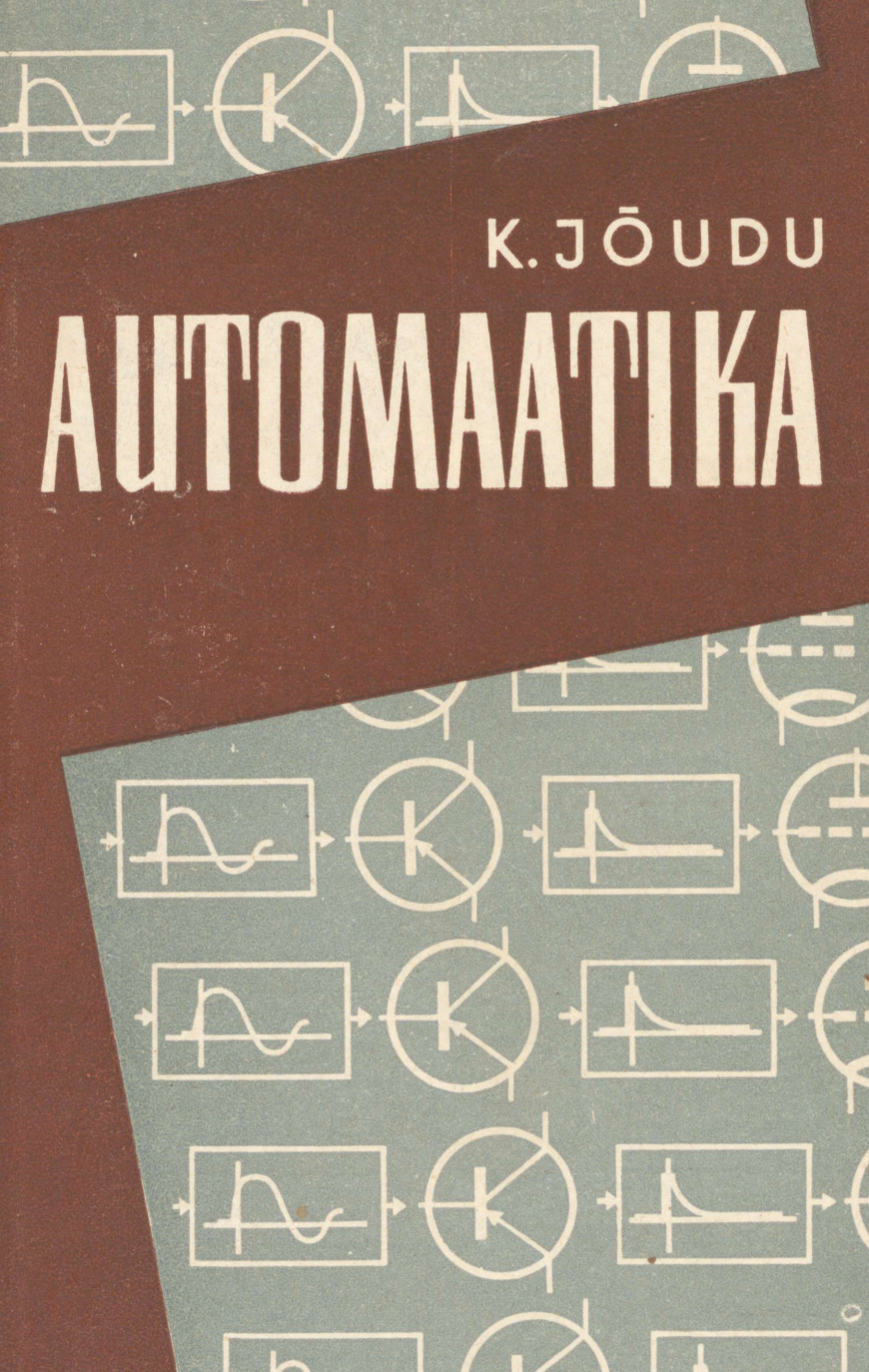
K. JÕUDU

AUTOMAATIKA



A-295253 III

K. JÕUDU

AUTOMAATIKA

EESTI RIIKLIK KIRJASTUS
TALLINN 1962

6T2.15
J. 84

Kaanekujundus V. Vare.

Raamat on oma sisult ja käsitluslaadilt mõeldud automaatika, automatiseerimise ning nendega seotud probleemide tutvustamiseks laiale lugejaskonnale — tootmisnovaatoritele, tööstuse ja majanduse juhtivale personalile ning loomulikult kõigile tehnikahuvilistele. Põhilise materjali esitusviis ei nõua lugejalt spetsiaalseid eelteadmisi.

Puht-automaatikaalaste küsimuste kõrval on teoses tähelepanu pööratud ka arvutustehnikale, küberneetikale ja mõnedele uuematele automatiseerimise eriküsimustele, mistõttu raamat võib pakkuda teatud huvi ka automaatika spetsialistidele.

2

Tartu Riikliku Ülikooli
Raamatukogu
54022

Retsenseerinud tehn. tead. kand. H. Sillamaa

I PEATÜKK

SISSEJUHATUS

1. Automaatika tähtsusest

Kaheksateistkümnenda sajandi viimasel kolmandikul tekkis inimkonna tootlike jõudude arengus murrang. Selle murrangu tulemusena asendus inimkäte töö masinate tööga. Ometi töötasid need masinad inimese vahetul ning pideval juhtimisel. On avaldatud arvamust, et käesoleval ajal leiab aset teine taoline murrang, mille käigus inimese vaimutegevus masinate juhtimisel asendatakse «elektronajude» tööga. Langeb hoopis ära tarvidus tootmisprotsessi vahetuks mõjutamiseks inimese poolt. Toimub tootmisprotsesside kompleksne automatiseerimine.

Käesoleval ajal pole tootmise areng enam mõeldav teisiti kui kõige tihedamas seoses tootmisprotsesside laialdase ja täieliku automatiseerimisega. Kõige kujukamalt peegeldub see asjaolu NLKP XXII kongressi materjalides.

Vastavalt NLKP uuele programmile automatiseeritakse lähema kahe aastakümne jooksul tootmist kompleksselt ja massilises ulatuses. Seoses üha laialdasema üleminekuga automaattehastele ja -tsehhidele kiireneb täiuslike automaatjuhtimise süsteemide rakendamine. Tööstuslikus tootmises, ehitustel, transpordis, teaduslikus uurimises, planeerimis- ja konstrueerimistöös, arvestuses ja tootmise organiseerimisel hakatakse laialdaselt rakendama küberneetilisi seadmeid elektronarvutusmasinate ja juhtivate masinate näol.

Automatiseerimise kõige olulisemaks tulemuseks on tööviljakuse tohutu kasv. Loomulikult eeldab see üldist teaduslikku ja tehnilist progressi. Tehnilise progressi tagamisel etendavad muidugi väga suurt osa tuuma-

energia, orgaaniliste ainete keemiline süntees ja paljud muud moodsa teaduse ja tehnika saavutused. Tänapäeval on mitmesugused tehnikaharud omavahel väga tihedalt seotud. Automaatika teenindab kõiki tehnikaharusid, olles otsekui ühendavaks lüliks nende vahel.

Automatiseerimine tagab tööviljakuse suurt kasvu mitte üksnes sellepärast, et ta vabastab inimese töömasina vahetu juhtimise ülesannetest, nii et üks inimene võib üheaegselt kontrollida paljusid automatiseeritud agregaate. Veelgi tähtsam on see, et tootmise areng ei ole nüüd enam piiratud inimorganismi võimalustega tootmisprotsesside juhtimisel.

Käesoleval ajal on paljude tootmisprotsesside kiirus piiratud just tootmisprotsessi juhtiva inimese reageerimiskiiruse poolt. Võimalus viia tootmisprotsess maksimaalse, sageli isegi avariilise režiimi piirile tänu automaatikaseadmete suurele tundlikkusele ja reageerimiskiirusele lubab rakendada enneolematute kiirustega ning võimsustega tehnoloogilisi protsesse.

Kujukaks näiteks Nõukogude Liidu saavutustest automaatika ja telemehaanika valdkonnas on kosmose uurimisel saavutatud tulemused. Nii näiteks toimus kosmoselaevas «Vostok» kosmonaudi tervisliku seisukorra pidev automaatne kontrollimine. Vastavad andmed anti telemehaanilisel teel edasi maapealsesse juhtimiskeskusesse. Automaatikaseadmete abil stabiliseeriti õhu koosseis ja temperatuur kosmoselaeva kabiinis. Peale selle oli kosmoselaev varustatud optiliste ja güroskoopiliste orienteerimisautomaatidega, mis hoidsid kosmoselaeva täpselt ettenähtud asendis päikese suhtes. Kosmoselaeva kiirus ja trajektoor tagati samuti vastavate programmautomaatide abil.

Juba see lühike loetelu näitab automaatika tohutut tähtsust kaasaja kõige eesrindlikumas tehnikaharus. Võib julgesti väita, et muudes tehnikaharudes ei ole automaatika tähtsus väiksem.

2. Automaatika olemusest, ajaloost ning arenguperspektiividest

Automaatikaks nimetatakse teaduse- ning tehnikaharu, mis tegeleb küsimusega, kuidas asendada inimese poolt teostatavaid juhtimisfunktsioone vastavate masinate ning

aparaatide, *automaatikaseadmete* poolt teostatavate funktsioonidega. Viimaste rakendamist inimeste asemel tööprotsesside juhtimiseks nimetatakse *automatiseerimiseks*. Loetakse üldiselt kehtivaks põhimõte, mille kohaselt on võimalik automatiseerida ainult neid inimtegevuse alasid, mille kohta võib formuleerida täpseid ning üksikasjalikke tegevusjuhendeid. Niisugune tegevusjuhend ongi siis aluseks vastava automaatikaseadme projekteerimisel. Intuitiivseid toiminguid ja loomingulist protsessi ei ole niisiis võimalik automatiseerida. Ometi on siingi piirid üsna suhtelised ning käesoleval ajal on automaatika sisse tungimas isegi kaunite kunstide alale.

Otsides automaatika ajaloolisi allikaid selgub, et esimesteks automaatikaseadmeteks tuleks lugeda muinaskreeka füüsiku Heroni poolt kirjeldatud automaate[1]. Nende hulgas tuleks mainida automaati templiuste avamiseks. Templiuksed avanesid automaadi toimel siis, kui altaril süüdati tuli. Tule kustumise järel uks sulgus taas. Seadme töö põhines õhu paisumisel ning kokkutõmbumisel altari sisemuses *1* (joonis 1, *a*). Tule süütamisel õhk paisus ning surus vee anumast *2* sifooni *3* kaudu anumasse *4*, mis muutus raskemaks ja avas ukse *6* köie või keti *5* abil.

Ometi oli sel leiutisel vähe ühist moodsa automatiseerimisega. Esiteks ei olnud siin tegemist tööstusliku protsessiga ja teiseks puudus siin automaatse reguleerimise probleem.

Esimeseks automaatseks regulaatoriks, mida kasutati tootmisprotsessi juhtimisel, näib olevat Prantsuse kuninga Heinrich III sõjaväeinseneri Ramelly' poolt 1588. aastal kirjeldatud seade veskikivide vahele juhitava teravilja hulga reguleerimiseks (joonis 1, *b*). Nimelt tuleb teravilja juhtida veskikivide vahele seda roh-

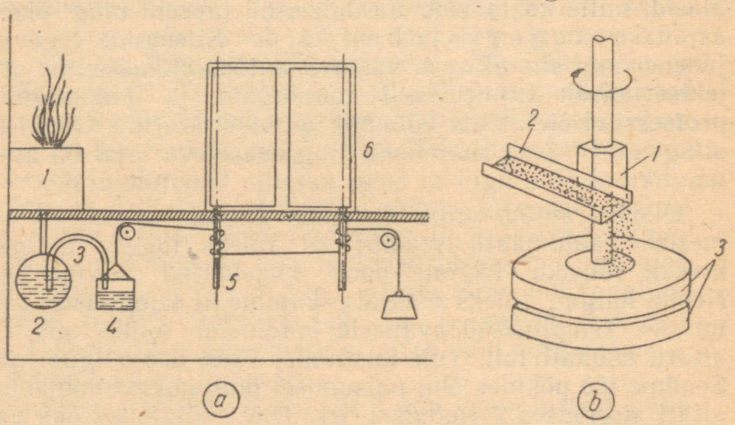
---

[1] Käesoleval ajal kasutatakse terminit «automaat» (kreeka k. *automatos* — iseliikuv) peamiselt kahes tähenduses:

1. Seade, mis teostab iseseisvalt, inimese kaasabita neid funktsioone, mida varem teostati inimese vahetul osavõtul (kaubandusautomaat, automaattelefon, automaattööpink, automaatliin) — automaat tavalises mõttes.

2. Neuronitest või samalaadsetest tehiselementidest koosnev süsteem, millele on omane keerukas loogikaline seos sisenevate ja väljuvate signaalide vahel. Esineb peamiselt matemaatilise mõistena.

kem, mida kiiremini viimased pöörlevad. Kui kivide pöörlemine aeglustub, tuleb teravilja juurdevoolu piirata, et vähendada jahvatava kivi pöörlemise takistust. Reguleerimise funktsioon on sedalaadi veskis väga lihtsalt ning teravmeelselt teostatud kandilise võlli *1* ning renni *2* abil,



Joonis 1

a — vana-kreeka automaat templiuste avamiseks; *b* — keskaegne automaat veskikividele voolava teravilja hulga reguleerimiseks

mida mööda teravili voolab kivide *3* vahele. Nimelt valiti renni kallak nii, et vili seal hõõrdejõu mõjul paigal püsis. Väikesest tõukest siiski piisas teatud viljahulga rennist väljaraputamiseks. Tõukeid andis rennile kandiline veskivõll, millest renn sobival kaugusel möödus. Nii saavutatigi seda, et tõugete arv ning rennist väljavoolava vilja hulk oli seda suurem, mida kiiremini võll pöörles.

Automaatse reguleerimise teooria alused töötati välja möödunud sajandi teisel poolel J. C. Maxwelli, Peterburi Tehnoloogilise Instituudi professori I. A. Võšnegradski ja slovaki õpetlase Aurel Stodola poolt seoses aurujõuseadmete reguleerimise probleemidega. Automatiseerimine sõna kaasaegses mõttes, kus pearõhk on pandud inimtöö hõlbustamisele ja tööviljakuse paljukordsele tõstmisele, omandas majandusliku tähtsuse alles pärast Teist maailmasõda.

Käesoleval ajal toimub tootmise automatiseerimine üha kasvava tempoga. Olgugi et mõned tööstusharud on juba

üsna täielikult automatiseeritud, kulub kõikide oluliste tööstusharude kompleksseks automatiseerimiseks siiski veel mitmeid aastakümneid. Suur osa tööstusharusid on käesoleval ajal võrdlemisi killustatud ning juba oma loomult raskesti automatiseeritavad. Kõigi tootmisharude täielikuks automatiseerimiseks tuleks rakendada vahendeid ja kõrge kvalifikatsiooniga tööjõudu vähemalt niisama suurel hulgal, kui seda oleks tarvis kogu olemasolevate tootmisvahendite pargi täielikuks uuendamiseks, võimalik aga ka, et tunduvalt rohkem.

Et tootmise enam-vähem täieliku automatiseerimise ajastu mõne aja pärast siiski saabub, näib olevat täiesti tõepärane, kui jälgida, milliste tohutute sammudega tehnika on arenenud viimase paarikümne aasta jooksul. Kolmkümmend aastat tagasi ei tuntud veel reaktiivlennukeid, raadiolokaatoreid ega ka aatomienergia tööstuslikku kasutamist, kuna televisioon oli alles katsetusjärgus. Kõnelemine inimese lennust kosmoses tundus tollal täieliku utoopiana.

Seoses niisuguste perspektiividega on mõned kodanlike maade teadlased avaldanud kartust, et käesolevale ajastule võib järgneda robotite ning automaatide ajastu, sest arenemisvõimega varustatud automaadid arenevad üha edasi, inimesed aga manduvad tegevuseta oleku tõttu. Viimaks haaravad automaadid võimu ning rakendavad inimesed eneste huvides tegevusse.

Eriliste kommentaaridetagi võib mõista, et niisugused kujutlused on haiglase fantaasia vili. Tegelikkuses tähendab täielik automatiseerimine enneolematult suurte inimtöö reservide vabanemist loominguliseks tööks šabloonilisest ning ebahuvitavast tööst vabanemise arvel. Milliste edaspidiste saavutusteni see omakorda viib, on praegu vara ennustada.

II PEATÜKK

AUTOMAATIKA ELEMENDID

3. Automaatse juhtimise süsteemid

Mõistet «juhtimine» kasutatakse laialdaselt mitmesugustel elualadel ja kõige erinevamates tähendustes: räägitakse hobuse, tööpingi, lennuki, suurtükitule, tööstusettevõtte ja vereringvoolu juhtimisest. Juhtimise küsimuste osatähtsus kaasaegses elus on muutunud nii tajutavaks, et tekkis vajadus erilise teaduse järgi juhtimise üldistest printsiipidest. See teadus sai nimeks *küberneetika* [1].

Küberneetika käsitleb teatud universaalseid juhtimise printsiipe. Need ei haara mitte üksnes tehnilisi seadmeid kõige erinevamatelt tehnikaaladelt, vaid ka suurt gruppi nähtusi orgaanilisest loodusest. Käesolevas ja järgnevates peatükkides käsitletakse automaatse juhtimise põhimõtteid ja selleks kasutatavaid tehnilisi seadmeid, kuna küberneetika üldküsimuste juurde pöördutakse tagasi VIII peatükis. Teadusharu, mis tegeleb automaatse juhtimise küsimustega, nimetatakse automaatse juhtimise teooriaks, mõnikord aga ka *tehniliseks küberneetikaks.*

Tehnilised automaatse juhtimise süsteemid võivad olla kõige mitmekesisema ehituse ning otstarbega. Nende uurimisel, projekteerimisel ja võrdlemisel kasutatakse laialdaselt *struktuurskeeme.* Struktuurskeemiks nimetatakse seadme või protsessi säärast skemaatilist kujutust, kus kujutatava seadme või protsessi põhilised sõlmed on märgitud lahtritega, kõige olulisemad seosed aga nooltega.

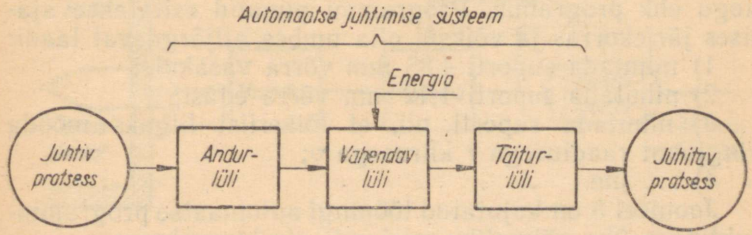
---

[1] 1948. a. ilmus N. Wieneri raamat «Küberneetika ehk juhtimine ja side loomas ning masinas». Nimetatud raamatus kasutas Wiener esmakordselt sõna «küberneetika» tema praeguses tähenduses.

Struktuurskeemi põhiülesandeks on näidata, kuidas toimub signaalide edasiandmine kirjeldatavas automaatse juhtimise süsteemis. Seepärast kujutatakse struktuurskeemides esmajoones neid seoseid ja sõlmi, mis on olulised signaalide edasiandmise või muundamise seisukohalt. Struktuurskeemi seosed ja sõlmed ei kopeeri sageli kujutatava seadme sõlmi ja seoseid. Töötamispõhimõtte ja funktsioonide seisukohast lähtudes on struktuurskeemis sageli otstarbekohane kujutada mitmeid seadme sõlmi ühise lahtrina, kui nad koos teostavad sama operatsiooni, ja vastupidi. Üheks oluliseks struktuurskeemide koostamise põhimõtteks on see, et kõik struktuurskeemi elemendid loetakse ühesuunalisteks, see tähendab, et kõik signaalid ja mõjutused kantakse edasi ainult sisendist väljundisse, mitte aga vastassunas. Vastassuunalised mõjutused märgitakse eraldi lahtrite ning nooltega.

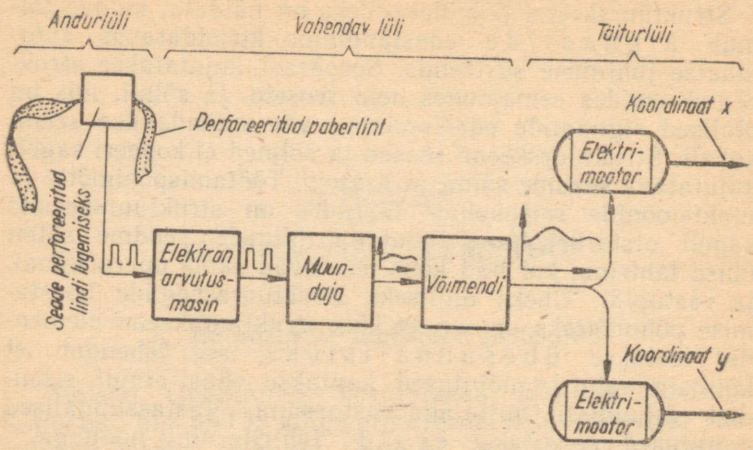
Joonisel 2 on kujutatud tüüpiline automaatse juhtimise süsteemi struktuurskeem.

Automaatse juhtimise süsteem seob omavahel kaks tehnilist protsessi. Üks nendest protsessidest on juhtiv, teine juhitav. Andmed juhtiva protsessi kohta võtab vastu ja «tõlgib» automaatse juhtimise süsteemile arusaadavasse «keelde» *andurlüli*. Andmed juhtiva protsessi kohta antakse edasi *vahendavale lülile*. Vahendav lüli õieti teostabki automaatset juhtimist, s. o. reageerib vastaval, konstruktori poolt ettenähtud viisil juhtiva protsessi muudatustele, teiste sõnadega, töötab vajalikul viisil ümber sisendlülist saadud andmed ja annab need andmed edasi *täiturlülile*. Täiturlüli omakorda kohastab vahendavast lülist väljuvad andmed juhitava protsessi juhtimiseks. Automaatse juhtimise süsteemi üksikud lülid koosnevad



Joonis 2

Automaatse juhtimise süsteemi tüüpiline struktuurskeem



Joonis 3

Automaatse programmjuhtimisega tööpingi struktuurskeem

omakorda *automaatika elementidest*, s. o. seadmetest ja aparaatidest, mis on vajalikud antud lüli funktsioonide täitmiseks.

Tavaliselt on juhitava protsessi juhtimiseks mitmesugustel põhjustel tarvis tunduvalt rohkem energiat, kui seda suudab anda andurlüli. Seepärast sisaldab vahendav lüli tavaliselt seadmeid signaali võimsuse suurendamiseks — *võimendamiseks* väljastpoolt tuleva lisaenergia arvel.

Tüüpiliseks automaatse juhtimise süsteemi näiteks võiks olla *programmjuhtimisega* tööpink. Juhtivaks protsessiks on siin varem ettevalmistatud tegevusjuhendite kogu ehk programm. Programmi punktid esitatakse ajalises järjekorras ja võiksid olla umbes alljärgnevat laadi:

1) nihutada suporti 4,85 mm võrra vasakule;
2) nihutada suporti 1,12 mm võrra edasi;
3) nihutada suporti nii, et lõikeriist liiguks mööda ringjoont raadiusega r kiirusega v;
4) ... jne.

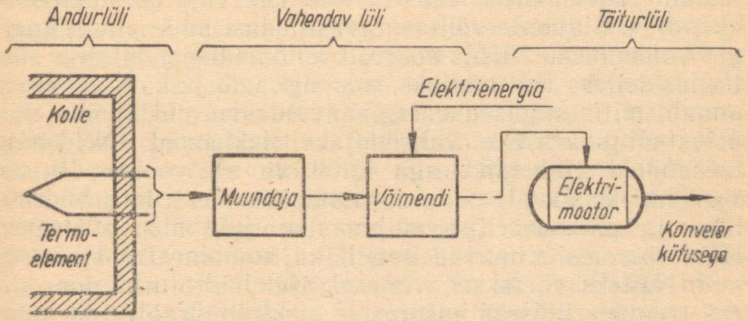
Joonisel 3 on kujutatud tööpingi automaatse programmjuhtimise ühe võimaliku variandi struktuurskeem.

Tööpingi automaatne juhtimine programmi abil toimub üldjoontes järgmiselt. Programmi üksikud punktid kan-

takse eriliste leppemärkide abil paberlindile, kusjuures leppemärgid koostatakse linti perforeeritud aukudest. Tõmmates linti ühtlase kiirusega läbi vastava elektriliste kontaktidega varustatud seadme, sulguvad kontaktid iga kord, kui auk lindis satub kontaktide kohale. Kontaktid tekitavad vastavas vooluringis elektrilisi impulsse, mis juhitakse elektronarvutusmasinasse. Viimases töötatakse lindilt saadud signaalid ümber juba vahetult supordi liikumist juhtivateks signaalideks. Signaalid väljuvad elektronarvutusmasinast impulsside kombinatsioonidena — koodidena. Mootorite juhtimiseks tuleb kodeeritud signaalid väljendada elektrivoolu tugevuse kaudu ning seejärel võimendada vajaliku määrani. Seadme töö täpsuse tagamiseks on sageli vajalik täiendav seos juhitava objekti ja vahendava lüli vahel, mida nimetatakse *tagasisideks* (joonisel näitamata). Märgime, et tööpingi programmjuhtimise kirjeldatud struktuur ei ole ainuvõimalik. Käesoleval ajal kasutatakse tavaliselt täiuslikumaid struktuure.

Teiseks automaatse juhtimise süsteemi näiteks võiks olla *temperatuuriregulaator,* s. o. seade temperatuuri reguleerimiseks (joonis 4).

Siin on juhtivaks protsessiks kolde temperatuur. Koldesse paigutatud termoelemendis tekib elektromotoorne jõud, mis on proportsionaalne kolde temperatuuriga. Pärast võimendamist ning sellekohast muundamist juhitakse kolde temperatuurist sõltuva suurusega signaal mootorisse, mis mõjutab koldesse juurdeantava kütuse



Joonis 4

Automaatse temperatuuriregulaatori struktuurskeem

hulka. Seadme töö on korraldatud nii, et kolde temperatuuri tõusmisel juurdeantava kütuse hulk väheneb ning vastupidi. Sellisel juhul automaatse juhtimise seade ühtlustab ehk stabiliseerib kolde temperatuuri.

Peab märkima, et toodud näites eksisteerib otsene side juhitava protsessi, s. o. kütuse juurdeandmise kiiruse ja juhtiva protsessi, s. o. temperatuuri vahel koldes. Side automaatse juhtimise süsteemi kaudu osutub siin tagasisideks. Tagasiside olemasolu muudab süsteemi omadusi sageli tundmatuseni. Säärast automaatse juhtimise süsteemi, mis toimib tagasiside kaudu, nimetatakse *automaatse reguleerimise süsteemiks*. Automaatse reguleerimise süsteemile kui automaatse juhtimise süsteemide kõige tähtsamale liigile on pühendatud tervikuna III peatükk. Käesolevas peatükis piirdutakse üksikute elementide funktsioonide vaatlemisega.

Vastavalt eeltoodule võib üldmõistet *juhtimine* liigitada *programmjuhtimiseks* (juhtimine kitsas mõttes), kus objekti mõjutatakse eelnevalt koostatud programmi kohaselt, sõltumata sellest, kuidas objekt reageerib juhtimissignaalidele (näiteks seadmete sisse- ja väljalülitamine) ja *reguleerimiseks*, kus objekti mõjutatakse t a g a s i s i d e kaastegevusel sõltuvalt sellest, kuidas objekti olukord erineb vajalikust. Liigitus on kehtiv nii üldse juhtimise kui ka automaatjuhtimise puhul.

Nagu toodud näidetest selgub, on automaatse reguleerimise ja juhtimise süsteemide teostamiseks ennekõike vajalik see «miski», mida võib muundada, võimendada, teatud vahemaadele edasi anda. On vajalik signaalide «kandja». Signaale võib teatavasti edasi anda ainult energia vahendusel. Niisiis sobivad automaatse juhtimise süsteemis selleks vahendajaks, mis signaale ja käsklusi edasi annab, mitmesugused energia avaldusvormid. Toodud näidetes oli sääraseks vahendajaks elektrivool. Neidsamu ülesandeid võib täita aga ka surve all voolav õli või suruõhk. Vastavalt sellele eristatakse elektrilisi, hüdraulilisi ja pneumaatilisi automaatse juhtimise süsteeme. Häid tulemusi annavad sageli ka kombineeritud süsteemid. Näiteks võetakse viimasel ajal hüdroturbiinide kiiruse reguleerimiseks kasutusele elektrohüdraulilised automaatreguleerimise süsteemid hüdrauliliste asemel. Elektrohüdraulilistes süsteemides on sisend- ning vahendavad lülid elektrilised, täiturlüli aga hüdrauliline. Teatud juhtu-

del kasutatakse ka teisi vahendajaid, näiteks valguskiirt või radioaktiivset kiirgust. Üldiselt peab märkima, et paljud automaatika elemendid, mida käesoleval ajal kasutatakse, on väiksemate muudatustega üle võetud muudest tehnikaharudest, nagu raadiotehnikast, elektrimõõtetehnikast jne. Automaatika arengu üheks nõudeks on niisuguste elementide asemele spetsiaalsete, automaatika nõuetele täielikult kohandatud elementide väljatöötamine.

Tüüpiline automaatse juhtimise süsteem koosneb niisiis andurlülist, vahendavast lülist ja täiturlülist. Andurlüli põhiliseks koostisosaks on tavaliselt *mõõteelement*, s. o. element, mis «mõõdab» juhtivat protsessi iseloomustavat suurust ja esitab selle edaspidiseks töötlemiseks sobival kujul. Kuna mõõteelement enamasti muundab ühe füüsikalise suuruse teiseks füüsikaliseks suuruseks, näiteks temperatuuri elektripingeks, on ta ühtlasi ka *muundavaks elemendiks*. Vahendava lüli põhiliseks koostisosaks on tavaliselt *võimenduselement*. Täiturlüli ülesandeks on juhitava protsessi mõjutamine. Seepärast on täiturlüli põhiliseks koostisosaks harilikult *täiturelement*, mis muundab võimendavast elemendist väljuva energia mehaaniliseks liikumiseks või muuks sobivaks toimeks, et otseselt mõjutada juhitavat protsessi.

4. Mõõteelemendid

Automaatse juhtimise süsteemi andurlüli tähtsaimaks koostisosaks on tavaliselt *mõõteelement*. Toodud näites temperatuuri automaatse reguleerimise kohta (vt. joonis 4) on mõõteelemendiks termoelement. Mõõteelemendi ülesandeks on muundada sisenevat suurust nii, et andurlülist väljuks juba vastavalt kasutatava süsteemi iseloomule elektriline, pneumaatiline, hüdrauliline vms. signaal. Mõõdetav suurus võib olla kõige mitmesugusemat laadi. Selleks võib olla rõhk, temperatuur, elektrivool, elektripinge, vahelduvvoolu sagedus, valgusvoog, magnetvoog, radioaktiivne kiirgus, võlli pöörlemiskiirus, mingisuguse töömasina osa liikumiskiirus või asend, vedeliku nivoo, vedeliku või gaasi kulu, keemiline koostis, tihedus, õhu niiskus, lennuki või laeva asend ning kiirus jne. Vajalike mõõteelementide arv on väga suur. Võib öelda, et peaaegu igasuguse tootmisprotsessi või tehnilise seadme tööd ja

isegi loodusnähtust iseloomustava suuruse jaoks on tehnika tänapäevase taseme juures võimalik ehitada mõõteelementi, mis esitab andmed mõõdetava suuruse kohta mingisuguse tehniliste seadmete abil hõlpsasti muundatava signaali, näiteks elektrivoolu kujul. Järgnevalt käsitletakse ainult kõige iseloomulikumaid mõõteelementide tüüpe, et anda üldist pilti mõõteelementide võimalikest töötamise põhimõtetest.

Elektrilised mõõteelemendid. Kõige olulisema alaliigi mõõteelementide hulgas moodustavad elektrilised mõõteelemendid. Elektrilised mõõteelemendid põhinevad peaasjalikult elektritakistuse muutumisel. Elektrotehnikast on teada, et vooluringi läbiv vool määratakse Ohmi seadusega:

$$I = \frac{U}{Z},$$

kus I on vool, U — pinge vooluringi otstel ja Z — vooluringi elektriline *näivtakistus*. Tuntakse kolme näivtakistuse komponenti.

Oomtakistus (R) on praktiliselt ühesuurune nii alalis- kui ka vahelduvvoolu puhul. Peaaegu puhtakujulist oomtakistust omavad mitmesugused reostaadid, fotoelemendid, elektronlambid, paljud pooljuhid.

Mahtuvustakistus (X_C) kujutab enesest kondensaatori vahelduvvoolutakistust ja on määratav valemist

$$X_C = \frac{1}{2\pi f C},$$

kus $\pi \approx 3{,}14$, f — vahelduvvoolu sagedus, s. t. perioodide arv sekundis ja C — kondensaatori mahtuvus. Nagu valemist hõlpsasti näha võib, on alalisvoolu puhul mahtuvustakistus lõpmata suur ($f=0$) ja vool puudub. Vahelduvvoolu puhul on aga mahtuvustakistust läbiv vool võrdeline sagedusega.

Induktiivtakistus (X_L) on määratav valemist

$$X_L = 2\pi f L,$$

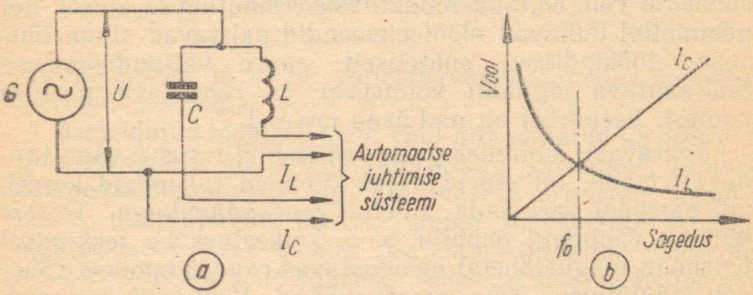
kus L on induktiivtakistust omava seadme, *paispooli* induktiivsuse suurus.

Nagu valemist nähtub, on antud pinge puhul induktiivtakistust läbiv vool pöördvõrdeline vahelduvvoolu

sagedusega. Alalisvoolu puhul on see lõpmata suur — paispool kujutab endast alalisvoolu jaoks lühist.

Paljude mõõteelementide töö põhineb *vastastikuse induktiivsuse* nähtusel, mis esineb kahe paispooli (või transformaatori kahe mähise) vahel. Vastastikuse induktiivsuse suuruse alusel võib arvutada, kui suur on ühes mähises kulgeva voolu poolt teises mähises indutseeritav pinge.

Jättes vaatlemata küsimuse kõigi kolme vaadeldud komponendi koosesinemisest, millise juhtumi analüüsimiseks soovitame pöörduda elektrotehnika õpikute poole, asume vaatlema üksikuid takistuse muutumisel põhinevaid mõõteelementide tüüpe.



Joonis 5

a — sagedust mõõtva elemendi lülitusskeem; *b* — sama elemendi tunnusjooned

Sageli, näiteks vahelduvvoolugeneraatori pöörlemiskiiruse automaatseks reguleerimiseks on tarvis mõõta tema poolt toodetava voolu s a g e d u s t. Seda on hõlpus teha näiteks paispooli ja kondensaatori abil skeemi kohaselt, mis on toodud joonisel 5, *a*. Sellel joonisel on näidatud vahelduvpinge allika *G* klemmidele paralleelselt lülitatud induktiivsus *L* ja mahtuvus *C*. Toodud valemeist selgub, et sageduse tõustes paispooli I_L läbiv vool nõrgeneb, kondensaatorit läbiv vool aga tugevneb. Joonisel 5, *b* on graafiliselt kujutatud voolu sõltuvus sagedusest mahtuvust ning induktiivsust sisaldavas haruühenduses. Teatud sageduse juures on voolud mõlemas haruühenduses

võrdsed. Tavaliselt valitakse kondensaatori mahtuvus ja paispooli induktiivsus nii, et reguleeritava generaatori nimisagedusel f_0 voolud oleksid võrdsed. Sageduse kõrvalekaldumisest annab siis märku voolude vahe tekkimine. Siin on tegemist nn. *kompensatsiooniprintsiibiga*, s. o. signaali ei tekita mitte voolu või pinge absoluutne suurus, vaid nende vahe olemasolu. Kompensatsiooniprintsiibi eeliseks on see, et mingi kõrvalise suuruse, näiteks generaatori pinge muutumisel kasvavad ühteviisi mõlemad komponendid, nende vahe aga jääb nimisagedusel endiselt nulliks. Kui me aga jälgiksime nimisagedust üheainsa voolu suuruse kaudu, näiteks üksnes mahtuvuslikus haruühenduses, tekiks viga, sest vool muutub nii sageduse kui ka pinge muutumise tagajärjel.

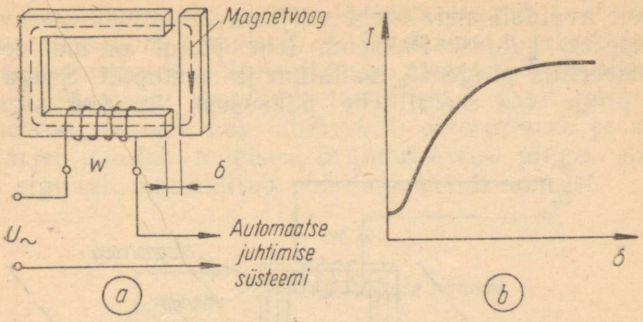
Mitmesuguseid mehaanilisi nihkeid mõõtvaid elemente võib ehitada induktiivsuse muutumise alusel. Sel põhimõttel töötavad mõõteelemendid paistavad silma lihtsuse, töökindluse, suhteliselt suure väljundvõimsuse (väljaantava signaali võimsuse) ja rahuldava täpsuse poolest. Seepärast on nad üsna levinud.

Teatavasti suureneb paispooli induktiivsus L väga tunduvalt (sadu, tuhandeid, isegi kümneid tuhandeid kordi), kui paispool varustada suletud raudsüdamikuga. Teisest küljest, vähimagi õhupilu, s. o. katkestuskoha tekkimisel paispooli magnetahelat moodustavas raudsüdamikus väheneb induktiivsus üsna suurel määral. Vastavalt tugevneb vool püsiva suuruse ja sagedusega vahelduvpingega toidetava paispooli vooluringis. Säärane induktiivne mõõteelement on otstarbekas väikeste (<1 mm) ankru nihete mõõtmiseks, sest väikeste õhupilude puhul on seadme tundlikkus suurim. Säärase mõõteelemendi üks võimalikke konstruktsioone on kujutatud joonisel 6, *a*.

Joonisel 6, *b* on graafiliselt kujutatud voolu I suurus mõõteelemendi vooluringis sõltuvalt õhupilu δ suurusest. Voolu I suurus on teatud piirides ligikaudu võrdeline õhupilu suurusega. Lihtsustatud valem säärase mõõteelemendi arvutamiseks on järgmine:

$$I \approx 2{,}5 \cdot 10^7 \frac{U}{w^2 S f} \cdot \delta,$$

kus I on vool amprites, U — pinge voltides, S — raudsüdamiku ristlõikepind ruutsentimeetrites, w — raudsüdamikul asuva mähise keerdude arv, δ — õhupilu suurus



Joonis 6

a — mehaanilist nihet mõõtva elemendi skeem; *b* — sama elemendi tunnusjoon

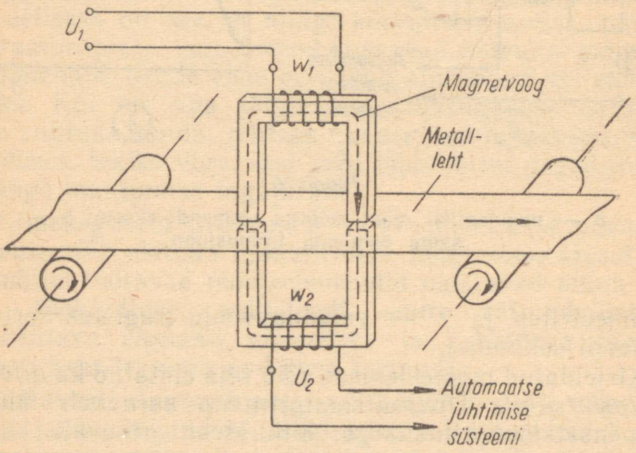
sentimeetrites ja f — vahelduvvoolu sagedus hertsides (perioodi sekundis).

Kirjeldatud mõõteelement võib olla ehitatud ka *diferentsiaalprintsiibil.* Diferentsiaalprintsiip sarnaneb üldiselt kompensatsioonprintsiibiga. Viimasest erinevalt kasutatakse diferentsiaalprintsiibi puhul mõõdetava suuruse määramiseks mitte üksnes üksikute signaalide vahe olemasolu, vaid ka selle suurust. Süsteemi sümmeetrilise ehituse tõttu on siin väljundsignaal suures ulatuses proportsionaalne mõõdetava suurusega.

Diferentsiaalprintsiibil töötav induktiivne mõõteelement koosneb tavaliselt liikuvast ankrust, mille suhtes on sümmeetriliselt paigutatud kaks mähistega varustatud raudsüdamikku. Südamikud on paigutatud nii, et ankru nihkumisel keskasendist ühe südamiku õhupilu ja seetõttu ka vool mähises suurenevad, teise õhupilu ja vool aga vähenevad. Ankru nihkumine võib olla otseselt seotud mõõdetava mehaanilise suurusega. Teisest küljest on säärase induktiivse mõõteelemendiga võimalik mõõta ka mingisugust muud suurust, muundades ta enne mehaaniliseks; näiteks võib ankur olla kinnitatud manomeetri membraanile — sellisel juhul annab mõõteelement edasi andmeid surve suuruse kohta.

Vastastikuse induktiivsuse muutumise alusel ehitatakse mõõteelemente näiteks valtsitava metall-lehe paksuse mõõtmiseks (joonis 7). Seadme töö põhineb mähiste

w_1 ja w_2 vahelise vastastikuse induktiivsuse muutumisel. Nimelt avaldab metall-leht varjestavat toimet vastuvõtva mähise ω_2 suhtes. Paksema lehe puhul on mähises ω_2 indutseeritud pinge U_2 madalam ja vastupidi. Seega sõltub pinge U_2 metall-lehe paksusest. Saadud signaali



Joonis 7

Lehtmetalli paksust mõõtva elemendi skeem

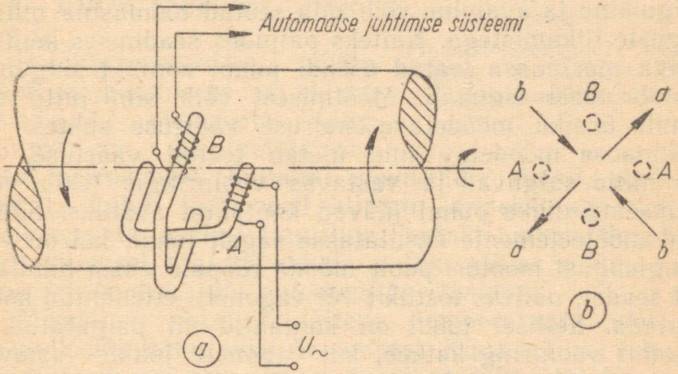
rakendatakse valtside vahekauguse automaatseks reguleerimiseks, et tagada valtsitava metall-lehe nõutavat paksust.

Oluliseks näitajaks mitmesuguste tööprotsesside mehhaniseerimisel on p ö ö r d e m o m e n d i suurus pöörleval võllil. Suurt huvi pakub seepärast allkirjeldatav lahendus. Seade on leidnud kasutamist paberivabrikus desintegraatorile etteantava puidu hulga reguleerimiseks sel viisil, et desintegraatorit käitav mootor oleks koormatud ühtlase momendiga. Sellisel juhul on seadme kasutegur tunduvalt kõrgem ja elektrienergia kulu väheneb. Arusaadavalt sobib taoline printsiip mitmesuguste analoogiliste töömasinate reguleerimiseks.

Induktiivse mõõteelemendi konstruktsioon pöördemomendi mõõtmiseks on kujutatud joonisel 8, *a*.

Mõõtmine põhineb asjaolul, et võlli kaudu pöörde-

momendi edasiandmisel tekivad võlli pinnas tõmbepinged *a—a* ühe diagonaali suunas ja survepinged *b—b* teise diagonaali suunas (joonis 8, *b*). On teada, et terase magnetilised omadused sõltuvad tema mehaanilisest pingestatusest. Momendi muutumisel mähise *A* poolt tekitatud magnetvoo see osa, mis läbib võlli, deformeerub ja selle tagajärjel muutub mähises *B* indutseeruv pinge, andes edasi signaali, mis näitab pöördemomendi suurust.



Joonis 8

a — pöördemomenti mõõtva elemendi skeem; *b* — magnetilise asümmeetria tekkimine pöördemomendi toimel võlli pinnas

Induktiivsete mõõteelementide hulka võib liigitada ka nn. *tahhodünamod*, s. o. väikesed, tavaliselt püsivmagnetitega ergutatavad alalisvoolu- või vahelduvvoolugeneraatorid. Säärase generaatori pinge on võrdeline tema pöörlemiskiirusega, järelikult võib tahhodünamo toimida p ö ö r l e m i s k i i r u s t mõõtva elemendina. Tahhodünamo variandiks on induktiivne impulsiline pöörlemiskiirust mõõtev element. Taoline element koosneb püsivalt kinnitatud raudsüdamikuga mähisest. Südamiku lähedalt möödub iga pöörde ajal võllile kinnitatud püsivmagnet, indutseerides mähises iga pöörde kohta ühe *pingeimpulsi*. Säärane mõõteelement on huvitav selle poolest, et ta annab edasi mõõdetava suuruse — võlli pöörlemis-

kiiruse — mitte voolu või pinge suurusena, vaid impulsside arvuna ajaühikus (nn. *unitaarne kood*).

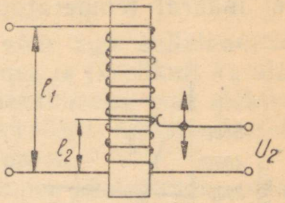
Suure alagrupi elektriliste mõõteelementide hulgas moodustavad põhielemendid, milles on rakendatud oomtakistuse muutumist. Lihtsaim takistuslik mõõteelement on elektriline kontakt. Kontakt on tegelikult *diskreetse* (*mittepideva*) *toimega* element, mis omab avatud olukorras väga suurt ja suletud olukorras väga väikest elektritakistust. Paljudel juhtudel piisab kontakti läbivast võimsusest vastava automaatikaseadme juhtimiseks. Kontakti sulgumine ja avamine võib olla seotud töömasina mitmesuguste liikumistega. Näiteks paljudes seadmetes kontrollitava masinaosa teatud asendi puhul kontakt sulgub ja annab edasi signaali. Mõõtmisest võib siin juttu olla ainult üksiku mõõdetava suuruse väärtuse suhtes. Kui masinaosa mõõdetav nihe ületab teatud väärtuse, siis kontaktid sulguvad ja vastavas vooluringis tekib vool. Väiksema nihke puhul jäävad kontaktid avatuks. Sääraseid mõõteelemente kasutatakse sageli juhul, kui on vaja mingisugust mootori poolt mööda rööpaid edasi nihutatavat seadet, näiteks tõstukit või vagonetti ettenähtud kohas peatada. Sellisel juhul on kontaktid nii paigutatud, et mootori vooluring katkeb, kui vagonett jõuab vastavale kaugusele ja lülitab oma mingi väljaulatuva osa abil kontakti ümber. Sääraseid kontakte nimetatakse *lõpplülititeiks*. Kontakti võib sulgeda mitte ainult liikuv masinaosa, vaid ka mingisugune elektrit juhtiv vedelik, näiteks elavhõbe termomeetris. Teatud temperatuuri saavutamisel elavhõbedasamba kaudu ühenduvate kontaktidega termomeetrit nimetatakse *kontakttermomeetriks*.

Lihtsaim seade, mis võimaldab elektrilise lülituse abil edasi anda mingi masinaosa liikumise käiku pideval kujul, on *reostaatandur*. Reostaatandur koosneb kas sirgjoonelisest või ringikujulisest alusest, millele on mähitud kiht takistustraati. Mähise isolatsioonist vabastatud pinda mööda libiseb mõõdetava masinaosa liikumisega seotud kontakt.

Nagu selgub jooniselt 9, muutub pinge U_2 sõltuvalt liugkontakti asendist nullist kuni U_1-ni. Matemaatiliselt võib pinget U_2 väljendada järgmiselt:

$$U_2 = U_1 \frac{l_2}{l_1},$$

s. o. pinge U_2 on võrdeline nihkega l_2. Potentsiomeetriline mõõteelement võib töötada nii alalis- kui ka vahelduvvooluga, sobib üsna suurte (vahetult kuni 1-meetriste) mehaaniliste ümberpaigutuste elektriliseks edasiandmiseks, on ehituselt lihtne ja täpne. Käesoleval ajal valmistatakse potentsiomeetrilisi mõõteelemente veaga mitte üle 0,1 või isegi 0,01% üldisest pikkusest l_1.



Joonis 9

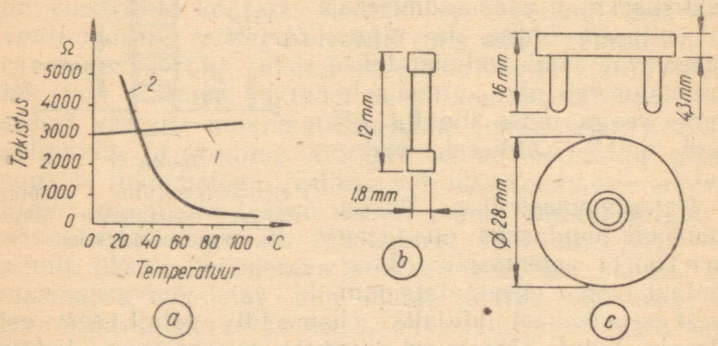
Potentsiomeetriline mõõteelement mehaanilise liikumise mõõtmiseks

Potentsiomeetrilise mõõteelemendi puuduseks on liugkontakti olemasolu. Liugkontakt on ekspluatatsioonilisest seisukohast küllaltki ebameeldiv detail, sest esiteks ta kulub töötamisel kiiresti, teiseks aga kaldub oksüdeeruma, millest tingituna kontakt katkeb. Seepärast võib viimasel ajal täheldada automaatikas püüdu kasutada nn. *kontaktituid automaatika elemente.*

Mõõdetav suurus, näiteks temperatuur, võib ka otseselt mõjutada takistuse suurust. Kuna sellisel juhul on takistuse muutused võrdlemisi väikesed, kasutatakse sageli nn. *sildlülitust,* mis mõnevõrra meenutab paragrahvi alguses käsitletud diferentsiaallülitust. Sildlülituse peaomaduseks on see, et normaalses (tasakaalustatud) olukorras pinge tema väljundklemmidel on null. Silda lülitatud neljast takistusest ühe muutumisel silla tasakaal kaob ja tema väljundklemmidel tekib pinge, mis on teatud piirides enam-vähem võrdeline takistuse muutusega.

Sildlülituse põhimõtet kasutatakse laialdaselt nn. *takistustermomeetrites.* Takistustermomeeter on takisti, mis vastavasse ümbrisesse paigutatuna asub kontrollitava temperatuuriga keskkonnas. Niisugust takistustermomeetrit läbiv vool sõltub takisti temperatuurist. Takistustermomeetri takisti võib olla valmistatud kas metalltraadist (võimaldab mõõta temperatuure −200... +700° C-ni) või pooljuhist. Traadi materjalina kasutatakse näiteks vaske, niklit või plaatinat. Metalli takistuse temperatuuritegur, s. o. tegur, mis näitab takistuse suuruse sõltuvust temperatuurist, on üsna väike (metalli takistus muutub üldiselt vähem kui 1% ühe kraadi kohta).

Seepärast leiavad viimasel ajal kasutamist *pooljuht-takistustermomeetrid.* Pooljuhtide takistus, niisiis vastavalt ka vool säärase termotakistuse vooluringis, sõltub väga suurel määral temperatuurist. Joonisel 10, *a* on graafiliselt



Joonis 10
a — vaskjuhtme (*1*) ja pooljuhttakisti (*2*) takistuse sõltuvus temperatuurist; *b* — termistorite MMT-1 ja KMT-1 gabariitmõõtmed; *c* — fototakisti ФСК-1 gabariitmõõtmed

kujutatud metalljuhtme ja pooljuhttakisti takistuse sõltuvus temperatuurist. Pooljuhid omavad negatiivset temperatuuritegurit — temperatuuri tõustes nende takistus, vastandina metallide takistusele, väheneb. Pooljuht-termotakistid ehk *termistorid* valmistatakse mitmesuguste (metalli-) oksüüdide kuumtöötlemise teel ning neid rakendatakse viimasel ajal väga laialdaselt nii temperatuuri anduritena kui ka voolu-, pinge- või võimsuseanduritena. Viimasel juhul kasutatakse ära asjaolu, et takisti temperatuur sõltub tema elektrilisest koormusest.

Takistustermomeetriga sarnaneb seade g a a s i k o o s t i s e mõõtmiseks, mis põhineb gaasi soojusjuhtivuse muutumisel sõltuvalt koostisest. Gaasiga täidetud ruumi asetatakse peenike elektrivooluga kuumutatav traat. Traadi temperatuur ja järelikult ka takistus oleneb siis sellest, kui suure osa traadis elektrivoolu poolt tekitatavast soojusest gaas ära juhib. Traadi takistuse muutumist võib aga näiteks sildlülituse abil muuta elektrilise pinge muutumiseks.

Sõltuvuste ahel on siin kokkuvõttes järgmine:

gaasi koostis → gaasi soojusjuhtivus → juhtme temperatuur → juhtme takistus → pinge sildlülituse väljundis.

Gaasi püsiva koostise korral võib aga sellelaadilist seadet kasutada gaasi voolamiskiiruse ja järelikult ka ajaühikus toru läbinud gaasihulga määramiseks, sest elektrivooluga kuumutatud traadi temperatuur sõltub ilmselt teda ümbritseva gaasi liikumiskiirusest.

Suurt tähtsust automaatse juhtimise süsteemides omavad *fotoelektrilised seadised.* Fotoelektriline mõõteelement mõõdab valguse hulka, mis langeb mõõteelemendi tundlikule pinnale. Valgushulk omakorda võib iseloomustada näiteks temperatuuri ahjus, sest kõrgema temperatuuri puhul on ahju avast kiirguva valguse hulk suurem. Sel põhimõttel on ehitatud *püromeetriline termomeeter.* Valgushulk võib iseloomustada ka vedeliku hägusust või värvust (*kolorimeetriline analüüs*). Selleks juhitakse valgusvoog läbi kontrollitava vedeliku, kus ta neeldub suuremal või vähemal määral.

Lõpuks võib valgusvoogu kasutada ka konveieril asuvate detailide lugemiseks. Selleks tuleb valgusallikas ja fotoelement paigutada omavahel nii, et iga mööduv detail varjaks hetkeks fotoelemendi. Seega tekib fotoelemendi vooluringis iga detaili möödumisel impulss, mis juhitakse loendajasse.

Käesoleval ajal rakendatakse fotoelektriliste mõõteelementidena peamiselt vaakuum-fotoelemente ja sisemisel fotoefektil põhinevaid pooljuht-fototakisteid. Pooljuht-fototakisteis kasutatakse mõnede pooljuhtide omadust muuta oma elektrilist takistust valgusvoo toimel. Fototakisti ФСК-1 gabariitmõõtmed on toodud joonisel 10, *c.* Pooljuht-fototakistite paremuseks on väikeste mõõtmete kõrval suur tundlikkus, mis ulatub kuni kolme amprini valgusvoo 1 luumeni kohta. Teiste sõnadega, tavalisest tubasest valgusest piisab, et säärane pooljuht-fototakisti võiks rakendada elektromagnetilisi seadmeid elektronvõimendeid kasutamata. Teatud tingimustes leiavad kasutamist ka nn. *fotodioodid* (vt. joonis 18), mis põhinevad germaaniumis või muus taolises materjalis moodustatud tõkkekihi fotoelektrilistel omadustel.

Fototakisti, nagu iga teinegi mõõteelement, ei reageeri mõõdetava suuruse — valgusvoo — muutumisele silma-

pilkselt. Selleks kulub teatud aeg. Fototakistite ФСК-1 ja ФСК-2 puhul on selle aja suuruseks mõni sajandik kuni mõni kümnendik sekundit. Nagu III peatükis selgub, ei ole selline reageerimiskiirus paljudel juhtudel siiski veel küllaldane. Hoopis kiiremini — mõne miljondiku sekundi vältel — reageerivad välisel fotoefektil põhinevad *vaakuum-fotoelemendid.* Kuid vaakuum-fotoelemendi tundlikkus on palju väiksem kui pooljuht-fototakistitel ning et vaakuum-fotoelemendi abil mingit seadet käivitada, on tingimata vajalik elektronvõimendi.

Teatud juhtudel osutuvad otstarbekaks elektrilised mõõteelemendid, mille talitlus põhineb kondensaatori elektrilise mahtuvuse muutumisel. Tasapinnaline kondensaator koosneb teatavasti kahest isoleeraine kihiga teineteisest eraldatud metallplaadist.

Vool, mis läbib vahelduvvooluringi lülitatud tasapinnaliste plaatidega kondensaatorit, on määratav valemiga

$$I_C = \frac{2\pi f S \varepsilon U}{l},$$

kus f on vahelduvvoolu sagedus, S — ühe plaadi pindala, ε — isoleeraine dielektriline läbitavus, U — rakendatud pinge ja l — plaatide vahekaugus. Järelikult on kondensaatorit läbiv vool konstantse pinge ja sageduse korral võrdeline kondensaatori plaatide pindalaga ja kondensaatori plaate isoleeriva aine dielektrilise läbitavusega ning pöördvõrdeline plaatide vahekaugusega. Mõõdetavaks suuruseks on tavaliselt kondensaatori plaatide vahekaugus, mida omakorda võib seostada mitmesuguste muude näitajatega, näiteks rõhuga. Teisest küljest võib säärast mahtuvuslikku mõõteelementi kasutada ka vedeliku dielektrilise läbitavuse mõõtmiseks, kui asetada kindlate mõõtmetega kondensaator läbivoolava vedeliku teele. Dielektriline läbitavus on omakorda sageli vedeliku kontsentratsiooni või koostise näitajaks. Üldiselt vajab mahtuvuslik mõõteelement mitte üksi elektronlampidel töötavat signaali võimendit, vaid ka spetsiaalset kõrge sagedusega vahelduvvoolu generaatorit, sest tavalise tööstusliku vahelduvvoolu puhul on kondensaatorit läbiv vool liiga väike. Säärane generaator valmistatakse üldreeglina kas pooljuhtseadiste või elektronlampide baasil.

Peale mahtuvusliku, induktiivse või oomtakistuse muutumise printsiibil töötavate elektriliste mõõteelementide on olemas veel terve rida mõõteelemente, mis i s e tekitavad elektromotoorset jõudu. Siia kuuluvad juba käsitletud tahhodünamod. Laialdaselt on levinud *termoelement*, milles kasutatakse nähtust, et kahe erineva metalli jootekoha kuumutamisel tekib seal elektromotoorne jõud. Kuigi see elektromotoorne jõud on võrdlemisi väike (mõnikümmend millivolti), sobib termoelement hästi temperatuuri mõõtvaks elemendiks.

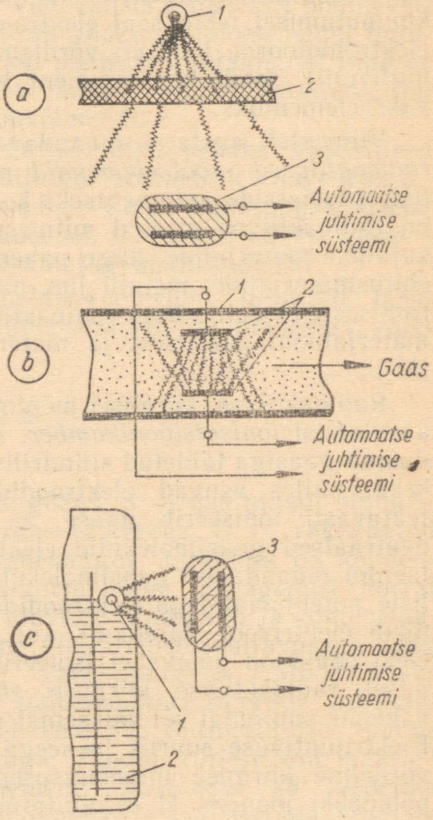
Viimastel aastatel omandavad üha laiemat levikut *radioaktiivsed mõõteelemendid* mitmesuguste tehnoloogiliste protsesside automaatseks kontrollimiseks. Eriti sobiv on radioaktiivne meetod mitmesuguste lindi- või plaadikujuliste materjalide, nagu paberi, tekstiili, mitmesuguste ehitusmaterjalide, metalli jne. paksuse või tiheduse määramiseks. Nimelt sõltub radioaktiivse kiirguse intensiivsus materjalikihi paksusest ja materjali tihedusest, mida ta läbib.

Radioaktiivse kiirguse mõõtmiseks leiab kõige enam kasutamist *ionisatsioonikamber*. Ionisatsioonikambri moodustab gaasiga täidetud silindrilise või muu kujuga õõneskeha, milles asuvad elektroodid. Radioaktiivne kiirgus teatavasti ioniseerib gaase, s. o. muudab elektriliselt neutraalsed gaasimolekulid elektriliselt laetuiks. Elektrilaengu omandanud gaasimolekulid aga liiguvad erinimeliste potentsiaalidega elektroodide suunas — vooluringis tekib elektrivool. Järelikult, kui tavaliselt gaasis asuvad elektroodid on omavahel isoleeritud, siis gaasi ioniseerimisel radioaktiivse kiirguse abil muutub elektroodide vahemik suuremal või väiksemal määral elektrit juhtivaks. Elektrijuhtivuse suurus ja seega ka vool on ligikaudu võrdeline kiirguse intensiivsusega. Kirjeldatud nähtusel põhinebki joonisel 11, *a* kujutatud seadme talitlus. Seade on määratud mistahes materjalist plaadi paksuse mõõtmiseks.

Radioaktiivse kiirguse allikast *1* väljuv kiirgus nõrgeneb seda enam, mida paksem ja tihedam on materjalikiht *2*. Vastavalt nõrgeneb ka vool ionisatsioonikambri *3* vooluringis. Voolu suurusest lähtudes saab reguleerida plaadi paksust määravaid tegureid, näiteks tooraine etteandmise kiirust, valtside vahekaugust vms.

Radioaktiivsed mõõteelemendid on väga paindlikud

oma rakendusvõimaluste mitmekülgsuse ja universaalsuse poolest. Näiteks omab gaaside voolamiskiiruse ja hulga mõõtmine ning reguleerimine suurt tähtsust mitmesugustes energeetilistes ja keemiatööstuse seadmetes. Joonisel



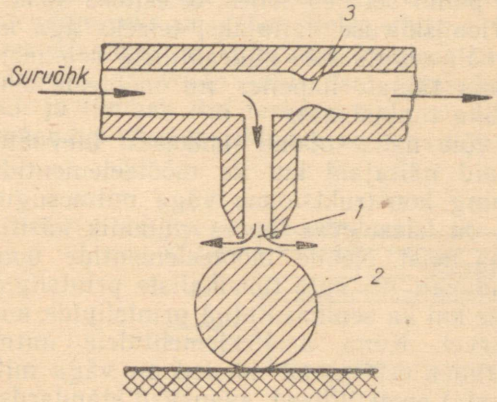
Joonis 11

a — radioaktiivse kiirguse abil plaadi paksust mõõtva seadme tööpõhimõte; *b* — radioaktiivse kiirguse abil töötav mõõteelement gaasi voolamiskiiruse mõõtmiseks; *c* — radioaktiivse kiirguse abil töötav mõõteelement vedeliku nivoo kontrollimiseks

11, *b* on kujutatud seade gaasi voolamiskiiruse mõõtmiseks torus *1*. Siin on elektroodid *2* ise kaetud radioaktiivse preparaadiga. Et gaasivool eemaldab ioniseeritud gaasimolekule pidevalt elektroodide vahelt, väheneb ioonide kontsentratsioon ja järelikult ka elektroodide vahemiku elektrijuhtivus gaasi voolamiskiiruse suurenedes. Joonisel 11, *c* on kujutatud vedeliku nivoo

elektrilise signalisaatori skeem. Radioaktiivne preparaat on siin paigutatud ujukisse *1*. Vedeliku nivoo tõusmisel paagis *2* teatud kõrgusele muutub läbi paagi seina tungiv radioaktiivne kiirgus niivõrd tugevaks, et väljaspool paaki asuvat ionisatsioonikambrit *3* läbiv vool suureneb järsult. Seda voolu võib kasutada näiteks vastava võimendi kaudu vedelikku juurdeandva pumba seiskamiseks. Taoline seade on eriti sobiv siis, kui suure surve, sööbivate vedelike, kõrge temperatuuri vms. tõttu ujuki vahetu sidumine automaatse juhtimise süsteemiga osutub raskeks.

Mitteelektrilised mõõteelemendid. Vaatamata elektriliste meetodite suurele levikule omandavad viimastel aastatel ka *pneumaatilised süsteemid* mitmetes automaatika harudes üha suuremat tähtsust. Pneumaatiliste seadmete suureks paremuseks on nende ehituse äärmine lihtsus.



Joonis 12

Pneumaatiline mõõteelement detaili läbimõõdu kontrollimiseks

Joonisel 12 on kujutatud pneumaatiline mõõteelement detaili mõõtme kontrollimiseks.

Väljuvale õhujoale düüsi *1* poolt avaldatav takistus oleneb detaili *2* paksusest (läbimõõdust). Paksema detaili puhul on detaili pind düüsi avale lähemal ning düüsi

takistus väljuva õhu suhtes suurem. Seega surutakse rohkem õhku läbi diafragma *3* ja järelikult on mõõteelemendist väljuva suruõhu hulk suurem. Õhema detaili puhul on olukord vastupidine, väljuva õhu rõhk väheneb. Väljuv suruõhk võib toimida vahetult pneumaatilises automaatse juhtimise süsteemis, kuid on ka mõeldav õhusurve muundamine mingiks muuks suuruseks, näiteks elektrivooluks vastava mõõteelemendi abil.

Mõnel juhul rakendatakse mõõteelementidena ka hüdraulilisi seadmeid. Väiksemate turboagregaatide juures kasutatakse sageli pöörlemiskiiruse mõõtmiseks väikest turbiinpumpa, nn. *impellerit*. Impeller on vahetult sidurdatud turbiini võlliga, mille pöörlemiskiirust mõõdetakse, ja pumpab vedelikku, näiteks õli. Õli tsirkuleerimise kiirus ja vastavalt surve turbiinpumba väljuva toru juures on teatud ulatuses ligikaudu võrdelised turbiini pöörlemiskiirusega. Seadme otstarbekus väikeste turbiinide puhul seisneb selles, et esiteks õlisurve on turbiini pöörlemiskiiruse näitajaks, teiseks aga kasutatakse sama suruõli regulaatori hüdrauliliste seadmete käitamiseks. Niisiis täidab impeller nii mõõteelemendi kui ka energiaallika funktsiooni.

Nagu võib näha toodud lühikesest ülevaatest, on nii mõõdetavaid näitajaid kui ka mõõteelementide tööpõhimõtteid ning konstruktsioone väga mitmesuguseid. Arusaadavalt on käesolevas teoses võimalik käsitleda ainult väikest osa neist. Nende mõõteelementide nomenklatuur täieneb pidevalt nii uute füüsikaliste printsiipide kasutuselevõtmise kui ka senikasutatud printsiipide uudse rakendamise arvel. Kuna mõõteelementidele mitmesugustes tootmisharudes esitatavad nõuded on väga mitmekesised ning igal alal spetsiifilised, avanevad standardsete mõõteelementide kohandamisel konkreetse tootmisprotsessi tingimustele ja samuti uut tüüpi mõõteelementide loomisel suured võimalused novaatoritele, ratsionaliseerijatele ja leiutajatele.

5. Võimenduselemendid

Automaatse juhtimise süsteemi üldisest struktuurist selgub, et elektriline, pneumaatiline või hüdrauliline signaal juhitakse andurlülist vahendavasse lülisse. Andurlülist väljuv signaal on tavaliselt väikese võimsusega.

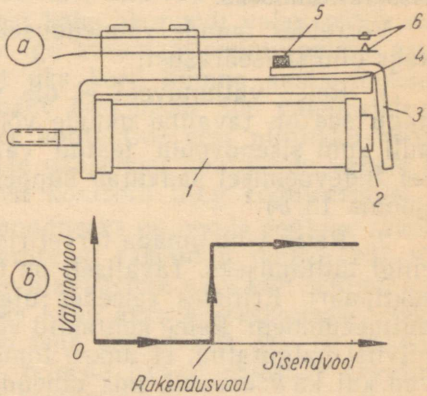
Täiturlüli aga peab juhtima töömasinat, tehnoloogilist protsessi vms., milleks vajatakse üldreeglina küllalt suurt võimsust. Järelikult kujuneb vahendava lüli esimeseks ja kõige põhilisemaks ülesandeks andurlülist väljuva signaali võimsuse suurendamine, s. o. *võimendamine.*

Käesoleval ajal tuntud ning kasutatavate võimendite liikide arv on võrdlemisi piiratud. Elektrilistest võimenditest leiavad kasutamist *releed, elektronlambid, gaaslahenduslambid, pooljuhtvõimendid, magnetvõimendid* ning *elektrimasinvõimendid.* Mitteelektrilisel põhimõttel töötavaist kasutatakse mitmesuguseid *hüdraulilisi* ning *pneumaatilisi võimendeid.*

Igasuguse võimendi töö aluseks on tarbijasse juhitava võimsusehulga d o s e e r i m i n e väikesevõimsuselise signaali abil. Sel viisil tekibki siseneva signaali võimsamaks muutumise efekt, olgugi et väljuva signaali energia pärineb täiel määral lisaallikast.

Releed. Ajalooliselt kõige vanem seade elektriliste signaalide võimendamiseks on *relee.* Relee ehituse üks võimalikke konstruktsioone on kujutatud joonisel 13.

Relee mähisesse *1* voolu juhtimisel terassüdamik *2* magnetiseerub ja tõmbab ligi terasest valmistatud *ankru 3* — relee *rakendub.* Ankur pöördub selle tagajärjel toe-



Joonis 13

a — elektromehaanilise relee ehitus; *b* — relee tunnusjoon; *c* — relee vooluringide tingmärgid: *1* — mähis, *2* — sulguvad kontaktid, *3* — avanevad kontaktid

tuspunkti *4* ümber ja surub oma elektriliselt isoleeritud tipuga *5* vastu relee *kontaktvedrusid 6*. Relee kontaktid sulguvad ning vooluringis tekib vool. Saavutatav võimendusefekt on tavaliste elektromagnetiliste releede puhul üsna suur. Kui mähise poolt tarbitav sisendvõimsus on tavaliselt kuni paarsada m i l l i v a t t i, siis väljuv, s. o. kontaktide poolt ümberlülitatav võimsus võib ulatuda paarisaja v a t i n i. Seega on sellise relee *võimsusevõimendustegur* tuhande ümber. Sõltuvalt relee konstruktsioonist võivad vool ja pinge relee sisend- ja väljundringides olla väga mitmesugused. Tavalise relee rakendamiseks on vaja vähemalt 2—3-milliamprist voolu ja lubatud pinge kontaktide vooluringis on 100 kuni 200 volti. Kontaktide poolt lülitatav vool ulatub kuni 1 amprini.

Peale tavaliste releede (näiteks *telefonireleed* ja *koodreleed*) on kasutusel veel eriti tundlikud *polariseeritud releed* ja eriti suure võimsusega releed — *kontaktorid*. Polariseeritud relee rakendamiseks piisab enamasti millivati murdosadest, vastavalt aga ka võimsus, mida polariseeritud relee kontaktid on suutelised lülitama, on tunduvalt väiksem kui tavalisel telefonireleel. Kontaktori elektromagnet seevastu võib tarbida elektrienergiat kuni sadu vatte, ent kontaktori kontaktide süsteemi ehitus sobib kuni mitmekümne kilovatise võimsusega elektrimootorite sisselülitamiseks.

Võrreldes muude võimenduselementidega on releedel kaks olulist iseärasust.

1. Relee väljundvool ei ole võrdeline sisendvooluga, nagu see on tavaline muude võimendite juures, vaid on null kuni sisendvoolu teatud väärtuseni ja selle edasisel tugevnemisel saavutab hüppeliselt maksimaalväärtuse (joonis 13, *b*).

2. Relee võib omada tervet rida kontakte mitme vooluringi lülitamiseks. Tavaliselt on telefonireleedel 2—6 kontaktipaari. Erilistes releedes ulatub kontaktipaaride arv mitmekümneni. Relee kontaktid võivad olla *sulguvad*, s. o. niiviisi paigutatud, et ankru tõmbumisel kontaktid sulguvad, kui ka *avanevad*, mis tähendab seda, et rakendumata relee puhul kontaktid on suletud, relee rakendumisel aga kontaktid avanevad ja katkestavad vooluringi. Relee mähiste ja kontaktide, s. o. tema sisend- ja väljundringide skemaatiline kujutamine lülitusskeemides on toodud joonisel 13, *c*.

Nimetatud iseärasused teevad relee kohaseks elemendiks mitmesuguste automaatikasüsteemide ehitamisel. Kümneid ja sadu tuhandeid releesid on automaattelefonikeskjaamades; esimesed elektrilised arvutusmasinad ehitati releede alusel; mitmesugused automaatsed ja poolautomaatsed agregaadid tööstuses on varustatud keerukate releelülitustega, mis lülitavad kontaktorite kaudu agregaadi mitmesuguseid osi käitavaid mootoreid vajalikkudel hetkedel sisse või välja. Ometi on releedel rida puudusi. Seepärast võib viimasel ajal märgata tendentsi releede asendamiseks täiuslikumate, kontaktitute elementidega. Teisest küljest tehakse ka katseid releede moderniseerimiseks, et nende puudusi kõrvaldada. Kõige suuremaks releede puuduseks on mehaaniliste kontaktide olemasolu. Kuigi kontaktid valmistatakse kõrgekvaliteedilistest materjalidest, hõbedast, volframist või isegi plaatinast, kuluvad nad üsna kiiresti. Tavalise relee kontaktid peavad vastu «kõigest» umbes ühe miljoni ümberlülituse ümber. Kui relee rakendub kord sekundis, võib ta järelikult töötada umbes kuu aega. Tegelikult töötavad enamikus seadmetes releed siiski tunduvalt harvemini. Raskemaks kujuneb kasutusea küsimus, kui on tegemist seadmega, mis sisaldab suurt arvu releesid. Näiteks 10 000-numbrilise mahuga automaattelefonijaam sisaldab 50 000 kuni 70 000 releed, mis omavad kuni 500 000 kontakti. Ühenduse loomisest kahe abonendi vahel võtab osa umbes 170 kontakti. Kui iga automaattelefonijaamas asuv kontakt «eksib» kõigest üks kord kümne aasta jooksul, siis tekib jaamas iga päev keskmiselt 100 valeühendust. Seepärast kantakse relee kontaktide eest piinlikku hoolt: välditakse tolmukübemete pääsemist kontaktide vahele ja teostatakse süstemaatilist kontrolli ning reguleerimist.

Teiseks releede põhipuuduseks on nende aeglane rakendumine. Tavaline telefonirelee rakendub umbes 20—100 millisekundi jooksul. See ajavahemik näib küll tühine, aga kui arvestame, et näiteks kahe arvu korrutamiseks elektronarvutusmasinas tuleb teha keskmiselt 20—50 üksikut operatsiooni, näeme, et releede baasil ehitatud arvutusmasin ei saa olla kiirelt toimiv.

Lõpuks peab veel märkima, et relee võib leida rakendamist mitte üksnes võimendava, vaid ka m õ õ t v a elemendina. Paljudel juhtudel nimelt on tarvis mõõta mitte lihtsalt elektripinge või -voolu väärtust, vaid just selle

kõrvalekaldumise suurust teatud etteantud väärtusest. Selline vajadus tekib näiteks *stabilisaatorites*, mille ülesandeks on elektripinge või -voolu püsiva väärtuse säilitamine. Mõõteelemendina kasutatav relee konstrueeritakse nii, et relee rakendusvool (vt. joonis 13, *b*) (või pinge) võrdub etteantud voolu väärtusega (või pinge väärtusega vooluringis, kuhu on lülitatud relee). Kui mõõdetav pinge või vool on väiksem etteantud väärtusest, siis vool relee kontaktide vooluringis puudub. Kui aga vool või pinge ületab vajaliku väärtuse, siis relee rakendub. Relee kontaktid annavad vastava signaali edasi automaatse reguleerimise süsteemi. Tuleb märkida, et säärane mõõteelement ei ole kuigi täpne. Seepärast leiab ta kasutamist ainult kõige lihtsamatel juhtudel, kui nõutav reguleerimise täpsus ei ole suur.

Elektronvõimendid. *Elektronlamp* on olnud seni kõige paindlikum, universaalsem ja täiuslikum olemasolevatest võimendavatest seadistest. Elektronlamp on praktiliselt inertsivaba. Aeg, mis kulub signaali saabumisest elektronlambi sisend- (võre-) ringi kuni selle väljumiseni väljund- (anood-) ringi kaudu, ulatub sõltuvalt lambi tüübist ja lülitusest kümnetest nanosekunditest (10^{-9} sek.) kuni mõne mikrosekundini (10^{-6} sek.). Vool elektronlambi võreringis on peaaegu null, seepärast võrdub ka sisenev võimsus praktiliselt nulliga.

Elektronlambi võimsuse võimendustegur

$$k = \frac{\text{väljundvõimsus}}{\text{sisendvõimsus}}$$

läheneb lõpmatusele. Muud automaatikas kasutatavad võimendusseadmed aga vajavad põhimõtteliselt teatud võimsust oma sisendringis, mistõttu nende võimsusevõimendustegur võib olla küll suur, kuid ei lähene lõpmatusele. Nimetatud positiivsete omaduste kõrval, mis teevad elektronlambi asendamatuks mitmesuguses keerukas aparatuuris, on tal automaatika seisukohalt siiski terve rida puudusi. Tänapäeval toodetavate elektronlampide garanteeritud kasutusiga on harva üle tuhande töötunni. Viimasel ajal väljatöötatud spetsiaalsete «pikaealiste» elektronlampide garanteeritud kasutusiga ulatub 10 000 tunnini. Ent seegi pole küllaldane, sest näiteks elektroonikaseadmes, mis sisaldab 1000 elektronlampi, tuleb sel juhul

keskmiselt iga 10 tunni järel üks lamp asendada uuega! Kasutuseaga on lähedalt seotud elektronlambi *töökindlus* ehk usaldatavus. Elektronlamp on üsna tundlik vibratsiooni, põrutuse ja ülekoormuse suhtes. Ta läheb kergesti rikki elektroodide omavahelisel kokkupuutumisel, küttenii di läbipõlemisel ning real muudel põhjustel. Automaatikaseadmeis, mis juhivad suurte, kalliste ja keerukate mehhanismide tööd, on täiesti lubamatu, et näiteks miljoneid rublasid maksev hüdroturbiin satuks ohtu mõne elektronlambi rikke tõttu tema automaatses regulaatoris. Seepärast ollakse siin sunnitud kasutama nii-öelda automaatikat automaatikas. Selleks koostatakse keerukad seadmed, mis mõne elektronlambi riknemisel lülitavad automaatselt sisse reservelektronlambi. Kõigele lisaks tarvitab elektronlamp suhteliselt palju ruumi ja energiat. Kõik need puudused on viinud paljudel juhtudel elektronlampide asendamiseni pooljuht- ning magnetiliste elementidega. Sellest hoolimata on ilmne, et elektronlamp, kohandudes tehnilise loominguprotsessi käigus automaatika nõudmistega, säilitab oma tähtsuse teatud rakendustes.

Elektronlambi moodustab klaasist, metallist või keraamilisest materjalist valmistatud, kõrgvaakuumini tühjendatud balloon, millesse on paigutatud rida *elektroode*.

Elektroodide arvust tuleneb lambi nimetus: diood — kahe elektroodiga, triood — kolme elektroodiga, tetrood — nelja elektroodiga, pentood — viie elektroodiga jne.

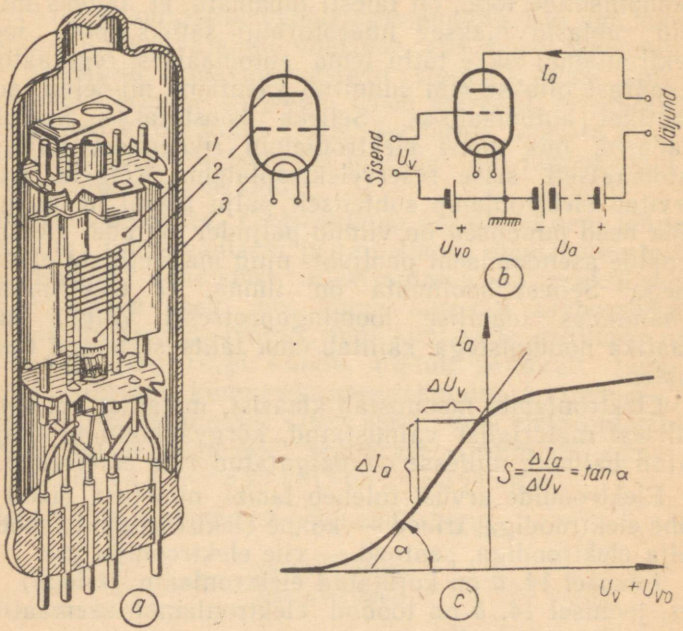
Joonisel 14, *a* on kujutatud elektronlamp (triood) lõikes, joonisel 14, *b* on toodud elektronlambi skemaatiline kujutis koos toiteallikatega.

Trioodi anoodile *1* rakendatakse katoodi *3* suhtes positiivne potentsiaal — anoodpinge U_a, võrele *2* aga negatiivne potentsiaal — võre-eelpinge U_{v0}, millega liidetakse võimendatav vahelduv- või alalispinge — võrepinge U_v.

Elektronlambi talitlus põhineb kuumendatavalt katoodilt anoodile liikuvate elektronide voo muutumisel võrepinge mõjul. Seega kui rakendada võrele muutuv pinge, siis muutub ka anoodvool samasugusel viisil, korrates võrepinge muutumist. Anoodringis tekib alalisvoolu kõrval vahelduvkomponent, mille võimsus on palju suurem kui võreringis tarbitav võimsus.

Elektronlambi võimendusomadusi iseloomustatakse graafiliselt *tunnusjoonte* abil. Automaatikaseadmete

puhul on kõige olulisem tunnusjoon, mis näitab anoodvoolu sõltuvust võrepingest (joonis 14, *c*). Nagu graafikult selgub, muutub anoodvool teatud võrepinge väärtuste ulatuses ligikaudu võrdeliselt võrepingega. Seda võrepinge väärtuste piirkonda nimetatakse ka elektronlambi



Joonis 14

a — elektronlambi (trioodi) ehitus; *b* — trioodi lülitusskeem koos toiteallikatega; *c* — trioodi tunnusjoon

võrekäiguks. Elektronlambi üheks tähtsamaks iseloomustussuuruseks on tunnusköövera *tõus*. Tõus *S* näitab, mitme milliampri võrra muutub anoodvool võrepinge muutumisel ühe voldi võrra. Tavaliselt on tõusu *S* väärtus sõltuvalt lambi tüübist 1—20 milliamprit voldi kohta (mA/V). Siit järeldub, et ühestainsast elektronlambist automaatikaseadme funktsioneerimiseks sageli ei piisa, sest mõõteelementide poolt antav pinge piirdub tavaliselt millivolti-

dega, täiturelemendi, näiteks väikese elektrimootori käitamiseks tarvilik vool on aga vähemalt paarkümmend milliamprit.

