika tsoonilise olekumudeliga jätk(2)

$$\Sigma \alpha_{qn} A_{qn}^{(i)} (T_{qn}^{(i)} - T_n) \quad \alpha_q - i\text{-nda sisemise soojaallika konvekt. tegur [W/m}^2\text{K]}$$

$$T_{ow} = T_o + \alpha_{abs} I_{sol} / \alpha_{ew}$$

α_{abs} – *absorption factor of solar radiation*
 I_{sol} – *solar radiant intensity* [W/m²]
 α_{ew} - [W/m²K]

Lisalugemist Internetist

Kuphaldt. Lessons In Industrial Instrumentation. (ANSI/ISA) 2019 Creative Commons
>3300 lk

Vabavaraline küberfüüsikaliste süsteemide modelleerimise keel

<https://www.modelica.org/libraries/ModelicaLibrariesOverview>

<https://modelica-buildingsystems.de/bim2modelica.html>

“Coupling indoor airflow, HVAC, control and building envelope heat transfer in the Modelica Buildings library” 2016

Methodology for Obtaining Linear State Space Building Energy Simulation Models.
Modelica Conference 2015

<http://scilab.ninja/> (automaatjuhtimise simulatsioonid vabavaralise Scilab-ga)

A. Rähni. Automaatjuhtimissüsteemid, õppematerjal. TTÜ 2009

http://www.ttu.ee/public/i/infotehnoloogia-teaduskond/Instituudid/automaatikainstituut/oppeained/AJS/AJS_1_0a.pdf

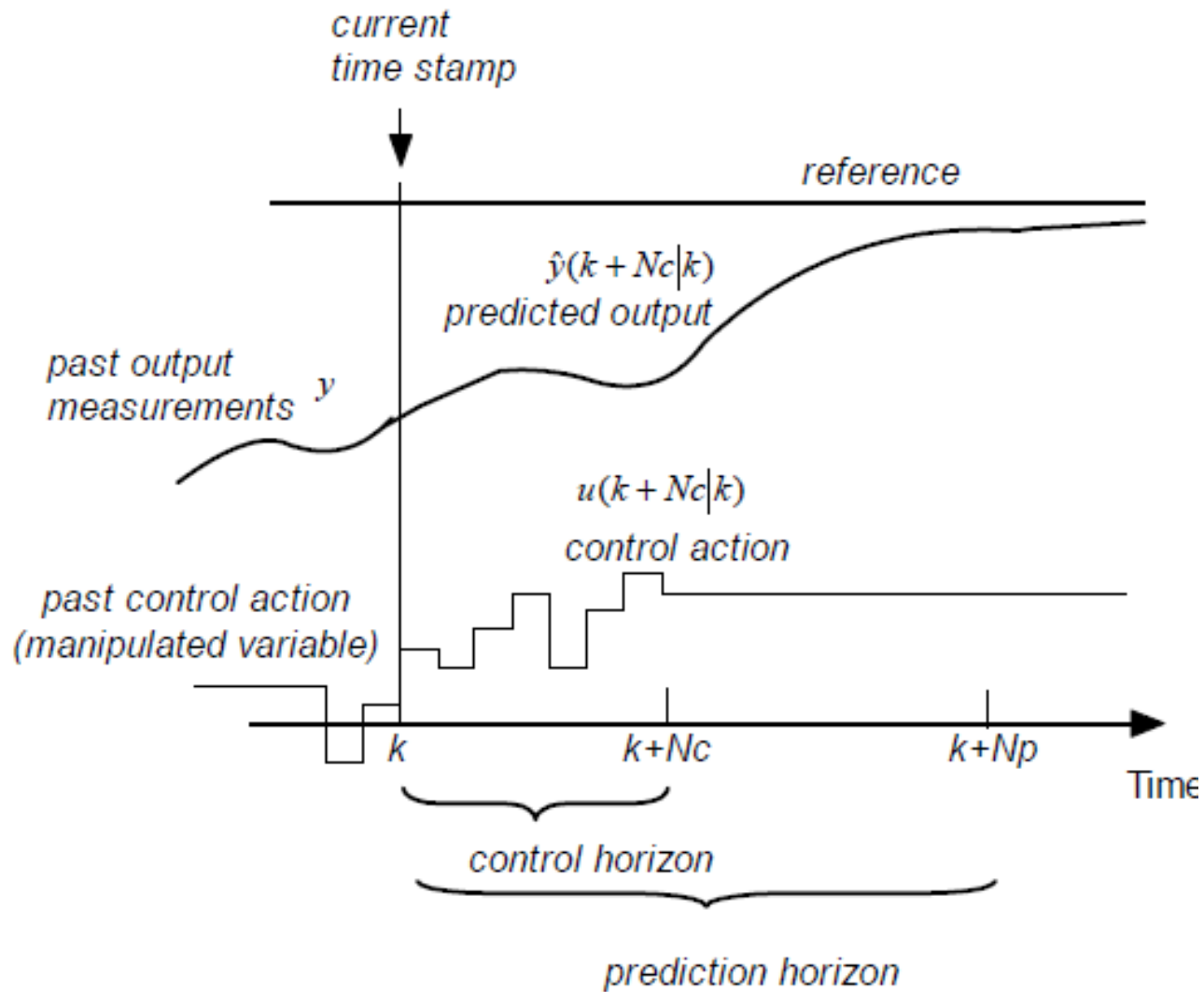
MPC

MPC muudab juhtimisülesande optimiseerimisülesandeks:

- Diskreetaja juhttoime $u(t)=u(k)$;
- Tulemuskriteeriumid (nagu opt. juhtimiskriteerium):
 - juhttoime määr;
 - kaugus seadesuurusest;
 - ülesande spetsiifiline kriteerium (nt. Energia tarbimine).
- Piirangud:
 - juhttoime ja juhitavate muutujate min/max väärtused;
 - olekud ja nende muutumiskiirused;
 - dünaamilised sisend-väljund seosed (süsteemi mudel)
$$x(k+1)=f(x(k),u(k),p,k) \quad y(k)=g(x(k),u(k),p,k)$$

Igal taktil lahendatakse optimiseerimine ja arvutatakse juhttoime.

MPC ennustuse horisont



Igal taktil k lahendatakse optimiseerimine ja arvutatakse juhtoime.