

Tõnu Lehtla, Argo Rosin

# ***AUTOMAATIKA***

Tallinn  
2001

This study material has been compiled in the framework of and by financial support of the Leonardo da Vinci pilot project "International Curricula of Mechatronics and Training Materials for Initial Vocational Training, EE/99/1/87301/PI.1.1.A./FPI"

## Sisukord

<b>1.</b>	<b>Sissejuhatus. Tootmise areng ja automatiseerimine</b>	<b>5</b>
1.1	Tootmise tehnoloogilise arengu põhietapid	5
1.2	Tootmise hierarhiline juhtimine	12
<b>2.</b>	<b>Automaatika põhimõisted</b>	<b>15</b>
2.1	Automaatika seos küberneetika ja informaatikaga	15
2.2	Klassikalised juhtimismeetodid	18
2.3	Moodsad juhtimismeetodid	21
2.4	Intellektuaalsed juhtimismeetodid	26
<b>3.</b>	<b>Andurid</b>	<b>32</b>
3.1	Põhimõisted	32
3.2	Andurite ja nende elementide liigitusi	33
3.3	Andurite signaalid	36
3.4	Tajurite tööpõhimõte	38
3.4.1	Takistus- ja potentsiomeetertajurid	38
3.4.2	Tensotajurid	38
3.4.3	Termotakistustajurid	39
3.4.4	Induktiivtajurid	40
3.4.5	Mahtuvustajurid	43
3.4.6	Trafotajurid	44
3.4.7	Elektromehaanilised generaartajurid	45
3.4.8	Termopaartajurid	45
3.4.9	Halli tajurid	47
3.4.10	Piesotajurid	47
3.4.11	Fototajurid	49
3.4.12	Tajurisignaali mõõtelülitused	49
3.4.13	Keelkontaktajurid	52
3.4.14	Bimetalltajurid	54
3.4.15	Optopaartajurid	55
3.4.16	Täpsuse suurendamine nooniuse ja rastritega	56
<b>4.</b>	<b>Andurite ehitus</b>	<b>58</b>
4.1	Asendi- ja siirdeandurid	58
4.2	Kiirusandurid	63
4.3	Kiirendusandurid	65
4.4	Vooluandurid	67
4.5	Jõuandurid	68
4.6	Momendiandurid	69
4.7	Rõhuandurid	74
4.8	Lähedusandurid	75
4.8.1	Lähedusandurite paigaldusolud	80
4.8.2	Lähedusandurite elektrilised parameetrid	82
4.9	Fotoelektrilised andurid	86
4.9.1	Fotoelektriliste andurite põhimõisteid	90
4.9.2	Fotoelektriliste andurite optilised omadused	92

<b>5.</b>	<b>Automaatjuhtimissüsteemi PID-reguleerimine</b>	98
5.1	Reguleerimispõhimõtted	98
5.2	Alluvkontuuridega süsteem	100
5.3	Reguleerimisprotsesside kvaliteedinäitajad	102
5.3.1	Süsteemi stabiilsus	103
5.3.2	Siirdeprotsessi kvaliteedinäitajad	104
5.4	Automaatjuhtimissüsteemides kasutatavad regulaatorid	108
5.5	Arvregulaatorite numbriline modelleerimine	111
5.6	Reguleerimistarkvara SIMATIC S7/M7/C7 kontrolleri te	115
5.7	Analoogsignaaliid ja pidevjuhtimine	119
5.8	Analoogsuuruste normeerimine	122
5.9	Signaali tundetustsooni ja piirangu määramine	124
5.10	Kahe- ja kolmeolekuline binaarjuhtimine	125
5.11	PID-juhtimine	127
5.12	PID-juhtimine tööstuskontrolleri SIMATIC S7-200 abil	134
5.13	PID-juhtimine tööstuskontrolleri SIMATIC S7-300/400 abil	141
<b>6.</b>	<b>Täiturid</b>	142
6.1	Elektromagnetilised releetäiturid	142
6.2	Elektrimootorid ja -ajamid	145
<b>7.</b>	<b>Andmesidevõrgud</b>	154
7.1	Andmesidevõrkude üldiseloomustus	154
7.2	Tööstuslike andmesidevõrkude liigid ja omadused	157

## Automaatika ajaloost

3. saj. e. m. a. kreeka mehaanik Ktesibios, kes tegutses Aleksandrias, kasutas vesikella konstruktsioonis nivooregulaatorit. See on esimene teadaolev tagasiside kasutamine juhtimissüsteemis [EE].
1. saj. Heron Aleksandriast (vt. koolimatemaatikast tuntud kolmnurga pindala arvutamise Heroni valemit) avaldas kaheköitelise raamatu "Pneumaatika", milles käsitletakse muuhulgas ka mitmesuguseid vedeliku nivoo reguleerimise mehhanisme ehk regulaatoreid.
- u. 1280 saksa filosoof ja alkeemik Albertus Magnus ehitas inimesesarnase roboti ehk nn. raudinimese, kellest tegi oma uksehoidja.
- 1642 Blaise Pascal ehitas esimese mehaanilise digitaalse liitmis- ja lahutamismasina.
- 1681 prantsuse füüsik D. Papin lisas enda poolt eelmisel aastal ehitatud katlale (Papini katel) kaitseklapi, mida võib käsitleda rõhuregulaatorina.
- 1764 vene leidur I. Polzunov võttis kasutusele aurukatla toiteveeregulaatori. EE andmetel toimus see 1765. a.
- 1788(1789) inglise leidur J. Watt, universaalse aurumasina leiutaja (1784), võttis kasutusele pöörlemiskiiruse tsentrifugaalregulaatori.
- 1805...1808 prantsuse mehaanik Joseph-Marie Jacquard konstrueeris uut liiki kudumismasina - ?akaarmasina, mis töötas perfokaardile kirjutatud programmi järgi ja mida võib lugeda üheks esimeseks tööstuslikuks programmjuhtimisega masinaks.
- 1830...1835 ameerikas arendati välja automaattreipink (revolverpink), mis pani aluse tööstuslikule masstootmisele.
- 1833 C. Babbage konstrueeris esimese universaalse automaatkalkulaatori, millel olid kõik põhilised nüüdisarvuti elemendid: mälu, juhtplokk, aritmeetika-loogikaplokk, sisendid ja väljundid.
- 1868 inglise füüsik J. C. Maxwell pani aluse automaatjuhtimise matemaatilisele käsitlemisele ja formuleeris süsteemi stabiilsuse ülesande. Ilmus tema töö "Regulaatoritest", kus ta näitas, et süsteem on stabiilne, kui seda kirjeldava diferentsiaalvõrrandi tunnusvõrrandi kõigi lahendite reaalosad on negatiivsed.
- 1883...1888 automaatvintpüssi, kuulipilduja, automaatsuurtüki leiutamine (H. S. Maksim).
- 1892 A. M. Ljapunov (1857-1918) kaitses oma doktoridissertatsiooni "Stabiilse liikumise üldine probleem", kus käsitleti lineaarsete ja mittelineaarsete süsteemide stabiilsuskriteeriume (*Ljapunovi stabiilsuskriteeriumid*).

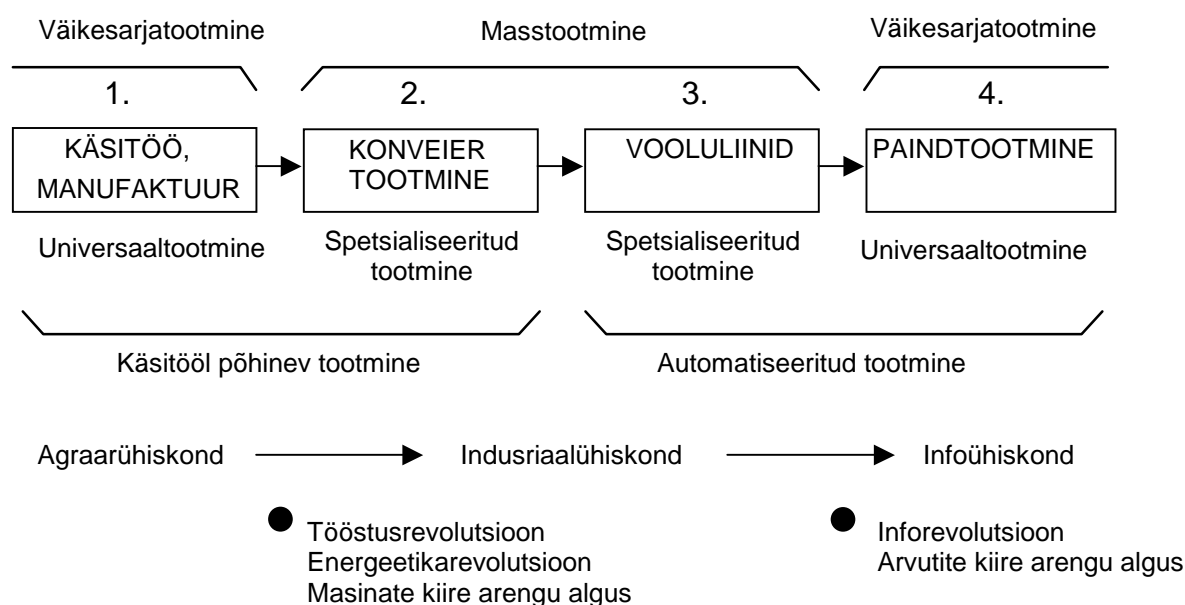
1912. E. Armstrong (1890-1964) leidis, et positiivne tagasiside suurendab võimendustegurit ja seda omadust saab kasutada generaatori parameetrite (omaduste) muutmisel.
- 1918 prantsuse teadlased H. Abraham ja E. Bloch konstrueerisid positiivsel tagasisidel põhineva elektronlampidel multivibraatori, mis avardas signaalide genereerimise võimalusi.
- 1926 ameerika teadlane H. A. Wheeler konstrueeris võimenduse automaatregulaatori.
- 1927 ameerika teadlane H. S. Black (töötas firmas Bell Laboratories) leidis, et negatiivne tagasiside suurendab võimendi stabiilsust ning vähedab häirete mõju.
- 1932 ameerika teadlane H. Nyquist esitas süsteemi sagedustunnusjoontel põhineva stabiilsuskriteeriumi (*Nyquisti stabiilsuskriteerium*), mis oli esimene sagedusmeetoditel põhinev stabiilsuskriteerium.
- 1936 inglise matemaatik A. M. Turing kirjeldas abstraktset arvutit ja oli üks arvutiteooria rajajaid.
- 1945 ungari päritolu ameerika teadlane J. von Neuman esitas nüüdisaegse elektronarvuti projekti.
- 1948 C. E. Shannon pani aluse uuele teadusharule Informatsiooniteooria ja võttis seal kasutusele entroopia mõiste.
- 1948 N. Wiener pani aluse uuele teadusharule "Küberneetika" mida ta iseloomustas kui: "Juhtimine ja side loomas ja masinas".
- 1961 USA-s firmas Unimation konstrueeriti esimesed tööstusrobotid
- 1964 azerbaiid?ani päritolu ameerika teadlane Lotfi A. Zadeh pani aluse hägusloogilisele (*Fuzzy Logic*) juhtimisteooriale.
- 1970 lennutati välja esimene kuukulgur Lunahod 1.
- 1971 valmistati esimesed mikroprotsessorid.
- 1975...1976 lennutati välja esimene planeetidevaheline automaatjaam Viking 1.
- 1980...1985 lasti käiku esimesed pindtootmissüsteemid ja automaattehased.
- 1987 hägusloogika kontrolleri rakendas esmakordselt Matsushita Electric Industrial Co vee temperatuuri juhtimiseks.
- 1990 toimus IFAC kongress Tallinnas.
- 1990... tehisintellekti (*Artificial Intelligence*), tehisnärvivõrgude (*Neural Network*) ja virtuaalse reaalsuse, s. h. virtuaalsete tehaste väljaarendamine.

# 1. Sissejuhatus.

## Tootmise areng ja automatiseerimine

### 1.1 Tootmise tehnoloogilise arengu põhietapid

**Tootmine** on sihipärane tegevus inimeste vajaduste rahuldamiseks, mille käigus luuakse tootmisvahendite abil ainelist (materiaalset) vara. Inimühiskonna ajaloo kestel on tootmise iseloom oluliselt muutunud. Tootmise tehnoloogilises arengus saab eristada pikemaid kindlate tunnustega etappe (joonis 1.1).



Joonis 1.1. Tootmise tehnoloogilise arengu etapid

Tootmise arengu alguseks võib sisuliselt nimetada aega, millal inimene leiutas esimese tööriista. Ühiskondliku arengu ja tootmise esimeseks ja pikimaks arenguetapiks loetakse **agraarühiskonna** ajajärku, mis algas u. 10000 aastat tagasi ja millal inimesed hakkasid tegelema paikse karjakasvatuse ja põllumajandusega. Agraarühiskonda iseloomustab põllumajanduslik tootmine ja käsitöö. Tootmine oli hajutatud ning hinnatud olid mitmekülgsete võimetega käsitöömeistrid, kes valmistasid unikaalseid esemeid. 18. sajandi keskpaigas muutus ühiskondade käitumine ja mõtlemislaad, mille tulemuseks oli tööstusrevolutsioon (aurumasina leiutamine 18. sajandi lõpus). Tekkis **industriaalühiskond**, mille põhilisteks tunnusteks olid tootmise spetsialiseerumine, kontsentreerumine, maksimeerimine, tsentraliseerimine, standardiseerimine ja sünkroniseerimine. Eelmainitud tunnused eeldasid suurtööstuse väljaarendamist ja inimeste plahvatuslikku siirdumist suurematesse keskustesse (linnadesse). Töökohtade ja töövõtete spetsialiseerumise tulemusel kujunes välja konveiertootmine, kus iga inimene tegi töötamisel vaid mõnda üksikut lihtoperatsiooni. Töö hakkas toimuma sünkroonselt konveieri rütmiga. Järgmise sammuna toimus toodangu ja töövahendite standardiseerimine. Paralleelselt tööstusrevolutsiooniga

toimunud energeetilisele revolutsioonile toimus masinate kiire areng. Masinate leiutamise ja ulatusliku mehhaniseerimise tulemusel hakkasid masinad inimest konveieri juurest välja vahetama. Masinate järjest laiema kasutuselevõtuga loodi eeldused automaatsete vooluliinide rakendamiseks. Kõik see soodustas tööstuse järjest suurenevat kontsentreerumist ja massilist tarbimist.