Sellistel juhtudel kasutatakse *mitmeastmelisi* võimendeid. Mitmeastmelise võimendi esimestes astmetes töötavad väikese võimsusega elektronlambid, mille ülesandeks on p i n g e võimendamine, s. o. siseneva vahelduvpinge amplituudi suurendamine. Kui pinge on võimendatud niisuguse suuruseni, et tema amplituud on võrreldav lõppastme lambi võrekäigu ulatusega, siis juhitakse ta võimsa lõppastme lambi võrele. Lõppastme anoodvooluga käitatakse täiturelementi.

Elektronlampidega töötavad võimendid jagunevad kaheks suureks põhiliigiks:

1) alalisvooluvõimendid,
2) vahelduvvooluvõimendid.

Alalisvooluvõimendites on üksikute võimendusastmete vaheline sidestus teostatud selliselt, et võimendit läbivad kuitahes aeglased esimese astme võrele juhitud pingemuudatused, s. o. kuitahes madala sagedusega vahelduvvoolusignaal. Alalisvooluvõimendi võimendusteguri K sõltuvus sisendsignaali sagedusest on kujutatud joonisel 15, *a*. Nagu sellelt jooniselt näha võib, ei sõltu alalisvooluvõimendi võimendus sisendpinge muutumise kiirusest (sagedusest). Ainult väga kõrgetel sagedustel võimendustegur langeb.

Joonisel 15, *b* on kujutatud kolmeastmeline alalisvooluvõimendi. Esimese astme võimenduslambile antakse anoodpinge +200 V läbi koormustakisti R_{a1}. Lambi EL_1 anoodvool, läbides takisti R_{a1}, tekitab sellel pingelangu

$$U_{a1} = R_{a1} I_{a1},$$

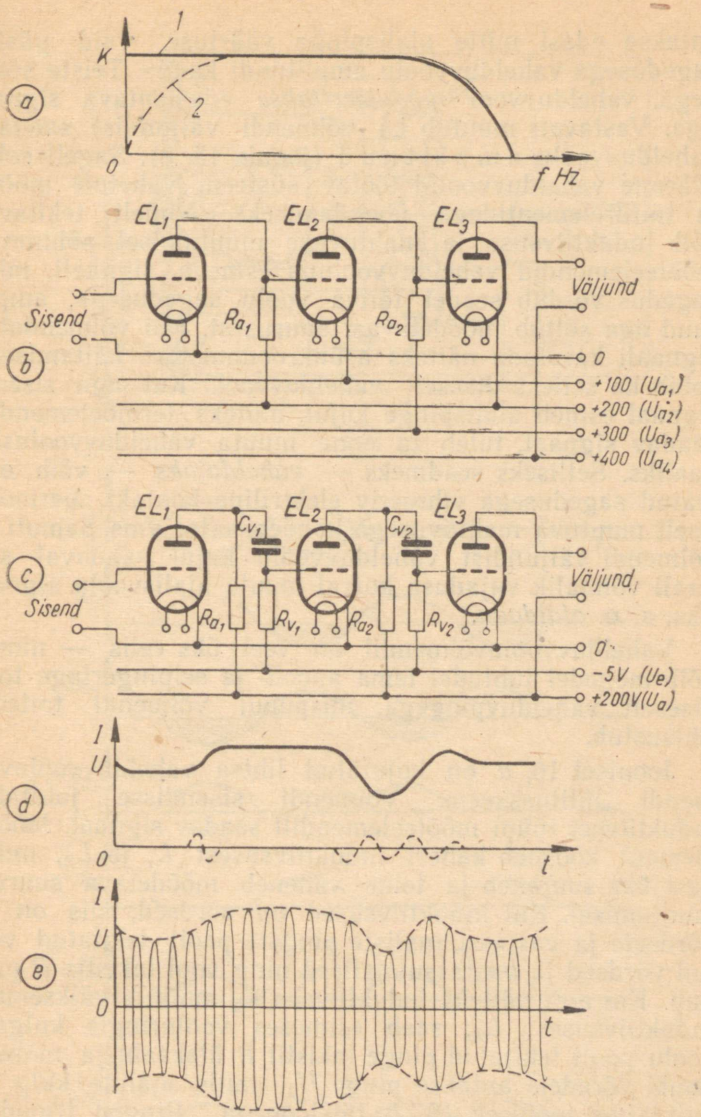
kus I_{a1} on lambi anoodvool. Et tagada järgmise astme võrele vajalik negatiivne eelpinge katoodi suhtes, tuleb viimasele anda positiivne potentsiaal, näiteks käesoleval juhul ühendada katood toitejuhtmega +100 V. Järgmise astme anoodile aga tuleb siis anda suurem positiivne potentsiaal, käesoleval juhul +300 V. Kolmanda astme jaoks on vajalik veelgi kõrgem potentsiaal. Järelikult niisuguse alalisvooluvõimendi anoodtoiteks vajaliku patarei või muu vooluallika pinge kasvab võrdeliselt astmete

arvuga. Et aga astmete arv ulatub harva üle nelja, on see asjaolu vähema tähtsusega. Kuid alalisvooluvõimendil on teine, palju olulisem puudus. Nimelt võimendab iga aste (lamp) sisenevat pinget keskmiselt 30—50 korda. Järelikult võib kolmeastmelise võimendi üldine pingevõimendustegur ulatuda kuni 125 000-ni. See tähendab, pinge muutumine esimese astme võrel 10 mikrovoldi (kümne miljondiku voldi) võrra põhjustab pinge muutumist viimase astme anoodringis 1,25 voldi võrra. Alalisvooluvõimendi võimendab vastavalt oma ehitusele ja otstarbele kuitahes aeglaselt muutuvaid signaale. Just sääraseks signaaliks on ka nn. *triiv*, s. o. esimese lambi anoodil esineva pinge aeglane muutumine lambi vananemisel, toiteallikate pinge muutumisel ja muudel põhjustel. Selle tõttu tekkinud ebasoovitav signaal, nn. nullpunkti nihkumine, võib alalisvooluvõimendites tunduvalt ületada kasuliku, võimendatava signaali suuruse. Et mainitud raskusi vältida, kasutatakse automaatikaseadmeis peamiselt *vahelduvvooluvõimendeid.*

Vahelduvvooluvõimendi sagedustunnusjoon on kujutatud samuti joonisel 15, *a*. Nagu sellelt nähtub, on vahelduvvooluvõimendi võimendustegur alalisvoolu puhul n u l l. Seepärast igasugused häirivsignaalid, mis on tingitud lampide omaduste või toitepingete aeglasest muutumisest, jäävad praktiliselt võimendamata.

Nagu selgub lülitusskeemilt (joonis 15, *c*), vajab vahelduvvooluvõimendi peale küttepinge ainult kahte toitepinget: *anoodpinget* (kõikidele astmetele ühine) ja *võre-eelpinget* (samuti kõikidele astmetele ühine). Võimendusastmed sidestatakse kondensaatorite C_v abil, mis lasevad läbi ainult vahelduvpinget, tõkestades alalispinge läbipääsu. Seetõttu on võimalik lampidele võre-eelpinget anda iseseisvate vooluringide, nimelt takistite R_v kaudu.

Vahelduvvooluvõimendi kasutamisel tuleb arvestada järgmist asjaolu. Kui juhtida võimendi sisendisse signaal, mille ajaline kulg on kujutatud joonisel 15, *d*, annab võimendi edasi ainult signaali kiired muutumised (ligikaudu kujutatud joonisel 15, *d* punktiiris). Signaali püsivad väärtused jäävad edasi andmata. Tekivad nn. *lineaar-* ehk *sagedusmoonutused,* mis võivad esialgse signaali tundmatuseni moonutada. Seepärast kasutatakse vahelduvvooluvõimendi puhul raadiotehnikast hästi tuntud võtet. Automaatikaseadme juhtimiseks tarvilik signaal



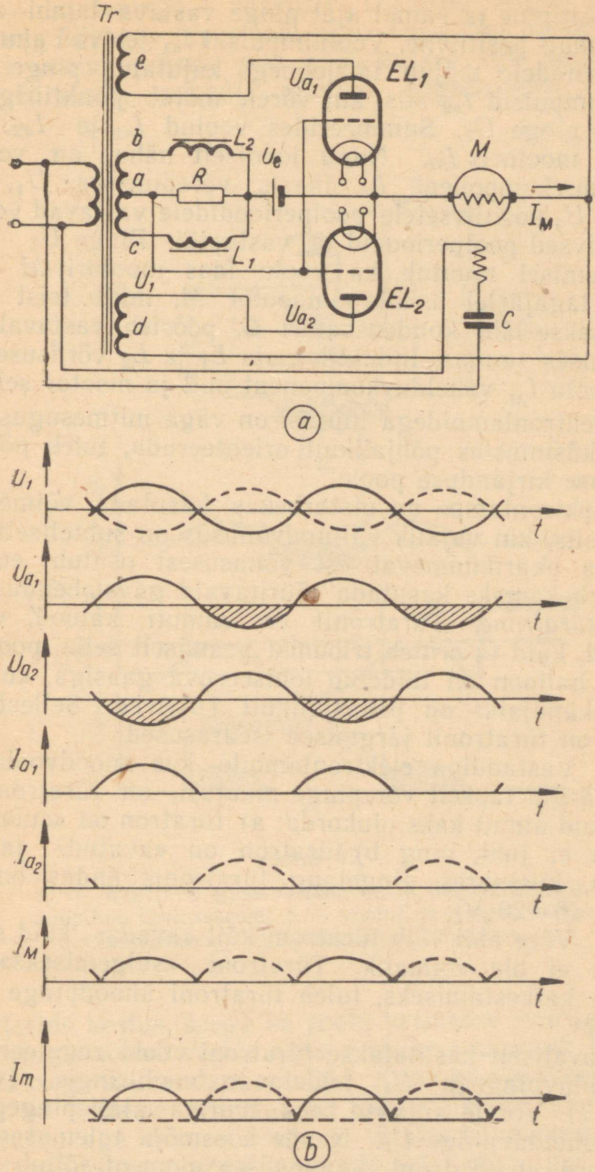
Joonis 15

a — alalisvooluvõimendi (*1*) ja vahelduvvooluvõimendi (*2*) sagedustunnusjoon; *b* — alalisvooluvõimendi lülitusskeem; *c* — vahelduvvooluvõimendi lülitusskeem; *d* — signaali edasiandmine alalisvoolu abil; *e* — signaali edasiandmine moduleeritud vahelduvvoolu abil

antakse edasi mitte alalispinge väärtuse, vaid püsiva sagedusega vahelduvvoolu amplituudi kaudu. Teiste sõnadega, vahelduvvool *moduleeritakse* edasiantava signaaliga. Vastavalt muutub ka võimendi väljundist saadava vahelduvvoolu amplituud (joonis 15, *e*). Sageli sobib säärane vahelduvvoolul töötav süsteem vahetult mõõteja täiturelementidega ühendamiseks. Nimelt tekitavad kõik induktiivsuse ja mahtuvuse muutumisel põhinevad mõõteelemendid vahelduvvooluna esineva signaali, mille sagedus võrdub seadet toitva voolu sagedusega, amplituud aga sõltub mõõdetavast suurusest. Kui võimendatud signaali kasutada näiteks asünkroonmootori käitamiseks, sobib ka selleks otseselt vahelduvvool. Kui aga sisendsignaal esineb alalispinge kujul, näiteks termoelemendist saadav signaal, tuleb ta enne muuta vahelduvvoolusignaaliks. Selliseks seadmeks — *vaheldajaks* — võib olla teatud sagedusega vibreeriv elektriline kontakt, perioodiliselt muutuva mahtuvusega kondensaator vms. Samuti on võimendi väljundist vahelduvvoolu kujul saadavat signaali võimalik vajaduse korral muuta alalisvoolu signaaliks, s. o. *alaldada.*

Vahelduvvooluvõimendil on veel üks eelis — nimelt võib mõnedel juhtudel tema anood- ja eelpingeringe toita otseselt vahelduvpingega, mispuhul võimendi toiteosa lihtsustub.

Joonisel 16, *a* on kujutatud lihtsa vahelduvvooluvõimendi lülitusskeem. Võimendi sisendisse juhitakse induktiivset tüüpi mõõteelemendilt saadav signaal. Mõõteelement koosneb kahest induktiivsusest L_1 ja L_2, milledest üks suureneb ja teine väheneb mõõdetava suuruse muutumisel. Kui induktiivsused on võrdsed, siis on ka võrdsete ja vastassuunaliste pingete poolt tekitatud voolud võrdsed ja vastassuunalised ning vool takistis R puudub. Kui aga näiteks induktiivsus L_1 muutub väiksemaks induktiivsusest L_2, saab esimeses vooluringis kulgeva voolu poolt tekitatud pinge takistil R ülekaalu ja mõlema lambi võredele antakse pinge U_1, mille ajaline kulg on kujutatud joonisel 16, *b* täisjoonega. Pinged trioodide EL_1 ja EL_2 anoodidel on kujutatud samal joonisel. Nagu näha, on need pinged *vastasfaasis,* s. o. ühe maksimum ühtib ajaliselt teise miinimumiga. Negatiivse pinge puhul anoodil lamp voolu ei juhi (viirutatud alad). Järelikult juhib lamp voolu ainult neil poolperioodidel, mil pinge U_1



Joonis 16

a — otseselt vahelduvpingega toidetava vahelduvvooluvõimendi lülitusskeem; *b* — voolud ja pinged sama lülitusskeemi mitmesugustes punktides

on positiivne ja samal ajal pinge vastava lambi anoodil on samuti positiivne. Vooluimpulsid I_{a1} tekivad ainult siis, kui võredele mõjub täisjoonega kujutatud pinge U_1, ja vooluimpulsid I_{a2} siis, kui võrele mõjub punktiiriga näidatud pinge U_1. Summeerides voolud I_{a1} ja I_{a2}, saame voolu mootoris I_M. Nagu jooniselt näha, on voolu I_M vahelduvkomponent I_m faasis võrepingega U_1, s. o. pinge U_1 positiivsetele poolperioodidele vastavad voolu I_m positiivsed poolperioodid ja vastupidi. Pinge U_1 faasi muutumisel muutub ka voolu faas mootori M ahelas. Selle tagajärjel asünkroonmootor M, mille teist mähist toidetakse läbi kondensaatori C, pöörleb vastavalt ühes või teises suunas. Induktiivsuste L_1 ja L_2 võrdsuse puhul on voolu I_M vahelduvkomponent null ja mootor seisab.

Elektronlampidega lülitusi on väga mitmesuguseid. Et neis küsimustes põhjalikult orienteeruda, tuleb pöörduda erialase kirjanduse poole.

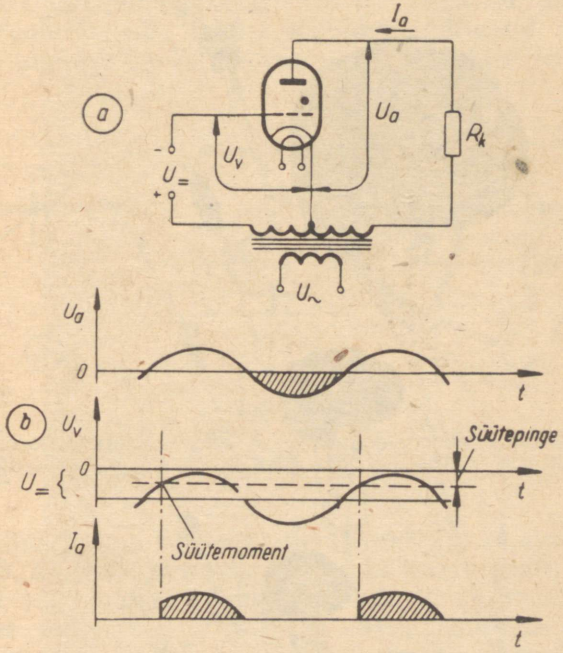
Elektronlampe on otstarbekas kasutada võimendamiseks siis, kui vajalik väljundvõimsus on suhteliselt väike. Alates paarikümnevatisest võimsusest osutub enamasti otstarbekamaks kasutada tüüritavaid gaaslahenduslampe, nn. *türatrone*. Türatronil on samuti katood, võre ja anood, kuid ta erineb trioodist peamiselt selle poolest, et tema balloon on täidetud ioniseeruva gaasiga, kusjuures voolukandjaiks on peaasjalikult ioonid. Sellest tingituna on türatronil järgmised iseärasused.

1. Vastandina elektronlambile, kus anoodvoolu tugevus järgib täpselt võrepinge muutusi, on türatronis võimalikud ainult kaks olukorda: a) türatron on «suletud» ja voolu ei juhi, ning b) türatron on «avatud» ja juhib voolu, kusjuures pingelang türatronis endas on üsna väike (6—20 V).

2. Võre abil võib türatroni küll «avada», kuid sulgeda enam ei ole võimalik. Türatroni «sulgemiseks», s. o. voolu katkestamiseks, tuleb türatroni anoodpinge muuta nulliks.

Tavaliselt kasutatakse türatroni voolu reguleerimiseks vahelduvpingega U_a toidetavas vooluringis (vt. joonis 17). Võrele antakse koos tüüriva alalispingega $U_{=}$ ka vahelduvpinge U_v. Nende koosmõju tulemusena tekib olukord, et türatroni «avanemise» moment sõltub tüüriva alalispinge suurusest. Nimelt «avaneb» türatron iga kord sel hetkel, kui võrepinge ületab avanemiseks vajaliku

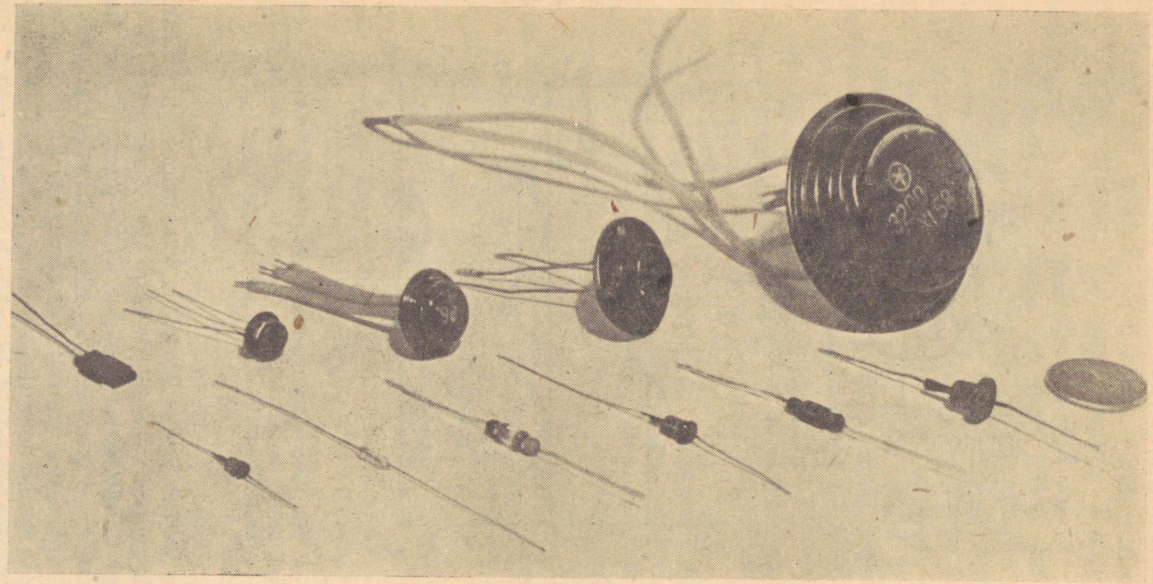
pinge — süütepinge— väärtuse. Türatron sulgub anoodpinge negatiivse poolperioodi ajal. Türatroni anoodringis tekivad vooluimpulsid, sest vool katkeb iga kord, kui pinge türatroni anoodil muutub negatiivseks. Voolu-



Joonis 17

a — tüüritava gaaslahenduslambi tingmärk ning tüüpiline lülitusskeem; *b* — voolud ja pinged sama lülitusskeemi mitmesugustes punktides

impulsside kestus, seega ka voolu keskmine suurus tarbija vooluringis sõltub võrele antava pinge suurusest. Nii saavutataksegi võimendamise efekt. Kuna energiakaod türatronis on väikese pingelangu tõttu väikesed, anoodvoolu väärtused aga üsna suured, on türatroni kasutegur suur. Türatrone ja muid sedaliiki seadmeid, nagu *ignitrone* ja *tüüritavaid elavhõbealaldeid,* võib kasutada väga suurte võimsuste reguleerimiseks. Käesoleval ajal ehitatakse tüü-



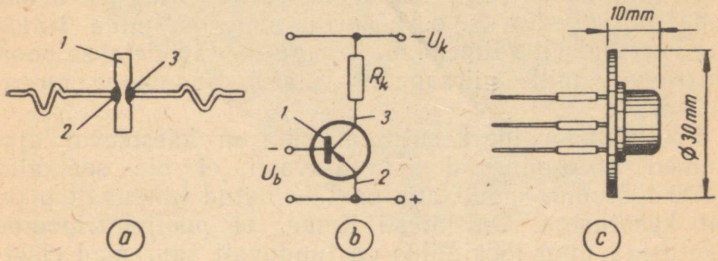
Joonis 18

Pooljuhtelemendid. Esireas pooljuhtdioodid, taga pooljuhttrioodid; vasakpoolne äärmine element—fotodiood

ritavaid elavhõbealaldeid kümnete megavattideni ulatuvate võimsuste reguleerimiseks.

Viimasel ajal on leidnud väga laia rakendamist elektronlambi «järglased» — pooljuhttrioodid ehk transistorid ja pooljuhtdioodid.

Pooljuhtvõimendid. Pooljuhttrioodide peamisteks eelisteks elektronlampidega võrreldes on väikesed mõõtmed, väike voolutarvitus, madal tööpinge, kütteniidi puudumine ja tunduvalt pikem kasutusiga kui elektronlambil.



Joonis 19

a — pooljuhttrioodi ehitus; *b* — pooljuhttrioodi tingmärk ning lülitusskeem; *c* — võimsustrioodi П4А gabariitmõõtmed

Pooljuhttrioodi põhimõtteline ehitus on kujutatud joonisel 19, *a*. Pooljuhttrioodi põhiliseks koostisosaks on keemiliselt väga puhas germaaniumikristall (lisandeid mitte üle ühe miljondiku protsendi). Plaadikujulise kristalli külge, mida nimetatakse *baasiks 1*, on keevitatud kahelt poolt kaks elektroodi, nn. *emitter 2* ja *kollektor 3*.

Pooljuhttrioodi kasutatakse automaatikas tavaliselt nn. ühise emitteriga lülituses (joonis 18, *b*), mispuhul trioodi võimendustegur on suurim. Kui sisendpinge on null, on ka vool kollektoriringis nulli lähedal. Sisendpinge tõusmisel tugevneb vool nii baasi- (sisend-) kui ka kollektoriringis. Seega tarbib pooljuhttriood erinevalt elektronlambist ka sisendringis võimsust. Iseloomulikuks suuruseks pooljuhttrioodi puhul on *vooluvõimendustegur* β, mis näitab, mitu korda on voolu muutus kollektoriringis suurem voolu muutumisest baasiringis. Tavalistel trioodidel vooluvõimendustegur $\beta = 20 \div 50$. Kollektorile antava pinge U_k suuruseks on 2—50 volti.

Pooljuhttrioodid, samuti nagu elektronlambidki, jagunevad väikese võimsusega trioodideks, mida kasutatakse signaalide eelnevaks võimendamiseks, ja suure võimsusega trioodideks, mida kasutatakse võimendajate väljundastmetes. Joonisel 19, *c* on kujutatud võimsustrioodi П4А gabariitmõõtmed. Säärase trioodi väljundvõimsus on umbes 20 vatti. Käesoleval ajal toodetakse veelgi suuremaid, sajavatise väljundvõimsusega pooljuhttrioode. Sellised trioodid leiavad edukat kasutamist mitmesugustes automatiseeritud elektriajamites.

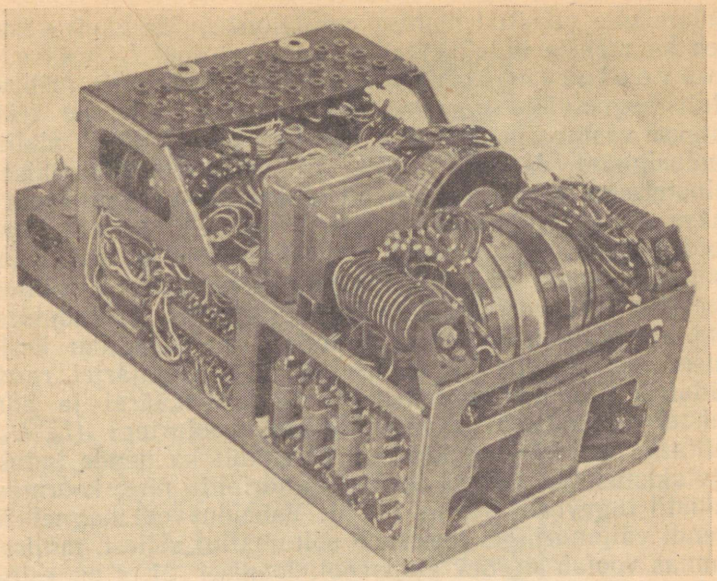
Pooljuhttrioodide rakendamist piiras algul nende madal *piirsagedus*, s. o. kõrgeim sagedus, mida triood veel normaalselt võimendab. Praegu aga toodetakse pooljuhttrioode, mille piirsagedus ulatub sadadesse megahertsidesse.

Pooljuhttrioodide kasutusea kohta on käesoleval ajal andmed lahkuminevad. Arvatavasti ei ole see alla 10 000 töötunni, sageli aga on täheldatud tunduvalt pikemat kasutusiga. On täiesti ilmne, et pooljuhttrioodide kasutusiga ning töökindlus on tunduvalt suuremad elektronlampide vastavaist näitajaist.

Pooljuhttrioodide põhiliseks puuduseks on nende parameetrite (võimendustegur jne.) ebapüsivus ning suur sõltuvus temperatuurist. Need asjaolud takistavad suurel määral pooljuhttrioodide rakendamist teatud lülitustes, kus parameetrite püsivus on esmajärgulise tähtsusega. Ometi on paljudel juhtudel võimalik koostada lülitusi, kus parameetrite tunduv muutumine ei halvenda seadme töötamist. Teisest küljest on konstrueeritud ning toodetakse pooljuhttrioode räni baasil, millede termiline stabiilsus on tunduvalt suurem.

Pooljuhttrioode kasutatakse väga mitmesugustes automaatikaseadmetes, ent eriti sobivad on nad numbriliste elektronarvutusmasinate koostisosadena. Üldiselt aga saab pooljuhttrioode rakendada samaks otstarbeks kui elektronlampegi. Samuti kasutatakse lampdioodide asemel vahelduvvoolu alaldamiseks ulatuslikult pooljuhtdioode.

Magnetvõimendid. Väga heade ekspluatatsiooniliste omadustega võimendi tüübiks on *magnetvõimendi*. Koosnedes raudsüdamikust koos sellel asuvate mähistega, s. o. omades tavalise transformaatori tugevat konstruktsiooni, sobib ta hästi kasutamiseks tehaste tsehhides.



Joonis 20

Mitmeastmeline magnetvõimendi. Joonisel on eraldatavad magnetvõimendi üksikud toroidaalsetest elementidest koostatud astmed

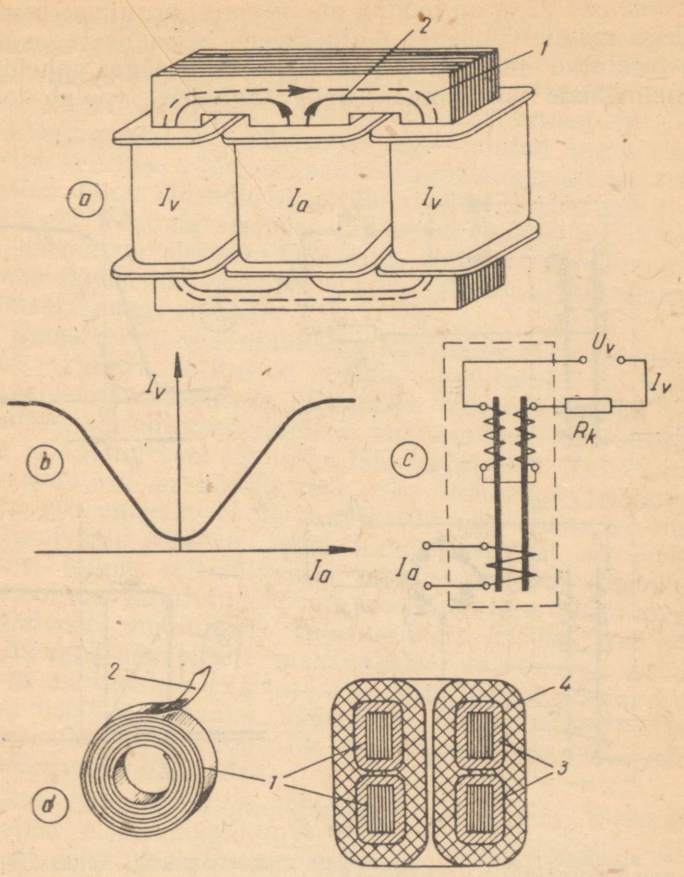
Magnetvõimenditel puuduvad liikuvad osad ja mehaanilised kontaktid, nagu need esinevad näiteks releedel; samuti puuduvad siin kunstlikult loodud tingimustes (väga kõrge vaakuum, ülipuhtad pooljuhid) toimuvad keerukad protsessid. Seepärast ei vaja magnetvõimendi praktiliselt mingisugust hooldamist ja tema kasutusiga on peaaegu piiramatult suur. Samuti sobib ta ühtlaselt hästi väga suurte kui ka väga väikeste võimsuste võimendamiseks alates mikrovattidest ja lõpetades megavattidega. Magnetvõimendi puudusteks on võrdlemisi suured gabariidid ja suur kaal ning aeglane reageerimine sisendsignaali muutustele.

Magnetvõimendi töö põhineb nähtusel, et mitmesugused ferromagnetilised materjalid, peaasjalikult raud, muudavad oma magnetilisi omadusi magnetvälja toimel. Nimelt väheneb raua magnetiline läbitavus tema magneetimisel alalismagnetväljas. Selle tagajärjel väheneb raud-

südamikule mähitud mähise induktiivsus. Järelikult väheneb ka mähise induktiivtakistus. Seega vool I_v vahelduvvooluringis, mis sisaldab mainitud mähist, alalismagnetvälja tugevnemisel suureneb. Viimane tekitatakse vastava mähise abil, kus tsirkuleerib tüüriv alalisvoolusignaal I_a. Et alalis- ja vahelduvvoolumähised teineteisega transformatoorselt seotud poleks, konstrueeritakse magnetvõimendi tavaliselt selliselt, et vahelduvvooluringide magnetvood *1* oleksid võrdsed ja vastassuunalised (joonis 21, *a*) alalismagnetvoogude *2* suhtes. Seetõttu alalisvoolumähises vahelduvpinget ei indutseerita. Alalisvoolusignaal I_a juhitakse raudsüdamiku keskmisel sambal asuvasse mähisesse. Selle tagajärjel raudsüdamik küllastub suuremal või vähemal määral ja äärmistel sammastel asuvasse vahelduvvooluringi (I_v, U_v) lülitatud mähiste induktiivsus, järelikult ka nende induktiivtakistus väheneb ja vool väljundringis ning koormustakistil tugevneb (joonis 21, *b*). Vahelduvvool magnetvõimendi väljundringis tugevneb sõltumatult sellest, millises suunas voolab sisenev alalisvool. Joonisel 21, *c* on esitatud magnetvõimendi lülitusskeem. Mitmesugustel põhjustel leiab käesoleval ajal rohkem rakendamist magnetvõimendi konstruktsioon, mis on kujutatud joonisel 21, *d*. Siin on kumbki vahelduvvoolumähise pool keritud omaette rõngakujulisele südamikule *1*, nn. *toorile* (toroidaalse kujuga raudsüdamikule). Viimane on tavaliselt keritud õhukesest kõrgekvaliteedilise magnetilise materjali, näiteks *permalloi* lindist *2*.

Kuna vahelduvvoolumähised *3* on magnetvõimendi südamikule keritud nii, et nad toimivad vastassuunaliselt, siis ei mõjuta nad alalisvoolumähist *4*, mis keritakse ühisena kahele toorile korraga. Magnetvõimendi võimsusevõimendustegur küünib erilisi abinõusid rakendamata paarisajani. Magnetvõimendi pingevõimendustegurit või vooluvõimendustegurit võib suvalistes piirides valida, muutes sisendmähise keerdude arvu ning traadi ristlõiget. Suure keerdude arvu puhul on tarvilik sisendpinge kõrgem ja vool nõrgem ning vastupidi.

Võimsusevõimendustegurit saab tunduvalt tõsta *positiivse tagasiside* rakendamisega. Tagasiside põhineb sellel, et osa võimendi väljundenergiast juhitakse tagasi võimendi sisendisse. Kui see energia oma mõju suunalt

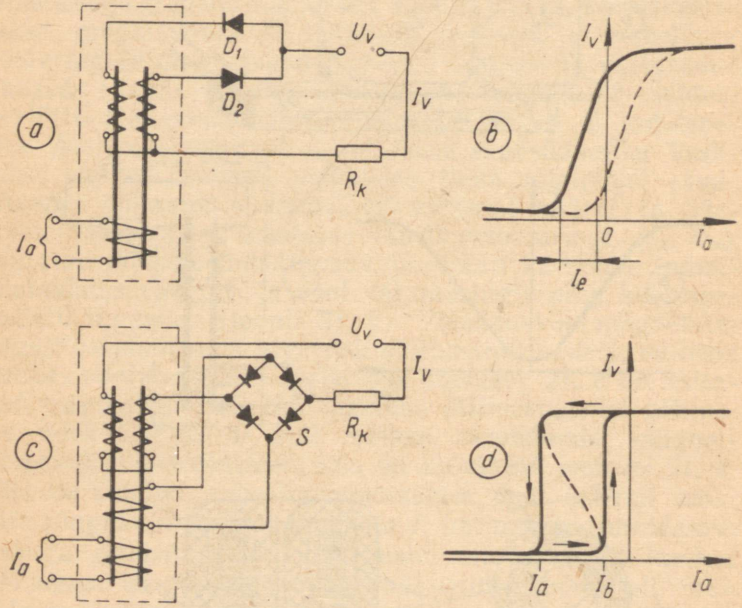


Joonis 21

a — tavalist tüüpi trafosüdamikuga magnetvõimendi ehitus; *b* — tagasisidestamata magnetvõimendi tunnusjoon; *c* — magnetvõimendi tingmärk ning tüüpiline lülitusskeem; *d* — toroidsüdamikuga magnetvõimendi lõikes; vasakul üksiku toroidsüdamiku ehitus

tugevdab sisendsignaali, on tegemist positiivse tagasisidega. Positiivne tagasiside, mõjudes samas suunas kui sisendsignaal, suurendab võimendustegurit.

Joonisel 22, *a* on toodud nn. *sisemise* positiivse tagasisidega magnetvõimendi lülitusskeem. Sisemine tagasiside on teostatud dioodide D_1 ja D_2 lülitamisega vahelduvvoolumähiste vooluringi. Selle tagajärjel voolab kum-



Joonis 22

a — sisemise positiivse tagasisidega magnetvõimendi lülitusskeem; *b* — tagasisidestatud magnetvõimendi tunnusjoon; *c* — välise positiivse tagasisidega magnetvõimendi lülitusskeem; *d* — releerežiimis töötava magnetvõimendi tunnusjoon

maski mähises pulseeriv alalisvool, mille alaliskomponendi mõju liitub sisendmähise voolu alaliskomponendi mõjuga. Tulemuseks on võimendustunnusjoon, mis on kujutatud joonisel 22, *b*. Teatud piirides kasvab väljundsignaal sisendsignaali vähenedes väga kiiresti. Vajaduse korral on võimalik võimendustunnusjoont *eelmagneetimisvoolu* I_e abil hõlpsasti nihutada (kriipsjoonega kõver). Sisemise tagasisidega magnetvõimendites saavu-

tatakse võimendustegureid kuni 10 000 ja isegi enam (ühe astme kohta). See tähendab, et näiteks 10-kilovatist elektrimootorit võib lihtsa üheastmelise magnetvõimendi kaudu juhtida kõigest ühevatise võimsuse abil. Teatud tingimustel, kui väljundist tagasijuhitud energia hulk ületab kriitilise väärtuse, satub magnetvõimendi nn. *releerežiimi.* Olgu tähendatud, et ülekriitilist tagasisidet ei ole võimalik teostada sisemise tagasiside printsiibil. Teisest küljest on see sisemise tagasiside eelis — ta võimaldab saada tagasiside väärtusi, mis on lähedal kriitilisele, aga viimast kunagi ei ületa.

Releerežiimi saavutamiseks kasutatakse *välist tagasisidet.* Vastav lülitus on toodud joonisel 22, *c.* Välise tagasiside teostamiseks lülitatakse magnetvõimendi väljundisse *sildlülituses* alaldi *S*, mis alaldab väljundvoolu. See alaldatud vool juhitakse läbi lisamähise. Kui viimase keerdude arv on küllalt suur, siis tunnusjoon omandab kuju, mis on joonisel 22, *d* näidatud kriipsjoonega. Kuna väljundvoolu väärtus sellel tunnusjooneosal on ebastabiilne, toimib releelülituses magnetvõimendi tegelikult täisjoonega kujutatud kõvera kohaselt. See tähendab, et sisendvoolu muutumisel väärtuseni I_b kasvab vool väljundringis hüppeliselt maksimaalse väärtuseni; sisendvoolu muutumisel väärtuseni I_a aga langeb väljundvool hüppeliselt minimaalse väärtuseni. Loomulikult on eelmagneetimise abil võimalik tunnusjoont horisontaalsihis soovikohaselt nihutada.

Releerežiimis magnetvõimendi tunnusjoon meenutab tavalise elektromagnetilise relee tunnusjoont. Seepärast leiab ülekriitilise tagasisidega magnetvõimendi kasutamist relee asendajana kohtades, kus mehaaniliselt liikuvate osade ja kontaktide puudumine on eriti oluline, näiteks plahvatusohtlikes ruumides.

Nagu juba mainitud, on magnetvõimendi põhiliseks puuduseks aeglane rakendumine. Rakendumise ajakonstant[1] τ on määratav lihtsa valemi abil:

$$\tau = \frac{\tau_i k_p}{4f},$$

kus k_p on võimsusevõimendustegur, f — toitepinge sage-

[1] Ajakonstant — aeg, mille jooksul väljundsignaal on kasvanud 63,2%-ni maksimaalsest väärtusest.

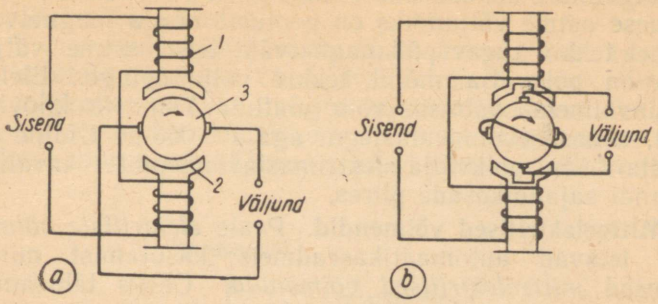
dus ja η — teatud tegur, mis on lähedane ühele. Näiteks, kui $k_p = 100$, $f = 50$ ja $\eta = 1$, siis $\tau = 0{,}5$ sek. Valem on õige tagasisideta magnetvõimendi puhul. Tagasiside rakendamisel on sama võimendusteguri puhul ajakonstant tunduvalt väiksem. Ajakonstandi vähendamiseks, nagu toodud valemist näha võib, on veel teine tee — toitevoolu sageduse f suurendamine. Kõrgema sagedusega magnetvõimenditel on veel teine paremus: võimendi ruumala ja kaal vähenevad umbes pöördvõrdeliselt sagedusega. Seepärast leiab magnetvõimendite toitmisel sageli kasutamist vool sagedusega 400, 2000 ja isegi 10 000 hertsi.

Magnetvõimendi rakendumisaja minimaalseks väärtuseks, mida väikese võimendusteguri puhul võib saavutada, on toitva vahelduvvoolu poolperioodi kestus, s. o. 50 hertsi puhul 10 millisekundit, 1000 hertsi puhul aga 0,5 millisekundit.

Kõik siintoodud magnetvõimendi lülitused võivad esineda ka diferentsiaalkujul. Diferentsiaallülituses võimendi koosneb kahest sümmeetrilisest poolest, nagu joonisel 16 kujutatud elektronlampidega võimendigi, ja reageerib nii sisendsignaali suurusele kui ka suunale (polaarsusele). Peale selle on diferentsiaallülituse eeliseks veel see, et mitmesugused seadmes tekkivad muutused ning välised häired mõjuvad mõlemale sümmeetrilisele poolele umbes ühevõrra. Seetõttu häirete mõju väheneb ja seadme töökindlus tõuseb.

Võib julgesti väita, et käesoleval ajal tuntakse printsipiaalselt erinevaid magnetvõimendi lülitusi ligikaudu paarisaja ümber. Et magnetvõimendi ehitus on väga lihtne — lihtsaima magnetvõimendi võib koostada kahest ühesugusest transformaatorist mähiste järjestikku lülitamise teel — avaneb mitmesuguste magnetvõimendite konstrueerimisel tootmisprotsesside automatiseerimiseks lai tegevusväli leiutajaile ja ratsionaliseerijaile.

Elektrimasinvõimendid. Küllalt olulist kohta mitmesugustes tööstusliku automaatika seadmetes omavad *elektrimasinvõimendid.* Lihtsaimaks elektrimasinvõimendiks on alalisvoolugeneraator (joonis 23), kusjuures sisendsignaal juhitakse ergutusmähisesse *1.* Kui vool ergutusmähises puudub, siis pöörleva masina harjadelt saadav pinge ja järelikult ka vool väljundringis on peaaegu null. Ergutusvoolu sisselülitamisel masina poolused *2* magneetuvad ja ankru *3* ringis tekkiv pinge on ligi-



Joonis 23

a — alalisvoolugeneraatori lülitusskeem võimendina kasutamisel; *b* — põikvälja-elektrimasinvõimendi lülitusskeem

kaudu võrdeline pooluseid ergutava vooluga. Sellise võimendi võimsusevõimendustegur võib ulatuda paarikümneni.

Rakendumise ajakonstant on määratav väga lihtsa valemi abil

$$\tau = \frac{L}{R},$$

kus L on ergutusmähise induktiivsus henrides ja R — ergutusmähise takistus oomides. Tavaliselt on alalisvoolumasinate ajakonstant sekundi kümnendikosade piirides, suurenedes koos masina võimsusega.

Tunduvalt paremate omadustega on nn. *põikvälja-elektrimasinvõimendi* (joonis 23, *b*). Põikvälja-elektrimasinvõimendis ergutab sisendsignaal masina pooluseid nagu tavalises alalisvoolugeneraatoriski. Masina kommutaatoril liuguvad harjad on aga omavahel lühistatud. Seepärast tekib väiksegi ergutuse mõjul otsekohe tugev vool ankruringis. See vool tekitab teise magnetvälja, nn. *põikmagnetvälja*, mis on eelmise magnetväljaga võrreldes risti. See põikmagnetväli indutseerib omakorda ankrumähises teise elektromotoorse jõu, mille tagajärjel vertikaaltasapinnas asuvate lisaharjade vooluringis tekib pinge. Alles see pinge juhitakse väljundringi, kus ta põhjustab sisendsignaaliga võrdelise voolu.

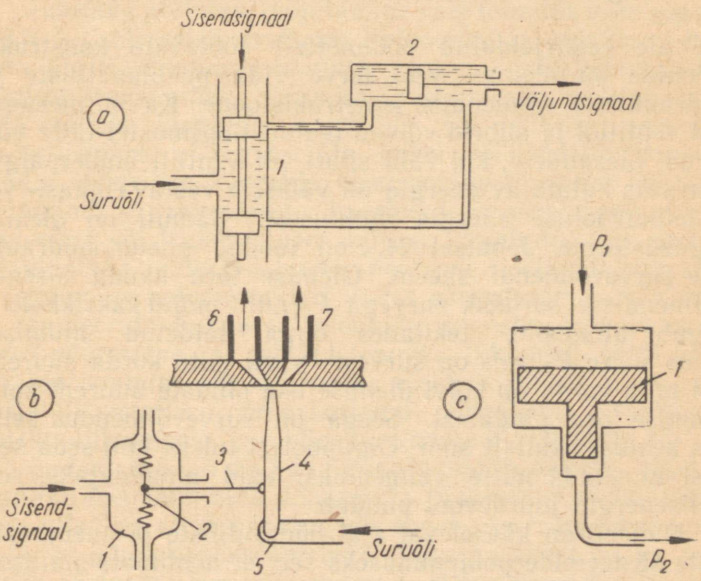
Tegelikult on säärane võimendi *kaheastmeline*: esimese astme väljundiks on pooluste nõrga magnetvälja toimel tekkiv tugev põikmagnetväli, teise astme väljundiks on põikvälja mõjul tekkiv väljundpinge. Elektrimasinvõimendi võimsus võib ulatuda kümnete kilovattideni, võimsusevõimendustegur aga 100 000-ni. Üldine ajakonstant on põikvälja-elektrimasinvõimenditel tavaliselt sekundi sajandikosade piires.

Mitteelektrilised võimendid. Peale *elektriliste võimendite* leiavad automaatikaseadmeis kasutamist mitmesugused *mitteelektrilised võimendid.* Üheks tähtsamaks nende hulgas on *hüdraulilised võimendid.*

Lihtsa hüdraulilise võimendi põhimõtteskeem on kujutatud joonisel 24, *a.* Seadmesse juhitakse suure surve all (kuni 20 atmosfääri) vedelikku — õli. Vastava jaotaja *1* abil, mille vardale mõjub sisendsuurus — mehaaniline nihe, juhitakse suruõli silindrisse *2* kas ülemise või alumise toru kaudu. Sellele vastavalt liigub kolb silindris *2* kas paremale või vasakule. Kui jaotusseade *1* on keskasendis, siis suruõli ei pääse kummassegi torusse ja kolb silindris *2* seisab paigal. Taolise hüdraulilise võimendi heaks omaduseks on suur tekitatav jõud ja suhteliselt kiire toimimine. Näiteks hüdrauliline võimendi, mille silindri läbimõõt on 20 sentimeetrit ja kolvikäik 1 meeter, tekitab oma kolviga jõu üle kuue tonni. Arvestades, et aeg, mis kulub säärasel hüdraulilisel võimendil selleks, et viia kolb ühest lõppasendist teise, moodustab umbes neli sekundit, on kerge arvutada hüdraulilise võimendi väljundvõimsust. See on antud näite puhul umbes 15 kilovatti. Sisendsignaal seevastu on küllalt väike, sest ta peab ületama ainult hõõrdejõudu. Õlisurve mõjub jaotaja mõlemale kolvile ühesuguselt ja vastassuunas ning selle tõttu jaotussiibri liikumisele mõju ei avalda. Seda tüüpi hüdrauliline võimendi võimendab mehaanilist jõudu. Sealjuures saavutatav võimendustegur on küllalt suur. Hüdraulilist võimendit kasutatakse enamasti juhtudel, mil on tarvis teostada edasi-tagasi liikumist, näiteks reguleerida hüdroturbiini juhtratta labade asendeid. Suurte hüdroelektrijaamade (Volga, Volgogradi, Bratski) turbiinides on hüdrauliliste võimendite viimaste astmete kolvid umbes meetrise läbimõõduga ja tekitavad vastavalt tuhandeisse tonnidesse ulatuvat jõudu. Teisest küljest kasutatakse laialdaselt ka

üsna väikesi, paarikilose või paarikümnekilose jõuga hüdraulilisi võimendeid.

Erinev hüdraulilise võimendi konstruktiivne lahendus on kujutatud joonisel 24, *b*. Kui eelmisel juhul võimendi oli määratud mehaanilise jõu võimendamiseks, siis vaadeldav seade võimendab õlisurvet. Oma suure tundlikkuse tõttu leiab säärane seade kasutamist hüdrauliliste



Joonis 24

a — jaotussiibri abil töötav hüdrauliline võimendi; *b* — joatoru abil töötav hüdrauliline võimendi; *c* — pneumohüdrauliline survevõimendi

automaatse juhtimise süsteemide võimendusosa esimestes astmetes. Sisendsignaali mõjul, mis juhitakse kambrisse *1*, *manomeetriline membraan 2* paindub. Membraaniga *2* on varda *3* abil seotud joatoru *4*, mis on kinnitatud kergelt liikuvale šarniirile *5*. Sama šarniiri kaudu juhitakse joatorusse suruõli, mis paiskub suure jõuga joatorust välja. Membraani mõjul vasakule või paremale kaldudes suunab joatoru suruõli joa suuremal määral kas

toru *6* või toru *7* avasse. Keskmise asendi puhul siseneb õli mõlemasse torru ühepalju. Seega on kirjeldatavas võimendis kasutatud diferentsiaalprintsiipi, sest signaali mõjul õlisurve ühes harus suureneb ja teises väheneb. Võimendi väljund võib olla ühendatud silindri või mõne muu seadmega.

Mõlemate vaadeldud võimendite tööpõhimõtted on rakendatavad ka siis, kui meil on tegemist *pneumaatilise* süsteemiga, s. o. kui suruõli asemel kasutatakse s u r u õ h k u.

Peale eelkirjeldatud põhimõtteil töötavate konstruktsioonide on olemas veel terve rida pneumaatiliste ja hüdrauliliste võimendite konstruktsioone. Ka mitmesugused ventiilid ja siibrid võivad teatud tingimustel täita võimendi ülesandeid, kui vaid siibri või ventiili ümberpaigutamiseks kulutatav energia on väiksem vastava gaasi- või vedelikuvooluse energia muutusest. Samuti on olemas segasüsteeme. Joonisel 24, *c* on toodud pneumohüdraulilise survevõimendi skeem. Ülemise toru kaudu siseneb võimendisse suruõhk survega P_1, mille mõjul kaksikkolb *1* liigub allapoole, tekitades õliga täidetud alumises torus surve P_2, mis on survest P_1 nii mitu korda suurem, kui mitu korda on kolvi ülemise osa pindala suurem kolvi alumise osa pindalast. Seega on survevõimendus sellises seadises küllalt suur. Õigupoolest tuleks küll seda seadist nimetada mitte võimendiks, vaid muundajaks, sest välisenergia juurdevool puudub.

Üldiselt on käesoleval ajal hüdrauliliste ja pneumaatiliste süsteemide põhipuuduseks see, et hoolimata näilisest lihtsusest nõuab pneumaatiliste ja hüdrauliliste automaatse juhtimise seadmete valmistamine ja montaaž üsna suurt täpsust ja kõrge kvalifikatsiooniga tööjõudu, võrreldes näiteks elektriseadmetega. Mitteküllaldase täpsuse puhul on igasugused lekkimised ja kinnijäämised paratamatud. Samuti on hüdrauliliste ja pneumaatiliste võimendite puuduseks piiratud töötamiskiirus, võrreldes näiteks elektronlampvõimendiga. Neil põhjustel on hüdrauliliste ja pneumaatiliste süsteemide levik käesoleval ajal üsna piiratud.

6. Muud automaatse juhtimise süsteemide elemendid

Täiturelemendid. Nagu järeldub automaatse juhtimise süsteemi struktuurskeemist (vt. joonis 2) juhitakse vahendavast lülist väljuv signaal *täiturlülisse.* Täiturlüli oluliseks koostisosaks on *täiturelement.* Täiturelemendi ülesandeks on vahendavast elemendist saabuva võimendatud signaali kohandamine juhitava protsessi mõjutamiseks.

Juhitava protsessi mõjutamine võib toimuda mitmesugusel viisil, olenevalt protsessi iseloomust ja vajaliku mõjutuse liigist. Enamasti taandub protsessi juhtimine mitmesuguse mehaanilise liikumise teostamisele, milleks võib olla näiteks klappide, ventiilide või siibrite avamine ja sulgemine, et reguleerida gaasi või vedeliku juurdevoolu; elektrilise kaarahju elektroodide tõstmine või langetamine, et reguleerida kaarleegi intensiivsust ahjus; konveieri või transportööri kiiruse muutmine, et muuta teisaldatava materjali hulka; neutrone neelavate varraste langetamine aatomireaktori keres asuvatesse kanalitesse, et reguleerida tuumareaktsioonide intensiivsust; lennukitüüri pööramine, et juhtida lennuki liikumist; lüliti kontaktide avamine või sulgemine elektriseadmete sisse- või väljalülitamiseks; radariantenni pööramine vastavalt objekti liikumisele jne. Seega enamasti kujutab täiturlüli endast m u u n d a j a t, mis muundab näiteks elektrisignaali mehaaniliseks liikumiseks. Sääraseks muundajaks võib olla kas elektrimootor või tugev elektromagnet koos vajalike jõuülekandeseadistega. Teisest küljest on ka võimalik süsteem, kus võimendatud elektrisignaal mõjutab otsekohe reguleeritavat suurust. Näiteks elektrigeneraatori pinge reguleerimiseks tuleb muuta tema ergutusvoolu.

Paljudel juhtudel puudub iseseisev täiturelement ka pneumaatiliste ja hüdrauliliste võimendite kasutamisel, mille väljund esineb otseselt mehaanilise liikumise kujul. Pneumaatilisi ja hüdraulilisi võimendeid kasutatakse sageli siis, kui protsessi juhtimiseks on tarvis teostada lühikesi mehaanilisi ümberpaigutusi suure jõu ning kiirusega.

Kõige tüüpilisemaks ja levinumaks täiturelemendiks on käesoleval ajal siiski e l e k t r i m o o t o r. Automaatse juhtimise süsteemides on kasutusel kõige erinevamaid elektrimootoreid, alates mõnevatise võimsusega nn. mikromootoreist kuni mitmekilovatiste mootoriteni. Suuremate

võimsuste ja väikeste kiiruste puhul on otstarbekam kasutada hüdraulilisi täiturmehhanisme, sest elektrimootorite puhul kasutatav reduktor kujuneks väga suureks, aeglaselt reageerivaks ning kalliks. Elektrimootori põhiliseks paremuseks on aga see, et ta ei vaja keerukat ning suuremahulist suruõlisüsteemi. Suuremad elektrimootorid on otstarbekad ka siis, kui automaatselt reguleeritavaks suuruseks on pidev ühesuunaline liikumine, näiteks konveierite puhul, või pidev pöörlemine, näiteks aerodünaamiliste katsetuskanalite propellerpumpade käitamisel. Sellistel juhtudel võib mootorite võimsus ulatuda megavattideni. Niisugusel juhul pole mootorid enam automaatse juhtimise süsteemi täiturelementideks, vaid reguleeritavateks objektideks — *ajamiteks.*

Elektriajamite ja nende reguleerimise teooria ja tehnika moodustab käesoleval ajal tähtsa ja ulatuslikult arenenud tehnikaharu.

Et elektrivool võib mõjutada reguleeritava objektina esinevat elektrimootorit otseselt, siis suurte mootorite, samuti elektrigeneraatorite reguleerimiseks on tarvilikud üsna suure väljundvõimsusega võimendid. Selleks otstarbeks võivad leida kasutamist kas tüüritavad alaldid, elektrimasinvõimendid või magnetvõimendid.

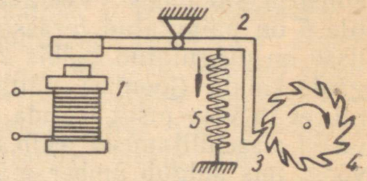
Automaatikas leiavad kasutamist peaaegu kõik elektrimootorite liigid. Üldiselt eelistatakse asünkroonmootoreid, sest nende konstruktsioon ja hooldamine on väga lihtne, töökindlus aga küllalt suur. Suuremate võimsuste puhul võib leida kasutamist tavaline kolmefaasiline asünkroonmootor. Pöörlemiskiiruse ning pöördemomendi reguleerimine on väikestes piirides teostatav mootori klemmipinge reguleerimise teel. Selleks sobib näiteks eriline kolmefaasiline magnetvõimendi. Mootori kiiruse ulatuslikumaks reguleerimiseks tuleks muuta mootorit toitva vahelduvvoolu sagedust ja pinget. Vastavad seadised on aga küllalt keerukad, mistõttu sageli piirdutakse mootori mähiste ümberlülitamisega mitmesugustele nimikiirustele, millega saavutatakse kiiruse astmeline reguleerimine. Väikeste võimsuste puhul, kuni umbes 100 vatini, leiavad laialdast kasutamist kahefaasilised asünkroonmootorid. Säärase mootori põhimõtteline skeem on toodud joonisel 16, *a* koos vastava vahelduvvooluvõimendiga. Kondensaatori *C* abil saavutatakse mootori töötamiseks vajalik faasinihe mähiste voolude vahel. Automaatika-

alasteks rakendusteks on eriti sobiv *õõnsa rootoriga* asünkroonmootor, mis erineb tavalisest asünkroonmasinast selle poolest, et rootoriks, s. o. pöörlevaks osaks on õõnes alumiiniumsilinder, mis asendab tavalise asünkroonmootori rootori lühismähist. Rootori raudsüdamik on konstrueeritud paigalseisvana. Nii saavutatakse rootori minimaalne inerts. Säärane rootor reageerib väga kiiresti igasugustele sisendsignaali muutustele, mis on suuremas osas automaatse juhtimise süsteemides põhjapaneva tähtsusega.

Alalisvoolumootorite põhiliseks eeliseks vahelduvvoolumootoriga võrreldes on suur algpöördemoment, lihtsalt teostatav pöörlemiskiiruse muutmine ja nn. jäik karakteristik. Viimane avaldub selles, et mootori pöörlemiskiirus sõltub vähe koormuse suurusest. Seepärast kasutatakse keerukate automaattööpinkide käitamiseks ja juhtimiseks sageli alalisvoolumootoreid.

Peale kirjeldatud põhitüüpide kasutatakse üksikuil juhtumeil *sünkroonmootoreid* ning *samm-mootoreid*. Sünkroonmootor tagab täiesti täpse pöörlemiskiiruse sõltuvalt mootorisse saabunud vahelduvvoolu sagedusest. Samm-mootor töötab üksikute vooluimpulsside toimel, kusjuures iga mootorisse saabuv impulss põhjustab rootori pöördumise mootori konstruktsiooniga määratud nurga võrra.

Neid mootoreid kasutatakse juhtumeil, kui on tarvis tagada automaatselt juhitava seadise liikumisel suurt täpsust. Säärane vajadus esineb näiteks elektrilistes ajanäitajates ning programmjuhtimisega tööpinkides. Lihtsaima samm-mootori konstruktsioon on toodud joonisel 25. Impulsi saabumisel elektromagnetisse *1* tõmbub ankur *2* vastu magnetit, tema nokk *3* haakub hammasratta *4* hamba taha ning nihutab hammasratast ühe hamba võrra edasi. Impulsi lõppedes tõmbab vedru *5* ankru *2* algasendisse tagasi ja uue impulsi saabudes protsess kordub. Niisiis pöördub iga impulsi mõjul hammasratas ühe hambajaotuse võrra. Kirjeldatud mehhanismi nõrgaks kohaks on nokast ja hammasrattast koosnev



Joonis 25
Samm-mootori ehitus

komplekt, sest see kulub võrdlemisi kiiresti. Seepärast püütakse viimasel ajal konstrueerida impulssmootoreid, millel puuduvad hõõrduvad osad (peale võlli laagrite).

Üksikutel juhtudel kasutatakse eritüüpi hüdraulilisi mootoreid, mis tekitavad pideva pöörleva liikumise näiteks suruõli toimel. Sääraste mootorite detailid peavad olema ülitäpselt valmistatud ning nende töökindlus on võrdlemisi väike. Seevastu võivad säärased mootorid väikeste gabariitide juures tagada üsna suuri võimsusi. Näiteks on 2-kilovatine hüdrauliline õlimootor umbes niisama väike kui kahekümnevatine elektrimootor.

Sageli osutub otstarbekaks korraldada juhitava protsessi mõjutamine niiviisi, et elektrimootor või muu jõumasin töötab pidevalt, juhtimisele allub aga s i d u r, mis ühendab mootori võlli juhitava seadme võlliga. Sisselülitatud siduri puhul veab mootor võlli, siduri väljalülitamisel aga võll peatub.

On võimalik teostada ka kahe siduriga ajamit, nii et ühe siduri ühendamisel töömasina võll pöörleb ühes suunas, teise siduri ühendamisel teises suunas. Säärane seade on skemaatiliselt kujutatud joonisel 26, *a*.

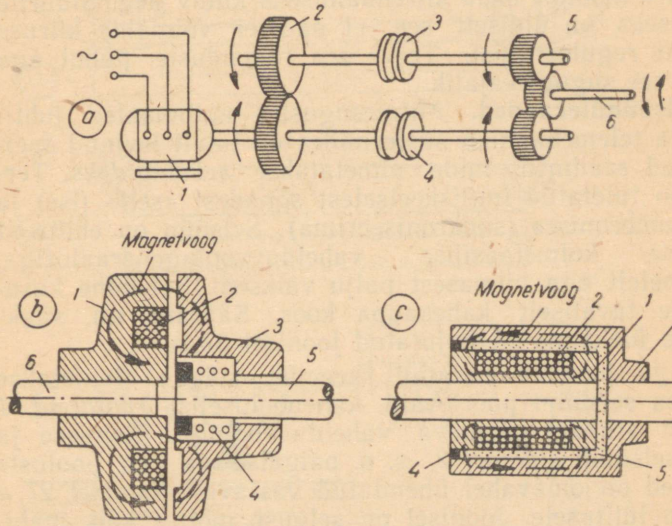
Mootor *1* pöörleb pidevalt. Hammasrataas-ülekanne *2* paneb pöörlema võlli, mis pöörleb sama kiirusega, ent vastassuunas, võrreldes mootori võlliga. Mõlemad võllid on ühendatud sidurite *3* ja *4* kaudu teise hammasratas-ülekandega *5*, mille kaudu sidurite võllide pöörlemine antakse edasi veetavale võllile *6*. Kui mõlemad sidurid *3* ja *4* on avatud, siis veetav võll *6* ei pöörle. Siduri *3* sulgemisel hakkab veetav võll *6* pöörlema ühes suunas, siduri *4* sulgemisel aga vastassuunas.

Sidurite *3* ja *4* sisse- ning väljalülitamine võib toimuda elektromagnetite abil.

Joonisel 26, *b* on kujutatud üks võimalikest sidurmuhvi konstruktsioonidest. Veetavale võllile *5* ja vedavale võllile *6* on paigutatud terasseibid *1* ja *3*. Seibi *1* ringkanalisse on paigutatud mähis *2*, mida toidetakse kontaktrõngaste kaudu (joonisel näitamata). Seib *3* on kinnitatud nii, et ta võib pisut liikuda piki veetavat võlli. Mähisesse voolu sisselülitamisel tekib muhvi seibides *1* ja *3* magnetvoog, mis sulgub ümber mähise läbi seibidevahelise õhupilu, surudes seibe üksteise vastu. Selle tulemusena saab võimalikuks pöördemomendi ülekanne muhvi kaudu. Ülekantava momendi suurendamiseks kaetakse ühe seibi pind

mingi suurt hõõrdetegurit omava materjaliga. Voolu väljalülitamisel eemaldab vedru *4* seibid teineteisest.

Ketassiduriga elektromagnetilisest muhvist on mõnevõrra täiuslikum viimasel ajal kasutusele võetud *vedeliktäitega muhv* (joonis 26, *c*). Nimetatud konstruktsiooni



Joonis 26

a — reversiivne ajam kahe siduriga; *b* — elektromagnetiline sidurmuhv lõikes; c — elektromagnetiline vedeliktäitega sidurmuhv lõikes

puhul on vedavale võllile liikumatult kinnitatud ferromagnetilisest materjalist südamik *1* koos mähisega *2*, veetaval võllil aga samasugusest materjalist õõnessilinder *3*. Ruum detailide *1* ja *3* vahel on suletud tihendusrõngaga *4* ja täidetud ferromagnetilise seguga *5* — rauapulbri suspensiooniga petrooleumis või masinaõlis.

Mähisesse voolu sisselülitamisel tekib magnetvoog, mis kutsub esile suspensiooni tihenemise. Viimases sisalduv ferromagnetiline pulber liitub silindritega *1* ja *3* otsekui ühiseks tervikuks, võimaldades pöördemomendi edasiandmist. Kui mähisest on vool välja lülitatud, tekib

tähtsusetult väike pöördemoment ainult suspensiooni viskoossuse tõttu. Vedeliktäitega muhvid rakenduvad ja lahutuvad väga kiiresti. Lülitamiseks kuluv aeg ei ületa paari-kolme sajandikku sekundit, edasiantav pöördemoment võib aga olla palju suurem kui ketassidureil.

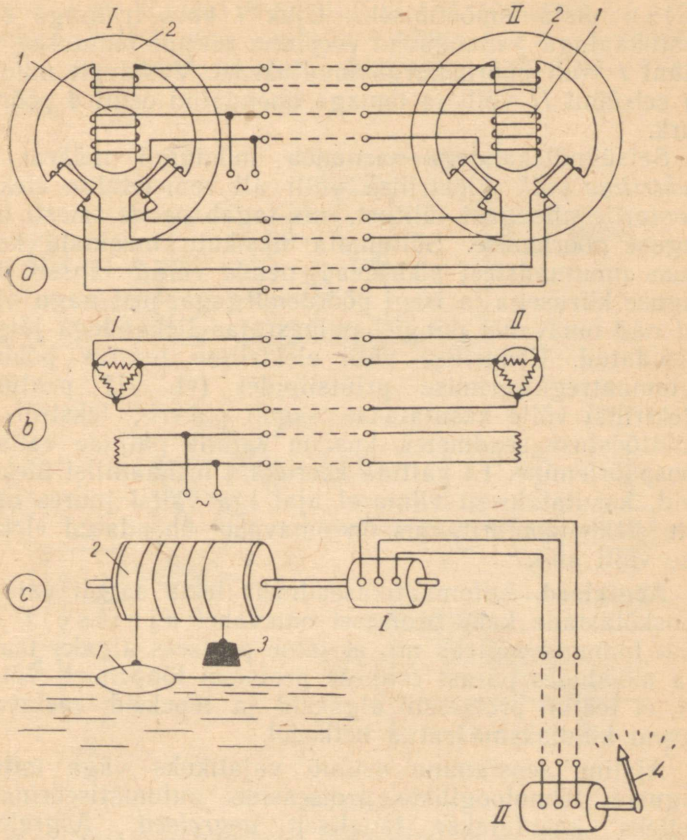
Sidurmuhvide põhiliseks eeliseks muude reguleeritavate ajamite ees on nende suur teotsemiskiirus, sest jääb ära mootori enda kiirendamiseks kuluv aeg. Sidurite puuduseks on üldiselt see, et nad ei võimalda kiiruse pidevat reguleerimist. Terve rea rakenduste puhul aga ei ole see sugugi vajalik.

Selsüünülekanded. Mitmesugustes automaatse juhtimise ja telemehaanika süsteemides on laialt levinud spetsiaalsed seadmed, mida nimetatakse *selsüünideks*. Termin on tuletatud ingliskeelsetest sõnadest «self» (ise) ja «to synchronise» (sünkroniseerima). Selsüün on ehituselt sarnane kolmefaasilise vahelduvvoolugeneraatoriga, mõõtmetelt aga viimasest palju väiksem. Selsüüne kasutatakse tavaliselt kahekaupa koos. Säärane nn. sünkroonne ülekanne on kujutatud joonisel 27, *a*.

Nagu joonisel esitatud skeemist selgub, toidetakse mõlema selsüüni pöörlevaid kahepooluselisi *rootoreid 1* ühisest allikast pärineva vahelduvvooluga. Esimese ja teise selsüüni *staatori 2*, s. o. paigalseisva osa pooluste mähised on omavahel ühendatud vastavalt joonisel 27, *a* toodud lülitusele. Joonisel on selguse mõttes kõik mähised omavahel eraldi juhtmete kaudu ühendatud. Praktikas kasutatakse aga joonisel 26, *b* tingmärkide abil kujutatud lülitust, kus staatorite ühendamiseks piisab kolmest juhtmest.

Üksikasjaline selsüünide teooria on küllalt keerukas. Ligikaudselt aga võib selsüünülekande tööd ette kujutada nii, et kui näiteks esimese selsüüni rootor on suunatud staatori teatud pooluse suunas, siis indutseeritakse vastavas pooluse mähises kõige kõrgem pinge, see tekitab kõige suurema voolu teise selsüüni vastavas mähises ja viimase rootor pöördub vastava pooluse suunas.

Järelikult, kuidas me ka ei pööraks esimese selsüüni võlli, teise selsüüni võll pöördub samasse asendisse, järgides esimese selsüüni võlli asendit. Sealjuures vahekaugus esimese ja teise selsüüni vahel võib olla küllalt suur, kümneid ja isegi sadu meetreid, efekt aga on niisugune, nagu oleksid selsüünid omavahel võlliga ühenda-



Joonis 27

a — selsüünülekande ehitus; *b* — selsüünülekande lülitusskeem; c — seade veeseisu distantsmõõtmiseks selsüünülekande abil

tud. Selsüünülekandeid kasutatakse enamasti selleks, et anda teatud vahekaugusele edasi informatsiooni töömasinate või seadmete detailide asendi ja liikumise kohta.

Selsüünülekande poolt edasiantav jõud on võrdlemisi väike; tavaliselt piisab sellest ainult kõige kergemate mehhanismide käitamiseks.

Joonisel 27, *c* on kujutatud selsüünülekanne veeseisu distantsmõõtmiseks. Ujuk *1* koos trumliga *2* ja vastukaaluga *3* muudavad veepinna taseme muutused selsüüni *I* võlli pöördenurga muutusteks. Vastavalt muutub ka selsüüni *II* võlli ja temaga ühendatud osuti *4* pöördenurk.

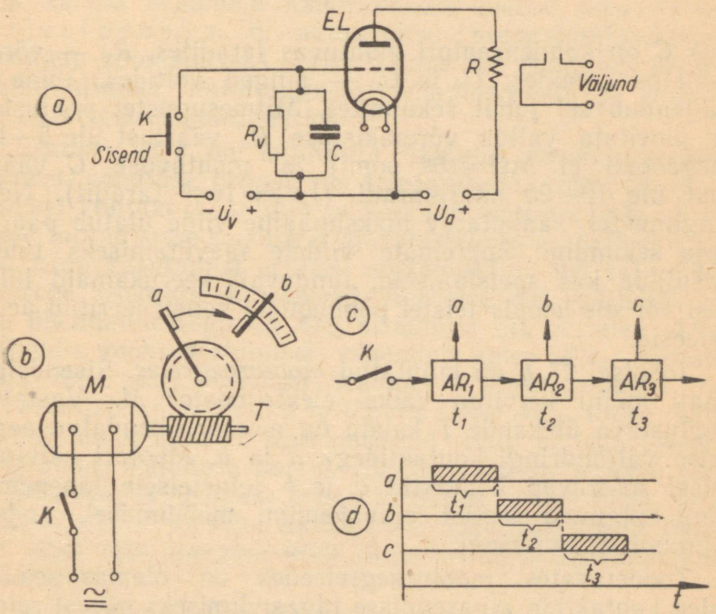
Selsüünülekandega sarnaneb mõningal määral nn. *elektriline võll.* Elektrilise võlli all mõistetakse elektrimootorite niisugust lülitust, mis tagab nende täiesti ühesuguse pöörlemise. Sõltumata üksikute masinate koormuse muutumistest pöörlevad nende võllid täpselt ühesuguse kiirusega ja isegi pöördenurgaga, just nagu oleksid nad omavahel mingi hammasratas-ülekandega jäigalt ühendatud. Elektrilise võlli elektriline teostus põhineb automaatreguleerimise printsiipidel (vt. III peatükk). Elektrilisi võlle kasutatakse sageli paberi-, tekstiili- ja trükitööstuse seadmetes, kus on vajalik paljude valtside koospöörlemine. Et vältida keerukaid mehaanilisi ülekandeid, kasutataksegi viimasel ajal iga valtsi juures omaette elektrimootorit, mis on omavahel ühendatud elektrilise võlli abil.

Aegreleed. Automaatikaseadmeis tekib sageli vajadus kooskõlastada kaks protsessi omavahel ajaliselt. See võib toimuda näiteks nii, et teine protsess algaks teatud aja möödudes pärast esimese protsessi lõppemist, või ka nii, et teatud protsessid algaksid ja lõpeksid vastavatel varem kindlaksmääratud hetkedel.

Ajaline seostamine osutub vajalikuks väga mitmesuguste tehnoloogiliste protsesside automatiseerimisel. Selleks kasutatakse tavaliselt *aegreleed.* Aegreleeks nimetatakse automaatika elementi, mille väljundringis tekib signaal teatud aja möödumisel signaali andmisest relee sisendisse. Seda aega nimetatakse tavaliselt relee *viiteks.* Vastavalt eelmises paragrahvis toodud andmetele esineb kõikides võimendites väljundsignaali teatud hilinemine sisendsignaali suhtes. Normaalsetes võimendites on see hilinemine väike ega ületa tavaliselt sekundi murdosi. Aegreleedes on hilinemine ehk relee viide tavaliselt paari sekundi kuni mitmekümne minuti piirides, olenevalt relee ehitusest ja otstarbest.

Üheks levinumaks aegrelee tüübiks on elektronaegrelee. Lihtsaima elektronaegrelee skeem on kujutatud joonisel 28, *a.*

Relee töötamispõhimõte on järgmine. Enne signaali andmist on kontakt *K* suletud ja elektronlambi *EL* võrele antakse küllalt suur negatiivne pinge U_v, nii et elektronlambi anoodvool on null. Signaali saabumisel avaneb



Joonis 28

a — lihtsa elektronaegrelee lülitusskeem; *b* — mootor-aegrelee ehitus; *c* — struktuurskeem kolmeelemendilise programmi teostamiseks aegreleede abil; *d* — sama programmseadme tööd selgitav ajaline diagramm; diagrammi viirutatud osad tähistavad vastavate releede rakendunud olekut

kontakt *K*. Kondensaatori *C* olemasolu tõttu ei lange pinge võrel otsekohe nullile, sest kondensaator on esialgu laetud. Kontakti *K* avanemisel hakkab kondensaator *C* tühjenema läbi takisti R_v. Kui võre-eelpinge, s. o. negatiivne pinge kondensaatoril *C* on kahanenud teatud väärtuseni U_0, tekib lambis anoodvool. Kuna lambi anoodvool on tavaliselt liiga nõrk täiturelemendi käivitamiseks,

lülitatakse elektronrelee väljundringi elektromagnetiline relee R. Sellisel juhul tuleb pinge U_a valida parajasti nii suur, et vastav anoodvool käivitaks relee.

Relee viide t_s määratakse sellisel juhul valemiga

$$t_s = C R_v \ln \frac{U_v}{U_0},$$

kus C on kondensaatori mahtuvus faradites, R_v — võretakistus oomides, U_v ja U_0 — pinged voltides. Viide t_s väljendub sel juhul sekundites. Mitmesugustel põhjustel ei soovitata valida võretakistuse R_v väärtust üle 5—10 megaoomi (1 MΩ = 10^6 oomi) ja mahtuvuse C väärtust üle 10—20 mikrofaradi (1 μF = 10^{-6} faradit). Neil tingimustel saavutatav maksimaalne viide ulatub paarisaja sekundini. Suuremate viidete saavutamiseks tuleb kasutada kas spetsiaalseid, tunduvalt keerukamaid lülitusi või siis hoopis teistel põhimõtetel konstrueeritud aegreleesid.

Joonisel 27, *b* on kujutatud *mootoraegrelee*. Sisendsignaali mõjul käivitub väike elektrimootor M. Vastava aeglustava ülekande T kaudu on mootor ühendatud aegrelee väljundringi kontaktidega *a* ja *b*. Mootori käivitumisel hakkavad kontaktid *a* ja *b* teineteisele lähenema ning sulguvad teatud ajavahemiku möödumisel, andes signaali väljundringi.

Toodetavates mootoraegreleedes on olemas seadis relee kontaktide algasendisse tagasiviimiseks pärast relee rakendumist, seadised relee viite reguleerimiseks kas kontaktide ümberpaigutamise või ajami ülekandesuhte muutmise teel jne. Üks ja seesama aegrelee võib, olenevalt kontaktide asendist ning ajami ülekandesuhtest, tekitada viite alates paarist sekundist kuni mõnekümne minutini. Vaatamata pisut raskepärasele konstruktsioonile on mootoraegrelee kasutamise võimalused automaatikaseadmeis kõige laialdasemad.

Väiksemate viidete puhul kasutatakse ka *elektromehaanilist aegreleed*, kus elektrimootori asemel kasutatakse kellamehhanismi taolist seadet, mille vedru pingestatakse elektromagneti abil. On võimalik teostada ka pneumaatilisi ja hüdraulilisi aegreleesid. Sellisel juhul on aegrelee oluliseks koostisosaks düüs, mis on ühendatud suurema mahutiga. Mahuti täitmiseks suruõhu või õliga väikese

düüsi kaudu kulub teatud ajavahemik. Mahuti täitumisel suureneb seal pidevalt rõhk. Teatud aja möödudes kasvab rõhk piisavalt suureks, et käivitada aegrelee väljundis asuvaid seadmeid. Düüsi ava või mahuti suuruse muutmise teel saab muuta relee viidet.

Nagu juba märgitud, võib aegreleesid kasutada mitte ainult viite tekitamiseks teatud ühe seadme käivitamisel, vaid ka rea seadmete käivitamiseks teatud ajalises järjestuses, s. o. automaatse programmjuhtimise seadmete koostamiseks. Eriti kohane on sedalaadi programmjuhtimine mitmesuguste tehnoloogiliste ja transpordiprotsesside juhtimiseks.

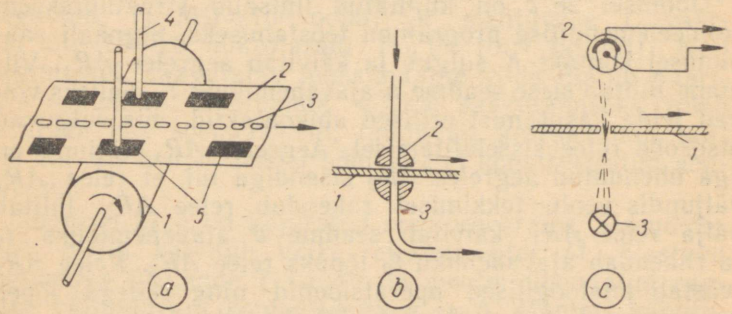
Joonisel 28, *c* on kujutatud lihtsaim struktuurskeem kolmeelemendilise programmi teostamiseks. Signaali saabumisel kontakt K sulgub ja käivitab aegrelee AR_1. Viimane lülitab sisse seadme *a* ajavahemikuks t_1. Selleks võivad leida kasutamist erilised abikontaktid, mis sulguvad otsekohe relee sisselülitamisel. Aegrelee AR_1 väljund on aga ühendatud aegrelee AR_2 sisendiga nii, et relee AR_1 väljundis voolu tekkimisel rakendub relee AR_2, lülitab välja relee AR_1, käivitab seadme *b* ajavahemikuks t_2 ja rakendab ajavahemiku t_2 lõpuks relee AR_3. Relee AR_3 teostab analoogilised operatsioonid ning sellega lõpeb programm. Vajaduse korral võib korraldada seadme töö ka tsüklilise programmi kohaselt. Sellisel juhul tuleb AR_3 lülitada nii, et ta viite möödumisel käivitaks uuesti AR_1. Sel viisil võib operatsioonide järjestus korduda piiramatu arv kordi.

Skeemi töö ajaline diagramm on toodud joonisel 28, *d*.

Programmide reprodutseerimisest. Analoogiliselt eeltoodule võib koostada ka tunduvalt komplitseeritumaid, suurema «sammude» arvuga automaatjuhtimise skeeme. Skeemid võivad omada ka hargnevat konfiguratsiooni. Üldiselt on sageli vaja peale aegreleede veel mitmesuguseid abi- ning täiendavaid releesid ja muid seadmeid. Kokku võttes kujuneb niisugune releeline *automaatse programmjuhtimise* seade üsna keerukaks. Teisest küljest pole säärane seade küllalt paindlik, sest programmi oluliseks muutmiseks tuleks kogu seade ümber ehitada. Seepärast kasutatakse suurte, keerukate ja sageli muudetavate programmide teostamisel kas *perforeeritud linte* või *perforeeritud kaarte* programmi ülesmärkimiseks. Programmi ajaline teostamine aga toimub sel-

lisel juhul mitte aegreleede kaudu, vaid perforeeritud lindi liikumise abil. Kui lint liigub ühtlase kiirusega, siis on iga üksiku operatsiooni kestus määratud lindile perforeeritud märkide vahekaugusega, mis tähistavad antud protsessi algust ning lõppu. Umbes taoline on olukord ka perforeeritud kaartide (perfokaartide) kasutamisel.

Perforeeritud lindiga töötava seadme eskiis on toodud joonisel 29, *a*. Üle rulli *1* liigub noolega näidatud suunas kas pidevalt või sammhaaval lint *2*, millesse on vastava seadme abil perforeeritud piki linti kulgevad avade read.



Joonis 29

a — perforeeritud lindi abil töötav programmseade; *b* — perforeeritud lindi lugemine pneumaatilise seadme abil; *c* — perforeeritud lindi lugemine fotoelektrilise seadme abil

Osa avasid *3* on määratud lindi edasiviimiseks ja need asuvad võrdsete vahekauguste järel kas lindi äärtel (nagu kinofilmil) või keskjoonel. Ülejäänud ridades on avad *5* perforeeritud ebakorrapäraste vahedega, vastavalt programmile. Iga rea jaoks on oma lugev seadis, milleks võib olla lihtsalt kontakt *4*, mis ava saabumisel ühendub rulli pinnaga. Kui kontakti all on terve lint, on kontakt võllist isoleeritud.

Lugev seadis võib olla ka p n e u m a a t i l i n e (joonis 29, *b*). Sel juhul on ühelt poolt lindi *1* iga aukuderea vastu suunatud düüs *2*, kust väljub suruõhk. Ava saabumisel düüsi kohale pääseb suruõhk signaali vastuvõtvasse torusse *3*.

Suurte lindikiiruste puhul kasutatakse *fotoelektrilist lugemist* (joonis 29, *c*). Selleks on iga aukuderea kohal ühel pool linti *1* fotoelement (fotodiood) *2*, teisel pool linti aga asub valgusallikas *3*. Valgus pääseb seega fotodioodile ainult siis, kui ava lindis satub fotodioodi kohale. Valgustatud fotoelemendis tekib vool.

Niisiis on iga aukuderida varustatud mingi vastuvõtva elemendiga, mis töötab kas mehaanilisel, pneumaatilisel, fotoelektrilisel või muul põhimõttel.

Vastuvõttev element on aga kas otseselt või võimendi kaudu ühendatud vastava töömasinaga või selle osaga. Perfolindi abil teostatava programmi muutmiseks tarvitseb vaid asetada uus lint programmi «lugevasse» seadmesse.

Viimasel ajal on laialdaselt kasutusele võetud programmide *magnetiline salvestamine*, mis on mitmeti eelistatavam programmi märkimisest perfolindile. Programmi märkimine magnetlindile toimub analoogiliselt heli salvestamisega magnetofonis. Oluline on see, et siin on võrdlemisi hõlpus üles märkida ka pidevalt muutuvaid suurusi. Laialdaselt on tuttavaks saanud nn. «hea operaatori» meetod tööpinkide automaatseks programmeerimiseks. Selle meetodi kohaselt jäädvustatakse magnetlindile kõik pingi osade liikumised, kui detaili töötleb vilunud spetsialist. Järgmisi detaile võib sama tüüpi pink töödelda juba iseseisvalt, kopeerides jäädvustatud programmi alusel kõiki liikumisi, mis esinesid esimese detaili töötlemisel.

III PEATÜKK

AUTOMAATNE REGULEERIMINE

7. Automaatse reguleerimise süsteemid

Automaatse reguleerimise üldpõhimõtted. Reguleerimise all mõistetakse tegevust, mis seisneb mingisuguse protsessi või seadme töö juhtimises inimese või masina poolt nii, et protsessi kulg või seadme töö resultaat vastaks soovitud ning ettenähtud tulemusele.

Kui seadme tööd juhib inimene, on tegemist *käsitsi reguleerimisega.* Kui seadme töö juhtimine toimub inimese kaastegevuseta, on tegemist *automaatse reguleerimisega.*

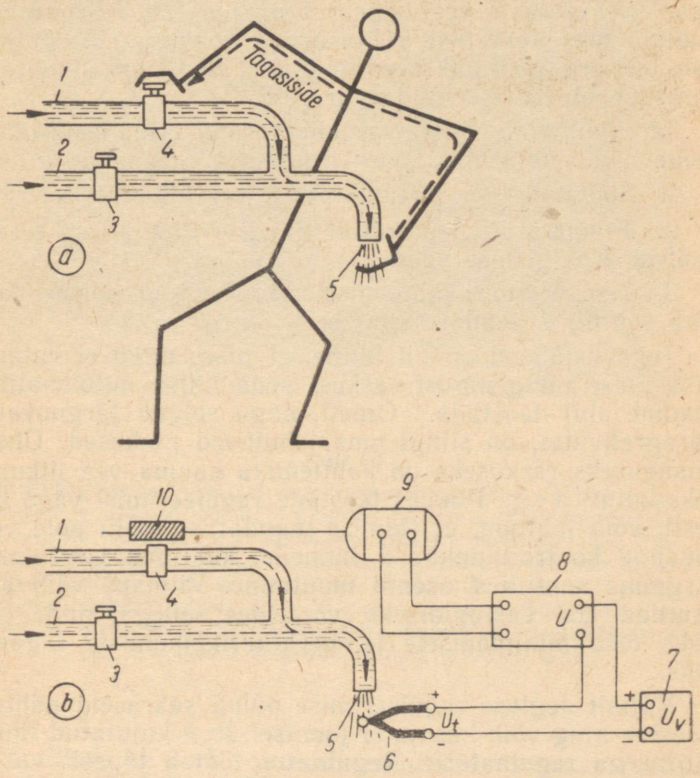
Automaatse reguleerimise süsteem on niisiis seadmete kompleks, mis koosneb põhilisest protsessi teostajast — *töömasinast* ning reast abiseadmeist, mis on ette nähtud töömasina juhtimiseks. Viimased moodustavadki *automaatse regulaatori.*

Reguleerimise oluliseks tunnuseks, mis teda eraldab muudest juhtimise meetoditest, on k o n t r o l l reguleeritava suuruse üle. Kontrolli teostamine toimub tagasiside abil.

Joonisel 30, *a* on skemaatiliselt kujutatud lihtne käsitsi reguleerimise protsess. Tegemist on vee temperatuuri reguleerimisega külma veega segatava kuuma vee hulga reguleerimise teel. Toru *1* kaudu voolab kuum vesi, toru *2* kaudu külm vesi. Ventiil (kraan) torus *2* on avatud. Ülesandeks on reguleerida ventiili *4* abil toru *1* kaudu voolava kuuma vee hulka nii, et väljavoolava vee temperatuur torust väljumise kohas (punktis *5*) oleks soovitud suurusega. Olgu soovitud suuruseks näiteks kõrgeim temperatuur, mille juures veel ei teki kõrvetustunnet käel.

Inimene, teostades säärast või muud taolist reguleerimist, ei mõtle tavaliselt selle kulgemise üle järele, vaid

toimib instinktiivselt, s. o. sisseharjunud, «automaatselt» mõjuvate reflekside varal. Selleks aga, et leida võimalusi mingi tööprotsessi või muu inimtegevuse automatiseerimiseks, on tarvis ennekõike analüüsida inimese tegevust



Joonis 30

a — vee temperatuuri käsitsi reguleerimine; *b* — automaatregulaator vee temperatuuri reguleerimiseks

vastaval juhul, lahutades selle üksikuteks elementaarseteks toiminguteks.

Analüüsides joonisel 30, *a* kujutatud reguleerimisprotsessi, jõuame järgmistele järeldustele. Inimene kontrollib käega vee temperatuuri punktis *5*. Kui vee tempe-

ratuur on lähedane kõrvetustunde tekkimisele, ent viimast siiski veel ei teki, on ventiili *4* asend õige. Kõrvetuse tekkimisel hakkab inimene ventiili sulgema, s. o. keerab ventiili ratast teatud suunas. Vastav suund peab olema loomulikult varem kindlaks määratud ning ette teada. Kui aga väljavoolava vee temperatuur muutub märgatavalt madalamaks kõrvetust põhjustavast temperatuurist, hakkab inimene pöörama ventiili *4* vastassuunas, kuni temperatuur tõuseb soovitud suuruseni.

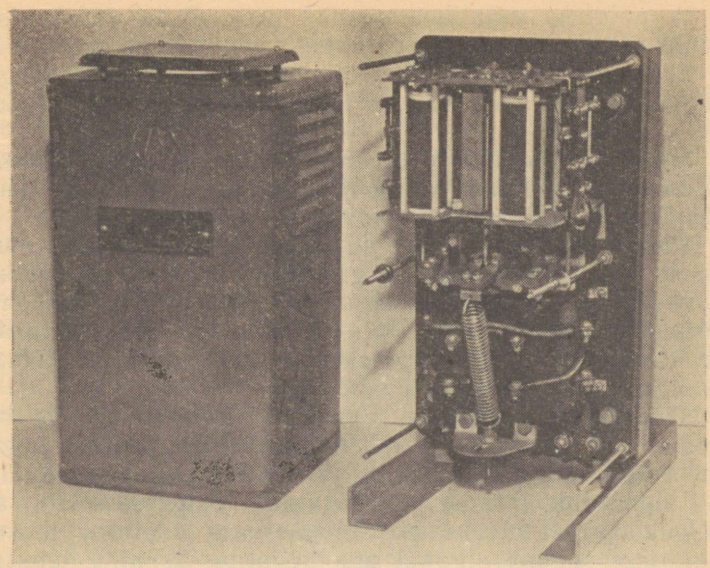
Järelikult võib käesoleval juhul formuleerida üsna lihtsa «tegevusjuhendi», mis koosneb kolmest «käsust»:

1. Soovitud temperatuuri puhul ventiili mitte keerata.
2. Temperatuuri tõusmisel üle soovitud piiri keerata ventiili *4* sulgemise suunas.
3. Temperatuuri langemisel alla soovitud suuruse keerata ventiili *4* avamise suunas.

Tegevusjuhend on nii lihtne, et näib, nagu ei valmistaks üldse mingisugust raskust seda lihtsa automaatikaseadme abil teostada. Ometi, nagu selgub järgnevates paragrahvides, on siingi oma tehnilised raskused. Üheks niisuguseks raskuseks on kahtlemata kuuma vee liikumiseks kuluv a e g. Püüdes teostada reguleerimist väga kiiresti, võib juhtuda, et eelmise muudatuse mõju pole veel jõudnud kontrollpunktis *5* ilmneda, kui juba teostatakse järgmine ventiili *4* asendi muutmine. Viimane võib aga osutuda just vastupidiseks, võrreldes sellega, mida tulnuks teha minimaalsete temperatuurikõikumiste tagamiseks.

Küllalt aeglase reguleerimise puhul sääraseid nähtusi ei esine ning võib kasutada joonisel 30, *b* kujutatud lihtsa lülitusega regulaatorit. Regulaator töötab täpselt vastavalt eeltoodud programmi punktidele. Termoelement *6* tekitab pinge U_t, mis on võrdeline vee temperatuuriga kontrollitavas punktis *5*. See pinge on lülitatud järjestikku vastasmärgilise *võrdluspingega* U_v, mis saadakse iseseisvast lisapingeallikast *7*. Võrdluspingeks valitakse pinge, mis vastab termoelemendi pingele soovitud temperatuuri puhul. Võrdluspinge muutmise teel võib muuta regulaatori *sätet*, s. o. reguleeritava temperatuuri soovitud väärtust. Pinge U võimendi *8* sisendis

$$U = U_v - U_t$$



Joonis 31

Pingeregulaator. Vasakul kate, paremal aparatuur. Pinge reguleerimine toimub seadme ülalosas asuvate, täiturelemendina toimivate süsiplaatidest sammaste pikkuse muutmise teel. Pikkuse muutumisel muutub süsiplaatidest samba elektriline takistus. Sammaste pikkust muudetakse seadme alumises osas asuva tugeva elektromagneti abil. Viimane täidab ühtlasi mõõteelemendi ülesandeid. Elektromagneti tõmbejõud vastukaalustatakse joonisel selgesti eraldatava vedru abil

ja järelikult ka vool võimendi väljundis võrduvad nulliga ainult siis, kui $U_v = U_t$.

Viimane võrdus on aga rahuldatud siis, kui temperatuur on soovitud väärtusega. Järelikult tegevusjuhendi esimene «käsk» on täidetud.

Temperatuuri tõusmisel üle soovitud väärtuse pinge U muutub negatiivseks, vool võimendi väljundis hakkab voolama samuti negatiivses suunas ning elektrimootor *9* hakkab ajami *10* abil sulgema ventiili *4*. Ventiili sulgemine kestab kuni vahe $U_t - U_v$ nulliks muutumiseni. Mootor peab olema sealjuures loomulikult nii ühendatud,

et ta pöörleks vajalikus suunas ning et ta pöörlemise suund sõltuks võimendisse saabuva signaali märgist.

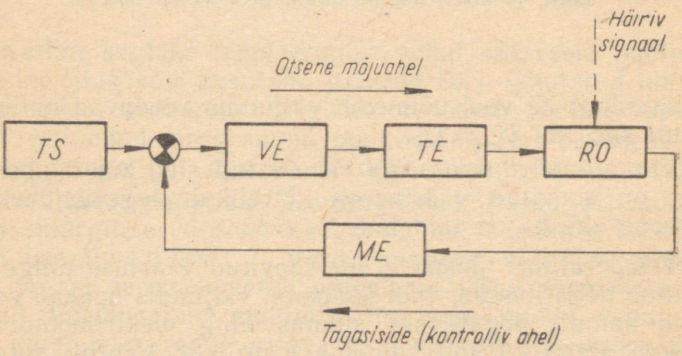
Temperatuuri langemisel toimub kõik vastupidi. Seega on siis ka teine ning kolmas tegevusjuhendi «käsk» täidetud.

Niisiis kirjeldatud seade, mis koosneb termoelemendist, võrdluspinge allikast, võimendist ja elektriajamist, võib asendada inimest vee temperatuuri reguleerimisel.

Üldpõhimõttelt on kõik automaatsed regulaatorid sarnased äsjakirjeldatuga, kuigi nende üksikud elemendid võivad olla kõige mitmesugusema ehituse ning tööpõhimõttega. Järelikult on ka automaatsete regulaatorite struktuurskeemid, mis peegeldavad seadme üldist töötamise printsiipi, omavahel sarnased.

Tüüpiline automaatse regulaatori struktuurskeem on toodud joonisel 32. Olgu tähendatud, et sektoritesse jagatud ringikestega tähistatakse struktuurskeemides tavaliselt signaalide liitmist ja lahutamist. Valgesse sektorisse saabuv signaal loetakse positiivseks ning liidetakse, musta sektorisse saabuv signaal aga negatiivseks ning lahutatakse. Reguleeritava objekti *RO* iseloomulikku näitajat mõõdetakse mõõteelemendi *ME* abil. Mõõteelemendist väljuv mõõdetava suuruse väärtus lahutatakse *tugi-* ehk *võrdlussuurusest*, mis saadakse elemendist *TS*. Vahe satub vahendavasse elementi *VE*, vahendavast elemendist täiturelementi *TE*, mis mõjutabki reguleeritavat suurust vajalikus suunas.

Joonisel 32 on näha *otsene mõjuahel:* võrdlussuurus



Joonis 32

Automaatregulaatori tüüpiline struktuurskeem

(pinge, vool vms.) → vahendav element → täiturelement → reguleeritav objekt.

Algul võib jääda mulje, et automaatse reguleerimise teostamiseks piisaks üksnes otsesest mõjuahelast. Tarvitseb vaid valida võrdlussuuruse niisugune väärtus, et reguleeritav protsess omaks soovitud näitajat, ning kõik on korras. Säärane arutluse käik oleks täiesti õige siis, kui reguleeritav suurus sõltuks ainuüksi mõõteelemendist saabuva signaali suurusest, viimane omakorda aga ainult võrdlussuuruse väärtusest. Niisugusel juhul tõepoolest langeks ära tarvidus keeruka automaatse regulaatori kasutamiseks. Tegelikult on nii looduses kui ka tehnikas kõik nähtused omavahel mingil viisil seotud. Seepärast on olemas ka väga suur hulk tegureid, millest reguleeritava suuruse väärtus sõltub.

Näiteks joonisel 30 kujutatud seadme puhul torust väljuva vee temperatuur sõltub: vee survest torus *1*, vee survest torus *2*, vee temperatuurist torus *1*, vee temperatuurist torus *2*, ventiili *3* asendist, ventiili *4* asendist ja tervest reast muudest väiksema tähtsusega tegureist.

Teades, kuidas sõltub vee temperatuur nendest faktoritest, oleks põhimõtteliselt võimalik neid ükshaaval arvesse võtta. Selleks tuleks iga faktori registreerimiseks konstrueerida spetsiaalne mõõteelement ja suunata kõik mõõdetud suurused spetsiaalsete vahendavate elementide kaudu täiturelementi. Sealjuures peavad vahendavate elementide karakteristikud olema valitud nii, et iga üksiku mõõteelemendi signaal, toimides võrdselt ja vastassuunaliselt teda väljakutsunud põhjusega, kompenseeriks viimase mõju. Praktiliselt on säärase seadme ehitamine kui mitte päris võimatu, siis igatahes äärmiselt raskendatud. Seade kujuneb üsna keerukaks. Seetõttu võib kompenseerimise viga, mis kujutab endast halvimal juhul üksikute elementide vigade s u m m a t, kujuneda lubamatult suureks. Vigade kompenseerimiseks tuleks seadet veelgi keerukamaks muuta jne. Võrratult lihtsam on teine tee. Suure hulga häirivate signaalide asemel võib kontrollida otseselt reguleeritavat suurust. Säärast kontrolli on kõige hõlpsam teostada võrdlussuurusega võrdlemise teel. Selleks ongi ette nähtud kontrolliv ahel.

Kontrolliv ahel koosneb mõõteelemendist *ME* (joonis 32), mille kaudu signaal reguleeritava suuruse kohta juhitakse t a g a s i vahendava elemendi sisendisse, v õ r-

reldakse seal signaaliga, mis vastab vajalikule reguleeritava suuruse väärtusele, ja vahe ilmnemisel mõjutatakse vajalikul viisil reguleeritavat suurust.

Et kontrolliv signaal toimib vastupidises suunas, võrreldes otsese mõjuahelaga, nimetatakse säärast toimet *tagasisideks* ja vastavat kontrollivat ahelat *tagasisideahelaks.*

Kui tagasisidesignaal lahutatakse võrdlussuurusest, nimetatakse seda tagasisidet *negatiivseks tagasisideks.* Automaatset reguleerimist suudab tagada üksnes negatiivne tagasiside. Negatiivne tagasiside üldiselt vähendab reguleeritava suuruse sõltuvust igasugustest juhuslikkudest mõjudest.

Positiivse tagasiside puhul kontrolliv signaal liidetakse võrdlussuurusega. Järelikult on positiivse tagasiside mõju vastupidine. Positiivse tagasiside olemasolu suurendab reguleeritava suuruse sõltuvust igasuguseist juhuslikest faktoreist, sest igale väljundsuuruse juhuslikule muutusele kaasneb sisendsignaali muutus, mis oma mõjusuunale vastavalt viib väljuva suuruse juhusliku kõrvalekalde edasisele suurenemisele. Selle tõttu tugevneb tagasiside kaudu saabuva signaali mõju veelgi. Kui tagasiside on küllalt tugev, siis seade võib muutuda hoopis ebastabiilseks. Väljundsuurus kasvab sealjuures iseseisvalt kas oma maksimaalse või minimaalse väärtuseni või siis hakkab isegi võnkuma nende kahe suuruse vahel.

Tugeva positiivse tagasiside olemasolu korral toodud näites (joonis 30) ventiil *4* kas sulgub või avaneb täielikult, või siis hakkab, teatud tingimustel, perioodiliselt sulguma ja avanema. Positiivse tagasiside olemasolu reguleeritorites on niisiis ilmselt ebasoovitav.

Positiivse ja negatiivse tagasiside mõju võib ilmekalt demonstreerida järgmise lihtsa, ent pisut ohtliku katsega. Jalgrattasõitja ja jalgratas teatavasti moodustavad reguleeriva süsteemi, kus inimese kui regulaatori ülesandeks on hoida ratast tasakaalus. Kui ratas kaldub näiteks vasakule, siis sõitja pöörab tüüri refleksi mõjul instinktiivselt samuti vasakule ja seejuures tekkiv tsentrifugaaljõud kallutab ratast paremale. Samuti vastupidisel juhul. Nii säilitatakse ratta tasakaaluseisund. Ilmselt on siin tegemist negatiivse tagasisidega. Et rattasõitja reageerimine on reflektoorne, nähtub kasvõi sellest, et rattasõit nõuab õppimist. Ei piisa sellest, kui inimene teab, et ratta

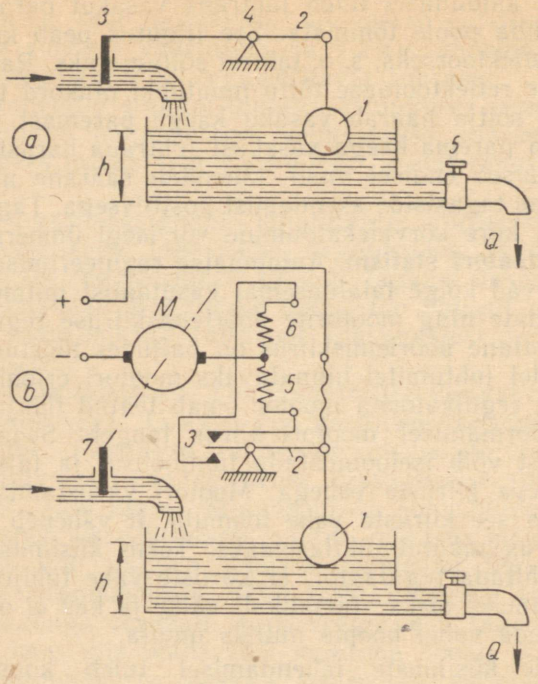
vasakule kaldumisel tuleb juhtraua vasakut haru vasaku käega enda poole tõmmata. See liigutus peab kujunema täiesti reflektoorseks, s. o. tahtest sõltumatuks. Rattasõitja liigutuste reflektoorsuse tõttu muutubki olukord täielikult siis, kui sõitja haarab vasaku käega paremast juhtraua harust ja parema käega vasakust juhtraua harust. Et refleks tegutseb endisel viisil, tähendab säärane muudatus negatiivse tagasiside asendamist positiivsega. Tagajärjeks on ratta kiire kõrvalekaldumine või isegi ümberminek.

Regulaatori statism. Automaatse reguleerimise süsteemid leiavad kõige laialdasemat kasutamist mitmesuguste jõumasinate ning mootorite pöörlemiskiiruse reguleerimiseks. Ühtlane pöörlemiskiirus on paljudes tööstusharudes ja muudel juhtumitel hinnatavaks mootori eriomaduseks. Tavaline regulaatorita mootor omab teatud tühijooksukiirust. Koormamisel mootori kiirus langeb. Seda kiiruse langemist võib iseloomustada tühijooksul ja täiskoormusel esineva kiiruste vahega. Mootori varustamisel regulaatoriga see kiiruste vahe loomulikult väheneb ja mootori kiirus muutub ühtlasemaks. Tekib küsimus, kuidas tuleks ehitada regulaator, et kiiruste vahe tühijooksul ja täiskoormusel oleks võimalikult väike ja kas ei oleks võimalik seda vahet hoopis nulliks muuta.

Nende küsimuste lahendamisel tuleb konstruktoril kokku puutuda kahe põhimõtteliselt erineva automaatse regulaatori tüübiga — staatilise ja astaatilise regulaatoriga. Nende oluliseks omavaheliseks erinevuseks on see, et kui *staatilises* süsteemis püsiva võrdlussuuruse puhul väljundsuurus, näiteks mootori pöörlemiskiirus, muutub ligikaudu võrdeliselt segava mõju, näiteks mootori koormuse suurusega, siis *astaatilises* süsteemis jääb reguleeritav suurus praktiliselt muutumatuks. Liigitus on kehtiv nii mootorite kui ka muude objektide reguleerimise kohta.

Hästi selgub astaatilise ja staatilise reguleerimise olemus vee nivoo regulaatorite vaatlemisel.

Joonisel 33 on toodud kahe erineva ehitusega vee nivoo regulaatori põhimõtteskeemid. Joonisel 33, *a* on kujutatud lihtne nn. *otsetoimega regulaator*, kus mõõteelemendiks on ujuk *1*, vahendavaks elemendiks kang *2* ja täiturelemendiks siiber *3*. Võrdlussuuruseks on kangi *2* toetuspunkti *4* kõrgus, mis määrab reguleeritava nivoo. See lihtne seade toimib regulaatorina. Vee nivoo alanemisel langeb ka ujuk ning avab siibri *3* suuremal mää-



Joonis 33

a — staatiline vee nivoo regulaator; *b* — astaatiline vee nivoo regulaator

ral, mille tagajärjel vee juurdevool suureneb. Vee nivoo tõusmisel siiber sulgub. Säärane automaatne regulaator hoiab nivoo *h* anumas ühel kõrgusel siis, kui väljavooluava ventiil *5* on suletud, sest vähimalgi vee nivoo alanemisel (näiteks auramise tagajärjel) avaneb otsekohe siiber *3*, põhjustades vee juurdevoolu kuni endise nivoo taastumiseni. Kui aga avada ventiil *5*, peab tasakaaluolukorra tagamiseks sissevool siibri kaudu kujunema täpselt niisama suureks kui väljavool *Q*. Järelikult peab ka siiber *3* olema rohkem avatud. See on aga võimalik üksnes ujuki, ent järelikult ka nivoo madalama asendi korral.

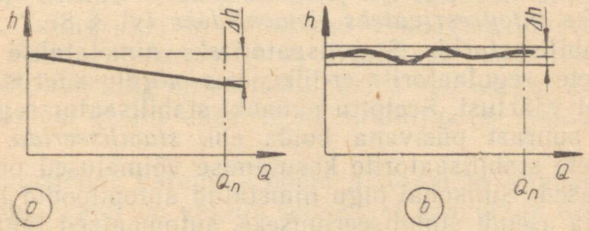
Seega vee nivoo *h* on küll püsiv ventiili *5* iga teatud asendi puhul, kuid nivoo kõrgus on seda väiksem, mida suuremal määral on avatud ventiil *5* ja järelikult mida suurem on väljavoolava vee hulk *Q*.

Joonisel 34, *a* on graafiliselt kujutatud vee nivoo *h* sõltuvus väljavoolava vee hulgast *Q*. Nivoo muutuse suurust Δh täiesti avatud väljavooluava ning maksimaalse väljavoolava veehulga Q_n puhul nimetatakse *statismiks*. Regulaatori statismi väljendatakse tavaliselt protsentides. Statism on niisiis arvutatav valemist

$$s = \frac{\Delta h}{h} \cdot 100\%,$$

kus *h* on vee nivoo kõrgus suletud väljavooluava puhul. Tavaliselt omab regulaatorite statism väärtust 2—5%.

Astaatilised regulaaotrid. Joonisel 33, *b* on kujutatud pisut erineva ehitusega vee nivoo regulaatori skeem. Vahe on siin selles, et ujuk *1* mõjutab kangi *2* abil kontakte *3*, mis lülitavad sisse ning välja mootori *M* ergutusmähiseid. Ergutusmähised on ühendatud nii, et ergutusmähise *5* sisselülitamisel hakkab mootor siibrit *7* avama. Seevastu ergutusmähise *6* sisselülitamisel hakkab siiber *7* sulguma. Ujuki keskasendi puhul, kui kang *2* ei puuduta kumbagi kontakti, mootor seisab. Järelikult lakkab reguleerimine sõltumata väljavoolava vee hulgast alles siis, kui vee nivoo ja ujuk on saavutanud eelnimetatud keskasendi. Kõikidel muudel juhtumitel reguleeritakse siibri *7* asendit seni, kuni vee nivoo omandab nimetatud väärtuse. Säärast regulaatorit nimetatakse *astaatiliseks* regulaatoriks. Regulaatori tööd võib kujutada graafiku abil, mis on toodud joonisel 34, *b*. Vee nivoo on sõltumatu väljavoolava vee hulgast ja püsib pidevalt teatud kõrgusel. Prakti-



Joonis 34

a — staatilise regulaatori koormusjoon; *b* — astaatilise regulaatori koormusjoon

liselt ei ole võimalik teha kontaktide *3* vahekaugust astaatilises regulaatoris väga väikeseks, sest siis igasugune juhuslik kontaktide paindumine või metalliosakese sattumine kontaktide vahele võib viia selleni, et kang ühendub üheaegselt mõlema kontaktiga. Analoogilised raskused tekivad ka muude astaatilise regulaatori konstruktsioonide puhul. Seepärast tekib ka astaatilistes regulaatorites viga Δh (joonis 34, *b*). Astaatilise regulaatori viga määratakse samuti protsentides.

$$e = \frac{\Delta h}{h} \cdot 100\%.$$

Sedalaadi viga nimetatakse tavaliselt regulaatori *ebaühtluseks*. Kõrgekvaliteediliste astaatiliste regulaatorite ebaühtlus ei ületa protsendi kümnendikke või isegi sajandikke osi. Astaatilise regulaatori viga ei olene järelikult häiriva faktori suurusest (käesoleval juhul väljavoolava vee hulgast), vaid kannab juhuslikku iseloomu. Vea maksimaalne võimalik suurus on määratud regulaatori konstruktsiooniga, käesoleval juhul kontaktide vahekaugusega.

Ülalkirjeldatud astaatiline regulaator kujutab endast ühte võimalikku lahendust. Tegelikkuses astaatilised regulaatorid, samuti nagu staatilisedki, võivad omada väga mitmesugust konstruktsiooni. Astaatilise regulaatori oluliseks tunnuseks on elemendi olemasolu, mille väljundsuurus muutub vahetpidamata, kuigi sisendsignaal on muutumatu suurusega. Käesoleval juhul on sääraseks elemendiks, mille sisend- ja väljundsuuruse vahel puudub üksüheline seos, elektrimootor. Signaali olemasolul ei lakka mootori võll pöörlemast enne, kui reguleerimise viga võrdub nulliga. Kirjeldatud tüüpi elemente nimetatakse ka *integreerivateks elementideks* (vt. § 8).

Stabilisaatorid. Stabilisaatoriteks nimetatakse automaatsete regulaatorite eriliiki, kus võrdlussuurus omab püsivat väärtust. Seetõttu püüabki stabilisaator reguleeritavat suurust püsivana hoida ehk *stabiliseerida*. Automaatsete stabilisaatorite kasutamise võimalused on väga laialdased. Siinkohal olgu nimetatud autopiloodid lennuki kursi ja asendi stabiliseerimiseks, automaatsed regulaatorid mitmesuguste mootorite ja turbiinide pöörlemiskiiruse püsivuse tagamiseks, automaatsed regulaatorid rõhu, temperatuuri jne. stabiliseerimiseks tööstuslikes protsessides,

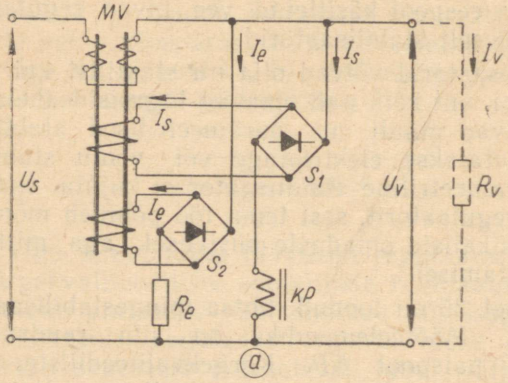
pingestabilisaatorid tarbijale rakendatava pinge püsivaks muutmiseks ja terve rida muid seadmeid. Klassikaliseks mootori kiiruse stabilisaatori näiteks on aurumasina üldtuntud tsentrifugaalkiirusregulaator ehk nn. Watti regulaator. Ka eespool käsitletud vee nivoo regulaatorid on oma olemuselt stabilisaatorid.

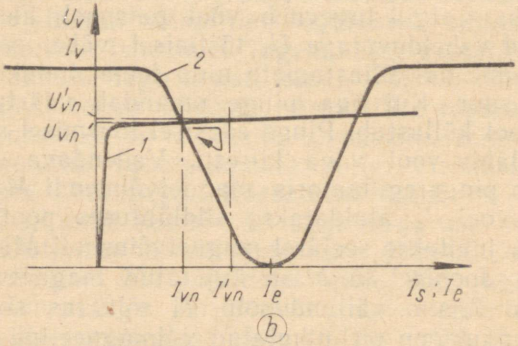
Stabilisaatorid võivad olla nii staatilist kui ka astaatilist tüüpi, ent kõik nad omavad tagasisideahelat. Erandi moodustavad ainult nn. parameetrilised stabilisaatorid, mida kasutatakse elektripinge või -voolu stabiliseerimiseks. Parameetriline stabilisaator ei kujuta endast automaatset regulaatorit, sest tema töö põhineb mõnede seadmete füüsikaliste omaduste püsivusel, aga mitte tagasiside kasutamisel.

Joonisel 35 on toodud lihtsa pingestabilisaatori lülitusskeem. Mõõteelemendiks on siin raudsüdamikuga küllastuv paispool *KP*. Kõrgekvaliteediliste, nn. täisnurkse hüstereesisilmusega magnetiliste materjalide kasutamisel on säärast paispooli läbiva voolu sõltuvus pingest selline, nagu on kujutatud joonisel 35, *b* (kõver *1*). Joonisel selgub, et algul tugevneb vool paispooli klemmidele rakendatud vahelduvpinge U_v tõstmisel vähe, sest paispooli südamik on küllastumata ning tema induktiivtakistus väga suur. Kui aga pinge omandab väärtuse U_{vn}, siis paispool küllastub. Pinge edasisel tõusmisel suureneb paispooli läbiv vool väga kiiresti. Vahendava elemendi osa täidab pingeregulaatoris magnetvõimendi *MV*. Paispooli *KP* vool I_s alaldatakse sildlülituses pooljuhtalalditega S_1 ja juhitakse seejärel magnetvõimendi *MV* sisendmähisesse. Joonisel 35, *b* on kujutatud magnetvõimendi tunnusjoon *2*, s. o. väljundvoolu I_v sõltuvus sisendvoolust I_s. Tunnusjoon on nihutatud eelmagneetimisvoolu I_e võrra. Eelmagneetimisvool I_e tekitatakse stabiliseeritud pinge U_v abil ning on seetõttu püsiva suurusega. Eelmagneetimisvool alaldatakse teise sildlülituses alaldaja S_2 abil.

Tunnusjoone paremale poole nihutamine eelmagneetimisvoolu I_e abil on vajalik selleks, et saavutada negatiivset tagasisidet. Antud juhul on tagasiside tõepoolest negatiivne. Selles võib veenduda, eeldades, et stabilisaator töötab olukorras, kus väljundpinge väärtus U_{vn} ja väljundvoolu väärtus I_{vn} vastavad tunnusjoonte lõikepunktile,

nagu on näidatud joonisel 35, *b*. Kui nüüd mingil juhuslikul põhjusel stabilisaatori väljundpine U_{vn} tõuseb uue väärtuseni U'_{vn}, siis sellele vastab anduri voolu tunduv kasva-

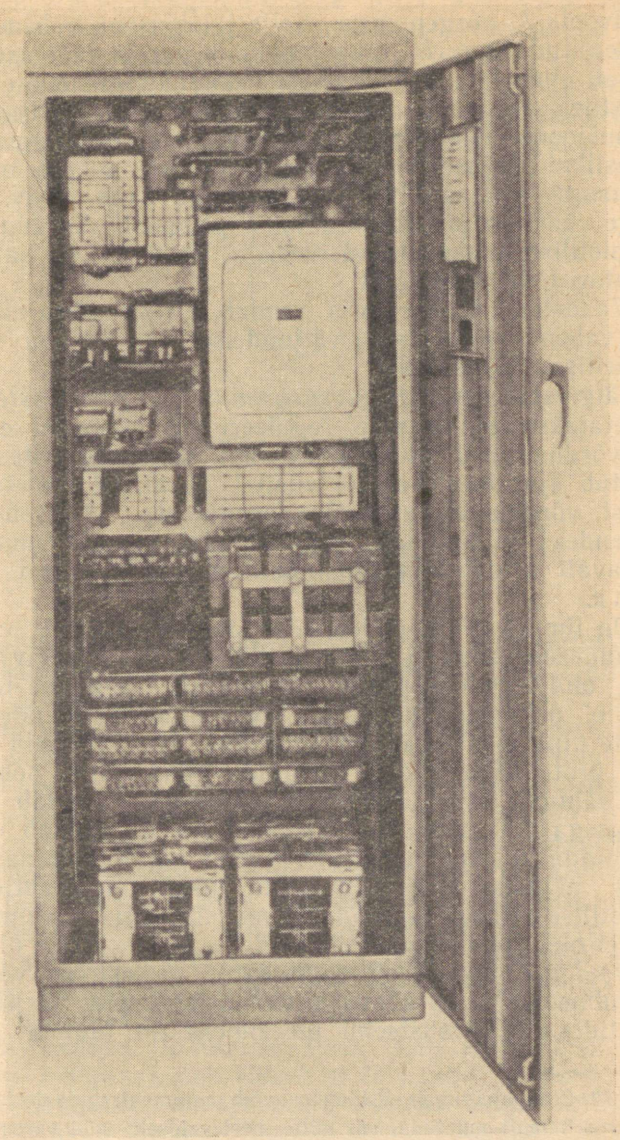




Joonis 35

a — pingestabilisaatori skeem; *b* — paispooli läbiva voolu sõltuvus pingest (kõver *1*) ja magnetvõimendi tunnusjoon (kõver *2*)

mine kuni väärtuseni I'_{vn}. See tähendab, et magnetvõimendi sisendsignaal suureneb. Vastavalt magnetvõimendi tunnusjoonele põhjustab sisendvoolu tugevnemine väl-



Joonis 36

Magnetvõimendiga varustatud pingeregulaator suurte vahelduvvoolugeneraatorite pinge reguleerimiseks

jundvoolu I_v nõrgenemise. Selle tulemusena väheneb stabiliseeritud pinge U_v ning omandab uuesti väärtuse, mis vastab anduri ja vahendava elemendi tunnusjoonte lõikepunktile. Niisamuti pöördub stabilisaatori talitluspunkt tunnusjoonte lõikepunkti tagasi, kui väljundpinge mingil juhuslikul põhjusel langeb. Nagu jooniselt selgub, on tunnusjoonte lõikepunktile vastav pinge üsna püsiv. Selle pinge väärtuse püsivus tagatakse paispooli *KP* südamiku magnetiliste omaduste püsivusega. Vastavalt on ka stabilisaatori toime efektiivne.

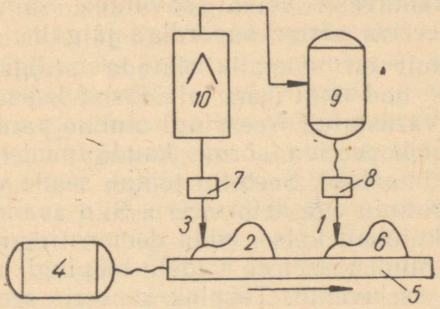
Vaadeldud regulaatoris puudub eriline täiturelement, sest vahendava elemendi väljund ise esineb juba sobiva elektrilise suuruse näol.

Jälgivsüsteemid. *Jälgivsüsteemiks* ehk *servosüsteemiks* nimetatakse automaatse reguleerimise süsteemi eriliiki, kus võrdlussuurus ei ole püsiv nagu stabilisaatorites, vaid muutub ajas meelevaldsel viisil.[1] Tavaliselt nimetatakse sellist võrdlussuurust *etteandesuuruseks*. Jälgivsüsteemi ülesandeks on sundida reguleeritavat suurust muutuma vastavalt etteandesuuruse muutumisele, viimast j ä l g i m a.

On ilmne, et väljundsuuruse sidumine küllalt võimsa etteandesuurusega ei tekita erilisi raskusi. Jälgivsüsteemide oluliseks omaduseks on aga just võimalus tagada tühiste, peaaegu tabamatute signaalide täpne jälgimine suurte ning massiivsete masinate või suurt jõukulu nõudvate protsesside poolt. Niisugune ebatavaline põhjuslik seos nähtuste vahel, kus võimas protsess jäljendab suure täpsusega väiksevõimsuselist protsessi, võimaldab sageli saavutada üllatavaid efekte. Üheks kõige hämmastavamaks näiteks jälgivsüsteemide tööst on kahtlemata ballistilise raketi juhtimine tema trajektoori algusosas. Siin ei ole etteandesuurust füüsilises mõttes üldse olemas. On vaid matemaatiliselt väljendatud trajektoori võrrand ja andmed raketi nõutava kiiruse kohta selle trajektoori punktides. Jälgivsüsteemi ülesandeks on tagada raketi

[1] Programmjuhtimise seadmetes võib automaatregulaatori võrdlussuurus samuti muutuda, ent mitte meelevaldselt, vaid varem kindlaksmääratud programmi kohaselt. Säärast automaatregulaatorit nimetatakse ka *programmregulaatoriks*. Programmregulaatorite reguleerimise kvaliteeti (vt. § 8) on kergem tagada, sest etteandesuuruse muutumise käik on eelnevalt teada.

trajektoori kokkulangemine selle üsna abstraktse matemaatilise informatsiooni kujul esitatud kõverjoonega ruumis. Ometi tagatakse etteantud trajektoori jälgimine raketi poolt mitte tavalise tehnilise, vaid isegi tunduvalt suurema täpsusega. Väga efektiivne on jälgivsüsteemide rakendamine ka metallitöötlemispinkide juhtimisel.



Joonis 37

Jälgivsüsteemiga varustatud kopeerfreesi põhimõtteskeem

Joonisel 37 on kujutatud kopeerfreesi põhimõtteskeem. Jälgivsüsteemi ülesandeks on siin juhtida freesi *1* niiviisi, et see jälgiks võimalikult täpselt mööda mudeli *2* pinda libiseva sõrme *3* liikumist, kujundades töödeldava eseme pinna vastavalt mudeli kujule. Mootori *4* jõul liigub töölaud *5* koos mudeli ning toorikuga *6* joonisel noolega näidatud suunas. Sõrm *3*, liugudes mööda mudeli pinda, annab vertikaalsihilised liikumised edasi andurile *7*. Anduriks võib olla näiteks induktiivne mõõteelement, mille töö põhineb õhupilu muutumisel. Anduri kest on jäigalt ühendatud freesi kandva supordiga *8*, mida vertikaalsihis nihutab mootor *9*. Seega siis reageerib andur supordi ja kopeeriva sõrme omavahelisele suhtelisele nihkumisele vertikaalsihis.

Kui töölaua liikumisel sõrm surutakse üles, tekib anduris *7* signaal, mis võimendi *10* kaudu käivitab mootori *9*. Sealjuures on saabunud signaali suund selline, et suport hakkab tõusma, jälgides sõrme liikumist. Tõus kestab seni, kuni supordi tõusmise tagajärjel andur omandab uuesti neutraalse seisundi. Võimendatav signaal muutub siis nulliks ja mootor seiskub. Kui töölaua edasisel liiku-

misel sõrm langeb allapoole, tekib anduris vastassuunaline signaal ning mootor käivitub vastassuunas. Tulemuseks on supordi allapoole nihkumine kuni neutraalse olukorra saavutamiseni.

Kirjeldatud süsteemi tööga tutvumisel võib tekkida kahtlus, kas on siin jälgivsüsteemi kasutamine üldse põhjendatud. Nähtavasti võiks saavutada sama tulemuse, sidudes kopeeriva sõrme supordiga jäigalt.

Loomulikult on võimalik ehitada sedalaadi kopeerfreespinke — nad ongi üsna laialdaselt kasutusel. Jälgivsüsteemiga varustatud freespingi oluline paremus seisneb aga selles, et kopeeriva sõrme kaudu mudelile mõjuvad jõud on minimaalsed. Seetõttu töötab seade väga täpselt, mudel aga ei kulu ega deformeeru. Siin avanevaid võimalusi näitab kujukalt katse, mida demonstreeriti ühel töös-tusnäitusel. Mudeli asemel heideti tööpingi mudelilauale tükk tihedat seebivahtu. Tööpink kopeeris seebivahupinna täpselt metallis.

Jälgivsüsteemideta oleks mõeldamatu ka joonise või numbrilise informatsiooni järgi töötavate tööpinkide ning paljude muude tänapäeva automaatikaseadmete töö.

8. Reguleerimise kvaliteet ja regulaatori stabiilsus

Senikäsitletud materjal puudutab üksnes reguleerivate süsteemide staatilisi omadusi, s. o. niisugust olukorda, kus reguleerimisprotsess toimub väga aeglaselt. Sellisel juhul ei tarvitse arvesse võtta automaatikasüsteemi elementide ega ka reguleeritavate objektide poolt tekitatavat ajalist viivitust sisenevatele signaalidele reageerimisel. Asja lihtsustamiseks eeldatakse, et kõik automaatse reguleerimise süsteemi osad reageerivad silmapilkselt. Näiteks jälgivsüsteemi puhul, mille skeem on toodud joonisel 37, ei tekita kopeeriva sõrme jälgimine freesi poolt raskusi, kui sõrme liikumise kiirus on küllalt väike, näiteks mõned millimeetrid minutis.

Kui aga sõrme asend muutuks hüppeliselt sekundi murdosa vältel mitme sentimeetri võrra, ei jõuaks frees talle otsekohe järele. Tekiksid täiendavad reguleerimise vead supordi ja mootori *9* inertsi tõttu.

Automaatse reguleerimise süsteemide käitumine kiiresti muutuvate signaalide puhul kuulub *automaatse regu-*

leerimise dünaamika probleemide valdkonda. Enamik käesoleval ajal kasutatavaist regulaatoreist nõuab dünaamika nähtuste arvesse võtmist. Kui reguleerivate süsteemide staatika on käsitletav lihtsate algebraliste võrrandite abil, siis dünaamiliste protsesside käsitlemisel tuleb kasutada kõrgema matemaatika meetodeid. Et paremini orienteeruda automaatse reguleerimise süsteemide dünaamika küsimustes, jagatakse need süsteemid sageli *tüüplülideks*. Tüüplülideks jaotatud automaatse reguleerimise süsteemi omadustes võib teatud määral orienteeruda ka ilma kõrgema matemaatika meetodeid rakendamata.

Automaatse reguleerimise süsteemi tüüplülid. Mistahes automaatse reguleerimise süsteemi võib jagada tüüplülideks. Sealjuures võivad lülide sisendid ja väljundid olla ühendatud kõige mitmesugusemal viisil nii omavahel kui ka väliste objektidega. Tüüplülide omavahelisi ühendusi kujutatakse tavaliselt struktuurskeemina. Kuigi tüüplüli on iseenesest abstraktne mõiste ja esineb vaid paberil, vastab tavaliselt igale automaatse reguleerimise süsteemis esinevale seadmele või aparaadile üks tüüplüli. Mõnikord aga on õigem kujutada üht seadet koosnevana mitmest tüüplülist või, vastupidi, rida seadmeid üheainsa tüüplülina.

Enamiku automaatikaseadmete puhul on üldiselt teada, milliste tüüplülide abil neid võib kirjeldada. Tüüplülisid on üsna piiratud arv, nende omadused aga on hästi teada.

Tüüplülidest koosnevate struktuurskeemide alusel ongi võrdlemisi hõlpsasti võimalik orienteeruda automaatse reguleerimise süsteemide dünaamika küsimustes. Sääraste struktuurskeemide varal võib koostada mitte üksnes matemaatilisi valemeid, vaid ka matemaatilisi m u d e l e i d reguleerimise dünaamika uurimiseks. Sageli võib hinnata süsteemi omadusi lihtsalt struktuurskeemi põhjal. Selleks aga on tarvis hästi tunda üksikute tüüplülide omadusi.

Tüüplülide omadusi võib kirjeldada mitmesugusel viisil. Kõige täielikumalt on tüüplülide omadused määratud *siirdenähtuste* järgi, mis tekivad teatud tüüpiliste signaalide saabumisel lüli sisendisse. Siirdenähtuseks nimetatakse seadme väljundis tekkivat signaali muutumist signaali järsul muutumisel seadme sisendis. Tüüpilisteks järsult muutuvaiks signaalideks on kas sisendsignaali silmapilkne muutus ühe ühiku võrra ehk nn. *ühikhüpe* või siis

väga väikese kestusega ja suure amplituudiga signaal, mille amplituudi ja vältuse korrutis võrdub ühega — nn. *ühikimpulss.*

Tüüplüli reageerimine ükskõik millisele nendest signaalidest määrab lüli tüübi ja tema iseloomulikud näitajad. Sel viisil on alati võimalik määrata mingi automaatikaelemendi omadusi katselisel teel, kui juhtida lüli sisendisse näiteks ühikimpulsile vastav signaal ja jälgida samal ajal signaali lüli väljundis näiteks ostsillograafi abil või mingil muul viisil.

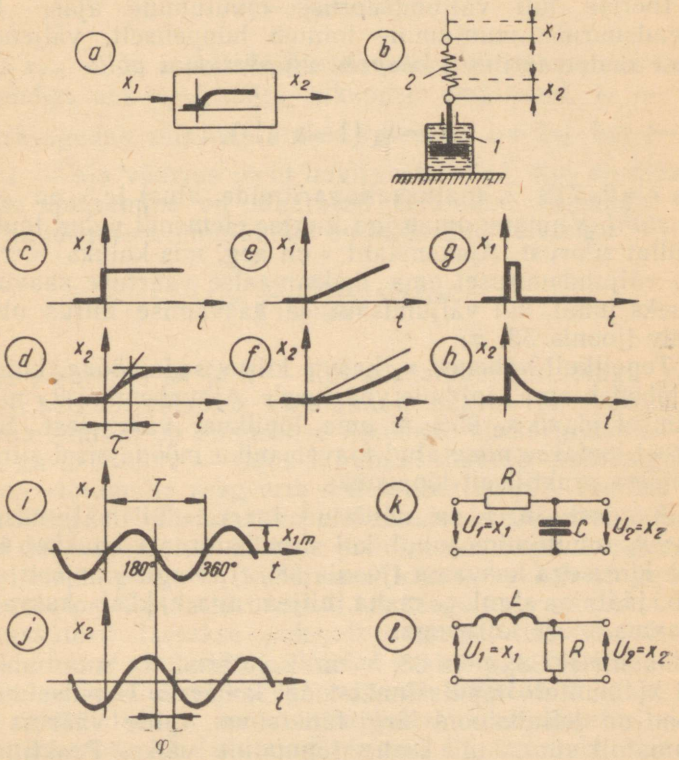
Proportsionaalne lüli. Proportsionaalseks lüliks nimetatakse lüli, mis annab moonutamatult edasi mistahes ajalise kulgemisega signaali. Proportsionaalse lüli väljundsuurus on alati täpselt proportsionaalne (võrdeline) sisendsuurusega. Proportsionaalsuse tegurit *k* väljendatakse väljund- ja sisendsignaali suhtena ning nimetatakse sageli lüli *ülekandeteguriks* või, kui ta on suurem ühest, ka võimendusteguriks. Tegelikkuses proportsionaalseid lülisid sõna ranges tähenduses ei esine. Ometi võib lugeda lüli praktiliselt proportsionaalseks, kui tema poolt tekitatud signaali moonutuste ajaline kestus on tühiselt väike, võrreldes antud süsteemi teiste lülide poolt tekitatavate moonutuste ajalise kestusega. Näiteks automaatse juhtimise süsteemis, kus elektrimootorit juhitakse elektronlambi abil, võib viimast ilmselt lugeda proportsionaalseks lüliks. Elektronlülituse reageerimise kiirus on teatavasti miljoneid kordi suurem elektrimootori reageerimise kiirusest.

Inertne lüli. Enamik automaatse reguleerimise süsteemi elementidest kujutab endast inertseid lülisid, sest inerts on mitte ainult mehaaniliste, vaid ka elektriliste seadmete üldiseks omaduseks. Inerts avaldub lüli väljundsuuruse muutuste teatud mahajäämises sisendsuuruse muutustest.

Joonisel 38, *a* on toodud inertse lüli tingmärk, mida kasutatakse struktuurskeemides. Joonisel 38, *b* on toodud lihtsa mehaanilise seadme visand, mis oma omaduselt vastab ligikaudu inertsele lülile. Seade koosneb õliga täidetud silindrist *1*. Silindris liikuv kolb on varustatud väikese läbiva avaga (joonisel kujutamata). Kolbi on peaaegu võimatu kiiresti liigutada, sest kolvi all olev õli ei pääse kuhugi, teda aga kokku suruda ei ole võimalik. Seepärast avaldab ta kolvi liikumisele ülisuurt takistust.

Küllalt aeglane kolvi liikumine ei ole aga peaaegu üldse takistatud, kuna õli jõuab kolvis oleva väikese ava kaudu vabalt ühelt poolt teisele voolata. Säärast seadet kasutatakse laialdaselt mitmesugustes aparaatides ebasoovitavate liikumiste summutamiseks.

Kolvi külge kinnitatud vedru *2* ülemise otsa edasiliikumise suurus x_1 vastab inertse lüli sisendsuurusele.



Joonis 38

a — inertse lüli tingmärk; *b* — inertse lüli võimalik teostus mehaanilises süsteemis; *c*, *d* — inertse lüli väljundsuuruse muutumine hüppeliselt muutuva sisendsuuruse puhul; *e*, *f* — inertse lüli väljundsuuruse muutumine ühtlase kiirusega kasvava sisendsuuruse puhul; *g*, *h* — inertse lüli väljundsuuruse muutumine sisendisse juhitava ühikimpulsi toimel; *i*, *j* — inertse lüli väljundsuuruse muutumine siinuseliselt muutuva sisendsuuruse puhul; *k* — inertse lüli teostus elektrilises süsteemis takistuse ja mahtuvuse abil; *l* — inertse lüli teostus elektrilises süsteemis takistuse ja induktiivsuse abil

Kolvi liikumine x_2 on inertse lüli väljundsuuruseks. On ilmne, et tõstes vedru ülemist otsa teatud x_1 väärtuse võrra (joonis 38, *c*), kolb «venib» talle teatud aja jooksul järele (joonis 38, *d*), jäädes lõpuks seisma asendis, mis vastab vedru pingestamata olukorrale. Nii et mõne aja möödudes alati $x_1 = x_2$. Samasugune nähtus tekib ka vedru ülemise otsa järsul allasurumisel.

Inertse lüli väljundsuuruse muutumine ajas, kui sisendsuuruse muutumine toimub hüppeliselt, väljendatakse matemaatiliselt *eksponentfunktsiooni abil:*

$$x_2 = x_1 (1 - e^{-\frac{t}{\tau}}),$$

kus e=2, 718 ... (naturaallogaritmide alus) ja τ on *ajakonstant.* Viimane omab iga inertse elemendi puhul teatud kindlat suurust. Ajakonstant τ on aeg, mis kuluks inertse lüli väljundsuurusel oma maksimaalse väärtuse saavutamiseks juhul, kui väljundsuuruse kasvamise kiirus oleks püsiv (joonis 38, *d*).

Tegelikult väheneb x_2 kasvu kiirus sedamööda, kuidas ta läheneb oma lõplikule väärtusele. Ajavahemiku 3τ möödumisel jõuab x_2 95%-ni oma lõplikust väärtusest. Seepärast loetakse nimetatud ajavahemiku möödumisel siirdeprotsess praktiliselt lõppenuks.

Joonisel 38, *f* on näidatud inertse lüli väljundsuuruse x_2 muutumine juhul, kui sisendsuurus x_1 hakkab ühtlase kiirusega kasvama (joonis 38, *e*). Nagu jooniselt selgub, jääb x_2 algul x_1 maha, hiljem aga hakkab kasvama niisama suure kiirusega.

Joonistel 38, *g* ja 38, *h* on kujutatud x_2 muutumine, kui x_1 muutub impulssfunktsiooni kohaselt. Impulssfunktsioon on definitsiooni järgi funktsioon, mille väärtus on lõpmatult suur, kuid kestus lõpmatult väike. Praktiliselt vastab impulssfunktsioonile lihtsalt küllalt lühike impulss. Mõnevõrra võib joonisel 38, *b* kujutatud inertse elemendi puhul impulssfunktsiooni jäljendada haamrilöök vedru ülemisele otsale. Vedru alumine ots nihkub löögi tagajärjel kiiresti teatud suuruse võrra alla ning liigub siis pikkamööda tagasi, seda muidugi juhul, kui vedru ülemine ots viidi pärast lööki kiiresti lähteasendisse tagasi.

Ühendades taolise inertse elemendi vedru ülemise otsa kepsu abil ühtlaselt pöörleva väntvõlliga, võib anda sel-

lele lainekujulise, siinuselise edasi-tagasi liikumise (joonis 38, *i*). Loomulikult hakkab siis ka kolb (x_2) siinuseliselt liikuma (joonis 38, *j*). Seejuures aga x_2 siinuseline liikumine jääb ajaliselt maha x_1 siinuselisest liikumisest teatud aja φ võrra. Et siinuselise liikumise periood T jagatakse tavaliselt 360-ks kraadiks, mõõdetakse ka aega φ kraadides, kusjuures $\varphi = 0 \div 90°$. Siinuselist muutumist võib väljendada valemiga

$$x_1 = x_{1m} \sin \omega t,$$

kus x_{1m} on x_1 maksimaalse kõrvalekaldumise suurus keskasendist ehk siinuselise liikumise amplituud, ω — nn. nurksagedus, mis määratakse valemiga $\omega = 2\pi f$, kus $f = \frac{1}{T}$ ja t — aja väärtus meid huvitaval hetkel. Kui sisendsuuruse muutumine on määratud eeltoodud valemiga, siis väljundsuuruse muutumine on määratud valemiga

$$x_2 = x_{1m} \frac{k}{\sqrt{1 + \omega^2 \tau^2}} \sin (\omega t - \varphi),$$

kus $\varphi = \arctan \omega\tau$ ja k — lüli ülekandetegur. Nagu valemist selgub, väheneb ka signaali suurus ja seda enam, mida suurem on siinuselise liikumise nurksagedus ω. See on ka mõistetav — mida kiiremini muutub sisendsignaal, seda «loiumalt» reageerib sellele inertne lüli. Inertne lüli on hõlpsasti teostatav ka elektrilistes süsteemides. Joonisel 38, *k* kujutatud lülituse puhul, rakendades kondensaatorile äkki pinge U_1 takistuse R kaudu, hakkab pinge kondensaatori C plaatidel teatud kiirusega kasvama, sest kondensaatorit laetakse pidevalt vooluga, mis voolab läbi takistuse R. Sedamööda, kuidas vastupinge kondensaatoril viimase laadimisel kasvab, väheneb takistust R läbiv vool ja samuti laengu muutumise kiirus kondensaatoril. Kui kondensaator on laadunud pingeni U_1, muutub vool nulliks. Pinge kulg elemendi väljundis on iseloomulik inertsele lülile.

Säärase elektrilise inertse elemendi puhul on kerge arvutada lüli iseloomustavaid näitajaid:

$$\tau = RC \text{ ja } \varphi = \arctan R\omega C.$$

Inertne element on koostatav ka induktiivsust ja takis-

tust sisaldava lülitusena. Iseloomustavad näitajad on siis järgmised:

$$\tau = \frac{L}{R} \text{ ja } \varphi = \operatorname{arctan} \frac{\omega L}{R}.$$

Enamik kasutusel olevaid võimendavaid elemente, nagu pooljuhtvõimendi, magnetvõimendi ja üheastmeline elektrimasinvõimendi, on kirjeldatavad inertsete lülidena. Põikvälja-elektrimasinvõimendi on aga kirjeldatav kahe järjestikku ühendatud inertse lülina. Ka paljud andurid, täiturmehhanismid ja objektid vastavad oma dünaamilistelt omadustelt inertsele lülile.

Integreeriv lüli. Integreeriv lüli sarnaneb mõnevõrra oma omadustelt inertse lüliga. Õigemini, sisendsuuruse muutumise esimestel hetkedel käitub integreeriv lüli sarnaselt inertse lüliga. Hilisem siirdenähtuste kulg aga kujuneb neis lülides erinevalt. Integreeriva lüli põhiliseks omaduseks on see, et väljundsuuruse x_2 muutumise kiirus on võrdeline sisendsuuruse x_1 väärtusega.

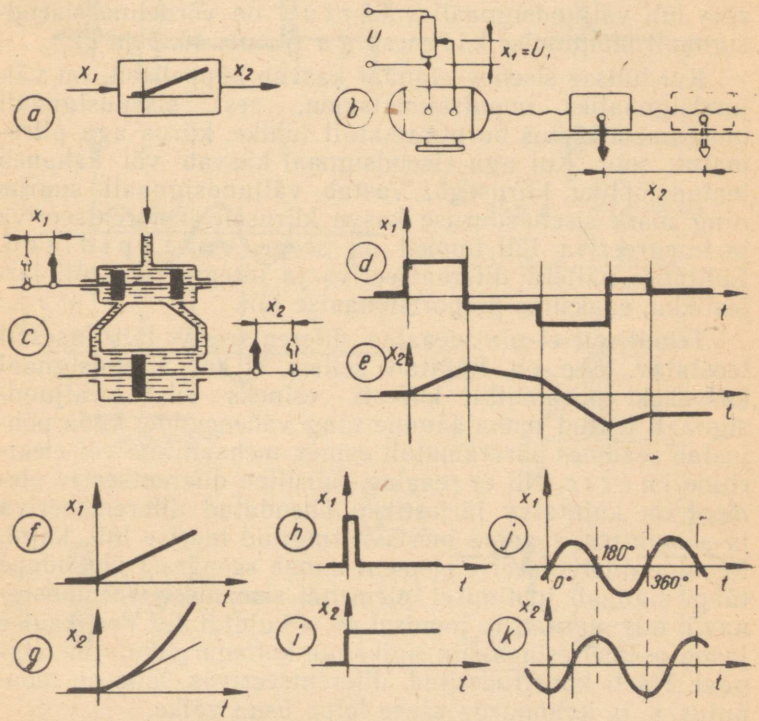
Integreeriva lüli (joonis 39, *a*) näiteks võiks olla elektrimootor koos käiguvõlliga tööriista sirgjooneliseks edasinihutamiseks (joonis 39, *b*).

Sisendsuuruseks on sellisel juhul mootori ankruringi antav pinge $U_1 = x_1$, väljundsuuruseks aga tööriista nihe x_2. Tõepoolest, mootori pöörlemise ja järelikult ka tööriista edasinihkumise kiirus on võrdeline mootori ankruringi antava pingega (eeldusel, et ergutusvool on püsiv).

Teiseks näiteks võiks olla hüdrauliline servomootor (joonis 39, *c*). Mida enam on avatud siiber (x_1), seda rohkem õli pääseb servomootorisse ja seda kiiremini liigub kolb (x_2). Joonisel 39, *e* on kujutatud integreeriva lüli väljundsuuruse x_2 muutumine, kui sisendsuurus x_1 (joonis 39, *d*) muutub keerulisel viisil. On näha, et väljundsuuruse muutumise kiirus, s. o. graafiku x_2 kallak on võrdeline sisendsuuruse x_1 väärtusega. Sisendsuuruse märgi muutumisel muutub ka kallaku märk, s. o. kõver omandab tõusva asemel langeva suuna. Kui sisendsuurus x_1 muutub nulliks, jääb väljundsuurus oma eelmise väärtuse juurde püsima.

Eelkirjeldatud seaduspärasusele allub integreeriva lüli väljundsignaal ka siis, kui sisendsignaal on ühtlaselt kasvav (joonis 39, *f* ja *g*), või omab impulssfunktsiooni kuju

(joonis 39, *h* ja *i*). Sisendsuuruse siinuselisel muutumisel on faasinihe integreeriva lüli sisend- ja väljundsuuruse vahel alati 90° (joonis 39, *j* ja *k*). Seega siis vastavad sisendsignaali nullist läbiminekule väljundsignaali lainete harjad, kus signaali suurus ei muutu. Väljundsignaali amplituud on aga pöördvõrdeline sagedusega. Matemaatiliselt võib integreeriva lüli väljundsignaali väljen-



Joonis 39

a — integreeriva lüli tingmärk; *b* — integreeriva lüli võimalik teostus elektromehaanilises süsteemis; *c* — integreeriva lüli võimalik teostus hüdraulilises süsteemis; *d*, *e* — integreeriva lüli väljundsuuruse muutumine meelevaldselt muutuva sisendsuuruse puhul; *f*, *g* — integreeriva lüli väljundsuuruse muutumine ühtlase kiirusega kasvava sisendsuuruse puhul; *h*, *i* — integreeriva lüli väljundsuuruse muutumine sisendisse juhitava ühikimpulsi toimel; *j*, *k* — integreeriva lüli väljundsuuruse muutumine siinuseliselt muutuva sisendsuuruse puhul

dada järgmiselt:

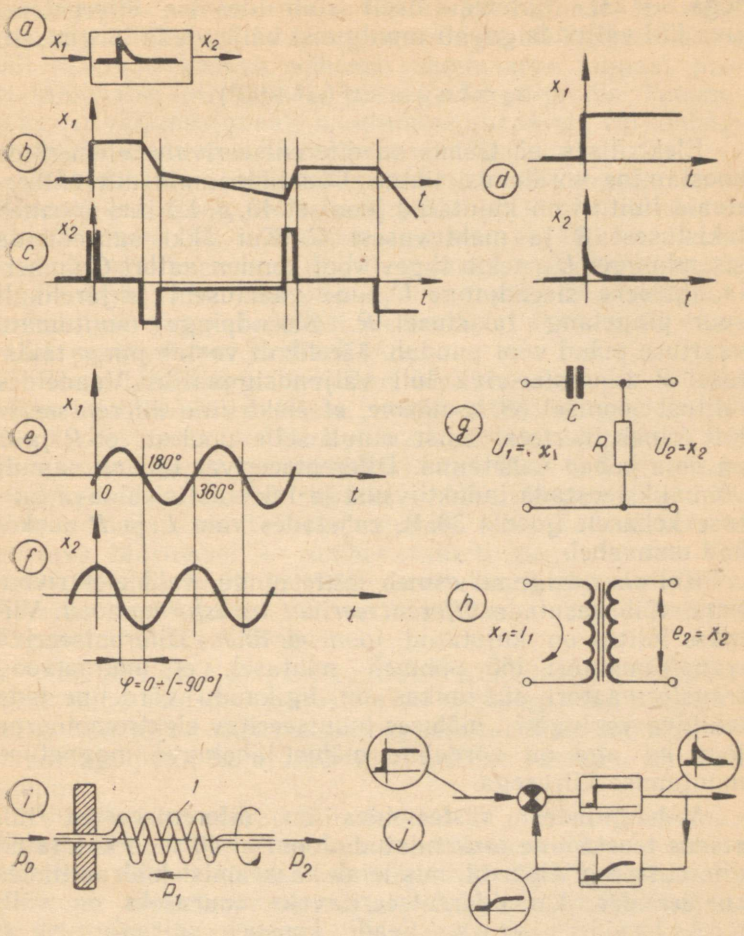
$$x_2 = k \frac{x_1}{\omega} \sin(\omega t - 90°).$$

Diferentseeriv lüli. Samuti nagu integreeriva lüli toimimine vastab matemaatilisele integreerimistehtele, nii vastab *diferentseeriva lüli* (joonis 40, *a*) toimimine matemaatilisele diferentseerimistehtele. Lühidalt võib diferentseeriva lüli toimimist määratleda järgmiselt: diferentseeriva lüli väljundsignaali väärtus on võrdeline sisendsignaali muutumise kiirusega (joonis 40, *b* ja *c*).

Kui lülisse sisenev signaal kasvab hüppeliselt, on väljundsignaaliks impulssfunktsioon, sest sisendsignaali muutumise kestus on piiramatult lühike, kiirus aga piiramatult suur. Kui aga sisendsignaal kasvab või kahaneb teatud lõpliku kiirusega, vastab väljundsignaali suurus ning märk sisendsuuruse kasvu kiirusele. Diferentseeriva ja integreeriva lüli toimed on seega vastupidised. Lülitades näiteks diferentseeriva ja integreeriva lüli järjestikku, saaksime proportsionaalse lüli.

Tehniliselt ei ole ideaalne diferentseeriv lüli otseselt teostatav. See on tingitud sellest, et kui sisendsignaal kasvakski piiramatult kiiresti, esineks siiski väljundsignaali teatud mahajäämine ning vähenemine, mida põhjustab seadmes paratamatult esinev mehaaniline või elektriline inertsus. Nii et reaalne, füüsiline diferentseeriv element on kujutatav järjestikku ühendatud diferentseeriva ja soovimatu, seadme inertsist tingitud inertse lüli kujul. Reaalne diferentseeriv element annab seepärast ühikhüppe tüüpi signaali juhtimisel elemendi sisendisse väljundsignaali, mis sarnaneb joonisel 40, *d* kujutatule. Vertikaalse joone asemel esineb siin ligikaudu kolmnurgakujuline signaal. Hästi konstrueeritud diferentseerivas lülis on moonutus, s. o. kolmnurga aluse laius üsna väike.

Siinuseliselt muutuva signaali puhul (joonis 40, *e*) jõuab väljundsignaal ajaliselt ette teatud nurga φ võrra (joonis 40, *f*), s. o. siinusfunktsiooni iseloomulikud punktid, nagu maksimumid ja nullist läbiminekud, tekivad diferentseeriva lüli väljundis aja φ võrra varem kui sisendis. Ideaalse diferentseeriva lüli puhul on ajaline ettenihe 90°, reaalsete diferentseerivate lülide puhul aga väiksem. Diferentseeriva lüli väljundsignaal suureneb siinuselise muutumise puhul võrdeliselt sisendsignaali nurksagedu-



Joonis 40

a — diferentseeriva lüli tingmärk; *b*, *c* — diferentseeriva lüli väljundsuuruse muutumine meelevaldselt muutuva sisendsuuruse puhul; *d* — diferentseeriva lüli väljundsuuruse muutumine ühikhüppe tüüpi sisendsignaali toimel; *e*, *f* — diferentseeriva lüli väljundsuuruse muutumine siinuselise sisendsignaali puhul; *g* — diferentseeriva lüli võimalik teostus elektrilises süsteemis takistuse ning mahtuvuse abil; *h* — diferentseeriv transformaator; *i* — diferentseeriva lüli võimalik teostus hüdraulilises süsteemis, kui diferentseeritavaks suuruseks on pöörlemiskiirus; *j* — diferentseeriva lüli kaudne teostus inertse ja proportsionaalse lüli abil

sega $\omega = 2\pi f$. Matemaatiliselt võib ideaalse diferentseeriva lüli väljundsignaali muutumist väljendada järgmiselt:

$$x_2 = kx_{1m}\,\omega \sin(\omega t + 90°).$$

Elektrilises süsteemis on diferentseerivate elementide koostamine võrdlemisi lihtne. Üks lihtsamaid diferentseerivaid lülitusi on kujutatud joonisel 40, *g*. Lülitus koosneb takistusest *R* ja mahtuvusest *C*. Kui äkki suurendada sisendpinget U_1, tekib tugev vool kondensaatori *C* ümberlaadimiseks sisendpinge U_1 uue väärtuseni ja järelikult suur pingelang takistusel *R*. Sisendpinge muutumatu väärtuse puhul vool puudub. Järelikult vastab pinge takistusel *R* diferentseeriva lüli väljundsignaalile. Vaadeldes lülitust joonisel 38, *k*, näeme, et elektriline diferentseeriv lüli erineb inertsest lülist ainult selle poolest, et *R* ja *C* on oma kohad vahetanud. Diferentseerivat lüli on samuti võimalik teostada induktiivsust ja takistust sisaldava lülituse kohaselt (joonis 38, *l*), vahetades vaid *L* ja *R* asukohad omavahel.

Kui sisendsignaal esineb mitte pinge, vaid elektrivooluna, võib kasutada *diferentseerivat transformaatorit*. Viimase lülitus on kujutatud joonisel 40, *h*. Diferentseeriva transformaatori töö põhineb nähtusel, et magnetvoog transformaatori südamikus on ligikaudu võrdeline teda tekitava vooluga i_1, mähises indutseeritav elektromotoorne jõud e_2 aga on võrdeline mähist aheldava magnetvoo muutumise kiirusega.

Mehaanilistes süsteemides on diferentseeriva lüli otsene teostamine raskendatud. Joonisel 40, *i* on kujutatud diferentseeriv element, mis leiab kasutamist hüdraulilistes süsteemides, kui diferentseeritavaks suuruseks on võlli p ö ö r l e m i s k i i r u s. Seade koosneb spiraaltorust *1*, mis pöörleb oma pikitelje ümber. Pöörlemise järsul pidurdamisel püüab spiraaltorus asuv õli inertsi tõttu edasi liikuda ja surutakse surve P_1 all sisenevale õlile vastu. Selle tagajärjel väljuva õli rõhk P_2 väheneb. Järsul pöörlemiskiiruse suurenemisel esineb vastupidine nähtus — õlirõhk P_2 suureneb.

Paljudel juhtudel konstrueeritakse diferentseeriv element selliselt, et lülitatakse proportsionaalse lüli tagasisideringi inertne lüli (joonis 40, *j*). Ühikhüppe tüüpi signaali saabumisel säärase kombineeritud lüli sisendisse on

signaali amplituud proportsionaalse lüli sisendis algul maksimaalne, kuna inertse lüli väljundsignaal on algul null. Sedamööda, kuidas tagasisidesignaali suurus inertse lüli väljundis kasvab, väheneb summaarne signaal proportsionaalse lüli sisendis ja seega ka väljundis. Tulemuseks on väljundsignaali muutumine sarnaselt väljundsignaali muutumisega diferentseeriva lüli puhul.

Võnkuv lüli. Teatud tähtsust automaatse reguleerimise süsteemides omab peale eelkirjeldatud lülide ka *võnkuv lüli*. Võnkuva lüli iseärasuseks on see, et väikese kestusega signaalile reageerib lüli vaibuva võnkeprotsessiga. Võnkumiste vaibumine ehk *sumbumine* on tingitud paratamatutest energiakadudest elemendis. Võnkuva lüli tingmärk on kujutatud joonisel 41, *a*.

Kõige laialdasemalt tuntud võnkuva elemendi näiteks võiks olla p e n d e l. Tõuke saamisel hakkab pendel võnkuma, kusjuures võnkeamplituud pidevalt väheneb. Kui võnkuva elemendi sumbumus on väga suur — kujutletagu näiteks vette asetatud pendlit — siis võnkumist ei teki. Väljundsuurus muutub siis sujuvalt oma jõudeolukorrale vastava väärtuseni — umbes samuti nagu inertse lüli puhul. Sellist võnkuvat lüli nimetatakse *aperioodiliseks*. Aperioodiline võnkuv lüli on kujutatav kahe järjestikku ühendatud inertse lülina.

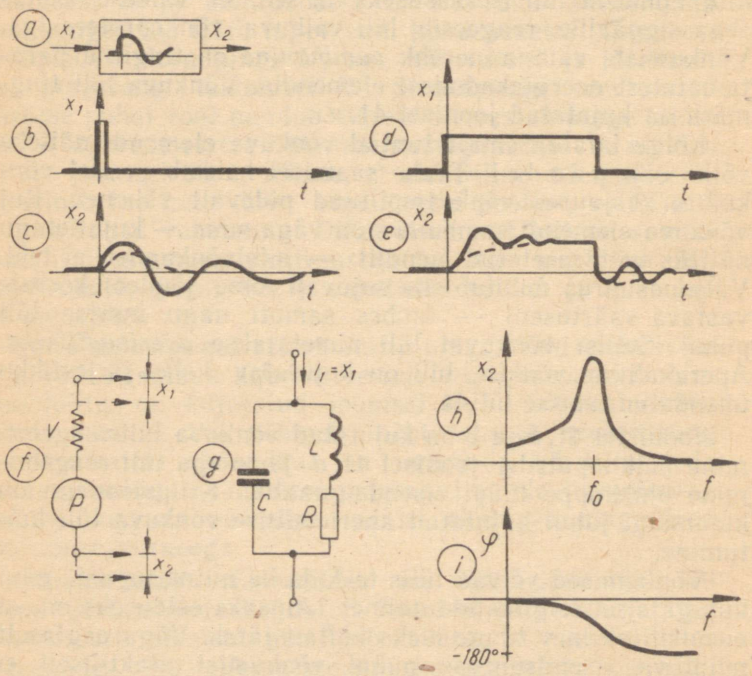
Joonistel 41, *b* ja *c* on kujutatud võnkuva lüli reageerimine ühikimpulsile, joonisel 41, *d* ja *e* aga lüli reageerimine ühikhüppe tüüpi sisendsignaalile. Kriipsjoonega on kummalgi juhul kujutatud aperioodilise võnkuva lüli käitumine.

Võnkumised võivad lülis tekkida ka mitmesuguste muu kujuga sisendsignaalide toimel. Ainsaks eelduseks on, et elementi sisenev tõuge oleks küllalt järsk. Väga aeglaselt muutuva sisendsuuruse puhul võnkumisi praktiliselt ei teki.

Mehaanilistes süsteemides on võnkuvaks elemendiks tavaliselt ühel või teisel viisil vedru kaudu seotud raskus *P* (joonis 41, *f*). Vedru *V* ülemise otsa asendi järsul muutumisel hakkab raskus *P* üles-alla võnkuma.

Elektrilistest seadmetest on võnkuva elemendina kõige enam tuntud *võnkering*, mis koosneb paralleelselt lülitatud mahtuvusest *C* ja induktiivsusest *L* (joonis 41, *g*). Sisendsignaal — vooluimpulss *i* — laeb kondensaatori *C*. Viimane, tühjenedes läbi induktiivsuse *L*, tekitab selles

voolu. Et induktiivsusel on omadus püüda säilitada tema kaudu voolavat voolu (elektromagnetiline inerts), siis kondensaatori tühjenemise hetkel vool võnkeringis ei katke, vaid jätkab mõnda aega voolamist endises suunas. Selle tõttu laetakse kondensaator vastasmärgilise pingega. Vastasmärgiline kondensaatori laeng omakorda voolab ära läbi induktiivsuse L, seejärel toimub kondensaatori uus laadimine esialgse suunaga ning protsess hakkab perioo-



Joonis 41

a — võnkuva lüli tingmärk; *b*, *c* — võnkuva lüli väljundsuuruse muutumine sisendisse saabuva ühikimpulsi toimel (kriipsjoonega on näidatud vastav graafik aperioodilise võnkuva lüli puhul); *d*, *e* — võnkuva lüli väljundsuuruse muutumine hüppeliselt muutuva sisendsuuruse puhul; *f* — võnkuva lüli võimalik teostus mehaanilises süsteemis; *g* — võnkuva lüli võimalik teostus elektrilises süsteemis; *h* — võnkuva lüli väljundsuuruse amplituudi muutumine sõltuvalt siinuselise sisendsignaali sagedusest; *i* — võnkuva lüli väljundsignaali faasinihke muutumine siinuselise sisendsignaali suhtes sõltuvalt sagedusest

diliselt korduma. Sumbumuse tõttu pingete ja voolude amplituudid kahanevad pidevalt.

Kui võnkuvasse lülisse sisenev signaal muutub siinuseliselt, siis väljuv, samuti siinuseline signaal käitub omapäraselt. Teatud sageduse puhul (f_0, joonis 41, *h*) kasvab väljundsignaali amplituud x_2 väga suureks. Säärast nähtust nimetatakse *resonantsiks* ja vastavat sagedust f_0 *resonantsisageduseks.* Elektrilise võnkeringi puhul on resonantsisagedust võimalik arvutada ligikaudse valemi abil:

$$f = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}},$$

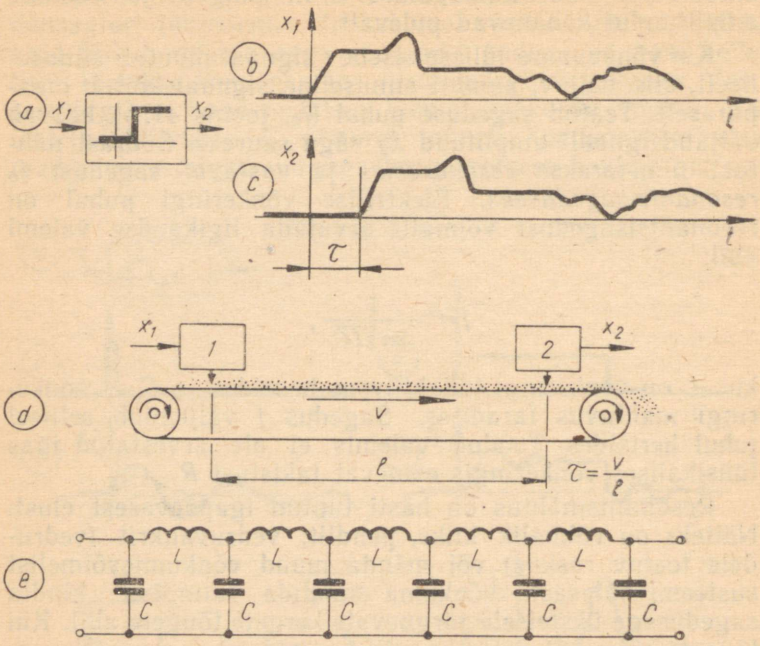
kus L on võnkeringi induktiivsus henrides ja C — võnkeringi mahtuvus faradites. Sagedus f väljendub sellisel juhul hertsides. Toodud valemis ei ole arvestatud igas füüsikalises võnkeringis esinevat takistust R.

Resonantsinähtus on hästi tuntud igapäevasest elust. Näiteks on võimalik kiike, pendlit, vedruvankrit (vedrudele toetuv raskus) või mõnda muud võnkumisvõimelist süsteemi hõlpsasti võnkuma sundida rütmiliste, kindla sagedusega üksteisele järgnevate kergete tõugete abil. Kui tõugete rütm või sagedus erineb süsteemi resonantsisagedusest, siis resonantsi saavutamine ei õnnestu. Täpse resonantsisageduse leidmisel on aga üsna nõrkade tõugete abil võimalik saavutada väga tugevaid võnkumisi.

Oluliseks võnkuvat lüli iseloomustavaks näitajaks on ajaline nihe ehk faasinihe lüli sisend- ja väljundsuuruse vahel. Faasinihe sõltub sagedusest, kusjuures madalate sageduste puhul lüli omadused lähenevad inertse lüli omadustele ning faasinihe erineb vähe nullist. Resonantsisageduse piirkonnas faasinihe suureneb kiiresti ning väga kõrgete sageduste puhul läheneb $-180°$-le. Resonantsi puhul on faasinihe $-90°$ (joonis 41, *i*).

Viitlüli. Võrdlemisi suurt praktilist tähtsust omab ka *viitlüli.* Viitlüli iseärasuseks on see, et ta ei muuda lüli läbiva signaali kuju, täpselt nagu proportsionaalne lüligi. Viimasest erineb viitlüli selle poolest, et proportsionaalse lüli väljundsuuruse muutumised ei toimu mitte samaaegselt, vaid kindla ajavahemiku τ võrra h i l j e m, võrreldes sisendsuuruse vastavate muutustega.

Joonisel 42, *a* on kujutatud viitlüli tingmärk. Jooni-



Joonis 42

a — viitlüli tingmärk; *b*, *c* — viitlüli väljundsuuruse muutumine meelevaldselt muutuva sisendsuuruse toimel; *d* — reguleeritav objekt — konveier — viitlülina vaadelduna; *e* — viitlüli elektrilises süsteemis — viitliin

sel 42, *b* ja *c* on kujutatud vastavalt viitlüli sisendsuuruse x_1 ja sellele vastava väljundsuuruse x_2 muutumine ajas.

Praktiliselt toimib viitlülina näiteks k o n v e i e r. Konveier võib esineda automaatse reguleerimise süsteemis kui reguleeritav objekt (joonis 42, *d*). Täiturelement *1*, olles seotud reguleeritava objekti sisendiga, määrab kindlaks konveierile puistatava aine hulga. Objekti väljundiga on seotud mõõteelement *2*, mis näitab antud konveieri lõiku läbiva aine hulka. Mõõteelement on paigutatud konveieri liikumise suunas kaugusele *l*, arvates täiturelemendist. On selge, et sellisel juhul näitab mõõteelement *2* aja τ võrra v a r e m konveierile puistatud aine hulka. τ on aeg,

mis kulub selleks, et konveierile paigutatud ese võiks läbida vahemaa l. τ on hõlpsasti arvutatav seosest

$$\tau = \frac{v}{l},$$

kus v on konveieri liikumise kiirus.

Elektrilistest seadmetest tekitab hilinemise nn. *viitliin*, s. o. rida joonise 42, *e* kohaselt lülitatud mahtuvusi ja induktiivsusi. Säärase liini poolt tekitatud viide τ elektrilise impulsi edasiandmisel võib olla sekundi miljondikest osadest kuni sekundi kümnendikosadeni. Suuremate viidete saamine sel viisil on piiratud selleks vajalike induktiivsuste ja mahtuvuste hinna ja mõõtmete tõttu, sest viite suurendamiseks tuleb liini lülide arvu kui ka üksikute induktiivsuste ja mahtuvuste väärtusi suurendada.

Suuremate viidete saamiseks võivad leida kasutamist mitmesugused elektromehaanilised seadmed, näiteks magnetofon. Liikuva magnetlindi abil on hõlpus tekitada viidet, kui paigutada salvestav ning taastav helipea teineteisest sobivale kaugusele.

Reguleerimise kvaliteet. Peaaegu kõik praktiliselt kasutusel olevad automaatse reguleerimise süsteemid on jagatavad eelkirjeldatud tüüplülideks. Sageli on võimalik süsteeme tüüplülideks jagada sel alusel, et süsteemi üksikute elementide (elektrimootori, magnetvõimendi jne.) tüüplülide abil kujutatavad ekvivalendid on üldiselt teada. Nii on näiteks magnetvõimendi enamasti kujutatav ühe inertse lülina, elektrimootor kahe järjestikku ühendatud inertse lülina jne. See on aga ainult siis võimalik, kui järgneva lüli mõju eelnevale, s. o. *tagasimõju*, praktiliselt puudub. Kui aga eelmise lüli seisund sõltub olulisel määral järgmise lüli seisundist, on probleem keerukam.

Kui näiteks magnetvõimendi abil juhtida elektrimootorit ergutusvoolu reguleerimise teel, võib tagasimõju mitte arvestada, sest ergutusahela parameetrid mootori töörežiimist peaaegu ei sõltu. Kui aga juhtida magnetvõimendi abil elektrimootorit ankruringi kaudu, tuleb tagasimõju tingimata arvestada, sest ankruringi *vastuelektromotoorne jõud* on otseselt sõltuv mootori pöörlemiskiirusest ning sageli ka koormusvoolust. Niisugustel juhtudel on ainukeseks võimaluseks lähtuda seadme tööd kirjeldavatest matemaatilistest võrranditest.

Viimaste alusel on juba hõlpus koostada õiget struktuurskeemi, kus iga tüüplüli on ühesuunalise mõjuga. Suurem osa lülisid, nagu integreeriv lüli, inertne lüli, võnkuv lüli ning viitlüli võivad esineda nii reguleerimise objektides kui ka spetsiaalsetes korrigeerivates ahelates, mille ülesandeks on parandada regulaatori dünaamilisi omadusi ning siirdenähtuste kulgemist. Diferentseeriv lüli seevastu esineb peamiselt ainult korrigeerivates ahelates.

Igasuguse automaatse reguleerimise süsteemi oluliseks omaduseks on see, et süsteem võimaldab väikese võimsusega signaali abil juhtida suure võimsusega protsessi kulgemist. Reguleeritava suuruse vastavaks seadmine etteandesuuruse suhtes saavutatakse sel teel, et ilmutatakse mingisugusel viisil nende suuruste vahe — viga, mida võimendatakse ning kasutatakse saadud signaali reguleeritava protsessi mõjutamiseks vastassuunaliselt, nii et viga väheneks (negatiivne tagasiside).