Tänapäeval kiire teadus- ja tehnikaarengu tulemusena on industriaalühiskond asendumas **infoühiskonnaga**. Infoühiskonnas mängivad tähtsat rolli infoedastus ja -töötlus ning nende toimingute kiirus. Infoühiskond tähistab uut arenguetappi, mille tõi kaasa elektroonika ja arvutustehnika, sh. programmjuhtimise kasutuselevõtt. Selle tulemusel toimus tootmise iseloomu oluline muutumine. Arvutitega juhitud robotid, arvjuhtimisega tööpingid on uue põlvkonna masinad. Tänu programmjuhtimisele on need masinad paindlikumad ja universaalsemad. Seega tõi programmjuhtimise kasutuselevõtt kaasa tähtsa muudatuse tootmises, s. o. jäiga automatiseeritud tootmise asendumise paindtootmisega. Tänu inimese loomulikule vajadusele mitmekesisuse ja vahelduse järele on paremini läbi löönud ettevõtted ja inimesed, kes on paindlikumad ja suudavad muutuvate oludega kiiremini kohaneda. Paindtootmise valdava kasutuselevõtuga toimub üleminek masstootmiselt sarja- ja väikesarjatootmisele, mis iseenesest, senikaua kui on vajadus masstootmise järele, ei tähenda automaatliinide kadumist.

**Tootmise automatiseerimine** (*industry automation*) on mehhanismide, seadmete, mehhaniseeritud protsesside jms. ühendamine terviklikuks süsteemiks, milles energia, materjalide ja informatsiooni hankimine, töötlemine ja edastamine toimub inimese vahetu osavõtuta. Tootmise automatiseerimine vähendab tunduvalt inimese omaduste (kvalifikatsiooni, reageerimiskiiruse, meeleolu jm.) mõju tööle ning vabastab ta pidevast ühetoonilisest protsessi juhtimisest (mõõtmisest, tüürimisest, reguleerimisest, arvutamisest, operatsioonide ümberjaotamisest jne.).

**Automatiseeritud juhtimissüsteem** on tootmis-, majandus- vms. tegevuse juhtimise süsteem, mille puhul kasutatakse juhtseadmetena regulaatoreid, programmeeritavaid kontrollereid, tööstusarvuteid, personalarvuteid ja teisi andmetöötlusvahendeid (joonis 1.2). Tehnoloogilise protsessi automatiseeritud juhtimissüsteemis analüüsitakse andurilt saabuvat informatsiooni juhtsüsteemis (arvutis, kontrolleris) ja moodustatakse seejärel juhtsignaalid (juhtkäsud) täituritele. Süsteemis toimuvaid protsesse jälgib operaator juhtimispuldil olevalt kuvarilt. Säilitamisele kuuluv informatsioon salvestatakse mälli ning vajadusel saab selle printeri abil väljastada paberil. Automatiseeritud juhtimissüsteemis osaleb inimene juhtimisprotsessis kaudselt protsessi jälgijana või vajaduse korral selle ümberhäälestajana või ümberprogrammeerijana.

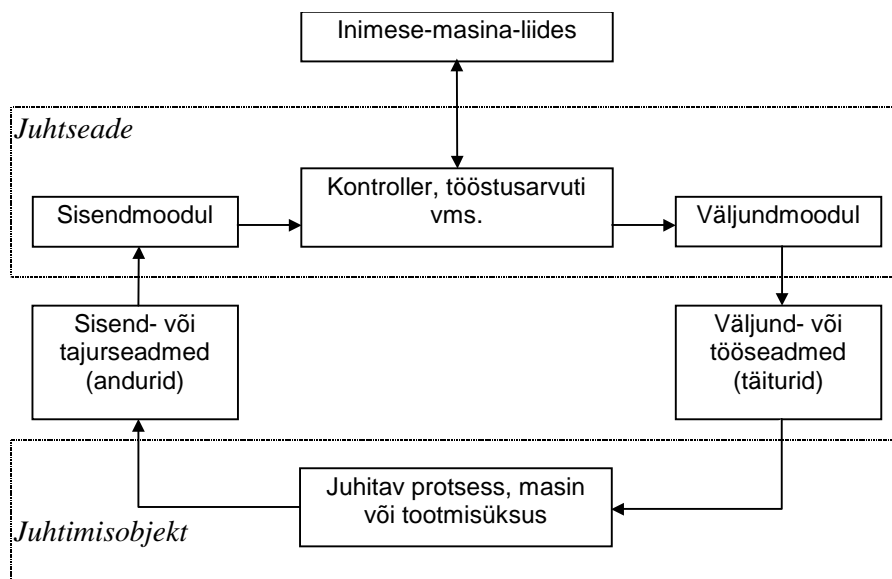
Automatiseeritud juhtimissüsteemi põhikomponendid on järgmised:

- juhitud protsess - tehnoloogiline tegevus nagu keevitamine, kuumutamine, tükitootmine jne.;
- sisendseadmed - lülitid, kontaktid, andurid, seadurid jne.;
- sisendmoodulid - signaalmuundurid, võimendid, eraldusplokid, filtrid, kaitseahelad jms;
- regulaatorid, kontrollid või juhtarvutid - pidevad või diskreetsed regulaatorid, mikroprotsessoritel kontrollid, laiatarbe või tööstusarvutid;
- juhtprogramm - protsessijuhtimise eeskiri;
- väljundmoodulid - signaalmuundurid, võimendid, kaitseahelad jms;



- inimese-masina-liides (IML) - juhtseadme ja protsessi jälgimiseks, juhtimiseks ja programmeerimiseks. IML koosneb üld- või eriotstarbelisest kuvarist ning juhitava protsessiga seotud tarkvarast.

Juhtimissüsteemis tehnoloogiaprotsessist anduritega tuvastatav info muundatakse juhtseadmele vastuvõetavale kujule. Juhtseade töötleb seda infot mällu salvestatud programmi järgi ning väljastab juhtsignaalid täiturseadmetele, mis juhivad konkreetset protsessi. Juhtimissüsteemi juurde kuulub alati **inimese-masina-liides** ehk **kasutajaliides** (*Human-Machine-Interface, Man-Machine-Interface*), mis võimaldab inimesel osaleda juhtimiseks vajaliku (või täpsustava) informatsiooni sisestajana (programmeerijana) ning talitlusjärelvalve operaatorina või juhtimisprotsessi jälgijana.



Joonis 1.2. Automatiseeritud juhtimissüsteemi struktuur ja süsteemi komponendid

Tootmisega seotud juhtimisobjektid võib liigitada laias laastus pidevprotsessideks, tootmismasinateks ja tükitootmissüsteemideks. Pidevprotsessidega on tegemist energeetikas (katlamajad) keemia- ja toiduainetööstuses, metallurgias jm. Tükitootmissüsteemidega on tegemist nt. masinaehituses. Tükitootmissüsteemide põhilisteks komponentideks on **automaatliinid ja paindtootmissüsteemid**.

**Automaatliinid** on automaatsetest töomasinatest, teisaldusseadmetest ning juhtimis-, reguleerimis- ja kontrollseadmetest (-aparatuurist) koosnev automaatpingisüsteem toodete valmistamiseks inimese vahetu osavõtuta. Teenindava personali põhiülesanne on liini seadistamine ja häälestamine, töö jälgimine ja tekkivate seisakute korral normaalse tööseisundi taastamine ning töömaterjali etteandmine ja valmistoote eemaldamine. Automaatliine kasutatakse väga mitmesugustes tööstusharudes. Tänapäeva automaatliine saab suhteliselt kergesti ümber kohandada ühetüübiliste toodete rühma piires ning nad õigustavad end sarja- ja suursarjatootmises.

Väikesarjatootmises kasutatakse paindlikke robotsüsteeme kuhu kuuluvad ka **automaatpingid** koos tooriku- ja detailvaheladustuse, detailikinnitusrakiste, detailiteisaldus- ja

laadimisseadmete, lõikeriistamagasinide, kontrollseadmete ning automaatjuhtimisseadmete kogum teatavate kindlate detailide automaattöötlemiseks.

Automaatliinidest, robotsüsteemidest, toorikute ja detailide, rakiste ja lõikeriistade keskladudest ning teisaldus- ja laadimisseadmetest koosnev kompleks, mille tööd organiseerivad ja juhivad keskarvutid, nimetatakse **automaattootmissüsteemiks**.

Automaattootmissüsteemid jagunevad

- *paindlikeks*, mis on ette nähtud väga mitmesuguste ühetüübiliste detailide väikesari- ja saritootmiseks. Nad koosnevad arvjuhtimispinkidest, vaheladudest, teisaldusseadmetest, tööstusroboteist ning tööriistade ja detailide magasinidest. Üldjuhtimist teostab keskarvuti, iga agregaati juhib kontrollier ehk mikroarvuti.
- *ümberseadistatavateks*, mis on ette nähtud teatavate kindlate ühetüübiliste detailide sari- ja suursaritootmiseks. Nad koosnevad automaat- ja arvjuhtimispinkidest, detailimagasinidest, jäikadest või paindlikest detailiteisaldus- ja -laadimisseadmetest ning lõikeriistavahetusseadmetest.
- *jäikadeks*, mis on ette nähtud ühe detaili masstootmiseks. Nad koosnevad automaatpinkidest, detailimagasinidest, jäikadest detailiteisaldus- ja -laadimisseadmetest ning kontrollautomaatidest.

Lähemalt tuleks vaadelda paindlikke automaatpingisüsteeme, mis on eelmainitud kolmest süsteemist oma ülesehituselt ja juhtimispõhimõttelt ilmselt kõige keerukam.

**Paindtootmissüsteem** (*flexible manufacturing system*) on paindtootmise põhimõttel organiseeritud tootmisüksus ning sisaldab mitmeid erinevate ülesannetega juhtsüsteeme. Üks või enam paindlikku automaatpingisüsteemi moodustavad paindtootmissüsteemi.

**Paindtootmine** on automatiseeritud tööstuslik väikesaritootmine, mille puhul saab tööoperatsioone ja tehnoloogiat kergesti muuta. Tööoperatsioonide paindlikkust võimaldab universaalsete töökohtade (*painttöötlemismoodulite*) ja seadmete (programmjuhtimisega tööpinkide ja tööstusrobotite) kasutamine. Tehnoloogilise paindlikkuse tagavad painttöötlemismoodulite rööptöö, asendatavus ja reverseeritavus, ümberprogrammeeritavus, laonduse ja tööriistanduse automatiseerimine, transpordiseadmete paindlik töökorraldus (materjalide liikumisteede optimaalne valik ja operatiivne ümbersuunamine) ning programmjuhtimine. Paindtootmissüsteem võib kujutada endast painttöötlemismoodulit, -jaoskonda, -tsehi või ettevõtet. **Paindtöötlemismoodul** on paindtootmissüsteemi väikseim iseseisev üksus, mis põhineb universaalseil programmjuhtimisega tehnoloogiaseadmel ning on ette nähtud suure nomenklatuuriga toodete valmistamiseks. Paindtootmismoodul koosneb tööpingist, detailide ja tööriistade etteandeseadmetest (salvedest, kassetidest või konteinereist), transpordi- ja teisaldusseadmetest (konveiereist ehk transportliinidest, roboteist), kontroll- ja juhtseadmetest (kontrollereist, arvuteist ja juhtpultidest).

Paindtootmissüsteeme juhitakse *hierarhiliste* ja *hajutatud* (*detsentraliseeritud*) juhtimissüsteemidega, mis koosnevad paljudest kohalikest alamsüsteemidest. Juhtseadmeina kasutatakse mitmesuguse võimsusega juhtarvuteid ja kontrollereid, millede eritarkvara võimaldab inimese dialoogi automaatidega.

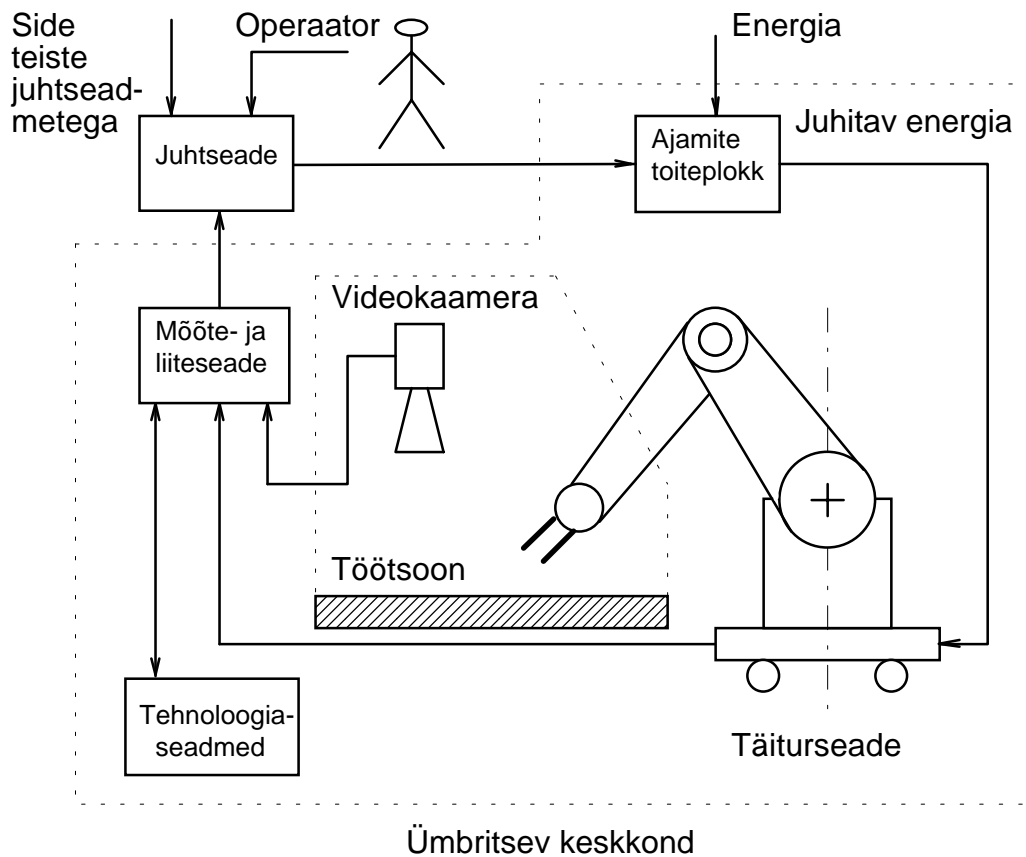
Ühel või mitmel robotil põhinevat painttöötlemismoodulit nimetatakse **robotsüsteemiks** (*robot system*) ehk **robotmooduliks**. **Robot** on ümberprogrammeeritav isetoimiv masin, mida

kasutatakse inimese liikumist, tajumist ja mõtlemist asendavais töödes (nt. esemete teisaldamisel, tööriista käsitsemisel ning keskkonna jälgimisel ja uurimisel). Eristatakse tööstus-, uurimis-, meditsiini-, põllumajandus- ja majapidamisroboteid. Roboti iseloomulikud tunnused on ühe- või mitmekäeline manipulaator ja programmjuhtimisseade.