On selge, et ükski reaalne tehniline süsteem ei saa tagada absoluutselt täpset vastavust etteantud suuruse ja reguleeritava suuruse vahel. Kõikides reguleerivais süsteemides esineb paratamatult *reguleerimise viga.*

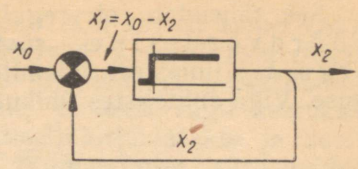
Arvestades eelkirjeldatud tüüplülide dünaamilisi omadusi, on selge, et vahetult pärast mingi järsu muutuse tekkimist süsteemis erineb süsteemi olukord tunduvalt tasakaaluolukorrast. Tasakaaluolukord tekib, kui kõik süsteemi näitajad on omandanud oma püsiva, staatilise väärtuse.

Järelikult erineb reguleeritava suuruse ning ka vea väärtus pärast tõuke tekkimist süsteemis mõnda aega vea staatilisest väärtusest. Seepärast eristatakse automaatse reguleerimise süsteemides staatilist ja dünaamilist viga. *Staatiline viga* esineb paigalseisvas või ühtlaselt liikuvas süsteemis, dünaamiline viga tekib lisaks staatilisele siis, kui süsteemis esinevad siirdenähtused. Reguleeriva süsteemi dünaamiline viga on tavaliselt tunduvalt suurem süsteemi staatilisest veast ning nõuab seepärast erilist tähelepanu.

Süsteemi staatilise vea suurust võib võrdlemisi hõlpsasti määrata *süsteemi võimendusteguri* järgi. Süsteemi võimendusteguriks nimetatakse siin üldist võimendusteguri ahelas, mis koosneb järjestikku ühendatud otsesest mõjuahelast ning tagasisideahelast. Süsteemi võimendus-

tegur näitab, mitu korda suurendatult saabub reguleerimise viga tagasi otsese mõjuahela sisendisse.

Vaatleme lihtsa jälgivsüsteemi struktuurskeemi (joonis 43). Süsteem koosneb ainult ühest proportsionaalsest lülist • võimendusteguriga k. Etteandesuurusest x_0 lahutatakse väljundsuurus x_2. Proportsionaalse lüli sisendisse pääseb signaal



Joonis 43

Lihtsa jälgivsüsteemi struktuurskeem

$$x_1=x_0-x_2.$$

Et proportsionaalse lüli võimendustegur on k, siis kehtib võrrand

$$\frac{x_2}{x_1}=\frac{x_2}{x_0-x_2}=k.$$

Korrutades võrrandi mõlemat poolt vahega (x_0-x_2), saame

$$x_2=k(x_0-x_2)=kx_0-kx_2,$$

millest

$$x_2+kx_2=kx_0.$$

Edasi võime avaldada väljundsuuruse väärtuse

$$x_2=x_0\,\frac{k}{k+1}.$$

Saadud võrrand näitab, et jälgiv suurus x_2 erineb etteandesuurusest x_0 üsna vähe, kui vaid lüli võimendustegur k on küllalt suur, võrreldes 1-ga.

Veelgi kujukam on vea x_1 matemaatiline väljendus. Eelnevate tehete põhjal võib näidata, et

$$x_1=x_0-x_2=x_0-x_0\,\frac{k}{k+1}=x_0\,\frac{1}{k+1}.$$

Kui nüüd $k \gg 1$, mis tavaliselt süsteemides tõepoolest nii on, siis vea suurus

$$x_1\approx x_0\,\frac{1}{k}.$$

See tähendab, et reguleerimise vea suurus on pöördvõrdeline süsteemi võimendustegu-riga k. Viimastest valemitest võib teha veel ühe järelduse. Viga suhtelistes ühikutes

$$\frac{x_1}{x_0} = \frac{1}{k+1}.$$

Suhtelist viga aga nimetatakse reguleeritava objekti nimikoormuse puhul teatavasti statismiks (vt. § 7). Järelikult statism

$$s = \frac{1}{k+1}.$$

Automaatse reguleerimise süsteemi viga on niisiis seda väiksem, mida suurem on süsteemi võimendustegur. Seda asjaolu on võimalik ka otseselt ette kujutada, otsimata abi matemaatikalt. Tõepoolest, mida rohkem regulaator viga võimendab, seda suurem see talle «näib» ja seda energilisemalt püüab ta viga kõrvaldada. Piltlikult väljendudes on võimendi otsekui suurendusklaas, mis suurendab vea näilist väärtust.

Nüüd saab ka selgeks, miks astaatilise regulaatori staatiline viga on null. Nimelt on integreeriva lüli võimendustegur staatilises režiimis lõpmata suur. Tõepoolest, staatilises režiimis lüli väljundsuurus enam ei muutu. Integreeriva lüli väljundsuurus kasvab aga pidevalt, kui vaid sisendsignaal on suurem nullist. Järelikult saabub integreeriva lüli puhul staatiline režiim siis, kui sisendsignaal on muutunud nulliks. Et aga lüli väljundsignaal on selleks ajaks omandanud lõpliku väärtuse, siis võimendustegur, mis nüüd väljendub lõpliku arvu ja nulli jagatisena, võrdub lõpmatusega. Et sellisel juhul viga tõepoolest nulliks muutub, on näha eeltoodud valemist vea x_1 määramiseks. (Mistahes lõplik arv, jagatud lõpmatusega, võrdub teatavasti nulliga.)

Hoopis komplitseeritum staatilise vea määramisest on *dünaamilise vea* määramine. Et automaatse reguleerimise süsteemi kõik lülid reageerivad signaali muutustele erinevalt ning on omavahel mitmesugusel viisil seotud, siis suurema lülide arvu puhul muutub kujutluse saamine süsteemi dünaamilistest omadustest üsna keerukaks. Väga ligikaudselt võiks automaatse reguleerimise süsteemi dünaamikat võrrelda lainetusega, mis tekib suure

kivi heitmisel väikesesse basseini. Kui küllalt suure vaba veepinna olemasolul lained levivad korrapäraste ringidena, siis väikeses basseinis otsesed ja peegeldunud lained põimuvad omavahel nii, et tekib väga keerukas ning ebakorrapärane pilt. Üldiselt kirjeldatakse ja uuritakse protsesse automaatse reguleerimise süsteemides ning muudes taolistes dünaamilistes süsteemides kõrgema matemaatika meetodite, peamiselt diferentsiaalvõrrandite abil.

Viimasel ajal on jõutud järeldusele, et üha keerukamaks muutuvate automaatse reguleerimise süsteemide uurimiseks ei piisa puhtarvutuslikest meetoditest. Kui need viivadki sihile, siis sageli on vajalike arvutuste maht tohutult suur. Seepärast on viimasel ajal hakatud laialdaselt kasutama *matemaatilisi mudeleid.* Matemaatiliste mudelite töötamisprintsiipe ja kasutamise võimalusi kirjeldatakse IV peatükis.

Vaatamata protsesside keerukusele dünaamilistes süsteemides võib neist saada teatud kujutluse ka kvalitatiivse vaatluse kaudu, mida järgnevas ongi teha püütud.

Joonisel 44, *a* on skemaatiliselt kujutatud autopiloodi abil juhitav lennuk. Asja lihtsustamiseks vaadeldakse esialgu autopiloodi tegevust ainult lennuki pöördetüüri suhtes. Säärase äärmuseni lihtsustatud autopiloodi mõõteelemendiks on gürokompass *1.* Viimase ülesandeks on näidata, millisel määral lennusuund kaldub kursist *K* kõrvale. Seega siis on mõõteelemendi väljundiks vea suurus. Viga, mis võib esineda näiteks elektripinge kujul, juhitakse pärast võimendamist võimendis *2* täiturelementi *3.* Täiturelemendiks on antud juhul mootor, mis kallutab lennuki pöördetüüri. Esialgsel vaatlusel näib, et säärasest süsteemist piisab, sest õige lülituse puhul autopiloot tõepoolest pöörab lennuki pöördetüüri seni, kuni kursiviga on likvideeritud.

Tegelikult on autopiloodi ülesanne palju keerukam, sest see ei piirdu üksnes lennuki üldise kursil hoidmisega, vaid on seotud nõudega, et igasugused kursist kõrvalekaldumised tuleb võimalikult kiiresti likvideerida. Arvestades lennuki liikumiskiirust, selgub, et juba tühine viivitus vea likvideerimisel põhjustab suure kursist kõrvalekaldumise.

Lendur ei piirdu sellega, et pöörab tüüri vastassuunas, kui lennuk kõrvale kaldub. Lendur arvestab mehaa-

niliselt kõrvalekaldumise iseloomu. Kui lennuki kõrvalekaldumine toimub äkki, on tarvis anda otsekohe tüürile küllalt suur kallak vastassuunas, enne kui kõrvalekaldumine omandab ohtliku väärtuse. Seda sellepärast, et kiirel kõrvalekaldumisel on lennuki inertsi mõju suur ning kui otsekohe ei võeta tarvitusele abinõusid lennuki õigesse asendisse tagasiviimiseks, võib ta kaotada stabiilsuse.

Tavaline regulaator seevastu tekitab suure tüüri kallaku alles siis, kui lennuki kõrvalekaldumine on *juba* omandanud küllalt suure väärtuse. Olukorda saab parandada diferentseeriva elemendi lülitamisega võimendi sisendisse. Sellisel juhul regulaator reageerib mitte kõrvalekaldumise suurusele, vaid kõrvalekaldumise *kiirusele*. Seega aitab diferentseeriv element lähendada autopiloodi omadusi lenduri omadustele või viimaseid isegi ületada.

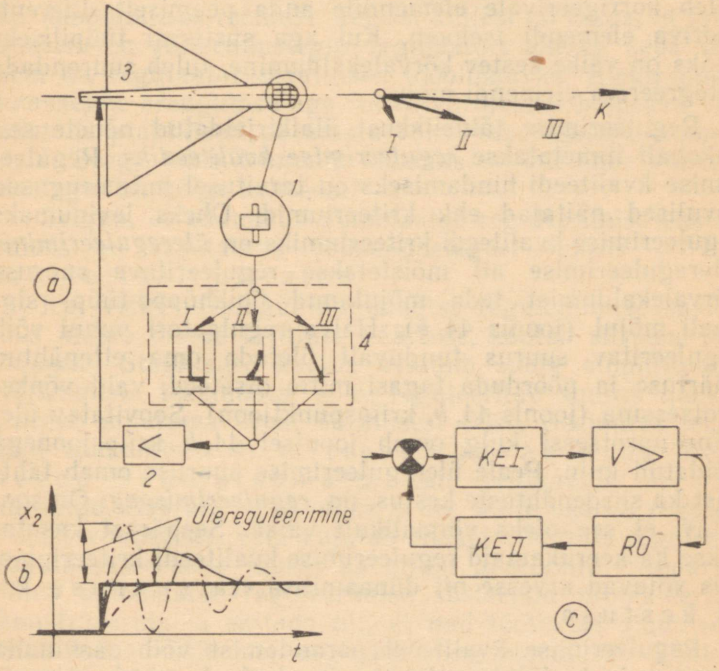
Teisest küljest on soovitav reguleerimise täpsuse suurendamiseks anda regulaatorile mõningad astaatilise regulaatori omadused. Seda võib saavutada integreeriva elemendi lülitamise teel võimendi sisendisse. Integreeriv lüli aitab viga kõrvaldada väikeste, ent kestvate kursist kõrvalekaldumiste puhul, sest integreeriva lüli väljundsignaal kasvab aja jooksul suureks isegi väga väikese signaali toimel. Väikese ühesuunalise kursivea kõrvaldamine on aga küllalt suure tähtsusega, sest säärane viga võib aja jooksul viia küllalt suure kõrvalekaldumiseni sihtpunktist.

Seega siis asetseb täiustatud regulaatoris kusagil, tavaliselt võimendi sisendis, *korrigeeriv element 4* (vt. joonis 44, *a*). Sageli koosneb korrigeeriv element paralleelselt ühendatud proportsionaalsest, integreerivast ja diferentseerivast lülist. Üksikute lülide osatähtsuse muutmisega nende võimendusteguri muutmise teel on võimalik soovikohaselt korrigeeriva elemendi omadusi muuta, lähendades neid rohkem kas integreeriva, diferentseeriva või siis proportsionaalse elemendi omadustele. Kirjanduses on sedalaadi korrektsiooniga varustatud regulaatorid tuntud PID-regulaatorite nime all. Nimetus on tuletatud üksikute lülide nimetuste algustähtedest.

Sageli leiavad kasutamist veelgi keerukamad korrigeerivad elemendid, mis reageerivad näiteks mitte ainult reguleeritava suuruse juurdekasvu kiirusele, vaid ka *kii-*

rendusele, s. o. kiiruse juurdekasvu kiirusele, samuti ka muudele sisendsignaali iseärasustele ettenähtud viisil.

Eriti suurt tähtsust omavad korrigeerivad elemendid autopiloodi täielikus skeemis, mis on seotud nii pöörde-, kõrgus- kui ka kaldtüüridega. Autopiloot nagu lendurgi



Joonis 44

a — lennuki juhtimine autopiloodi abil; *b* — ülereguleerimise nähtus; *c* — korrigeeritud regulaatori struktuurskeem

peab võimalikult kiiresti likvideerima igasugused lennuki kaldumised ja pöördumised, mis võivad olla põhjustatud «õhuaukudest», mootorite ebaühtlasest tööst ja muudest juhuslikku laadi asjaoludest. Igasugune viivitus lennuki tasakaalustamisel võib tähendada avariid.

Üldiselt on korrigeeriva elemendi ülesandeks vähendada automaatse reguleerimise süsteemi dünaamilist viga.

Et dünaamilise vea suurus oleneb mitte ainult regulaatori omadustest, vaid ka regulaatori töö iseloomust, siis püütakse viimasel ajal ehitada regulaatoreid nii, et nad antud tingimustes töötades tagaksid keskmiselt võttes minimaalse vea. Üksikute mittetüüpiliste, harva esinevate häiresignaalide puhul võib viga ka suurem olla. Näiteks süsteemis, kus esinevad peamiselt lühikesed järsud tõuked, tuleb korrigeerivale elemendile anda peamiselt diferentseeriva elemendi iseloom. Kui aga süsteemi tüüpiliseks veaks on väike kestev kõrvalekaldumine, tuleb suurendada integreeriva elemendi mõju.

Reguleerimise täiuslikkust ülalkirjeldatud nõuete seisukohalt nimetatakse *reguleerimise kvaliteediks.* Reguleerimise kvaliteedi hindamiseks on tarvitusel mitmesugused arvulised näitajad ehk kriteeriumid. Üheks levinumaks reguleerimise kvaliteedi kriteeriumiks on *ülereguleerimine.* Ülereguleerimise all mõistetakse reguleeritava suuruse kõrvalekaldumist teda mõjutanud ühikhüppe-tüüpi signaali mõjul (joonis 44, *b*). Halva regulaatori puhul võib reguleeritav suurus tunduvalt ületada oma ettenähtud väärtuse ja pöörduda tagasi mitte otseteed, vaid võnkeprotsessina (joonis 44, *b*, kriipspunktjoon). Soovitatav üleminekuprotsessi kulg omab joonisel 44, *b* kriipsjoonega näidatud kuju. Peale ülereguleerimise suuruse omab tähtsust ka siirdenähtuste kestus, nn. *reguleerimisaeg.* On soovitav, et see oleks võimalikult väike. Seepärast kasutatakse ka keerukamaid reguleerimise kvaliteedi kriteeriume, mis võtavad arvesse nii dünaamilise vea suurust kui ka kestust.

Reguleerimise kvaliteedi parandamist võib saavutada korrigeerivate lülide rakendamise teel. Joonisel 44, *c* on kujutatud automaatse reguleerimise süsteemi struktuurskeem, mis koosneb reguleeritavast objektist *RO,* võimendist *V* ja korrigeerivatest elementidest *KE-I* ja *KE-II,* milledest üks asub võimendi, teine aga tagasiside ahelas. Mitmelüliliste regulaatorite puhul on olemas veel terve rida kombinatsioone korrigeerivate lülide lülitamiseks muude lülide vahele.

Peale selle kasutatakse süsteemi dünaamiliste omaduste parandamiseks veel nn. *kohalikke tagasisidestusi,* s. o. tagasisidestusi, mis haaravad võimendi üksikuid astmeid ja muid reguleeriva süsteemi osi.

Korrigeerivate elementide valik, ehitus ja asend regu-

laatori struktuuris reguleerimise maksimaalse kvaliteedi tegemiseks ongi üheks kõige olulisemaks probleemiks automaatse reguleerimise teoorias ja praktikas.

Regulaatorite stabiilsus. Senitoodud materjali läbimõtlemisel ei tohiks jääda tähelepandamatuks järgmine asjaolu. Nagu selgus, nõutakse regulaatorilt eelkõige võimalikult väikest reguleerimise viga niihästi staatilises kui ka dünaamilises režiimis. Teisest küljest on teada, et mida suurem on võimendustegur regulaatori ahelas, seda täpsem on regulaator staatilises tööolukorras. Elektroonika kaasaegne arengutase aga lubab võrdlemisi hõlpsasti valmistada praktiliselt piiramatu võimendusteguriga võimendeid. Seega tekib loomulik küsimus — kui suur võimendustegur on kõige kohasem?

Selgub, et enamikus automaatse reguleerimise süsteemides on kasutatava võimendusteguri suurus p õ h i m õ t t e l i s e l t p i i r a t u d.

Kui võimendustegur automaatse reguleerimise süsteemis ületab teatud kriitilise väärtuse, kaotab süsteem *stabiilsuse.* Stabiilsuse kaotus avaldub suure amplituudiga võnkumiste tekkimises, s. o. reguleeritav suurus hakkab kiiresti muutuma ühest äärmusest teise. Seejuures tekkinud võnkumised on m i t t e s u m b u v a d n i n g k e s t a v a d v a h e t p i d a m a t a, kuni regulaator on sisse lülitatud. Säärane võnkumine ei tee mitte üksnes reguleerimist võimatuks, vaid kujutab endast võimsate reguleeritavate süsteemide juures ka otsest avariiohtu. Seepärast tuleb automaatse reguleerimise süsteemid projekteerida, konstrueerida ja ehitada nii, et nad töötaksid stabiilselt. Stabiilsuse küsimuste uurimine ning meetodite väljatöötamine stabiilsete süsteemide projekteerimiseks oligi õieti lähtepunktiks automaatse reguleerimise teooria tekkimisel.

Et pisut üksikasjalisemalt selgitada, mil viisil võib tekkida ebastabiilsus automaatse reguleerimise süsteemis, on joonisel 45, *a* näitena kujutatud automaatse reguleerimise süsteemi üks võimalikke lülitusskeeme. Joonisel 45, *b* on kujutatud sama süsteemi struktuurskeem. Automaatse reguleerimise süsteem on ette nähtud mootori *3* pöörlemiskiiruse reguleerimiseks. Pöörlemiskiirust mõõtvaks elemendiks on tahhodünamo *4* (§ 4). Tahhodünamo pinget võrreldakse etteandepingega x_1 ning nende pingete vahe juhitakse magnetvõimendi *1* sisendisse. Signaali edasiseks võimendamiseks on ette nähtud magnetvõimendi *2*.

Nagu selgub struktuurskeemilt, on kõik kolm elementi, nii magnetvõimendid kui ka reguleeritav objekt (elektrimootor) inertsed lülid. Tahhodünamo seevastu on praktiliselt proportsionaalne lüli, sest tema ajakonstant on palju kordi väiksem kui muudel antud süsteemi elementidel.

Ebastabiilsuse olemuse selgitamiseks võib kujutleda järgnevat eksperimenti. Katkestades regulaatori ahela punktis *a* ja tekitades magnetvõimendi *1* sisendis mingi kõrvalise vooluallika abil siinuseliselt muutuva signaali (vt. diagramm joonisel 45, *c*, kõver *I*), kandub see loomulikult ka järgmistele lülidele edasi. Vastavalt inertse lüli omadustele muutub signaali amplituud $k_{ü}$ korda, kusjuures üldine võimendustegur

$$k_{ü} = \frac{k}{\sqrt{1+\omega^2\tau^2}}$$

(vt. § 8) ja signaal hilineb nurga φ_1 võrra (kõver *II*). Nurga suurus on seejuures seda suurem, mida kõrgem on sagedus *f*.

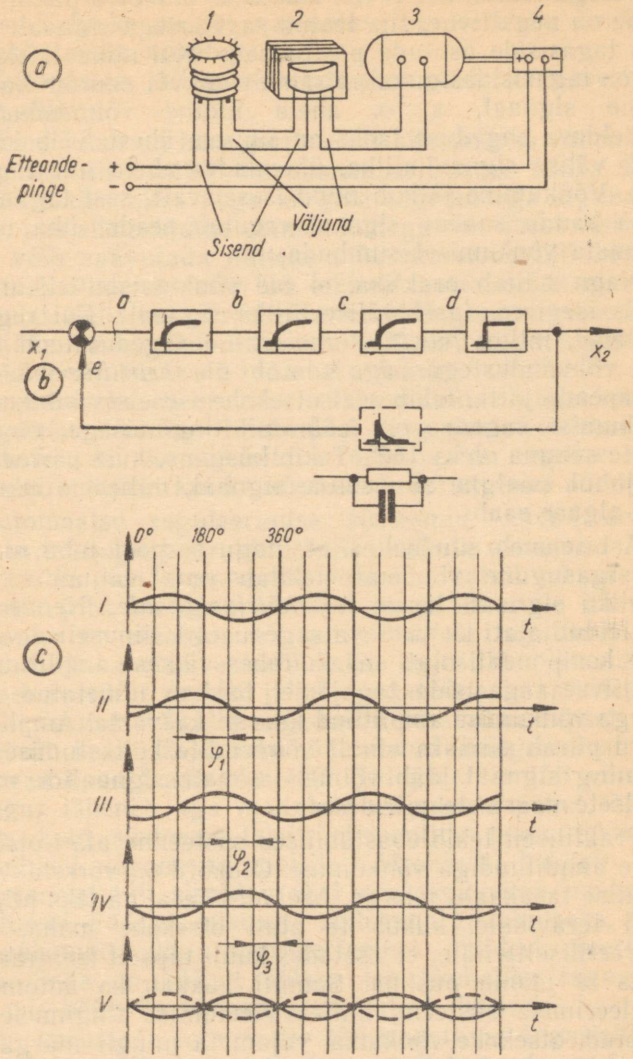
Järgmine inertne lüli, magnetvõimendi *2*, jällegi kas suurendab või vähendab, olenevalt siinuselise signaali sagedusest ja magnetvõimendi võimendustegurist, teda läbiva siinuselise signaali amplituudi. Ajaliselt hilineb signaal veelgi nurga φ_2 võrra, nagu selgub jooniselt 45, *c*, kõver *III*. Viimases inertses lülis, mootoris *3*, toimub samuti signaali amplituudi muutus, hilinemine aga suureneb veelgi nurga φ_3 võrra (joonis 45, *c*, kõver *IV*). Tahhogeneraatoris faasi muutust ei toimu (kõver *V*).

Muutes kõrvalise vooluallika poolt punkti *a* antava signaali sagedust *f*, on võimalik saavutada säärast olukorda, kus

$$\varphi_1+\varphi_2+\varphi_3=180°.$$

Nurga muutus on siis keskmiselt 60° iga inertse lüli kohta, mis on täiesti mõeldav ja võimalik.

Et tagasiside on negatiivne, siis peab signaal tagasisideahelas muutuma 180° võrra. Järelikult tagasisidesignaal on antud juhul pööratud kaks korda 180° võrra — esiteks faasimuutuste läbi inertsetes lülides ja teiseks kui tagasisidesignaal (joonis 45, *c*, kõver *V*, kriipsjoonega). Järelikult muutub tagasisidesignaal täpselt analoogiliselt kõrvalise allika poolt punkti *a* antava signaaliga, s. t. on



Joonis 45

a — automaatse reguleerimise süsteem elektrimootori pöörlemiskiiruse reguleerimiseks; *b* — sama süsteemi struktuurskeem; *c* — diagramm võnkumiste tekkimise kohta süsteemis

viimasega faasis. Nii et kui staatilise olukorra puhul tagasiside on negatiivne, siis teatud sagedusega signaali jaoks võib tagasiside osutuda positiivseks. Kui nüüd lisaks sellele on tagasisidesignaal niisama suur või suurem kui kõrvaline signaal, s. o. ahela üldine võimendustegur vaadeldava sageduse jaoks on suurem ühest, võib kõrvaldada välise signaaliallika, ühendades ahela uuesti punktis *a*. Võnkumine jätkub nüüd iseseisvalt, sest tagasideahela kaudu saabuv signaal ergutab seadet üha uuesti, laskmata võnkumisel sumbuda.

Nagu näitab praktika, ei ole võnkumiste tekkimiseks tarvis isegi esialgset välise allika signaali. Kui regulaatori ahel, milles *faasitingimus* antud sagedusel on täidetud, võimendustegur aga ulatub üle *kriitilise* väärtuse, «omapead» jätta, tekib seal otsekohe iseseisev võnkumine. Võnkumise sagedus on määratud tingimusega, et faasinihete summa oleks 180°. Tekib küsimus, kust pärineb siis sel juhul esialgne siinuseline signaal, millest võnkeprotsess alguse saab.

Asi seisneb siin selles, et, nagu eespool juba nimetatud, igasugune võimendi tekitab oma väljundis peale kasuliku signaali terve rea *häirivsignaale*. Nende hulgas leidub alati ka vastava sagedusega siinuselise võnkumise komponent, olgu siis kuitahes väikese amplituudiga. Positiivse tagasiside tagajärjel hakkab nimetatud sagedusega võnkumise amplituud kiiresti kasvama. Amplituudi kasvu piirab viimaks ainult võimendite küllastumise nähtus ning signaal jääb võimendatavate signaalide maksimaalsete väärtuste piiridesse.

Praktiliselt tekib ebastabiilses süsteemis alati otsekohe suure amplituudiga võnkumine. Olukord on võrreldav ebastabiilse tasakaalu juhuga. Asetades kera, näiteks piljardikuuli teravikule, kukub ta alati otsekohe maha, kuigi «teoreetiliselt» näib, et asetades kuuli täpselt tsentraalselt, peaks ta jääma püsima. Samuti hakkab ka automaatse reguleerimise süsteem, milles võnkumise tingimused on täidetud, otsekohe võnkuma, vajamata mingit märgatavat välist tõuget. Säärane nn. *endaergutuse* printsiip leiab kasuliku rakenduse elektronlampidega töötavates vahelduvvoolu generaatorites, mida kasutatakse näiteks raadiosaatjates. Automaatsete regulaatorite puhul aga on endaergutus kahjulik nähtus ning teda püütakse kõigi vahenditega vältida. Lihtsaimaks teeks võnkumiste vältimiseks

on küllalt väikese võimendusteguri valimine regulaatori ahelas. Kahjuks on see vastuolus reguleerimise kvaliteedile esitatavate nõuetega.

Olukorda on jällegi võimalik parandada korrigeerivate lülide abil.

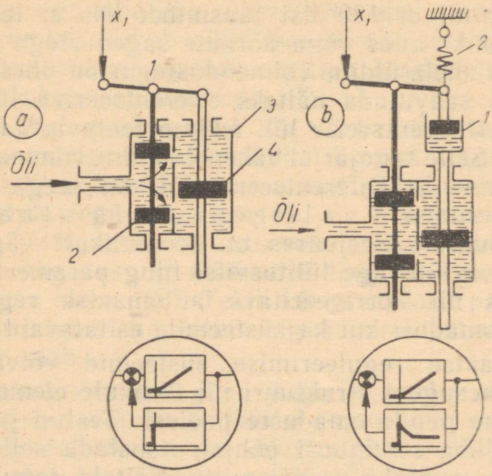
Antud juhul on korrigeeriva lüli ülesandeks vähendada faasinihet, nii et 180°-list faasinihet kas ei tekiks üldse või siis tekiks alles väga kõrgete sagedustega signaalide puhul, kus ahela üldine võimendustegur on ühest väiksem. Seda võib saavutada näiteks diferentseeriva lüli kasutamise teel. Diferentseeriv lüli tekitab teatavasti faasis eteruttamist. Selle tagajärjel väheneb üldine summaarne faasi mahajäämine φ. Diferentseeriv lüli on seega kasutatav nii reguleerimise kvaliteedi kui ka stabiilsuse suurendamiseks. Seejuures on loomulikult väga oluline korrigeeriva lüli õige lülitusviisi ning parameetrite valik, arvestades nii korrigeeritava automaatse reguleerimise süsteemi omadusi kui ka süsteemile esitatavaid nõudmisi.

Automaatse reguleerimise süsteemid võivad omada väga mitmesugust struktuuri nii üksikute elementide lülituse kui ka nende omaduste poolest. Teatud juhtudel on võimalik juba struktuuri põhjal otsustada selle üle, kas regulaator on stabiilne või mitte. Näiteks reguleeriv süsteem, mille ahelas esineb kaks järjestikku ühendatud integreerivat lüli, on igal juhul ebastabiilne, kuna integreeriv lüli tekitab kõikidel sagedustel faasinihke täpselt 90°. Järelikult kaks järjestikku ühendatud integreerivat lüli tekitavad koos faasinihke 180°. Integreeriva lüli võimendustegur läheneb aga madalate sageduste puhul lõpmatusele, kuid süsteemi teiste elementide poolt tekitatud faasinihked lähenevad nullile. Järelikult hakkab kaht integreerivat lüli sisaldav ahel võnkuma väga madalatel sagedustel. Säärast süsteemi võib muuta stabiilseks, muutes vähemalt ühe integreerivatest lülidest inertseks küliks. Seda on küllalt hõlpus teha kohaliku tagasiside abil, mis hõlmaks üht integreerivatest lülidest.

Kui varustada integreeriv lüli negatiivse tagasisidega, ei saa tema väljundsuurus piiramatult kasvada, sest koos väljundsignaali kasvamisega kasvab ka sisendisse tagasiside kaudu saabuv signaal. Lüli sisendisse ühikhüppetüüpi signaali juhtimisel hakkab väljundsignaal kasvama üha väheneva kiirusega, lähenedes oma statsionaarsele väärtusele, mispuhul tagasisidesignaal on täpselt võrdne

sisendsignaaliga. Säärane käitumine aga on omane inertsele lülile.

Negatiivse tagasiside teostamist hüdraulilise võimendi juures kujutab joonis 46, *a*. Sisendsuurus x_1 saabub siin jaotussiibri vardale mitte vahetult, vaid ühepoolse



Joonis 46

a — negatiivse tagasiside teostamine hüdraulilises võimendis; *b* — elastse tagasiside teostamine hüdraulilises võimendis

kangi *1* kaudu. Kangi *1* teine ots on kinnitatud šarniiri abil kolvivarrega. Kui nüüd x_1 mõjul kangi vaba ots nihkub allapoole, nihkub allapoole ka jaotussiiber. Selle tagajärjel avatakse õli juurdepääs silindrisse *3* ning kolb *4* hakkab üles liikuma, tõstes kangi *1* tugipunkti kõrgemale. Selle tagajärjel hakkab õli sissevooluava uuesti sulguma. Ava lõplikul sulgumisel kolb jääb seisma. Kolvi asend aga vastab väljundsuurusele x_2.

Mõnikord teostatakse tagasiside ka nn. *elastse tagasiside* näol (joonis 46, *b*). Elastse tagasiside tekitamiseks on tagasisideahelasse ühendatud *katarakt 1*. Katarakt kujutab endast õliga täidetud silindrit, milles liigub aukudega varustatud kolb. Silinder võib kolvi suhtes liikuda ainult pikkamisi, sedamööda, kuidas õli voolab läbi kolvi

avade. Kiirete liikumiste puhul toimib katarakt monoliitse tervikuna. Katarakt vastab oma toimelt diferentseerivale lülile, tekitades negatiivse tagasiside ainult kolvi asendi kiirete muutuste puhul. Pärast seda viib vedru *2* kangi otsa jälle aeglaselt endisesse asendisse tagasi. Niisiis toimib säärase tagasisidega varustatud servomootor dünaamilistes protsessides inertse lülina, staatilises olukorras aga integreeriva lülina.

Säärast võtet kasutatakse regulaatoris, mis on ajalooliselt tuntud *isodroomse regulaatori* nime all (isodroomne — ühtlase käiguga). Nimelt võimaldas varem ainult katarakt teostada teatud jõumasinate astaatilist reguleerimist. Elastne tagasiside võimaldab saavutada kompromisslahendust, kus astaatiline reguleerimine on tagatud integreeriva elemendi olemasoluga, mis dünaamilistes režiimides käitub inertse elemendina, tagades regulaatori stabiilsuse.

Käesoleval ajal tuntakse mitmesuguseid võimalusi regulaatori stabiilsuse ja reguleerimise kvaliteedi tõstmiseks. Tavaliselt kasutatakse selleks mitte üht korrigeerivat elementi, vaid tervet rida mitmesuguseid täiendavaid kohalikke sidestusi ning tagasisidestusi regulaatori üksikute struktuurielementide vahel. Nende konkreetne kujundus määratakse üksikute regulaatori lülide kui ka korrigeerivate ahelate tehnilise teostusega. Üldiselt on tarvidus korrigeerimise järele seda suurem, mida rohkem lülisid sisaldab regulaatori ahel. Iseloomulikud on selles mõttes tabelis 1 toodud võimendustegurite kriitilised väärtused süsteemi kohta, mis koosneb kahest, kolmest jne. järjestikku lülitatud inertsest lülist. Seejuures eeldatakse, et

Tabel 1

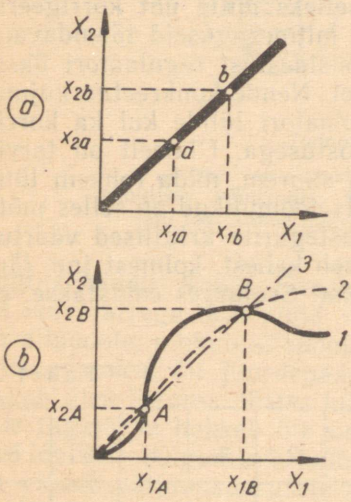
Järjestikku lülitatud inertsete lülide arv n	2	3	4	5	6
Kriitiline võimendustegur k_{kr}	∞	8	4	2,9	2,4

kõigi ahelas olevate inertsete lülide ajakonstandid on võrdsed. Erinevate ajakonstantide esinemisel on kriitilised võimendustegurid suuremad. Kriitilise võimendus-

teguri ületamisel süsteem kaotab stabiilsuse. Hästi korrigeeritud süsteemides on kriitilised võimendustegurid palju suuremad, ulatudes 100-ni ja isegi üle selle.

9. Mittelineaarsed ja releelised automaatse reguleerimise süsteemid

Lineaarsed ning mittelineaarsed elemendid. Seni käsitletud automaatse reguleerimise süsteemide puhul oli vaikides eeldatud, et need süsteemid koosnevad ainult *lineaarsetest elementidest.* Lineaarseteks nimetatakse elemente, mille väljundsignaal on staatilises olukorras alati võrdeline sisendsignaaliga. Dünaamilistes režiimides võib ka lineaarsete elementide puhul võrdelisus puududa. Teisiti väljendades, lineaarsete elementide (lülide) ülekandetegur k, vastandina mittelineaarsetele, on konstantne ning ei sõltu sisendsignaali suurusest.



Joonis 47

a — lineaarse elemendi väljundsuuruse sõltuvus sisendsuurusest; *b* — mittelineaarse elemendi väljundsuuruse võimalikke sõltuvusi sisendsuurusest

Kui kujutada graafiliselt lineaarse elemendi väljundsuuruse x_2 väärtus i sõltuvalt sisendsuuruse x_1 väärtustest, on tulemuseks sirgjoon (joonis 47, *a*). Seepärast nimetataksegi säärastest elementidest koostatud automaatse reguleerimise süsteemi lineaarseks automaatse reguleerimise süsteemiks.

Matemaatiliselt võib lüli või süsteemi lineaarsust väljendada järgmiselt: kui lüli sisendsuurusele x_{1a} vastab väljundsuurus x_{2a} ja sisendsuurusele x_{1b} vastab väljundsuurus x_{2b}, siis kehtib võrrand

$$\frac{x_{1a}}{x_{1b}} = \frac{x_{2a}}{x_{2b}},$$

s. o. sisendsuuruste suhe võrdub alati vastavate väljundsuuruste suhetega. Sealjuures on oluline, et võrrand kehtib mistahes vabalt valitud x_{1a} ja x_{1b} väärtuste puhul.

Kõiki automaatse reguleerimise süsteeme, milles kas- või üksainus element ei vasta toodud lineaarsuse tingimusele, s. t. on mittelineaarne, nimetatakse *mittelineaarseteks automaatse reguleerimise süsteemideks*. Rangelt võttes on kõik tegelikkuses esinevad automaatse reguleerimise süsteemid mittelineaarsed. (Seda sellepärast, et sirgjoon on matemaatiline mõiste, mida looduses üldse ei esine. Iga looduses esinev sõltuvus ja joon on suuremal või vähemal määral «kõver».)

Joonisel 47, *b* on kujutatud mõned võimalikest kõverjoontest, mis läbivad punkte *A* ja *B*.

Mittelineaarseks elemendiks nimetatakse niisiis elementi, mille kohta pole ei staatilises ega dünaamilises olukorras kehtiv võrdeline sõltuvus, s. o. vabalt valitud punktide x_{1A} ja x_{1B} puhul suhe $\frac{x_{1A}}{x_{2A}}$ üldiselt ei võrdu suhtega $\frac{x_{1B}}{x_{2B}}$. Soovi korral võib loomulikult valida punktid *A* ja *B* nii, et nende punktide kohta toodud avaldised oleksid võrdsed. Kui nendest punktidest läbi juhtida sirgjoon, saame lineaarse tunnusjoone, mis l ä h e n d a b (aproksimeerib) mittelineaarset tunnusjoont. Säärast võtet kasutatakse üsna sageli. Oluline on siinjuures valida punktid *A* ja *B* nii, et viga, s. o. lahkuminek sirgjoone ja kõverjoone vahel meid huvitavas osas oleks küllalt väike. Kui see pole võimalik, tuleb lähendamisest loobuda (joonis 47, *b*, kõver 1).

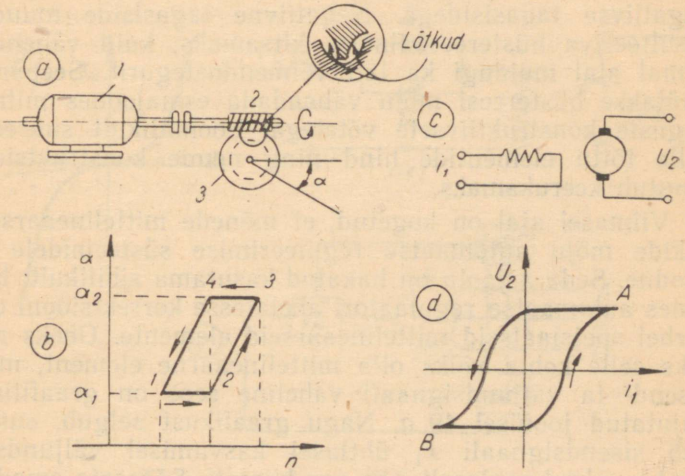
Praktiliselt on kuni viimase ajani automaatse reguleerimise süsteemide teoorias olnud valdavaks eeldus, et süsteem on l i n e a a r n e. Peamiseks põhjuseks on siin see, et lineaarse süsteemi matemaatiline käsitlemine on võrratult lihtsam mittelineaarsete süsteemide matemaatilisest käsitlusest. Süsteemide lineariseerimine on võimalik seetõttu, et enamik automaatse reguleerimise süsteemides kasutatavaid seadmeid, nagu näiteks võimendus- ja mõõteelemendid, omavad p r a k t i l i s e l t l i n e a a r s e t tunnusjoont, kui sisendsuuruse x_1 muudatused on küllalt väikesed (joonis 47, *b*, kõver *2*). Algusosas on säärane kõver hästilähendatav sirgega *3*. Suuremate x_1 väärtuste

puhul tekib tavaliselt *küllastumise* nähtus, s. o. x_1 edasisel suurendamisel x_2 kasvamine aeglustub. Niisiis süsteemi võimendustegur signaali kasvamisel väheneb. Seepärast võib eeldada, et kui süsteem on stabiilne väikeste signaalide puhul, on ta reeglina stabiilne ka suurte signaalide puhul, mil võimendustegur on väiksem. Seepärast piisab küllastumisest tekkivate mittelineaarsustega süsteemis stabiilsuse kontrollimisest üksnes väikeste signaalide puhul. Väikeste signaalide puhul aga on võimalik kasutada võrdlemisi lihtsat lineaarsete süsteemide teooriat. Seepärast kasutataksegi tänapäeval peamiselt automaatse reguleerimise süsteemide lineaarteooriat. Siiski on lineaarteooria kasutamise võimalused piiratud. On teada terve rida juhtumeid, kus lineaarteooria järgi arvutatud süsteemi töö erineb lubamatult palju arvutamise tulemustest. Asi seisneb teatud tüüpi mittelineaarsustes, mida ei tohi arvestamata jätta. Kõige suuremat mõju avaldavad selles mõttes igasugused *lõtkud* ja *hüstereesi*-tüüpi mittelineaarsused. Kuna sääraste mittelineaarsuste arvessevõtmine puhtarvutuslikul teel on äärmiselt raske, kasutatakse seda liiki automaatse reguleerimise süsteemide uurimisel laialdaselt matemaatilist modelleerimist (vt. IV ptk.).

Mittelineaarsete elementide toime. Mittelineaarsete elementide toime automaatse reguleerimise süsteemides võib üldiselt olla kas soodne või ebasoodne. Mittelineaarsete elementide ebasoodsa mõjuga tutvusid automaatse reguleerimise süsteemide konstruktorid ajalooliselt varem. Säärasteks ebasoodsateks mittelineaarsusteks on peamiselt lõtkud, «surnud» käigud ja hüstereesinähtused, mis esinevad enamasti mehaanilistes, kuid ka mõnedes elektrilistes süsteemides.

Visand ajamist, milles esineb tüüpiline lõtk, on toodud joonisel 48, *a*. Elektrimootor *1* käitab siin tiguajami *2* kaudu mingit täiturmehhanismi, näiteks ventiili. Säärane seade võib olla rakendatud täiturelemendina näiteks vedelikuhulga regulaatoris. Kui mootor pöörleb teatud kindlas suunas, siis tema võlli pöörete arvu n kasvamisel suureneb ka tiguajami hammasratta pöördenurk α (lõik *2—3*, joonis 48, *b*). Kui nüüd mootor peatub ning hakkab vastassuunas pöörlema, siis algul tiguratas seisab paigal (lõik *3—4*). See on tingitud lõtku olemasolust tiguajamis. Alles siis, kui mootori võll on küllaldasel määral pöördunud, et katta «surnud» käiku, hakkab vastassuunas pöör-

lema ka hammasratas *3*. Hammasratta pöördenurk α hakkab vähenema (lõik *4—1*). Mootorile uuesti edasikäigu andmisel tuleb jällegi ületada lõtk (lõik *1—2*). Samalaadne lõtk esineb ka paljudes teistes mehaanilistes seadmetes. Mõnevõrra analoogiline nähtus esineb aga ka



Joonis 48

a — lõtk tiguajamis; *b* — lõtku mõju graafiline kujutus; *c* — elektrimasinvõimendi lihtsustatud lülitusskeem; *d* — hüstereesinähtus elektrimasinvõimendis

elektrimasinvõimendites (joonis 48, *c*). Kui suurendada voolu i_1 sisendmähises, suureneb loomulikult ka väljundpinge U_2 (joonis 48, *d*). Kui hakata vähendama sisendsignaali suurust (punkt *A*), hakkab vähenema ka väljundsignaali suurus. Ent signaali kahanemine toimub juba aeglasemalt kui kasvamine, sest elektrimasinvõimendi magnetpoolused säilitavad teatud *jääk- ehk remanentsmagnetismi*. Muutes sisendsuurust kuni väärtuseni *B* ja uuesti tagasi, saame nn. *hüstereesisilmuse*. Analoogia tõttu nimetatakse mõnikord ka mehaanilisest lõtkust tekkinud silmusetaolist ebalineaarset sõltuvust (joonis 48, *b*) hüstereesisilmuseks.

Sõltumata hüstereesisilmuse päritolust on tema mõju automaatse reguleerimise süsteemi omadustele e b a-

soodne. Hüstereesisilmust või lõtku omavaid elemente sisaldava süsteemi stabiilsus on väiksem arvutuslikust, samuti on ka süsteemi viga suurem hüstereesi poolt põhjustatud lisavea tõttu.

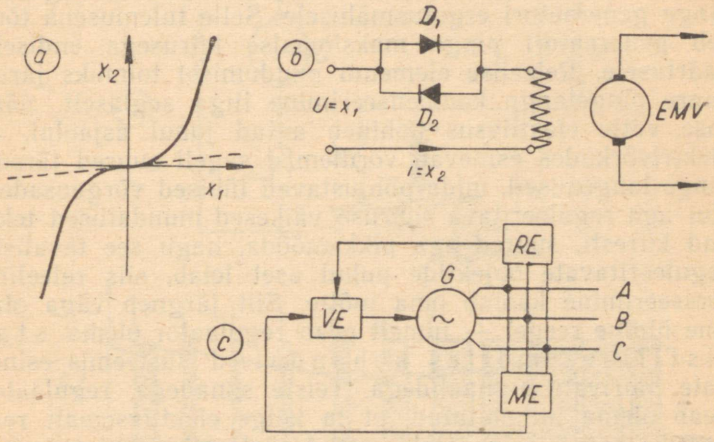
Üheks võimaluseks hüstereesi kahjuliku mõju vähendamiseks on varustada hüstereesi omav element kohaliku negatiivse tagasisidega. Negatiivne tagasiside muudab resulteeriva hüstereesisilmuse kitsamaks, kuid vähendab samal ajal muidugi ka lüli võimendustegurit. Seepärast püütakse hüstereesi mõju vähendada esmajoones mitmesuguste konstruktiivsete võtetega. Loomulikult suureneb selle tõttu elementide hind ning nende konstruktsioon muutub keerukamaks.

Viimasel ajal on kogetud, et mõnede mittelineaarsuse liikide mõju automaatse reguleerimise süsteemidele on soodne. Seda asjaolu on hakatud kasutama sihilikult, lülitades automaatse regulaatori ahelatesse korrektsiooni otstarbel spetsiaalseid mittelineaarseid elemente. Üheks näiteks selle kohta võiks olla mittelineaarne element, mille sisend- ja väljundsignaali vaheline seos on graafiliselt kujutatud joonisel 49, *a*. Nagu graafikust selgub, suureneb sisendsignaali x_1 ühtlasel kasvamisel väljundsignaal x_2 algul aeglaselt, siis aga kiiresti. Sääraste omadustega elektriline element võib olla teostatud näiteks kahe dioodi (D_1 ja D_2, joonis 49, *b*) lülitamise teel paralleelselt ning vastassuunaliselt. Dioodide erilise tunnusjoone tõttu omab säärane element madalama pinge puhul suurt ja kõrgema pinge puhul väikest elektrilist takistust. Kui lülitada selline element näiteks võimendi sisendringi, saame lüli, mille võimendustegur on väikeste signaalide puhul väike, suurte signaalide puhul aga suur.

Mittelineaarsete süsteemide teoreetiline käsitelu on üsna keerukas. Väga ligikaudselt võib ülalkirjeldatud mittelineaarse elemendi mõju ette kujutada järgmiselt.

Jõudeolukorras on säärane süsteem väikese võimendusteguri tõttu stabiilne. Suure häiriva signaali saabumisel süsteemi satub viimase tööpunkt korrigeeriva elemendi tunnusjoone suure võimendusteguriga osale. Selle tagajärjel muutub viga kiiresti nulliks, sest võimendist väljub tugev signaal vea kõrvaldamiseks. Kui nüüd süsteem oleks lineaarne, leiaks aset tugev ülereguleerimine. Süsteemis tekiks seetõttu suur vastasmärgiline viga, viimase kõrvaldamine põhjustaks omakorda veel suurema üleregu-

leerimise jne. Süsteem hakkaks võnkuma. Mittelineaarsuse olemasolu tõttu reguleeriva ahela üldine võimendustegur väheneb reguleerimise vea nullile lähenemisel järsult. Seepärast on ka vastassuunaline ülereguleerimine nõrk ning võnkumised süsteemis kustuvad kiiresti. Seega võimaldab



Joonis 49

a — mittelineaarsus, mille puhul signaali suurenedes suureneb ka lüli ülekandetegur; *b* — kujutatud mittelineaarsuse teostamine elektrimasinvõimendi sisendringis; *c* — releeline ergutuse forsseerimine

mittelineaarne korrigeeriv element ära kasutada suure võimendusteguri eeliseid, kõrvaldades viimase puudused.

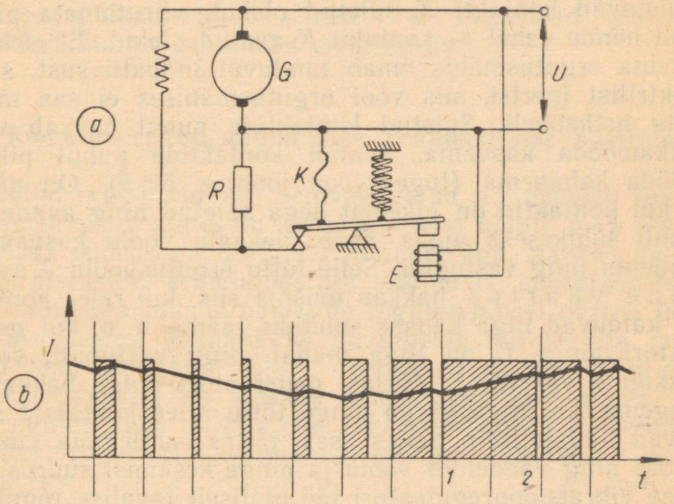
Teiseks näiteks mittelineaarsuse kasuliku rakendamise kohta võiks olla nn. *releeline ergutuse forsseerimine,* mida kasutatakse võimsate vahelduvvoolu hüdro- ja turbogeneraatorite elektripinge reguleerimisel. Mittelineaarse elemendina kasutatakse siin releed, mis omab teatavasti teravalt väljenduva mittelineaarsusega tunnusjoont (vt. § 5). Vastava regulaatori struktuurskeem on toodud joonisel 49, *c*. Generaatori pinge reguleerimine toimub teatavasti generaatori ergutusvoolu reguleerimise teel. Tavalises olukorras toimub pinge reguleerimine järgmiselt: mõõteelement *ME* lülitatakse generaatori *G* väljuvate faasidega *A*, *B*, *C*. Mõõteelemendist saabuv signaal võimendatakse

võimendi *VE* abil ning juhitakse generaatori *G* ergutusmähisesse. Selles osas vastab regulaatori töö täpselt tavalise lineaarse automaatse regulaatori tegevusele. Kui aga generaatori klemmidel pinge äkki tugevasti langeb (lühis elektrivõrgus), astub tegevusse releeline element *RE* ja lülitab oma kontaktide abil otsekohe maksimaalse ergutuspinge generaatori ergutusmähisele. Selle tulemusena tõuseb generaatori pinge maksimaalse kiirusega endisele väärtusele. Releelise elemendi puudumisel toimuks järsu suure pingelangu kompenseerimine liiga aeglaselt. Säärase võtte efektiivsus põhineb antud juhul asjaolul, et elektrivõrkudes esinevad võrdlemisi sageli suured järsud pinge langemised, mida põhjustavad lühised võrguosades. Kui aga reguleeritava suuruse väikesed muudatused tekivad kiiresti, suured aga pikkamööda, nagu see tavaliste reguleeritavate objektide puhul aset leiab, siis releeline forsseerimine kaotab oma mõtte. Siit järgneb väga oluline üldine reegel — nimelt peab regulaator olema *statistilises mõttes kohandatud* süsteemis esinevate häirivate signaalidega. Teiste sõnadega, regulaator peab olema nii ehitatud, et ta kõige efektiivsemalt reageeriks sageli esinevatele, antud süsteemi puhul tüüpilistele häirivatele signaalidele. Mittetüüpilistele signaalidele võib ta see-eest halvemini reageerida.

Releelised regulaatorid. Küllaltki tähtsat kohta mitmesuguste regulaatoritüüpide hulgas omavad *releelised regulaatorid*. Ühelt poolt on see tingitud releeliste regulaatorite konstruktsiooni lihtsusest, teiselt poolt aga asjaolust, et releeline regulaator võimaldab teatud tingimustes saavutada üsna kõrget reguleerimise kvaliteeti. Releeline regulaator erineb tavalisest regulaatorist peaasjalikult võimenduselemendi osas. Võimenduselemendina kasutatakse siin releed või muud releele omase tunnusjoonega elementi. Väikeste üldiste võimendustegurite ning suure inertsiga elementide rakendamisel on muidugi võimalik ehitada stabiilseid releelisi automaatse reguleerimise süsteeme. Ent sääraste regulaatorite paratamatuks puuduseks on relee hüstereesi poolt põhjustatud ebatäpsus staatilises töörežiimis, samuti see, et regulaatori väljundsignaal ei muutu sujuvalt.

Hoopis suuremat huvi pakuvad releelised regulaatorid, mille normaalseks töörežiimiks on teadlikult valitud ebastabiilne, kustumatute võnkumistega seotud režiim.

Nimelt on võimalik muuta korrigeerivate lülide ning regulaatori parameetrite sobiva valiku teel regulaatoris tekkivate võnkumiste sagedust üsna suureks.



Joonis 50

a — vibratsioonregulaatori põhimõtteskeem; *b* — vibratsioonregulaatori tööd kujutav diagramm; viirutatud aladele vastab regulaatori kontaktide suletud seisund

Kuna reguleeritav suurus omab tavaliselt üsna suurt inertsi, siis küllalt kõrge sagedusega võnkumised avalduvad reguleeritava suuruse vaevumärgatava vibreerimisena, mis enamikul juhtudel on täiesti lubatav.

Joonisel 50, *a* on kujutatud lihtsa vibreeriva releelise pingeregulaatori põhimõtteline lülitus alalisvoolugeneraatori *G* pinge reguleerimiseks.

Pinge reguleerimine toimub järgmiselt. Kui pinge *U* ületab soovitava väärtuse, rakendub elektromagnet *E* ja avab kontaktid *K*, mille tulemusena generaatori ergutusmähise vooluringi lülitub täiendav takistus *R*. Seetõttu väheneb generaatori ergutusvool, generaatori pinge langeb mõnevõrra ning elektromagnet vabastab ankru. Kontakt *K* sulgub uuesti, lühistades takistuse *R*. Takistuse

lühistamise tulemusena generaatori ergutusvool ja väljundpinge suurenevad ning äsjakirjeldatud protsess kordub üha uuesti. Elektromagneti ankur hakkab pidevalt vibreerima. Joonisel 50, *b* on kujutatud säärase releelise reguleerimise võimalik ajaline kulg. Viirutatud pindalad tähistavad kontakti *K* suletud olekut, viirutamata pindalad nende vahel — kontakti *K* avatud olekut. Et elektrimasina ergutusmähis omab tunduvat induktiivsust, s. o. elektrilist inertsi, siis vool ergutusmähises ei saa muutuda hetkeliselt. Suletud kontaktide puhul hakkab vool pikkamööda kasvama, avatud kontaktide puhul pikkamööda kahanema (tugev joon joonisel 50, *b*). On näha, et kui kontaktid on pikemat aega suletud ning avanevad ainult lühikeseks ajaks, saab ülekaalu voolu kasvamise tendents ning vastupidi. Selle tõttu ergutusvoolu keskmine väärtus hakkab tõusma siis, kui relee kontaktid kalduvad liiga kauaks suletuks jääma, s. o. kui generaatori pinge *U* on liiga madal, ning vastupidi, voolu keskmine väärtus ja ühtlasi generaatori pinge hakkavad langema, kui liiga kõrge pinge tõttu relee kontaktid sulguvad lühiajaliselt. Selles osas, jättes vaatlemata vibratsiooni ning vaadeldes voolu ja pinge keskmisi suurusi, ei erine vibratsioonregulaatori töö oluliselt tavalise regulaatori tööst. Relee tunnusjoon oleks otsekui vibreerimise tõttu lineariseeritud, sest ergutusvoolu muutumine kujuneb ligikaudu võrdeliseks reguleerimise veaga. Võrdlussuuruseks on siin lihtsalt relee rakenduspinge.

Kui aga generaatori pinge mingil põhjusel äkki tugevasti langeb, jääb kontakt *K* pingelangu likvideerimiseni suletuks, võnkerežiim katkeb ning generaatorile antakse otsekohe maksimaalne ergutusvool pingelangu kiireks likvideerimiseks. Analoogiliselt käitub regulaator pinge järsul tõusmisel.

Paljudel juhtudel töötavad vibratsioonregulaatorid sunnitud võnkumiste režiimis, kus ankru vibreerimine on sünkroniseeritud mingi konstantse sagedusega võnkuva seadmega. Sääraste regulaatorite töö on üldiselt ühtlasem ja stabiilsem, sest katkestussagedus ei sõltu süsteemi töörežiimist. Ka joonisel 50 kujutatud muutumatu «sammuga» diagramm on tegelikult iseloomulik sunnitud võnkumiste režiimile.

Vibratsioonregulaatoris on ühendatud lineaarsetele regulaatoritele omane sujuv reguleerimine statsionaarses

režiimis ning releelist forsseerimist meenutav kiire toimimine dünaamilistes režiimides. Säärane regulaator võimaldab paljudel juhtudel saavutada võrdlemisi kvaliteetset reguleerimist. Et vältida relee kontaktide kulumisest tingitud ebameeldivusi, ehitatakse viimasel ajal ka vibratsioonregulaatoreid, kus relee on asendatud vastava karakteristikuga kontaktitu elemendiga.

10. Komplitseeritud automaatse reguleerimise süsteemid

Seotud reguleerimine. Senivaadeldud automaatse reguleerimise süsteemides on olnud tegemist ainult ü h e reguleeritava suurusega. Paljudel juhtudel aga, näiteks kõrgahjuprotsesside, keemiatööstuse seadmete, energiasüsteemide ning rea muude objektide reguleerimisel osutub ühe seadme juures võimalikuks üheaegselt reguleerida mitmeid suurusi, nagu rõhku, temperatuuri, juurdeantava tooraine koostist jne. Raskus seisneb siin just selles, et iga reguleeritava näitaja ehk parameetri jaoks ei ole oma vastavat reguleerimisvõimalust, mis mõjutaks ainult seda näitajat.

Teatud organite reguleerimisel muutuvad üheaegselt reguleeritava objekti mitmed parameetrid. Sageli mõjutavad üksikud näitajad teineteist isegi vastupidistes suundades. Lihtsaks näiteks säärasest seosest reguleeritavate suuruste vahel on peatüki alguses toodud näide vee temperatuuri reguleerimisest, kui oletada, et reguleerimisele ei kuulu mitte üksnes väljavoolava vee temperatuur, vaid ka ajaühikus väljavoolava vee hulk. Püüdes reguleerida neid suurusi omaette ning eraldi ühe kraani abil, nagu see on kirjeldatud peatüki alguses, selgub, et see ei ole võimalik. Vee temperatuur ja ajaühikus väljavoolava vee hulk osutuvad omavahel s e o t u k s. Igale temperatuurile vastab oma kindel veehulk ning vastupidi. Isegi mõlema kraani käsitsemisel on küllalt raske saavutada olukorda, mil väljavoolava vee hulk ja temperatuur vastaksid mingisugustele suvaliselt etteantud väärtustele, sest kraani iga asendi muutus toob kaasa nii temperatuuri kui ka veehulga muutumise. Alles kahe kraani koostoimel on võimalik teatud raskustega muuta veehulka nii, et temperatuur jääks püsivaks või, vastupidi, muuta temperatuuri nii, et veehulk jääks püsivaks. Tööstuslike protsesside puhul

muutuvad need raskused võrreldamatult suuremaks, sest reguleeritavaid suurusi ja reguleerivaid organeid on tunduvalt rohkem. Neil asjaoludel on käsitsi juba peaaegu võimatu tagada tehnoloogilise protsessi ettenähtud käiku. Seepärast varustatakse sellised tööstuslikud objektid keeruka automaatse reguleerimise süsteemiga, kus reguleerivad organid ja reguleeritavad suurused on omavahel kindlate reeglite kohaselt seotud. Säärast süsteemi nimetataksegi *seotud automaatse reguleerimise süsteemiks.* Enamasti seotakse üksikute protsessi näitajate regulaatorid omavahel nii, et ühe suuruse reguleerimine ei mõjutaks teisi reguleeritavaid suurusi. Kirjeldatud lihtsa näite puhul omaks regulaator kaht eteandesuurust — üht temperatuuri ja teist veehulga määramiseks, kusjuures kumbagi neist suurustest võiks muuta teisest sõltumatult vastava juhtimisorgani abil.

Et teostada säärast seotud reguleerimist, peavad välised, üksikute regulaatori osade vahelised seosed kompenseerima sisemiste, reguleeritavale objektile omaste seoste mõju reguleeritavate näitajate vahel. Seda liiki seotud reguleerimise süsteemi nimetatakse *autonoomseks automaatse reguleerimise süsteemiks,* sest ta võimaldab reguleerida üksikuid reguleeritavaid suurusi autonoomselt, üksteisest sõltumatult.

Suurt tähtsust omavad ka mitteautonoomsed seotud reguleerimise süsteemid. Sellisel juhul on vajalikud seosed reguleeritava tootmisprotsessi üksikute parameetrite vahel tavaliselt väljendatud võrrandite kujul. Seotud reguleerimise süsteemi ülesandeks on siis protsessi üksikute parameetrite reguleerimine vastavalt neile võrrandeile.

On arusaadav, millist suurt hõlbustust taoliste protsesside juhtimisel pakub seotud reguleerimine. Seotud reguleerimise tehniline teostamine on aga tunduvalt keerukam kui tavalise automaatse reguleerimise teostamine. Selleks kasutatakse spetsiaalset automaatset arvutusseadet, kuhu saabuvad reguleeritavate suuruste etteantud ning tõelised väärtused. Lähtudes nendest suurustest, määrab matemaatiline seade vea iga reguleeritava suuruse jaoks eraldi ja neist vigadest lähtudes arvutab välja signaalid, mida tuleb saata reguleeriva süsteemi üksikutesse täiturelementidesse, et tagada üheaegset kõigi vigade hoidmist ettenähtud piires.

Ekstreemreguleerimine. Eespool käsitletud automaatse reguleerimise süsteemid eeldavad etteandesuuruse või -suuruste olemasolu. Regulaatori ülesandeks oli hoida reguleeritav suurus võimalikult täpselt vastav etteandesuurusele. Näiteks jälgivsüsteemi väljundsuurus peab võimalikult täpselt jälgima sisendsuuruse muutumist, stabilisaatori väljundsuurus aga peab püsima teatud vea piires konstantsena, sest etteandesuurus on siin konstantne. Sellised regulaatorid vastavad oma tegevuselt üldiselt mitte eriti kõrge kvalifikatsiooniga töötajaile, kelle ülesandeks on reguleerida mingit tootmisprotsessis esinevat suurust vastavalt lihtsale juhendile. Näiteks peab valvekorramadrus hoidma laeva kursil. Tema tegevus seisneb tüüriratta pööramises teatud suunas, kui kompass hakkab näitama kursist kõrvalekaldumist. Sama laadi on ka katlakütja ülesanne, kes kontrollib manomeetri järgi rõhu suurust, võrdleb seda nõutava rõhuga ja sellele vastavalt kütab katelt rohkem või vähem intensiivselt.

Seda laadi operatsioonide juures, kui jätta kõrvale kütja või valvekorramadruse muud funktsioonid, võib tavaline automaatse reguleerimise süsteem täielikult inimest asendada.

Ometi esineb nii tootmisprotsessides kui ka muudel inimtegevuse aladel terve rida ülesandeid, mis oma olemuselt seisnevad reguleerimises, pole aga siiski teostatavad tavalise või ka seotud reguleerimise süsteemi abil. Nimelt puudub seda tüüpi ülesannetes valmiskujul või võrrandi kaudu esitatud etteandesuurus. Iga olukorra jaoks tuleb siin leida kas proovimise või kogemuste varal kõige sobivam etteandesuuruse väärtus.

Hinnang selle kohta, millist etteandesuuruse väärtust lugeda sobivaks ja millist mitte, tehakse lähtudes reguleerimise tulemustest. Vastav kriteerium peab seejuures loomulikult olema antud. Sääraseid ülesandeid esineb väga palju. Näiteks on hästi teada, et teatud metallurgiaprotsesside puhul annab vilunud ning suurte kogemustega operaator suurema koguse ning kõrgema kvaliteediga terast kui vähem vilunud operaator. Asi seisneb selles, et lähtudes üldisest eeskirjast — anda võimalikult rohkem ja võimalikult parema kvaliteediga terast — suudab vilunud ning suurte kogemustega operaator kiiremini ja täpsemini määrata selleks vajaliku materjalide koosseisu ning ahju termilise režiimi.

Samalaadne probleem võib esineda näiteks lennuki juhtimisel, kui ülesandeks on antud kütusehulgaga maksimaalse lennukauguse saavutamine. Antud kütusehulgaga saavutatav lennukaugus sõltub eelkõige lennuki kiirusest, viimane aga ajaühikus mootorisse antavast kütuse hulgast. Aeglase lennu puhul on küll kütusekulu väiksem, ent väikese kiiruse tõttu ei jõua lennuk kaugele, kiiruse ülemäärasel suurendamisel aga lõpeb kütus kiiresti otsa ning lennuk ei jõua samuti kuigi kaugele. Ilmselt eksisteerib siin teatud kompromisslahendus, mil kütusekulu iga läbisõidetud kilomeetri kohta ehk kütuse e r i k u l u on minimaalne. Sellisel juhul on saavutatav lennukaugus maksimaalne. Minimaalsele kütuse erikulule vastava lennukiiruse võiks arvutuslikul teel ette kindlaks määrata, kuid kogu raskus seisneb kõigi selliste probleemide puhul selles, et kõige sobivam lahendus, antud juhul sobiv lennukiirus, sõltub tervest reast pidevalt muutuvatest faktoritest, nagu õhurõhust, tuule suunast ning tugevusest, lennuki jäätumisest, mootori temperatuurist, lennukõrgusest, mitmesugustest hoovustest õhus, kütuse kvaliteedist ning paljudest muudest teguritest.

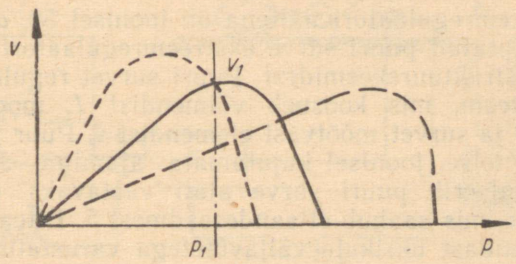
Kõiki neid tegureid ja nende mõju on äärmiselt raske ette näha, et anda lendurile tabeli kujul juhendid, et nii- ja niisugustel tingimustel tuleb lennata sellise kiirusega. Vilunud lendur «tunneb» ise, milline režiim on sobivaim ning valib selle pikemalt kaalutlemata. Sageli toimub režiimi valik ka nii, et lendur kas instinktiivselt või teadlikult valib paar režiimi, mis näivad talle ligikaudu sobivad olevat, võrdleb neid kütuse erikulu järgi, lennates pisut ühe ning pisut teise režiimi juures, ja valib siis sobivama.

Vist veelgi suuremat osavust ning vilumust nõudis omal ajal kiirete purjelaevade — klipperite — juhtimine, mispuhul kasutati vähimaidki hoovusi ning tuulepuhanguid laeva kiiruse suurendamiseks.

Kirjeldatud näidete puhul kombineerub kõige sobivama režiimi valik seotud reguleerimise probleemidega, sest olukorda mõjutavaid tegureid on väga palju.

Ometi on palju juhtumeid, kus optimaalse režiimi leidmine esineb ka tavalise üheparameetrilise reguleerimisülesande puhul. Väga lihtsaks ning ilmekaks näiteks seda laadi masinate reguleerimise kohta on puurmeistri tegevus naftapuuraukude puurimisel. Joonisel 51 on kujutatud

kõver, mis näitab puuri edasiliikumise kiirust v pinnase läbimisel sõltuvalt puurile avaldatavast survest p. On ilmne, et surve suurendamisel algul puurimise kiirus tõuseb, ent hiljem, puuri pöörlemiskiiruse vähenemisel, sedamööda kuidas pöörlemise takistus suureneb, hakkab ka



Joonis 51

Puuri edasiliikumise kiiruse sõltuvus puurimissurvest naftapuuraukude puurimisel

läbimise kiirus uuesti vähenema. Küllalt suure surve puhul jääb puur hoopis seisma ning läbimise kiirus muutub nulliks. Maksimaalsele läbimise kiirusele vastava surve p leidmiseks tuleb proovida mitut p väärtust ning peatuda sellel, millele vastab suurim läbimise kiirus.

Seda tegevust tuleb puurimise käigus perioodiliselt korrata, sest sõltuvus puurile avaldatava surve ning läbimise kiiruse vahel muutub pidevalt, sõltuvalt läbitava kihi omadustest, puuri kulumise astmest ning puurvardale avaldatavast hõõrdetakistusest (kriipsjoonega kõverad joonisel 51). Tavaliselt teostab seda puurmeister.

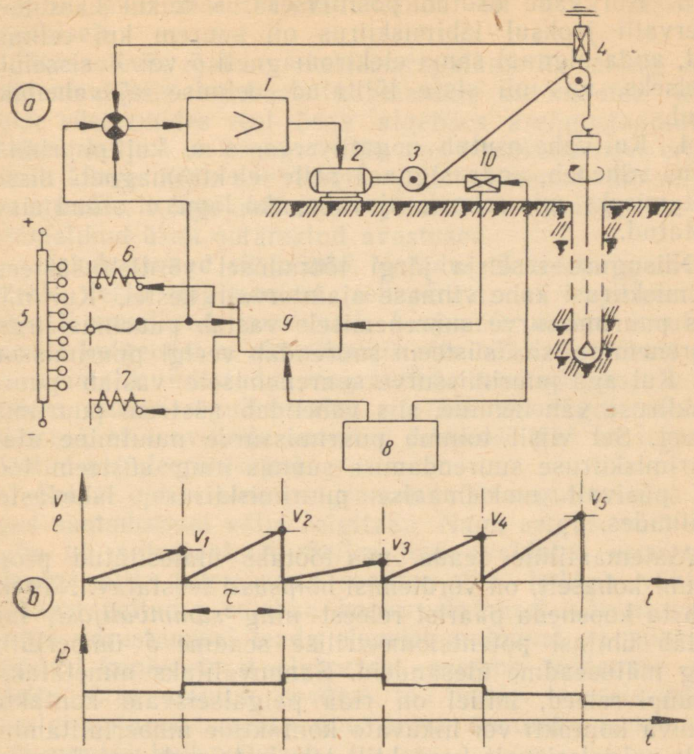
Kõik loetletud ülesanded taanduvad matemaatilises keeles väljendatuna mingisuguse sõltuvuse ehk funktsiooni m a k s i m u m i või m i i n i m u m i leidmisele (maksimaalne terase hulk, minimaalne kütusekulu jne.). Matemaatikas nimetatakse funktsioonide minimaalseid kui ka maksimaalseid väärtusi ühise nimetusega funktsioonide *ekstreemväärtusteks* ehk *ekstreemumiteks*. Seepärast nimetataksegi keerukaid automaatseid regulaatoreid, mis on määratud selleks, et asendada inimest protsessi ekstreemväärtuste saavutamisel, *ekstreemregulaatoreiks*. Sääraste regulaatorite teostamisel kasutatakse

samuti arvutusseadmeid, mis ühelt poolt teostavad ekstreemväärtuste otsimist, teiselt poolt aga võivad täita joonisel 51 kujutatud funktsioonide «meelespidamise» ülesandeid neil juhtudel, kui protsessi iseloomustavad näitajad on küllalt püsivad. Sellisel juhul puudub vajadus kord kindlaks määratud sõltuvuse jooksvaks kontrollimiseks.

Ekstreemregulaatori näitena on joonisel 52, *a* lihtsustatult kujutatud puuri surve ekstreemregulaatori üks võimalikest struktuurskeemidest. Puuri survet reguleerib siin jälgivsüsteem, mis koosneb võimendist *1*, mootorist *2*, ajamist *3* ja survet mõõtvast elemendist *4*. Puur pannakse pöörlema teise, joonisel kujutamata ajamiga. Jälgivsüsteem reguleerib puuri surve alati vastavaks etteantud väärtusele, mis saabub etteandeseadmest *5*. Etteandeseade kujutab endast üksikute väljavõtetega varustatud potentsiomeetrilist pingejagajat, mille kontakte mööda libiseb liugkontakt, võimaldades niiviisi ette anda mitmesuguseid elektripinge väärtusi. Etteandeseadet juhitakse kahe elektromagneti *6* ja *7* abil. Elektromagneti *6* rakendumisel tõuseb etteandepinge ühe astme võrra, sest liugkontakt nihkub ühe astme võrra ülespoole. Elektromagneti *7* rakendumisel pinge alaneb samuti ühe astme võrra. Vastavalt muutub ka jälgivsüsteemi poolt kontrollitav puurimissurve.

Peale ülalnimetatud elementide kuulub süsteemi veel signaalide generaator *8*, mille ülesandeks on tekitada elektriimpulsse võrdsete ajavahemike τ tagant, matemaatiline seade *9* ning mõõteelement *10*, mis mõõdab ajami *3* pöördenurga kaudu puuri edasiliikumise suurust l. Ajaimpulsside generaatoriga on mõõteelement *10* ühendatud selliselt, et iga impulsi saabumisel mõõteelemendi väljundsuurus loetakse ning kustutatakse, s. o. viiakse uuesti nullväärtusele tagasi. Seepärast iseloomustab igal mõõtmisel saadav väljundsuuruse väärtus puuri edasiliikumist antud ajavahemiku vältel. Püsiva suurusega ajavahemike puhul on mõõteelemendi väljundsuurus järelikult võrdeline puurimise keskmise kiirusega antud intervalli vältel. Joonisel 52, *b* on kujutatud mõõteelemendi *10* väljundsuuruse l väärtus sõltuvalt ajast. Samal graafikul on märgitud ka üksikute ajavahemike lõpp-punktid, mis vastavad keskmistele kiirustele v_1, v_2, v_3 jne.

Matemaatiline seade *9* koosneb mäluseadmest, loogilisest seadmest ning aritmeetilisest seadmest kahe suuruse



Joonis 52

a — puurimissurve ekstreemregulaatori töö skeem; *b* — puurimiskiiruse, puuri edasiliikumise ja puurimissurve sõltuvus ajast

teineteisest lahutamiseks. Matemaatilise seadme tööd võib formuleerida järgmise eeskirja kujul.

1. Pidada meeles esiteks eelmise ajaintervalli lõpul mõõdetud kiirus v_1, s. o. mõõteelemendi *10* väljundsuurus eelmise lugemise ajal, ning teiseks see, kumb elektromagnetitest, kas *6* või *7*, rakendus eelmise ajaimpulsi saabumisel.

2. Lahutada käesoleva ajavahemiku lõpul mõõdetud läbimiskiirusest v_2 eelmise ajavahemiku lõpul mõõdetud, meelespeetav läbimiskiirus v_1.

3. Kui vahe osutub positiivseks, s. o. kui käesoleva intervalli jooksul läbimiskiirus oli suurem kui eelmise ajal, anda signaal sama elektromagneti *6* või *7* sisselülitamiseks, mis oli sisse lülitatud eelmise ajavahemiku lõpul.

4. Kui vahe osutub negatiivseks, s. o. kui puurimise kiirus väheneb, anda signaal selle elektromagneti sisselülitamiseks, mis eelmise ajavahemiku lõpul ei olnud sisse lülitatud.

Niisuguse eeskirja järgi töötamisel võrdleb süsteem läbimiskiirusi kahe viimase ajaintervalli kestel. Kui näiteks puurimissurve suurenemisele vastab puurimiskiiruse suurenemine, siis süsteem suurendab veelgi puurimissurvet. Kui aga puurimissurve suurenemisele vastab puurimiskiiruse vähenemine, siis vähendab süsteem puurimissurvet. Sel viisil toimub puurimissurve muutmine alati puurimiskiiruse suurendamise suunas ning süsteem töötab püsivalt maksimaalse puurimiskiiruse lähedastes režiimides.

Matemaatiline seade, mis töötaks ülalesitatud programmi kohaselt, on võrdlemisi hõlpsasti teostatav. Näiteks võib ta koosneda paarist releest ning *sammvalijast*, mis täidab ühtlasi potentsiomeetrilise seadme *5* ümberlüliti ning mäluseadme ülesandeid. Sammvalijaks nimetatakse eritüüpi releed, millel on rida paigalseisvaid kontakte. Liikuva kontakti või liikuvate kontaktide ümberlülitamine ühelt paigalseisvalt kontaktilt teisele toimub impulssmootori taolise elektromagnetilise seadme abil. Iga sisselülitamise puhul liigub sammvalija edasi ühe «sammu» võrra, s. o. liikuv kontakt libiseb järgnevale paigalseisvale kontaktile.

Puurile avalduva surve *p* muutumine vastavalt eeltoodud programmile on graafiliselt kujutatud joonisel 52, *b*. Selgub, et puuri surve säärases seadmes muutub tõepoolest ligikaudu nii, et oleks tagatud maksimaalne võimalik puurimise kiirus. Iga intervalli lõpul kontrollib seade, kas eelmise intervalli lõpul teostatud puurimissurve muutus andis positiivseid tulemusi, s. o. kas puurimise kiirus suurenes või mitte. Kui puurimiskiirus suurenes, muudetakse puuri poolt avaldatavat survet *p* veelgi samas suunas. Kui aga läbimise kiirus vähenes, muudetakse puuri poolt avaldatavat survet vastassuunas, võrreldes eelmise survemuutusega. Kui ajaintervallid on küllalt lühikesed, siis

tegelik puurimissurve muutumine on üsna lähedane ideaalsele.

Käesoleval ajal on ekstreemregulaatorite areng ning matemaatiliste seadmete kasutamine automaatse juhtimise süsteemides veel üsna algelises arengustaadiumis. Teisest küljest on arengutempo neis tehnikaharudes erandlikult kõrge. Kõik see tingib väljakujunenud lahenduste puudumise. Kõige üldisemate põhimõtete raamides on siin võimalikud üsna ootamatud avastused.

Isekohastuvad süsteemid. Vajadus ekstreemregulaatori järele tekib õigupoolest sellepärast, et reguleeritava objekti omadused muutuvad, kusjuures nende muutuste täpset kulgemist ei ole võimalik ette näha. Seepärast pole ka võimalik koostada programmi, mis näitaks, kuidas tuleks muuta reguleeritavat suurust või reguleeritavaid suurusi, et saavutada soovitud tulemusi (kui on tegemist seotud reguleerimisega).

Sobiv, optimaalne programm tuleb reguleerimise käigus sammhaaval välja selgitada. Nagu selgus, võib seda teha ka automaatselt. Selles just avaldubki arengutendents, mille tulemusena seadme töö hakkab vähemal määral sõltuma seadme konstrueerimisel või programmiga varustamisel teada olevaist andmeist ja suuremal määral konkreetsest olukorrast seadme töötamise ajal. Selle tõttu muutub seadme töö veelgi iseseisvamaks, veelgi automaatsemaks ning tema teenindamiseks vajalik inimtöö hulk väheneb.

Automaatse juhtimise süsteemide «iseseisvumine» ei piirdu ülalkäsitletuga.

Paljudel juhtudel võivad mitte üksnes objekti, vaid ka regulaatori enese näitajad tunduvalt muutuda, näiteks mitmesuguste rikete tekkimisel.

Et regulaator oleks võimeline töötama uues, muutunud olukorras, on tarvis muuta regulaatori enda üksikute elementide parameetreid või isegi regulaatori lülitusskeemi. Mõnikord on võimalik asja nii korraldada, et vajalikke muudatusi ei teosta mitte tehnik, kes regulaatorit ümber häälestab, vaid vajalikud muudatused teostab automaatse reguleerimise süsteem i s e.

Sääraseid automaatse juhtimise ja reguleerimise süsteeme, mis ise teostavad mitmesuguseid tööprotsessi jooksul vajalikuks osutuvaid muudatusi süsteemis endas, nimetatakse *isekohastuvateks süsteemideks.*

Säärane süsteem tuleb konstrueerimisel varustada vaid teatud kriteeriumiga, mille järgi süsteem võiks «otsustada», kas ta töötab õigesti või mitte. Regulaatori puhul võib niisuguseks kriteeriumiks olla regulaatori stabiilsus. On võimalik ehitada näiteks automaatset regulaatorit, mis on varustatud terve rea mitmesuguste korrigeerivate elementidega. Elemendid on spetsiaalse seadme abil mingisuguses järjestuses kordamööda sisse lülitatavad. Lülitusseade omakorda rakendub kestvate võnkeprotsesside tekkimisel regulaatoris, s. o. siis, kui viimane muutub ebastabiilseks. Selle tulemusena lülitatakse sisse teistsuguste omadustega korrigeeriv element. Kui viga ikkagi ei vähene, lülitatakse sisse kolmas, jällegi erinevate omadustega korrigeeriv seadis jne. seni, kuni süsteem stabiliseerub.

Niiviisi võib tagada stabiilset reguleerimist üsna suuresti muutuvate omadustega reguleerivas süsteemis.

Isekohastuvalt süsteemilt võib samuti nõuda, et ta p a r a n d a k s oma vead ja rikked ise. Selle probleemi lahendamine on põhimõtteliselt siiski tunduvalt raskem. Põhiline raskus seisneb siin selles, et vigade leidmine ja samuti nende parandamine nõuab üldiselt automaatse süsteemi olemasolu, mis kujuneb tavaliselt keerukamaks, kui seda on parandatav süsteem ise. Selle parandava süsteemi parandamine aga nõuab omakorda veelgi keerulisema parandava süsteemi olemasolu jne. Ometi on teatud erandjuhtumeil sääraste süsteemide võimalikkus teoreetiliselt tõestatud. Nimelt võib säärane «iseparandamine» aset leida väga suurtes süsteemides.

Keerukamaid isekohastuvaid süsteeme, mis on võimelised end iseseisvalt parandama ja täiendama, nimetatakse ka *iseorganiseeruvateks* süsteemideks. Tehnikas sääraseid süsteeme seni oluliselt rakendatud ei ole.

IV PEATÜKK

MATEMAATILISED MUDELID

11. Arvutamisest ning modelleerimisest

Mitmesuguste tehnikaalaste projektide oluliseks komponendiks on projekti arvutuslik osa. Projekti arvutusliku osa sisuks on projekteeritava objekti niisuguste mõõtmete ja kujunduse leidmine, et ta võimalikult paremini rahuldaks ülesseatud tehnilisi tingimusi. Arvutusliku osa teostamisel kasutatakse aja jooksul väljatöötatud ning kogemuste varal kontrollitud matemaatilisi meetodeid, seoseid ning valemeid.

Sageli, eriti uuetüübiliste seadmete projekteerimisel ja konstrueerimisel, tekivad raskused projekti arvutusliku osa teostamisel, sest puuduvad piisavad arvutusalused, s. o. matemaatilised seosed, valemid ja koefitsiendid, mis kirjeldaksid vastava objekti käitumist ning omadusi. Selleks, et määrata kindlaks teatud objekti arvutamiseks sobivat matemaatilist aparaati kui ka vajalikke arvulisi lähteandmeid, tuleb tavaliselt teha hulk katseid. Kui analoogilised eeskujud puuduvad, tuleb katsete läbiviimiseks eelkõige ehitada spetsiaalne katseobjekt. Enamasti katseobjekt ei pruugi olla oma ulatuselt ja ehituselt projekteeritava objektiga võrdne. Oluline on vaid see, et ta kujutaks projekteeritava objekti kõige olulisemaid omadusi, olgu siis ka vähendatud mõõtkavas. Niisiis võib kujutleda mingi uue seadme väljatöötamise käiku skemaatiliselt umbes sellisena. Esiteks uuritakse läbi kogu kirjandus, s. o. inimkonna eelnev kogemus antud küsimuse kohta, teiseks tehakse kindlaks, millises ulatuses tuleb teha eksperimente, ning viiakse need läbi, kolmandaks luuakse eksperimentide ja eelnevate kogemuste varal teooria, neljandaks arvutatakse teooria alusel, kuidas

tuleks ehitada objekt, ning alles viiendaks võib objekti enese ehitamisele asuda. Praktikas tuleb lisaks sellele eelmainitud tsüklit sageli korrata, s. o. loodud teooria varal ehitada uus, täielikum katseobjekt, mis omakorda võimaldab teooriat täiustada jne.