Nüüdistootmises on tähtsal kohal **robotid** ja **robotsüsteemid**. Automaattööpinkide, -transportiseadmete ja -ladude kõrval on need automaattootmise põhilisteks komponentideks. Tootmise paindlikkuse seisukohalt eristatakse raskesti ümberkorraldatavat **jäika automaattootmist** ja **paindtootmist**, mida saab kiiresti kohandada muutuvate tootmis-tingimustega ning lihtsalt ümber seadistada uute toodete valmistamiseks. Esimene põhineb funktsionaalselt jäikadel (üheotstarbelistel) vooluliinidel, mis sobivad eelkõige hulgitootmiseks. Paindtootmise aluseks on universaalsed, mitmeotstarbelised seadmed ja masinad. Niisuguste masinate hulka kuuluvad ka robotid.

**Robot** on automaatne paikne või liikuv, mitme liikuvusastmega manipulaatorist ja ümberprogrammeeritavast juhtseadmest koosnev masin, mis on ette nähtud tootmisprotsessis vajalike liikumis- ja juhtimisfunktsioonide täitmiseks. Robotite juhtimine tähendab väga paljude tehniliste ja organisatsiooniliste ülesannete lahendamist, mille lõppeesmärgiks on roboti rakendamine seal, kus inimtöö on raskendatud või vähetõhus. Robotite ja robotsüsteemide juhtimise täiustamine on kujunenud automaatika üheks peamiseks arengusuunaks.

Roboti juhtimissüsteemi funktsionaalskeem on joonisel . Liikumisfunktsiooni täidab üks või mitu manipulaatorit ning liikuroboti korral ka veok. Üldjuhul võib neid kõiki nimetada roboti **täiturseadmeteks**. Täiturseadme mootoreid käitatakse energiaga, mida saadakse ajamite toiteploki- st. Roboti kui automaatjuhtimisobjekti väljunditeks on signaalid, mis saadakse manipulaatorile paigutatud anduritelt, ning signaalid, mis saadakse roboti töötsoonis olevatelt anduritelt ja robotiga koos töötavatelt seadmetelt. Mõlemat liiki signaale kasutatakse tagasisideks. Manipulaatorilt saabuvate signaalide korral on tegemist **sisemise**, töötsoonist saabuvate signaalide korral aga **välise tagasisidega**. Manipulaatori olekut iseloomustavateks põhisuurusteks on lülide **liikumisparameetrid**: asend, kiirus, kiirendus ja haaratsi sõrmede asend. Töötsooni olekut iseloomustab teisaldatavate või töödeldavate esemete asukoht ja suunistus ehk orienteeritus ning manipulaatori liikumisteel esinevad takistused. Tuleb arvestada, et töötsooni üksikasjalikult kirjeldada on väga keerukas ning infomahukas. Alati ei leidu töötsooni olekute määramiseks sobivaid andureid ning töötsooni mudel ei võimalda neid täpselt hinnata. Puuduliku informatsiooni tõttu tekib määramatus, mis raskendab roboti juhtimist. Lihtsamatel juhtudel võib roboti kui automaatjuhtimisobjekti määratlemisel töötsooni mitte arvestada ning piirduda üksnes manipulaatori olekute hindamisega. Piltlikult öeldes on sel juhul tegemist pimedaga ja kurdi robotiga, kes ei tea, mis tema ümber toimub.



Joonis. 1.3. Roboti juhtimissüsteemi üldine funktsionaalskeem

Töötsoonist saav informatsioon annab robotile **ümbrusetaju**. Kõige tõhusamaks vahendiks sellise informatsiooni hankimisel on **raalnägemine** (*machine vision*). Selleks kasutatakse videokaamerasid, mille signaalid edastatakse juhtseadmesse, kus toimub **kujudite tuvastamine**, s. t. vastuvõetud kujutiste dekodeerimine ja filtreerimine ehk olulise informatsiooni eraldamine mitteolulisest ning selle muutmine robotile arusaadavaks. Keerukuse ja kalli hinna tõttu pole masinnägemine veel laialt levinud, kuid selle täiustamine on robotitehnika üheks põhiülesandeks. Lihtsamatel juhtudel kasutatakse ümbrusetajuks mitmesuguseid puute- ja lähedusandureid ning lokatsiooniseadmeid.

**Mõõte- ja liiteseadmed** on anduritelt saavate signaalide muundamiseks ja edastamiseks, s. t. täidavad kontrollifunktsiooni. Nende kaudu jõuab manipulaatorilt, roboti töötsoonist ja tehnoloogiaseadmetelt (juhtimisobjekti väljunditelt) informatsioon juhtseadmesse.

**Juhtseadme** ülesandeks on täita kõiki roboti juhtimisfunktsioone. Ta peab sidet automaattootmises rakendatud teiste juhtseadmetega, võtab operaatorilt vastu käsked ning väljastab juhttoimeid. Ta tagab varem salvestatud või seadme koostatud (iseprogrammeeritud) programmi täitmise ning programmi operatiivse salvestamise. Programm salvestatakse **õpetamise** või **analüütilise programmeerimise** teel.

**Juhttoimed** on tavaliselt elektrilised pidev- või arvsignaalid, mis määravad ajamite toitemuundurite väljastatavad energianivood. Roboti juhtimissüsteemi **väljundid** on manipulaatori lülide asendi- ja kiirussignaalid, s. o. siseandurite signaalid, ning roboti

töökeskkonda ja tehnoloogiaseadmete tööd iseloomustavad välisandurite signaalid. Juhtimissüsteemi **häiringud** on ajamite toitepinge või rõhu muutumine, teisaldatavate esemete põhjustatud koormusjõud, robotsüsteemi transpordiseadmete töö ebatäpsus jms. **Seadesuurused** on operaatori või teiste juhtseadmete poolt robotile antavad käsud. Põhiline osa käskudest on salvestatud programmina juhtseadme mällu. Teise osa moodustavad käsud, millega operaator või juhtarvuti sekkuvad operatiivselt roboti töösse.

Üldjuhul töötab robot automaatselt, s. t. inimese sekkumiseta tööprotsessi. Operaatori ülesanne on roboti tööks ettevalmistamine, s.t. roboti töökoha tehnoloogilist organiseerimist ning tema töö programmeerimist. Roboti tööprogramm koostatakse vastavalt tootmisprotsessi **tehnoloogilisele algoritmile**, mis määrab üksikute tööoperatsioonide sisu ja järjekorra. Osaliselt võib robot programmeerida end ka automaatselt.

Tööprogramm kantakse analoog- või digitaalkujul andmekandjale, kust programmseade seda automaatselt loeb ning juhtsignaalideks muundab. **Roboti programmeerimine** tähendab tööprogrammi koostamist ja salvestamist juhtseadme andmekandjale (mällu). Roboti tööprotsessi programmi järgi juhtimist nimetatakse **roboti programmjuhtimiseks**.

Juhtimise ja roboti programmeerimise seisukohalt on oluline, mil määral tööprotsessid on formaliseeritavad. Determineeritud juhtimisobjekti korral saab kõiki töö käigus tekkivaid olukordi täpselt ette näha ja leida neile vastav juhtimise algoritm. Paljudel juhtudel peab aga robot uue olukorraga kohanema töö käigus. Seejuures võib määramatuse aste olla erinev. Ühel juhul piisab roboti tööprogrammi ümberhäälestamisest vastavalt muutunud oludele, teisel juhul valitakse uus, senikogematu tegutsemisviis.

Tuntakse robotite kolme põlvkonda, mida eristatakse sõltuvalt sellest, kui täpselt on roboti töö formaliseeritav ning millise määramatuse korral on robot suuteline oma ülesandeid täitma.

**Esimesse põlvkonda** kuuluvad suhteliselt lihtsad robotid, mis talitlevad edukalt vaid täpselt määratletud (determineeritud) tingimustes. Kuna mällu salvestatud programmi töötamise ajal ei muudeta, siis on tegu jäiga programmjuhtimisega robotitega. Neil puudub ümbrusetaju ja järelikult pole ka väliseid tagasisideahelaid. Manipulaatori liikumist ruumis juhitakse üksnes sisemistelt asendi- ja kiiruseanduritelt saadud signaalide järgi. Esimese põlvkonna robotid suudavad haarata esemeid, mille asend ja paigutus ruumis on roboti suhtes täpselt fikseeritud. Seetõttu kasutatakse robotsüsteemis tehnoloogilisi abivahendeid, näiteks orienteeritakse töödeldavad detailid eelnevalt ruumiliselt või paigutatakse need fikseeritud pesadega kassetidesse. Nii suureneb oluliselt robotsüsteemi hind ning väheneb töö paindlikkus. Kokkuvõtteks võib öelda, et esimese põlvkonna robotite juhtseadmete ülesandeks on realiseerida järgalt etteantud programm.

**Teise põlvkonda** kuuluvad ümbrusetajuga robotid, mis kohastuvad keskkonnas toimuvate muutustega. Ümbrusetajuks vajaliku välise informatsiooni allikateks on mitmesugused puute-, lähedus- ja lokatsiooniandurid ning masinnägemine. Teise põlvkonna robotite juhtimise algoritm sõltub konkreetsest olukorrast töösoonis. Eri olukorrad nõuavad robotilt erilaadset tegutsemist. Seepärast peab teise põlvkonna robotite juhtseade lisaks juhtalgoritmi realiseerimisele vajaduse korral ka algoritmi ümber häälestama. Roboti tööd juhib kõrgema tasandi programm, mis sõltuvalt olukorrast muudab roboti tööprogrammi. See tähendab, et keerukuse tõttu on otstarbekas jaotada juhtimisfunktsioonid eri tasandite vahel ning kasutada hierarhilist juhtimist.

Nüüdistootmises kasutatakse valdavalt esimese põlvkonna jäiga programmjuhtimisega roboteid. Alles viimastel aastatel on tööstus hakanud juurutama ja kasutama ümbrusetajuga adaptiivroboteid. Tehisintellektiga robotid on seni veel laboratoorsete uuringute tasemel. Käesolevas raamatus käsitletakse valdavalt jäiga programmjuhtimisega esimese põlvkonna roboteid.

## 1.2. Tootmise hierarhiline juhtimine

Tootmise juhtimine ja automatiseerimine ei toimu ainult ühel kindlal tasandil, vaid hierarhiliselt mitmel erineval tasandil. Selline *tootmise hierarhiline jaotamine ja juhtimine* kujutab endast piltlikult *püramiidi*, mis sisaldab eri suunitluse ja ülesannetega *juhtimistasandeid* (ehk *kihte*). Tootmise hierarhiline juhtimine jaguneb kolmeks põhiliseks juhtimistasandiks (joonis 1.7) nagu:

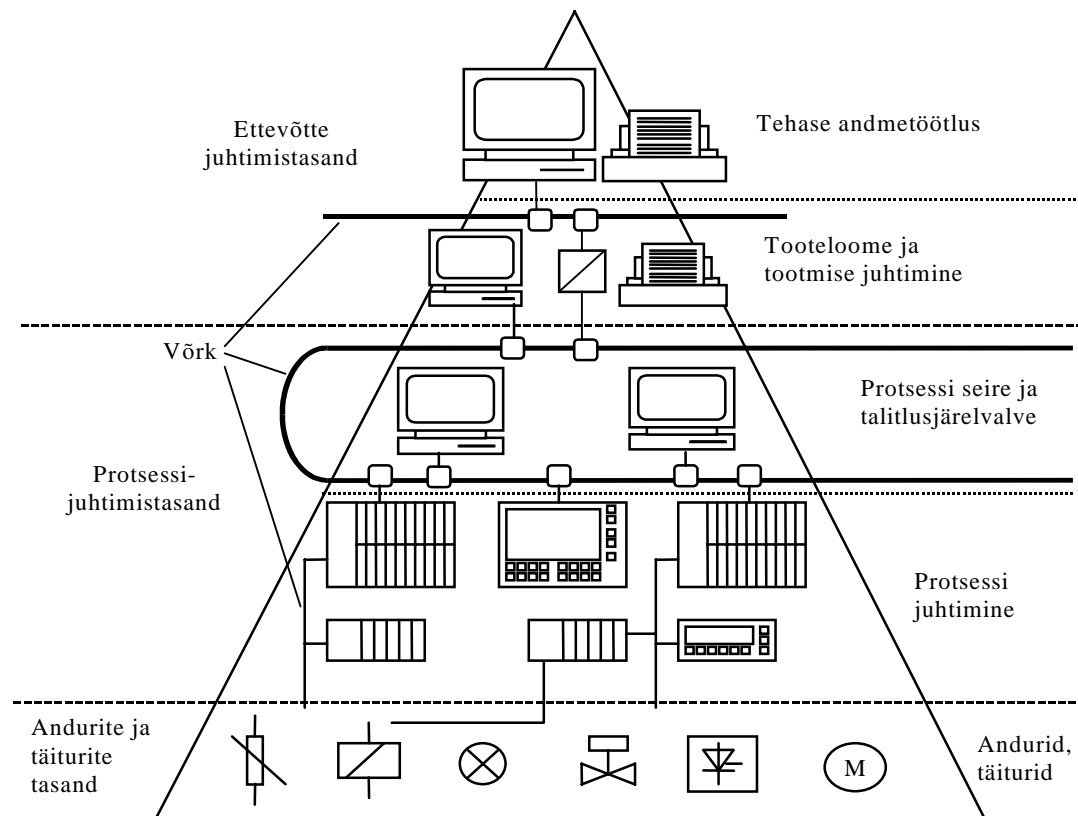
- ettevõtte ehk tootmise juhtimistasand,
- protsessijuhtimistasand ja
- andurite ja täiturite tasand.

Ettevõtte juhtimistasandi peamised ülesanded on tootmis- ja töökorraldus, laomajandus, raamatupidamine ja rahandus ning side alumise tasandiga. Protsessijuhtimistasandi peamine ülesanne on tootmisprotsessi automaatne või automatiseeritud juhtimine, kontroll ja diagnostika ning side kõrgema ja madalama juhtimistasandiga. Andurite ja täiturite tasandi ülesanne on tootmisprotsessist tuleva info esitamine protsessijuhtimistasandile sobival kujul ning sealt tulevate käskude täitmine.

Eelmainitud kolm põhitasandit võib jaotada omakorda väiksemateks alamtasanditeks (joonise 1.4 parempoolne külg), millest kõige ülemine võiks olla tehase andmetöötlustasand, kuhu koguneb kogu tehasest tulev informatsioon ning mille põhjal kontrollitakse ja analüüsitakse kogu tehase tööd majanduslikest, tehnilistest jm. aspektidest. Tootelooma ja tootmise juhtimistasandil toimub toodete väljatootamine, arendamine, ümberkujundamine jne. ning nende tootmise juurutamine ja tootmise juhtimine. Juhtseadmetena kasutatakse võimsaid juhtarvuteid ja servereid. Protsessiseire ja talitusjärelvalve tasandil toimub tootmise osaprotsessi(de) talitluse jälgimine ja kontroll eri seadmetega, nagu tekstipaneelide, operatsioonipaneelide ja arvutitega. Protsessijuhtimistasandil saavad juhtseadmed (kontrollerid, tööstusarvutid) protsessianduritelt infot ning jagavad täiturseadmetele ja ajamitele vastavaid käsklusi. Sellel tasandil antakse ette protsessijuhtimiseks vajalikud parameetrid. Seega on tootmise hierarhia talitluseks vaja andmesidesüsteeme, milleks kasutatakse eri protokolliga andmesidevõrke.

*Tootmise* totaalne ehk *täielik automatiseerimine* (*totally integrated automation*) kogu hierarhia ulatuses tähendab tootmises kõigi loetletud tasandite automatiseerimist ning sidumist omavahel ehk seadmete ühendamist ning ühildumist nii riist- kui tarkvaraliselt. Täielik automatiseeritud juhtimine hõlmab:

- arvutite või programmeeritavate kontrollritega juhitavaid protsesse või masinaid,
- protsesside ja masinate talitlusjärelvalvet, automaatkontrolli, ja rikete registreerimist,
- tsentraalselt ja detsentraalselt juhitavaid tootmismooduleid,
- katkelise ja pideva iseloomuga tootmisprotsesse,
- automatiseeritud laomajandust ja tsehhisisest transporti,
- automatiseeritud majandusarvestust ja raamatupidamist.



Joonis 1.4. Tootmise automatiseerimise püramiid

Täielikku automatiseerimist või nimetada ka avatud automatiseerimiseks, kuna seda saab alati laiendada ning eri suundades arendada. Täieliku automatiseeritud juhtimise eeliseks on:

- koolituskulude vähenemine,
- riistvara hinna vähenemine,
- projekteerimise produktiivsuse tõus,
- madalad hoolduskulud,
- eri seadmete riskivaba ühendamise,
- paindlikkus jne.

Täieliku automatiseerimise aluseks ja eelduseks on informatsiooni liikumise võimalikkus tootmishierarhia nii vertikaal- kui ka horisontaalsis. Informatsiooni liikumiseks piki tasandeid kasutatakse eri *andmesidevõrke*, risti tasandeid aga *võrguliitise* ehk ühendusseadmeid eri andmesidevõrkude vahel.

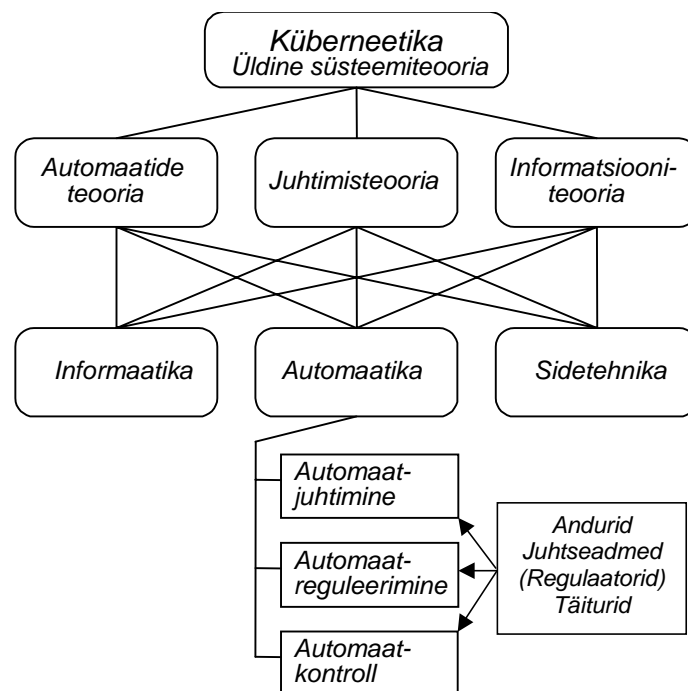
Täieliku automatiseerimise korral saab juhtida tootmist alates kõige alumisest kuni kõige ülemise hierarhia tasandini välja. Selline täielik automatiseerimise integratsioon tootmises on võimalik tänu veatule andmetötlusele, seadmete konfigureerimisele ja programmeerimisele, seadmete ühildumisele ja eri andmesidevõrkude veatule ühendamisele kogu tootmise ulatuses.



## 2. AUTOMAATIKA PÕHIMÕISTEID

### 2.1. Automaatika seos küberneetika ja informaatikaga

**Juhtimine** on infotöötlusprotsess, mis väljendub mingi tegevuse sihipärasel korraldamises. Juhitakse nii tehnilisi, bioloogilisi kui ka sotsiaalseid süsteeme. Tehnilistes süsteemides toimub juhtimine kas inimese osavõtul või automaatselt. Eristatakse **käsijuhtimist, automatiseeritud ja automaatjuhtimist**. Käsijuhtimise korral on kõik juhtimisfunktsioonid usaldatud inimesele. Automatiseeritud juhtimisel on need jaotatud inimese ja automaatide vahel. Seejuures täidavad automaadid funktsioone, mida inimene pole füüsiliselt võimeline täitma või mis primitiivsuse ja üksluisuse tõttu pole inimesele vastuvõetavad. Võrreldes automaatidega on inimese võimed piiratud, tema meeleorganite tundlikkus, täpsus ja vastuvõtu ulatus on väike ning lihaste toimekiirus ebapiisav. Inimese eelised automaatide ees avalduvad aga keerukate loogikaülesannete lahendamisel ning intuitsiooni näol. Juhul kui süsteem talitleb pikemat aega ilma inimese sekkumiseta selle juhtimisse, on tegemist automaatjuhtimisega.



Joonis 2.1. Automaatjuhtimise koht küberneetikas ja üldises süsteemiteoorias

Juhtimisteooria (joonis 2.1) kuulub laiemas ulatuses **küberneetika** ja **üldise süsteemiteooria** valdkonda. Koos automaatide teooriaga ja informatsiooniteooriaga on juhtimisteooria aluseks kolmele üksteisega tihedalt läbipõimunud tehnikaharule: informaatikale, automaatikale ja sidetehnikale. Automaatide teooria ehk täpsemalt **lõplike automaatide teooria** käsitleb üldistatud algoritmilist infotöötlust ning seda võimaldavat üldistatud abstraktset automaati - Turingi masinat. Reaalselt kuuluvad lõplike automaatide hulka kõik tänapäeva arvutid, s. t.

nii informatsiooni jadatöötusega J. von Neumanni tüüpi arvutid kui ka rööptöötusega arvutistruktuurid, nt. üha suuremat huvi pakkuvad **neuronivõrgud** ehk **tehisnärvivõrgud** (*NN, neural network*). Informatsiooniteooria käsitleb informatsiooni ning seda kandvate füüsiliste signaalide töötlust nt. **objektide tuvastamist**, olekute hindamist, signaalide moduleerimist, kodeerimist ja filtreerimist. Keerukate tehniliste süsteemide, nagu robotite või automaatvooluliinide, korral tuleb tegemist teha kõigi loetletud teadusharude probleemidega.

**Automaatjuhtimine** on automaatika haru, mis käsitleb masinate, seadmete, tootmisprotsesside jm. inimese vahetu osavõtuta juhtimise meetodeid ja tehnilisi vahendeid.

**Juhtimissüsteem** (*control system*) koosneb (vt. lk. 9) **juhtimisobjektist** (*control object*) ning selle juhtimiseks rakendatud **juhtseadmest** (*control device, control mechanism*). Juhtimisobjekt koosneb omakorda primaarsüsteemist (*primary system*) ja selle kontrolliks ettenähtud mõõteseadmest (*measurement device*). Primaarsüsteemiks on juhitud protsess või tehniline seade. Kuna enamikku reaalseid süsteeme iseloomustab neis kulgevate protsesside inertsus, siis on tegemist inertsiaalsete ehk dünaamiliste süsteemidega.

Juhtimissüsteemi uurimisel ehk **analüüsil** pööratakse põhitähelepanu juhtimisobjekti omaduste kindlakstegemisele, tema modelleerimisele ning mudeli parameetrite identifitseerimisele. Erilist huvi pakuvad süsteemi **jälgitavus, juhitudavus, stabiilsus** ning **protsesside ajaline kulgemine**. Kaudselt iseloomustavad neid süsteemi omadusi ka sagedustunnusjooned. Uue süsteemi loomise ehk **sünteesi** üheks tähtsamaks ülesandeks on juhtseadme määratlemine.

**Dünaamilist süsteemi** (*dynamical system*) iseloomustavad tema sisendid ehk sisendmuutujad, väljundid ehk väljundmuutujad ja olek ehk olekumuutujad.

**Süsteemi olek** (*state*) on määratud tema dünaamiliste olekumuutujate hetkväärtuste hulga. Kuna dünaamilised muutujad kajastavad süsteemi minevikku, siis võib süsteemi olekut võrrelda mälu.

**Süsteemi väljundid** (*outputs*) on tema oleku need funktsioonid, mida saab mõõta. Väljundiks võib olla mingi olekumuutuja või olekumuutujate kombinatsioon, kui neid muutujaid saab mõõta.

**Süsteemi sisenditeks** (*inputs*) on muutujad, mis võivad mõjutada süsteemi olekut ja/või väljundeid. Sisendid jagunevad omakorda juhtsisenditeks (*control inputs*) ja määramatuteks sisenditeks ehk häiringuteks (*uncertain inputs*). Seejures on juhtsisenditeks nii süsteemile väljaspoolt etteantavad seadesignaalid (*command inputs*) kui ka juhtseadme poolt väljastatavad juhttoimed (*automatic control inputs*).

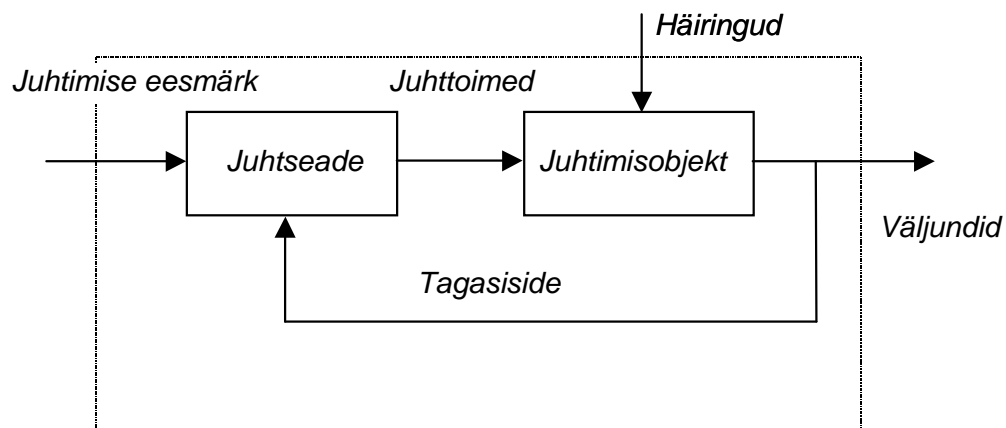
**Juhtsisendid** ehk seadesignaalid antakse ette kas operaatori või välise, tavaliselt kõrgema juhtimistasandi, juhtseadme poolt. Protsessi juhtimiseks mõeldud juhttoimed on määratud juhtimise algoritmiga (*control algorithm*) ning on tavaliselt arvutatud kas analoog- või digitaaljuhtseadme poolt. Juhttoimed mõjutavad juhtimisobjekti täiturite (*actuators*) abil, mida loetakse süsteemi osaks.

**Süsteemi häiringud** (*uncertain inputs*) jagunevad samuti kahte liiki. Üks osa häiringutest mõjutab otseselt juhtimisobjekti dünaamikat s. o. juhitudava protsessi kulgu või seadme tööd.