On täiesti selge, et teooria ning küsimuse arvutuslik külg peab kogu aeg kulgema käsikäes praktikaga ja eksperimentidega. Ilma eksperimentaalse kontrollita tekib enamikul juhtudel reaalne oht, et teooria kaugeneb tegelikkusest. Tüüpiliseks näiteks selle kohta võiks olla eelmises peatükis puudutatud automaatse reguleerimise süsteemide lineaarteooria. Teatavasti hakkas see teooria teatud süsteemide arvutamisel ebarahuldavaid tulemusi andma, sest teooria koostamisel ei arvestatud nimetatud süsteemide omapära. Teisest küljest on hästi mõistetav, millest tuleneb inseneride, konstruktorite ja teadlaste kõrvalekaldumatu püüe mahutada kõik nähtused teooria raamidesse.

Esimesel pilgul võib tõepoolest näida, et kindlam on kõike eksperimentaalselt proovida. Ent tarvitseb vaid kujutleda, mis sünniks, kui ehitajad peaksid selleks, et osata ehitada üht kõlbulikku maja, ehitama ning lõhkuma kümmekond proovimaja mitmesuguste talade ristlõigetega ja seinte paksusega, et proovida, milline konstruktsioon on küllalt vastupidav ja samal ajal küllalt ökonoomne. Mõistlikum on sel juhul siis ehitada proovimaja juba väikeste mudelite kujul, vähendatud mõõtkavas, säilitades sealjuures kõik proportsioonid.

Tänapäeva ehitajad, olles varustatud küllalt arenenud teooriaga materjalide tugevusõpetuse näol, lähevad veelgi kaugemale, kontrollides eksperimentaalselt ainult mitmesuguste kuubikute, varraste ning muude katsekehade tugevust. Mitmesuguse suuruse ja kujuga, ent samast materjalist valmistatud talade, sammaste ja muude ehituselementide tugevus ning kandevõime on siis juba arvutuslikul teel võrdlemisi hõlpsasti määratav.

Füüsikaline modelleerimine. Valemid, mille abil võib arvutada näiteks samba tugevust, s. o. koormust, mille juures sammas puruneb, on matemaatiliselt vormilt täpselt ühesugused, sõltumata sellest, kas sammas valmistatakse puust, kivist, betoonist, metallist või muust homogeensest materjalist. Erinevad on ainult valemis esinevad koefitsiendid, näiteks lubatud koormus kilogrammi-

des ruutsentimeetrile. Niisiis tarvitseb katseliselt määrata vaid koefitsiendid — seda on hõlpus teha väikeste katsekehade varal — ja edasi võib juba puhtarvutuslikul teel projekteerida mistahes mõõtmete ja kujuga detaile.

Paljude ülesannete lahendamisel siiski ei ole üksi koefitsientide määramisest küllalt. Mõnel juhul ei ole keerulisi objekte kirjeldavad matemaatilised valemid küllalt täpselt teada, teistel juhtudel tekivad aga raskused lihtsalt vajalike arvutuste suure mahu ja keerukuse tõttu. Sellisel juhul on õigem minna modelleerimise, s. o. nähtuse muudetud mõõtkavas järeleaimamise teed. Sellise modelleerimise näiteks võiks olla silla mudeli kasutamine silla tugevuse kontrollimiseks.

Säärast modelleerimist nimetatakse *füüsikaliseks modelleerimiseks*. Füüsikalise modelleerimise puhul on modelleerivate ja modelleeritavate nähtuste füüsikaline olemus sama, vahe seisneb ainult objektide mõõtmetes. Näiteks elektriseadet modelleeritakse samasuguse, ent väiksema võimsusega elektrilise seadme abil; vee voolamise nähtusi jões modelleeritakse katseseadme väikesemõõtmelises kanalis jne.

Loomulikult erinevad siis ka saadud arvulised tulemused mudelil ning tegelikkuses. Ümberarvutamiseks vajalike võrdelisustegurite leidmine on aga võrdlemisi hõlpus, kui vaid mudel ise on õigetes proportsioonides teostatud.

Füüsikalist modelleerimist kasutatakse laialdaselt elektroenergeetiliste süsteemide, hüdroenergeetiliste ehituste, auru- ning hüdroturbiinide ja paljude muude seadmete projekteerimisel.

Kuigi mõned autoriteedid rõhutavad, et füüsikaline modelleerimine on eelistatavam mitmesuguste matemaatiliste meetoditega võrreldes, sest ta võimaldab arvesse võtta ka objektide niisuguseid omadusi, mille matemaatiline kirjeldus ei ole teada, on viimasel ajal füüsikalise modelleerimise kõrval üha laiemalt levima hakanud *matemaatiline modelleerimine*.

Füüsikaliste mudelite peapuuduseks on kõrge hind ja mitteküllaldane paindlikkus ning universaalsus. Erinevate objektide uurimiseks tuleb ehitada loomulikult erinevad füüsikalised mudelid.

Matemaatiline modelleerimine. Matemaatiline modelleerimine lähtub asjaolust, et sageli esineb märgatav

analoogia mitmesuguste näiliselt väga erinevate nähtuste kulgemisel. Selgub, et ühesugused matemaatilised valemid ei kehti mitte ainult erinevast materjalist talade või sammaste mehaanilise tugevuse arvutamisel. Väga sageli ilmneb, et ühesugused valemid kehtivad mitmesuguste täiesti erineva füüsikalise sisuga nähtuste kirjeldamisel. Näiteks kirjeldavad pendli ja elektrilise võnkeringi võnkumise protsessi ühesugused diferentsiaalvõrrandid.

Ühel juhul on võrrandi konstantideks pendli pikkus, gravitatsioonijõud ning hõõrdetakistus pendli liikumisel, teisel juhul aga induktiivsus, mahtuvus ning elektritakistus. Ühel juhul on võrrandi lahendiks pendli mehaanilise liikumise matemaatiline kirjeldus, teisel juhul elektrivoolu või pinge muutumise kirjeldus võnkeringis.

Lihtsama näitena võib märkida, et nii suurtükikuuli kui ka helilaine liikumiskiirust arvutatakse teatavasti ühe ja sellesama valemi abil, olgugi et vastavate nähtuste füüsikaline sisu erineb.

Seda liiki analoogiaid on looduses ja tehnikas üsna palju ning viimasel ajal kasutatakse neid üha laiemalt. Näiteks on paljudel juhtudel võimalik, selle asemel et ehitada hüdrotehnilise kanali füüsikalist mudelit, kasutada katsete läbiviimiseks elektrilistest takistitest ja mahtuvustest koostatud korrapäraseid ruumilisi *võresid*, mille pingestamisel elektriliste potentsiaalide jaotus võre üksikute sõlmede vahel vastab näiteks veevoolu kiiruste jaotusele kanali teatud ristlõikes. Samasuguse elektrilistest elementidest võre abil võib aga matemaatiliselt modelleerida ka näiteks soojuse turbiini rootorisse tungimise protsessi. Hinnatav on viimasel juhul see, et mudeli sõlmedes võib vahetult mõõta pingete väärtusi, mis vastavad temperatuuri väärtustele teatud punktides rootori keha *sisemuses*. Ülesande lähteandmeid on elektrilises lülituses samuti palju hõlpsam muuta kui füüsikalise mudeli puhul.

Samuti võib elektripingete abil, mis esinevad vastavais vooluringides, modelleerida näiteks lennuki või raketi teekonda ehk trajektoori mitmesuguste väliste tingimuste puhul. Seejuures võib modelleerimisel aja mõõtkava valida suvaliselt, pidades silmas vaid vajalikke proportsioone mudeli üksikute näitajate vahel. Seetõttu on võimalik ühelt poolt kiiresti lahendada küsimusi,

mille loomulik kulg nõuaks üsna palju aega. Näiteks võib matemaatilise mudeli abil arvutada rongi ööpäevase veograafiku mõne minuti jooksul. Teiselt poolt võib kiireid protsesse, näiteks juhitava mürsu lendu modelleerida aeglustatud aja mõõtkavas. Seetõttu on võimalik nähtuse kulgu mitte üksnes pidevalt jälgida, vaid soovi korral ka mõjutada, sest kõik nähtuse kulgu mõjutavad tegurid on mudelis modelleeritud ning hõlpsasti muudetavad. Nii näiteks on matemaatilise mudeli abil võimalik arvutada mürsu trajektoori andmeid mitmesuguse õhurõhu, tuule suuna ja tugevuse puhul, muutes selleks vaid mõningaid suurusi elektriskeemis.

Matemaatiliseks mudeliks, matemaatiliseks analoogiks või ka *pidevatoimeliseks matemaatiliseks masinaks* nimetatakse arvutusseadet, mis põhineb nähtusel, et mitmesugused vormilt erinevad füüsikalised ja muud protsessid on oma olemuselt sarnased ning on kirjeldatavad ühesuguste matemaatiliste võrranditega. Pidevatoimelise matemaatilise masina ehitamisel valitakse tavaliselt aluseks niisugune füüsikaline protsess, mida on hõlpus tekitada, juhtida ning mõõta. Tavaliselt vastab neile nõudeile kõige paremini elektriline protsess, mõningail juhtumeil aga ka mehaaniline liikumine. Säärase protsessi varal modelleeritaksegi nii elektrilisi, mehaanilisi, termilisi, hüdraulilisi, akustilisi kui ka muid protsesse, mille matemaatiline kirjeldus on a n a l o o g i l i n e. Seepärast nimetataksegi sääraseid masinaid sageli m a t e m a a t i l i s t e k s a n a l o o g i d e k s. Peale modelleerimise võib matemaatilise analoogi abil lahendada ka võrrandeid ning võrrandsüsteeme, mis otseselt mingit konkreetset objekti ei kirjelda. Selles osas võib matemaatiline analoog abistada ka teatud puhtmatemaatiliste ülesannete lahendamisel.

Oluline on see, et universaalne matemaatiline analoog võib leida kasutamist väga mitmesuguste ülesannete lahendamisel. Selleks projekteeritakse universaalne matemaatiline analoog nii, et ta koosneks suurest hulgast üksikutest võrdlemisi lihtsa ehitusega ning matemaatilise funktsiooniga elementidest. Ühe matemaatilise analoogi koosseisu võib kuuluda kümneid või isegi sadu lihtsaid ühetüübilisi blokke. Kui ühendada vastavate lülitusseadiste abil blokid ühel või teisel viisil omavahel, võib sama mudeli abil modelleerida peaaegu piiramatult

mitmekesiseid objekte ja seadmeid, samuti lahendada mitmesuguseid matemaatilisi ülesandeid ning võrrandsüsteeme. Selles seisnebki matemaatilise modelleerimise põhiline paremus füüsikalise modelleerimisega võrreldes.

Üldse kasutatakse käesoleval ajal matemaatilisi elektronmudeleid väga laialdaselt. Näiteks leiavad nad kasutamist aatomienergeetiliste seadmete tööprotsesside, lennukite, laevade, mürskude ja rakettide liikumise, autode, tankide ning raudteeplatvormide amortisatsioonisüsteemide, keemiatööstuse seadmete, elektroenergeetiliste süsteemide, raadiotehniliste seadmete, tööpinkide, tõste- ning transpordiseadmete ja paljude muude tehniliste objektide uurimisel ning projekteerimisel. Peale selle on matemaatilisi analooge rakendatud ka mitmesuguste bioloogiliste ja isegi majandussüsteemide modelleerimiseks, haiguste diagnoosimiseks, rongide veograafikute arvutamiseks ning veel paljudeks muudeks kõige erinevamateks otstarveteks.

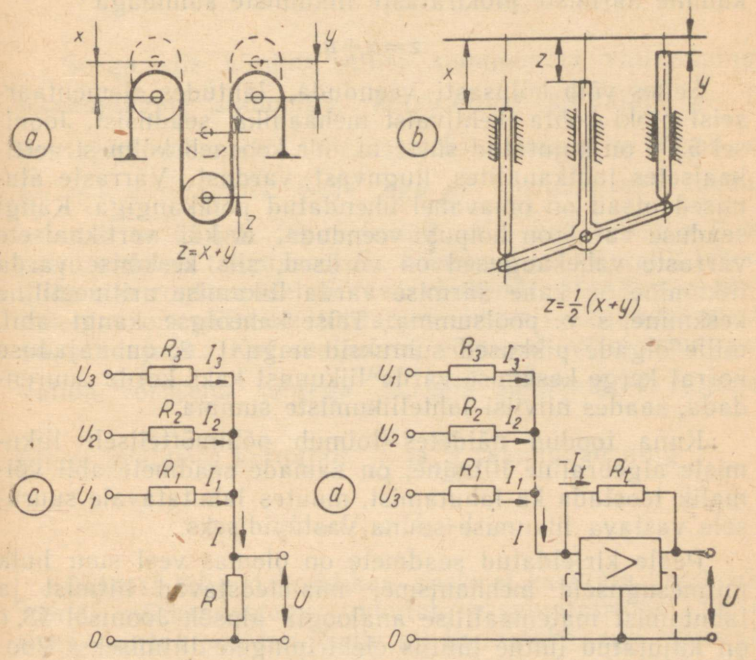
Matemaatilised analoogid võivad olla määratud kas algebra abil kirjeldatavate staatiliste protsesside või kõrgema matemaatika abil kirjeldatavate dünaamiliste protsesside uurimiseks. Sellele vastavalt eristatakse *staatilisi* ja *dünaamilisi* matemaatilisi analooge.

Dünaamiliste matemaatiliste analoogide kõige tänulikumaks rakendusalaks on mitmesuguste automaatse reguleerimise süsteemide uurimine ja projekteerimine. Neis süsteemides esinevaid keerulisi mittelineaarseid nähtusi on peaaegu võimatu tavaliste arvutuste abil ette näha, olgu siis ainult juhul, kui teostatakse väga suurel hulgal arvutusi, näiteks numbrilise arvutusmasina abil (vt. V peatükk).

12. Põhitehete teostamine matemaatiliste mudelite abil

Matemaatilisi analooge võib ehitada teatavasti mitmesuguste analoogiate alusel. Käesoleval ajal on üldiselt kasutusel *elektriline analoogia.* Elektripinged on hõlpsasti mõõdetavad, elektriahelate parameetreid saab lihtsalt muuta, protsessid nendes on väga kiiretoimelised ja nende teostamine suhteliselt odav, võrreldes näiteks täpsete peenmehaanikaseadmetega.

Ajalooliselt kõige vanemaks matemaatilise analoogi tüübiks on aga kahtlemata *mehaaniline matemaatiline analoog*. Esimesed mehaanilised matemaatilised analoogid ilmusid juba möödunud sajandil. Elektrilised ning



Joonis 53

a — plokkide süsteem summaatorina; *b* — kang summaatorina; *c* — lihtne lülitus elektripingete liitmiseks; *d* — võimendiga varustatud lülitus elektripingete liitmiseks

segatüüpi, s. o. *elektromehaanilised matemaatilised analoogid* võeti laiemalt kasutusele alles pärast Teist maailmasõda.

Liitmine ja lahutamine. Liitmine ja lahutamine on nii elektriliste kui ka mehaaniliste analoogide puhul üsna hõlpsasti teostatavad. Mehaaniline liitmine ja lahutamine toimub üldiselt mingisuguste arvutusmasina osade p i k k u s t e või p ö ö r d e n u r k a d e liitmise või lahutamise teel.

Joonisel 53, *a* on näiteks kujutatud süsteem, mis koosneb nöörist ning kolmest plokirattast. Nööri vabad otsad on kinnitatud paigalseisvale alusele. Äärmiste plokirataste x ja y tõstmisel võrdub keskmise plokiratta z liikumine äärmiste plokirataste liikumiste summaga

$$z=x+y.$$

Selles võib hõlpsasti veenduda, lähtudes elementaarseist ploki kohta kehtivaist mehaanika seadusist. Joonisel 53, *b* on kujutatud süsteem, mis koosneb kolmest vertikaalsetes juhtkanalites liuguvast vardast. Varraste alumised otsad on omavahel ühendatud põikkangiga. Kangi seaduse varal on hõlpus veenduda, et kui vertikaalsete varraste vahekaugused on võrdsed, siis keskmise varda liikumine on kahe äärmise varda liikumise aritmeetiline keskmine, s. o. poolsumma. Teise kaheõlgse kangi abil, mille õlgade pikkused suhtuksid nagu 1 : 2, on vajaduse korral kerge keskmise varda liikumist kaks korda suurendada, saades niiviisi lähteliikumiste summa.

Kuna toodud näidetes toimub põhimõtteliselt liikumiste algebraline liitmine, on samade seadmete abil võimalik teostada ka lahutamist, muutes lahutatavale suurusele vastava liikumise suuna vastupidiseks.

Peale kirjeldatud seadmete on olemas veel suur hulk mitmesuguseid mehhanisme, mis teostavad liitmist ja lahutamist matemaatilise analoogia alusel. Joonisel 53, *c* on kujutatud lihtne lülitus elektripingete liitmiseks. Voolud lülituse üksikutes vooluringides on määratavad järgmiste ligikaudsete valemitega:

$$I_1 \approx \frac{U_1}{R_1}; \quad I_2 \approx \frac{U_2}{R_2}; \quad I_3 \approx \frac{U_3}{R_3}.$$

Toodud valemid on ligikaudu õiged sel juhul, kui takistus R on nii väike, et teda võib mitte arvesse võtta. Summaarne vool I, mis läbib takistit R, on väljendatav järgmiselt:

$$I=I_1+I_2+I_3=\frac{U_1}{R_1}+\frac{U_2}{R_2}+\frac{U_3}{R_3}.$$

Teisest küljest, pinge takistusel R

$$U=IR=\left(\frac{U_1}{R_1}+\frac{U_2}{R_2}+\frac{U_3}{R_3}\right)\cdot R.$$

Kui valida takistused R_1, R_2 ja R_3 võrdsed, nii et $R_1 = R_2 = R_3 = R_s$, siis summaatori väljundpinge U avaldub järgmiselt:

$$U = (U_1 + U_2 + U_3) \frac{R}{R_s}.$$

Seega siis võrdub sellise summaatori väljundpinge sisendpingete summaga, korrutatuna kordajaga $\frac{R}{R_s}$. Et kordajast vabaneda, selleks tuleks valida R ja R_s nii, et $\frac{R}{R_s} = 1$, s. o. $R = R_s$. Seda aga ei või teha, sest toodud arvutus on küllalt täpne ainult siis, kui takistus R on palju väiksem takistusest R_s. Küsimust on võimalik lahendada elektronlampidel töötava võimendi rakendamise teel. Mõeldav on võimendi lülitamine lihtsalt väljundpinge U võimendajana. Kui sealjuures võimendi võimendustegur valida võrdsena suhtega $\frac{R_s}{R}$, siis summaatori väljundpinge avaldises kordajad $\frac{R}{R_s}$ ja $\frac{R_s}{R}$ taanduvad ning

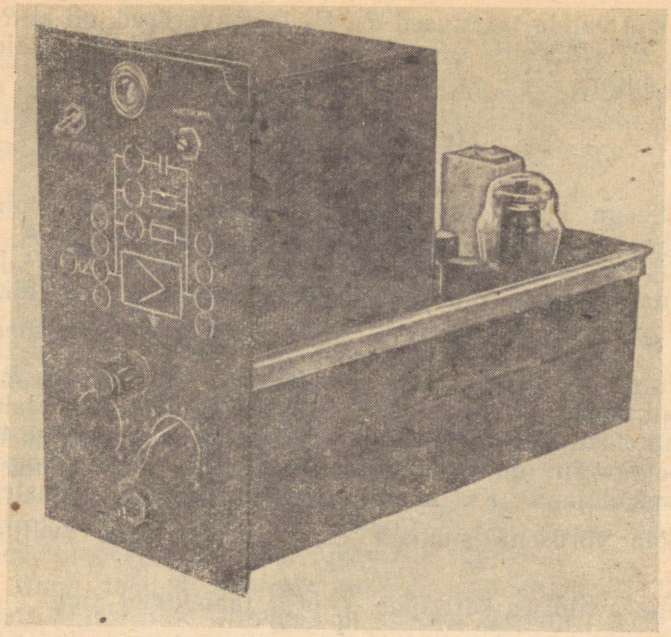
$$U = U_1 + U_2 + U_3.$$

Säärast lülitust praktikas siiski ei kasutata, sest võimendi võimendustegur muutub ekspluatatsiooni vältel üsna suurtes piirides. Selle all kannataks aga summaatori täpsus. Praktikas kasutatakse lülitust, mis on kujutatud joonisel 53, *d*. Siin leiab rakendamist väga suure võimendusteguriga (umbes 40 000) alalisvooluvõimendi, nn. *operatsioonvõimendi*. Lülituses esineb tagasiside, mis on teostatud takisti R_t abil.

Võimendi suure võimendusteguri tõttu moodustub väga täpne jälgivsüsteem. Süsteem reguleerib summaatori väljundpinget U niiviisi, et vool I_t tagasisideahelas võrduks sisendvooluga

$$I = I_1 + I_2 + I_3,$$

kuid oleks vastasmärgiline. Seega voolude summa $I + I_t$, mis kujutab endast võimendi sisendisse sattuvat viga, on praktiliselt nulli lähedal ning $I \approx -I_t$. Et vool



Joonis 54

Operatsioonvõimendi. Nagu selgub seadme esiküljel asuvast lülitusskeemist, võib võimendi tagasisideahela ühendada kas takisti või kondensaatori kaudu. Esimesel juhul on tulemuseks proportsionaalse, teisel juhul integreeriva lüli mudel

võimendi sisendis on praktiliselt null, võib seal mõjuvat pinget samuti lugeda nulliks. Sel juhul summaatori väljundpinge

$$U = -IR_t = -\left(\frac{U_1}{R_1} + \frac{U_2}{R_2} + \frac{U_3}{R_3}\right)R_t .$$

Siin ei ole takistite R_1, R_2, R_3 ja R_t suuruste valik millegagi eriti piiratud. Seetõttu on võimalik saavutada olukorda, kus summaatori väljundpinge U on võrdne sisendpingete U_1, U_2 ja U_3 summaga, kui valida $R_1 = R_2 = R_3 = R_t$. Nagu valemist selgub, muutub väljundpinge märk sealjuures siiski vastassuunaliseks, võrreldes sisendpin-

gete märkidega. Vajaduse korral on ometi võrdlemisi hõlpus märki õigeks muuta. Seda võib teha näiteks teise samalaadse summaatori abil, mis lülitatakse ühe oma sisendi kaudu antud summaatori väljundisse. Teine summaator töötab sellisel juhul lihtsalt märgi muutjana, sest tema teistesse sisenditesse mingeid signaale ei saabu.

Toodud näites oli tegemist kolme sisendsuuruse summeerimisega. Analoogilise lülituse abil on loomulikult võimalik liita ka kahte, nelja või enamat suurust. Selleks peab vaid sisendite arv olema piisav. Tavalistes mudelites ei ole tarvidust rohkem kui 6—7 suuruse üheaegseks liitmiseks.

Et vaadeldud summeerivates matemaatilistes mudelites toimub suuruste liitmine algebraliselt, s. o. sisendsignaali märk või mõjusuund on olulise tähtsusega, siis on kõik kirjeldatavad seadmed kasutatavad mitte üksi liitmiseks, vaid ka lahutamiseks. Sisendsuuruse lahutamiseks tuleb tema märk muuta vastupidiseks. Elektrilistes süsteemides võib seda teostada märki muutva ehk *inverteeriva* võimendi abil, millest oli juttu eespool. Mehaanilistes süsteemides võib liikumise märgi muutmiseks kasutamist leida näiteks võrdõlgne kang.

Korrutamine ja jagamine. Korrutamise ning jagamise sõlmed valmistavad matemaatiliste analoogide konstruktoreile üldiselt suuremaid raskusi kui liitmise ja lahutamise sõlmed. Mehaanilistest korrutamise ja jagamise seadmetest, mis töötavad matemaatilise analoogia alusel, on kahtlemata kõige tuntum ja levinum tavaline arvutuslükati ehk logaritmiline joonlaud. Arvutuslükati idee põhineb asjaolul, et kahe arvu korrutamiseks tuleb nende logaritmid omavahel liita, arvude jagamiseks aga tuleb jagaja logaritm jagatava logaritmist lahutada. Suuruste liitmine ja lahutamine on aga mehaanilistes süsteemides hõlpsasti teostatav. Seda võib teostada näiteks pikkuste liitmise või lahutamise teel. Arvutuslükati puhul nii just toimitaksegi.

Universaalsete matemaatiliste analoogide ehitamiseks ei ole aga arvutuslükati printsiip otseselt rakendatav, sest mudeli üksikute osade omavaheliseks sidumiseks peavad nende väljundsuurused olema esitatud mingi mehaanilise liikumisena, et seda võiks mudeli teistele osadele edasi anda. Arvutuslükati väljundsuurus esineb aga teatavasti abstraktse lugemi näol, mida on

peaaegu võimatu masina muude osadega siduda. Seepärast kasutataksegi universaalsete matemaatiliste analoogide ehitamisel pisut teist laadi mehaanilisi korrutamise ja jagamise seadmeid.

Üks võimalikest lahendustest on kujutatud joonisel 55, *a*. Seade kujutab endast hõõrd- ehk friktsioonajamit, mis koosneb vedavast kettast *1* ja vedava ketta vastu surutud veetavast kettast *2*. Veetava ketta pöördumine vedava ketta pöördumise toimel on võrdeline vedava ketta pöördenurga suurusega ja ketaste puutepunkti *H* kaugusega veetava ketta teljest *l*.

Kui veetava ketta raadius *r* on võrdne ühe pikkusühikuga, siis ongi kehtiv valem $\beta = l\alpha$, kus β on veetava ketta pöördenurk, mis on tekkinud vedava ketta pöördumisel nurga α võrra.

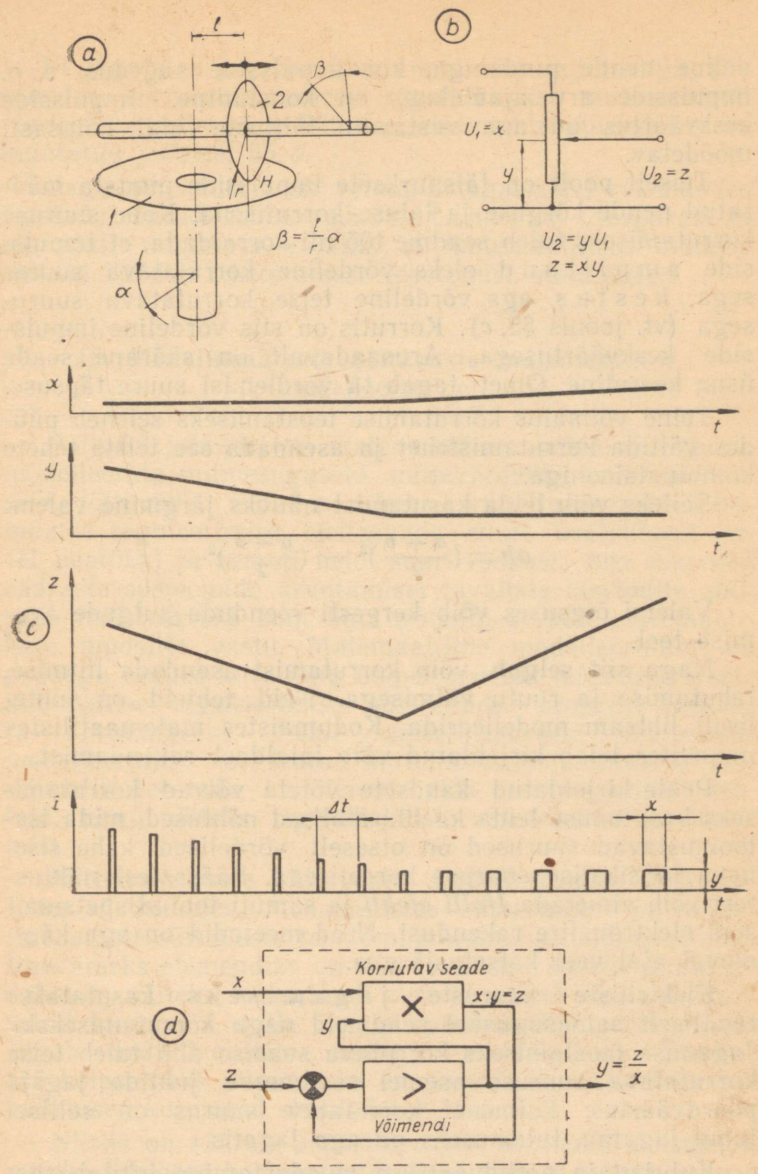
Suhteliselt hõlpsasti on korrutamine teostatav mehaanilis-elektriliste, segatüüpi sõlmede abil. Joonisel 55, *b* on kujutatud liugkontaktiga varustatud elektritakisti — potentsiomeeter. Potentsiomeetri liugkontaktil tekkiv pinge on ühelt poolt võrdeline potentsiomeetrile rakendatava kogupinge väärtusega $U_1 = x$, teiselt poolt aga võrdeline liugkontakti kaugusega y potentsiomeetri alumisest punktist. Järelikult väljundpinge $U_2 = z$ on avaldatav valemiga

$$U_2 = yU_1.$$

Pingeid U_1 ja U_2 on võimalik mõõta voltmeetri abil, potentsiomeetri liugkontakti asendi võib aga määrata vastava osuti ning skaala abil. Sel viisil võib näiteks ehitada lihtsa matemaatilise mudeli kahe suuruse korrutamiseks elektromehaanilise analoogia alusel. Vajaduse korral võib ka teise korrutatava suuruse esitada elektripinge kujul, kui muuta viimane jälgivsüsteemi abil võrdeliseks mehaaniliseks liikumiseks.

P u h t e l e k t r i l i s t e lülituste puhul on kahe elektrilise suuruse (pinge või voolu) korrutamise seadme konstrueerimine üks raskemaid probleeme matemaatiliste analoogide projekteerimisel. Võimalikke lahendeid on siin väga palju, ent nad kõik on kas liiga keerukad, ebatäpsed või aeglase toimega.

Üks paremaid meetodeid kahe elektrilise suuruse korrutamiseks põhineb asjaolul, et täisnurkse kujuga impulssidena esineva voolu või pinge k e s k v ä ä r t u s on võr-



Joonis 55

a — friktsioonajam korrutusseadmena; *b* — potentsiomeeter elektromehaanilise korrutusseadmena; *c* — korrutamine impulsside amplituudi ja kestuse mõjutamise teel; *d* — korrutusseadme kasutamine jagamiseks

deline nende pindalaga, kui impulsside sagedus, s. o. impulsside arv ajaühikus, on konstantne. Impulsside keskväärtus on aga vastavate lülituste abil hõlpsasti mõõdetav.

Teiselt poolt on täisnurksete impulsside pindala määratud nende kõrguse ja laiuse korrutisena. Kahe suuruse korrutamiseks tuleb seadme töö nii korraldada, et impulsside amplituud oleks võrdeline korrutatava suurusega, kestus aga võrdeline teise korrutatava suurusega (vt. joonis 55, *c*). Korrutis on siis võrdeline impulsside keskväärtusega. Arusaadavalt on säärane seade üsna keeruline. Ometi tagab ta võrdlemisi suure täpsuse.

Teine võimalus korrutamise teostamiseks seisneb püüdes vältida korrutamistehet ja asendada see teiste tehete kombinatsiooniga.

Selleks võib leida kasutamist näiteks järgmine valem:

$$ab = (\frac{a+b}{2})^2 - (\frac{a-b}{2})^2.$$

Valemi õigsuses võib kergesti veenduda sulgude avamise teel.

Nagu siit selgub, võib korrutamist asendada liitmise, lahutamise ja ruutu võtmisega. Neid tehteid on suhteliselt lihtsam modelleerida. Kodumaistes matemaatilistes mudelites leiab kirjeldatud võte laialdast rakendamist.

Peale kirjeldatud kaudsete võtete võivad korrutamiseks kasutamist leida ka füüsikalised nähtused, mida iseloomustavad suurused on otseselt võrdelised kahe siseneva füüsikalise suuruse korrutisega. Säärastest nähtustest võib nimetada *Halli efekti* ja samuti teatud spetsiaalseid elektronkiire rakendusi. Need meetodid on aga käesoleval ajal veel katsetusjärgus.

Elektriliste suuruste jagamiseks kasutatakse tavaliselt samasuguseid seadmeid nagu korrutamisekski. Jagamise teostamiseks korrutava seadise abil tuleb teise korrutatava suuruse asemel seadmesse juhtida jagaja pöördväärtus. Esimene korrutatav suurus on sellisel juhul jagatav, tulemuseks on aga jagatis.

Kui jagaja pöördväärtuse moodustamine tekitab raskusi, võib kasutada jagamiseks erilist jälgivsüsteemi, mis reguleerib üht korrutatavatest suurustest y nii, et korrutava seadise väljund võrduks jagatavaga z. Teise korrutatava suurusena x viiakse seadisesse jagaja.

Et jagaja ja jagatise korrutis võrdub jagatavaga, siis esimene korrutatav suurus reguleeritakse automaatselt võrdseks jagatisega *y*. Säärase seadme struktuurskeem on kujutatud joonisel 55, *d*.

Nagu siit nähtub, on võimalik tagasisidet rakendades teostada antud tehete p ö ö r d t e h t e i d. Seepärast ei ole alati tingimata vajalik, et matemaatilises mudelis oleksid kõikide tehete otsese teostamise võimalused.

13. Mittelineaarsete sõltuvuste matemaatiline modelleerimine

Paljudel juhtudel on matemaatilise mudeli abil tarvis modelleerida mitmesuguseid mittevõrdelisi, mittelineaarseid sõltuvusi. Pidades silmas mittelineaarsete automaatse reguleerimise süsteemide suurt osatähtsust (vt. III peatükk) ja samuti neid suuri raskusi, mis esinevad sääraste süsteemide arvutamisel tavaliste meetodite abil, saab mõistetavaks suur huvi mittelineaarsete matemaatiliste mudelite vastu. Matemaatiline modelleerimine on peaaegu ainuke kiire ning hõlpus meetod mittelineaarsete automaatse reguleerimise süsteemide projekteerimiseks ja arvutamiseks. Peale mittelineaarsete süsteemide modelleerimise on teatud mittelineaarsete sõlmede abil võimalik teostada ka tervet rida matemaatilisi tehteid, nagu näiteks logaritmimist, astendamist ja juurimist.

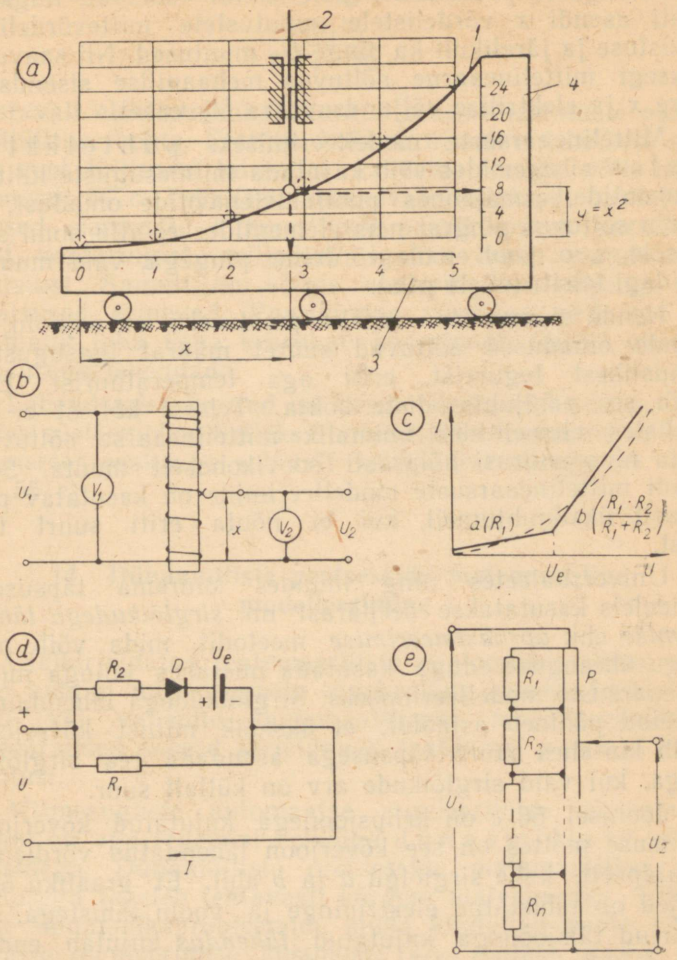
Mittelineaarsete sõltuvuste modelleerimine mehaanilistes süsteemides. Mehaanilistes süsteemides on mittelineaarsete sõltuvuste teostamine suhteliselt lihtne. Mittelineaarseks elemendiks on siin tavaliselt sobiva profiiliga šabloon, näiteks terasplaadi serv. Joonisel 56, *a* on kujutatud šabloon *1*, mille ülemist, profileeritud serva mööda liigub varda *2* alumine, rulliga varustatud ots. Seadme töö hõlpsamaks jälgimiseks on sisend- ja väljundsuuruse väärtused kujutatud skaaladel *3* ja *4*.

Niisiis on säärase mittelineaarse elemendi sisendsuuruseks šablooni horisontaalne liikumine ja väljundsuuruseks varda vertikaalne liikumine. Vastavad liikumised võivad loomulikult olla seotud mudeli muude elementide liikumisega. Kui liigutada šablooni *1* horisontaalsihis, saab valida mingi arvu horisontaalskaalal. Antud juhul

on profiili kuju nii valitud, et rulli asend vertikaalse skaala suhtes kujutab endast valitud arvu ruutu.

Kui kasutada vastava kujuga šabloone, on samal viisil võimalik juurida, logaritmida ja samuti modelleerida mistahes muud mittelineaarset sõltuvust. Säärase mudeli täpsus ei ole eriti suur. Täpsuse suurendamiseks tuleb suurendada mudeli vastavate osade töötlemistäpsust. Suure töötlemistäpsuse tagamine on aga küllaltki kulukas, sest valmistuskulud kasvavad tunduvalt kiiremini kui saavutatav täpsus. Peale selle on täpsuse suurendamine tehnika antud arenguetapil mitmesuguste muude asjaoludega piiratud (mõõtmistäpsus, parameetrite muutumine aja jooksul). Mehaaniliste mittelineaarsete elementide ja üldse mehaaniliste matemaatiliste analoogide teiseks puuduseks on väike töökiirus, mis on tingitud üksikosade inertsist. Suur inerts muudab dünaamiliste protsesside modelleerimise kas hoopis võimatuks või siis ollakse sunnitud kasutama aeglustatud aja mõõtkava, s. o. «venitama» modelleerivat protsessi ajas teatud arv kordi pikemaks, säilitades sealjuures protsessi kulgemise laadi. Säärane võte pikendab aga lahendamiseks kuluvat aega, mis sageli ei ole vastuvõetav. Peale selle ei võimalda mittenaturaalses (muudetud) aja mõõtkavas töötamine matemaatilise mudeli vahetut ühendamist uuritava seadmega. Mehaanilise mudeli puuduseks on veel ta osade kiire kulumine. Neil põhjustel kasutatakse mehaanilisi süsteeme universaalsete matemaatiliste analoogide ehitamisel väga harva. Küll aga leiavad mehaanilised süsteemid oma lihtsuse tõttu laialdast rakendamist mitmesuguste spetsiaalsete ülesannete lahendamisel.

Mittelineaarsuste elektriline ja elektromehaaniline modelleerimine. Elektromehaanilistes süsteemides kasutatakse mittelineaarsete nähtuste modelleerimiseks tavaliselt *mittelineaarseid potentsiomeetreid.* Mittelineaarse potentsiomeetri takistuskeha võib olla mitmesuguse ehitusega. Mõnikord keritakse takistustraat alusele muutuva sammuga, nagu on kujutatud joonisel 56, *b*. Teistes konstruktsioonides kujundatakse potentsiomeetri takistuskeha alus nii, et ühtlase sammuga keritud takistustraadist mähise puhul takistuskeha läbimõõt ja vastavalt siis ka ühe traadikeeru takistus oleks takistuskeha ulatuses muutuv vastavalt modelleeritavale mittelineaarsusele.



Joonis 56

a — mittelineaarsuse modelleerimine mehaanilises süsteemis šablooni abil; *b* — mittelineaarsuse modelleerimine elektromehaanilises süsteemis vastava potentsiomeetri abil; *c* — mittelineaarsuse modelleerimine sirglõikudega lähendamise teel; *d* — lülitusskeem mittelineaarsuse modelleerimiseks sirglõikudega lähendamise teel elektrilises süsteemis; *e* — lülitusskeem mittelineaarsuse modelleerimiseks sirglõikudega lähendamise teel elektromehaanilises süsteemis sektsioneeritud potentsiomeetri abil

Niisuguste potentsiomeetrite puhul vastavad liugkontakti asendi x võrdelistele muutustele mittevõrdelised takistuse ja järelikult ka pinge U_2 muutused. Nii saavutataksegi mittelineaarne sõltuvus mehaanilise sisendsuuruse x ja elektrilise väljundsuuruse U_2 vahel.

Mittelineaarsuste modelleerimiseks puhtelektrilistes süsteemides võib kasutada mitmesuguste lülituselementide, esmajoones pooljuhtelementide omadust, et voolu sõltuvus pingest neis elementides ei allu oomi seadusele, s. o. vool ei ole võrdeline pingega, vaid muutub kuidagi teisiti (vt. II ptk.).

Nende elementide ühiseks puuduseks on asjaolu, et nende omadused sõltuvad suurel määral igasugustest juhuslikest tegureist, eriti aga temperatuurist. Eriti käib see pooljuhtseadiste kohta. Teisest küljest ei ole sellistes elementides võimalik mittelineaarse sõltuvuse kuju ning suurusi hõlpsasti soovikohaselt muuta. Seda laadi mittelineaarsuste modelleerimine on kasutatav peamiselt üksikjuhtumeil, kui ei nõuta eriti suurt täpsust.

Universaalsetes ning muudes suurema täpsusega mudeleis kasutatakse seepärast nn. *sirglõikudega lähendamise* ehk *aproksimeerimise* meetodit, mida võib peaaegu ühesuguse eduga kasutada mistahes kujuga mittelineaarsuste modelleerimiseks. Sirglõikudega lähendamise meetod põhineb asjaolul, et ükskõik millist kõverjoont võib kuitahes suure täpsusega asendada rea sirglõikudega, kui vaid sirglõikude arv on küllalt suur.

Joonisel 56, *c* on kriipsjoonega kujutatud kõverjoon. Lihtsuse mõttes on see kõverjoon lähendatud võrdlemisi ebatäpselt, kahe sirglõigu *a* ja *b* abil. Et graafiku 56, *c* teljed on tähistatud elektripinge ja -voolu tähistega, siis murtud täisjoonega kujutatud *lähendus* kujutab endast pinge sõltuvust voolust mingis elektrilülituses. Joonisel 56, *d* on toodud vastav lülitusskeem. Nõutava tunnusjoone saamiseks on siin paralleelselt lülitatud kaks vooluringi. Esimene neist koosneb takistist R_1, teises aga on järjestikku lülitud takisti R_2, diood D ning eelpingeallikas U_e. Sisendpinge U tõstmisel läbib vool algul ainult takistit R_1. Alles siis, kui pinge U ületab eelpinge U_e väärtuse, hakkab diood D voolu juhtima ning takistile R_1 lülitub paralleelselt lisaks takistus R_2. Vooluringi kogutakistus

muutub nüüd väiksemaks ning võrdub

$$\frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2},$$

vastavalt elektrotehnikast tuntud seosele takistuste paralleellülituse kohta. Seetõttu hakkab nimetatud hetkest alates vool lülituses kiiremini kasvama, nagu võib näha jooniselt 56, *c*. Tavaliselt koosnevad sedalaadi mittelineaarsed elemendid kümnest või paarikümnest paralleelsest vooluringist, milledest igaüks omab muudetavat takistust. Samuti on kõigis vooluringides eelpinge U_e väärtused erinevad. Paarikümne sirglõigu abil aga on võimalik juba üsna keerukat kõverjoont täiesti piisava täpsusega lähendada.

Lähendamise meetod on kasutatav ka elektromehaanilistes süsteemides. Selleks šunteeritakse lineaarne potentsiomeeter osakaupa sobivalt valitud takistitega (vt. joonis 55, *e*).

14. Dünaamiliste protsesside matemaatiline modelleerimine

Ülalkirjeldatud matemaatiliste analoogide sõlmed olid ette nähtud mitmesuguste algebraliste seoste, funktsioonide või valemite matemaatiliseks modelleerimiseks. Algebralised seosed kirjeldavad teatavasti staatilisi nähtusi.

Mitmesuguste automaatse reguleerimise süsteemide puhul on aga tegemist eelkõige dünaamiliste protsessidega. Dünaamiliste protsesside matemaatilise kirjeldusega tegeleb teatavasti kõrgem matemaatika. Tüüpiliste dünaamikaprobleemide hulka kuuluvad peale automaatse reguleerimise küsimuste veel näiteks mürsu või raketi liikumine, laeva kõikumine lainetel, auto kõikumine vedrudel, kella balanssiiri liikumine jne. — ühesõnaga kõik protsessid, kus meid huvitab mitte ainult keha asend, vaid ka tema kiirus ja kiirendus. Elektrilistes süsteemides loetakse dünaamilisteks neid protsesse, kus rolli ei mängi mitte ainult pingete ja voolude suurused, vaid ka nende kestus ning muutumine ajas. Oomtakistitest koosnev elektrilülitus on puhtstaatiline lülitus, sest ta ei sisalda elektrilist «inertsi» omavaid elemente,

mille reageerimine sõltuks pinge või voolu kestusest või muutumise kiirusest. Kõik mahtuvusi või induktiivsusi sisaldavad lülitused aga kuuluvad juba dünaamiliste süsteemide hulka.

Laialdaselt kasutusel olevad universaalsed elektronmudelid ongi ette nähtud peaasjalikult dünaamiliste protsesside modelleerimiseks. Kõige enam kasutatakse selleks elektronmudeleid, kuna elektromehaanilised ning mehaanilised mudelid leiavad harva kasutamist.

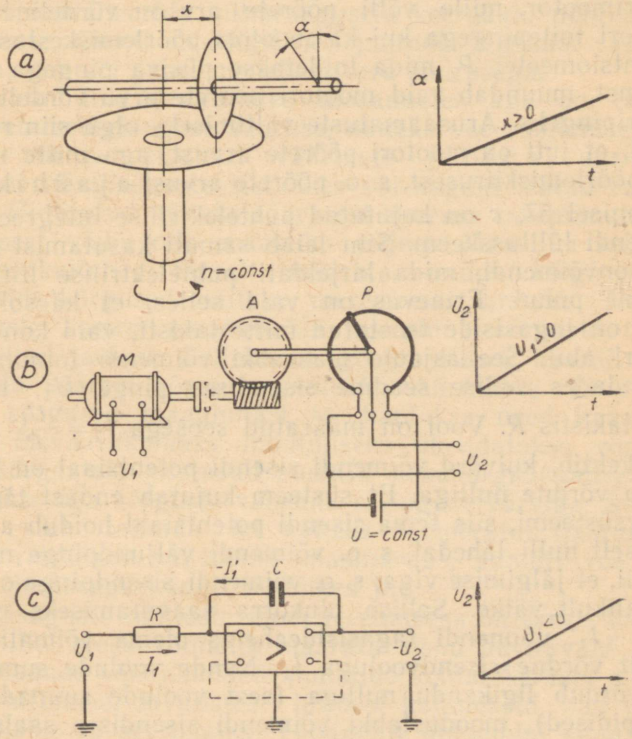
Nagu selgus eelmises peatükis, on automaatse reguleerimise süsteeme ning üldse igasuguseid dünaamilisi süsteeme võimalik jaotada üksikuteks tüüplülideks. See asjaolu võimaldabki väga mitmesuguseid keerukaid dünaamilisi süsteeme modelleerida ühe ja sellesama universaalse mudeli abil. Universaalne mudel peab vaid sisaldama piisaval hulgal ja piisavates proportsioonides üksikuid tüüplülisid modelleerivaid elemente. Ühendades need elemendid omavahel vastavalt modelleeritava süsteemi struktuurskeemile ning seades üksikute elementide muudetavad parameetrid vastavusse modelleeritava süsteemi vastavate parameetritega, saamegi meid huvitava süsteemi mudeli.

Universaalse matemaatilise analoogi ehitust on võimalik veelgi lihtsustada. Nagu selgus III peatükis, on integreerivat lüli tagasiside abil võrdlemisi hõlpsasti võimalik muuta inertseks lüliks. Inertse lüli alusel on omakorda võimalik teostada diferentseerivat lüli. Selleks tuleb inertne lüli lülitada proportsionaalse lüli tagasisideahelasse. Ka võnkuv lüli on koostatav inertsete ja diferentseerivate lülide alusel. Niisiis selgub, et mudelis ei ole tingimata vajalik kõigi tüüplülide olemasolu. Tavaliselt sisaldavad mudelid ainult kaht tüüpi lülisid, nimelt integreerivaid ning proportsionaalseid lülisid, peale selle muidugi ka seadmeid aritmeetika põhitehete sooritamiseks ning enamasti ka vahendeid mittelineaarsuste modelleerimiseks. Dünaamilise matemaatilise analoogi põhiliseks dünaamiliseks lüliks on niisiis integreeriv lüli.

Integreeriva lüli matemaatilist mudelit on võrdlemisi hõlpsasti võimalik teostada nii mehaanilistes, elektrilistes kui ka segatüüpi süsteemides.

Joonisel 57, *a* on kujutatud integreeriv lüli, mida kasutatakse mehaanilist tüüpi matemaatilistes analoogides.

Konstruktsioonilt ei erine säärane lüli eespool kirjeldatud korrutavast seadisest, mis on kujutatud joonisel 55, *a*. Erinevus on vaid töölerakendamise viisis. Säärase friktsioonajami rakendamisel integraatorina antakse nimelt vedava ketta võllile ühtlane pöörlev liikumine $n = \text{const}$. Sisendsuuruseks on sellisel juhul veetava ketta kaugus vedava ketta teljest x. Ajami ülekandetegur on teatavasti võrdeline selle kaugusega. Kui $x=0$, s. o. veetav ketas asub täpselt vedava ketta teljel, siis ülekandetegur on samuti null ja integraatori väljundsuurus, milleks on veetava võlli pöördenurk α, ei muutu. Kui kaugus x on



Joonis 57

a — friktsioonajam integraatorina; *b* — elektromehaanilise integraatori põhimõtteskeem; *c* — operatsioonvõimendil põhineva puhtelektrilise integraatori lülitusskeem

nullist erinev, hakkab α ühtlaselt kasvama või kahanema, sõltuvalt x-i märgist. Pöörlemise kiirus, s. o. pöördenurga α muutumise kiirus, on seejuures võrdeline kaugusega x. Järelikult seade toimib täpselt nii, nagu peab toimima integreeriv lüli.

Elektromehaanilises süsteemis on integraator samuti üsna lihtsalt teostatav. Nagu selgub jooniselt 57, *b*, käitatakse elektromehaanilises integraatoris lineaarne potentsiomeeter P elektrimootori M abil. Mootor on potentsiomeetriga ühendatud suure ülekandeteguriga ajami A abil nii, et potentsiomeetri üks täispööre vastab hulgale mootori pööretele. Integreeriva lülina toimib siin tegelikult elektrimootor, mille võlli pöörete arv on võrdeline nii mootori toitepingega kui ka mootori pöörlemiskestusega. Potentsiomeeter P, mida toidetakse püsiva pingega $U=$ = const, muundab vaid mootori pöörete arvu võrdeliseks elektripingeks. Arusaamatuste vältimiseks olgu siin rõhutatud, et jutt on mootori pöörete arvust, aga mitte mootori pöörlemiskiirusest, s. o. pöörete arvust a j a ü h i k u s.

Joonisel 57, *c* on kujutatud puhtelektrilise integreeriva elemendi lülitusskeem. Siin leiab samuti kasutamist operatsioonvõimendi, mida kirjeldati puhtelektrilise liitmisseadme puhul. Erinevus on vaid selles, et käesoleval juhul on tagasiside teostatud mitte takisti, vaid kondensaatori abil. See asjaolu määrabki võimendi toimimise. Rakendades sellise seadme sisendisse pinge U_1, tekib vool takistis R. Vool on määratud seosega $I_1 = \frac{U_1}{R}$. See seos kehtib, kuivõrd võimendi sisendi potentsiaal on ligikaudu võrdne nulliga. Et süsteem kujutab endast täpset jälgivsüsteemi, siis tema sisendi potentsiaal hoidub automaatselt nulli lähedal, s. o. võimendi väljundpinge muutub nii, et jälgimise viga, s. o. võimendi sisendpinge oleks võimalikult väike. Sellise olukorra saavutamiseks peab vool $-I_1'$ võimendi tagasisideahelas olema võimalikult täpselt võrdne sisendvooluga I_1. Nende voolude summa, mis võrdub ligikaudu nulliga (sest voolude suunad on vastupidised), moodustabki võimendi sisendisse saabuva signaali.

Püsiva voolu tagamiseks kondensaatoris tuleb temale rakendatud pinget vahetpidamata ühtlase kiirusega suurendada. Siit tulenebki, et vaadeldud seadme väljundpinge tõuseb või langeb ühtlase kiirusega, sõltuvalt

sisendpinge väärtusest ja märgist. Säärane toimimine aga ongi integreeriva elemendi iseloomulikuks omaduseks. Nagu selgub eelkirjeldatust, etendab siin integreeriva elemendi osa tegelikult kondensaator. Võimendi on vajalik vaid selleks, et tagada kondensaatori laadimist vooluga, mis oleks võrdeline sisendpingega ning ei sõltuks olulisel määral muudest suurustest.

15. Ruumiliste protsesside matemaatiline modelleerimine

Käsitletud matemaatiliste mudelite elemendid võimaldavad modelleerida mitmesuguseid keerukaid nähtusi ja protsesse. Ometi on kõigil neil juhtudel tegemist väikese hulga, ühe või paari modelleeritava suurusega.

Teatud liiki praktilistes ülesannetes aga on tarvis määrata mingisuguse suuruse, näiteks vee voolamise kiiruste või temperatuuri väärtuste jaotust uuritava seadme mingisuguses ristlõikes või koguni teatud ruumalas. Üldtuntud näiteks säärasest suuruse tasapinnalisest jaotusest võiks olla maastiku reljeef. Maastiku reljeefi võime kuitahes täpselt määrata, andes kõigi tema punktide kõrgused näiteks merepinnast arvates. Nende kõrguste kogum moodustabki maapinna kõrguste tasapinnalise jaotuse. Selleks et geograafilisel kaardil fikseerida säärast kõrguste jaotust, määratakse rea punktide kõrgused maapinnast ja kantakse need kaardile. Pildi ülevaatlikumaks muutmiseks ühendatakse võrdsetele kõrgustele vastavad punktid *samakõrgusjoontega* ja kaetakse iga kõrguste vahemik erisuguse värviga. Samal viisil võib toimida ka näiteks temperatuurijaotusega kolde ristlõikes või mõnes masinaosas, samuti vee kiiruste jaotusega kanali ristlõikes jne.

Niisuguste nähtuste modelleerimiseks on tarvis mudelit, millel oleks võimalik määrata meid huvitavaid suurusi sadade või tuhandete punktide kohta. Selliste mudelite ehitamisel tavalistest lülidest kujuneksid nad väga kogukaiks ja keerukaiks. Tunduvalt lihtsamini suudavad seda ülesannet täita nn. ruumilise võrega mudelid. Mudeli võre võib olla kahedimensiooniline, s. o. tasapinnaline, aga ka kolme- või isegi enamadimensiooniline. Nii et säärane mudel võimaldab modelleerida isegi kujutletavat mitmemõõtmelist ruumi. Modelleeriv võre koos-

tatakse enamasti takistitest. Dünaamiliste ülesannete lahendamisel võivad võre üksikutes sõlmedes esineda ka induktiivsed või mahtuvuslikud elemendid. Samuti on mõeldav mittelineaarsete elementide lülitamine võre sõlmedesse.

Konstruktsioonilt on säärased mudelid väga lihtsad ning töökindlad, kuigi takisteist võre ise võib mõningail juhtudel, kui nõutakse suurt lahenduse täpsust ja järelikult «tihedat», suure elementide arvuga võret, kujuneda küllaltki kalliks ja kogukaks.

Matemaatilises mõttes erinevad kirjeldatud mudelid tavalistest selle poolest, et võimaldavad lahendada *osatuletistega diferentsiaalvõrrandeid.* Säärased võrrandid on aga vajalikud paljude automatiseeritavate tööstuslike protsesside kirjeldamisel.

16. Matemaatiliste mudelite tüübid ning ehitus

Üldisi andmeid. Viimase aastakümne jooksul on hakatud laialdaselt kasutama elektronlülituste baasil töötavaid dünaamilisi matemaatilisi mudeleid.

Tüüpiline seda liiki mudel koosneb mitmekümnest või isegi mitmesajast operatsioonivõimendist. Operatsioonvõimendi võimendustegur on üldreeglina väga kõrge — 10^4 kuni 10^6. Suure võimendusteguri tõttu on operatsioonvõimendid tundlikud mitmesuguste häirivate signaalide suhtes. Suurimaid raskusi valmistab operatsioonvõimendi nullpunkti nihkumine ehk nn. *triiv.* Nullpunkti nihkumise vähendamiseks toidetakse operatsioonvõimendeid stabiliseeritud vooluallikatest ning kasutatakse mitmesuguseid kunstlikke võtteid nullpunkti stabiilsuse suurendamiseks. Igal juhul on vajalik kas käsitsi või automaatselt teostatav perioodiline või pidev nullpunkti väärtuse k o n t r o l l.

Ühtedel operatsioonvõimendeil on tagasiside teostatud takisti abil — neid operatsioonvõimendeid kasutatakse summeerivate ja märki ning mastaapi muutvate, s. o. püsiva suurusega korrutavate lülidena. Säärane operatsioonvõimendi kujutab endast muudetava ülekande- või võimendusteguriga proportsionaalset lüli.

Teisel osal operatsioonvõimendeist on tagasiside teostatud kondensaatori abil. Säärased operatsioonvõimendid toimivad integreerivate lülidena.

Peale kaht liiki operatsioonvõimendite kuuluvad universaalse mudeli komplekti veel spetsiaalsed seadmed korrutamise, jagamise ja mitmesuguste mittelineaarsete sõltuvuste modelleerimiseks.

Mudel peab sisaldama eriseadmeid ülesande algtingimuste, s. o. modelleeritava protsessi lähteolukorra määramiseks, mõõteriistu ja katoodostsillograafi ülesannete lahenduste lugemiseks, mõõtmiseks ning kujutamiseks, stabiliseeritud toitepinge allikaid jms.

Mudel on konstrueeritud tavaliselt nii, et stendidele paigutatud üksikuid lülisid oleks hõlpsasti võimalik vastavate ühendusjuhtmete ja pistikupesade abil omavahel soovitud viisil ühendada. Samuti sisaldab iga lüli muudetavaid takisteid, mille abil saab iga ülesande lahendamiseks valida säärased lülide ülekandetegurid, et oleks tagatud mudeli ja modelleeritava objekti vastavus kas mõõtkavas 1 : 1 või mõnes muus proportsioonis.

Sageli valitakse mitmesuguste mudeli osade jaoks erinevad mõõtkavad. See on tarvilik selleks, et kõik mudeli osad võiksid töötada võimalikult suurte signaalide juures, sest siis on mitmesuguste häirivate signaalide mõju väiksem. Teisest küljest tuleb tagada, et lahenduse käigus ühegi operatsioonvõimendi väljundpinge ei ületaks teatavat, maksimaalselt lubatud väärtust. Tavaliselt on sääraseks piiriks 100 volti.

Arvestades kõiki neid asjaolusid selgub, et kõige aegaviitvam operatsioon mitmesuguste ülesannete lahendamisel on tavaliselt mudeli ettevalmistamine ning seadistamine ülesande lahendamiseks, s. o. õige modelleeriva lülituse valik, selle teostamine mudelil, mõõtkavade valik, üksikute lülide ülekandetegurite määramine ning seadistamine ja kontroll kõigi nende teostatavate toimingute üle.

Keerukamate ülesannete puhul võib lahenduse ettevalmistamine kesta nädalaid. Ühe ülesande lahendamine toimub aga võrratult kiiremini.

Käesoleval ajal toodetavate universaalsete elektronanaloogide puhul võib lahendusprotsess kesta sekundi murdosast kuni umbes 10 000 sekundini.

Hoolimata lahenduste ettevalmistamise suurest töömahust on sääraste mudelite efektiivsus väga suur, sest kord seadistatud modelleeriva lülituse olemasolul on hõlpus üksikute näitajate muutmisega saada kiiresti ter-

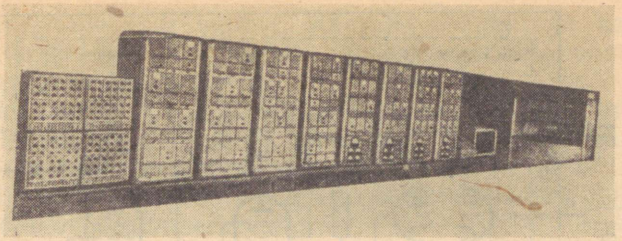
ved komplektid lahendusi mitmesuguste variantide ja variatsioonide kohta. Suur arv lahendite variatsioone aga loob konstruktorile tervikliku pildi sellest, kuidas üks või teine suurus mõjutab tulemusi, aitab konstruktoril või projekteerijal tajuda projekteeritava objekti omadusi mudeli varal. Seetõttu hõlbustub optimaalse lahenduse leidmine tunduvalt. Mõnikord toimub töö matemaatilise mudeliga ka nii, et konstruktor muudab meelevaldselt mitmesuguseid suurusi, jälgides pidevalt lahenduse käiku näiteks ostsillograafi ekraanil. Sellisel juhul tajub konstruktor juba peaaegu vahetult modelleeritava, ent reaalselt veel teostamata objekti käitumist. Paljudel juhtudel on mudeli abil isegi hõlpsam tajuda objekti olemust, sest reaalse objekti puhul on lähteandmete muutmine tunduvalt tülikam ning aegaviitvam, mõnedel juhtudel aga üldse võimatu.

Alles siis, kui säärase ligikaudse vaatluse käigus on leitud umbes sobivatena tunduvad lahendused, teostatakse lõplik variantide valik juba rangema arvuliste näitajate võrdlemise teel.

Levinumaid matemaatiliste analoogide tüüpe. Eeltoodud printsiipidel töötavaid, suure võimendusteguriga operatsioonvõimenditega varustatud dünaamilisi analooge toodetakse käesoleval ajal mitmetes maades seeriaviisiliselt ning suures valikus.

Üks kõige väiksemaid kodumaiseid mudeleid MH-M sisaldab kuusteist operatsioonvõimendit, neist kuus integreerivate elementide koosseisus, neli mittelineaarset blokki ja kuus dioodelementi kahest sirglõigust koosnevate mittelineaarsuste modelleerimiseks. Maksimaalne lahenduse aeg on kuni 200 sekundit, lahenduse viga ei ületa 1—2%. Mudeli gabariitmõõtmed on 70×40×32 cm, kaal 45 kg ning võimsusetarvitus 0,75 kilovatti. Suurim kodumaine matemaatiline analoog tüüp MH-8 sisaldab 304 operatsioonvõimendit, neist 32 integraatorit, 2310 elektronlampi, 8620 pooljuhtdioodi ning tarbib võimsust 35 kilovatti. Mudeli kaal on kuue tonni ümber, ta koosneb neljateistkümnest suurest paneelist ning vajab põrandapinda 60 m^2.

Üks levinum kodumaine matemaatiline analoog tüüp МПТ-9 sisaldab 48 operatsioonvõimendit, neist 16 integraatorit, 245 elektronlampi ning tarbib võimsust 4 kilovatti. Mudeli gabariitmõõtmed on 700×80×123 cm.



Joonis 58

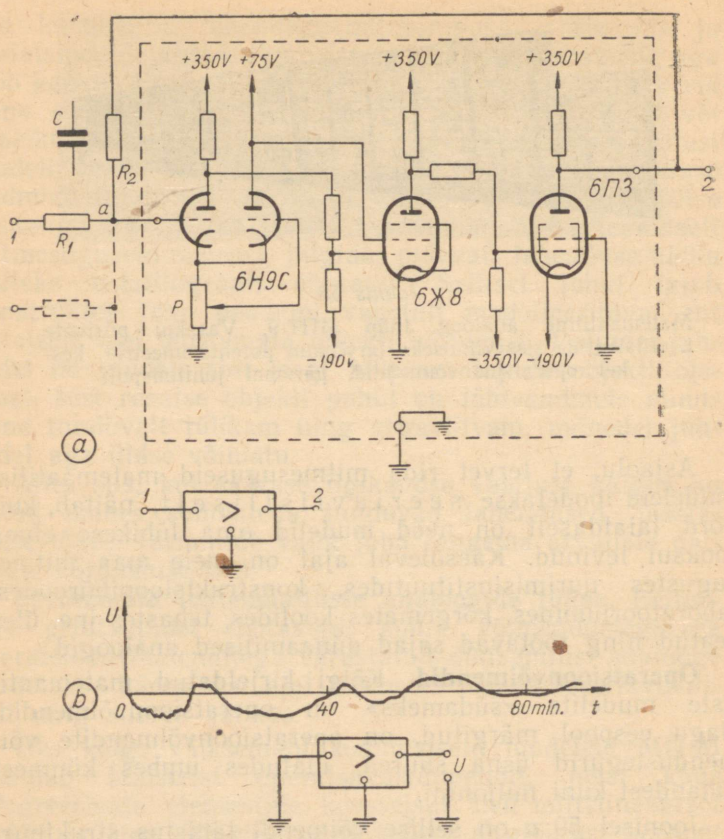
Matemaatiline analoog tüüp МПТ-9. Vasakul püsivate koefitsientide sisseviimiseks tarvilikud potentsiomeetrid, keskel operatsioonvõimendid, paremal juhtimispult

Asjaolu, et tervet rida mitmesuguseid matemaatilisi mudeleid toodetakse seeriaviisiliselt, näitab, kuivõrd laialdaselt on need mudelid oma lühikese eluea jooksul levinud. Käesoleval ajal on meie maa mitmesugustes uurimisinstituutides, konstruktsioonibüroodes, laboratooriumides, kõrgemates koolides, tehastes jne. üles seatud ning töötavad sajad dünaamilised analoogid.

Operatsioonvõimendid. Kõigi kirjeldatud matemaatiliste mudelite «südameks» on operatsioonvõimendid. Nagu eespool märgitud, on operatsioonvõimendite võimendustegurid üsna suured, ulatudes umbes kümnest tuhandest kuni miljonini.

Joonisel 59, *a* on sellise võimendi tähistus struktuurskeemides ning proportsionaalset lüli imiteeriva operatsioonvõimendi lihtsustatud põhimõtteskeem. Lüli ülekandetegurit muudetakse takistite R_1 ja R_2 suhte muutmise teel. Takisti R_2 asendamisel kondensaatoriga saadakse integreeriva lüli mudel. Kui lülitada punkti *a* mitu sisendtakistust R_1, võib sama võimendit kasutada sisendsuuruste summeerimiseks, kusjuures iga sisendsuurus juhitakse vastava sisendtakistuse klemmile. Kuna punkti *a* potentsiaal on lähedane nullile, toimub summeerimine peaaegu veatult (vt. § 12).

Nagu jooniselt selgub, on operatsioonvõimendi kolmeastmeline. Esimene aste toimib pingevõimendina kaksiktrioodi 6H9C baasil, kusjuures üks trioodidest on rakendatud tegeliku võimendina, teine aga teostab nn. *katood-*



Joonis 59

a — operatsioonvõimendi lülitusskeem ja tingmärk; *b* — triivpinge graafik ja lülitus selle määramiseks

kompensatsiooni. Viimane on vajalik võimendi parameetrite muutumisest tingitud nullpunkti nihkumise vähendamiseks. Võimendi teine aste pentoodi 6Ж8 baasil võimendab samuti pinget, kolmas aste aga võimsust jugatetroodi 6П3 baasil.

Et võimendi üldine võimendustegur võrdub teatavasti üksikute astmete võimendustegurite k o r r u t i s e g a, siis operatsioonvõimendi üksikute astmete võimendus-

tegurid ei ole eriti suured. Käesoleval juhul on kolme astme koguvõimendus 40 000, üksikute astmete võimendus aga keskmiselt 30—40.

Takistite R_1 ja R_2 väärtused valitakse tavaliselt nii, et lüli ülekandetegurit saaks astmeliselt muuta. Ülekandetegur omandab seejuures väärtused kas 0,01; 0,1; 1; 10 või 100. Säärane ülekandetegurite detsimaaljaotus hõlbustab mõõtkavade ümberarvutamist.

Nagu juba eespool mainitud, on suur võimendustegur operatsioonvõimendite puhul tarvilik selleks, et tagada jälgivsüsteemi režiimis töötava lüli küllaldast täpsust. Nagu teada, ei saa mudel iialgi anda absoluutselt täpset vastust. Vastuses esineb alati teatud v i g a. Teostades mudeli abil näiteks tehet 2×2, saame vastuseks l i g i k a u d u 4. Püüdes vastust täpsemalt määrata, saame enamasti midagi taolist nagu 3,976 või 4,011, sõltuvalt mudelis esinevast juhuslikust veast. Matemaatilise analoogi vea suurus on tavaliselt ette teada ning vastuses võetakse arvesse ainult need kümnendkohad, mille õigsuses võib kindel olla.

Universaalsete dünaamiliste analoogide puhul võtab ühe ülesande lahendamisest sageli osa mitukümmend või isegi enam lüli. Üldine viga aga ei tohi tavaliselt ületada 10—20 protsenti, sageli on aga nõuded veelgi rangemad.

Süsteemi üksikute lülide vead tavaliselt liituvad. Seega siis ei tohi üksiku lüli viga ületada kümnendikku või isegi sajandikku protsenti kasulikust signaalist. Tavaliste raadiodetailide, s. o. elektronlampide, takistite, kondensaatorite jne. suurused erinevad sageli üle 10% detailile märgitud või kataloogis esinevatest *nimisuurustest*. Et niisugustest ebatäpsetest elementidest saaks ehitada suure täpsusega võimendit, on tegelikult ainukeseks reaalseks võimaluseks jälgivsüsteemi printsiibi kasutamine. Sellisel juhul peavad olema suure täpsusega valmistatud ainult takistid R_1 ja R_2, mis otseselt teostavad väljundning sisendsignaalide võrdlemist. Muude võimendi detailide tunnussuuruste muutumine mõjutab lahendi viga üsna vähesel määral.

Teisest küljest toob suur võimendusteguri väärtus enesega kaasa mitmesuguseid tehnilisi ja ekspluatatsioonilisi raskusi. Kõige suuremaks ebameeldivuseks on triiv — võimendi nullpunkti nihkumine. Viimane toimub

niivõrd kiiresti, et praktiliselt on tarvis iga lahenduse eel võimendeid uuesti häälestada, s. o. võimendite nullpunkti asendit reguleerida. Seda tehakse tavaliselt potentsiomeetri *P* abil (joonis 59, *a*). Tüüpiline nullpunkti nihkumise ajaline käik on toodud joonisel 59, *b*. Nullpunkti nihkumine on siin väljendatud võimendi väljundpinge kaudu, juhul kui sisendpinge on null. Nagu jooniselt selgub, on triivi suuna ning suuruse muutumine täiesti juhuslik, korrapäratu.

Pideva käsitsi järelehäälestamise vältimiseks on viimasel ajal kasutusele võetud nn. nullpunkti automaatne häälestamine. Selleks ettenähtud seade kujutab endast täiendavat võimendit, mille oluliseks koostisosaks on vibreerivate kontaktidega relee ehk *vibraator*. Vibraatori abil muundatakse võimendisse saabunud signaal vahelduvpingeliseks, võimendatakse seda vahelduvvoolu-elektronvõimendiga ning alaldatakse siis uuesti sama vibraatori abil. Et vahelduvvooluvõimendites triiv praktiliselt puudub, siis tagab säärase võimendi kasutamine nullpunkti püsivuse. Teisest küljest on sedalaadi võimendil väga suur inerts, mistõttu ta reageerib ainult suhteliselt aeglaselt muutuvatele signaalidele, nagu seda on triivi poolt põhjustatud häiriv signaal. Tavalise operatsioonvõimendi ning kirjeldatud alalis-vahelduv-alalisvooluvõimendi kombinatsioon aga rahuldab nõudmised nii triivi puudumise kui ka kiirete signaalimuutuste edasiandmise, s. o. laia sagedusriba osas.

Sääraste kombineeritud võimenditega on varustatud mudelid МПТ-9, МН-8 ja paljud teised viimasel ajal konstrueeritud mudelid.

Staatilised mudelid. Ülalkirjeldatud võrdlemisi keerukate, kogukate ning kallite universaalsete dünaamiliste elektronmudelite kõrval on võrdlemisi laialdaselt levinud spetsialiseeritud staatilised mudelid teatud kindlate, massiliselt esinevate ülesandetüüpide lahendamiseks, kus dünaamilisi probleeme ei esine. Seega siis on staatiline mudel kasutatav väga mitmesuguste algebraliste ülesannete lahendamiseks. Kuna algebraliste ülesannete mitmekesisus on üldiselt palju suurem kui diferentsiaalvõrrandite oma, on staatilisi mudeleid otstarbekas ehitada nimelt spetsialiseeritutena. Spetsialiseeritud mudel on enamasti tunduvalt lihtsam kui universaalne.

Väiksema ulatusega ülesannete lahendamisel on sageli

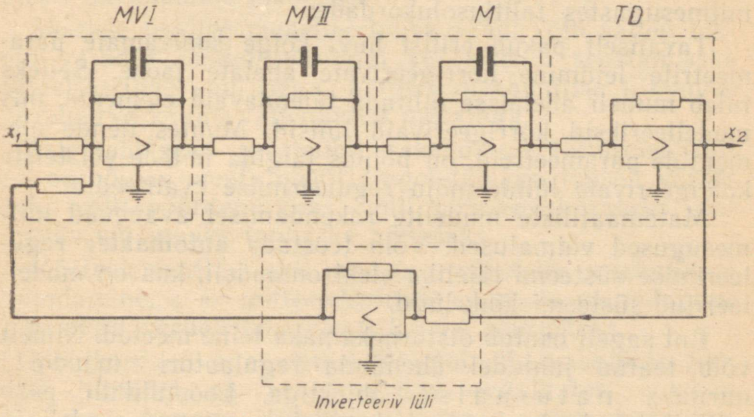
võimalik kasutada staatilisi mudeleid, kus võimendus-elemendid, nagu elektronlambid vms. hoopis puuduvad. Säärane mudel koosneb vooluallikaist, muudetavaist takisteist, ümberlüliteist ning elektrimõõteriistast või -mõõteriistadest.

Spetsialiseeritud staatilisi matemaatilisi mudeleid on kasutatud näiteks lõikerežiimide arvutamiseks treimistööde juures, koormusjaotuse arvutamiseks energiasüsteemides, diagnooside määramiseks haigustunnuste alusel ja paljudel muudel juhtumitel. Staatilise mudeli rakendamise eeltingimuseks on vaid see, et modelleeritavat protsessi saaks algebraliste seoste abil kirjeldada.

17. Matemaatiliste mudelite kasutamine

Dünaamilise mudeli kasutamise näitena on joonisel 60 kujutatud mudeli struktuurskeem automaatse reguleerimise süsteemi modelleerimiseks. Mudel vastab elektrimootori kiiruse automaatse reguleerimise süsteemile, mida kirjeldati eelmises peatükis (vt. joonis 45). Mudel on koostatud operatsioonvõimendite baasil.

Modelleeritav süsteem koosneb siin kolmest inertsest lülist ning ühest proportsionaalsest lülist. Inertseteks lüli-



Joonis 60

Lülitusskeem joonisel 45 kujutatud automaatse reguleerimise süsteemi modelleerimiseks

deks on magnetvõimendid MV_1 ja MV_2 ning reguleeritav objekt — elektrimootor M. Tahhodünamo D modelleeritakse proportsionaalse lülina.

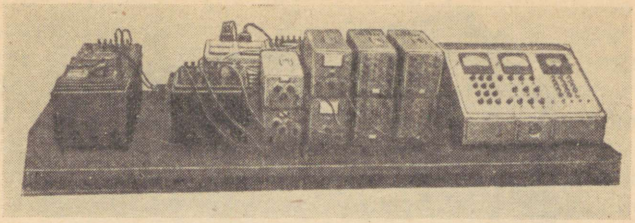
Nagu selgub jooniselt, on inertsete lülide mudelid moodustatud integraatoritest, milledest igaühes on loodud täiendav tagasiside kondensaatorile paralleelselt ühendatud takistite näol. Tagasiside- ja sisendahelate parameetrid on kõikides mudeli osades valitud sobiva mõõtkava alusel, lähtudes modelleeritava süsteemi andmetest. Et kogu reguleeriv süsteem peab moodustama suletud negatiivse tagasisideahela, osutub tarvilikuks lisada ahelasse veel üks operatsioonvõimendi, mille ülekandetegur võrdub ühega. Selle võimendi ülesandeks on *inverteerimine,* s. o. märgi muutmine. Et iga võimendi muudab üks kord signaali märki, siis neljast võimendist koosnevas ahelas on võimalik ainult positiivne tagasiside. Negatiivse tagasiside tekitamiseks peab võimendite arv olema paaritu.

Taolise mudeli abil saab uurida jälgivsüsteemi käitumist mitmesuguste etteandesuuruse x_1 muutumiste puhul, kui juhtida mudeli sisendisse vastaval viisil muutuv pinge. Pinge mudeli väljundis kujutab mootori M pöörlemiskiirust. Seda pinget võib jälgida kas osutiga mõõteriista, isekirjutava mõõteriista või siis ostsillograafi abil, mis annab ettekujutuse mootori M kiiruse muutumisest mitmesugustes talitlusolukordades.

Tavaliselt pakub erilist huvi kõige sobivamate parameetrite leidmine korrigeerivate ahelate jaoks. Selleks tuleb mudeli ahelaisse lülitada täiendavaid elemente, mis modelleeriksid korrigeerivaid lülisid. Muutes nende elementide parameetreid, on hõlpus jälgida ühtede või teiste korrigeerivate lülide mõju reguleerimise kvaliteedile.

Matemaatiliste mudelite rakendamisel avanevad mitmesugused võimalused. Võib teostada automaatse reguleerimise süsteemi täieliku elektronmudeli, kus on modelleeritud süsteemi kõik lülid.

Ent sageli osutub otstarbekamaks teine meetod. Nimelt võib teatud juhtudel ühendada regulaatori m u d e l i uuritava n a t u r a a l s e objektiga. Loomulikult peab sellisel juhul olema tagatud esiteks vastavus mudeli ja naturaalse süsteemi sisend- ja väljundsuuruste mõõtkavades, teiseks peab aga mudeli a j a mõõtkava tingimata naturaalne olema. Viimane nõue ei ole teatavasti



Joonis 61

Üksikutest blokkidest koosnev portatiivne matemaatiline analoog lahendamiseks ettevalmistatult. Vasakul ostsillograaf lahendi üleskirjutamiseks, keskel operatsioonvõimendid, paremal juhtimispult, taga stabiliseeritud toitepinge allikas

obligatoorne objekti tervikliku modelleerimise puhul. Üldiselt ei valmista mudeli juures tarviliku aja mõõtkava valimine raskusi.

Säärase osakaupa modelleerimise puhul on oluliseks paremuseks see, et jääb ära küllaltki tülikas ning suuremahuline töö naturaalse süsteemi modelleerimiseks. Pealegi ei vasta mudel iialgi nii täpselt uuritavale objektile kui objekt ise. Ka selles mõttes on eelistatav naturaalse objekti ühendamine mudeliga.

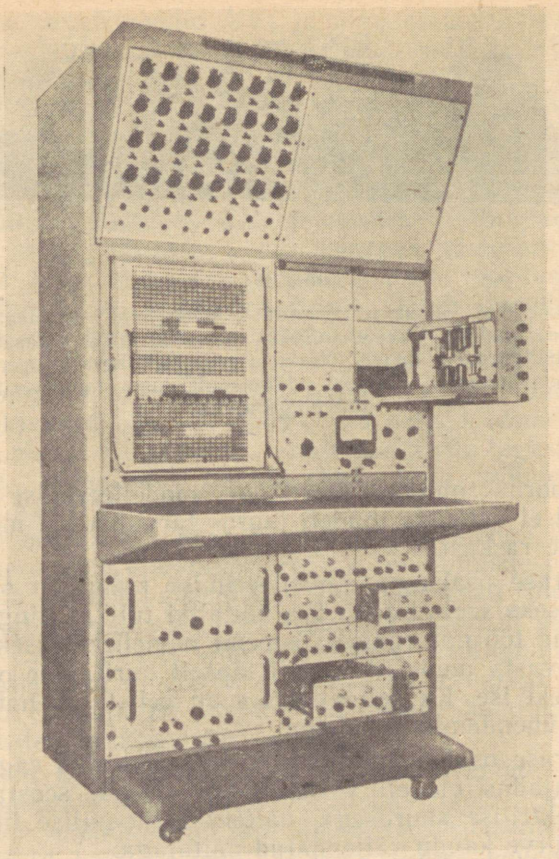
Säärase osalise modelleerimise puhul võib sageli tekkida vajadus mudeli väljundi või sisendi seostamiseks mitteelektrilise suurusega, näiteks mehaanilise liikumise või õlisurve kaudu väljendatud näitajaga.

Jälgivsüsteemi printsiibil rakendatud täiturelemendi abil on hõlpus muuta elektripinget temaga täpselt võrdeliseks võlli pöördenurgaks, võlli pöörlemiskiiruseks, õlisurveks või muuks taoliseks näitajaks.

Mõõteelementide abil on aga võimalik vastupidine muundamine, s. o. mitteelektriliste suuruste muundamine viimastega võrdelisteks elektrilisteks suurusteks.

Mõnikord on aga otstarbekas toimida vastupidi. Sellistel juhtudel on projekteeritav regulaator naturaalne, temaga ühenduses olevad süsteemid aga modelleeritakse.

Praktikas esineb sageli juhtumeid, kus on vaja valmis regulaatoreid kontrollida, täiendada, muuta või paran-



Joonis 62
Kompaktse ehitusega matemaatiline analoog

dada. Säärase regulaatori naturaalse süsteemiga seostamine on paljudel juhtudel tülikas, kulukas või isegi ohtlik. Kõrgahju, energiasüsteemi või lennukit ähvardab tõsine avarii, kui nendega seotud regulaatoritega mingeid eksperimente ette võtta. Niisuguste regulaatoritega ei ole talitlusolukorras peaaegu kunagi võimalik teha nende tööd suurel määral mõjutavaid katseid. Enamasti aga pakuvad eksperimentaatorile huvi just äärmuslikud,

kriitilised režiimid, kus regulaator töötab stabiilsuse piiril, sageli aga kaotab eksperimendi käigus hoopiski stabiilsuse. Teisest küljest, kiirete tööde puhul võib esineda vajadus projekteerida, konstrueerida ja valmistada regulaator koos korrigeerivate ahelatega enne, kui on valminud reguleeritav objekt ise.

Kõigil seda laadi juhtumitel on peaaegu möödapääsematu reguleeritava objekti matemaatiline modelleerimine, nii et see võiks töötada koos naturaalse regulaatoriga. Probleemid naturaalsete seadmete ja mudelite seostamisel on siin samad mis eelmiselgi juhul.