Teine osa häiringutsest on seotud mõõtmistega ning mõjutavad süsteemi väljundeid. Neid häiringuid nimetatakse vastavalt protsessimüraks (*process noise*) ja mõõtemüraks (*measurement noise*). **Protsessimüra** hulka kuuluvad näiteks juhuslik pinge kõikumine elektrivõrgus või süsteemis toimivad kontrollimatud jõud (nt. hõõrdumine, töömasina juhuslik koormusmomendi muutus jms.). **Mõõtemüra** hulka kuulub peale mõõtemuundurite vigade ka juhitava töömasina instrumendi viga (*instrument error*).

Dünaamiliste süsteemide tööpõhimõtte selgitamiseks kasutatakse plokk skeeme (joonis 2.1). Nooled joonisel näitavad infovoo kulgemise suunda. Süsteemi üldisel käsitlusel vaadeldakse plokkidevahelisi seoseid, kuid ei vaadelda üksikplokkide sisu. Süsteemi üksikasjalikumaks uurimiseks tuleb ka tema plokkide sisu kirjeldada detailselt. Tavaliselt kirjeldatakse dünaamilist süsteemi ja selle üksikuid plokkide diferentsiaalvõrranditega.

Mõiste **automaat** tuleneb kreeka sõnast *automatos*, mille eestikeelne tõlge on isetoimiv. Tehnikas tähendab automaat seadet, masinat või seadmete ja masinate kogumit, mis võib töötada iseseisvalt inimese vahetu osavõtuta tööprotsessist. Juhtimise seisukohalt on isetoimiv masin või masinate kogum **automaatjuhtimissüsteem**, mida võib tinglikult jagada **juhtimisobjektiks** ja **juhtseadmeks** (joonis 1.2).



Joonis 2.2. Juhtimissüsteemi üldine struktuur

Juhtimissüsteemis kulgevad mitmesugused infovood (signaalid), mille suunad on joonisel 1.2 näidatud nooltega. Juhtimisobjekti tööd iseloomustavad väljundid, mida on alati võimalik mõõta. Objekti käitumist mõjutavad häiringud ning juhtseadme poolt antavad juhttoimed. Juhttoimed moodustatakse sõltuvalt juhtimise eesmärgist ning objekti väljunditest. Kui objekti väljundeid kasutatakse selleks, et mõjutada objekti enda käitumist, siis toimib süsteemis tagasiside. Kõiki süsteeme liigitatakse sõltuvalt tagasiside olemasolust avatud ja suletud süsteemideks. Avatud süsteemide hulka loetakse suhteliselt lihtsad süsteemid, kus tagasisideahelad puuduvad, s. t. väljundid ei mõjuta juhtseadme tööd. Suletud süsteemides kontrollitakse tagasiside abil objekti väljundeid ning korrigeeritakse kontrolli tulemuste järgi süsteemi edasist tööd.

Sõltuvalt süsteemis edastatavate signaalide iseloomust jaotatakse automaatjuhtimissüsteemid **pidevateks ja diskreetseteks süsteemideks**, viimased aga omakorda **binaarsüsteemideks**,

**impulss-süsteemideks** ning **arvsüsteemideks**. Nende süsteemide uurimiseks kasutatakse erinevaid matemaatilisi vahendeid, nt pidevsüsteemide puhul harilikke diferentsiaalvõrrandeid ning Laplace teisendust, diskreetsete süsteemide korral aga diferentsvõrrandeid ja z-teisendust. Binaarsüsteemide uurimiseks kasutatakse loogikavõrrandeid. Vastavalt sellele on välja kujunenud eri süsteeme käsitlevad automaatjuhtimisteooria harud.

Sageli on aga automaatjuhtimissüsteemide liigitus küllaltki tinglik, sest olenevalt olukorrast vaadeldakse süsteemi kas pidevana või diskreetsena. Kui juhtseadme signaalide kvantimise sagedus on piisavalt suur, filtreeritakse süsteemi pidevatoimelise osa poolt impulsside kandesagedusega harmooniline komponent välja ning diskreetne süsteem töötab sarnaselt pidevatoimelise süsteemiga.

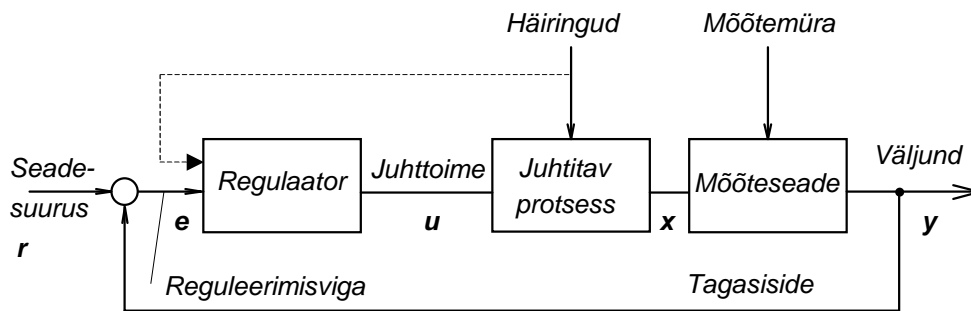
Nüüdisaegsetes automaatjuhtimissüsteemides kasutatavad **juhtimismeetodid** võib liigitada kolme suurde rühma:

- klassikalised meetodid,
- moodsad meetodid,
- intellektuaalsed meetodid.

## 2.2. Klassikalised juhtimismeetodid

Klassikalised juhtimismeetodid põhinevad **tagasisidel** (*feedback*) ning **vea järgi juhtimisel** (*error driven control*). Neid on eriti sobiv rakendada lihtsate ühe sisendi ja väljundiga süsteemide korral. Enamikul juhtudel on need süsteemid tööpunkti ümber lineariseeritavad, s. t. neid saab kirjeldada lineaarsete diferentsiaalvõrranditega. Nende korral on hõlpus rakendada Laplace'i teisendust, kasutada süsteemi analüüsiks ja sünteesiks sageduslikke meetodeid ja neist tuletatud sagedustunnusjooni. Klassikaliste süsteemide juhtimiseks kasutatakse enamikus proportsionaalse, integraalse ja diferentsiaalse (PID-) toimega regulaatoreid.

Juhtimisobjektile on alati teatud struktuur. Tehnilisi ja tehnoloogilisi juhtimisobjekte võib vaadelda koosnevana juhitavast protsessist ja mõõteseadmest (joonis 1.3). Protsessi juhtimise all mõistetakse ka mingi täiturseadme, näiteks roboti manipulaatori, laotõstuki või tööpingi supordi talitluse juhtimist. Mõõteseade annab juhtimisobjekti töö kohta infot. Protsessi kulgu ja mõõteseadme tööd mõjutavad häiringud, mida nimetatakse vastavalt **protsessi- ja mõõtehäiringuteks** või protsessi- ja mõõtemüraks.



Joonis 2.3. Väljunditagasisidega suletud süsteemi plokk skeem

Lihtsad süsteemid on enamasti ühemõõtmelised, s. t. ühe sisendi ja ühe väljundiga. Sel juhul on juhtimisobjekti oleku ja väljundi vaheline sõltuvus määratav suhteliselt lihtsa funktsiooniga ning niisuguseid süsteeme saab edukalt juhtida ka väljundite järgi. Juhtimise eesmärk on väljundi automaatne stabiliseerimine, muutmine etteantud seaduspärasuse järgi või muutmine tundmatu (määramatu, juhusliku) seaduspärasuse järgi. Vastavaid süsteeme nimetatakse **stabiliseerimis-, reguleerimis- või järgivüsteemideks**.

Juhttoime võib olla ainult seadesisendi funktsioon või sõltuda ka ajast ning süsteemi väljunditest. Esimesel kahel juhul, mil juhttoime ei sõltu otseselt süsteemi väljunditest, on tegemist avatud (*open-loop*) süsteemidega. Kolmandal juhul kui juhttoime sõltub otseselt süsteemi väljundist on tegemist suletud (*closed-loop*) juhtimissüsteemiga. Suletud süsteemi korral kasutatakse tagasisidet (feedback) selleks, et anda mõõtetulemite kohta info süsteemi väljundist tagasi sisendisse eesmärgiga kasutada seda süsteemi paremaks juhtimiseks.

Lihtsaid süsteeme juhitakse kahel põhimõttel. Esimesel juhul moodustatakse juhttoime sõltuvalt reguleerimisveast. Kuna juhttoime moodustamiseks kasutatakse tagasisidet, on tegemist juhtimisega **tagasiside põhimõttel**. Teisel juhul moodustatakse juhttoime **häiringute kompenseerimise põhimõttel**. Enamasti kasutatakse mõlemat moodust kombineeritult ja juhttoime on sel juhul nii reguleerimisvea kui ka häiringu funktsioon. Juhttoime moodustamise seadet nimetatakse **regulaatoriks**. Häiringute kompenseerimise põhimõtet võib tagasiside põhimõttest eristada vaid teatud lihtsustuse korral, sest üldjuhul on mõõdetavad häiringud vaadeldavad samuti juhtimisobjekti väljunditena, nende kasutamine juhtimiseks aga tagasisidena.

Pideva või diskreetse programmi järgi töötavat automaatregulaatorit nimetatakse **programmregulaatoriks**. Programmregulaator koosneb programm- ehk etteandeseadmest ja regulaatorist. **Programmseade** salvestab, säilitab ning taasesitab programmi. Eri seadmetes kasutatakse selleks mehaanilisi, magnetilisi, elektrilisi ja optilisi andmekandjaid. **Regulaator** võrdleb objekti programmikohast olekut tegelikuga ning moodustab juhttoimed. Kuna regulaator muudab süsteemi dünaamilisi omadusi ning ühtlasi ka süsteemis edastatavate signaalide sagedusspektrit, siis nimetatakse regulaatoriga sarnast seadet eri süsteemides ka **korrigeerimislüliliks** või **filtriks**. Kui objekti talitlust (olekut) juhitakse varem koostatud eeskirja (programmi) järgi, siis on tegu **programmjuhtimisega**.

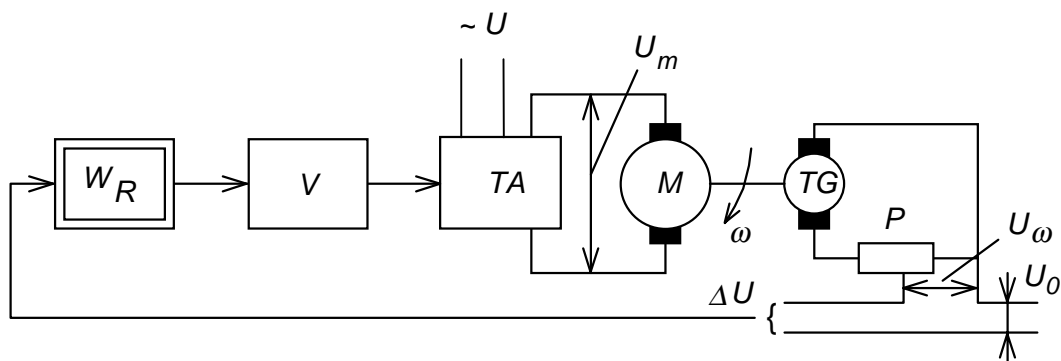
Tagasiside on automaatika põhimõisteid. Tagasisidestatud süsteemid toimivad tehnikas ja looduses peaaegu kõikjal. Raske on kujutada inimese tegevust ilma kuulmise, nägemise või

kompimise teel saadud tagasiside informatsioonita. Avatud juhtimissüsteeme kasutatakse suhteliselt harva ainult sel põhjusel, et nad on tundvalt odavamad kui suletud süsteemid. Avatud süsteemide korral kasutatakse juhtseadmes üksnes kella ning juhttoime moodustamine toimub vastavalt seadesisendile ning ajale. Avatud süsteemi kasutamisel peab selle projekteerija täpselt ette nägema süsteemi käitumise tulevikus. See eeldab, et süsteemi kohta on teada tema täpne mudel ning süsteemile toimivad ainult määratud sisendid. Tegelikult pole ükski süsteemi mudel absoluutselt täpne ning peaaegu alati toimivad süsteemile ka määramatud sisendid ehk häiringud. Muidugi on olemas ka süsteeme, mille juhtimine avatud süsteemis on isegi väga efektiivne, kuid suurem osa automaatjuhtimise probleeme on seotud suletud juhtimissüsteemide projekteerimisega.

Väljunditagasisidega suletud süsteemi plokkskeem on näidatud joonisel. Määramatud sisendid  $v$  ja  $w$  pole tavaliselt teada ning ei sõltu juhtseadmest. Juhttoime moodustatakse täielikult juhtseadme seadesisendi ning tagasisidesignaali järgi.

### Näide 1.1

Lihtsa juhtimissüsteemi näide on joonisel 1.4, kus juhtimisobjektiks on alalisvoolumootor  $M$  ja reguleeritavaks suuruseks tema pöörlemisagedus  $\omega$ . Mootorit toidetakse juhitava pingega toiteallikast  $TA$  (nt. juhitavast alaldist) ja mootori pöörlemisagedust  $\omega$  mõõdetakse tahhogeneatoriga  $TG$  (pöörlemisageduse andur). Pinge potentsiomeetri  $P$  klemmidel  $U_\omega$  on võrdeline pöörlemisagedusega  $\omega$  ja seda võrreldakse seadesuurusega  $U_0$ . Reguleerimisviga  $\Delta U = U_\omega - U_0$  antakse regulaatorisse  $W_R$ . Regulaator väljastab juhttoime, kusjuures regulaatoriks võib olla ka korrigeerimislüli või filter. Juhttoime võimendatakse võimendis  $V$  ja suunatakse juhtiva toiteallika  $TA$  juhtimissüsteemi, mis muudab pinget toiteallika klemmidel nii, et pöörlemiskiirus  $\omega$  oleks konstantne. Vaadeldava automaatjuhtimissüsteemi regulaatori  $W_R$  süntees on esitatud jaotises 6.8; näide 6.3.



Joonis 2.4. Reguleeritav elektriajam

## 2.3. Moodsad juhtimismeetodid

**Moodsad juhtimismeetodid** (*advanced control*) põhinevad süsteemi olekuruumil (*state space*) ja olekumuutujatel (*state variables*). Neid meetodeid rakendatakse, kui tegemist on keerukate mitme sisendi ja väljundiga mitmelisidusate mittelineaarsete süsteemidega. Olekumuutujate määramiseks kasutatakse juhtimisobjekti mudeleid, mis võimaldavad süsteemide optimaalset ning adaptiivjuhtimist. Olekumuutujatel põhinevate süsteemide analüüsiks ja sünteesiks kasutatakse peamiselt vektormuutujatel ja maatriksvõrranditel põhinevaid algebralisi meetodeid ning neist tuletatud ajafunktsioone, s.o. siirdeprotsesse. Põhiliselt käsitletakse normeeritud sisenditele, s. o. ühikhüppe- (*step*) ja lineaarfunktsioonile (*ramp*) vastavaid reaktsioone. Süsteemi reaktsiooni ühikhüppele nimetatakse **hüppekajaks**. Matemaatiliste arvutuste keerukusega on seletatav tõsiasi, et moodsate süsteemide uurimiseks rakendatakse põhiliselt digitaalarvuteid, mis töötavad nii-öelda ajaskaalal. Võrdluseks võib öelda, et klassikalisi süsteeme uuriti peamiselt sagedusmeetoditega. Olekumuutujatel põhinevat automaatjuhtimisteooriat nimetatakse ka moodsaks juhtimisteooriaks.

Moodsa juhtimisteooria seisukohalt võib eristada tagasisidet väljundi (*output feedback*) ja tagasisidet olekumuutujate (*state feedback*) järgi. **Väljundmuutujate tagasiside** korral sõltub juhttoime otseselt väljundist, **olekumuutujate tagasiside** puhul kui mõõdetakse või hinnatakse kõiki olekumuutujaid.

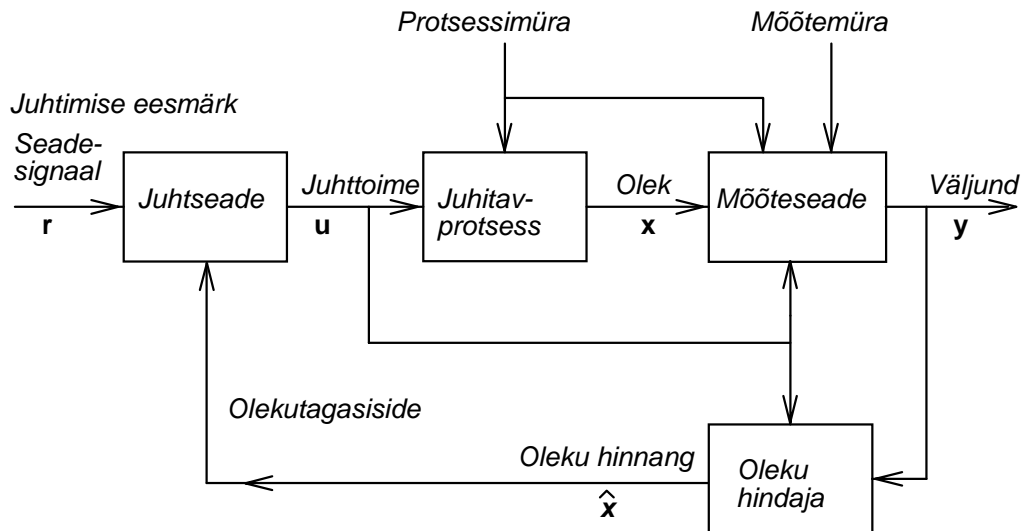
Iga juhitavat protsessi või seadet iseloomustab antud hetkel tema **olek** (joonis 1.5). Tehnilise juhtimisobjekti olekut kirjeldavad paljud ajas muutuvad suurused. Nende muutujate väärtuste lõplikku hulka ehk  $n$ -mõõtmelist reaalarvuliste komponentidega vektorit nimetatakse objekti **pidevaks olekuks**. Roboti manipulaatori olekut kirjeldavad nt. kõigi tema lülide kiirusvektorid ja asendid. Katla olekut kirjeldavad eri agregaatide temperatuurid ja rõhud ning põlemisprotsessi gaaside sisaldus (vt. ühtlasi näide 1.2).

Mõnikord võib juhtimisobjekti pidevliikumise kirjeldamisest ka loobuda, näiteks kui tuleb juhtida järjestikuseid diskreetseid tehnoloogiaoperatsioone **A, B, ... , H**. Operatsioonide soovitud järjekorra saavutamiseks peab teadma, millist operatsiooni täidab automaatseade (-süsteem) antud hetkel ning millist operatsiooni tuleb täita järgmisel hetkel. Sel juhul on otstarbekas kirjeldada automaatseadme tööd lõpliku arvu **diskreetsete olekute** abil, mille näiteks on järgmised olekud: 1) seade on välja lülitatud, 2) seade on rikkis, 3) seade täidab operatsiooni **A**, 4) seade täidab operatsiooni **B** jne. Kõik diskreetsete olekud erinevad üksteisest kvalitatiivselt.

Juhtimisobjekti olekuid kirjeldatakse  $n$ -mõõtmelises **olekuruumis**. Pidevale olekule vastab olekuruumis **kujutispunkt**. Kahemõõtmelise olekuruumi korral on tegemist olekutasandiga, mida saab hõlpsasti joonisel kujutada (joonis 1.6). Objekti olekut määravad vaid kaks muutujat  $x_1$  ja  $x_2$ . Sõltuvalt muutujate väärtusest võib objekti kujutispunkt sattuda tasapinna eri piirkondadesse, millele vastavad objekti erinevad diskreetsete olekud.

Olekutagasisidega suletud süsteemi plokk skeem on näidatud joonisel 6. Juhtseade töötab vastavalt seaduspärasusele  $\mathbf{u} = \mathbf{u}[\mathbf{r}(t), \mathbf{x}]$ . Juhul kui väljundite (mõõdetavate suuruste) arv on väiksem kui olekumuutujate arv, tuleb oleku hinnata kaudselt. Selleks kasutatakse oleku hindajat (*state estimator*). Kuna oleku hinnang on alati ligikaudne, siis kasutatakse selle

tähistamiseks vastavat tähist  $\hat{x}(t)$ , kusjuures  $x(t) \approx \hat{x}(t)$ . Üldjuhul vajab oleku hindaja infot nii väljundite  $y$ , sisendite,  $r$ ,  $v$ ,  $w$  kui ka juhttoime  $u$  kohta. Juhttoime  $u(t)$ , mõõdetud väljundite  $y(t)$  ja süsteemi dünaamikamudeli järgi annab oleku hindaja hinnangu  $\hat{x}(t)$ , mida kasutatakse tagasisidesignaali moodustamiseks. Kui süsteemi olekut saab mõõta täielikult ning täpselt, pole oleku hindajat vaja.



Joonis 2.5. Olekutagasisidega suletud süsteemi plokk skeem

Automaatjuhtimissüsteemide juhtimise peamiseks ülesandeks on tagada, et süsteemi tegelik olek langeks kokku soovitud olekuga  $x_s$  või oleks soovitud oleku lähedal. Kui soovitud olekuvektor on ajas muutumatu (ette on antud olekuruumi punkt), siis on tegemist stabiliseerimisprobleemiga ning juhtimisprobleem taandub regulaatori sünteesi ülesandeks. Kui soovitud olekuvektor  $x_s$  on ajas muutuv, nt. antakse ette ajas muutuva seadesignaali hulk, siis on tegemist kas programm- või järgivsüsteemi sünteesiga ning luua tuleb vastav servomehhanism.

Juhtimissüsteemi analüüsil tehakse kindlaks **süsteemi juhitavus** (*controllability*). Süsteemi juhitavus näitab, kas on olemas juhttoime  $u(\cdot)$ , mida rakendades saab viia süsteemi oleku algolekust  $x(0)$  soovitud lõppolekusse  $x_s(f)$ , nii et oleks täidetud teatud piirangud või kvaliteedinõuded. Automaatjuhtimissüsteemi sünteesil on esmaseks nõudeks, et süsteem oleks juhitav.

Automaatjuhtimissüsteemi sünteesil on tähtsaks näitajaks ka **süsteemi vaadeldavus** (*observability*), mis kajastab süsteemi oleku  $x(t)$  määramise võimalikkust tema väljundite järgi. Sageli iseloomustavad mõõtetulemid ainult mõnda olekumuutujat. Süsteemi loetakse vaadeldavaks, kui teatud ajaintervallis  $[0, t_f]$  tehtud mõõtmiste põhjal on võimalik järeldada tema algolek  $x(0)$ . Vaadeldava süsteem korral on võimalik konstrueerida süsteemi oleku hindaja, mis annab tegeliku oleku  $x(t)$  hinnanguvektori  $\hat{x}(t)$  sõltuvalt väljundi mõõtetulemitest  $y(t)$ .



Tehnilise objekti **juhtimisülesande** saab formuleerida, lähtudes oleku mõistest, järgmiselt. *Juhtimise ülesandeks on vastavalt juhtimise eesmärgile viia objekti kujutispunkt olekuruumi mingist algpunktist **A** punkti **B**, kusjuures liikumisel ühest punktist teise tuleb täita teatud kvaliteedinõudeid.* Näiteks tuleb liikuda lühimat teed pidi, minimaalse energiakuluga või võimalikult lühikese ajavahemiku jooksul. Oluliseks üldistuseks on siinkohal see, et mehaaniliste liikuvate objektide korral ei tähenda liikumine olekuruumis mitte ainult seadme lülide asendi geomeetrilist muutumist, vaid kõigi tema olekut kirjeldavate suuruste muutumist. Tervikuna iseloomustavad seadme tööd nii kujutispunkti pidev liikumine olekuruumis kui ka tema diskreetsete olekute vaheldumine.

Juhtimisülesanne lahendatakse kahes järgus. Kõigepealt kavandatakse sobiv liikumistee olekuruumi punktist **A** punkti **B**, seejärel püütakse kavandatu võimalikult täpselt realiseerida. Kujutispunkti kavandatud liikumisteed nimetatakse juhtimisteoorias **soovitud olekutrajektoori**ks. Juhtimisobjekti oleku tegelikku muutumist nimetatakse aga **tegelikuks olekutrajektoori**ks. Soovitud olekutrajektoori kavandamist võib tinglikult nimetada strateegiliseks juhtimisülesandeks, liikumise tegelikku realiseerimist aga taktikaliseks juhtimisülesandeks. Juhtimisel tuleb tagada tegeliku ja soovitud olekutrajektoori võimalikult väike lahknevus, piirjuhtumil isegi kokkulangevus. Seetõttu võib tihti väita, et süsteemi parameetrid muutuvad piiratud ulatuses, mis lubab aga rakendada mittelineaarsete süsteemide lineariseerimist.

Juhtimisülesande lahendamist käsitletakse automaatjuhtimise nüüdisteoorias objekti kujutispunkti juhtimisena olekuruumis. Levinud on ka varasem käsitlus, kus juhitavate suurustena vaadeldakse objekti väljundeid. Nende käsitluste erinevus seisneb selles, et objekti väljundid ei iseloomusta küllaldaselt objekti käitumist, eriti kui objekti järgmised olekud sõltuvad eelmistest olekutest. Ehk piltlikult öeldes - kui objekti tulevik sõltub tema minevikust. Niisuguse nähtusega on tegemist kõigi inertsiaalsete ehk **dünaamiliste süsteemide** korral. Seepärast võib inertsia vaadelda ka juhtimisobjekti sisemise mäluna, milles peegeldub objekti minevik. Oleku järgi juhtides saab ära kasutada suuremat hulka infot kui väljundite järgi juhtimisel. Ühtlasi kõrvaldab see väljundite näiliselt mitteühese sõltuvuse objekti sisenditest, nõnda et kaob vajadus säilitada juhtseadmes objekti käitumise eellugu ehk minevikku.

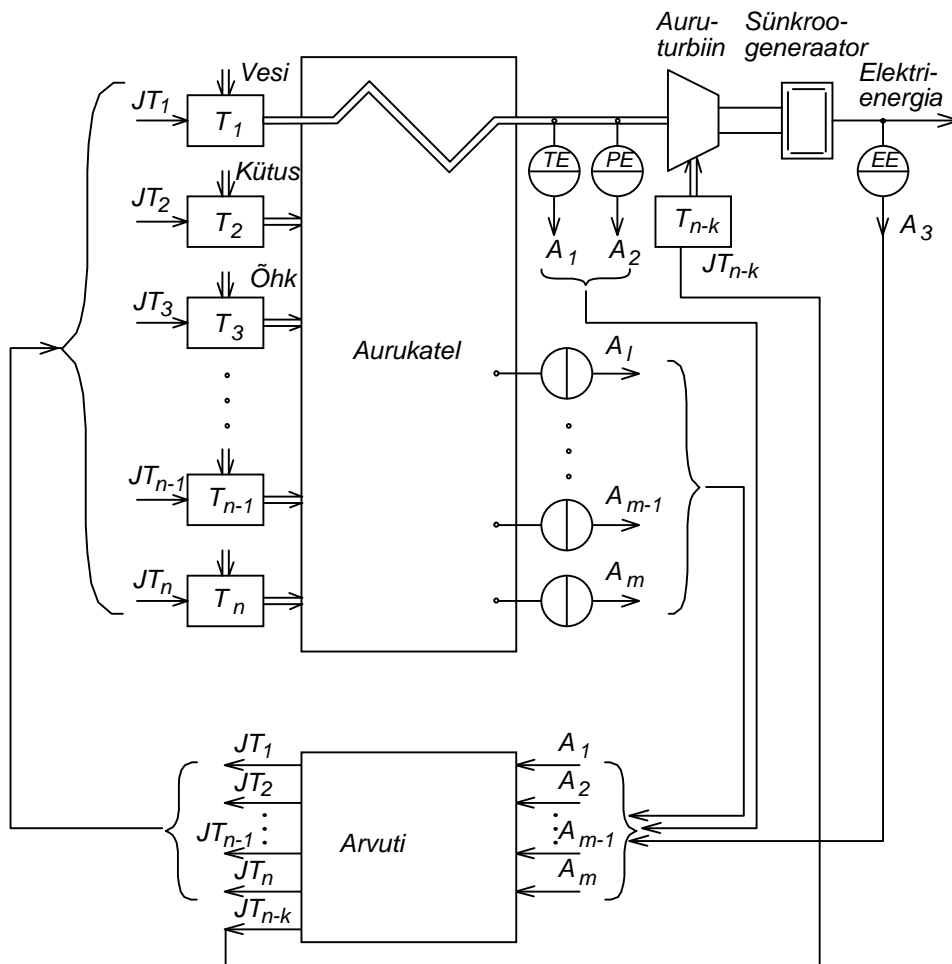
Kujutispunkti juhtimine olekuruumis on aktuaalne kõigi keerukate süsteemide korral, mis on mitmemõõtmelised, mitmelisidusad või stohhastilised. Juhtimissüsteemi struktuur, mis vastab kujutispunkti juhtimisele olekuruumis, on joonisel 1.5. Juhtseadme ülesandeks on hinnata objekti olekuid ning moodustada vajalikke juhttoimeid. Seejuures kasutatakse objekti olekute hindamiseks infot nii väljundite kui sisendite kohta.