V PEATÜKK

NUMBRILISED ARVUTUSSEADMED

18. Üldisi andmeid

Matemaatilised mudelid ja numbrilised arvutusmasinad. Matemaatiliste mudelite arvutusviis erineb teatavasti põhiliselt inimeste poolt «käsitsi» arvutamisel kasutatavast arvutusviisist. Selleks et korrutada näiteks kaks arvu omavahel, korrutab arvutaja omavahel teatud viisil nende arvude üksikud koostisosad ning liidab siis saadud korrutised. Selliste arvutamiseeskirjade ehk *algoritmide* järgi arvutamisel võib teha mitmesuguseid tehteid, nagu liitmine, lahutamine, korrutamine, jagamine, astendamine, juurimine jne. Algoritmide rakendamisel taanduvad need tehted üsna lihtsatele tehetele ühekohaliste arvudega, mis on esitatavad suhteliselt väikese hõlpsasti meelespeetava tabelina, nagu seda on näiteks korrutustabel. Laiemalt võttes on ka igasugune algebraline avaldis algoritmiks tema numbrilise väärtuse leidmisel. Saadud vastuse täpsus ei sõltu sealjuures arvutamise viisist ega vahendeist, ei sõltu sellest, kas arvutaja arvutab arvelaua abil, lihtsalt pliiatsiga paberil, arvutuspulkade või muu taolise abil.

Vastuse täpsus sõltub ainuüksi sellest, mitmekohaliste arvudega arvutus teostatakse, seda muidugi eeldusel, et lähteandmed on antud küllaldase täpsusega. Hoopis teistsugune on olukord matemaatiliste mudelite puhul. Siin ei esine ülesande lahutamist elementaarseteks teheteks. Numbrite abil esitatud arvude asemel figureerivad siin pidevalt muudetavad füüsikalised suurused. Lahendus tekib vahetult füüsikalise protsessi käigus, sõltuvalt protsessi määravaist lähtesuurusist. Sellise lahenduse täpsus sõltub esmajoones sellest, kui suurel määral

on võimalik kõrvaldada mitmesuguste juhuslike, kontrollimatute tegurite mõju modelleerivatele füüsikalistele suurustele. Nende tegurite suurus sõltub peamiselt mudeli ehitusest ning tema üksikute elementide töötlemistäpsusest. Põhimõtteliselt võiks ka matemaatilised mudelid töötada piiramata täpsusega. Ometi on üldiselt teada asjaolu, et suure täpsusega töötavate tehniliste seadmete, täppisaparaatide, kronomeetrite jms. valmistamine on väga keerukas ning kulukas. See on kehtiv ka matemaatiliste mudelite kohta. Sääraste seadmete ekspluateerimine nõuab samuti väga ranget eeskirjadest kinnipidamist, et ettenähtud täpsust säilitada. Üldse on analoogide täpsuse suurendamine võimalik ainult teatud piirides. Täpsuse suurendamist piiravad kasutada olevate tööriistade ja mõõtevahendite täpsus, mitmesugused termilised ja muud klimaatilised mõjutused, seadmete osade kristall- ning isegi molekulaarstruktuur ja palju muid tegureid.

Lihtsaima matemaatilise mudeli, arvutuslükati poolt arvutamisel tekitatud viga ei ületa üht protsenti arvutustulemuse väärtusest. Et suurendada arvutatavate suuruste täpsust ainult ühe kümnendkoha võrra, s. o. tagada, et viga ei ületaks 0,1% arvutatavate suuruste väärtusest, tuleb ületada juba väga suuri raskusi. Endise töötlemistäpsuse puhul tuleks säärane arvutuslükati teha kümme korda pikem tavalisest, s. o. 25 cm asemel 2,5 meetri pikkune. Peale selle tuleks tarvitusele võtta erilised abinõud, et vältida vea tekkimist arvutuslükati osade paisumise ja kõverdumise mõjul. Arvutuslükati ehitamine aga, mis võimaldaks opereerida näiteks kümnekohaliste arvudega, on käesoleval ajal täiesti võimatu.

Numbriliste arvutuste mehhaniseerimisest ja automatiseerimisest. Paljudel juhtudel ei ole matemaatiliste analoogide kasutamine võimalik nende mitteküllaldase täpsuse tõttu. Peamiselt mitmesuguste finantsalaste arvutuste jaoks, kus ümardamine ning ligikaudsed tehted on hoopis lubamatud, on pikema aja jooksul leiutatud terve rida abinõusid arvutaja töö lihtsustamiseks. Järkjärgulise arengu käigus on neist välja arenenud täielikult automatiseeritud arvutusseadmed.

Arvutaja esimeseks abivahendiks oli tavaline arvelaud, mis leidis kasutamist juba antiikrahvaste juures. Säärase arvutusvahendi funktsiooniks on õieti ainult

arvude meelespidamine, kuna aritmeetilised tehted ning operatsioonide juhtimine teostatakse täielikult arvutaja enese poolt. Niisiis on arvelaud õigupoolest moodsate kiiresti toimivate mäluseadiste kauge eelkäija.

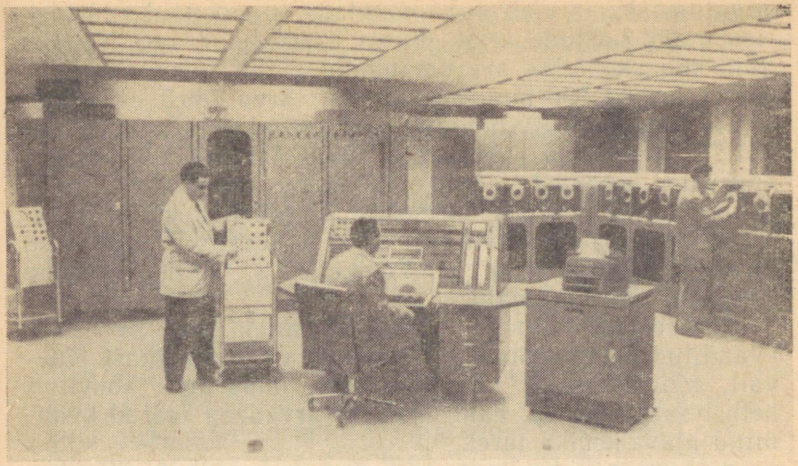
Edasiseks sammuks arvutaja töö hõlbustamisel pärast mälufunktsioonide teatavat mehhaniseerimist oli aritmeetiliste tehete teostamise mehhaniseerimine. 1694. aastal ehitas kuulus matemaatik ja filosoof Leibniz mehaanilise arvutusmasina, mis oma võimalustelt vastas umbes käesoleval ajal laialdaselt kasutatavatele *aritmomeetritele.*

Jäi üle veel programmjuhtimise printsiibi väljatöötamine, s. o. arvutusoperatsiooni juhtimise mehhaniseerimine ning järelikult kogu arvutusprotsessi automatiseerimine. Programmjuhtimisega mehaanilise arvutusmasina projekti töötas silmapaistva põhjalikkuse ning ettenägelikkusega juba üle saja aasta tagasi välja inglane Charles Babbage. Ehitada õnnestus tal sellest masinast ainult mõned osad. Hiljem see masin unustati.

Tema ideed realiseeriti täiel määral alles käesoleva sajandi neljakümnendatel aastatel, ent juba mitte mehaaniliste, vaid elektriliste ja elektromehaaniliste vahenditega. Esimene programmjuhtimisega elektronarvutusmasin ENIAC ehitati H. Aikeni juhtimisel 1944. aastal. Sellele masinale järgnesid üsna pea teised, sealhulgas väike elektronarvutusmasin MECM, mis valmis 1950. aastal Kiievis akadeemik A. S. Lebedevi juhtimisel, ja suur elektronarvutusmasin BECM, mis valmis sama teadlase juhtimisel 1953. aastal Moskvas.

Programmjuhtimisega elektronarvutusmasin tähendas suurt kvalitatiivset hüpet mitte ainult mitmesuguste finantsalaste ja teaduslike arvutuste teostamisel, vaid vaimse töö automatiseerimisel üldse. Tema kasutamise võimalused on osutunud väga laialdaseks.

Ometi vastab programmjuhtimisega elektronarvutusmasina tööviis küllalt lähedaselt tavalise kutselise arvutaja tööle. Oluline erinevus on vaid arvutamise kiiruses. Elektronarvutusmasin võib oma töö kiiruse ja tootlikkuse poolest asendada kümneid tuhandeid arvutajaid, võimaldades lahendada paljusid ülesandeid, mis varem käisid üle jõu lihtsalt oma suure töömahu tõttu. Sellega seoses pole huvituseta märkida, et maailma esimese elektron-



Joonis 63

Suure elektronarvutusmasina üldvaade. Keskel juhtimispult, taga kappides elektroonikaseadmed, paremal välised mäluseadmed, paremal ees trükkivseade

arvutusmasina ehitamise algtõukejõuks oli kavatsus kasutada seda masinat arvutusteks, mida ka miljon arvutajat ei suudaks küllalt kiiresti teostada — nimelt ballistilise raketi koordinaatide arvutamiseks raketi lennu ajal. Teiseks samalaadseks näiteks on ilmaennustamiseks vajalike meteoroloogiliste arvutuste tegemine. «Käsitsi» arvutamisel kuluks nädalaid, et arvutada tänaste andmete alusel homset ilma. Loomulikult ei oma säärased arvutused enam praktilist väärtust. Elektronarvutusmasina abil aga õnnestus näiteks ennustada tugevat tormi 12 tundi enne selle tekkimist.

Diskreetse toimega arvutusmasinad. Numbrilisi arvutusmasinaid nimetatakse erinevalt pideva toimimisega matemaatilistest masinatest — matemaatilistest analoogidest — ka *diskreetse* (*mittepideva*) *toimega matemaatilisteks masinateks*. Niisugune jaotus tuleneb arvude esitamise viisist masinas. Sellal kui matemaatilises analoogis muutub arvu kujutav elektripinge pidevalt, omandades mistahes etteantud väärtuse, siis diskreetse toimega

arvutusmasinas võib arv omandada ainult neid väärtusi, mis antud kohtade arvu juures võimalikud on. Näiteks võib kolmekohaline arv omandada ainult tuhat väärtust, alates arvust 000 kuni arvuni 999. Arvu 786,5 esitamine ei ole antud juhul võimalik, võib esitada vaid arve 786 või 787 kui antud väärtusele kõige lähemaid. Sääraste suuruste jagamist teatud «lubatud» väärtusteks ning nende vahel asuvaiks «keelatud» väärtusteks nimetatakse ka suuruste *kvantimiseks*, s. o. suurused jagatakse otsekui üksikuteks kvantumiteks, mille edasine jagamine pole võimalik.

Diskreetse toimega arvutusmasinais on ka aeg kvanditud selles mõttes, et lahend ei välju masinast pidevalt, näiteks pinge väärtuse näol, mida igal soovitud hetkel saaks mõõta, vaid üksikute arvudena teatud kvanditud ajavahemike järel.

Praktiliselt ei avalda lahendi väärtuste kvantimine masina töötulemustele olulist mõju, sest alati on võimalik ülesannet lahendada piisava kohtade arvuga, s. o. jagada suurused niisuguseks hulgaks «kvantideks», et nad praktiliselt vastavad pidevale suurusele.

Teine lugu on arvutusmasina töö kvantimisega ajas. Siin ei ole kvantide arvu suurendamine nii lihtne, sest selleks tuleb arvutusmasina töökiirust vastavalt tõsta. Olgugi et elektronarvutusmasina töökiirus on väga suur, osutub ta sageli siiski mittepiisavaks. Masina töökiiruse tõstmist aga takistab masina lülituselementides esinev elektriline inerts. Elektriline inerts väheneb koos masina detailide mõõtmete vähenemisega. Seepärast tehakse viimasel ajal ühelt poolt katseid elektronarvutusmasinate üksikute ehituselementide mõõtmeid oluliselt vähendada — miniimiseerida. Näiteks on kirjanduses juttu kavatsustest mahutada ühte kuuptolli 200 000 või isegi miljon (!) elektrilist elementi, s. o. takistit, kondensaatorit vms. Teiselt poolt tehakse katseid üle minna klassikalisest raadiotehnikast pärinevatelt elementidelt ja meetoditelt, mis on rakendatavad sadade meetritega mõõdetavate lainepikkuste piirkonnas, raadiolokatsiooni tehnikas kasutatavatele elementidele ja meetoditele, mis on ette nähtud töötamiseks detsimeeter- ja isegi sentimeeterlainete piirkonnas. Viimane tee on vist küll kõige efektiivsem, võimaldades tõsta töökiirust tuhandeid ja isegi kümneid tuhandeid kordi, sest üksikute diskreet-

sete lahendamise «sammude» sagedus tõuseb miljonitelt miljardite ja kümnete miljardite «sammudeni» sekundis.

19. Arvusüsteemidest ja koodidest

Oleme niivõrd harjunud igal sammul kasutatava kümnendsüsteemiga, et esimesel pilgul tundub täiesti arusaamatuna arvutamine mingi muu süsteemi abil. Ometi on arv kümme saanud meil kasutatava arvusüsteemi aluseks üsna kõrvalisel ning juhuslikul põhjusel. Ilmselt on see seotud inimese sõrmede arvuga.

Ometi võiks arvusüsteemi aluse ülesandeid edukalt täita mistahes muu mitte liiga suur arv. Palju sobivam oleks näiteks hõlpsa jagatavuse seisukohalt arv 12, mis on jagatav 2, 3, 4 ja 6-ga, kuna 10 on jagatav ainult 2 ja 5-ga. Käesoleval ajal on arvutamise alust siiski tülikas muuta, sest kümnendsüsteem on liiga juurdunud. Ometi ei ole kümnendsüsteem ainuvalitsev. Indiaani rahvusel *maia* oli näiteks kasutusel kombineeritud arvusüsteem, mille alusteks on 5 ja 20.

Tabel 2

Koht paremalt arvates	Number	Kordaja	Ümmargune arv
I	3	$10^0=1$	3
II	0	$10^1=10$	00
III	0	$10^2=100$	000
IV	2	$10^3=1000$	2 000
V	6	$10^4=10\,000$	60 000
VI	7	$10^5=100\,000$	700 000
VII	4	$10^6=1\,000\,000$	4 000 000
VIII	2	$10^7=10\,000\,000$	20 000 000
		Summa	24 762 003

Suuruste esitamine kümnendsüsteemis. Mingi suuruse esitamiseks kümnendsüsteemis väljendatakse ta teatavasti rea «ümmarguste» arvude summana. «Ümmargused» arvud kujutavad endist korrutisi, kus üheks teguriks on meid huvitavat arvu moodustavad üksikud numbrid, teiseks teguriks aga arvu 10 astmed, s. o. $10^0=1$, $10^1=10$, $10^2=100$ jne. Arv esitatakse nimetatud korrutiste summana. Kümnendsüsteemis esitatud arvu 24 762 003 koostisosad on toodud tabelis 2. Mida vasakpoolsem on number, seda suurem on tema kordaja, seda suurem on numbri «kaal». Kõige äärmine parempoolne number näitab «üheliste» arvu, järgmine «kümneliste» arvu ja nii edasi. Arvusüsteemi alus on niisiis arv, mis näitab, mitu korda on vasakpoolse numbri «kaal» suurem tema parempoolse naabri «kaalust».

Suuruste esitamine kahendsüsteemis. Nagu öeldud, võib arvutussüsteemi aluseks olla ükskõik milline arv.

Tabel 3

Koht paremalt arvates	Number	Kordaja	«Ümmargune» arv
I	1	$(2^0=)$ 1(1)	1(1)
II	0	$(2^1=)$ 10(2)	00(0)
III	1	$(2^2=)$ 100(4)	100(4)
IV	1	$(2^3=)$ 1 000(8)	1 000(8)
V	0	$(2^4=)$ 10 000(16)	00 000(00)
VI	1	$(2^5=)$ 100 000(32)	100 000(32)
VII	1	$(2^6=)$ 1 000 000(64)	1 000 000(64)
VIII	0	$(2^7=)$ 10 000 000(128)	00 000 000(000)
IX	1	$(2^8=)$ 100 000 000(256)	100 000 000(256)
		Summa	101 101 101(365)

Olgu selleks näiteks arv k a k s. Sellisel juhul toimub antud suuruse esitamine samuti eeltoodud põhimõttel. Erinevuseks on vaid see, et numbritest esinevad nüüd ainult 0 ja 1, täpselt samuti nagu kümnendsüsteemi puhul esinevad numbrid 0, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9. Iga numbri kordaja või «kaalu» määrab jällegi tema asend arvus. Kordajate suurused on aga nüüd määratud juba mitte kümne, vaid kahe astmetega, s. o. väärtustega $2^0=1$, $2^1=2$, $2^2=4$, $2^3=8$ jne. Öeldut illustreerib tabel 3, kus on toodud kahendsüsteemi arvu 101 101 101 (kümnendsüsteemis 365) liigestus. Selguse mõttes on kahendsüsteemis avaldatud suuruste kõrval sulgudes esitatud nende väärtused kümnendsüsteemis.

Loomulikult võib arvusüsteemi aluseks olla ka mistahes muu arv peale kümne ja kahe. Näiteks on ehitatud elektronarvutusmasinaid arvusüsteemis, mille aluseks on k o l m. Tavaliselt kasutatakse elektronarvutusmasinais siiski kahendsüsteemi, sest sellised masinad on tehniliselt lihtsamini teostatavad.

Arvutamine kahendsüsteemis. Kahendsüsteemis on arvutamine tunduvalt lihtsam kui kümnendsüsteemis. Et numbreid on ainult kaks, 1 ja 0, on ka korrutustabel elementaarne, koosnedes neljast elemendist:

×	0	1
0	0	0
1	0	1

Liitmistabel on samuti neljaelemendiline:

+	0	1
0	0	1
1	1	10

Tõepoolest, kahendsüsteemis $1+1=10$; arv kaks väljendatakse nagu kümme kümnendsüsteemis, sest number kaks puudub. Seepärast väljendub kaks juba kahekoha-

lise arvuna. Kahendsüsteemis väljendatud arvud on umbes 3—4 korda pikemad vastavaist kümnendarvudest.

Selleks et teostada kahendsüsteemis näiteks tehet $343 \cdot 98 = 33614$, tuleb korrutatavad suurused kõigepealt väljendada kahendsüsteemis. Seda on kõige hõlpsam teha sel teel, et jagatakse kümnendsüsteemis arvu kahega seni, kuni tulemus muutub nulliks. Jagatised tuleb arvutada ainult täisarvude ulatuses. Jagatiste jäägid alt ülespoole lugedes annavadki siis tulemuse kahendsüsteemis. Käesoleval juhul:

$$\begin{aligned}
343 : 2 &= 171 \ (1)\\
171 : 2 &= 85 \ (1)\\
85 : 2 &= 42 \ (1)\\
42 : 2 &= 21 \ (0)\\
21 : 2 &= 10 \ (1)\\
10 : 2 &= 5 \ (0)\\
5 : 2 &= 2 \ (1)\\
2 : 2 &= 1 \ (0)\\
1 : 2 &= 0 \ (1)
\end{aligned}$$

Järelikult arv 343 väljendub kahendsüsteemis nii: 101010111. Täpselt analoogilisel viisil võib kindlaks teha, et arvu 98 väljendus kahendsüsteemis on 1100010.

Arvude k o r r u t a m i n e kahendsüsteemis toimub täpselt sama korra kohaselt kui kümnendsüsteemi puhulgi. Ainukeseks erinevuseks on see, et ülekannete teostamisel tuleb arvestada asjaolu, et suuremaid numbreid kui 1 ei tohi kasutada. Arvu kasvades üle 1 tekib otsekohe ülekanne järgmisele kohale:

Niisiis

$$\begin{array}{r}
101010111 \cdot 1100010\\
\hline
000000000\\
101010111\\
000000000\\
000000000\\
000000000\\
101010111\\
101010111\\
\hline
1000001101001110
\end{array}$$

Et tulemust väljendada kümnendsüsteemis, on kõige hõlpsam kanda korrutis kahe astmete tabelisse (tabel 4)

ja liita omavahel kõik kahe astmete väärtused, mille kohale satub 1.

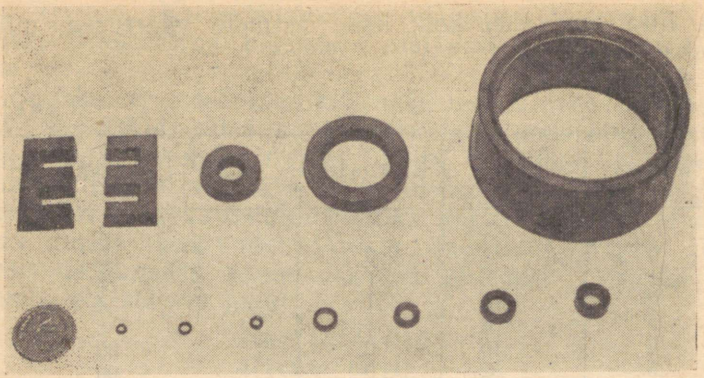
Tabel 4

Koht n	2^n	Kahendarv	Liidetavad
0	1	0	0
1	2	1	2
2	4	1	4
3	8	1	8
4	16	0	00
5	32	0	00
6	64	1	64
7	128	0	000
8	256	1	256
9	512	1	512
10	1 024	0	0 000
11	2 048	0	0 000
12	4 096	0	0 000
13	8 192	0	0 000
14	16 384	0	00 000
15	32 768	1	32 768
			Summa 33 614

Tulemuseks on 33 614, mis vastab vahetult kümnendsüsteemis saadud tulemusele.

Toodud näitest on selgesti näha, et kahendsüsteemis arvutamine on mõnevõrra igavam ning mehaanilisem kümnendsüsteemis arvutamisest: tehete arv on suurem, tehted ise aga tunduvalt lihtsamad ja ühetaolisemad. Seetõttu on kahendsüsteem eriti kohane masinarvutamiseks; masina lülitus lihtsustub märgatavalt. Töökiiruse vähenemine operatsioonide arvu suurenemise tõttu ei ole aga nii tunduv, sest üksikud elementaartehted on nende lihtsuse tõttu kahendsüsteemis kiiremini teostatavad.

Näitest selgub samuti, et kahendsüsteemis esitatud arvude ümberarvutamine kümnendsüsteemi ning vastupidi on küllaltki suuremahuline ning tülikas toiming. Pikkade arvutuste puhul pole viimasel asjaolul siiski otsustavat tähtsust. Nimelt tarvitseb ainult lähteandmed ümber arvutada kahendsüsteemi, tulemused aga kümnendsüsteemi. Kogu ülejäänud arvutuskäik teostatakse kahendsüsteemi arvude abil. Sellisel juhul on ümber-



Joonis 64

Ferriitsüdamikud. Esireas täisnurkse hüstereesisilmusega, taga pehme magnetilise karakteristikuga ferriitsüdamikud

arvutusteks kuluva töö maht suhteliselt väike, võrreldes põhilise arvutustöö mahuga.

Arvude säilitamine ja edasiandmine elektronarvutusmasinas. Kahendsüsteemi laialdasel kasutamisel elektronarvutusmasinais on arvutusprotsessi teatud lihtsustamise kõrval veel teine põhjus. Nimelt omab valdav enamik elektrilistest elementidest, mida kasutatakse arvutusmasinais, võimalust k a h e erineva seisundi säilitamiseks ja edasiandmiseks. Kuigi võib ehitada elektrilisi elemente ka kolme, nelja ja suurema arvu fikseeritud seisunditega, on kahe seisundiga elemendid ometi eelistatavad nende lihtsa konstruktsiooni ja suure töökindluse tõttu.

Elektromehaanilises arvutusmasinas on kaheks seisundiks elektromehaanilise relee kontaktide avatud ning suletud olek. Et elektromehaanilised releed töötavad aeglaselt, kuluvad aga võrdlemisi kiiresti, siis käesoleval ajal kasutatakse neid arvutusmasinais äärmiselt harva.

Viimasel ajal on võrdlemisi laialdaselt levinud erilisest ferromagnetilisest materjalist, *ferriidist* valmistatud väikesed, mõnemillimeetrise läbimõõduga magnetilised *rõngassüdamikud.* Need nn. *täisnurkse hüstereesisilmu-*

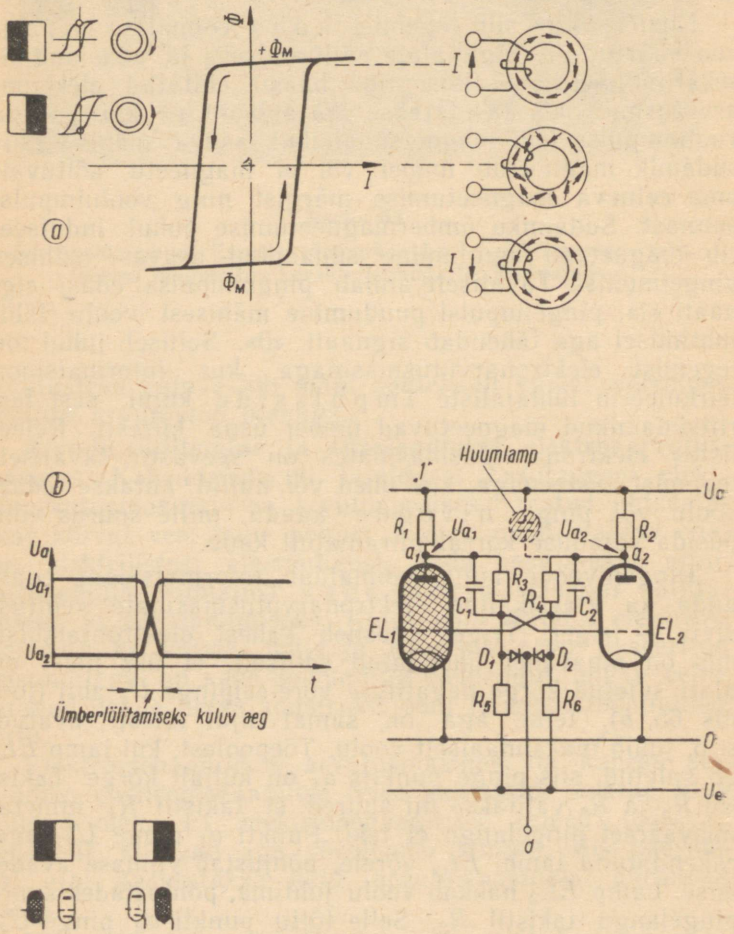
sega magnetsüdamikud vastavad oma magnetilistelt omadustelt ligikaudu suletud magnetahelaga püsivmagnetitele, säilitades oma magnetvoo väärtuse $+\Phi_M$ või $-\Phi_M$, olenevalt viimati toiminud magneetimisvoolu I suunast, piiramatuks ajaks (joonis 65, *a*). Küllalt tugeva sobiva suunaga magneetimisvoolu impulsi abil on aga südamikku võimalik ümber magneetida, näiteks asendist $+\Phi_M$ asendisse $-\Phi_M$.

Niisiis on ka siin tegemist k a h e võimaliku magnetvoo väärtusega. Signaalide säilitamiseks ja edasiandmiseks magnetiliste elementide baasil ehitatud elektronarvutusmasinais kasutatakse ära asjaolu, et kui juhtida vooluimpulss läbi magnetsüdamikul asuva mähise, siis südamik magneetub ümber või ei magneetu, sõltuvalt oma eelneva magneetumise märgist ning vooluimpulsi suunast. Südamiku ümbermagneetumise puhul indutseerib magnetvoo muutumine südamikul asuvas mähises pingeimpulsi. Tavaliselt annab pingeimpulss edasi signaali «1», pingeimpulsi puudumine mähisest voolu läbijuhtimisel aga tähendab signaali «0». Sellisel juhul on tegemist elektronarvutusmasinaga, kus informatsioon tsirkuleerib lühiajaliste i m p u l s s i d e kujul, sest ferriitsüdamikud magneetuvad ümber üsna kiiresti. Releelistes elektronarvutusmasinates on seevastu tavaliselt tegemist süsteemiga, kus ühed või nullid antakse edasi voolu või pinge n i v o o d e kaudu, mille suurus võib püsida vajaduse korral piiramatult kaua.

Pingenivoode kujul võimaldab informatsiooni edasi anda ka klassikaline elektronarvutusmasinate «ehituskivi» — triger. Triger koosneb kahest elektronlambist, mis on omavahel ühendatud selliselt, et üks neist on alati suletud kõrge negatiivse võre-eelpinge U_e abil (joonis 65, *b*), teine aga on samal ajal täiesti avatud, s. o. juhib maksimaalselt voolu. Tõepoolest, kui lamp EL_1 on suletud, siis pinge punktis a_1 on küllalt kõrge. Takistid R_3 ja R_5 valitakse nii suured, et takistil R_1 nimetamisväärset pingelangu ei teki. Punkti a_1 pinge U_{a1} aga, rakendatuna lambi EL_2 võrele, põhjustab viimase avanemise. Lamp EL_2 hakkab voolu juhtima, põhjustades suure pingelangu takistil R_2. Selle tõttu punkti a_2 pinge U_{a2} langeb üsna madalaks ning lambi EL_1 avanemine välditakse. Triger jääb stabiilselt kirjeldatud asendisse püsima, kuni mingi mõjutus, näiteks punkti *d* juhitud

negatiivne pingeimpulss ei sunni teda oma asendit muutma. Ümberlülitamiseks kuluv aeg ei ületa seejuures tavaliselt mikrosekundi murdosi. Triger aga omandab uue stabiilse seisundi, kus lampide L_1 ja L_2 osad on vahetatud.

Et tavalisel trigerlülitusel on rida puudusi, muuhulgas suur üksikosade arv ja suur voolutarvitus, kasuta-



Joonis 65

a — täisnurkne hüstereesisilmus; *b* — trigerlülitus

takse sageli nn. *dünaamilist trigerit.* Dünaamiline triger koosneb põhiliselt ainult ühest elektronlambist ja ühest transformaatorist. Seade on projekteeritud nii, et ergutamisel ühe impulsi abil hakkab ta pidevalt genereerima elektriimpulsse endaergutuse printsiibil, milline dünaamiline seisund vastab tavaliselt «1»-le. Võnkumiste katkestamisel vastassuunaliselt toimiva impulsi abil võnkumised iseseisvalt uuesti ei taastu ning seisund vastab «0»-le. Genereeritavate impulsside edasiandmine teistesse elementidesse ei paku erilisi raskusi.

Peale nimetatute on olemas veel terve rida peamiselt katsetusstaadiumis olevaid elemente, nagu näiteks k r ü o t r o n, mille töö põhineb nähtusel, et mõnede metallide elektritakistus muutub absoluutse nulli (−273° C) lähedasel temperatuuril nulliks (ülijuhtivus). Takistus võib aga taastuda teatud tugevusega magnetvälja toimel. Viimane tekitatakse väikese, otse juhtmele mähitud traatspiraali — solenoidi — abil. Niisiis on ka siin kaks seisundit — suure takistusega ning ülijuhtiv seisund. Krüotrone on võimalik valmistada väikeste, mõne millimeetri pikkuste «traadijuppide» kujul, mistõttu seade kujuneb väga kompaktseks. Et aga krüotron võiks töötada, tuleb ta paigutada jahutusvedelikku — v e d e l a s s e h e e l i u m i, mille säilitamine on omaette tehniline probleem.

Koodidest ja kodeerimisest. Käesoleval ajal tuntakse mõningaid elemente, mis võivad omandada kümme ja enam erinevat seisundit, nagu näiteks spetsiaalne elektronlamp — *dekatron.* Diskreetse toimega arvutusmasinate ehitamisel neid elemente ometi peaaegu ei kasutata. Siiski on üsna paljudes elektronarvutusmasinates kasutusel kümnendsüsteem. Tavaliselt on kümnendsüsteemi kasutamine otstarbekas siis, kui arvutusmasinasse saabuva ning sealt väljuva informatsiooni hulk on suur, võrreldes masina poolt teostatavate tehete mahuga. Niisugune proportsioon on eriti iseloomulik mitmesuguste majandus- ja finantsalaste arvutuste korral. Siin on masinasse juhitavate andmete hulk tohutult suur, tehted ise aga väga lihtsad, piirdudes peamiselt liitmise ning lahutamisega.

Osutub, et kümmet erinevat numbrit võib esitada kahe võimaliku seisundiga elementide abil. Selleks kasutatakse mitmesuguseid *koode.* Kood on õieti reegel, antud

kas tabeli või matemaatilise avaldise kujul, mis näitab, milline koodi elementide või koostisosade kombinatsioon vastab teatud edasiantavale teatele, käesoleval juhul numbrile. Mõnel juhul nimetatakse koodiks ka koodi abil esitatud, s. o. kooditud teadaannet või numbrit ennast, esitatuna kas siis vastavate märkidena paberil, impulssidena elektrilistes lülitustes või mõnel muul kujul. Laialdaselt on tuntud telegraafis kasutatavad koodid, näiteks morsetähestik.

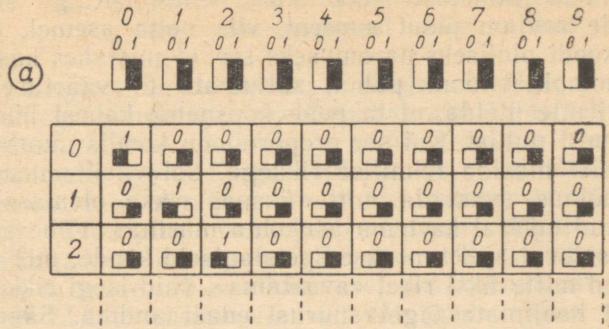
Lihtsaim kood kümne numbri moodustamiseks kahe seisundiga elementide baasil on toodud joonisel 66, *a*. Selleks on vaja nii palju koodielemente, kui palju on erinevaid numbreid, s. o. kümme elementi. Igal elemendil, mis võib olla esitatud näiteks trigerlülituse abil, on kaks võimalikku asendit või väärtust. Säärast elementi võib tähistada kahest poolest koosneva ristkülikuga, kusjuures tumeda poole paigutamine paremale tähendab näiteks nulli, selle paigutamine vasakule aga ühte. Säärane tähistus on kergesti seotav trigerlülituse asenditega.

Niisiis lihtsaim võimalus kümne erineva arvu koodimiseks kahendsüsteemis on kümne elemendi kasutamine, milledest kooditavale numbrile vastav asub asendis «1», ülejäänud aga asendis «0». Näiteks arv 1960, esitatuna niisuguse koodi abil, näeks välja nii: 0100000000 0000000001 0000010000 1000000000. Säärane lahendus on küll lihtne, kuid mitte ökonoomne. Kõige ökonoomsem lahendus koodielementide arvu suhtes on kooditavate arvude väljendamine k a h e n d s ü s t e e m i s (joonis 66, *b*). Minimaalne kahendelementide arv, mille abil võib, kasutades erinevaid kombinatsioone, esitada kümme numbrit, võrdub järelikult neljaga. Arv 1960, väljendatuna niisuguses *kahend-kümnendsüsteemis*, näeb välja nii:

0001 1001 0110 0000.

Ökonoomia, võrreldes eelmisega, on ilmne. Teisest küljest, vaadeldes arvude esitamist puhtkahendsüsteemis, osutub viimane veelgi ökonoomsemaks. Arv 1960 omab puhtkahendsüsteemis väljendust: 11110101000.

Siiski on kahend-kümnendsüsteemil oluline paremus, mis seisneb selles, et ü m b e r a r v u t a m i n e puhtkümnendsüsteemist kümnend-kahendsüsteemi ning vastupidi on väga hõlpus. Selleks on tarvis üksnes vastavat tabelit



b

	0 1	0 1	0 1	0 1
0	0	0	0	0
1	0	0	0	1
2	0	0	1	0
3	0	0	1	1
4	0	1	0	0
5	0	1	0	1
6	0	1	1	0
7	0	1	1	1
8	1	0	0	0
9	1	0	0	1

c

	0 1	0 1	0 1	0 1	0 1
0	0	0	0	1	1
1	1	0	0	0	1
2	1	1	0	0	0
3	0	1	1	0	0
4	0	0	1	1	0
5	1	0	0	1	0
6	0	1	0	0	1
7	1	0	1	0	0
8	0	1	0	1	0
9	0	0	1	0	1

Joonis 66

a — kood «üks kümnest»; *b* — kahendkood; *c* — kood «kaks viiest»

(joonis 66, *b*). Tehete teostamine ise on aga kümnend-kahendsüsteemis üsna keerukas.

Mõnikord kasutatakse kahend-kümnendsüsteemis erilist koodi, mis on esitatud tabelis joonis 66, *c*. Säärane

kood kannab nimetust *kood kaks viiest*. Kuigi siin elementide arv on pisut suurem, viis nelja asemel, on säärase koodi oluliseks paremuseks see, et mistahes kasutatava kombinatsiooni puhul, sõltumata ta väärtusest, võib alati ette ütelda, et ta peab koosnema kahest ühest ning kolmest nullist. Kui see proportsioon koodis muutub, on tegemist masina tehnilise rikkega. Sel viisil on suhteliselt hõlpus avastada mitte üksnes rikke olemasolu, vaid teatud määral ka tema asukohta masinas. Vähe sellest. Käesoleval ajal tuntakse spetsiaalseid koode, mis on võimelised mitte üksi riket «avastama», vaid isegi rikkest või veast hoolimata õiget suurust edasi andma. Sääraseid koode nimetataksegi *isekorrigeerivateks koodideks*. Niisugune kood omab teatud *liigsust*, s. o. rohkem elemente, kui on minimaalselt tarvis antud teate või numbri edasiandmiseks. Nende «üleliigsete» elementide arvel ongi võimalik mõne elemendi väljalangemise puhul esialgset pilti taastada. Näiteks võib olla alltoodud kood nelja erineva teate *A*, *B*, *C* ja *D* edasiandmiseks:

A	*B*	*C*	*D*
01001	01110	10010	10101
01000	01111	10011	10100
01011	01100	10000	10111
01101	01010	10110	10001
00001	00110	11010	11101
11001	11110	00010	00101

Teadete edasiandmiseks kasutatakse joonega ümbritsetud koode. Allpool asuvas tulbas aga on kõik koodid, mis võivad tekkida ühekordse vea puhul, s. o. koodid, mis erinevad lähtekoodist ainult ü h e elemendi võrra. Koodi vastuvõttev seade ehitatakse nii, et ta reageeriks ükskõik millisele koodile tulbast *A* nagu *A*-le, ükskõik millisele koodile tulbast *B* nagu *B*-le ja nii edasi. Nii saavutataksegi olukord, et ühe vea tekkimisel edasiantav signaal ei muutu. Loomulikult tuleb selleks lähtekoodid nii valida, et erinevates tulpades ei tekiks ühekordse vea mõjul samu koode. Selleks peavad lähtekoodid erinema vähemalt k o l m e elemendi võrra.

Üldse on võimalike koodide ja kodeerimise printsiipide arv väga suur ning nende uurimisele pühendatakse palju tähelepanu.

20. Algmõisteid matemaatilisest loogikast ning tema rakendamisest automaatikas

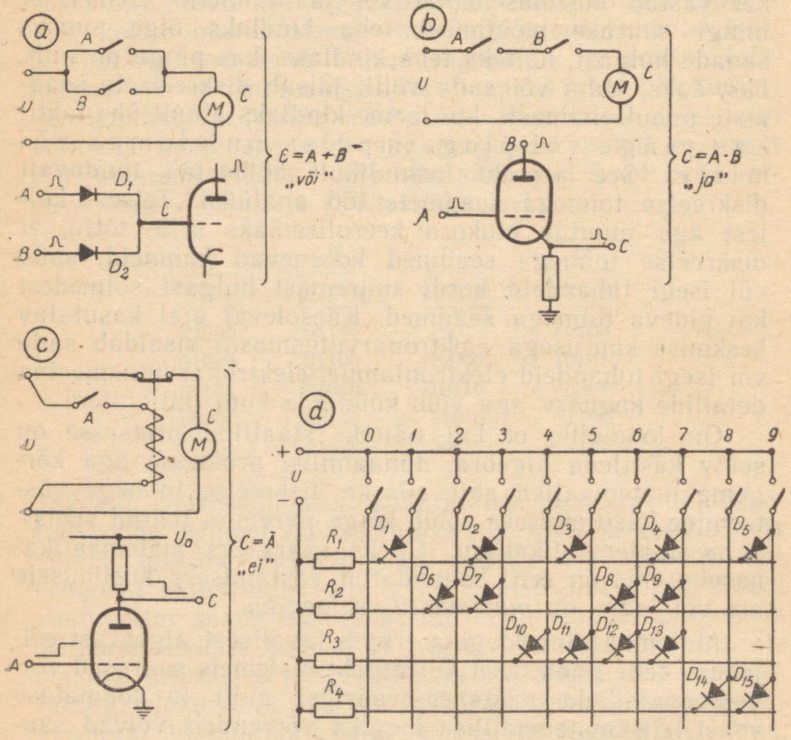
Eespool toodud materjali põhjal on selge, et diskreetse toimega numbriliste arvutusmasinate töö erineb põhiliselt matemaatiliste mudelite ja üldse suurema osa tehniliste seadmete tööst. Kõige olulisemaks, põhimõtteliseks erinevuseks on siin just see, et kui igasuguste muude masinate töö jälgimisel peab insener endalt ennekõike küsima: «Kui palju?», siis diskreetse toimega arvutusautomaatide töö analüüsimisel piisab enamasti, kui insener vastab küsimusele «ei või jaa?». Selle asemel, et mingi suuruse mõõtmisel teha kindlaks õige suurus sadade hulgast, näiteks teha kindlaks, kas pinge on null, üks, kaks, kolm või sada volti, piisab diskreetsete seadmete puhul enamasti, kui teeme kindlaks ainult ühe fakti: kas pinge või pingeimpulss on olemas või mitte. See asjaolu loomulikult hõlbustab tunduvalt diskreetse toimega seadmete töö analüüsi. Teisest küljest aga muutub olukord keerulisemaks selle tõttu, et diskreetse toimega seadmed koosnevad kümneid, sadu või isegi tuhandeid kordi suuremast hulgast sõlmedest kui pideva toimega seadmed. Käesoleval ajal kasutatav keskmise suurusega elektronarvutusmasin sisaldab sadu või isegi tuhandeid elektronlampe, elektronarvutusmasina detailide koguarv aga võib küündida kuni miljoniteni.

On loomulik, et kui näiteks staatilisi protsesse on sobiv käsitleda algebra, dünaamilisi protsesse aga kõrgema matemaatika abil, siis ka diskreetse toimega süsteemide käsitlemiseks sobib kõige paremini teatud spetsiaalne matemaatikaharu. Üheks sääraseks matemaatikaharuks, mis on eriti kohandatud vastamiseks küsimusele «ei või jaa?» on *matemaatiline loogika.*

Matemaatiline loogika erineb tavalisest algebrast esijoones selle poolest, et kui algebravalemeis suurused võivad omandada mistahes väärtusi nulli ja lõpmatuse vahel, siis matemaatilise loogika võrrandeis võivad suurused omada ainult üht kahest võimalikust väärtusest. Neid väärtusi tähistatakse tavaliselt arvudega «0» ja «1».

Matemaatilise loogika esialgseks sihiks oli formaalse kooliloogika reeglite väljendamine matemaatilisel kujul. See matemaatilise loogika osa kannab *loogikalise algebra* nime. Matemaatiline loogika leidis kaua aega rakenda-

mist ainult mõnede puhtmatemaatiliste teoreemide rangelt formaalse tõestamise juures, peamiselt aga kasutati teda omaenese teoreemide süsteemi laiendamiseks. Alles käesoleva sajandi kolmekümnendail aastail panid ameeriklane Claude Shannon ja nõukogude füüsik V. I. Šestakov aluse loogikalise algebra rakendamisele elektrotehnikas — releelülituste uurimiseks ja projekteerimiseks. Elektronarvutusmasinate ilmumiseni oli matemaatiline loogika siiski tuttav vaid piiratud matemaatikute ning mõningal määral ka filosoofide ringile; üsna hiljuti väljaarenenud



Joonis 67

a — matemaatilise loogika tehte «või» realiseerimine lülitite ja elektronlülituse abil; *b* — matemaatilise loogika tehte «ja» realiseerimine lülitite ja elektronlülituse abil; *c* — matemaatilise loogika tehte «ei» realiseerimine relee ja elektronlambi abil; *d* — dioodšifraator koodi «üks kümnest» kahendkoodiks muundamiseks

üldine laiahaardeline teooria — *metamatemaatika* on seda praegugi, hoolimata katsetest kasutada teda küberneetiliste probleemide lahendamisel. Loogikaline algebra on aga käesoleval ajal juba üsna laialdaselt tarvitusel. Loogikaline algebra meenutab mõningal määral arvude kahendsüsteemi selles mõttes, et siin kasutusel olevad muutujad võivad omandada üldiselt ainult kaks väärtust: üks või null, ei või jaa, sellal kui tavalises algebras kasutatavad muutujad võivad omandada mis tahes arvväärtusi.

Loogikalise algebra tehted. Loogikalise algebra tehted erinevad tavalise matemaatika tehetest, olgugi et siin on olemas teatud analoogia.

Loogikaliseks liitmiseks nimetatakse tehet, mille tulemus on jaatav (1), kui vähemalt üks liidetavatest on jaatav (1). Kui kõik liidetavad on eitavad (0), on ka tulemus eitav (0). Loogikalist liitmist tähistatakse kas tavalise liitmise märgiga (+) või siis erilise, ainult matemaatilisele loogikale omase märgiga ($\vee$). Et loogikalise liitmise tulemus on jaatav, kui üks v õ i teine liidetavatest on jaatav, loetakse avaldist

$$A \vee B = C$$

järgmiselt: *A* v õ i *B* võrdub *C*-ga. Seepärast nimetatakse loogikalist liitmist lühidalt ka tehteks «või».

Loogikalise liitmise reeglit võib esitada tabeli kujul:

$\vee$	0	1
0	0	1
1	1	1

Lihtsaim elektriline lülitus, mille toime vastab loogikalise liitmise tehtele, on kujutatud joonisel 67, *a*. Võib hõlpsasti veenduda, et kui lüliti *A* v õ i lüliti *B* või mõlemad neist on sisse lülitatud, siis mootor *C* käivitub. On aga mõlemad lülitid üheaegselt avatud, siis mootor ei tööta. Järelikult on mootori *C* käivitumise fakt määratud lülitite *A* ja *B* sisselülitamise faktide loogikalise s u m -

maga. Säärast lülitust kasutatakse otseselt mitmesuguseis automaatikaseadmeis, näiteks juhul, kui mootorit on vaja käivitada mitmesuguste erinevate ahelate toimel. Lüliteiks A ja B on sellisel juhul releede või kontaktorite kontaktid. Elektronarvutusmasinais kasutatakse tavaliselt analoogilist lülitust, et pinge tõusmisel kas sisendis A või sisendis B avada selle pinge abil elektronlamp C, juhtides pinge viimase võrele. Ahelate lahutamiseks on siin vajalikud dioodid D_1 ja D_2. Vajaduse korral võib loogikalise summa moodustada ka mitte kahest, vaid kolmest ja enamast liidetavast.

Teiseks tähtsamaks matemaatilise loogika tehteks on *loogikaline korrutamine*. Loogikaliseks korrutamiseks nimetatakse tehet, mille resultaat on siis ja ainult siis jaatav (1), kui üks ja teine korrutatavatest suurustest on jaatavad. Seepärast nimetatakse loogikalist korrutamist lühidalt ka tehteks «ja». Kõigil teistel juhtudel resultaat on eitav (0). Formaalses loogikas vastab tehtele «ja» reegel, et järeldus on õige siis ja ainult siis, kui kõik tehtud eeldused õiged on. Korrutatavaid võib olla loomulikult ka rohkem kui kaks.

Loogikalist korrutamist märgitakse kas tavalise matemaatilise korrutusmärgiga ($\cdot$ või $\times$) või siis spetsiaalse matemaatilise loogika märgiga ($\wedge$). Loogikalise korrutamise tabel on järgmine:

$\wedge$	0	1
0	0	0
1	0	1

Loogikaliseks korrutamiseks releelülitustes tarvitseb vaid releede kontaktid järjestikku lülitada. Lülitades mootori C vooluringi (vt. joonis 67, *b*) järjestikku kahe relee A ja B normaalselt avatud kontaktid, käivitub mootor C siis ja ainult siis, kui relee A ja relee B on üheaegselt rakendunud.

Elektronlülitustes on loogikalise tehte «ja» teostamine pisut keerukam. Üks võimalus selleks on asjaolu kasuta-

mine, et elektronlamp juhib voolu siis ja ainult siis, kui tema võrele j a anoodile on antud küllalt kõrge potentsiaal (joonis 67, *b*). Teatud võtete abil on tehte «ja» teostamine võimalik ka dioodlülituste abil.

Kolmandaks põhiliseks loogikalise algebra tehteks on *ümberpööramine* ehk *inversioon*. Inversioonile puudub vaste tavalises algebras. Inversiooniks nimetatakse tehet, mille tulemus on eitav (0), kui inverteeritav suurus on jaatav (1) ja vastupidi. Inversiooni tähistatakse horisontaalse joonega inverteeritava suuruse või sümboli kohal:

$$\overline{1}=0$$
$$\overline{0}=1.$$

Et inversioon otsekui e i t a b inverteeritavat suurust, muutes ta vastupidiseks, nimetatakse inversiooni ka *operatsiooniks «ei»*.

Inversiooni võib elektrilises lülituses teostada näiteks n o r m a a l s e l t s u l e t u d kontaktiga varustatud elektromagnetilise relee abil. Nagu selgub jooniselt 67, *c*, vastab lüliti *A* sulgemise fakt mootori *C* seiskumisele ja vastupidi.

Elektronlülitustes võib inversiooni teostada tavalise lülituse kohaselt anoodringi lülitatud koormustakistusega elektronlambi abil, kus võrele suure signaali andmisel langeb anoodpinge nulli lähedale tugeva anoodvoolu tekkimise tagajärjel. Sisendsignaali puudumisel aga on lambi anoodil pinge U_a.

Loogikalistest lülitustest. Kirjeldatud loogikalise algebra põhitehetele vastavate lülituselementide kombineerimise teel võib koostada mitmesuguseid *loogikalisi lülitusi*. Kõige üldisemal juhul on loogikaline lülitus seade, kuhu sisendite kaudu elektriliste impulsside kujul on võimalik juhtida mitmesuguseid k o o d e. Seadme väljundis tekivad sisenevatele koodidele vastavalt kindlad väljundkoodid, mis aga erinevad sisendkoodidest. Niisiis toimivad loogikalised lülitused koodide m u u n d a j a i n a.

Joonisel 67, *d* on kujutatud laialdaselt kasutatav lülitus, nn. *dioodvõre*, mida käesoleval juhul kasutatakse joonisel 66, *b* toodud koodi realiseerimiseks. Sisendeiks on siin kümme lülitit *0, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9*, väljundeiks neli koormustakistit R_1, R_2, R_3, R_4. Näiteks lüliti *1* sul-

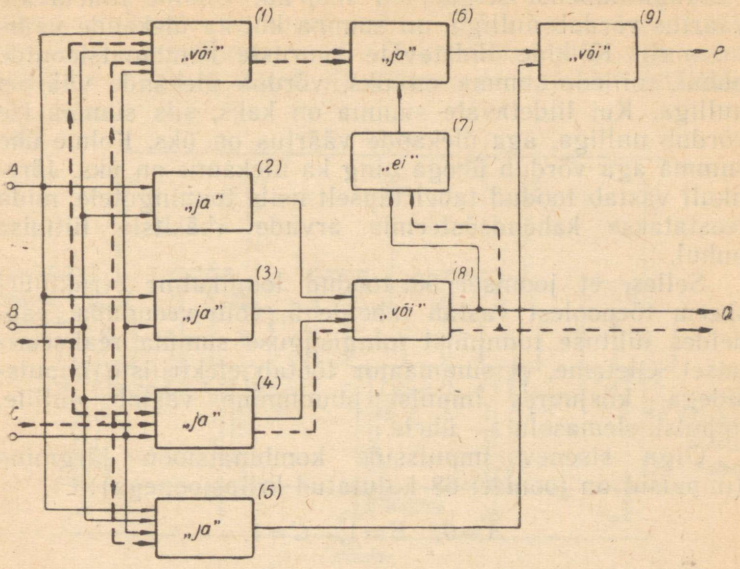
gemisel suundub vool läbi takisti R_1 dioodi D_1 kaudu, teistesse takistitesse aga vool ei hargne. Väljundis moodustub kood, mis vastab numbrile «1». Lüliti *2* kontakti sulgemisel tekib takistites kood «2» ja nii edasi. Säärane dioodvõre võib leida rakendamist elektronarvutusmasinais näiteks selleks, et «tõlkida» kümnendkujul väljendatud sisendsuurused kahend-kümnendkoodi, kui masin töötab säärase koodiga. Pisut keerukama dioodvõre abil on võimalik ka vastupidine muundamine.

21. Aritmeetiliste tehete teostamine masina abil

Mitmesuguste diskreetse toimega matemaatiliste masinate üheks kõige olulisemaks koostisosaks on *aritmeetiline seade*. Aritmeetilise seadme ülesandeks on elektripingete või -impulsside näol kooditud arvudega aritmeetiliste ja ka mõningate loogikaliste operatsioonide teostamine. Aritmeetiline seade võimaldab tavaliselt arve liita, lahutada, korrutada ja jagada. Keerukamad tehted, nagu näiteks juurimine ja astendamine, teostatakse tavaliselt aritmeetilise seadme mitmekordse kasutamise teel vastavalt masina tööd juhtivale programmile.

Summaatorite ehitusest. Nimetatud neljast tehtest on olulisemaiks liitmine, kuna lahutamine on teostatav täiendarvu [1] liitmise teel, korrutamine ja jagamine aga koosnevad kindlal viisil järgnevaist liitmise ja lahutamise tehetest. Järelikult peab aritmeetilise seadise põhiliseks koostisosaks olema summeeriv seade — *summaator*. Summaator kujutab endast loogikalist lülitust, mis tekitab summeeritavate arvude koodide juhtimisel lülituse sisendeisse väljundis summale vastava koodi. Joonisel 68 on kujutatud kahendsüsteemis töötava summaatori struktuurskeem, mis on määratud liitmiseks ühe kahendkoha ulatuses. Elemendid mitmesuguste matemaatilise loogika tehete teostamiseks on kujutatud ruutudena, millesse on kirjutatud vastavate matemaatilise loogika tehete nimetused. Tabelis 5 on esitatud sellise lülituse koostamiseks

[1] Kahendsüsteemi puhul saadakse täiendarv sel teel, et lähtearvus asendatakse nullid ühtedega ja ühed nullidega, peale selle liidetakse kõige madalamale järgule 1. Kümnendsüsteemi puhul on täiendarvu moodustamine keerukam.



Joonis 68

Ühekohalise kahendsummaatori struktuurskeem

vajalikud lähteandmed, s. o. algoritm või arvutuse eeskiri, millele summaator peab vastama.

Ühekohalisel summaatoril on kolm sisendit: ühe liidetava väärtus *A*, teise liidetava väärtus *B* ning ülekanne eelmiselt, «nooremalt» kohalt *C*. Väljundeid on samuti kaks: summa väärtus *P* ja ülekande väärtus järgmisele, «vanemale» kohale *Q*.

Tabel 5

A	*B*	*C*	*P*	*Q*
0	0	0	0	0
0	0	1	1	0
0	1	0	1	0
1	0	0	1	0
0	1	1	0	1
1	0	1	0	1
1	1	0	0	1
1	1	1	1	1

Nagu tabelist selgub, on siis, kui kõikide liidetavate väärtus võrdub nulliga, nii summa kui ka ülekande väärtus null. Kõikide liidetavate suuruste kombinatsioonide puhul, millede summa on üks, võrdub ülekande väärtus nulliga. Kui liidetavate summa on kaks, siis summa ise võrdub nulliga, aga ülekande väärtus on üks. Kolme ühe summa aga võrdub ühega ning ka ülekanne on üks. Järelikult vastab toodud tabel täpselt neile toimingutele, mida teostatakse kahendsüsteemis arvude «käsitsi» liitmise puhul.

Selles, et joonisel 68 toodud loogikaline struktuurskeem tõepoolest vastab tabelile 5, võib veenduda, vaadeldes lülituse toimimist mingisuguse summa realiseerimisel. Oletame, et summaator töötab elektriliste impulssidega, kusjuures impulsi puudumine vastab nullile, impulsi olemasolu — ühele.

Olgu sisenev impulsside kombinatsioon järgmine (impulsid on joonisel 68 kujutatud kriipsjoonega):

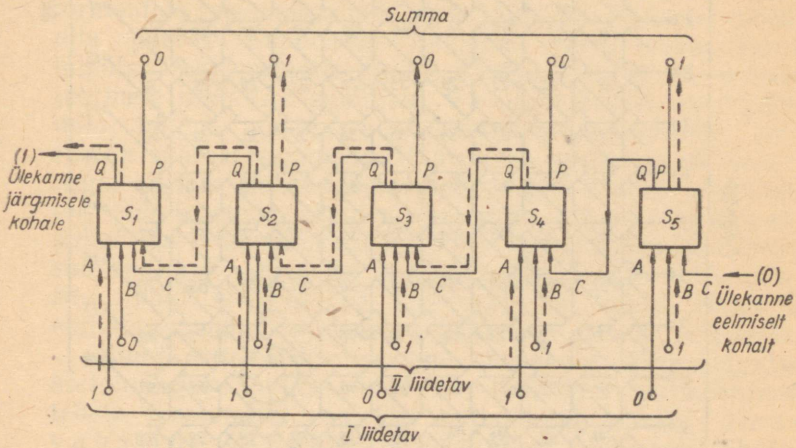
$$A=0,\quad B=1,\quad C=1.$$

Säärase sisendsuuruse tulemusena tekivad impulsid loogikaliste elementide *1* ning *4* väljundeis. Elemendi *4* väljundist lähtuv impulss tekitab impulsi ka elemendi *8* väljundis, elemendi *7* väljundis seetõttu impulssi ei teki. Seepärast ei pääse edasi ka elemendist *1* elemendi *6* teise sisendisse saabuv impulss ning väljundis P signaali ei teki. Signaal esineb ainult väljundis Q. Seega siis $P=0$ ja $Q=1$, nagu peabki olema tabeli 5 kohaselt. Samal viisil võib jälgida lülituse käitumist kõigi teiste võimalike sisendsignaalide kombinatsioonide korral.

Ühekohaliste summaatorite baasil, mis toimivad tabeli 5 kohaselt, on kerge ehitada summaatorit mitmekohaliste kahendsüsteemis arvude summeerimiseks. Joonisel 69 on kujutatud sellise summaatori struktuur. Nagu selgub jooniselt, on üksikute kohtade summaatorid omavahel seotud ülekande väljundite Q kaudu, milledest ülekandeimpulss satub järgmise summaatori S sisendisse C. Summaatori töö paremaks selgitamiseks on joonisel punktiirjoonega kujutatud «1»-dele vastavate impulsside käik arvude 11010 ja 01111 liitmisel. Nende arvude summa on 101001, nagu selgub ka jooniselt.

Pidades silmas, et iga summaator S_1 kuni S_5 joonisel 69 sisaldab tervikuna lülitust, mille struktuur on

kujutatud joonisel 68, võib ette kujutada summaatori lülituse keerukust ning suurt mahtu. Tuleb ka arvestada, et tavaliselt on summaator 30—60-kohaline, mitte aga viiekohaline nagu joonisel. Et vähendada vajalike detailide



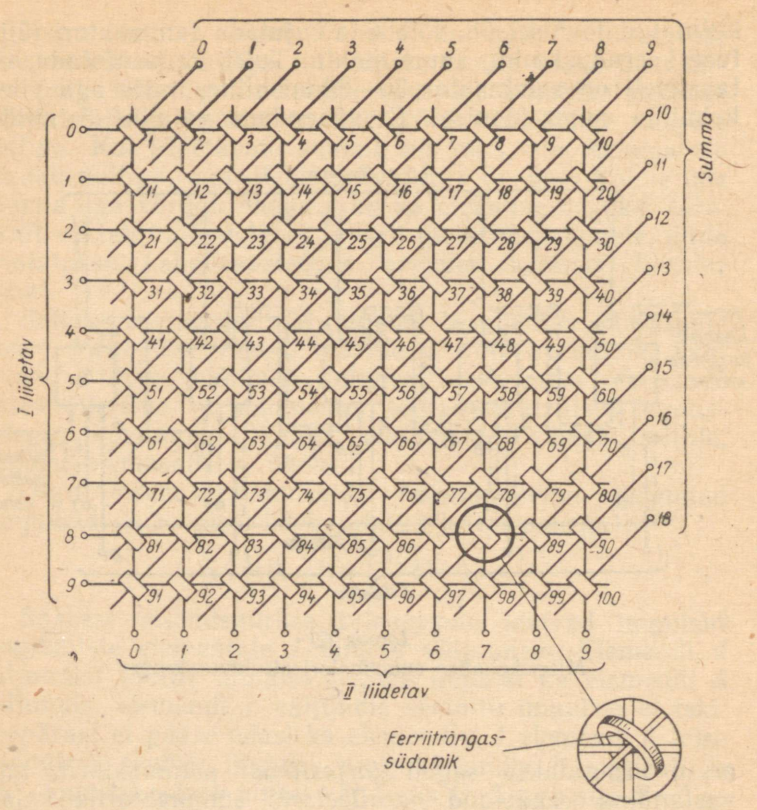
Joonis 69
Mitmekohalise summaatori struktuurskeem

arvu, kasutatakse sageli *järjestikust* summaatorit, mis vastandina vaadeldud *paralleelsele* summaatorile vajab ühtainust ühekohalist summaatorit. Järjestikuses summaatoris toimub arvude paari üksikute kahendkohtade liitmine ajaliselt üksteise järel, mistõttu niisuguse summaatori töökiirus on mitu korda väiksem paralleelse summaatori töökiirusest. Järjestikuseid summaatoreid kasutatakse seepärast väikestes, suhteliselt aeglaselt töötavates elektronarvutusmasinates.

Analoogiliselt jaotatakse diskreetse toimega seadmeid koodi esitamise viisi järgi paralleelseteks ja järjestikusteks.

Kümnendsüsteemiline summaator. Huvitav ning suhteliselt lihtne lülitus kümnendsüsteemis arvude liitmiseks on kujutatud joonisel 70.

Lülitus esitab õieti liitmistabelit kümnendsüsteemis arvude 0 kuni 9 liitmiseks. Esimene ja teine



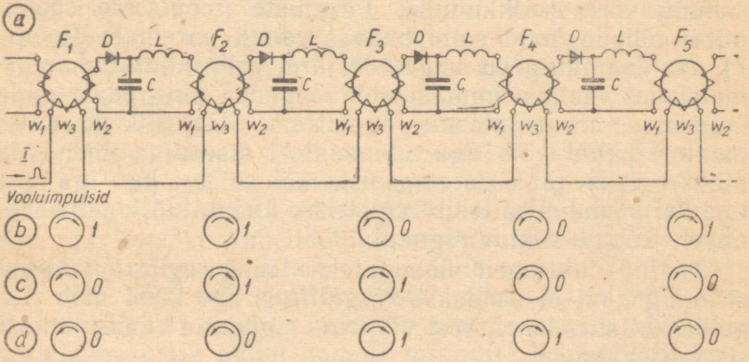
Joonis 70

Kümnendsummaator ferriitsüdamikel

liidetav saabuvad summaatorisse «üks kümnest» koodi kujul, vooluimpulssidena. Seega suubuvad summaatorisse kokku 20 elektrijuhet, mis lõikudes moodustavad sada lõikepunkti. Kõikides lõikepunktides asuvad ferriitrõngas-südamikud. Teatud impulsside kombinatsiooni, näiteks viienda (I liidetav) ja kaheksanda (II liidetav), saabumisel vastavatesse vertikaalsetesse ja horisontaalsetesse juhtmetesse magneeditakse ümber ainult see ferriit, mis asub vastavate juhtmete lõikepunktis, antud juhul ferriit nr. 59. Selleks on impulsside amplituudid nii valitud, et

ainult kahe impulsi koosmõju on suuteline ferriiti ümber magneetima. Toimides analoogiliselt transformaatori südamikuga, indutseerib ferriit nr. 59 ümber magneetudes summa juhtmes nr. 13 pingeimpulsi. Viimane läbib samuti seda ferriiti ning teda võib vaadelda transformaatori sekundaarmähisena. Mistahes teisele sisendite paarile impulsside andmisel tekib sekundaarne impulss alati juhtmes, mille number vastab sisenevate juhtmete numbrite summale. Vajaduse korral on võrdlemisi hõlpus vastavate koodimuundamislülituste abil siduda säärast summaatorit masinas kasutatavate koodidega, näiteks kahend-kümnendkoodiga. Taoline summaator võib teostada kümnendsüsteemis väljendatud arvude puhul ühe kümnendkoha liitmist. Nagu kahendsüsteemis summaatorite puhul, on ka kümnendsüsteemis summaatorite puhul ühekohaliste summaatorite baasil võimalik ehitada summaatoreid mitmekohaliste arvude liitmiseks.

Muud aritmeetilise seadme elemendid. Mitmesuguste abitoimingute hulgas, mis on vajalikud aritmeetiliste tehete teostamisel, on üks tähtsamaid arvude omavaheline nihutamine liitmisel. Säärane nihutamine on vajalik näiteks korrutamise puhul üksikute osakorrutiste liitmisel. Järjestikuse toimega aritmeetiliste seadmete puhul aga tuleb mingisugusel viisil arvu üksi-



Joonis 71

a — ferriit-diood-elementidest koosneva nihkeregistri lülitusskeem; *b* — ferriitsüdamike esialgsed seisundid; *c* — ferriitsüdamike seisundid pärast ühe impulsi saabumist; *d* — ferriitsüdamike seisundid pärast teise impulsi saabumist

kute kohtade koodid ajaliselt üksteise järel summaatorisse juhtida.

Nii üheks kui ka teiseks otstarbeks sobib ühevõrra hästi *nihkeregister*. Nihkeregister võimaldab vastavate impulsside toimel nihutada mingites elementides säilitatavat koodi nende elementide suhtes. Nihkeregistrid võivad olla ehitatud kas dünaamiliste või staatiliste trigerlülituste, ferriitsüdamike või ka muude diskreetse toimega elementide alusel (vt. § 19).

Joonisel 71 on kujutatud lihtsaim nihkeregister, mis on ehitatud ferriitsüdamikega transformaatorite baasil. Ferriitsüdamike F magneetumisolukorra kujul on neis säilitatud mingisugune kahendkood, käesoleval juhul 11001 ... Juhtides ferriitsüdamike F järjestikku ühendatud mähistesse w_3 vooluimpulsi I, mille suund on selline, et kõik ferriitsüdamikud magneetuksid ümber asendisse «0», indutseeritakse ümbermagneetuvate ferriitsüdamike F mähistes w_2 pinged, mis dioodide D kaudu laevad kondensaatoreid C. Impulsi I lõppedes kasvab induktiivsusi L läbiv vool kondensaatorite C laengu toimel nii suureks, et ferriitsüdamikud magneetuvad ümber voolu tõttu mähistes w_1. Selle tagajärjel enne impulsi I saabumist seisundis «1» olnud ferriitide parempoolsed naabrid magneetuvad nüüd omakorda asendisse «1» (joonis 71, *c*). Jääb mulje, nagu oleks registrisse kantud kood ühe sammu võrra «nihkunud». Järgmiste impulsside saabumisel nihkub kood sammhaaval veelgi paremale (joonis 71, *d*). Vajaliku arvu sammude järel võib nihutatud informatsiooni vastava impulsi abil «lugeda» ning edasi anda muudesse arvutusmasina ahelatesse. Järjestikuse summaatori puhul võib aga summaatori sisendiga ühendada nihkeregistri vaba parempoolse mähise w_2, kus iga uue impulsi saabumisel tekib registrisse kirjutatud koodi järgmisele kohale vastav signaal.

Teatud juhtumeil ühendatakse nihkeregistri väljund sisendiga, nii et saadakse *ringlülitus*, kus kood võib ringelda kuitahes kaua, sest väljuvad signaalid viiakse uuesti sisendisse tagasi.

Kirjeldatud nihkeregistri elementidega sarnaseid ferriitsüdamikega elemente kasutatakse ka loogikaliste elementidena.

Peale summaatorite ning nihkeregistrite sisaldab aritmeetiline seade tingimata veel juhtivat seadet, mille üles-

andeks on vastavalt jaotatud impulsside abil aritmeetilise seadme üksikute osade töö koordineerimine ja juhtimine. Juhtiv seade on tavaliselt koostatud samasugustest elementidest nagu summaator ning nihkeregistridki, tema struktuur aga määratakse kindlaks sõltuvalt mitmesuguste tehete sooritamiseks tarvilike elementaaroperatsioonide järjekorrast.

22. Mäluseadmed

Ülesannete lahendamisel elektronarvutusmasinate abil tekib vajadus teatud aja vältel «meeles pidada» mitmesuguseid arvutamiseks vajalikke andmeid. Seda ülesannet täidab nn. *mäluseade*. Peab märkima, et see nimetus ei ole päris täpne. Sellal kui inimese m ä l u kujutab endast keerukat, kõrgestiorganiseeritud süsteemi, mis on võimeline meelde jätma kõige olulisemat, unustades järkjärgult ebaolulise uute teatmete saabumisel, samuti aga ka grupeerima meelespeetavaid teatmeid nende sarnasuse alusel, võimaldades assotsiatsioonide tekkimist, on masinmälu funktsioonid märksa lihtsamad ning «masinlikumad». Elektronarvutusmasinais ja muudes diskreetse toimega automaatikaseadmetes on mälu ülesandeks säilitada kahend- või muude koodide kujul mitmesuguseid arve, teatmeid ja programme, et vastava signaali saabumisel neid uuesti väljastada. Selleks otstarbeks sobivad peaaegu kõik kasutatavad diskreetse toimega elemendid. Teatud mälufunktsioone täidavad ka aritmeetiliste ja muude seadmete elemendid. Spetsiaalsed mäluseadmed erinevad viimastest oma tunduvalt suurema mahu poolest. Mäluseadmete mahtu mõõdetakse *kahendühikutes* («bit»). Kahendühik on niisugune meelespeetava materjali hulk, mis vastab ühele ühekohalisele kahendsüsteemis arvule. Ühe kahendühiku suurust mälumahtu omab niisiis iga element, mis on võimeline omama kaht erinevat seisundit, näiteks ferriitsüdamik või trigerlülitus. Mäluseadmete vajalik üldmaht ulatub suurte elektronarvutusmasinate puhul sadade miljonite kahendühikuteni. Et sellest üldmahust pidevalt kasutatakse vaid väikest osa, mis piirdub tavaliselt kümnete tuhandete kahendühikuga, on tehniliselt otstarbekas mäluseadme jagamine kaheks osaks. Üks nendest, *operatiivmäluseade,* on suuteline informatsiooni välja andma väheste mikrosekundite

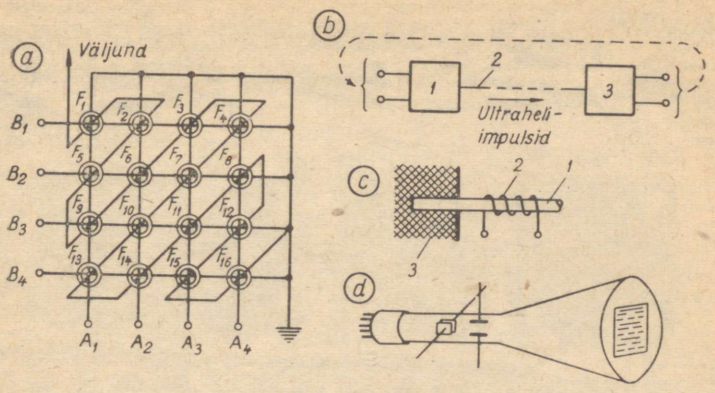
jooksul pärast vastava signaali saabumist, ent suudab mahutada vaid ülalnimetatud sageli tarvitatava informatsiooni. Teise mäluseadme, nn. *välise mäluseadme* maht on tunduvalt suurem, kuid töötsükliks, s. o. olemasoleva informatsiooni lugemiseks ning uue üleskirjutamiseks kuluv aeg on mõõdetav sekundite ja isegi minutitega. Niisugune kompromisslahendus rahuldab nii tehnilisest kui ka ökonoomilisest seisukohast.

Mäluseadmeid ehitatakse väga mitmesugustel printsiipidel. Üldiselt võib neid jagada kahte suurde põhirühma. Ühel juhul kantakse meelespeetavad märkide kombinatsioonid mingisuguste deformatsioonide näol üle homogeensesse keskkonda, mis kas ise liigub või milles need deformatsioonid liiguvad, näiteks helilainete kujul. Teisel juhul on iga meelespeetava kahendühiku jaoks oma kindel, «aadressiga» varustatud koht — lahter. Arvu lugemiseks või kirjutamiseks antud aadressi järgi tarvitseb vaid mäluseadmele anda aadress ja operatsioon võib toimuda otsekohe. Säärast tüüpi, kindlate lahtritega mäluseadmed sobivad hästi operatiivmäluseadmeiks.

Liikuva keskkonnaga mäluseadmeis aga tuleb üldiselt oodata, kuni soovitud arv jõuab lugeva või üleskirjutava seadiseni. Seetõttu on säärane mälu üldiselt aeglasem ning seda kasutatakse peamiselt välistes mäluseadmetes.

Materjalidest, mida kasutatakse kahe erineva seisundi meelespidamiseks, on viimasel ajal kõige laialdasemalt kasutusel ferromagnetilised materjalid, kus meelespidamine toimub materjali erinevates suundades magneetimise teel. Ferromagnetiliste materjalide suureks eeliseks on see, et nad võivad oma seisundit säilitada praktiliselt piiramata aja jooksul, samuti ka informatsiooni hõlpus üleskirjutamine ja kustutamine. Teatud puuduseks on see, et salvestatud informatsiooni lugemine on raske ilma ferromagnetilist materjali ümber magneetimata. Ümbermagneetimisel aga informatsioon kustutatakse. Tavaliselt saadakse sellest puudusest üle loetud informatsiooni *regenereerimise,* s. o. automaatse uuestikirjutamise teel vahetult pärast lugemist.

Magnetilised operatiivmäluseadmed. Mitmesuguseist operatiivmäluseadmeist omandab üha suuremat levikut *maatrikstüüpi mäluseade* ferriit-rõngassüdamikel. Säärase mäluseadme põhilise koostisosa, *ferriit-maatriksi* lihtsus-

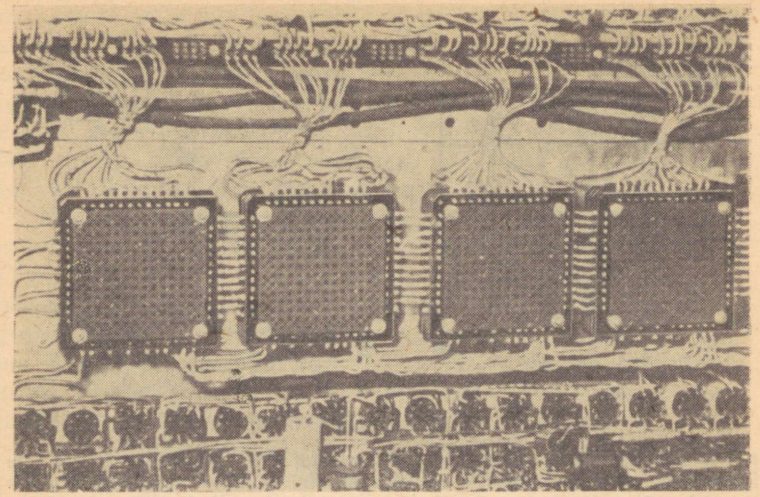


Joonis 72

a — ferriit-rõngassüdamikega maatrikstüüpi operatiivmäluseadme lülitusskeem; *b* — ultraheli levikunähtustel põhinev mäluseade; *c* — muundussõlm elektriimpulsside muundamiseks ultraheli-impulssideks; *d* — elektronkiiretoru mäluseadmena

tatud lülitus on kujutatud joonisel 72, *a*. Kujutatud maatriks on suuteline «meeles pidama» üht kuueteistkümnekohalist arvu. Tegelikult ehitatakse seda tüüpi mäluseadmed tavaliselt 512 kuni 4096 30—40-kohalise kahendsüsteemis arvu mahutamiseks. Vastavalt on siis ka maatrikslülitus keerukam, omades üldiselt ruumilist konfiguratsiooni, ent tööpõhimõttelt säärane seade kirjeldatud näitest oluliselt ei erine.

Nulli üleskirjutamiseks joonisel 72, *a* toodud maatrikslülitusse ei ole tarvis midagi teha, sest kõikide ferriitsüdamike algseisund vastab nullile. Ühe üleskirjutamiseks näiteks ferriiti F_6 juhitakse vooluimpulsid juhtmetesse A_2 ja B_2, millega määratakse aadress. Vooluimpulsside amplituudid on sealjuures valitud nii, et üks impulss üksi ei oleks suuteline ferriiti ümber magneetima. Kahe impulsi koosmõju on aga piisav juhtmete lõikepunktis asuva ferriidi F_6 ümbermagneetimiseks. Ülesmärgitud informatsiooni lugemiseks antakse soovitud aadressiga ferriidile samal viisil v a s t a s s u u n a l i n e vooluimpulss. Kui loetav ferriit oli asendis «null», siis jääb ta ümber magneetumata ning väljuvas juhtmes, mis läbib kõiki ferriitsüdamikke, pinget ei teki. Kui loetav ferriit oli asendis



Joonis 73

Maatrikstüüpi operatiivmäluseadme üks võimalikke konstruktsioone. Siin toimub arvude salvestamine 128-arvuliste blokkidena isoleerainest plaatidesse paigutatud ferriitsüdamikes

«üks», magneetub ta ümber asendisse «null», indutseerides väljundis pingeimpulsi.

Tavaliselt on mäluseadmed ehitatud nii, et joonisel 72, *a* kujutatud maatrikslülitus mahutab kõikide mäluseadmes säilitatavate arvude ühe koha. Teine analoogiline maatrikslülitus mahutab järgmise koha jne. Kolmekümne kahe kohaliste kahendsüsteemis arvude mahutamiseks on niisiis tarvis 32 maatriksit. Igaüks neist sisaldab 1024 erineva aadressi olemasolul $32 \times 32 = 1024$ ferriitsüdamikku. Kokku moodustab säärane üsna tavaliste mõõtmetega maatriksite kogum nn. *magnetilise kuubi*, sisaldades $32^3 = 32768$ üksikut ferriitsüdamikku ning säilitades järelikult niisama palju informatsiooni kahendühikuid. Tavalise konstruktsiooni puhul on säärase magnetilise kuubi mõõtmed ligikaudu $0{,}5 \times 0{,}5 \times 0{,}5$ meetrit.

Viimasel ajal on võetud kasutusele erilised ferriidist vormitud plaadid (joonis 74; plaadi mõõtmetest annab ettekujutuse plaadile osutav tuletikuots). Säärane plaat

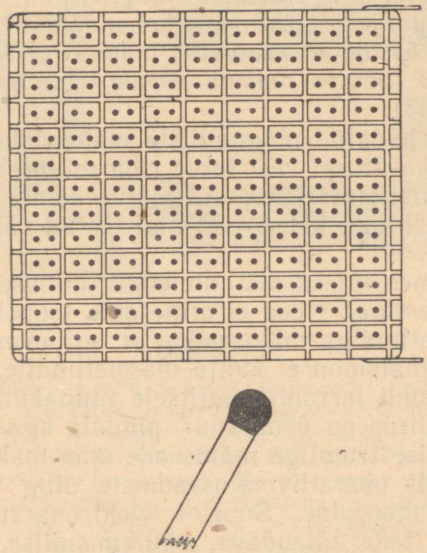
mahutab $16 \times 16 = 256$ informatsiooni kahendühikut. Plaatidest valmistatud magnetiline kuup 32 768 informatsiooni kahendühiku mahutamiseks omaks umbes teeklaasi ruumala.

Pakub teatud huvi hinnata, kui palju võiks säärane operatiivmäluseade mahutada sõnalist informatsiooni. Seda võib teha, kui oletada, et tähestiku 32 tähte on väljendatud kahendkoodide abil. Selleks piisaks viieelemendilistest koodidest, sest $2^5 = 32$.

Jagades üldise kahendühikute arvu ühe tähe säilitamiseks vajaliku kahendühikute arvuga, saame tähtede arvu, mida on võimalik mahutada antud mäluseadmesse. Käesoleval juhul see on ligikaudu

$$32768 : 5 = 6500 \text{ tähte.}$$

6500 tähest koosnev tekst mahuks ligikaudu käesoleva raamatu kolmele leheküljele. Siit on näha, et keskmise operatiivmäluseadme maht on üsna väike; teotsemiskiirus aga on väga suur — ühe sellisesse operatiivmälusead-



Joonis 74

Plaadikujuline ferriitmäluseadme element

messe kirjutatud lehekülje «läbilugemiseks» ei kuluks elektronarvutusmasinal aega üle paari tuhandendiku sekundi!

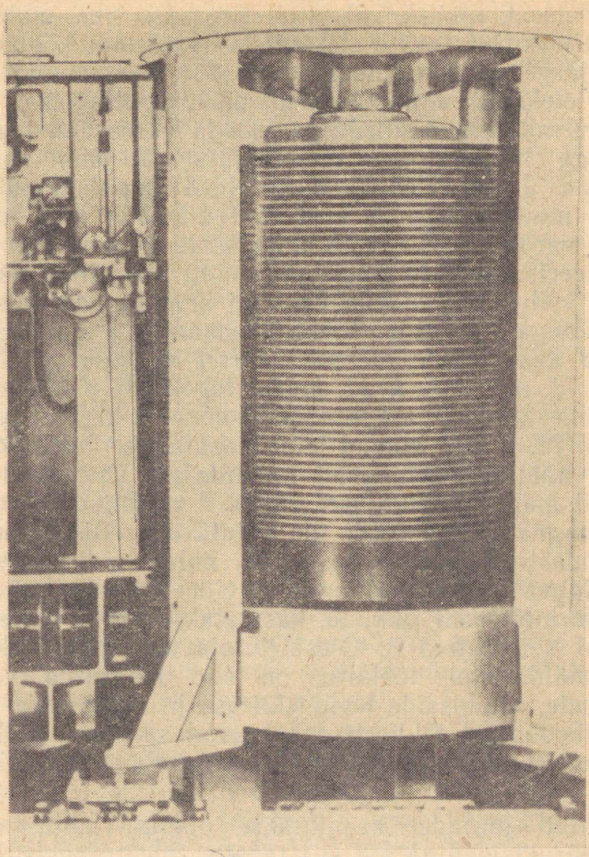
Muud mäluseadmete tüübid. Toodud näitest järeldub eriti ilmselt, et operatiivmäluseadmete maht ei ole piisav. Seepärast kasutatakse enamikus elektronarvutusmasinais täiendavaid väliseid mäluseadmeid. Kõige sagedamini kasutatakse selleks magnetofone, mis võrdlemisi vähe erinevad helitehnikas kasutatavaist. Heli asemel kirjutatakse magnetlindile elektriliste impulsside read, kusjuures tavaliselt impulsi puudumine vastab nullile, impulsi olemasolu aga ühele. Järelikult esitatakse siin arvud ajaliselt järjestikku saabuvate märkide näol. Sellele vastavalt on ka magnetlindiga töötava välise mäluseadme töökiirus väike, kuigi mõnikord püütakse seda tõsta kuni kümne või isegi enama paralleelse kanali loomise teel. Selleks on siis magnetlint laiem, umbes tavalise kinofilmi laiune, ühe helipea asemel on aga kasutusel vastav arv paralleelselt paigutatud helipäid.

Magnetlindiga töötava mäluseadme maht on praktiliselt piiramatu, sest tavaline magnetlindi rull mahutab paar miljonit informatsiooni kahendühikut, mis vastab ligikaudu käesoleva raamatu mahule. Sääraseid rulle koguneb aga töötava masina juurde terve «raamatukogu» (vt. joonis 63).

Peale kirjeldatud magnetiliste mäluseadmete on käesoleval ajal kasutusel veel terve rida mitmesugustel füüsikalistel printsiipidel töötavaid mäluseadmeid. Nende osatähtsus näitab aga käesoleval ajal teatud vähenemise tendentsi.

Esmajoones tuleks siin nimetada mäluseadmeid *magnetilistel trumlitel.* Need ei erine oma tööpõhimõttelt oluliselt magnetlindiga mäluseadmeist; erinevus seisneb selles, et informatsioon ei kanta magnetlindile, vaid kiiresti pöörleva trumli ferromagnetilisele pinnakihile. Et trumli pinna joonkiirus on üsna suur, pindala aga piiratud, siis on magnetilise trumliga mäluseade oma mahult ning töötamiskiiruselt operatiivmäluseadmete ning väliste mäluseadmete vahepealne. Suurtes elektronarvutusmasinates kasutatakse teda täiendava, suuremahulise, kuid aeglasema operatiivmäluseadmena.

Joonisel 72, *b* on kujutatud ultraheli leviku nähtustel põhineva mäluseadme põhimõtteline tööskeem.



Joonis 75

Magnetilistel ketastel põhinev mäluseade. Selles seadmes on ühendatud magnetlint-mäluseadmetele omane suur töömaht ja magnettrummel-mäluseadmetele omane suhteliselt suur töötamiskiirus. See on võimalik üksikute ülestikku paigutatud ketaste suure külgpinna tõttu, mida kasutatakse informatsiooni spiraalikujuliseks ülesmärkimiseks eriliste, pika konsoolikujulise hoidja külge kinnitatud salvestus- ja taastamishelipeade abil. Konsooli juhtimine toimub automaatselt, helipeade vajalik kaugus ketta pinnast aga tagatakse pneumaatiliste meetoditega

Mäluseadme informatsiooni säilitavaks osaks on siin elavhõbedast, niklist, sulatatud kvartsist vms. materjalist varb. Üleskirjutatavate elektriliste impulsside kogum juhitakse järgemisi muundusseadmesse *1*, mis muundab saabuvad elektrilised impulsid ultraheliimpulssideks. Viimased levivad teatud kiirusega mööda varrast *2*, saabudes mõninga hilinemisega muundajasse *3*, mis muundab impulsid uuesti elektrilisteks. Need impulsid juhitakse tagasi muundajasse *1*, kust nad ultraheli näol satuvad uuesti vardasse. Nii võib impulsside kogum ehk *pakett* tsirkuleerida suletud ringis piiramatu aja vältel; vajaduse korral võib impulssidena esitatud arve lugeda, kustutada või teistega asendada. Elektromehaaniliste muundajatena *1* ja *3* kasutatakse *piesoelektrilisel* nähtusel põhinevaid seadmeid, mis kujutavad endast tegelikult piesoelektrilisi ultraheli-valjuhääldajaid ja -mikrofone. Nikkelvarda puhul (joonis 72, *c*) aga võivad leida kasutamist *magnetostriktsiooni* nähtusel põhinevad muundajad. Et nikkel omab tugevat magnetostriktiivset efekti, s. o. muudab oma pikkust magnetvälja toimel, siis kujutavad sellised muundajad endast lihtsalt varda *1* otsi hõlmavaid mähiseid *2*. Peegelduvate ultrahelilainete likvideerimiseks, mis võiksid informatsiooni rikkuda, kasutatakse varda otstele kinnitatud summuteid *3*. Üleskirjutatavate impulsside hulk ning mäluseadme töökiirus on siin määratud varraste mõõtmete, impulsside levimiskiiruse ja impulsside võimaliku tihedusega. Üldiselt rahuldavad säärased mäluseadmed selles suhtes operatiivmäluseadmeile esitatavaid nõudeid.

Teatud juhtudel kasutatakse operatiivmäluseadmena erikonstruktsiooniga või siis tavalisi, elektronostsillograafides kasutatavaid elektronkiiretorusid (joonis 72, *d*). Andmed kirjutatakse siin elektronkiire poolt ridamisi asetatud punktidena toru ekraanile elektrilaengute näol. Informatsiooni lugemine toimub samuti elektronkiire abil. Et elektrilaengud hajuvad võrdlemisi kiiresti, siis on siin tarvis laenguid pidevalt regenereerida. Ka regenereerimine toimub automaatselt elektronkiire abil.

Sisend- ja väljundseadmed. Elektronarvutusmasinasse lähteandmete ja arvutusprogrammide sisseviimiseks kasutatakse mitmesuguseid meetodeid ja seadmeid. Enamikul juhtudel kasutatakse selleks *perforeeritud kaarte* või *linte*, mis kujutavad endast samuti teatud liiki ühekordse kasu-

tamisega mäluseadmeid. Perforeeritud lindi (vt. § 6) või perforeeritud kaardi pinna võib mõttes jagada lahtriteks. Augu olemasolu vastavas lahtris võib tähendada näiteks ühte, augu puudumine aga nulli. Vastava seadme abil lahtreid teatud järjekorras tastides loetaksegi kaardile või lindile kantud informatsiooni. Viimane kantakse lindile või kaardile vastavate perforaatorite (mulgustajate) abil.

Perfolintide ja -kaartide eeliseks on vastavate seadmete lihtsus ning automaatse kontrolli võimalus. Et vältida aparatuuri ja perforeerija vigu arvutusmasina jaoks lähteandmete perforeerimisel, kantakse sageli üks ja seesama informatsioon kahe operaatori poolt eri lintidele ja seejärel võrreldakse vastava automaadi abil mõlemaid lindilõike. Lahkuminekud võimaldavad avastada operaatorite poolt tehtud vigu.

Mõnikord, kui arvutustulemused võivad leida kasutamist muude arvutuste lähteandmetena, perforeeritakse ka arvutusmasinast väljuvad andmed lindile või kaardile. Tavaliselt trükitakse nad aga vastava elektrilise *trükkivseadme* abil numbrite või ka kirjamärkidega täidetud tabelite kujul.

Trükkivseadmeid on oma ehituselt mitmesuguseid, sõltuvalt vajalikust töökiirusest. Aeglasemaks trükkimiseks sobivad kas telegraafis kasutatavad *teletaibid* või siis *elektrilised kirjutusmasinad*, mille hoobe käitatakse klaviatuuri asemel elektromagnetitega.

Kiiretes trükkivseadmetes toimub *trükkimine käigult*. Trükkimine käigult seisneb selles, et tähtede või numbrite kujutistega varustatud trükkivrull pöörleb pidevalt. Rulli äärest liigub mööda trükipaber koos värvilindiga. Kui vastav vajalik märk jõuab trükipaberi kohale, surutakse viimane elektromagneti abil hetkeks vastu trükirulli viimast seiskamata. Nii tekib soovitud märgi jäljend.

Sääraste seadmete abil on ühe trükirulli täispöörde jooksul võimalik moodustada terve trükirida. Maksimaalseks trükkimiskiiruseks on sealjuures kuni kakskümmend rida sekundis.

Veelgi kiiremad on praegu katsetusjärgus olevad ilma liikuvate osadeta *fotoelektroonilised* trükkivseadmed, kus kirjapilt moodustatakse elektronseadmete abil katoodtoru ekraanile ning fotografeeritakse siis.

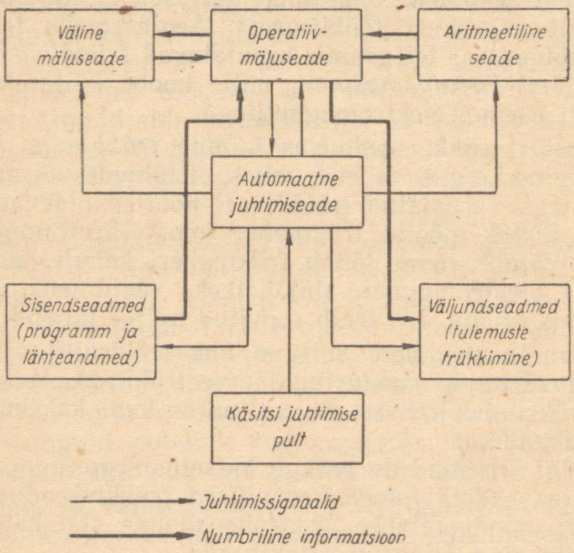
Trükkivseadmed trükivad üldiselt numbreid — arvutuste resultaate — tabelite kujul. Kui arvutusseadet kasu-

tatakse mitte arvutamiseks, vaid mingiks muuks otstarbeks, näiteks tõlkimiseks ühest keelest teise, siis võivad trükkivseadmed olla kohandatud vahetult kirjamärkide või muude tähiste trükkimiseks.

Trükkivseadmete koosseisu kuuluvad ka loogikalised lülitused, mis võimaldavad koodide kujul sisenevat informatsiooni *dešifreerida* trükkivseadme elektromagnetitele või muudele juhtimisseadistele täitekäskluste andmiseks.

23. Elektronarvutusmasina üldine struktuur ja programmeerimine

Elektronarvutusmasin tervikuna kujutab endast keerukat elektriliste ning elektromehaaniliste seadmete kompleksi, mille ülesandeks on mitmesuguste arvutuste võimalikult täielik automatiseerimine. Valdav enamus tänapäeval kasutatavaist elektronarvutusmasinaist omab joonisel 76 kujutatud üldist struktuuri.



Joonis 76
Elektronarvutusmasina üldine struktuurskeem

Peene joonega on struktuurskeemil märgitud juhtimiseks tarvilikud seosed masina üksikute osade vahel, jämeda joonega aga arvude edasiandmiseks tarvilikud seosed. Arvud esinevad masinas, nagu eespool märgitud, kas kümnend-, kahend- või siis kümnend-kahendsüsteemis.

Arvude esitamine masinas. Tavaliselt esitatakse masinas tsirkuleerivad arvud *normaliseeritud* kujul. See tähendab, arvutuskäik korraldatakse nii, et kõik ettetulevad arvud oleksid ühest väiksemad murdarvud. Iga masin suudab mahutada ainult teatud kindla kohtade hulgaga arve. Kohtade hulk, mis sõltub masina konstruktsioonist, määrab ära lahenduste maksimaalse võimaliku täpsuse. Tavaliselt on kümnendsüsteemi puhul kasutatav kohtade arv 3—15, kahendsüsteemi puhul aga vastavalt 10—50. Arvu kõik kohad on masinas esitatud vastavate koodielementide abil. Praktiliselt on kõik arvutusmasinad määratud teheteks algebraliste arvudega, s. o. peale arvu absoluutväärtuse tuleb esitada ka tema märk. Seda tehakse tavaliselt ühe koodielemendi abil, kus impulsi olemasolu tähendab märki «pluss», puudumine aga märki «miinus».

Niisiis näiteks arv −0,33614 esineb kaheksakohaliste arvudega töötavas kümnendsüsteemis masinas kujul:

−	3	3	6	1	4	0	0	0

kahend-kümnendsüsteemis masinas aga kujul:

0	0011	0011	0110	0001	0100	0000	0000	0000

Esimene null viimasel juhul tähendab märki «miinus». Arv +0,017 omaks vastavalt kuju:

+	0	1	7	0	0	0	0	0

ja

1	0000	0001	0111	0000	0000	0000	0000	0000

Niisiis määratakse koma asend masinas kindlaks juba arvu asetusega. Loomulikult võib ka kokku leppida, et koma ei asetse mitte esimese arvu ees, nagu toodud näidetes, vaid teise, kolmanda jne. arvu ees. Vastavast kokkuleppest aga tuleb siis alati kinni pidada. Teiste sõnadega, igal juhul määratakse kindlaks maksimaalne arv, mida masinas on võimalik esitada. Vaadeldud juhul on niisuguseks arvuks 0,99999999. Arvude liitmisel võib aga juhtuda, et summa osutub suuremaks kui nimetatud maksimaalne arv. Kui niisugune asjaolu ilmsiks tuleb, on vaja arvude mastaapi muuta ning arvutust korrata. Teisest küljest ei ole säärase süsteemi puhul võimalik esitada väga väikesi arve, näiteks arvu 10^{-10}.

Nimetatud raskuste vältimiseks kasutatakse eelkirjeldatud nn. *fikseeritud komaga* masinate kõrval tunduvalt keerukama aritmeetilise seadmega masinaid, mis töötavad nn. *liuguva koma* printsiibil. Liuguva koma printsiibil töötavais masinais esitatavad arvud koosnevad kuni neljast osast: märgist, absoluutsest suurusest, järgu märgist ja järgu absoluutsest suurusest. Kümnendsüsteemis arvude puhul järk tähendab arvu kordajaks oleva 10 astmenäitajat. Eeltoodud arv $-0{,}33614$ esitatakse liuguva komaga süsteemis järgmisel kujul:

−	3	3	6	1	4	0	0	0	+	0	0

Märk — Absoluutväärtus — Järgu märk — Järk

Arv $+0{,}00033614$ aga esineks järgmisel kujul:

+	3	3	6	1	4	0	0	0	−	0	3

Arv $-0{,}33614 \cdot 10^{25}$ omaks järgmist kuju:

−	3	3	6	1	4	0	0	0	+	2	5

Keeruka konstruktsiooni tõttu on liuguva koma süsteemiga varustatud ainult võrdlemisi suured masinad.

Väikestes lihtsa konstruktsiooniga masinates on fikseeritud komaga süsteemi paindlikkust võimalik teatud määral suurendada vastavate programmeerimisvõtete kasutamisega.

Programmi koostamisest. Selleks et arvutusmasin võiks teostada mingisuguse arvutuse, tuleb selle arvutuse käik ennekõike «pihustada» kõige elementaarsemateks üksikosadeks — matemaatilisteks teheteks — nagu korrutamine, jagamine, liitmine ja lahutamine. Viimaseid teostatakse juba aritmeetilise seadme abil. Arvutuste käik, see tähendab üksikute elementaarsete tehete omavaheline järjekord ning arvutamise kord kooditakse vastavate eeskirjade kohaselt nii, et see oleks kasutatavale arvutusmasinale «arusaadav». Tulemus, s. o. *programm* juhitakse sisendseadmete (vt. joonis 76) kaudu operatiivmäluseadmesse, kus ta hõivab teatud osa viimase mahust. Operatiivmäluseadmesse juhitakse samuti vajalikud arvutamise lähteandmed. Pärast seda jääb operaatori ülesandeks vaid masina käivitamine käsitsi juhtimise puldilt.

Selle tulemusena hakkab automaatjuhtimisseade lugema operatiivmäluseadmest üksikuid programmi punkte nende loomulikus järjekorras. Samas seadmes need punktid dešifreeritakse. Vastavalt dešifreeritud programmi punktidele moodustatakse järgnevalt käivitus- ning juhtimisimpulsid masina muudele sõlmedele, nagu aritmeetiline seade, mäluseadmed ja sisend- ning väljundseadmed.

Operatiivmäluseadme täitumisel arvutamise resultaatidega juhitakse viimased kas väljundseadmesse või välisesse mäluseadmesse. Samuti on vajaduse korral võimalik välisest mäluseadmest andmete üleviimine operatiivmäluseadmesse. Arvutamine ise toimub alati ainult nende arvudega, mis paiknevad operatiivmäluseadmes. Programmi viimaseks punktiks on masina seiskamine ning vastava signaali andmine käsitsi juhtimise puldile. Arvutuste tulemused juhitakse trükkivseadmesse.

Kõik masina poolt teostatavad operatsioonid peavad olema programmis üksikasjaliselt ette nähtud. Programmi koostamine on seetõttu väga keerukas ning aeganõudev töö. Programmeerimist teostavad kõrge kvalifikatsiooniga matemaatikud.

Tekib loomulikult küsimus, milles seisneb siis arvu-

tusmasina efektiivsus, kui kõik tehted tuleb programmimisel ette näha. Kas ei kulu selleks, et kõiki elementaarseid tehteid programmi märkida, niisama palju aega kui ülesande käsitsi lahendamiseks?

Seletus seisneb siin selles, et enamiku ülesannete lahendamisel esineb vajadus korrata mitmesuguseid tehteid suur arv kordi. Seetõttu kujuneb programmi punktide arv tunduvalt väiksemaks kui programmi täitmiseks vajalike tehete hulk. Teisest küljest, omades kord programmi, on selle programmi alusel võimalik läbi arvutada terve seeria samalaadseid ülesandeid, muutes iga kord vaid arvulisi lähteandmeid.

Programmeerimise automatiseerimise võimalused. Kõigest hoolimata jääb programmeerimine üsna töömahukaks operatsiooniks. Paljudel juhtudel ulatub üht arvutusmasinat teenindavate programmistide koosseis kümnete või isegi sadade matemaatikuteni.

Seepärast on ka mõistetavad püüded programmeerimise automatiseerimiseks. Esimeseks sammuks selles suunas on nn. *standardsed osaprogrammid* sageli esinevate arvutuste, nagu juurimise, astendamise, trigonomeetriliste funktsioonide määramise ja muu taolise teostamiseks. Standardsete osaprogrammide laialdasel kasutamisel kujuneb programmi koostamine suurel määral lihtsalt varuksolevate varem koostatud osaprogrammide omavaheliseks sidumiseks. Käesoleval ajal on tehtud katseid ka *programmeerivate programmide* koostamiseks, s. o. *automaatseks programmeerimiseks.* Programmeeriv programm on üsna suur ning keerukas programm, mille alusel ei teostata tavalisi arvutusi, vaid koostatakse programme. Programmeeriva programmi alusel on võimalik, lähtudes sel või teisel kujul kooditud ülesande formuleeringust, seda automaatselt, arvutusmasina enda abil nii ümber töötada, et tulemuseks on soovitud ülesande lahendamise programm. Programm esineb teatavasti samuti arvude kogumina nagu arvutuse resultaadidki, seepärast on ta täiel määral masina poolt käsitletav. Lähteandmed programmeeriva programmi koostamiseks viiakse masinasse operaatorite kujul. Nimelt omistatakse igale arvutustehtele teatud sümbol, *operaator.* Arvutuse käik väljendatakse siis lihtsalt järjestikku üleskirjutatavate operaatorite abil. Need kooditakse ja juhitakse masinasse, kus teostub juba automaatne üksikasja-

lise programmi väljatöötamine programmeeriva programmi kohaselt.

Praegu on ülesannete hulk, mille lahendamisel saab rakendada automaatset programmeerimist, veel siiski piiratud.

Programmeerimise näide. Vaatleme järgmise lihtsa ülesande programmeerimise käiku:

$$s = v_0 t + \frac{at^2}{2}.$$

Sõnades võib säärase ülesande lahendamise käiku formuleerida järgmiselt:

korrutada aja t ruut kiirendusega a ja saadud korrutis korrutada $\frac{1}{2}$-ga; tulemus $\frac{at^2}{2}$ liita algkiiruse v_0 ja aja t korrutisega.

Teatavasti jaguneb arvutusmasina operatiivmälu üksikuteks lahtriteks. Igasse lahtrisse mahub parajasti üks arv. Igal lahtril on oma püsiv *aadress*. Aadressiks on tavaliselt lahtri järjekorranumber. Näiteks 1000-lahtrilise mäluseadme korral võivad aadressideks olla arvud 000 kuni 999. Olgu arvutamise lähteandmed paigutatud järgmistel aadressidel:

$$\begin{aligned} 001 &— v_0 \\ 002 &— a, \\ 003 &— \frac{1}{2}, \\ 004 &— t. \end{aligned}$$

Matemaatilised tehted tähistatakse programmeerimisel samuti tingtähistega, nn. *operatsioonikoodidega*. Olgu käesoleval juhul kasutusel järgmised operatsioonikoodid:

01 — korrutamine,
02 — liitmine,
03 — stopp.

Programmi võib siis esitada tabeli kujul, kus esimeses lahtris on programmi punkti järjekorranumber, teises lahtris esimese lähtearvu aadress, kolmandas lahtris teise lähtearvu aadress, neljandas lahtris tulemuse aadress ja viiendas teostatava tehte operatsioonikood. Too-

dud lihtsa ülesande programm on esitatud tabelis 6. Sulgudes on märgitud mäluseadme vastava aadressiga lahtrite sisu.

Tabel 6

Jrk. nr.	Esimese lähtearvu aadress	Teise lähtearvu aadress	Tulemuse aadress	Operatsiooni-kood
1.	004 (t)	004 (t)	006 (t^2)	01
2.	006 (t^2)	002 (a)	007 (at^2)	01
3.	007 (at^2)	003 ($\frac{1}{2}$)	008 ($\frac{at^2}{2}$)	01
4.	001 (v_0)	004 (t)	009 (v_0t)	01
5.	009 (v_0t)	008 ($\frac{at^2}{2}$)	010 ($v_0t+\frac{at^2}{2}$)	02
6.	000	000	000	03

Seega siis viiakse kümnendsüsteemiga masina puhul operatiivmäluseadmesse peale arvuliste lähteandmete programm järgmiste arvuridade kujul:

004 004 006 01
006 002 007 01 ja nii edasi, vastavalt tabelile.

Et aadressid 1—10 on hõivatud lähteandmete ja arvutustulemuste poolt, võib programmi paigutada aadressidel 011—016. Vastavalt siis tuleb programmi lugemist alustada lahtrist 11. Üksikuid programmi punkte loendab masinas eriseade, nn. *aadresside loendaja.*

Toodud kujul esitatud programmi punktid on masinas teatud määral käsitletavad arvudena. Sageli kasutataksegi programmi väiksemateks muutmisteks nende arvude muutmist aritmeetiliste tehete abil programmi teostamise käigus. Mõnikord kombineeritakse ka vana programmi punktide osadest uus programmi punkt. Sääraseks «juurdelõikuseks» kasutatakse tavaliselt aritmeetilises seadmes esinevat loogikaliste tehete teostamise võimalust.

Iteratsioonimeetod. Seoses masinarvutuse laialdase levikuga ning eriliste nõuetega, mis viimane esitab arvutusmeetodeile, on välja arendatud erilised numbrilise arvutamise meetodid, mida on eriti sobiv rakendada

masinarvutamise puhul. Üks sääraseid meetodeid on *iteratsioonimeetod* (ladinakeelsest sõnast «iteratio» — kordamine).

Ruutjuurt mingisugusest arvust võib teatavasti võtta vastava kooliaritmeetikast hästi tuntud algoritmi alusel. Masinal arvutamise ja programmeerimise seisukohalt lähtudes on aga palju kohasem teostada ruutjuure võtmist iteratsioonimeetodil. Sama meetod on rakendatav ka paljude teiste ülesannete, muuseas mitmesuguste keerukate võrrandite lahendamiseks.

Seose $y=\sqrt{x}$ iteratsioonimeetodil lahendamiseks peab olema väga umbkaudselt teada lahenduse väärtus y_0, mis erineb üldisel juhul õigest lahendusest y vea h võrra, s. o.

$$y=y_0+h.$$

Järelikult

$$x=y^2=(y_0+h)^2=y_0^2+2y_0h+h^2.$$

Et h on suhteliselt väike arv, h^2 aga veelgi palju väiksem, siis võib ligikaudsel arvutamisel h^2 ära jätta.

Sel juhul

$$x=y_0^2+2y_0h,$$

millest

$$h=\frac{x-y_0^2}{2y_0}.$$

Järelikult

$$y=y_0+\frac{x-y_0^2}{2y_0}=\frac{x+y_0^2}{2y_0}$$

ehk

$$y=\frac{1}{2}(y_0+\frac{x}{y_0}).$$

Iteratsiooniprotsess seisneb selles, et toodud seosest saadakse ligikaudse y_0 väärtuse sisseviimisel esimene, juba täpsem y väärtus y_1. Viimase valemisse paigutamisel saadakse veel täpsem y väärtus y_2 ja nii edasi kuni soovitud täpsuse saavutamiseni.

Näiteks $\sqrt{2}$ arvutamise puhul, lähtudes ligikaudsest

väärtusest $y_0 = \sqrt{x} \approx 1$, kulgeb iteratsiooniprotsess järgmiselt:

$$y_1 = \frac{1}{2}\left(y_0 + \frac{x}{y_0}\right) = \frac{1}{2}\left(1 + \frac{2}{1}\right) = 1{,}5,$$

$$y_2 = \frac{1}{2}\left(y_1 + \frac{x}{y_1}\right) = \frac{1}{2}\left(1{,}5 + \frac{2}{1{,}5}\right) = 1{,}416167,$$

$$y_3 = \frac{1}{2}\left(1{,}416167 + \frac{2}{1{,}416167}\right) = 1{,}414216,$$

$$y_4 = \frac{1}{2}\left(1{,}414216 + \frac{2}{1{,}414216}\right) = 1{,}414219 \text{ jne.}$$

Säärane lahendusprotsess kestab kuni nõutava täpsuse saavutamiseni.

On ilmne, et selle protsessi kõik tsüklid on teostatavad ühe ja sellesama programmi alusel tsüklilise kordamise teel, iga «sammu» jaoks eraldi programmi koostamata.

Küsimus, millal peatada iteratsiooniprotsess, lahendatakse järgmiselt.

Iga «sammu» järel arvutatakse v a h e järgmise ja eelmise lahendi vahel $(y_i - y_{i-1})$:

$$(y_1 - y_0) = 0{,}500000;$$
$$(y_2 - y_1) = -0{,}083333;$$
$$(y_3 - y_2) = -0{,}002451;$$
$$(y_4 - y_3) = 0{,}000002 \text{ jne.}$$

Vajalik lahenduse täpsus antakse enne lahendamisele asumist ette, kandes ta vastavasse mälulahtrisse. Lahendamine lõpetatakse siis, kui kahe viimase lahenduse vahe muutub väiksemaks etteantud veast ε. Kõik need toimingud teostatakse programmi alusel automaatselt.

Et ühelt lahendustsüklilt, näiteks ruutjuure arvutamiselt, nõutava täpsuse saavutamisel üle minna järgmisele programmikohasele tehtele, kasutatakse erilist nn. *tingliku ülemineku operatsioonikoodi*. Tingliku ülemineku operatsioonikood võimaldab ülemineku järgmisele programmi osale alles siis, kui on täidetud nõutava täpsuse või mõni muu etteantud tingimus. Kui nõutav täpsus ei ole veel saavutatud, toimub iteratsioonitsükli kordamine.

Peale kirjeldatud operatsioonikoodide kasutatakse universaalsetes elektronarvutusmasinates veel kümneid mitmesuguseid operatsioonikoode erinevate operatsioonide teostamiseks. Selle tulemusena on masin võimeline tegema kuitahes pikki ja keerukaid arvutusi, ilma et operaator end arvutuse käiku vahele segaks.

24. Diskreetse toimega seadmed automaatikas

Numbrilised elektronarvutusmasinad täidavad automatiseerimise funktsioone õieti kahes mõttes. Ühelt poolt võimaldavad numbrilised elektronarvutusmasinad automatiseerida mitmesuguseid vaimse töö liike, peamiselt teaduslikke, ökonoomilisi, finantsalaseid ning statistilisi arvutusi. Mõningal määral võimaldavad elektronarvutusmasinad ka mitmesuguste dispetšeriteenistuse, strateegia ja taktika ülesannete lahendamise või ka tõlketööde automatiseerimist. Teiselt poolt on elektronarvutusmasinad rakendatavad mitmesuguste tööstuslike protsesside automaatseks juhtimiseks. Peale universaalsete elektronarvutusmasinate kasutatakse viimatimainitud otstarbeks veel tervet rida lihtsamaid, spetsialiseeritud, piiratud funktsioonidega diskreetseid seadmeid.

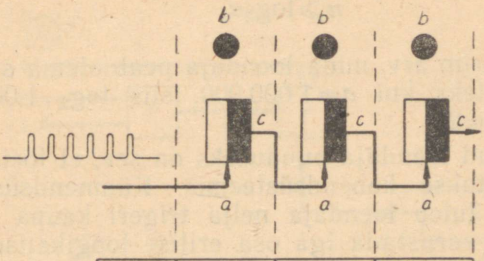
Impulsside loendajad. Väga laialdast kasutamist leiab seade elektriliste impulsside loendamiseks — *loendaja*. Impulsside elektronloendaja eelkäijaks on õieti tavaline *mehaaniline numeraator*, nagu neid kasutatakse näiteks elektri- ja gaasiarvestites või autodel läbisõidetud kilomeetrite arvu määramiseks. Mehaaniline numeraator loeb siseneva võlli pöörete arvu, esitades selle vastavas aknakeses arvu kujul. Mehaaniline numeraator on suuteline loendama mitte üle kümmekonna võlli pöörde sekundis. Tuumafüüsikuil tekkis aga mõni aeg tagasi tarvidus loendada elektrilisi impulsse, mis tekivad üksikute aine elementaarosakeste sattumisel erilisse osakesi registreerivasse seadmesse, näiteks Geiger-Mülleri või mõnda muud tüüpi registraatorisse. Ajaühikus registraatorisse sattunud elementaarosakeste arvu põhjal võib otsustada radioaktiivse kiirguse tugevuse üle. Selleks et niisuguse radioaktiivse kiirguse mõõtja oleks mitmesugustes olukordades kasutatav, on tarvis, et ta võimal-

daks lugeda ühevõrra hästi nii ühe kui ka miljoni elementaarosakese saabumist sekundis. Seega siis peab loendaja olema suuteline loendama kuni miljon vooluimpulssi sekundis, mõnikord aga veelgi enam. Probleemi lahendamiseks loodigi elektronlampidel töötava impulsside loendaja — ajalooliselt üks esimesi diskreetse toimimisega seadmeid.

Elektronlampidel töötava loendaja põhiliseks koostisosaks on trigerlülitus (vt. joonis 65, *b*). Joonisel 77 on toodud kahendsüsteemis loendaja struktuurskeem. Triger on siin tähistatud kahepoolse ristkülikuga, kusjuures ristküliku kumbki pool tähendab üht elektronlampi. Viirutatud lamp on suletud, viirutamata lamp juhib voolu. Triger on ehitatud nii, et impulsi saabumisel sisendi *a* kaudu tema seisund igal juhul muutub. Kui enne impulsi saabumist vasak lamp oli avatud ja parem suletud, siis uue impulsi saabumisel avaneb parempoolne lamp ning vasakpoolne sulgub. Uue impulsi saabumisel pöördub triger vanasse seisundisse uuesti tagasi. Trigeriga on tavaliselt seotud huumlamp *b*, mis asub loendaja esiküljel ning näitab vastava trigeri asendit. Käesoleval juhul eeldatakse, et huumlamp on lülitatud nii, et ta süttib trigeri parema poole avanemisel. Peale selle omab trigerlülitus veel väljundit *c*. Väljund *c* on konstrueeritud niiviisi, et seal tekib impulss ainult siis, kui sulgub trigeri parem pool, s. o. kui triger pöördub lähteasendisse tagasi. Trigeri vasaku poole sulgumisel väljundis *c* impulssi ei teki. Seetõttu jagab iga triger saabuvate impulsside arvu kahega — iga kahe impulsi kohta, mis sisenevad sisendi *a* kaudu, tuleb üks väljundimpulss väljundis *c*. Loendaja kui terviku käitumine sisendisse saabuvate impulsside puhul on kujutatud struktuurskeemi all asuvas tabelis. Lihtsuse mõttes on tabelis trigerite sisendi kujutised ära jäetud, vaid on kujutatud ainult trigeri asendit näitavad huumlambid. Esimene impulss «süütab» esimese trigeri. Järgmine impulss kustutab esimese uuesti, s. o. viib ta lähteasendisse tagasi. Selle tulemusena tekib esimese trigeri väljundis *c* impulss, mis käivitab teise trigeri jne. Et iga triger jagab siseneva impulsside arvu kahega, siis näiteks kolmeastmeline loendaja jagab sisenevate impulsside arvu $2^3 = 8$-ga, kahekümneastmeline aga $2^{20} = 1\,048\,576$-ga. Nii saab miljonite impulsside loendamine sekundi jooksul täiesti võimalikuks.

Nagu selgub tabelist, moodustub neoonlampidest

paremalt vasakule lugedes saabunud impulsside arv kahendsüsteemis väljendatuna, kui lugeda «süttinud» triger vastavaks ühele, «kustunud» triger aga vastavaks nullile.



Impulsi jrk. nr.	I aste	II aste	III aste
0	●	●	●
1	○	●	●
2	●	○	●
3	○	○	●
4	●	●	○
5	○	●	○
6	●	○	○
7	○	○	○
0	●	●	●

Väljund-impulss

Joonis 77

Impulsside loendaja struktuurskeem ja loendaja üksikutele «sammudele» vastavad seisundid

Pärast kaheksanda impulsi saabumist tekib impulss lülituse väljundis ja kõik trigerid pöörduvad lähteasendisse tagasi. Üldisel juhul on säärase loendaja maht ehk *ülekandetegur,* s. o. arv, mis näitab, mitu korda loendaja

väljundist väljuv impulsside arv on väiksem sisenevast impulsside arvust, võrdne 2^n, kus n on loendaja üksikute astmete (trigerite) arv. Antud mahu puhul võib kergesti arvutada vajaliku astmete arvu:

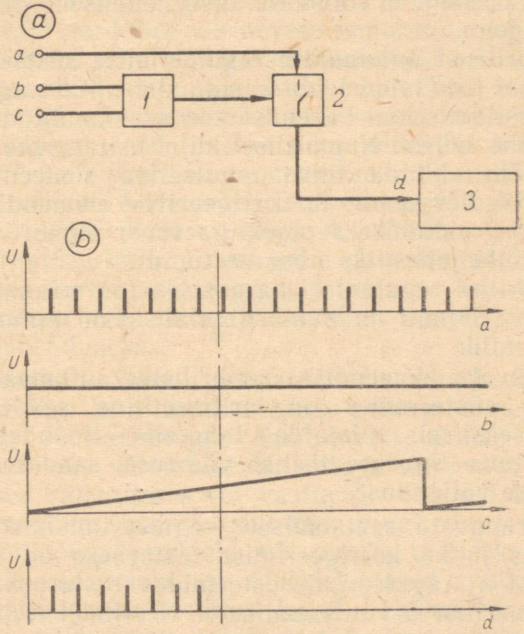
$$n \geqslant \log_2 a,$$

kus a on suurim arv, mida loendaja peab olema suuteline lugema. Näiteks kui $a = 1\,000\,000$, siis $\log_2 1\,000\,000 = 19{,}93$ ja $n = 20$.

Kirjeldatud loendaja puuduseks on see, et loetud tulemused esitatakse kahendsüsteemis. Kümnendsüsteemile üleminekuks tuleb loendaja nelja trigeri kaupa osadeks jagada ning varustada iga osa erilise loogikalise lülitusega, mille ülesandeks on muuta osa ümberarvutustegur võrdseks kümnega. Loogikaline lülitus peab olema ehitatud nii, et ta reageeriks koodile, mis tekib loendajas pärast üheksanda impulsi saabumist, ning tagaks loendaja tagasipöördumise nullile kümnenda impulsi saabumisel. See impulss viib siis neliku tagasi algasendisse, kusjuures neliku väljundis tekib impulss. Nii saavutatakse ümberarvutustegur 10. Kogu loendaja ümberarvutustegur võrdub siis $N = 10^n$, kus n on üksikute nelikute arv. Et iga neliku seisund on omakorda väljendatud kahendsüsteemis, siis säärase loendajaga seotud huumlambid näitavad loetud impulsside arvu kümnend-kahendsüsteemis. Vajaduse korral, vastavaid loogikalisi lülitusi kasutades, võib tulemuse esitada ka puhtakujulises kümnendsüsteemis.

Loendajaid kasutatakse käesoleval ajal mitte üksi elementaarosakeste loendamiseks, vaid ka reaks muudeks otstarveteks. Üldiselt võttes on loendaja seadis, mis võimaldab *unitaarkoodi*, s. o. koodi, mille arvväärtus võrdub impulsside arvuga, muuta kahend- või kümnend-kahendkoodiks. Sellega seoses kasutatakse loendajaid võlli pöörlemiskiiruse väljendamiseks näiteks kahendarvuna. Selleks tuleb loendaja sisend ühendada lihtsa anduriga, mis tekitab ühe impulsi iga võlli pöörde kohta. Loendaja lugem määratakse kindlaks võrdsete ajavahemikkude järel, viies sealjuures loendaja ühtlasi lähteasendisse tagasi. Saadud arvud näitavadki siis võlli pöörete arvu antud ajavahemiku jooksul. Loendaja võib samuti leida kasutamist pinge väljendamiseks ühel või teisel viisil

kooditud arvu kujul. Joonisel 78 on kujutatud lihtsa *numbrilise voltmeetri* struktuurskeem. Voltmeeter koosneb võrdlevast lülitusest *1*, lülitavast elemendist *2* ja loendajast *3*. Mõõtmistsükli alguses on lülitav element *2* avatud ning sisendi *a* kaudu saabuvad kindla sagedusega abiimpulsid suunduvad loendaja sisendisse. Sisendisse *b*



Joonis 78

a — numbrilise voltmeetri struktuurskeem; *b* — ajaline diagramm numbrilise voltmeetri töö selgitamiseks

juhitakse mõõdetav pinge, sisendisse *c* aga abiseadme poolt genereeritav, ühtlase kiirusega kasvav pinge. Hetkel, mil kasvav pinge sisendis *c* muutub suuremaks mõõdetavast pingest, annab võrdlev element *1* lülitavale elemendile *2* edasi impulsi. Viimane sulgeb selle tõttu sisendi *a* kaudu saabuvatele impulssidele tee loendajasse. Et pinge sisendis *c* kasvab ühtlase kiirusega, siis ajavahemik, mille jooksul püsiva sagedusega impulsid saa-

buvad loendajasse, on võrdeline mõõdetava pingega. Seega siis on ka loendajasse saabunud impulsside arv ning loendaja lugem võrdelised mõõdetava pingega, olles viimase mõõdupuuks. Tavaliselt töötab säärane voltmeeter pidevalt üksteisele järgnevate tsüklitena. Numbrilise voltmeetri paremuseks on täpne ja hästi loetav lugem, samuti võimalus otseühenduseks numbriliste süsteemidega.

Numbrilised automaatse reguleerimise süsteemid. Niisiis võivad loendajad leida kasutamist mitmesuguste näitajate esitamiseks kahendsüsteemis kooditud arvude kujul. Vähe sellest. Numbrilisel kujul esitatavate suuruste alusel võib ehitada terve reguleeriva süsteemi, kaasa arvatud võrdlev seadis ja korrigeerivad elemendid. Ainult regulaatori sidumiseks objektiga tuleb numbrilised suurused muuta pidevaiks ning vastupidi.

Numbrilise regulaatori paremuseks on eelkõige *suur täpsus*. Samuti on numbriline süsteem mitmes suhtes väga paindlik.

Võrdlevaks elemendiks numbrilistes automaatse reguleerimise süsteemides on aritmeetiline seade arvude lahutamiseks, mis võimaldab lahutada etteandesuurusest reguleeritava suuruse tõelise väärtuse, saades nii *vea* numbrilise väljenduse.

Mitmesuguste spetsiaalsete reguleerimisfunktsioonide täitmiseks ja ka korrigeerimise otstarbeks on säärastes numbrilistes reguleerimissüsteemides otstarbekas kasutada numbrilisi arvutusseadmeid. Paljudel juhtudel on siin tavaliste universaalsete numbriliste arvutusseadmete asemel kohane kasutada *numbrilisi diferentsiaalanalüsaatoreid*. Numbriline diferentsiaalanalüsaator sarnaneb oma võimalustelt ning struktuurilt matemaatilise analoogiga. Nagu matemaatilistel dünaamilistel analoogidelgi on ka numbrilise diferentsiaalanalüsaatori põhiliseks koostisosaks *integraator*. Oluliseks erinevuseks on aga see, et numbrilistes diferentsiaalanalüsaatorites ei tsirkuleeri arvud mitte elektripinge näol, vaid numbrilisel kujul, elektriliste impulsside kaudu väljendatud unitaarkoodidena. Suurused antakse sealjuures edasi nende *juurdekasvudena*. Näiteks impulsi olemasolu teatud hetkel tähendab suuruse kasvamist ühe ühiku võrra, impulsi puudumine aga suuruse vähenemist ühe ühiku võrra.

Integreeriva operatsioonvõimendi ülesandeid täidab niisugustes süsteemides impulsside loendaja. Tõepoolest, kui meenutame integreeriva lüli omadust, et tema väljundsignaali kasvamise kiirus on võrdeline sisendsignaali suurusega (vt. § 8), siis selgub, et kui loendaja sisendsignaaliks lugeda impulsside saabumise s a g e d u s t, siis väljundsuuruse — impulsside s u m m a kasvu kiirus on tõepoolest võrdeline sisenevate impulsside sagedusega.

Numbrilised diferentsiaalanalüsaatorid on oma ehituselt keerukamad matemaatilistest mudelitest, ent tunduvalt lihtsamad universaalsetest elektronarvutusmasinatest; nende käsitsemine on lihtsam ning detailide hulk palju väiksem. Teiselt poolt on numbrilised diferentsiaalanalüsaatorid vabad matemaatiliste analoogide põhipuudusest — mitteküllaldasest täpsusest. Mitmesuguste automaatse reguleerimise ülesannete lahendamisel, samuti otseselt reguleeriva süsteemi koostisosana kasutamiseks, on numbriline diferentsiaalanalüsaator sageli kõige sobivamaks lahenduseks.

Muundajad. Seoses numbriliste seadmete laialdase rakendamisega koos mitmesuguste pideva toimega seadmete ning töömasinatega omandavad olulise tähtsuse *muundajad*, mis võimaldavad esitada pidevaid suurusi numbrilises väljenduses või vastupidi — koodi kujul esitatud numbrilist suurust muundada pinge või voolu väärtuseks, võlli pöördenurgaks või muuks taoliseks. Üheks niisuguseks seadmeks on ülalkirjeldatud seade elektripingete esitamiseks kooditud kujul. Umbes samalaadne muundaja võib leida kasutamist ka mehaaniliste liikumiste esitamiseks koodi kujul, kui loendajasse juhitavate impulsside arv seada vastavusse masinaosa poolt läbitud pikkusühikute arvuga. Küllaldase täpsuse tagamiseks kasutatakse siin sageli klaasile kantud peene struktuuriga *difraktsioonvõresid*, mis ühenduses fotoelemendiga võivad anda ühe impulsi ühemikronise (tuhandikmillimeetrise) nihke kohta. Sääraseid seadmeid kasutatakse mitmesuguste metallitöötlemisseadmete lõikeriistade asendi määramiseks täpsete, mitmekohaliste arvude kujul.

Sageli tekib tarvidus mitmesuguste võllide pöördenurkade numbriliseks väljendamiseks.

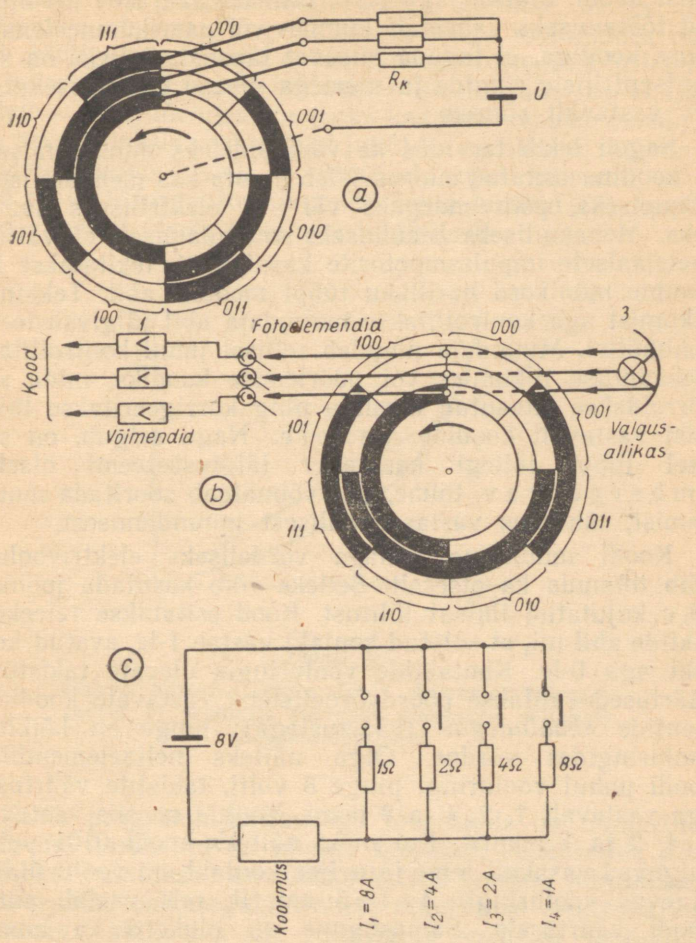
Selleks kasutatakse kontsentrilisteks ringideks jaotatud kettaid (joonis 79, *a*). Ketta üksikud ringid on varustatud sektoritega, mis esitavad koode. Sektorid võivad

olla elektrit juhtivast materjalist. Sellisel juhul tekitatakse koodisignaalid paralleelsel kujul vooluahelates, mis on kontaktharjade kaudu ühenduses vastavate ringidega. Joonisel on ringide elektrit juhtivad sektorid mustad, mittejuhtivad sektorid aga valged. Kood väljendub koormustakisteil R_k, kusjuures voolu olemasolu vastab ühele, voolu puudumine aga nullile. Käesolevas näites kooditakse ketta pöördenurk kolmeelemendilise koodi abil, kusjuures koodile vastavad kahendarvude väärtused on võrdelised ketta pöördenurgaga. Üldse on kolmeelemendilise koodi abil võimalik koodida kaheksa erinevat pöördenurga väärtust (tabel 7).

Tabel 7

Jrk. nr.	Nurk	Tavaline kood	Gray' kood
1	0—45°	000	000
2	45°—90°	001	001
3	90°—135°	010	011
4	135°—180°	011	010
5	180°—225°	100	110
6	225°—270°	101	111
7	270°—315°	110	101
8	315°—360°	111	100

Kui koodiva seadme konstruktsioonis pole liugkontaktide tarvitamine soovitav, võib seadme ehitada fotoelektrilisel printsiibil — läbipaistva kettana läbipaistmatute sektoritega, mida tastitakse fotoelektrilisel teel. Igal juhul jääb tavalise kahendkoodi kasutamisel säärasele muundajale üks oluline puudus — nimelt teatud nurkade puhul, näiteks kui nurk on täpselt 90°, muutub üheaegselt k a h e või enam koodielemendi väärtus. Et ükski tehniline seade ei suuda tagada nende muutuste absoluutselt täpset kokkusattumist, siis võib kergesti tekkida olukord, kus näiteks üks koodielement j u b a muutus, teine aga v e e l ei jõudnud muutuda. Tagajärjena tekib antud nurgale hoopiski mittevastav kood. Seda olukorda on hõlpus vältida, kasutades spetsiaalseid, nn. reflekskoode, milliste näiteks võib olla Gray' kood (vt. tabel 7). Nagu tabelist nähtub, muutub Gray' koodis üleminekul järgmisele muundatavale nurga väärtusele korraga alati ainult ü k s koodielement. Joonisel 79, *b* on kujutatud muundav ketas, millele



Joonis 79

a — kontaktmuundaja pöördenurga tavaliseks kahendkoodiks muundamiseks; *b* — fotoelektriline muundaja pöördenurga Gray' koodiks muundamiseks; *c* — kontaktmuundaja kahendkoodi muundamiseks vastava suurusega alalisvooluks

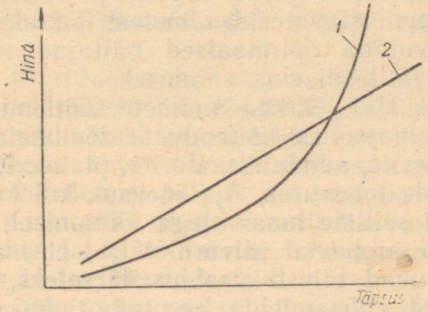
on kantud Gray' kood. Tastimine toimub siin fotoelektrilisel teel. Lihtsuse mõttes on siin vaadeldud kolmeelemendilist koodi, üldiselt aga valmistatakse säärased muundajad töötamiseks vähemalt kümne- või paarikümneelemendilise koodiga, et tagada piisavat täpsust. Selleks on siis kontsentriliste ringide ja nendega seotud tastimisseadiste arv vastavalt suurem.

Sageli tekib tarvidus ka vastupidiseks muundamiseks — koodina esitatud suurus tuleb muuta kas mehaaniliseks liikumiseks, pöördenurgaks või siis elektriliseks suuruseks. Mehaaniliseks liikumiseks muundamisel, et vältida spetsiaalsete impulssmootorite kasutamist, tekitatakse liikumine mõnikord harilikku tüüpi mootori abil. Tekkinud liikumist aga kontrollitakse muundaja abil jälgivsüsteemi põhimõttel. Muundaja muudab sellisel juhul kontrollitava mehaanilise liikumise või pöörlemise koodiks, mida siis võrreldakse etteantud koodiga ning korrigeeritakse liikumist vastavalt koodide v a h e l e. Nagu selgub, on sellisel juhul jällegi kasutatav jälgivsüsteemi otsekui ü m b e r p ö ö r a v toime, mis võimaldab sooritada muundamist, lähtudes vastassuunalisest muundamisest.

Koodi muutmine temaga võrdeliseks elektrivooluks võib toimuda ka otseselt. Selleks võib kasutada joonisel 79, *c*. kujutatud lihtsat lülitust. Kood esitatakse releekontaktide abil nii, et suletud kontakt vastab 1-le, avatud kontakt aga 0-le. Kontaktide vooluringis olevate takistuste väärtused valitakse pöördvõrdelistena vastavate koodielementide «*kaaludega*» (väärtustega); pinge on kõikides vooluringides võrdne. Olgu näiteks neljaelemendilise koodi puhul vooluringi pinge 8 volti, takistite väärtused aga vastavalt 1, 2, 4 ja 8 oomi. Voolud on siis vastavalt 8, 4, 2 ja 1 amprit. Kui nüüd näiteks koodi 0101 puhul sulguvad vasakult teine ja neljas kontakt, on voolu üldine tugevus vooluringis $4+1=5$ amprit, mis vastab antud koodi väärtusele. Samasugune on olukord ka muude koodi väärtuste puhul.

Numbriliste seadmete rakendustest. Viimasel ajal on kirjanduses väga palju juttu numbriliste seadmete kasutamisest automaatikas, kusjuures rõhutatakse numbriliste seadmete olulisi eeliseid pidevtoimeliste seadmete ees. Sageli tuuakse ära graafikud (joonis 80), mis näitavad, et juhul, kui seadmelt nõutakse suurt täpsust, on otstarbekam kasutada numbrilisi süsteeme.

Tegelikult on seni numbrilisi süsteeme kasutatud siiski üsna vähestel aladel ja piiratud ulatuses. Ennekõike tuleks siin nimetada programmjuhtimisega tööpinke, millest oli juttu juba eespool. Programmjuhtimisega tööpinkides toimub juhtimine nõutava suure täpsuse tõttu numbriliselt, kusjuures lähteandmed töötatakse üksikasjalisteks «käsklusteks» pingi tööorganite jaoks kas universaalse numbrilise arvutusmasina või mõnel juhul ka numbrilise diferentsiaalanalüsaatori abil. Numbrilisel kujul esinevad andmed pingi tööorganite liikumise kohta leiavad kasutamist juba vahetult nende liikumise juhtimiseks.



Joonis 80

Pideva toimega (kõver *1*) ja diskreetse toimega (kõver *2*) seadmete suhteline maksumus sõltuvalt seadme täpsusest

Peale programmjuhtimisega tööpinkide on numbrilisi süsteeme kasutatud ka muude keerukate süsteemide juhtimiseks. Laialdaselt on tuntud katsed lennuki juhtimiseks universaalse väikesegabariidilise numbrilise elektronarvutusmasina abil, mis on paigutatud vahetult lennukile. Säärase lahenduse eeliseks on peamiselt see, et üks universaalne arvutusmasin võib juhtida lennukit mitmesuguste programmide järgi, nagu näiteks «horisontaallend», «maandumine» jne. See kõik toimub ühe ja sellesama aparatuuri abil, tarvis on vaid vahetada programme, mis võib toimuda samuti automaatselt.

Üheks perspektiivsemaks elektronarvutusmasinate rakendamise võimaluseks on *andmete töötlemine* (ingl. k.

Data Processing). Selleks juhitakse piisava suurusega mäluseadist omavasse arvutusmasinasse kas sidekanalite kaudu või ka otseselt operaatori kaastegevusel tootmist iseloomustavad näitajad. Arvutusmasin on varustatud ulatusliku andurite ja sisendseadmete süsteemiga. Kui on tegemist arvestusalaste andmetega, seisneb nende töötlemine lihtsamal juhul sorteerimises ja summeerimises, vajaduse korral on aga ka võimalik materjalide, ressursside või transpordivahendite jaotuse ja kasutamise kõige otstarbekama kava väljatöötamine. Sedalaadi ülesanded on tavaliselt lahendatavad nn. *lineaarse programmeerimise* meetoditega.

Andurite süsteemi kaudu saadud ja vahetult tootmisprotsessi iseloomustavatest andmetest lähtudes on võimalik välja arvutada optimaalsed näitajad maksimaalse tootlikkuse, kvaliteedi vms. saamiseks.

Käesoleval ajal leiavad andmete töötlemise seadmed kasutamist esmajoones nõuandvate seadmetena operaatorite, dispetšerite, administraatorite, planeerijate jt. abistamiseks nende tegevuses. Aja jooksul, kui koguneb küllalt kogemusi selliste masinatega töötamisel, nende programmid aga arenevad niivõrd välja, et masina «nõuanded» muutuvad täiesti usaldusväärseteks, võib masinast väljuvaid «nõuandeid» kasutada juba otseselt töö juhtimiseks vastavate väljundseadiste ja täiturmehhanismide abil. Inimeste osaks jääb sel juhul üksnes kontrolli funktsioon. Usaldusväärsete programmide kõrval peab säärane süsteem omama ka piisavat *töökindlust*. Käesoleval ajal kasutatavad elektronarvutusmasinad vajavad teatavasti pidevat tehnilise personali «toetust». Sellele vaatamata tuleb nende masinate töös vahetpidamata ette tehnilisi rikkeid ja vigu.

Põhimõtteliselt võib universaalset elektronarvutusmasinat kasutada kõikjal, kus vaid on võimalik tema ülesannete ja nende lahendamise käigu täpne ja üksikasjaline formuleerimine programmi kujul. Intuitsiooni, instinkti ja «kuuendat meelt» elektronarvutusmasinad ei oma.

VI PEATÜKK

TELEMEHAANIKA

25. Telemehaanika üldpõhimõtteid

Üheks tööstuse arengu peasuunaks on käesoleval ajal mitmesuguste tööstuslike objektide kasv mitte ainult üksikute seadmete võimsuse või läbilaskevõime, vaid ka seadmete süsteemi territoriaalse ulatuse suurenemise tõttu. Kui veel võrdlemisi hiljuti oli paljudes tööstusharudes mõeldav, normaalne ning loomulik üksikute seadmete sõltumatu ning lahus töötamine, siis käesoleval ajal saab komplekssete tootmissüsteemide paremus üha selgemaks.

Kõige silmatorkavam on viimasel ajal olnud e n e r g i a s ü s t e e m i d e kiire kasv. Esialgsel vaatlusel näib olevat täiesti normaalne ning otstarbekohane niisugune korraldus, kus elektrijaam ehitatakse vahetult elektrienergia tarbija või tarbijate grupi juurde. Teise, eemal asuva tarbijate grupi juurde ehitatakse jälle oma elektrijaam ja nii edasi. Teiselt poolt on hästi teada, et kui ühendada eemal asuvad elektrijaamad omavahel kõrgepinge-elektrivõrkude kaudu, siis tekib rida äärmiselt tülikaid ning keerukaid kaasprobleeme. Üheks kõige raskemaks probleemiks nende hulgas on energiasüsteemi üksikute elektrijaamade kui ka elektrijaamade gruppide sünkroonse töö, s. o. süsteemi *stabiilsuse* säilitamine. Peale stabiilsuse probleemi esinevad süsteemides veel *sageduse reguleerimise*, *pingete ja võimsuste jaotumise* ning muud probleemid, mille lahendamine on tunduvalt raskem kui lahus töötavate elektrijaamade puhul.

Kuid vaatamata neile raskustele töötavad käesoleval ajal peaaegu kõik suuremad elektrijaamad omavahel süsteemidesse ühendatuna. Üksikute energiasüsteemide ruumiline ulatus kasvab üha. Käesoleval ajal ei eksisteeri

mitte üksnes üleriigilised, vaid isegi riikidevahelised energeetilised ühendused. Suurte energiasüsteemide peamiseks eeliseks on suure hulga otseste või kaudsete ühenduste olemasolu paljude energiat tootvate ja tarbivate keskuste vahel. Seetõttu suureneb süsteemi kui terviku t ö ö k i n d l u s, sest osa elektriliinide või -jaamade väljalangemisel võivad nendega seotud tarbijaid varustada süsteemi ülejäänud osad. Suured süsteemid on ka majanduslikult eelistatavad. Nimelt sõltub suurtes energiasüsteemides üksikute elektrijaamade koormus vähemal määral üksikute tarbijate poolt tarbitavast võimsusest, mis teatavasti pidevalt muutub. Süsteemi üldist elektrilist koormust on võimalik jaotada suurel määral meelevaldselt. Seda jaotamist toimetab *dispetšer*, koormates esimeses järjekorras neid elekrijaamu, mis antud olukorras toodavad kõige o d a v a m a t elektrienergiat.

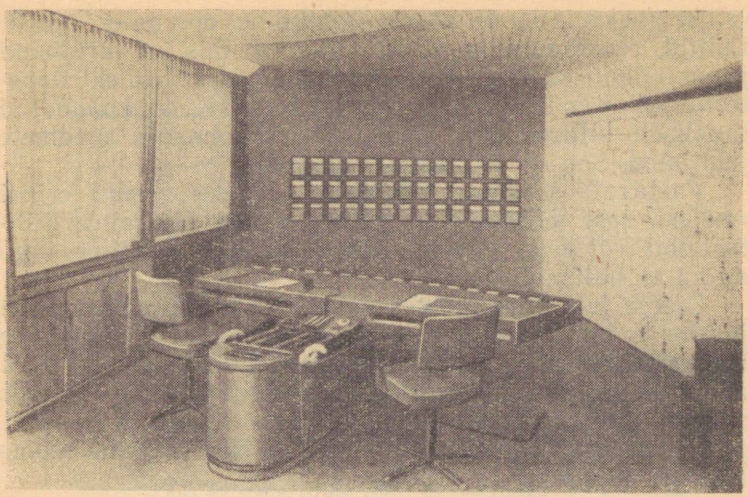
Kõrgepingeliinid energia kaugülekandeks võimaldavad otstarbekalt ära kasutada mitmesuguseid eemal asuvaid looduslikke energiavarusid. Võrdlemisi raskesti automatiseeritav ning kulukas kütuse vedu raudteel asendatakse siin hästi automatiseeritava energiatranspordiga elektrivoolu näol.

Umbes samasugune lugu on ka n a f t a ning g a a s k ü t u s e g a. On osutunud otstarbekaks ehitada sadade või isegi tuhandete kilomeetrite pikkusi torujuhtmeid, et transportida vedelaid või gaasilisi tooraineid leiukohast tarbijateni või edasiseks töötlemiseks.

Jättes kõrvale ülalnimetatud eriti laialdasele maa-alale levivad tootmisseadmed, tuleb märkida, et ka paljude teiste objektide, nagu näiteks kaevanduste, hüdrotehniliste ehitiste või ka suurte tehaste puhul võivad ühtse tootmis- ja transpordiprotsessiga seotud seadmed paikneda üsna laialdasel maa-alal.

Dispetšeriteenistus. Seoses ulatuslike tootmis- ja transpordisüsteemide kasvuga on omandanud üha olulisema tähtsuse spetsialist, keda nimetatakse *dispetšeriks*. Dispetšeri ülesandeks on suurte süsteemide töö jooksev koordineerimine, niisuguste jooksvate küsimuste pidev lahendamine, mida plaanis on võimatu ette näha peamiselt nende juhusliku iseloomu tõttu.

Kui esialgu kujutas dispetšer endast isikut, kes tegutses peamiselt telefonide ning oma töökohal asuvate kaartide, plaanide ning skeemide abil, siis viimasel ajal on



Joonis 81
Energiasüsteemi dispetšeripunkt

olukord põhjalikult muutunud. *Telemehaaniliste vahendite* abil on dispetšeril võimalik mitte üksnes saada pidevalt ülevaadet tema poolt juhitavate seadmete olukorrast, vaid ka ise aktiivselt vahele segada. Kõik tootmise või transpordi olulised sõlmed on otsekui koondatud dispetšeri töökohale. Kui mitmesugustest mõõteriistade näitudest, tabloodest ja transparentidest ei piisa olukorrast ülevaate saamiseks, kasutatakse *tööstusliku televisiooni* seadmeid, et tuua dispetšeripuldile mingi tähtsa tootmislõigu kujutis.

Kui neist tööd lihtsustavaist abinõudest hoolimata kujuneb dispetšeri töö juhitava süsteemi suure ulatuse tõttu ikkagi väga mahukaks, on automatiseerimise järgmiseks sammuks dispetšeri abistamine automaatjuhtimisseadmete rakendamise teel, mis oleksid arvutusmasinate kaastegevusel suutelised paljusid küsimusi lahendama iseseisvalt.

Otsene juhtimine. Tekib küsimus, millest siis õieti on välja kasvanud *telemehaanika.*

Väikeste, piiratud ulatusega seadmete puhul ei paku

erilisi raskusi nende otsene juhtimine operaatori poolt. Lülitid, reostaadid ja muud seadmed, mis on tarvilikud peaasjalikult samas ruumis asuva agregaadi elektrimootorite käivitamiseks ning reguleerimiseks, on koondatud tavaliselt lülituskilbile, mille juurest toimubki seadmete juhtimine. See on nn. *otsene juhtimine.*

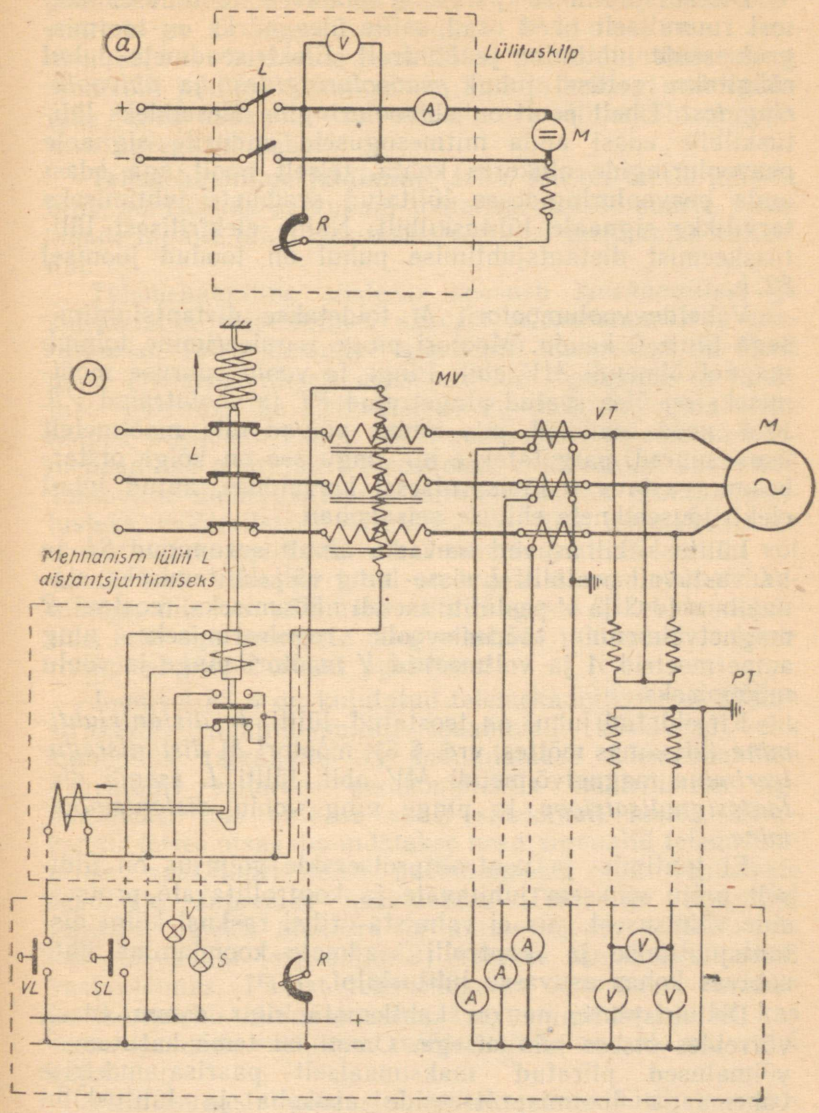
Vastavate suuruste mõõtmine ei paku samuti erilisi raskusi, sest mõõteriistad võivad asuda sealsamas lülituskilbil või selle vahetus läheduses. Samasugune lugu on ka signalisatsiooniga.

Otsese juhtimise näiteks võiks olla alalisvoolumootori juhtimise lülitusskeem (joonis 82, *a*). Mootori vooluring katkestatakse siin otseselt juhtimispuldis asuva lüliti *L* abil. Mootori pöörlemiskiiruse reguleerimine toimub samuti otseselt juhtimispuldis asuva reostaadi *R* abil. Voltmeetri *V* ja ampermeetri *A* abil on aga võimalik mõõta mootori tööpinget ja -voolu.

Säärane juhtimisprintsiip on ilmselt üsna primitiivne. Võimsate seadmete puhul on peavooluringide lülituskilbist läbijuhtimine väga ebaökonoomne ja tülikas. Juhtimisseadised ise muutuvad sellisel juhul samuti liiga suurteks ja kohmakateks lülituskilpi paigutamiseks. Kõrgemate pingetega töötavate seadmete puhul on peavooluringide lülituskilpi toomine ebasoovitav juba ohutustehnika seisukohast lähtudes.

Samalaadne olukord tekib ka aurukatelde, keemiatööstuse seadmete ja mitmesuguste muude tootmisseadmete reguleerimisel ning juhtimisel. Kui näiteks on tegemist kõrgeparameetrilise auruga ning jämedate torudega, ei ole torudesse ühendatud ventiilide lülituskilpi paigutamine kuidagi õigustatud. Sellistel juhtudel tuleb otsida teisi lahendusi, kui ei soovita iga ventiili või reguleerimisseadise käsitsemiseks ette näha koosseisulist masinisti või mehaanikut. Üheks lahenduseks, mis enamikul juhtudel aitab probleemi lahendada, on *distantsjuhtimine.*

Distantsjuhtimine. Tootmisseadmete juhtimiseks teatud vahemaa tagant rakendatakse distantsjuhtimist ja telemehaanilist juhtimist. Distantsjuhtimise korral kasutatakse iga käskluse edasiandmiseks omaette ühenduskanalit. Telemehaanilisel juhtimisel aga antakse mitmesuguseid käsklusi edasi ühe sidekanali kaudu, milleks kasutatakse eriseadmeid *sidekanalite tihendamiseks.*



Joonis 82

a — lülitusskeem mootori vahetu juhtimise puhul; *b* — mootori distantsjuhtimisseadme lülitusskeem

Distantsjuhtimise puhul eraldatakse tootmisseadmetest ruumiliselt need osad, mille ülesandeks on tootmisprotsesside juhtimine ja kontroll. Elektriseadmete puhul räägitakse sellisel juhul *peavooluringidest* ja *abivooluringidest*. Ühelt poolt on abivooluringide ülesandeks lülituskilbile edasi anda mitmesuguseid andurite signaale peavooluringide olukorra kohta, teiselt poolt aga edasi anda peavooluringidesse lülitatud seadmete juhtimiseks tarvilikke signaale lülituskilbilt. Näide elektrilisest lülitusskeemist distantsjuhtimise puhul on toodud joonisel 82, *b*.

Vahelduvvoolumootorit *M* toidetakse distantsjuhtimisega lüliti *L* kaudu. Mootori pinge reguleerimine toimub magnetvõimendi *MV* abil. Pinge ja voolu suuruse mõõtmiseks on üles seatud pingetrafod *PT* ja voolutrafod *VT*. Kõik need seadmed, mis muide võivad olla mõõtmetelt üsna suured, paigutatakse nii, nagu see on kõige otstarbekam vastava tootmisprotsessi korralduse, antud juhul elektrijõuseadmete ehituse seisukohalt.

Lülituskilbil asuvad seevastu ainult surunupud *SL* ja *VL* vastavalt pealüliti *L* sisse- ning väljalülitamiseks, signaallambid *S* ja *V* pealüliti asendi näitamiseks, reostaat *R* magnetvõimendi tüürimisvoolu reguleerimiseks ning ampermeetrid *A* ja voltmeetrid *V* mootori pinge ja voolu mõõtmiseks.

Kirjeldatud juhul on teostatud lüliti *L* *distantsjuhtimine* (kitsamas mõttes, vrd. § 3), mootori *M* *distantsreguleerimine* magnetvõimendi *MV* abil, lüliti *L* asendi *distantssignalisatsioon* ja pinge ning voolu *distantsmõõtmine*.

Et juhtimis- ja kontrolliprotsesside võimsus on üldiselt palju väiksem juhitavate ja kontrollitavate protsesside võimsusest, siis ei valmista erilisi raskusi kõigi distantsjuhtimise ja -kontrolli seadmete koondamine ühte sobivas kohas asuvasse lülituskilpi.

Distantsjuhtimine on kahtlemata suur samm edasi, võrreldes otsese juhtimisega. Ometi on tema kasutamise võimalused piiratud maksimaalselt paarisajameetrise vahemaaga tootmisprotsesside asukoha ja lülituskilbi vahel. Vastasel juhul kujunevad pinge- või survelangud (hüdrauliliste ja pneumaatiliste süsteemide puhul) juhtmeis või torustikes liiga suurteks, abijuhtmestik ise aga ulatuslikuks ning kalliks. Peale selle, hüdrauliliste ning

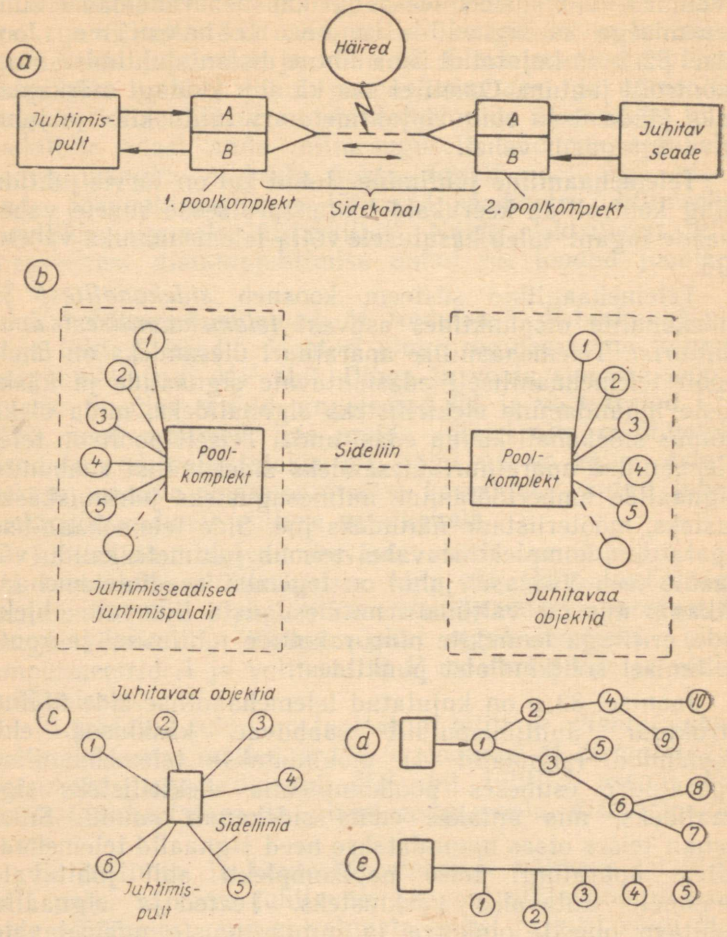
pneumaatiliste süsteemide puhul kaasneb vahemaade suurenemisega ka signaalide tunduv hilinemine. Joonisel 82, *b* on kujutatud üsna lihtne distantsjuhtimise ning -kontrolli juhtum. Ometi ei saa ka siin kuidagi märkamatuks jääda üsna suur abijuhtmete arv lülituskilbi ja juhitava agregaadi vahel.

Telemehaaniline juhtimine. Juhul kui on tarvis juhtida ning kontrollida keerukaid tootmisprotsesse suurte vahemaade tagant, tuleb kasutusele võtta telemehaanika vahendid.

Telemehaaniline süsteem koosneb *sidekanalitest* ja sidekanalite otspunktides asuvast *telemehaanilisest aparatuurist*. Telemehaanilise aparatuuri ülesandeks on ühelt poolt telemehaaniliselt edasiantavate signaalide ja käskluste muundamine elektrilisteks signaalideks, mida oleks hõlpus sidekanali kaudu edasi anda. Teiselt poolt on telemehaanilise aparatuuri ülesandeks sidekanalist saabunud signaalide ümbertöötamine mitmesugusteks juhtimiskäsklusteks, mõõteriistade näitudeks jne. Side telemehaanilise aparatuuri komplektide vahel toimub juhtmete kaudu või raadio teel. Viimasel juhul on tegemist raadiotelemehaanikaga, mis on vältimatu mitmesuguste liikuvate objektide, eriti aga lennukite ning rakettide juhtimisel ja kontrollimisel kohtkindlaist punktidest.

Joonisel 83, *a* on kujutatud telemehaanilise side üldine struktuur. Juhtimispuldilt saabuvad käsklused ehk komandod (signaalid *A*) muundatakse telemehaanilise aparatuuri esimeses poolkomplektis elektrilisteks signaalideks, mis antakse edasi sidekanali kaudu. Sidekanali teises otsas muundatakse need signaalid telemehaanilise aparatuuri teise poolkomplekti abil juhitavale seadmele antavaiks käsklusteks. Teated ja signaalid juhitava objekti olukorra ja mitmesuguste mõõdetavate suuruste kohta (signaalid *B*) antakse samal viisil edasi vastassuunas. Pärast telemehaanika aparatuuri esimese poolkomplekti läbimist esitatakse nad juhtimiskilbil kas signaallampide süttimise, mõõteriistade näitude või muul kujul.

Mitmesugustel põhjustel, näiteks amtosfääriliste elektrilahenduste tagajärjel, tekivad kõigis sidekanaleis häirivad signaalid. Telemehaaniline aparatuur peab seepärast töötama küllalt *häirekindlate* signaalidega. Signaalide häirekindluse tõstmiseks kooditakse nad isekorrigeerivate



Joonis 83

a — telemehaanilise side üldine struktuurskeem; *b* — sidekanali tihendamine; *c* — radiaalne liinidesüsteem; *d* — hargnev liinidesüsteem; *e* — kiirekujuline liinidesüsteem

koodidena (vt. § 19) või siis kasutatakse signaalide k o r d a m i s t.

Üldiselt on mingi objekti telemehaaniliseks juhtimi-

seks tarvis edasi anda terve rida erinevaid signaale seadme mitmesuguste osade juhtimiseks. Selleks kasutatakse enamasti ühtainust sideliini. Et ühe liini kaudu mitmesuguseid signaale ja käsklusi edasi anda, peab telemehaaniline aparatuur võimaldama *sidekanaleid tihendada*, s. o. edasi anda mitmesuguseid käsklusi üheaegselt või järjestikku (joonis 83, *b*).

Sageli tuleb telemehaaniliste vahendite abil juhtida paljusid objekte, mis on paigutatud laialdasele maa-alale. Sellisel juhul kerkib üles probleem, kuidas võimalikult vähendada selleks tarvilike sideliinide kui kõige kulukamate telemehaanika seadmete ulatust. *Radiaalne* süsteem (joonis 83, *c*) on ilmselt ebaökonoomne tarviliku sideliinide kogupikkuse seisukohalt. Seepärast kasutatakse sageli *hargnevat* (joonis 83, *d*) või *kiirekujulist* (joonis 83, *e*) sideliinide süsteemi. Viimastel juhtudel toimub mitmesuguste objektide juhtimine sama liini kaudu jällegi sideliini tihendamise võtete abil, s. o. kasutatakse erinevate objektide jaoks erinevaid signaale.

26. Signaalide edasiandmise võimalused

Telemehaanilisel juhtimisel, samuti nagu distantsjuhtimiselgi, tuleb edasi anda väga mitmesuguse iseloomuga signaale, nagu signaalid mitmesuguste seadmete seisundi kohta, mõõtmisandmed, signaalid mitmesuguste juhitava seadme osade juhtimiseks ja reguleerimiseks. Vastavalt sellele eristatakse ka *kaugsignalisatsiooni, kaugmõõtmist, kaugjuhtimist* ja *kaugreguleerimist*. Telemehaaniline aparatuur võimaldab tavaliselt teostada kõiki neid operatsioone. Telemehaanilise aparatuuri sidekanali kummaski otspunktis asuvad poolkomplektid sisaldavad sellisel juhul teatud arvu kaugmõõtmise, kaugsignalisatsiooni, kaugjuhtimise ja kaugreguleerimise *kanaleid*, s. o. võimalusi vastava arvu seadmete telemehaaniliseks ühendamiseks juhtimispuldiga ühe sideliini kaudu.

Tehniliselt erinevad need kanalid peamiselt oma tegutsemiskiiruse ja selle poolest, kas nende kaudu on võimalik edasi anda ainult diskreetseid käsklusi («sisse või välja lülitada», «ei—jaa») või siis pidevalt muutuvaid suurusi (mõõtmisandmeid). Tegutsemiskiiruse seisukohalt on näiteks hüdrogeneraatori poolt võrku juhitava voolu

väärtuste muutumist tarvis jälgida pidevalt, kuna sama generaatori laagrite temperatuuri võib mõõta teatud suuremate ajavahemike järel, sest see muutub võrdlemisi aeglaselt.

Kõiki neid asjaolusid arvestatakse otstarbeka telemehaanilise süsteemi koostamisel.

Elektriliste signaalide tunnused. Lihtsaimaks mooduseks teate edasiandmisel tavalise kahest juhtmest koosneva kaabel- või õhuliini kaudu on voolu sisselülitamine ning katkestamine. Nii saab aga edasi anda ainult kaks erinevat teadet — ühe tunnuseks on voolu puudumine, teise tunnuseks voolu olemasolu. Samasugune on lugu ka raadiosidekanali puhul. Ka siin võib signaali olemasolu tähendada üht, signaali puudumine aga teist käsklust või teadet. Näiteks võib vastuvõtjaga ühendatud relee signaali olemasolu puhul elektrimootori sisse, signaali katkemisel aga uuesti välja lülitada. Ometi on enamikel juhtudest telemehaaniliselt juhitav objekt suur ning keeruline. Tema juhtimiseks on tarvis edasi anda palju mitmesuguseid käsklusi. Sama probleem kerkib üles kaugmõõtmise puhul, mil on tarvis edasi anda üks sadadest mõõdetava suuruse võimalikest väärtustest. Näiteks televoltmeeter mõõtepiirkonnaga nullist kuni saja viiekümne voldini ning täpsusega mitte alla ± 1 voldi peab olema suuteline edasi andma järgmisi erinevaid teateid:

000 volti,
001 volti,
002 volti,
.....
.....
.....
150 volti.

See on kokku 151 erineva sisuga teadet. Esimesel pilgul näib olevat lihtsaimaks lahenduseks mõõdetava pinge otsene sideliini klemmidele juhtimine ning sama pinge mõõtmine liini teises otsas küllalt täpse voltmeetri abil. Tegelikult ei ole see nii lihtne. Peamised raskused seisnevad esiteks selles, et mistahes sideliini pingestamisel tekib vool läbi liini isolatsiooni, nn. *kaovool*. Kaovoolu suurus ei ole püsiv, vaid sõltub peale pinge väärtuse veel tervest reast enam või vähem juhusliku iseloomuga tegureist, nagu ilmastikuoludest, temperatuurist, liini vanusest jne. Teiseks omab iga sideliin elektritakistust liini

läbiva voolu suhtes. Seetõttu tekib liinil *pingelang*, mille suurus muutub samuti juhuslikkudest asjaoludest sõltuvalt. Pikkade liinide puhul võib pingelang omada üsnagi tunduvat suurust.

Olgu näiteks pingelangu suurus niisugune, et väljundpinge on vahemikus 60—90% sisendpingest. Seega kui pinge on 150 volti, siis liini lõpus on pinge 90 ja 135 voldi vahel, 99-voldise sisendpinge korral on pinge liini lõpus 58—89 voldi piires ja nii edasi. Vahepealseid mõõdetava pinge väärtusi pole liini lõpus enam võimalik eristada. Jätkates arvutamist samal viisil, võib koostada tabeli.

Tabel 8

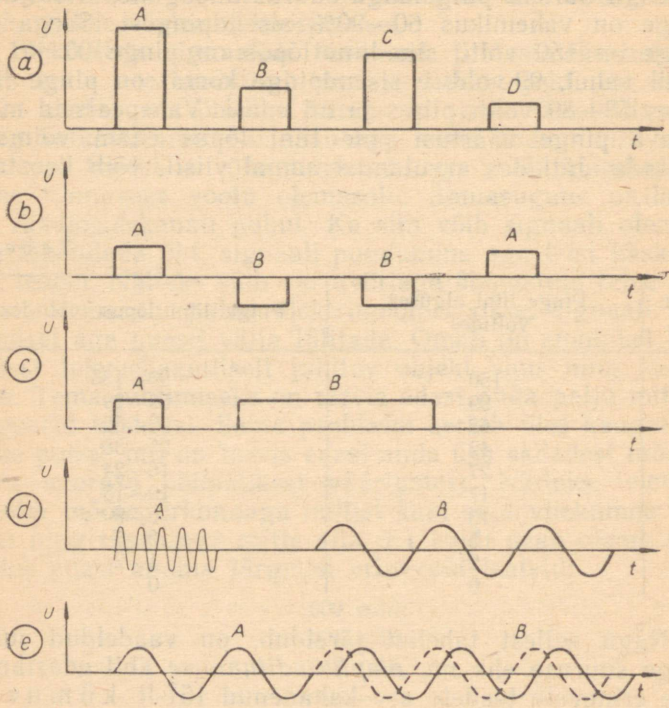
Jrk. nr.	Pinge liini alguses, voltides	Pinge liini lõpus, voltides
1	150	90—135
2	99	59—89
3	65	39—58
4	42	25—38
5	27	16—24
6	17	10—15
7	10	6—9
8	5	3—5
9	2	1—2
10	0	0

Nagu sellest tabelist järeldub, on vaadeldud juhul pinge suuruse ehk nn. *amplituuditunnuse* abil edasiantavate erinevate teadete arv kahanenud 151-lt k ü m n e l e. Nii et amplituuditunnuse abil edasiantavate teadete arv on üsna piiratud. Mitmesugustel põhjustel, peamiselt süsteemi *töökindluse* tagamiseks, valitakse amplituuditunnuste arv veel väiksem. Tavaliselt piirdutakse ühe, kahe või äärmisel juhul kolme pingenivooga.

Õnneks on peale pinge või voolu s u u r u s e liinis olemas veel terve rida tunnuseid, milliseid võib samuti kasutada erinevate teadete või komandode edasiandmiseks. Üheks niisuguseks tunnuseks on *polaarsus*. Sel viisil võib edasi anda kolm teadet: voolu puudumine, vool positiivses suunas ja vool negatiivses suunas.

Joonisel 84, *a* on graafiliselt kujutatud amplituuditunnusega signaalid, joonisel 84, *b* aga polaarsustunnusega signaalid.

Mitmesuguse sisuga teadete edasiandmiseks on võimalik ära kasutada ka aega. Joonisel 84, *c* on kujutatud impulsid, mida võib eristada nende erineva kestuse põhjal. Erineva kestusega impulsid tähendavad erinevaid



Joonis 84

a — amplituuditunnusega signaalid; *b* — polaarsustunnusega signaalid; *c* — ajatunnusega signaalid; *d* — sagedustunnusega signaalid; *e* — faasitunnusega signaalid

teateid. Et impulsi kestuse, samuti nagu amplituudigi määramine toimub teatud veaga, on ka erinevate *ajatunnustega* impulsside arv võrdlemisi piiratud. Et võimalike edasiantavate teadete arvu suurendada, tuleb mitmesuguste tunnustega signaalidest moodustada koodid (vt. § 19). Et väheste koodielementide varal on võimalik koostada kümneid ning sadu erinevaid kombineeritud signaale, on koodide kasutamine üsna efektiivne. Tuntuimaks koodiks

on morsetähestik, mis kasutab koodielementidena erineva ajatunnusega — pikka ja lühikest — signaali.