**Mitmemõõtmelises** süsteemis on palju sisendeid ja väljundeid. **Mitmelisidusates** süsteemides mõjutab iga sisend mitut väljundit. Süsteemide **stohhastilisus** tähendab, et häiringute tõttu pole juhttoimed, olekud ja väljundid teistsugustes keskkonnatingimustes reprodutseeritavad.

## Näide 1.2

Mitmemõõtmelise süsteemi näiteks on joonisel 1.7 esitatud energiaploki automaatjuhtimissüsteem. Energiaploki põhilised tehnoloogiaseadmed on aurukatel, auruturbiin ja sünkroongeneraator. Juhtimissüsteemi olulisemad seadmed on arvuti, andurid (tähistus: TE-termoandur; PE-rõhuandur; EE-andurid elektrienergia parameetrite mõõtmiseks jne.) ja täituriid (tähistus:  $T_1, T_2$  jne.).

Energiaploki juhitavaid ja reguleeritavaid parameetreid kontrollitakse andurite abil. Mõõdetud signaalid ( $A_1, A_2 \dots A_m$ ) sisestatakse arvutisse. Arvuti mälu on salvestatud ka energiaploki juhtprogramm, mille järgi arvuti, anduritelt saadud informatsiooni arvestades, moodustab täiturile antavad juhttoimed ( $JT_1, JT_2 \dots JT_n$ ).



Joonis 2.6. Elektrienergia tootmiskompleksi (energiaploki) automaatjuhtimissüsteem.

Näiteks, andur  $A_1$  mõõdab turbiini töölabadele antava auru temperatuuri ja andur  $A_2$  vastavat auru rõhku. Nende signaalide põhjal saab juhtida katlasse antava kütuse (täituri  $T_2$  juhttoime  $JT_2$ ) ning samuti katlasse antava vee kogust (täituri  $T_1$  juhttoime  $JT_1$ ).

Auruturbiini võimsust tuleb juhtida sõltuvalt sünkroongeneraatori koormusest, s.o. vastavalt tarbitavale elektrienergiale. Väljastatava elektrienergia üheks põhinäitajaks on sagedus, mis määratakse turboagregaadi (auruturbiini ja sünkroongeneraatori) võlli pöörlemisagedusega. Viimane omakorda sõltub aga turbiini võimsusest, mida saab muuta reguleerides sisselastava auru hulka. Elektrienergia parameetreid mõõdetakse anduriga EE. Regulaatori osa etendavad siin arvuti ja täitur  $T_{n-k}$ . Kooskõlas arvuti poolt moodustatud juhttoimega  $J_{t_{n-k}}$  muudab täitur turbiini sisselastava auru hulka ning ühtlasi ka turbiini pöörlemisagedust. Seega toimib süsteemis sageduse reguleerimiseks anduri  $A_3$  signaalide järgi tagasiside.

Analoogiliselt võib kirjeldada vaadeldava energiaploki teiste parameetrite juhtimist (nt. katla koldesse antava õhuhulga muutmist sõltuvalt koldes toimuvast põlemisprotsessist). Energiaploki juhtimissüsteem on mitmemõõtmeline, sest süsteemi juhitavate parameetrite arv võib olla üle 90.

Automaatjuhtimissüsteemi loomist alustatakse juhtimisobjekti määratlemisest, mis tähendab tema eraldamist ümbritsevast keskkonnast. Juhtimisobjekti struktuuri ja parameetrite kindlakstegemist nimetatakse **objekti identifitseerimiseks**. Sageli tehakse seda vaid mõtteliselt, sest reaalne juhtimisobjekt puudub, näiteks on alles projekteerimisjärgus. Objekti määratlemisel tehakse kindlaks tema sisendid ja väljundid. Juhtimisobjektist täpsema ettekujutuse saamiseks koostatakse matemaatiline **mudel**. Üldjuhul mõistetakse objekti mudeli all objekti talitluse formaliseeritud kirjeldust või talitlust imiteerivat tehisobjekti. Mudeli loomist nimetatakse **modelleerimiseks**.

Mudeli järgi saab hinnata objekti tegelikku olekut ning prognoosida järgnevat olekut. Modelleerimise täpsus sõltub objekti keerukusest. Paljud juhtimisobjektid pole piisava täpsusega modelleeritavad. Alati ei saa täpselt hinnata ka kõiki objekti olekuid iseloomustavaid suurusid. Näiteks mõõdetakse üht osa neist anduritega, teisi määratakse objekti mudelist kaudsete arvutuste teel, kolmandatele antakse üksnes ligikaudne hinnang. On olemas objekte, mille tööd iseloomustatakse vaid ligikaudsete mudelitega, või ka objekte, millest puuduliku informatsiooni tõttu polegi võimalik luua mõistlikku mudelit. Sel juhul on tegu **määramatusega**, mis oluliselt raskendab juhtimist, kuigi see on teatud viisil matemaatiliselt kirjeldatav. Mida suurem on juhtimisobjekti struktuuri ja parameetrite määramatus ning keskkonnahäiringute kontrollimatu muutumise ulatus, seda raskem on objekti juhtida.

Täielikult **determineerituiks** ehk määratletuiks loetakse objekte, mida saab täpselt modelleerida ning millele ei mõju juhuslikud häiringud. Selliseid objekte saab põhimõtteliselt juhtida ka ilma tagasisideta, s. o. avatud süsteemis. Kahjuks leidub reaalse objektide hulgas determineeritud objekte väga harva (nt. mõningad arvjuhtimisega tööpingid). Enamasti on juhtimissüsteemid suletud. Määramatust kompenseeritakse andurite informatsiooniga. Juhtimise eesmärgi saavutamine sõltub selle informatsiooni tõepärasusest ning informatsiooni kasutamise oskusest või juhtseadme intellektuaalsest tasemest.

Juhtimisülesande püstitamisel on vaja määratleda neli komponenti: 1) juhtimisobjekt, 2) juhtimise eesmärk või eesmärgid, 3) lubatud juhttoimed ja 4) juhtimise kvaliteedi mõõt. Juhtimisteoorias kirjeldatakse neid komponente matemaatiliste mudelitega. Seepärast on igasugune juhtimisülesanne eelkõige matemaatiline ülesanne, mida lahendatakse matemaatiliste meetoditega.

Kõik reaalsed juhtimisobjektid, (nt. tööpingid, robotid, energiaplokid jms.) kuuluvad nn. **järeilmõjuga süsteemide** ehk dünaamiliste süsteemide hulka, mis tähendab, et sõltuvalt

"eelloost" reageerib objekt samadele sisendtoimetele erinevalt. Seda asjaolu ei tohi ära segada objekti enda stohhastilisusest tingitud määramatusega. Järeelmõjuga objekti käitumist mõjutab lisaks sisenditele veel tema olek. Näiteks roboti korral tähendab see, et manipulaatori liikumist mõjutavad igal hetkel peale ajamite juhttoimete ka kõigi mehaaniliselt seotud lülide kiiruste ja kiirenduste hetkväärtused.

## 2.4. Intellektuaalsed juhtimismeetodid

Intellektuaalsed juhtimismeetodid põhinevad süsteemi projekteerinud inimese intuiivsetel hinnangutel nt. hägusloogikal ja lingvistilistel muutujatel või eksperthinnangutel. Neid meetodeid rakendatakse iseseisvalt või täiendava meetmena juhul, kui on tegemist juhtimisobjekti või tema töökeskkonna olulise määramatusega. Süsteemi muutujatele antakse kvantitatiivsete väärtuste asemel kvalitatiivsed hinnangud (nt. suur, keskmine, väike vms.) ning tema sisendid ja väljundid seotakse KUI-SIIS-(*IF-THEN*-) lausetega. Süsteemi analüüsiks ja sünteesiks kasutatakse eksperthinnangutel põhinevaid meetodeid, juhtimiseks aga hägusloogika kontrollereid. Juhtseadme loomine taandub sel juhul peamiselt vastava otsustamisloogika sünteesile. Intellektuaalsete juhtimismeetodite kasutamist automaatikas nimetatakse **tehisintellektiks** (*AI, artificial intelligence*).

Intellektuaalsel juhtimisel on selge hierarhiline struktuur. Põhilised juhtimistasandid on kõige madalamast alates järgmised:

- 1) juhtimisalgoritmi realiseerimine,
- 2) juhtimisalgoritmi **isehäälestamine**,
- 3) olekutrajektoori planeerimine ja **iseprogrammeerimine**,
- 4) juhtimisobjekti ja töökeskkonna **isemodelleerimine**,
- 5) ümbruse tuvastamine (ümbrusetaju) ja mõistete **iseõppimine** ning
- 6) tehisintellektiga objekti käitumise sihipärane **iseorganiseerimine**.

Iga järgmise juhtimistasandi algoritm juhib eelmise tasandi tööd, laiendades juhtseadme funktsionaalseid võimalusi ning parandades juhtimise kvaliteeti. Seega täidab intellektuaalne juhtseade ka neid ülesandeid, mis lihtsate süsteemide korral on inimese täita.

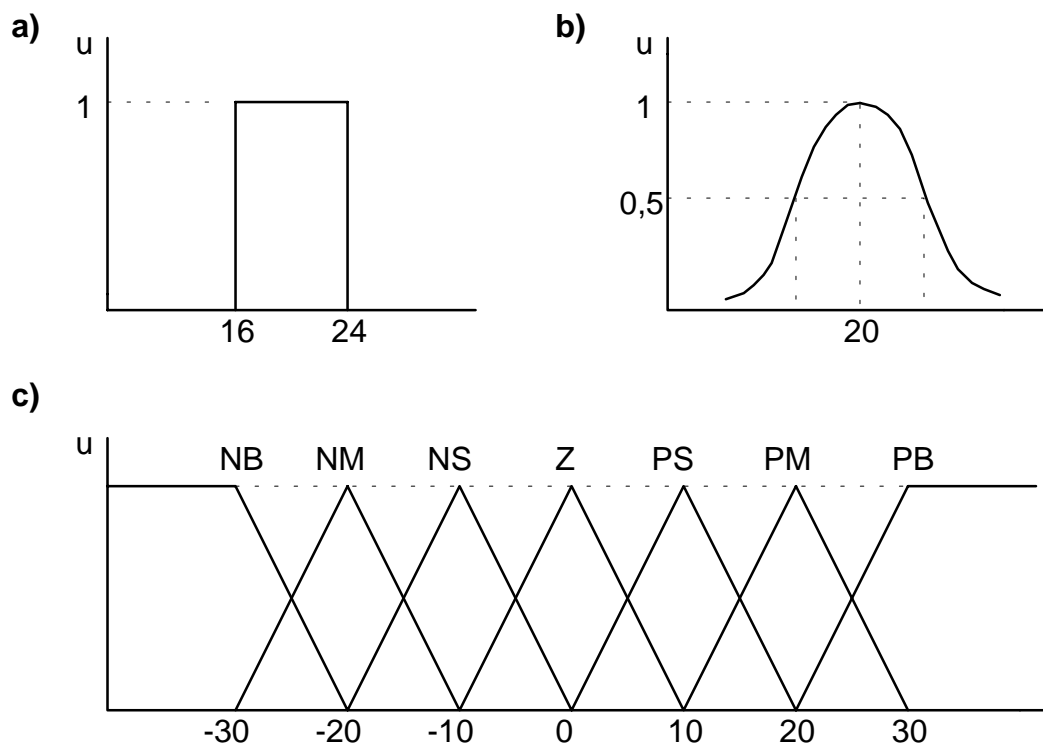
**Hägusloogilisele** juhtimisteooriale pani aluse Iraagi päritolu USA California Ülikooli professor Lofti A. Zadeh 1960. aastatel. Vajaduse seda liiki juhtimise järele põhjustas asjaolu, et vaid väga vähesed reaalsed protsesside olekumuutujad on kirjeldatavad binaarloogika kategooriates, s.o. kahe väärtusega - 0-väär ja 1-tõene. Inimese mõtlemises etendavad suurt osa paljud täpselt määratlemata hinnangud, nagu pikk, kõrge, madal, külm, leige, soe, palav, kuum jne. Binaarloogikas tuleks täpselt määratleda need temperatuurid, mil tuba lugeda külmaks, normaalseks või palavaks. Olgu normaalne temperatuur vahemikus 16 ... 24 °C. Hägusloogiline hinnang määrab normaalse temperatuuri mingi tõenäosusliku funktsiooni oma matemaatilise ootusega 20 °C ning teatud hajuvusega ehk dispersiooniga (joon.1.5).

Matemaatilisele ootusele vastab nn. **hägune ühikpunkt** (*fuzzi singleton*). Vastavat tõenäosuslikku funktsiooni nimetatakse **kuuluvusfunktsiooniks**. Kuuluvusfunktsiooni (*membership function*) punkte väärtusega 0,5 nimetatakse **ristumispunktideks** (*crossover point*), kuna seal on kahe kõrvuti asuva funktsiooni tõenäosusväärtused võrdsed, ning sisendsuuruse muutumisel toimub tõenäosuslik üleminek ühelt funktsioonilt teisele. Muutuja väärtuste hulka, mille korral kuuluvusfunktsioon on määratud, nimetatakse selle funktsiooni **toeks** e. kandjaks (*support*).

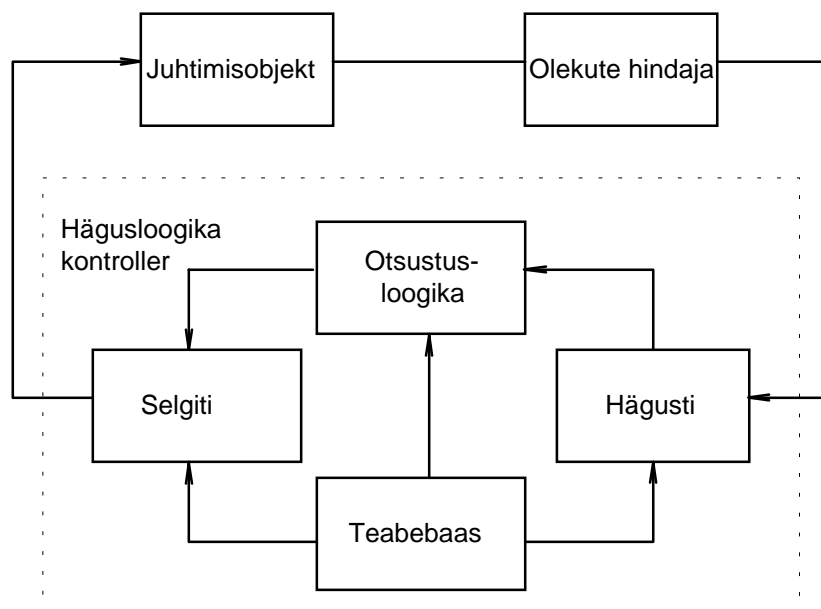
Normaaljaotusele ehk Gaussi jaotusele vastava tõenäosusfunktsiooni võib hägusloogilise juhtimise korral sageli asendada mõne lihtsamaga, näiteks kolmnurkse või trapetsfunktsiooniga. Hägusloogilise juhtimise kvaliteet sõltub suurel määral sisendmuutuja **skaala märgistamisest** e. gradueerimisest (*scale mapping*), s.t. sellest, milliste hägusloogiliste väärtuste ning tõenäosusfunktsioonidega iseloomustatakse teatud reaalseid kvantitatiivseid väärtusi omavaid suurusi. Seejuures gradueeritakse kogu skaala ühtlaselt ehk lineaarselt või vastavalt süsteemi looja hinnangule mittelineaarselt. Hägusloogiline juhtimine toimub **hägusloogika kontrolleri**ga (joon.1.6).

Kontroller täidab süsteemis põhiliselt kolme ülesannet: 1) sisendsuuruste gradueerimine (kvantimine ja normaliseerimine) ning **hägustamine** (*fuzzification*); 2) loogiliste otsuste tegemine ehk **otsustamisloogika** (*desisionmaking logic*); 3) väljundsignaali märgistamine ja selge ehk **kvantitatiivse juhttoime moodustamine** (*defuzzification*). Nende kolme ülesande lahendamise põhineb a) süsteemi looja ehk eksperdi kogemustel ja teadmistel; b) tema intuiitvusel tegevusel; c) juhtimisobjekti hägusal mudelil ning d) süsteemi iseõppimisel, s.o. meta- ehk ülireeglitel, mille põhjal süsteem oma otsuseid korrigeerib.

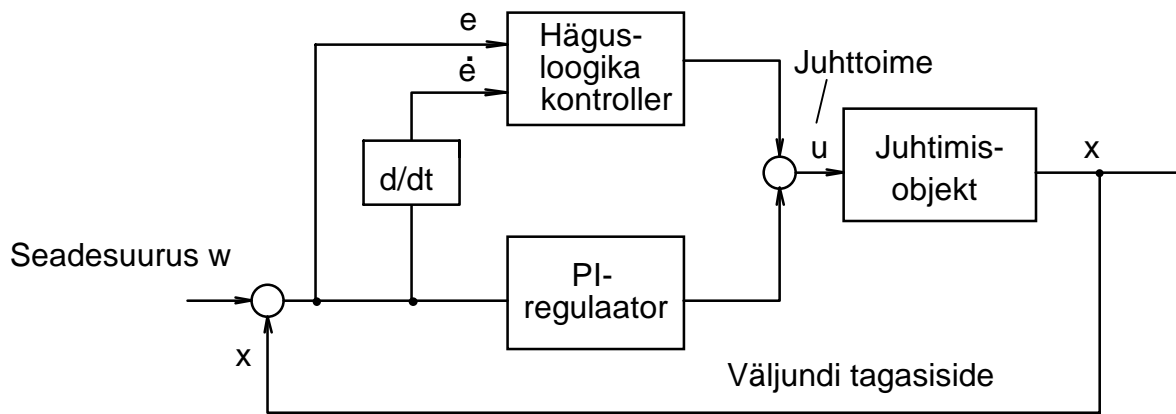
Kõik need teadmised on andmete ja reeglite näol koondatud kontrolleri teabebaasi (*knowledge base*), mis jaguneb omakorda andmebaasiks (*data base*) ja reeglite baasiks (*rule base*). Hägusloogika kontroller võib olla süsteemis ainus juhtseade (joon.1.6) või töötada ka paralleelselt hariliku PI-regulaatoriga (joon.1.7), aidates parandada süsteemi töö kvaliteeti.



Joonis. 2.7. Sisendmuutuja skaala märgistamine: binaarloogika (a) ja hägusloogika (b) kuuluvusfunktsioon ning lineaarne märgistamine (c)



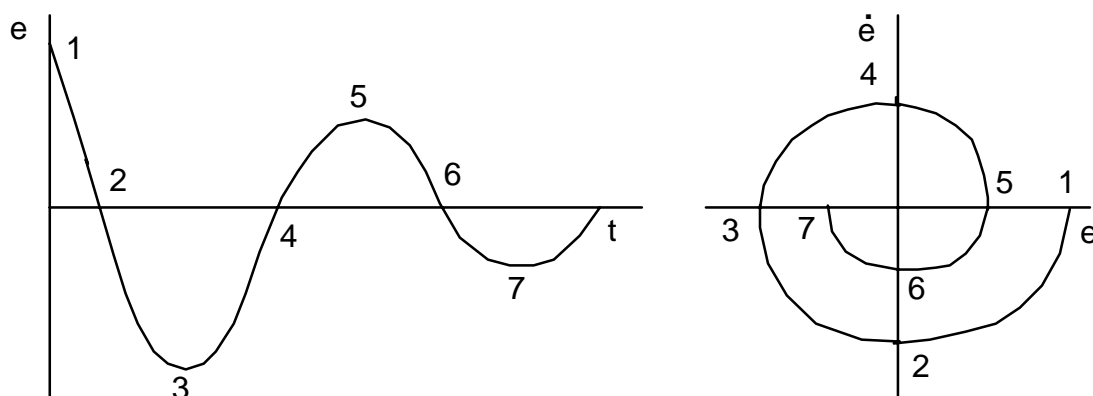
Joonis 2.8. Hägusloogilise juhtimisega süsteemi kontrolleri



Joonis 2.9. Hägasloogika kontrolleri töö koos tavalise PI-regulaatoriga

PI-regulaator reageerib süsteemi veale  $e = w - x$ , hägasloogika kontrolleri juhttoime moodustatakse aga sõltuvalt veast  $e$  ja vea tuletisest  $e'$ , mida illustreerib joonis 1.8. Sellel on näidatud vea siirdeprotsessi  $e = f(t)$  vastavus vea faasitrajektorile tasandil  $e - e'$ . Sõltuvalt sellest kus asub süsteemi faasipunkt ning kuidas muutub viga siirdeprotsessi käigus, saab formuleerida teatud IF-THEN-(KUI-SIIS-)reeglid (*fuzzy rules*), mis määravad kontrolleri juhttoime. Vea suurusele võib anda 5 hinnangut: suur positiivne (PB - *positive big*), keskmine positiivne (PM), väike positiivne (PS), null (ZE), väike negatiivne (NS), keskmine negatiivne (NM) ja suur negatiivne (NB). Analoogiliselt hinnatakse ka vea tuletisi. Vastavalt sellele võib sõnastada näiteks järgmised juhttoime moodustamise reeglid:

IF  $e = NB$  AND  $e' = NB$  THEN  $u = NB$   
 IF  $e = ZE$  AND  $e' = NM$  THEN  $u = NS$   
 IF  $e = PS$  AND  $e' = PM$  THEN  $u = PM$   
 jne.



Joonis 2.10. Süsteemi vea siirdeprotsess ja faasitrajektor

Kokku on kahe muutuja seitsme erineva hinnangu korral võimalik moodustada 49 reeglit ( $7 \times 7 = 49$ ). Iga juhttoimele omistatakse arväärtused. Hägusloogika reeglid saab esitada ka tabeli kujul.

### Hägusloogika reeglid

	Vea tuletis e'						
Viga e	NB	NM	NS	ZE	PS	PM	PB
NB	NB	NB	NM	NM	NS	NS	ZE
NM	NB	NM	NM	NS	NS	ZE	ZE
NS	NM	NM	NS	NS	ZE	ZE	ZE
ZE	NM	NS	ZE	ZE	ZE	PS	PM
PS	ZE	ZE	ZE	PS	PS	PM	PM
PM	ZE	ZE	PS	PS	PM	PM	PB
PB	ZE	PS	PS	PM	PM	PB	PB

Kui mitu reeglit toimivad üheaegselt, saadakse väljundsuurused hägusmuutujate mitmesuguste selgitusstrateegiatega abil. Nendeks võivad olla maksimumikriteerium, keskmise maksimumi või raskuskeskme meetod. Suhteliselt häid tulemusi andva raskuskeskme meetodi korral leitakse summaarne juhttoime valemiga:

$$JT = \frac{\sum_{n=1}^N (u_n \times U_n)}{\sum_{n=1}^N u_n},$$

kus  $u_n$  - kuuluvusfunktsioon,

$U_n$  - kuuluvusfunktsiooni hägune väljundsuurus,

$N$  - korruga toimivate kuuluvusfunktsioonide arv.

Hägusloogilisel juhtimisel on võrreldes teiste juhtimismoodustega rida eeliseid.

1. Kontrolleri sünteesiks pole vaja põhjalikult tunda automaatjuhtimise põhimõtteid, peab vaid teadma juhtimisobjekti käitumist. Nii võib iga tehnikavaldkonna asjatundja ilma automaatikaspetsialisti abita luua eeskujuliku juhtimissüsteemi. 2. Hägusloogilise kontrolleriga on lihtne juhtida mitmemõõtmelisi ja mitmelisidusaid süsteeme. 3. Hägusloogilise juhtimise saab välja arendada järk-järgult otsustamisreegleid lisades ja täiustades. 4. Hägusloogiline juhtimis põhimõte suurendab oluliselt diskreetsete süsteemide toimekiirust, sest arvutuste hulk ning selleks kuluv aeg on viidud minimaalseks. 5. Hägusloogika kontroller on suhteliselt odav, lihtne ning töökindel. Isegi väikese arvu reeglite korral on kontroller efektiivne.

Automaatjuhtimissüsteemi loomist alustatakse juhtimisobjekti määratlemisest, mis tähendab tema eraldamist ümbritsevast keskkonnast. Sageli tehakse seda vaid mõtteliselt, sest reaalne juhtimisobjekt puudub, näiteks on alles projekteerimisjärgus. Objekti määratlemisel tehakse kindlaks tema sisendid ja väljundid. Juhtimisobjektist täpsema ettekujutuse saamiseks koostatakse matemaatiline **mudel**. Üldjuhul mõistetakse objekti mudeli all objekti talitluse formaliseeritud kirjeldust või talitlust imiteerivat tehisobjekti. Mudeli loomist nimetatakse **modelleerimiseks**.



Mudeli järgi saab hinnata objekti tegelikku olekut ning prognoosida järgnevaid olekuid. Modelleerimise täpsus sõltub objekti keerukusest. Paljud juhtimisobjektid pole piisava täpsusega modelleeritavad. Alati ei saa täpselt hinnata ka kõiki objekti olekuid iseloomustavaid suursi. Näiteks mõõdetakse üht osa neist anduritega, teisi määratakse objekti mudelist kaudsete arvutuste teel, kolmandatele antakse üksnes ligikaudne hinnang. On olemas objekte, mille tööd iseloomustatakse vaid ligikaudsete mudelitega, või ka objekte, millest puuduliku informatsiooni tõttu polegi võimalik luua mõistlikku mudelit. Sel juhul on tegu **määramatusega**, mis oluliselt raskendab juhtimist, kuigi on teatud viisil matemaatiliselt kirjeldatav. Mida suurem on juhtimisobjekti struktuuri ja parameetrite määramatus ning keskkonnahäiringute kontrollimatu muutumise ulatus, seda raskem on objekti juhtida. Täielikult **determineerituiks** loetakse objekte, mida saab täpselt modelleerida ning millele ei mõju juhuslikud häiringud. Selliseid objekte saab põhimõtteliselt juhtida ka ilma tagasisideta, s. o. avatud süsteemis. Kahjuks leidub reaalselt objektide hulgas determineeritud objekte väga harva. Enamasti on juhtimissüsteemid suletud. Igasugune määramatus kompenseeritakse andurite informatsiooniga. Juhtimise eesmärgi saavutamine sõltub selle informatsiooni tõepärasusest ning informatsiooni kasutamise oskusest või juhtseadme intellektuaalsest tasemest.

Kokkuvõttes võib öelda, et tänapäeva automaatjuhtimissüsteemide juhtimisel rakendatakse kolme erinevat põhimõtet, nii klassikalist väljundite vea järgi juhtimist, moodsat olekumuutujatel ja objekti determineeritud mudelil põhinevat juhtimist kui ka tehisintellektil ja hägusatel mudelitel põhinevat juhtimist.