Amplituudi-, polaarsus- ja ajatunnusega signaalid ja nendest moodustatud koodid sobivad hästi mitmesuguste «ei—jaa»-tüüpi teadete, arvude või tähtede edasiandmiseks. Amplituudi-, polaarsus- või ajatunnusega signaalid on hõlpsasti formeeritavad relee- või elektronlülituste abil. Erinevate tunnustega signaalide eraldamine vastuvõtupunkti aparatuuris on samuti hõlpsasti teostatav samade lülitustega. Koodide moodustamiseks ja dešifreerimiseks kasutatakse aga dioodvõresid või muud tüüpi loogikalisi lülitusi (vt. § 20). Et loogikalised lülitused on tavaliselt kohased paralleelsete koodidega töötamiseks, sidekanalisse on aga koodielemente võimalik juhtida ainult ajaliselt üksteise järel, kasutatakse paralleelsete koodide järjestikusteks ja järjestikuste koodide uuesti paralleelseks muutmiseks *nihkeregistreid* (vt. § 21).

Koodide abil on põhimõtteliselt võimalik edasi anda mistahes suurusi. Erinevate teadete edasiandmist erinevate signaalide kombinatsioonidega ehk koodidega nimetatakse ka *kombinatsioonimeetodiks.* Siiski on paljudel juhtudel, eriti siis, kui edasiantavad suurused on pidevad, sobivam kasutada muid meetodeid, et vältida pidevate suuruste muutmist koodideks ja vastupidi. Üks niisugune võimalus on pideva suuruse edasiandmine liini juhitava vahelduvvoolu sageduse kujul.

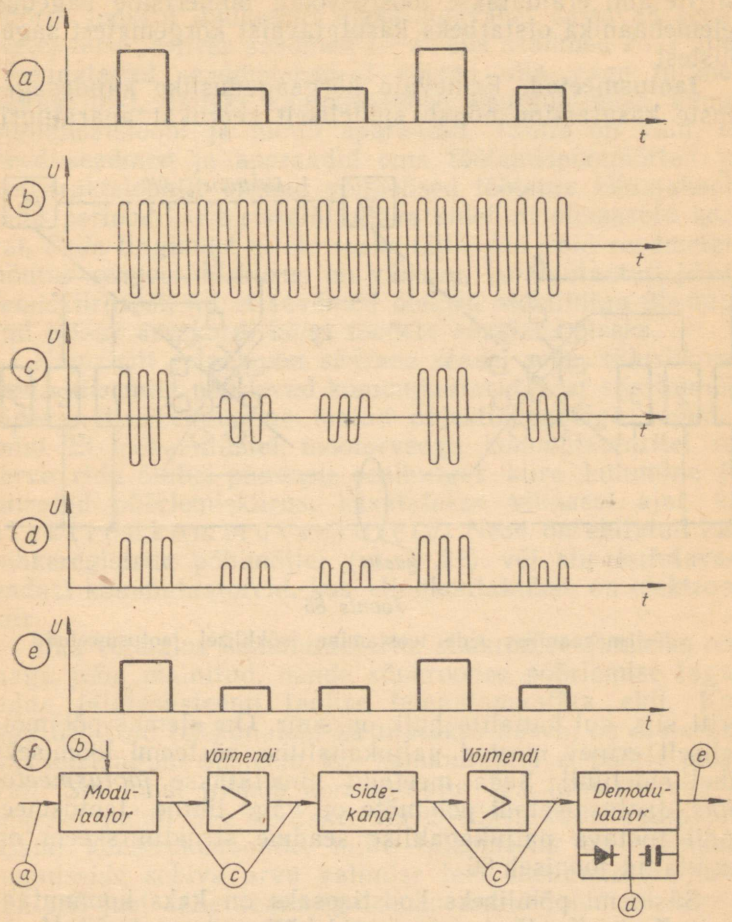
Vahelduvvoolu abil edasiantavad signaalid. Vahelduvvoolusignaali põhiliseks tunnuseks on tema sagedus, s. o. perioodide arv ajaühikus. Erineva sagedusega signaalide abil võib edasi anda erinevaid teateid, nagu on kujutatud joonisel 84, *d.* Sagedustunnus on võrdlemisi kindel tunnus, mis ei muutu mitmesuguste sideliini poolt avaldatavate kõrvalmõjude toimel. Ka on üksikute sageduste eraldamine ja genereerimine võrdlemisi hõlpus. Üldiselt kasutatakse selleks elektrilisi võnkeringe, viimasel ajal aga ka mehaanilisi resonaatoreid, mis töötavad analoogiliselt helihargiga. Kui meenutada, et näiteks klaveril on helisageduste vahemikku mahutatud üle viiekümne erineva heli, mida küllalt «terava» häälestusega seadme abil eksimatult eristada võib, saab selgeks, et sagedustunnuse abil on võimalik edasi anda üsna palju erinevaid teateid.

Peale selle võib vahelduvvoolu puhul kasutada ka nn. *faasitunnust*. Faasitunnuse olemus selgub jooniselt 84, *e*. Siin antakse erinevad teated edasi sama sagedusega, ent erineva *faasiga*, s. o. erineva ajalise nihkega vahelduvvoolude abil. Faasitunnuse abil signaalide edasiandmiseks peab faasitunnuse kindlakstegemiseks olema kasutada mingisugune b a a s, s. o. vahelduvvool, mille sagedus ja faas ei muutu ning mille s u h t e s antud signaali faasi võiks mõõta. Niisuguseks baasiks võib olla telemehaaniliste punktide ühise vahelduvvoolu-toitevõrgu sagedus.

Vahelduvvoolu puhul on samuti võimalik ka amplituuditunnuse kasutamine. Amplituuditunnusega signaalide edasiandmise käik on skemaatiliselt kujutatud joonisel 85.

Edasiantav signaal (*a*) ja *kandesagedus* (*b*) suunatakse *modulaatorisse*. Moduleeritud ja võimendatud kandesagedus (*c*) juhitakse sidekanalisse. Sidekanalist väljuvat signaali võimendatakse uuesti ning demoduleeritakse (*d*). Demoduleerimine seisneb moduleeritud kandesageduse detekteerimises dioodiga ning järgnevas silumises vastava filtri abil. Tulemuseks on lähtesignaalile vastav demoduleeritud signaal (*e*). Seadme struktuurskeem on kujutatud joonisel 85, *f*. Signaalide edasiandmisel moduleeritud vahelduvvooluga on tingimuseks, et kandesagedus oleks mitu korda suurem edasiantavate impulsside maksimaalsest sagedusest, vastasel juhul esineb liiga suur impulsside moonutus.

Amplituuditunnuse kasutamine vahelduvvoolusignaalide puhul on siiski väga raske, sest rea muundamiste tagajärjel on viga amplituudimuutuste edasiandmisel suur. Kuid vahelduvvoolul on see oluline eelis, et sama sidekanali kaudu saab samaaegselt edasi anda palju e r i n e v a t e k a n d e s a g e d u s t e g a signaale. Erinevad kandesagedused koos nende poolt «kantava» modulatsiooniga on vastuvõtuseadmes hõlpsasti eraldatavad vastavate elektrifiltrite abil. Olukord on täiesti analoogiline erinevate raadiosaadete edasiandmisega. Ühe vastuvõtja asemel on telemehaanilises süsteemis aga rida «vastuvõtjaid», milledest igaüks on häälestatud oma «jaamale» ning ühendatud omaette telemehaaniliste seadmetega.

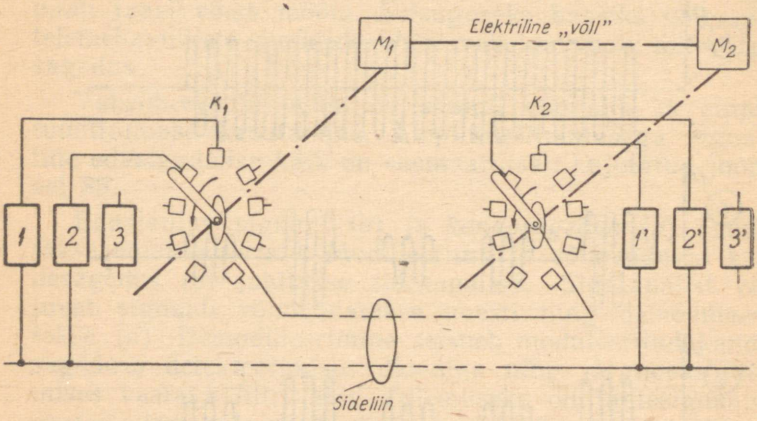


Joonis 85

a — edasiantavad amplituuditunnusega signaalid; *b* — kandesagedus; *c* — kandesageduslik signaal pärast moduleerimist amplituuditunnusega signaalide abil; *d* — sama signaal pärast detekteerimist; *e* — sama signaal pärast kandesagedusliku komponendi eraldamist (silumist); *f* — kõrgsagedusliku sidekanali struktuurskeem

Energiasüsteemide telemehaanikas kasutatakse sidekanalina laialdaselt kõrgepingeliine, kusjuures vastavate filtrite abil eraldatakse tööstusvoolu 50-hertsine sagedus telemehaanika otstarbeks kasutatavaist kõrgematest sagedustest.

Jaotusmeetod. Erinevate kõrgsageduslike kandesageduste kasutamine nõuab suhteliselt keerukat aparatuuri,



Joonis 86

Telemehaanilise side teostamine tsüklilisel jaotusmeetodil

eriti siis, kui kanalite hulk on suur. On olemas põhimõtteliselt erinev meetod paljukanalilise süsteemi loomiseks ühel sideliinil. Seda meetodit nimetatakse *jaotusmeetodiks*. Jaotusmeetodi põhimõte on väga lihtne. Jaotusmeetodil töötava paljukanalilise seadme struktuurskeem on kujutatud joonisel 86.

Süsteemi põhiliseks koostisosaks on kaks kommutaatorit K_1 ja K_2. Kommutaatoreid käitavad mootorid M_1 ja M_2. Kommutaatorid asuvad sideliini kummaski otsas, omavad võrdse arvu kontakte (positsioone) ning peavad pöörlema täiesti sünkroonselt (nn. *tsükliline jaotusmeetod*). Sünkroonne töö tagatakse tavaliselt sel teel, et vastava automaatse seadme abil antakse iga kommutaatorite täispöörde ajal edasi kontrollimpulss, mis võimaldab kommutaatorite sünkronismi automaatselt kontrollida ja korrigeerida. Võib kasutada ka muid mee-

todeid sünkroonse pöörlemise, s. o. «elektrilise võlli» teostamiseks. Kui kommutaatorite sünkroonse pöörlemise tingimus on täidetud, siis ühendatakse iga kommutaatorite pöörde jooksul lühikeseks ajaks omavahel vastavad seadmetepaarid: esiteks seadmed *1—1'*, siis seadmed *2—2'* jne. Ühendatavad seadmetepaarid võivad olla väga mitmesugust liiki, näiteks kaugmõõtmise, kaugjuhtimise, kaugsignalisatsiooni ja muud aparaadid. Tähtis on vaid, et need seadmed ja aparaadid oma töötamispõhimõttelt ja konstruktsioonilt oleksid võimelised töötama lühiajaliselt ning perioodiliselt sisselülitatava sideliini olemasolu korral. Seda tingimust ei ole raske täita, kui vaid seadmetelt nõutav reageerimiskiirus on väiksem kommutaatori pöörlemiskiirusest, nii et seadmed oleksid sideliiniga ühendatud piisav arv kordi kõigi teadete edasiandmiseks.

Nagu siit selgub, on säärane seade seda täiuslikum, mida kiiremini pöörlevad kommutaatorid, sest siis toimub sidekanali ühendamine teatud objektidepaariga sagedamini. Et mehaanilistel, mootorveoga kommutaatoritel on terve rida olulisi puudusi, sealhulgas kiire kulumine ja piiratud pöörlemiskiirus, kasutatakse viimasel ajal ka elektronkommutaatoreid. Need on ehitatud kas nihkeregistrite põhimõttel (vt. § 21) või siis kujutavad endast kommutaatoreid, kus «liugkontaktiks» on elektronkiir.

Üks võimalus kommutaatorite sünkroniseerimiseks on, nagu juba mainitud, nende sünkroonse pöörlemise tagamine jälgivsüsteemi taolise teleautomaatika abil. Kui aga üksikuid telekanaleid kasutatakse harva, on otstarbekas teistsugune süsteem, kus kommutaator ei pöörle pidevalt. Sel juhul nihkub kommutaator iga liinist saabuva impulsi puhul ühe kontakti võrra edasi, tänu vastavale ajami konstruktsioonile, mille tulemusena on võimalik impulsside sobiva arvu valimise teel ühendada kommutaatorit just selle seadmega, kuhu antud juhul on tarvis signaali edasi anda. Signaalide andmise ajal seisab kommutaator paigal. Loomulikult on niisuguse süsteemi puhul võimalik ainult ühe suuruse üheaegne edasiandmine. See süsteem kannab *atsüklilise jaotusmeetodi* nimetust.

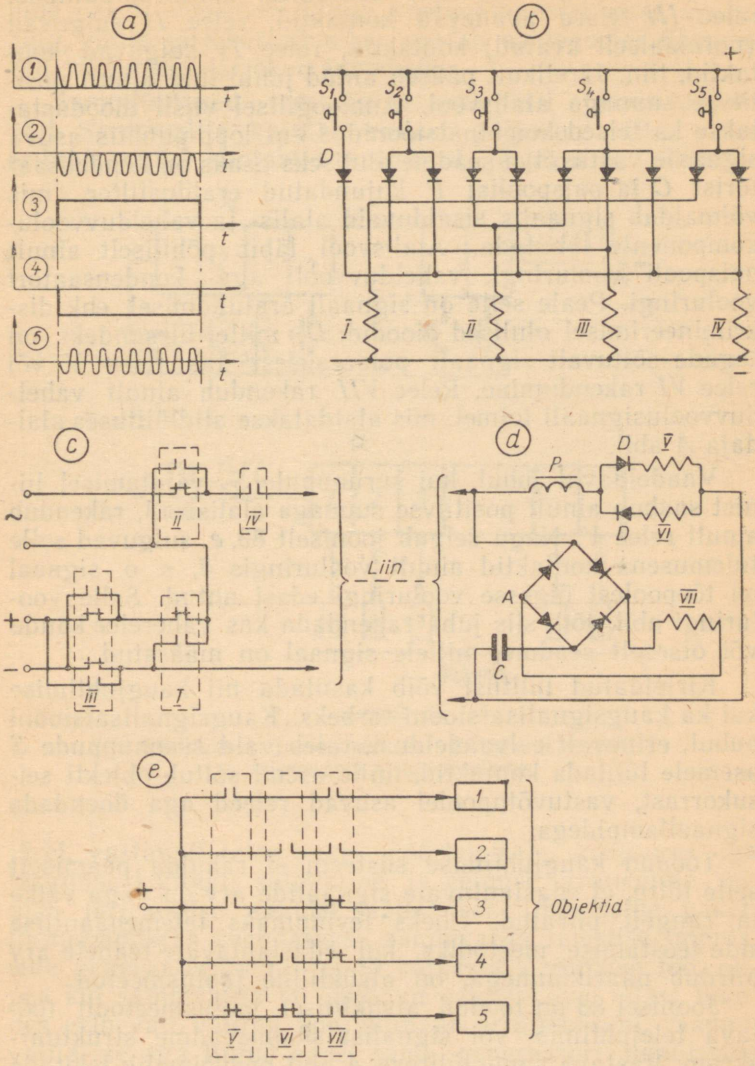
Käesoleval ajal rakendatakse väga mitmesugust telemehaanilist aparatuuri nii raadio- kui ka traatsidekanaleil kasutamiseks. Telemehaanilise aparatuuri täielikku standardiseerimist ei ole seni läbi viidud. Üldiseks tendentsiks on siiski püüe võimalust mööda üle minna laialdaselt levinud releelise aparatuuri kasutamiselt *kontaktitutele* süsteemidele. Kontaktitud telemehaanilised süsteemid on ehitatud peamiselt täisnurkse hüstereesisilmusega magnetiliste materjalide alusel. Mõningal määral kasutatakse ka p o o l j u h t s e a d i s e i d. Omaette tehnikat kasutab raadiotelemehaanika ning tööstuslik televisioon.

Kaugjuhtimine ja kaugsignalisatsioon. Kaugjuhtimise seadmed esinevad harva iseseisvalt. Enamasti kasutatakse kaugsignalisatsiooni koos kaugjuhtimisega selleks, et pidevalt kontrollida kaugjuhtimise resultaate. Kaugjuhtimise ja kaugsignalisatsiooni tehniline teostamine on küllalt sarnane, sest mõlemal juhul antakse edasi üksikud diskreetsed signaalid või komandod vormis «ei—jaa», sellal kui kaugmõõtmise ja kaugreguleerimise puhul peavad signaalid enamasti vastama küsimusele «kui palju?».

Joonisel 87 on toodud näitena lihtne lülitus, mis võimaldab kombineeritud tunnuste abil edasi anda kuni viis erinevat signaali.

Signaalide moodustamiseks kasutatakse alalisvoolu polaarsustunnuste ja vahelduvvoolu kombinatsioone. Kokku on siin, amplituuditunnuseid kasutamata, viis võimalikku kombinatsiooni: positiivse suunaga alalisvool koos vahelduvvooluga, negatiivse suunaga alalisvool koos vahelduvvooluga, positiivse suunaga alalisvool, negatiivse suunaga alalisvool ning üksnes vahelduvvool (joonis 87, *a*). Vastavalt neile kombinatsioonidele on koostatud lülitus signaalide saatmiseks (joonis 87, *b*). Vajutades ühele surunuppudest *S*, lülitub sisse liinirelee *IV*, mis lülitab vooluallikad liinile, ning vastav kombinatsioon releedest *I—III*. Releede sisselülitamine toimub dioodidest *D* moodustatud loogikalise lülituse abil. See lülitus on koostatud nii, et mistahes surunupule S_1—S_5 vajutamisel saatepoolel sulgub vastav vooluring vastuvõtupoolel.

Antud lülituse puhul, vajutades näiteks surunupule S_3, lülituvad sisse teine ja neljas relee. Selle tulemusena (joonis 87, *c*) tekib järgmine vooluring: liin, relee *III* avane-



Joonis 87

a — vahelduvvoolusignaalidest ja polaarsustunnusega alalisvoolusignaalidest moodustatud kombinatsioonid viie eri käskluse edasiandmiseks; *b* — saatva poolkomplekti lülitusskeem; *c* — releede kontaktide lülitusskeem; *d* — vastuvõtva poolkomplekti lülitusskeem; *e* — releede kontaktide lülitusskeem

vad (normaalselt suletud) kontaktid, alalisvooluallikas, relee *III* teised avanevad kontaktid, relee *II* sulguvad (normaalselt avatud) kontaktid, relee *IV* sulguvad kontaktid, liin. Järelikult pääseb antud juhul liini ainult positiivse suunaga alalisvool. Analoogilisel viisil moodustatakse ka teised kombinatsioonid. Liini lõpp-punktis asuva signaale vastuvõtva seadme oluliseks osaks on kondensaatorist *C* ja paispoolist *P* kujundatud eraldusfilter, mis võimaldab signaalis sisalduvaid alalis- ja vahelduvvoolukomponente lahutada. Alalisvool läbib põhiliselt ainult paispooli vooluringi, vahelduvvool aga kondensaatori vooluringi. Peale selle on signaali äratundmisel ehk diskrimineerimisel olulised dioodid *D*, mille ülesandeks on tagada sõltuvalt signaali polaarsusest kas relee *V* või relee *VI* rakendumine. Relee *VII* rakendub ainult vahelduvvoolusignaali toimel, mis alaldatakse sildlülituses alaldaja *A* abil.

Vaadeldaval juhul, kui surunupule S_3 vajutamisel liinist saabub ainult positiivse suunaga alalisvool, rakendub ainult relee *V*. Nagu selgub jooniselt 89, *e*, sulguvad selle tulemusena kontaktid ainult vooluringis *3*, s. o. signaal on tõepoolest õigesse vooluringi edasi antud. Selle vooluringi abil võib siis juba rakendada kas vaherelee kaudu või otseselt seadme, millele signaal on määratud.

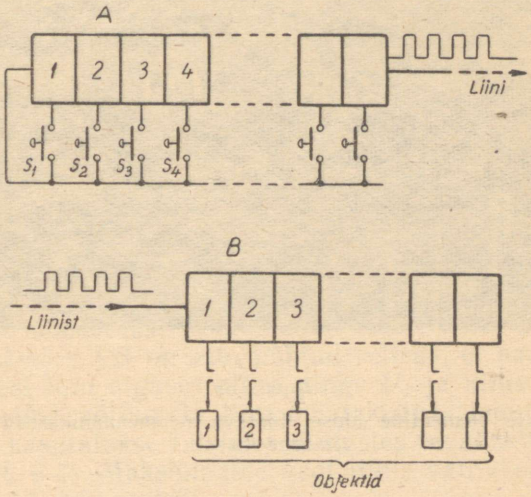
Kirjeldatud lülitust võib kasutada nii kaugjuhtimise kui ka kaugsignalisatsiooni tarbeks. Kaugsignalisatsiooni puhul, erinevalt eelvaadeldust, tuleb vaid surunuppude *S* asemele lülitada kontaktid, mille asend sõltub objekti seisukorrast, vastuvõtupoolel asuvad releed aga ühendada signaallampidega.

Toodud kaugjuhtimise süsteem ei rahulda peamiselt selle tõttu, et edasiantavate signaalide arv on väga väike ja rangelt piiratud. Üheks levinumaks telemehaanilise side teostamise meetodiks, kui edasiantavate teadete arv piirdub paarikümnega, on atsükliline jaotusmeetod.

Joonisel 88 on toodud atsüklilisel jaotusmeetodil töötava telejuhtimis- või signalisatsiooniseadme struktuurskeem. Vastava sammlülituse *A* abil on võimalik tekitada impulsside pakette, kus impulsside arv võrdub selle lüliti *S* järjekorranumbriga, mis on parajasti suletud, kusjuures üheaegselt suletakse ainult üks lüliti. Impulsid saabuvad sideliini kaudu vastuvõtvasse sammlülitusse *B*, mis nihkub iga impulsi toimel ühe sammu võrra edasi. Impuls-

side paketi lõppedes lülitub vastuvõtupoolel sisse vooluring, mille järjekorranumber vastab saatepoolel ühendatud vooluringi järjekorranumbrile.

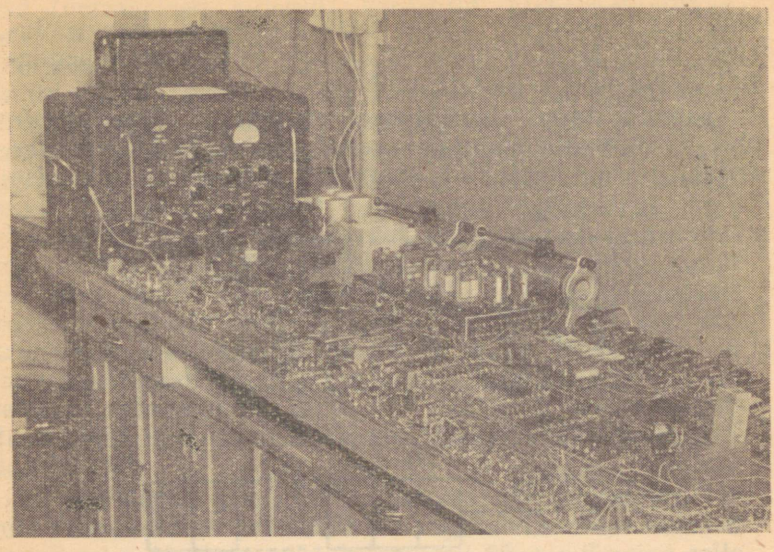
Sammlülitused teostatakse enamasti *sammvalijate* abil. Sammvalija kujutab endast paljukontaktilist relee eriliiki, mille kontaktid sulguvad järjekorras üksteise



Joonis 88

Atsüklilisel jaotusmeetodil töötava kaugjuhtimisseadme struktuurskeem

järel, vastavalt relee ankru pöörlemisele, kusjuures iga järgmise kontakti sulgumine ja eelmise avanemine toimub järjekordse impulsi saabumisel. Impulsside paketi formeerimiseks ühendatakse sammvalija releelise impulsside generaatoriga nii, et ta katkestaks viimase töö, niipea kui sammvalija on jõudnud sammhaaval edasi liikudes eelnevalt valitud kontaktipaari sulgemiseni. Sammvalija ise aga liigub edasi sama generaatori impulsside toimel. Seetõttu vastab genereeritud impulsside arv täpselt kasutatud kontaktipaari järjekorranumbrile. Teise kontaktipaari sisselülitamisel on genereeritav impulsside arv vastavalt erinev. Nii on võimalik edasi ända nii mitu erinevat komandot või signaali, kui palju asendeid on kasutataval sammlülitusel. Järelikult antakse sel puhul



Joonis 89

Kontaktitute elementide alusel töötava telemehaanikaseadme laboratoorne makett

informatsioon edasi unitaarse koodi abil. Sammvalijad omavad tavaliselt 10—50 asendit.

Sammlülitusi on võimalik koostada ka tavaliste releede abil, kusjuures iga «sammu» kohta on tarvilik üks relee, arvestamata abivooluringe. Peale selle on kasutusel mitmesugused kontaktitud sammlülitused, mis võivad olla ehitatud analoogiliselt nihkeregistritega kas magnetiliste elementide või ka trigerlülituste baasil.

On olemas ka spetsiaalseid sammukaupa liikuva lülitava elektronkiirega paljuelektroodilised elektronseadmed, mida nimetatakse *trohhotronideks* erilise kujuga elektronkiire trajektoori — trohhoidi järgi. Viimased võimaldavad kompaktse ehituse juures saavutada üsna suurt töökiirust.

Peale sammlülituste sisaldab atsüklilisel jaotusmeetodil töötav telemehaaniline aparatuur mitmesuguseid abiseadmeid, nagu impulsside generaatoreid, seadmeid väljakutseks, kontrolliks ja lülituste lähteasendisse

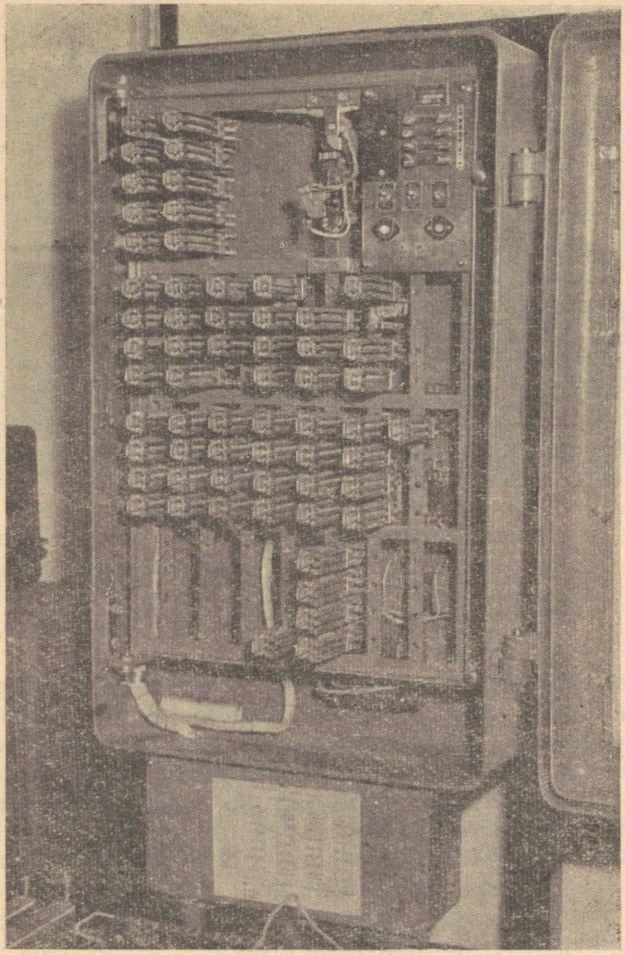
tagasiviimiseks, mis moodustavad võrdlemisi keerukaid, terveid paneele täitvaid seadmeid.

Kaugmõõtmine. *Kaugmõõtmine* on üks huvitavamaid ja mitmekülgsemaid telemehaanika harusid. Kaugmõõtmise teostamine on tunduvalt komplitseeritum, sest kaugmõõtmise aparatuur peab andma üsna täpse vastuse küsimusele «kui palju?»; seega on siis juba üheainsa suuruse mõõtmisel tarvis edasi anda üht tema paljudest võimalikest väärtustest. Käesoleval ajal kasutatavad kaugmõõtmise süsteemid jagunevad üldiselt lühimaa ja pikamaa kaugmõõtmise süsteemideks.

Lühimaa kaugmõõtmise süsteemid erinevad vähe distantsmõõtmise süsteemidest, sest siin toimub mõõdetava suuruse edasiandmine amplituuditunnuse abil. Lihtsa lühimaa kaugmõõtmise süsteemi põhimõtteskeem on esitatud joonisel 91, *a*. Siin muundatakse *primaarmõõteriista PM* hälve võrdeliseks vahelduvpingeks, alaldatakse alaldi *A* abil ning juhitakse liini. Liini teise otsa saabuvat voolu mõõdetakse *sekundaarse mõõteriista SM* abil. Ballasttakistus *RB* on ette nähtud selleks, et saada võrdelist seost liini alguses oleva pinge U_1 ja liinis voolava voolu *I* vahel, sõltumata liini omatakistuse muutumisest. Alaldina kasutatakse taolistes lülitustes tavaliselt kaksikdioodi (vt. § 5). Maksimaalne vool liinis valitakse tavaliselt 0,5—1,5 milliamprit.

Muundaja primaarmõõteriista hälbe pingeks muutmiseks kujutab endast trafot *Tr* muudetava vastastikuse induktiivsusega primaarmähise w_1 ja sekundaarmähise w_2 vahel. Paigalseisval südamikul asuvat primaarmähist w_1 toidetakse stabiliseeritud vahelduvpingega *U*. Südamiku õhupilus pöörlevale raamile keritud sekundaarmähises w_2 indutseeritakse pinge U_2, mis sõltub raami pöördenurgast α. Praktiliselt on pinge U_1 võrdeline pöördenurgaga α 80—85° ulatuses. Raami pööramine toimub vahetult primaarmõõteriista abil.

Et veelgi vähendada liini mõju mõõtmistulemustele, kasutatakse mitmesuguseid muid võtteid, sest vaadeldud süsteemis, vaatamata takisti *RB* mõjule, sõltub tulemus ka liini takistusest. Üheks niisuguseks võimaluseks on suuruste edasiandmine mitte pinge, vaid vahetult voolu tugevuse kaudu liinis. Vool seatakse sel juhul saatepoolel jälgivsüsteemi abil vastavusse mõõdetava suurusega. Vool liinis ei ületa seejuures paari milliamprit, kasutata-



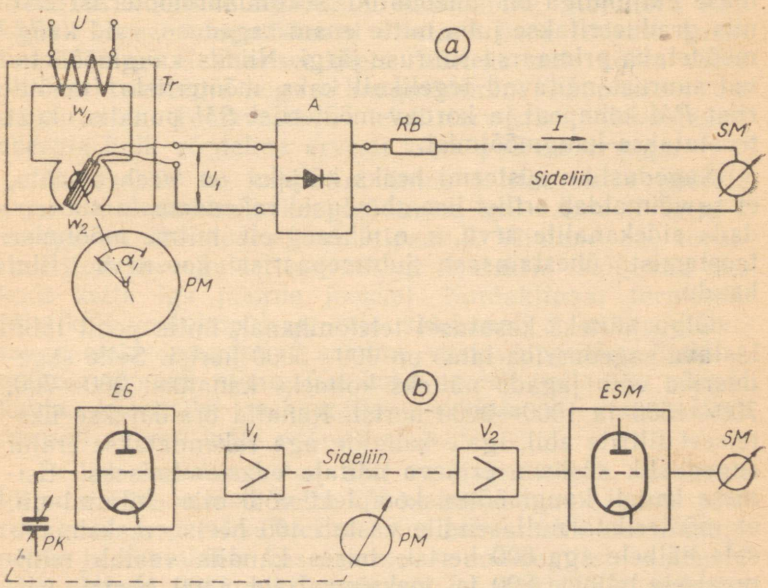
Joonis 90

Telemehaanilise kaugjuhtimisseadme BPT-48 saatev poolkomplekt. Seade töötab atsüklilisel jaotusmeetodil ja võimaldab juhtida kuni 11 objekti. Põhilisteks lülituselementideks on releed, keskel ülal üksik sammvalija

vad pinged aga muutuvad paarist voldist kuni paarikümne voldini. Olenevalt liini andmetest võib voolukadu olla protsentuaalselt väiksem kui pingelang.

Ometi ei aita nimetatud abinõud olulisel määral olukorda parandada ning rohkem kui paarikümne kilomeetriste vahekauguste puhul muutuvad need süsteemid liiga ebatäpseiks.

Sageduslik kaugmõõtmine. *Pikamaa kaugmõõtmise süsteemides* kasutatakse signaalide tunnuseid, mille väärtus ei olene sideliini omadustest ja seisukorrast. Selleks sobib kõige paremini vahelduvvoolu s a g e d u s. Joonisel 91, *b* on kujutatud sagedusliku kaugmõõtmissüsteemi struktuurskeem. Süsteem on välja töötatud lülituskilbis asuvate mõõteriistade näitude, s. o. p ö ö r d e n u r k a d e edasiandmiseks piiramatuile kaugustele. Mõõteriistad ise võivad seejuures näidata voolu, pinget, võimsust, temperatuuri või mistahes muud elektrilist või mitteelektrilist



Joonis 91

a — lühimaa kaugmõõtmise süsteemi skeem; *b* — sagedusliku kaugmõõtmisseadme struktuurskeem

suurust. Tähtis on vaid andurmõõteriista olemasolu, mille võllile kinnitatakse kerge pöördkondensaator *PK*. Viimane on nii konstrueeritud, et ta praktiliselt peaaegu mingit mehaanilist koormust primaarmõõteriista *PM* võllile ei tekita. Pöördkondensaator *PK* on ühendatud elektronlülituses vahelduvvoolugeneraatoriga *EG* nii, et genereeritava vahelduvvoolu sagedus sõltuks pöördkondensaatori mahtuvusest. Viimane omakorda sõltub teatavasti kondensaatori võlli pöördenurgast. Saadud vahelduvvool võimendatakse võimendi V_1 abil ning juhitakse sideliini. Sideliinis võib toimuda signaali tunduv nõrgenemine, võivad tekkida mitmesugused häired jne. Oluline on ainult see, et üleantava signaali s a g e d u s oleks mitmesuguste häirete hulgas selgesti äratuntav. Et häired on tavaliselt lühiajalised, vahelduvvoolusignaal aga pidev, on süsteemi häirekindlus ka pikkade liinide puhul üsna suur. Lühiajalised häired ei jõua mõjutada vastuvõtvat süsteemi. Liinist saabuvat signaali võimendatakse uuesti võimendi V_2 abil ning juhitakse elektron-sagedusmõõtjasse *ESM*. Viimase väljundiga on ühendatud sekundaarmõõteriist *SM*, mis gradueeritakse juba mitte enam sageduse, vaid kaugmõõdetava primaarse suuruse järgi. Niisiis kaugmõõdetavat suurust näitavad tegelikult kaks mõõteriista: mõõteriist *PM* kohapeal ja kordav mõõteriist *SM* punktis, kust teostatakse kaugmõõtmist.

Sagedusliku süsteemi heaks küljeks on veel asjaolu, et ta võimaldab erilisi lisa-abinõusid rakendamata suurendada sidekanalite arvu, s. o. üheaegselt mitme mõõtmise teostamist ühestainsast juhtmepaarist koosneva liini kaudu.

Olgu näiteks kasutusel telefonikanal, mille poolt läbilastava sagedusriba laius on 300—3000 hertsi. Selle sagedusriba võib jagada näiteks kolmeks kanaliks: 300—700, 700—1500 ja 1500—3000 hertsi. Kanalid eraldatakse üksteisest filtrite abil, igale kanalile aga rakendatakse eraldi sageduslik süsteem erineva näitaja edasiandmiseks. Esimese kanali kaugmõõtmiskomplekt võib olla ehitatud nii, et mõõteriista nullasendile vastab 400 hertsi, maksimaalsele hälbele aga 600 hertsi, teises kanalis vastab minimaalsele hälbele 800 ja maksimaalsele 1400 hertsi, kolmandas aga vastavalt 1700 ja 2800 hertsi. Et tagada kanalite täielikku eraldamist filtrite abil, tuleb jätta üksikute sageduspiirkondade vahele teatud «eikellegimaa».

Vastasel korral võivad tekkida omavahelised häired üksikute kanalite vahel.

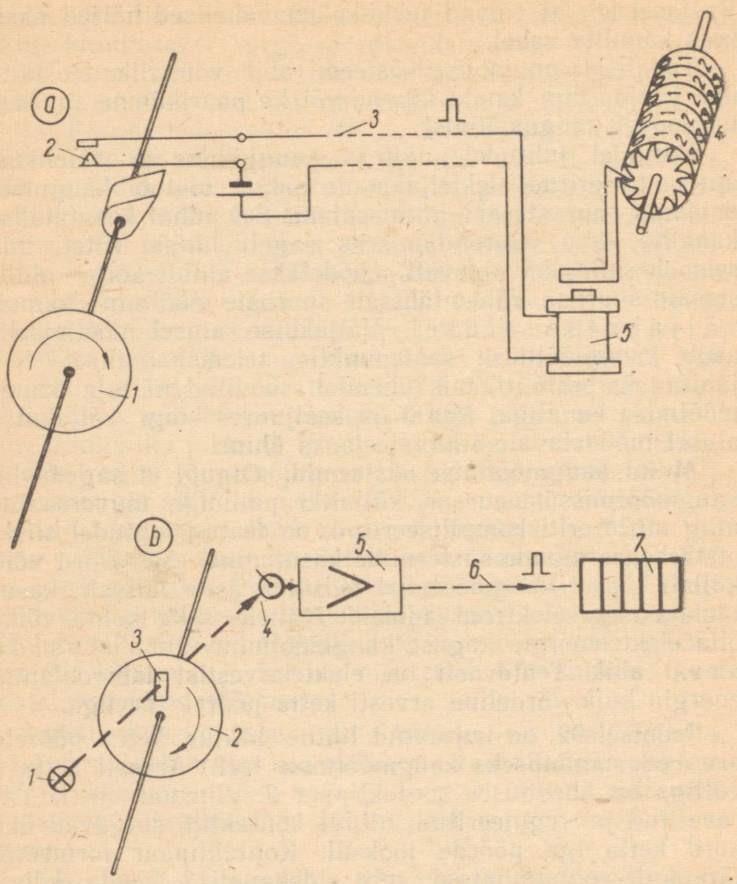
Tavaliselt on taolise süsteemi abil võimalik teostada ühe telefoniliini kaudu kümne või ka paarikümne suuruse üheaegset kaugmõõtmist.

Paljudel juhtudel, näiteks kaugjuhitavate täielikult automatiseeritud elektrijaamade puhul, ulatub kaugmõõdetavate suuruste arv mitmesajani. Sel puhul kasutatakse kanalite arvu suurendamiseks sageli lihtsat võtet, mis seisneb selles, et pidevalt mõõdetakse ainult kõige olulisemaid suurusi. Vähemtähtsate suuruste mõõtmine toimub väljakutse alusel. Väljakutse alusel mõõtmiseks asub kaugmõõtmise saatepunktis telemehaanilisel teel juhitav ümberlüliti, mis ühendab soovitud näitaja kaugmõõtmise kanaliga. Kanal on sealjuures kõigi väljakutse alusel mõõdetavate suuruste jaoks ühine.

Muud kaugmõõtmise süsteemid. Olgugi et sageduslik kaugmõõtmissüsteem on küllaltki paindlik, universaalne ning mitte eriti komplitseeritud, on teatud juhtudel siiski otstarbekas muude süsteemide kasutamine. Mõnikord võib küllalt täpset kaugmõõtmist teostada üsna lihtsalt, kasutamata isegi elektronseadmeid. Näiteks selle kohta võiks olla elektrienergia koguse kaugmõõtmine impulssside arvu abil. Teatavasti on elektriarvestist läbivoolanud energia hulk võrdeline arvesti ketta pöörete arvuga.

Joonisel 92 on kujutatud lihtne lülitus ketta pöörete arvu edasiandmiseks kaugmõõtmise teel. Arvesti ketta *1* võlliga on ühenduses kontaktipaar *2*. Viimane on konstrueeritud ja reguleeritud nii, et kontaktid sulguvad üks kord ketta iga pöörde jooksul. Kontaktipaar formeerib järelikult vooluimpulsse, mis sidekanali *3* kaudu käivitavad elektromagneti *5* seadme vastuvõtupoolel. Elektromagnet tõmbub niisiis üks kord arvesti ketta iga pöörde kohta, käivitades mehaanilise loendaja *4*, mis näitab otseselt arvesti ketta pöörete arvu.

Sellise impulssmeetodi abil on, nagu selgub, äärmiselt lihtne mõõta arvesti ketta või ka mõne muu seadme pöörete arvu. Loomulikult ei ole siin kohustuslik elektromagnetite ja kontaktide kasutamine — analoogilisi seadmeid võib ehitada ka induktiivsete või fotoelektriliste andurite ja elektronloendajate baasil. Näitena on joonisel 92, *b* kujutatud fotoelektrilise anduriga arvesti. Valgusallikast *1* väljuv valguskiir suundub läbi ketta *2* ava *3* foto-



Joonis 92

a — võimsuse kaugmõõtmisseadme lülitusskeem; *b* — samalaadne seade, kuid fotoelektrilise anduriga kontaktanduri asemel

elemendile *4*, millest väljuvaid elektriimpulsse võimendatakse võimendis *5* ja juhitakse sideliini *6* kaudu loendajasse *7*.

Üldiselt erineb impulsside abil teostatud kaugmõõtmine vähe sageduslikust kaugmõõtmisest — ühel juhul on tegemist impulsside arvuga, teisel juhul vahelduvvoolu perioodide arvuga ajaühikus.

Ometi paistab tähelepanelikule lugejale otsekohe silma nende kaugmõõtmismeetodite printsipiaalne erinevus, mis seisneb selles, et kui tavalistes kaugmõõtmise süsteemides on tegemist mõõdetava suuruse kui niisuguse t e r v i k u n a ü l e a n d m i s e g a, siis viimati vaadeldud süsteemi puhul antakse edasi ainult mõõdetava suuruse, käesoleval juhul energiakoguse, j u u r d e k a s v u d, võrreldes eelnevate väärtustega. Igale arvesti ketta pöördele vastab üks impulss. Juurdekasv antakse impulsi näol edasi alati siis, kui edasiantav suurus on muutunud ühe ühiku võrra. Antud juhul on olukord pisut lihtsam, sest energia ühesuunalise voolamise puhul on tegemist ainult positiivsete juurdekasvudega. Üldisel juhul tuleb edasi anda kaks erinevat impulssi — positiivse või negatiivse juurdekasvu märkimiseks. Hõlpus on seda teha polaarsustunnuse abil. Positiivne impulss tähendaks siis mõõdetava suuruse juurdekasvu ühe ühiku võrra, negatiivne impulss aga kahanemist samuti ühe ühiku võrra.

On selge, et säärast juurdekasvu või kahanemist on palju lihtsam edasi anda kui k o g u mõõdetava suuruse väärtust. Säärast kaugmõõtmise printsiipi nimetatakse *delta-modulatsiooniks*. Tüüpiliseks delta-modulatsiooni printsiibil töötavaks seadiseks on laialdaselt kasutatav elektriliste ajanäitajate süsteem, kus tsentraal- ehk kontrollkell annab igas minutis ühe impulsi. Mitmesugustesse punktidesse paigutatud dubleerivad ajanäitajad on aga nii ehitatud, et nende osuti liigub iga kontrollkellast saabunud impulsi toimel täpselt ühe minuti võrra edasi.

Delta-modulatsioonil on siiski üks oluline puudus — v i g a d e k u h j u m i n e. Kui tavaliste kaugmõõtmise süsteemide korral on antud hetkel tekkiv viga üldiselt sõltumatu eelmistest vigadest, siis delta-modulatsiooni puhul kord tekkinud viga (liigne impulss või, vastupidi, impulsi kadumine) jääb püsima ning uued vead liituvad vanadega. Seepärast ei ole säärast modulatsioonisüsteemi eriti vastutusrikastes seadmetes seni veel rakendatud, hoolimata uurijate huvist säärase printsiibi vastu.

Peale kirjeldatud printsiipide võib kaugmõõtmiseks kasutada ka k o m b i n a t s i o o n i m e e t o d e i d, vastandades igale mõõdetava suuruse väärtusele teatud koodielementide kombinatsiooni. Selleks tuleb mõõdetavad suurused esitada diskreetsel kujul. Arusaadavalt on säärased süsteemid küllalt keerukad. Neid kasutatakse mõni-

kord eriti vastutavail juhtumeil või kui nõutav täpsus on eriti suur. Korrektsioonkoodide kasutamisel on võimalik sääraste numbriliste telemõõtmise süsteemide töökindlust oluliselt tõsta. Lihtsamatel juhtudel võib korrigeerimist teostada kas iga koodi kahekordse väljasaatmise, s. o. kordamise, või siis *kviteerimise* teel. Kviteerimine seisneb selles, et vastuvõttev seade saadab vastuvõetud koodi tagasi saateseadmesse, kus seda võrreldakse väljasaadetud koodiga. Eriti sobiv on sääraste diskreetse toimega telemehaanika kanalite kasutamine mitmesuguste finantsalaste andmete töötlemise automatiseerimisel, sest siin on suurused juba algusest peale esitatud numbrilisel kujul, paljudel juhtudel aga tsirkuleerivad isegi järjestikuste koodidena, nii et kaugülekande teostamiseks tarvitseb neid vaid liini juhtida ning hoolitseda piisava võimenduse eest.

Tuleb märkida, et tsüklilise jaotusmeetodi kasutamisel saab ka amplituuditunnuse abil telemeetrilisi suurusi küllalt täpselt edasi anda. Nimelt antakse sel juhul ühe jaotusmeetodil kommuteeritava kanali kaudu edasi nn. *etaloonamplituud*, teiste kanalite kaudu aga mõõdetavaile suurusile vastavad pinge või voolu amplituudid. Kui kanalite kommuteerimine toimub küllalt kiiresti, ei jõua sideliini omadused vahepeal muutuda ning iga mõõdetava suuruse s u h e etaloonsuurusesse vastuvõtupoolel võrdub küllalt täpselt nende suuruste suhtega saatepoolel, kuigi nende suuruste absoluutväärtused võivad muutuda. Suhte varal aga on vastuvõtupoolel kerge mõõdetavaid suurusi määrata, kui on teada etaloonamplituudi väärtus saatepoolel. Kirjeldatud meetod on seda täpsem, mida kiiremini toimub kommuteerimine. Seepärast kasutatakse seda meetodit laialdaselt raadiokaugmõõtmisel.

Kaugreguleerimine. *Kaugreguleerimine* kujutab endast automaatse reguleerimise erijuhtumit, mil reguleeritav objekt asub reguleerivast (etteantavast) suurusest kaugel. Kaugreguleerimine toimub tegelikult kaugjuhtimise ja kaugmõõtmise kanalite koostoimel. Kaugmõõtmise kanali abil mõõdetakse pidevalt reguleeritava suuruse väärtust. Vastavalt kõrvalekaldumise suurusele ja suunale, võrreldes etteantud väärtusega, muudetakse kaugreguleeritavat suurust kaugjuhtimise kanali kaudu.

Sageli, näiteks elektrijaamade pinge ja võimsuse kaugreguleerimisel, ei ole nõutav suur reguleerimiskiirus. Sel-

listel juhtudel toimub kaugjuhtimine suure ajakonstandiga inertse lüli või ka integreeriva lüli kaudu kahe diskreetse käskluse abil: «suurendada» ja «vähendada». Need komandod saadetakse vaheldumisi ja igaüks neist mõjutab reguleeritavat suurust vähe. Nende kogutoime aga sõltub sellest, milline käsklustest on keskmiselt suurema kestusega.

28. Raadiotehnilistest meetoditest telemehaanikas

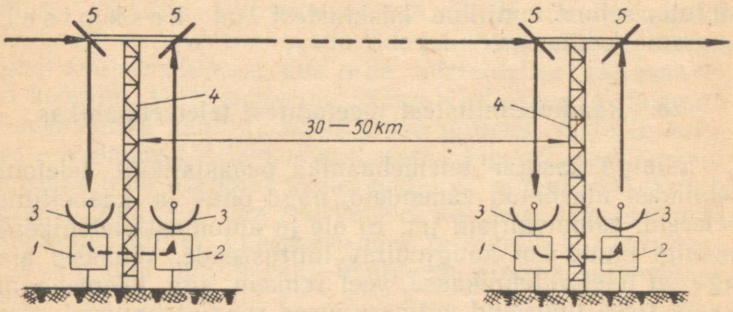
Esialgu kasutas telemehaanika peaasjalikult telefonitehnikast ülevõetud vahendeid, nagu õhu- ja kaabelliine, releesid, sammvalijaid jm. Ei ole ju automaattelefonikeskjaamgi muud kui kaugjuhitav lülitusseade. Viimasel ajal aga on telefonitehnikasse, veel rohkem aga telemehaanikasse sisse tunginud mitmesugused raadiotehnilised meetodid. Eespool oli juba juttu sidekanalite tihendamisest sageduslike meetoditega ja kõrgepingeliinide kasutamisest telemehaaniliseks sideks, s. o. raadiotehniliste meetodite kasutamisest traatsides.

Puht-raadioside leiab telemehaanika otstarbeks kasutamist peaasjalikult mitmesuguste liikuvate objektide eemalt juhtimisel, kuid ka siis, kui edasiantava informatsiooni hulk on väga suur.

Raadioreleeliinid. Vajadus mitmesuguste sidekanalite järele ringhäälingu, televisiooni, telefoni- ja telegraafiside ning samuti ka telemehaanika otstarbeks on viimasel ajal kiiresti kasvanud. Kõigi nende sidevajaduste rahuldamine traatjuhtmega sideliinide abil oleks väga kulukas juhtmematerjali tohutu suure kulu tõttu. Raadioside tavalises ringhäälingu lainealas ei rahulda seal valitseva «ruumipuuduse» tõttu. Sobivaks väljapääsuks on ultralühilainete kasutamine. Et aga ultralühilained levivad peaasjalikult sirgjooneliselt, siis on ultralühilaineside piiratud otsese nähtavuse kaugusega — 50—60 kilomeetriga. Pikemate ühenduste jaoks ehitatakse seepärast *raadioreleeliinid,* kuhu iga 50—60 km tagant on paigutatud retranslatsioonijaamad. Retranslatsioonijaamades toimub saate vastuvõtmine, võimendamine ning edasisaatmine järgmisse retranslatsioonijaama. Kahe retranslatsioonijaama skemaatiline kujutus on toodud joonisel 93.

Retranslatsioonijaamade vastuvõtuaparatuur *1* ja saateaparatuur *2* koos ultralühilainete suunamiseks vaja-

liku paraboolreflektoriga *3* asub tavaliselt maapinnal. Paraboolreflektorist suunatakse kitsas kiirguskimp jaama terasmastil *4* asuvale tasapinnalisele reflektorile *5* ja sealt järgmisse jaama. Mitmekümne meetri kõrgused mastid on



Joonis 93
Raadioreleeliini ehitus

tarvilikud küllaldase sidekauguse tagamiseks jaamade vahel.

Raadioreleeliinide üldpikkus võib ulatuda tuhandete kilomeetriteni ja nad võivad mahutada sadu või isegi tuhandeid telefonikanaleid, rida kaugnägemisprogramme ning igasuguseid muid sidekanaleid. Säärastes magistraalsetes raadioreleeliinides on tavaliselt ka telemehaanilised kanalid energiasüsteemide, nafta- ja gaasijuhtmete, raudtee ja muudeks vajadusteks. Mõnedel juhtudel aga on osutunud otstarbekaks ehitada raadioreleeliine ka spetsiaalselt gaasijuhtmete või muu taolise telemehhaniseerimiseks.

Raadioreleeliinide oluline paremus ilmneb just väga suure sidekanalite arvu puhul, sest kui tavaliste liinide puhul on liini maksumus ligikaudu võrdeline liini kanalite arvuga, siis raadioreleeliinide puhul muutub ühe kanali maksumus kanalite suure arvu tõttu tunduvalt väiksemaks. Peale selle on raadioreleeliini kasutamine peaaegu ainuvõimalikuks lahenduseks mägises ümbruses, kus tavaliste sideliinide rajamine on äärmiselt raske.

Rakendustelevisioon. Telemehaanika vahendite hulka kuuluvad ka *tööstusliku* ehk *rakendustelevisiooni* sead-

med. Rakendustelevisiooni seadmed võimaldavad tavaliselt veidi väiksemat kujutise edasiandmise täpsust ja teravust kui vaatelevi otstarbeks kasutatavad televisiooniseadmed. See-eest on nii televisioonikaamera kui ka saate- ja vastuvõtuseadmed võrdlemisi lihtsa ehitusega ning väikesemõõdulised. Üksikutel erijuhtudel aga kasutatakse rakendustelevisiooni seadmeid, kus kujutis koosneb kuni tuhandest pildireast. Teatud tehnoloogiliste protsesside jälgimiseks kasutatakse ka värvustelevisiooni. Rakendustelevisiooni seadmete konstruktsiooni lihtsustab tunduval määral see, et kujutise üleandmise kaugus ei ulatu enamikul juhtudel üle ühe kilomeetri. Sellisel juhul on võimalik kasutada televisioonisignaalide edasiandmiseks traatsidet. Seetõttu jäävad ära saate- ning vastuvõtuseadmete kõrgsagedusosa ning antenniseadmed.

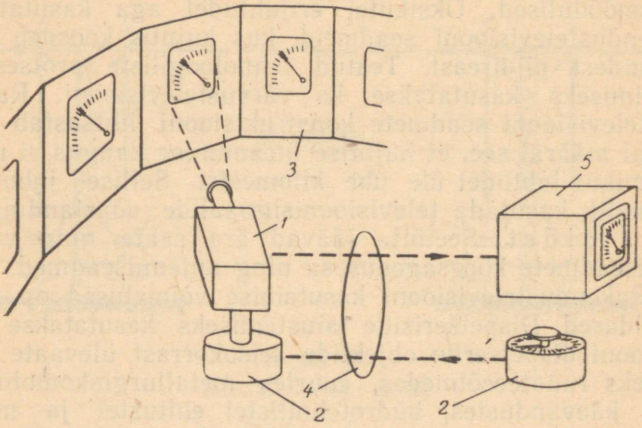
Rakendustelevisiooni kasutamise võimalused on väga laialdased. Dispetšeriside täiustamiseks kasutatakse televisiooni dispetšerile objektide seisukorrast ülevaate andmiseks raudteesõlmedes, suurtes metallurgiakombinaatides, kaevandustes, hüdrotehnilistel ehitustel ja mujal. Tavaliselt on säärastel objektidel üles seatud kümneid telekaameraid, ühed üldpildi ja teised detailide edasiandmiseks. Dispetšer võib siis soovi järgi kasutada üht või teist kaamerat, et kindlaks teha näiteks vagunite paiknemist raudteesõlmes.

On palju tehnoloogilisi protsesse, kus iseloomustavad pole niivõrd mõõtmistulemused, kuivõrd protsessi üldilme. Sageli pole aga protsessi kas kõrge temperatuuri tõttu või muudel põhjustel võimalik otseselt jälgida. Sellistel juhtumitel kasutatakse *tehnoloogilist kaugnägemist.* Tüüpiliseks tehnoloogilise kaugnägemise kasutamise näiteks on põlemisprotsessi jälgimine koldes. Leegi kuju pidev jälgimine võimaldab saavutada optimaalset põlemisrežiimi ning kütuse kokkuhoidu ja samuti õigel ajal märgata avariiohtu. Samuti on mõeldav korstnast väljuva suitsu pidev jälgimine tehnoloogilise televisiooni seadme abil. Tehnoloogilist televisiooni kasutatakse ka metallide töötlemisprotsessi jälgimiseks, eriti valtsimistööstuses.

Üheks huvitavaks televisiooni rakenduseks on tema kasutamine mitmesuguste mõõteriistade näitude edasiandmiseks, s. o. kaugmõõtmiseks.

Joonisel 94 on toodud kaugmõõtmiseks kasutatava televisiooniseadme skits. Televisioonikaamerat *1* on või-

malik telemehaanilise seadme *2* abil pöörata ühe või teise poolringikujuliselt asetatud mõõteriista *3* suunas. Saadud kujutise signaalid juhitakse sidekanali *4* kaudu vastuvõtjasse *5*. Kuigi esimesel pilgul näib olevat ebaratsionaalne



Joonis 94

Rakendustelevisiooni seadmete kasutamine kaugmõõtmiseks

kasutada sellisel juhul kaugnägemist, sest kaugmõõtmine on teostatav hoopis lihtsamate vahenditega, selgub siiski, et televisiooni-kaugmõõtmisel on olulisi eeliseid. Üheks eeliseks on see, et süsteem on peaaegu absoluutselt häirekindel ning usaldusväärne selles mõttes, et mistahes rikete puhul võib ülekanne küll moonutuda või hoopis kaduda, kuid iialgi ei saa tekkida e b a õ i g e n ä i t. Tavaliste kaugmõõtmise seadmete puhul aga võivad kergesti tekkida rikked, mispuhul suurus antakse edasi veaga, mille olemasolu jääb esialgu märkamatuks. Teiseks võib sääraste seadmete abil edasi anda mitte ainult osutimõõteriistade näite, vaid mitmesuguste termomeetrite, veemõõteklaaside jms. vedelikunivoosid ning muud taolist.

VII PEATÜKK

TOOTMISPROTSESSIDE AUTOMATISEERIMINE

29. Automatiseerimise üldistest printsiipidest

Automatiseerimise all mõistetakse mitmesuguste tootmisprotsesside ja nendega seotud toimingute täiustamist automaatika ja telemehaanika vahendite abil. Sellise täiustamise eesmärgiks on tööviljakuse ja toodangu kvaliteedi tõstmine ning inimeste töö hõlbustamine. Nende eesmärkide saavutamiseks rakendatakse tootmisprotsessi automaatset juhtimist. Masinate automaatse juhtimise tulemusena väheneb esiteks tootmiseks vajalike inimeste arv tunduvalt, teiseks on sageli võimalik agregaatide töökiirust suurel määral tõsta, kolmandaks aga tõuseb toodete kvaliteet, sest jääb ära subjektiivne ja ebatäpne käsitsi juhtimine.

Selleks et täiel määral kõiki neid paremusi ära kasutada, teostatakse *kompleksset automatiseerimist.* Kompleksne automatiseerimine näeb ette tootmisprotsessi kõigi lülide võimalikult täielikku automatiseerimist. Et kompleksne automatiseerimine toimub ühtse kava järgi, jäävad ära korduvad ümberkorraldused.

Üksikute tootmislõikude või agregaatide automatiseerimine koos mitmesuguste käsitsi teostatavate vahepealsete abioperatsioonidega osutub enamasti väheotstarbekaks. Käsitsi teostatavad operatsioonid kalduvad sellisel juhul muutuma kammitsaks, mis takistab automaatide töövõime täielikku ärakasutamist.

Nimetatud suurte eeliste kõrval on komplekssе automatiseerimise üldiseks puuduseks see, et vajalikud automaatikaseadmed on sageli võrdlemisi kallid, mõnede operatsioonide jaoks aga puuduvad veel hoopis. Vastavate seadmete projekteerimiseks, konstrueerimiseks, ehi-

tamiseks, käikulaskmiseks ja ekspluateerimiseks on aga vajalik suure hulga kõrge kvalifikatsiooniga spetsialistide olemasolu. Kuigi hiljem automatiseerimine ennast igati ära tasub, takistavad nimetatud tegurid komplekssе automatiseerimise «üleöö» teostamist. Automaatika peab orgaaniliselt tootmisprotsessi «sisse kasvama».

Seepärast ollakse sageli sunnitud alustama mittekomplekssest automatiseerimisest — sealt, kus kõige piiratumate võimaluste juures saavutatav efekt on kõige suurem (nn. «väikeautomatiseerimine»). Tootmisprotsessi analüüsimisel võib alati leida sõlmi, kus võib üsna lihtsate vahenditega saavutada suurt efekti. Nendest sõlmedest siis tavaliselt alustataksegi automatiseerimist.

Teiselt poolt on mõnede operatsioonide automatiseerimine kas äärmiselt raske või hoopis võimatu. Neil juhtudel on väljapääsuks tootmistehnoloogia ümberkorraldamine.

Automatiseerimisega on lähedalt seotud *mehhaniseerimine*. Õieti on mehhaniseerimine automatiseerimise alus ning baas. Selleks et masina tööd juhtida, peab kasutatav masin olema täiel määral mehhaniseeritud. Muidu ei ole juhtimist inimkäe abita võimalik teostada.

Piltlikuks ja primitiivseks näiteks selle kohta võiks olla mullatööde läbiviimine. Konservatiivseks lahenduseks oleks automatiseerimise eesmärgil labidamehe asendamine labidaga varustatud robotiga. Niisugused robotid oleksid väga kulukad ja ebaproduktiivsed. Seepärast tuleb enne automatiseerimisele asumist valida sobiv t e h n o l o o g i a. Antud juhul võiks selleks olla labida asendamine suuremahulise kopaga. Seejärel tuleb protsess m e h h a n i s e e r i d a — s. o. ühendada kopp ekskavaatoriga. Alles sobiva, täielikult mehhaniseeritud tehnoloogia rakendamisel võib tootmisprotsessi automatiseerida. Antud näite puhul tähendaks automatiseerimine ekskavaatorijuhi asendamist automaatse programmjuhtimisseadmega. Alles ekskavaatori suur tootlikkus korvab programmjuhtimisseadmega seotud kulud.

Analoogiline olukord esineb kõikides tootmisharudes. Tootmine planeeritakse juba algusest peale kõige laialdasemat automatiseerimist arvestades, automatiseerimine ise aga toimub enamasti järk-järgult, vastavalt automaatikaseadmete rakendamise programmile ja kogemuste ning aparatuuri väljakujunemisele.

Ainult neil juhtudel, kui vastava tootmisharu automatiseerimise alal on juba küllaldane baas ning kogemused olemas, on võimalik samalaadsete ettevõtete täielik ning viivitusteta automatiseerimine.

Väga oluliseks automatiseerimise eelduseks on tootmise pidevus ning massilisus. Tootmist, mille maht ja iseloom pidevalt muutuvad, on äärmiselt raske automatiseerida. Vaatamata neile raskustele kasvab käesoleval ajal tootmise automatiseerimise ulatus väga kiiresti. Üldisest tootmisvõimsusest kuulub automatiseeritud tootmisele siiski veel võrdlemisi väike osa.

Tootmisprotsesside automatiseerimisel kasutatakse väga mitmesuguseid meetodeid ja vahendeid. Erinevates tootmisharudes ja sama tootmisharu erinevate operatsioonide automatiseerimiseks tuleb kasutada kõige erinevamaid tehnilisi lahendusi. On tehtud palju katseid tootmistehnoloogiate süstematiseerimiseks automatiseerimise seisukohalt lähtudes. Need süstemaatilised jaotused omavad võrdlemisi kunstlikku ilmet. Oluline erinevus on siiski *pidevtootmise* ja *tükitootmise* automatiseerimise vahel. Pidevtootmise puhul on meil tegemist pideva voolusena toodetava gaasilise, vedela või ka tahke tootega. Tahke toode esineb seejuures kas pulbrina, sõmerana või siis pideva varda, toru, lehe või plaadi kujul. Pidevtootmiseks osutub ka energia tootmine.

Pidevtootmisel voolab toode torudes või juhtmetes, läbib valtse või kantakse edasi rullidel või konveieritel. Seetõttu ei valmista toote transpordi automatiseerimine erilist probleemi — toode liigub edasi loomulikul teel töötlemise käigus. Automatiseerimine seisneb siin peaasjalikult automaatse reguleerimise rakendamises, kusjuures reguleerimise eesmärgiks on toote kvaliteedi ja iseloomulike näitajate püsivana hoidmine, sõltumata tooraine ja muude faktorite juhuslikust muutumisest. Näiteks võiks siin olla valtsimisseade, kus automaatne regulaator reguleerib valtside vahekaugust, lähtudes valtsitud toote tegeliku ja vajaliku paksuse vahest. Regulaator toimib nii, et see vahe, s. o. viga oleks minimaalne. Mõnikord kasutatakse pidevtootmisel ka ekstreemregulaatoreid (vt. § 10). Ekstreemregulaatori ülesandeks on sellisel juhul tootmisprotsessi reguleerimine sel viisil, et toode omaks mingi näitaja maksimaalset võimalikku väärtust antud tingimustes.

Üldiselt on pidevtootmise automatiseerimine lihtsam kui tükitootmise automatiseerimine.

Tükitootmise puhul on tegemist toodanguga, mis esineb üksikute kindlate üksustena. Siia kuuluvad mitmesugused masinaosad, sõlmed ja agregaadid. Tükitootmisel on automaatse reguleerimise kasutamise võimalused väiksemad. Peamiseks automatiseerimise mooduseks on siin programmjuhtimine, s. o. toote käsitlemine vastava eelnevalt väljatöötatud programmi kohaselt. Oluline on tükitootmisel ka automaatne kontroll toodete kvaliteedi kontrollimiseks ning toodete sorteerimiseks vastavalt kontrolli tulemustele. Alles siis, kui automaatse kontrolli tulemusi kasutatakse programmi mõjutamiseks, võime rääkida tagasisidest ja automaatsest reguleerimisest.

Tükitootmisel on küllalt rasketeks probleemideks toote transport ühest töömasinast teise ning toote kinnitamine masinatesse täpses asendis, et tagada täpset töötlemist. Need probleemid lahendatakse enamasti puhtmehaaniliste vahenditega.

30. Masinaehituse ning metallide töötlemise automatiseerimisest

Kompleksne automatiseerimine näeb ette kõigi tootmiseks vajalike tehnoloogiliste operatsioonide automatiseerimist. Masinaehituse alal kuuluvad nende operatsioonide hulka esiteks otsesed metalli töötlemise operatsioonid, nagu treimine, freesimine, valtsimine, sepistamine, valu jne. Teiseks tuleb mehhaniseerida ja automatiseerida mitmesugused montaažitööd, detailide mahavõtmine ning kinnitamine, pesemine ning transport. Kolmandaks kuuluvad automatiseerimisele mõõte-, kontrolli- ja sorteerimisoperatsioonid. Alles kõigi nende operatsioonide automatiseerimisel on võimalik automaatsete tsehhide ning tehaste loomine.

Käesoleval ajal on masinaehitus üks kõige paremini automatiseeritud tootmisharusid. Sellest annavad tunnistust kõikides tähtsamates tööstusmaades järjest laialdasemalt levivad *automaatliinid* ja *-tsehhid*. Esimene automaatne autokolbide valmistamise tehas on loodud Nõukogude Liidus.

Masinaehituse alal on automatiseerimise peamiseks tulemuseks esmajoones suur tööviljakuse tõus vajaliku teenindava personali hulga vähenemise arvel, samuti aga ka toodangu kvaliteedi paranemine ning tootmiseks vajaliku põrandapinna tunduv vähenemine.

Tabelis 9 on toodud automaatliini rakendamisel saavutatud efekti iseloomustavad andmed. Tegemist on siin uurimisasutuse ЭНИМС ja tehase «Stankolit» poolt väljatöötatud automaatliiniga astmeliste võllide töötlemiseks. Üks seda tüüpi automaatliinidest töötab muide ka tehases «Volta».

Tabel 9

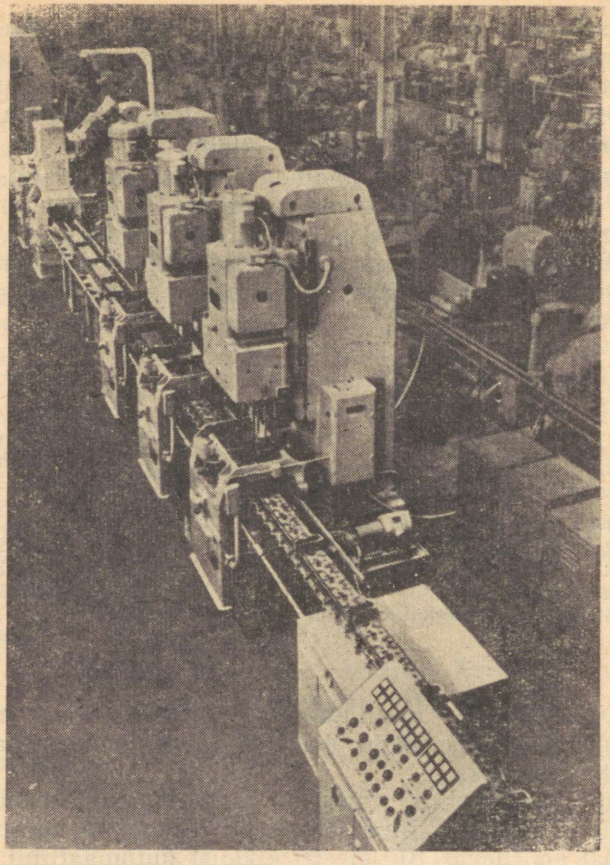
Näitaja	Universaaltööpinkide kasutamisel	Automaatliini puhul
Vahetuses toodetud võllide arv	343	343
Vajalik tööpinkide arv	19	9
Vajalik tööliste arv	19	3
Vajalik põrandapind m²	228	162
Ühe töölise poolt toodetud võllide arv	18	114

Automaatliine kasutatakse laialdaselt ka mitmesuguste üsna keerukate detailide ja sõlmede mehaaniliseks töötlemiseks.

Nii kasutatakse näiteks Ameerika Ühendriikides V-8 tüüpi mootori silindriplokkide töötlemisel viiest sektsioonist koosnevat 107 meetri pikkust automaatliini, mille tootlikkus on 100 plokki tunnis.

Prantsusmaal on loodud automaatne tsehh samuti mootori silindriplokkide töötlemiseks. Tsehh koosneb 16-st üksikust automaatliinist, mis on omavahel konveieritega ühendatud. Tsehhi üldpindala on 2185 m². Tsehhi teenindavad 63 reguleerijat, tema produktiivsus on 57 töödeldud plokki tunnis. Niisuguseid näiteid võib tuua väga palju.

Automaadid ja automaatliinid. Tavaliselt ei ole treipingil võimalik tooteid ühe võttega töödelda. Näiteks tuleb hariliku kruvi töötlemiseks kasutada vähemalt poolt tosinat erinevat töövõtet ja tööriista. Juba võrdlemisi ammu tuntud automaatsed tööpingid olid võimelised ise-



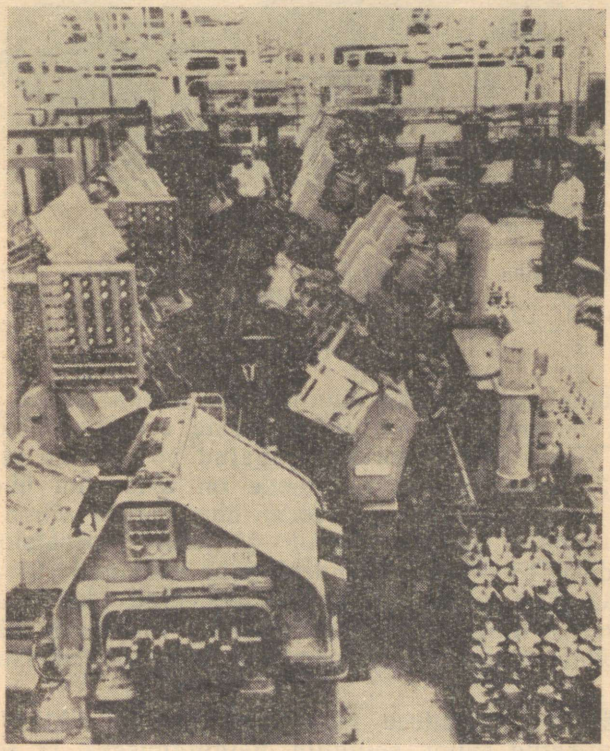
Joonis 95

Automaatliin silindriploki kaante tootmiseks. Tooted liiguvad vahetult ühest töömasinast teise; spetsiaalne transportlint puudub

seisvalt teatud töövõtteid teostama ning isegi tööriistu vahetama. Kruvide valmistamiseks olid säärased automaadid sobivad. Suuremate ja keerukamate toodete puhul tekkisid aga raskused. Kuigi põhimõtteliselt oleks võimalik teatud toote jaoks ehitada tööpinki, mis teostaks üksteise järel mitmesuguseid puurimise, treimise või freesi-

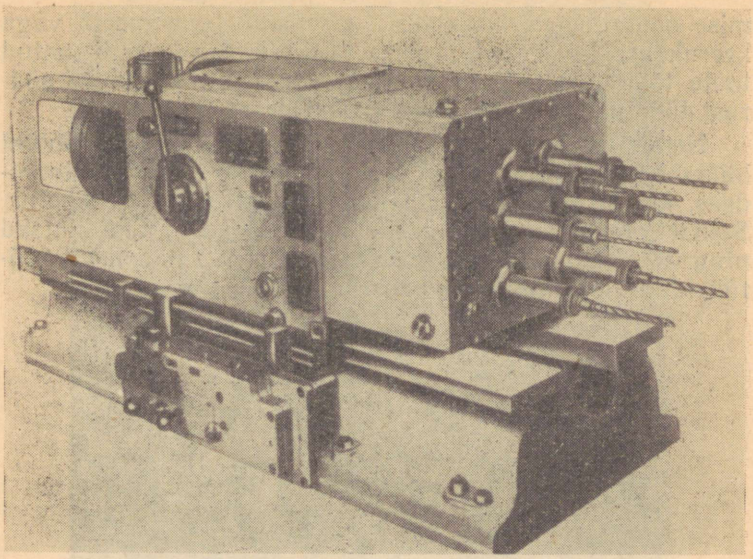
mise operatsioone, kujuneks säärane tööpink ometi väga keerukaks. Peale selle oleks ta kasutatav ainult antud toote töötlemisel. Muude toodete töötlemiseks oleks säärast tööpinki peaaegu võimatu ümber ehitada.

Nende raskuste tõttu tekkiski idee jagada töötüki lõiketöötlemise protsess elementaarseteks operatsioonideks, kusjuures iga operatsiooni teostaks erinev tööpink. Sellisel juhul oleksid üksikud tööpingid väga lihtsad ning automatiseerimise probleem seisneks peamiselt töötükkide kinnitamises ja edastamises.



Joonis 96

Automaatliin väntvõllide töötlemiseks. Väärib märkimist liini kohal asuv teenindussild mitmespindliliste agregaatide teenindamiseks



Joonis 97

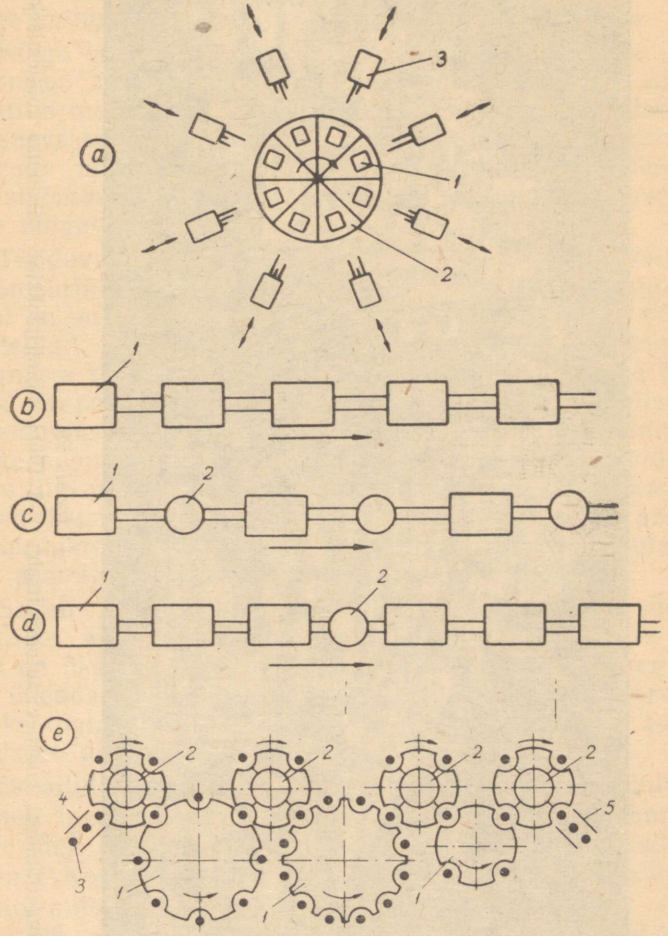
Mitmespindliline puurimisagregaat avade üheaegseks puurimiseks automaatliinil

Üheks võimaluseks kinnitamise ja edastamise probleemi lahendamisel on töödeldavate esemete *1* kinnitamine võrdseteks sektoriteks jagatud pöörduvale platvormile *2* (joonis 98, *a*). Kui toode on töödeldud ühe tööriista *3* abil, pöördub platvorm ühe jaotuse võrra ning kõigi toodete juures teostub järgmine operatsioon ja nii edasi. Üks positsioonidest jääb seejuures tavaliselt vabaks ning seda kasutatakse töödeldud toodete mahavõtmiseks ning uute kinnitamiseks. Platvormi liikumisel läbib toode siis järgemööda kõik töötlemisstaadiumid.

Säärase lahenduse puuduseks on töötsüklite väike arv, piiratud ruum spindlite paigutamiseks ja seadme väike paindlikkus mitmesuguste töötlemismeetodite rakendamiseks.

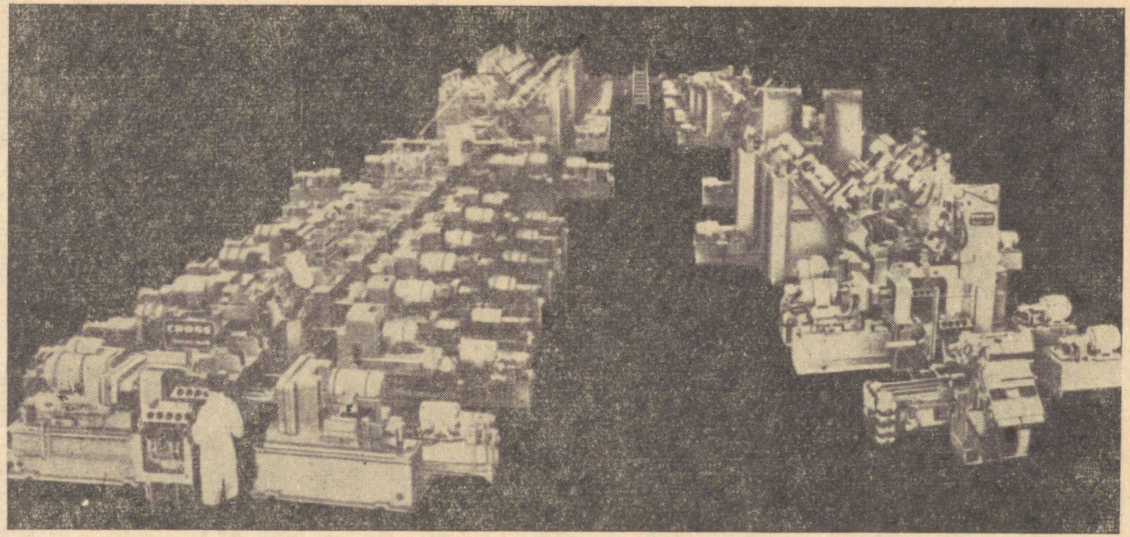
Arenemisvõimelisemaks lahenduseks osutusid nn. agregaattööpingid, mis koosnesid mitmest uni-

fitseeritud agregaadist ühe ja sellesama kohtkindlalt paigutatud eseme töötlemiseks. Üksikud agregaadid säärases tööpingis töötlevad eseme erinevaid külgi.



Joonis 98

a — toote järkjärguline töötlemine pöörleval platvormil: *b* — sünkroonselt töötlev automaatliin; *c* — mittesünkroonne automaatliin; *d* — automaatliinide kombinatsioon; *e* — rootor-automaatliin



Joonis 99

Automaatliinidest koosnev automaattsehh V-8 tüüpi silindriplokkide täielikuks töötlemiseks

Agregaattööpinkide üksteisega ühendamisel saadaksegi *automaatliinid* (vt. joonised 95, 96, 99).

Automaatliinide põhiliseks paremuseks on nende suur p a i n d l i k k u s. Automaatliini pikkus, s. o. üksikute agregaatide ning tööoperatsioonide arv võib olla väga erinev. Samuti on automaatliinis võimalik rakendada kõige mitmekesisemaid tööoperatsioone ja tööpinke.

Kõige laiemalt on kasutusel *sünkroonse* detailide liikumisega (joonis 98, *b*) automaatliinid. Säärane automaatliin moodustab omavahel ühendatud sektsioonidest *1* koosneva terviku. Toote edasiliikumine toimub siin korrapäraste ajavahemikkude järel — üheaegselt kõikides sektsioonides. Seetõttu on kõigile tootmisoperatsioonidele langevad ajavahemikud võrdsed.

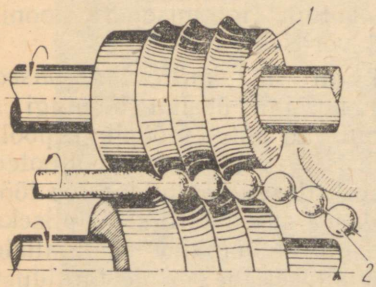
Tunduvalt paindlikumad on nn. *mittesünkroonsed* automaatliinid (joonis 98, *c*), kus iga üksiku tööpingi *1* järel on punker *2*, kuhu kogunevad antud tööpingi poolt töödeldud pooltooted. Punkrist suunduvad pooltooted järgmisse tööpinki edasi vastavalt sellele, kuidas see tööpink vabaneb. Mittesünkroonse automaatliini oluliseks paremuseks on see, et üksikute tööpinkide lühiajaliste rikete puhul, tööriistade vahetamisel jne. ei ole tarvidust kogu liini peatamiseks. Ühe masina seisaku ajal töötavad teised masinad punkritesse kogunenud toodangu arvel. Mittesünkroonselt töötavad automaatliinid on kasutatavad peamiselt väiksemõõtmeliste detailide tootmisel.

Sageli leiab kasutamist mittesünkroonsete ja sünkroonsete automaatliinide kombinatsioon (joonis 98, *d*). Siin on üksikud sünkroonsed automaatliinid või agregaadid ühendatud vahepealsete punkrite abil pikaks terviklikuks tootmisliiniks. Säärane liin võib täita terve automatiseeritud tsehhi ülesandeid.

Detailide transport sünkroonsetes automaatliinides toimub tavaliselt edasi-tagasi liikuvate edastusmehhanismide abil. Mõnedel juhtudel on aga otstarbekas kasutada insener Koškini poolt väljatöötatud *rootor-automaatliini*. Rootor-automaatliini põhimõtteskeem on kujutatud joonisel 98, *e*. Rootor-automaatliin koosneb spetsiaalseist *rootortöömasinaist 1*, mis on paigutatud tehnoloogilises järjestuses. Rootortöömasinate vahele on paigutatud ühise ajamiga käitatavad *transpordirootorid 2*. Masina töötamisel tooted *3*, saabudes toiteseadmest *4*, liiguvad

läbi kõikide rootorite vastuvõtuseadmesse *5*. Igas rootoris on võrdlemisi suur hulk tööriistu, mis töötlevad toodet kordamööda, sellal kui rootor pöörleb. Rootortöömasina rootor koosneb kahest samal võllil pöörlevast osast, milledest üks on määratud tööriistade, teine aga töödeldavate esemete kinnitamiseks. Rootorliinide tootlikkus on väga suur.

Sobiva tehnoloogia valikust. Masinaehituses ning metallitöötlemisel omab väga olulist tähtsust õige t o o t m i s t e h n o l o o g i a valik. Kujukaks näiteks selle kohta võiks olla laagrikuulide vormimine. Varasema tehnoloogia kohaselt neid stantsiti. Uus tehnoloogia — kuulide valtsimine — suurendas tootlikkust kahekordselt, tööjõukulu vähenes aga 10 korda. Peale selle saavutati tunduv metalli ökonoomia.



Joonis 100
Valtside eskiis toor-laagrikuulide tootmiseks

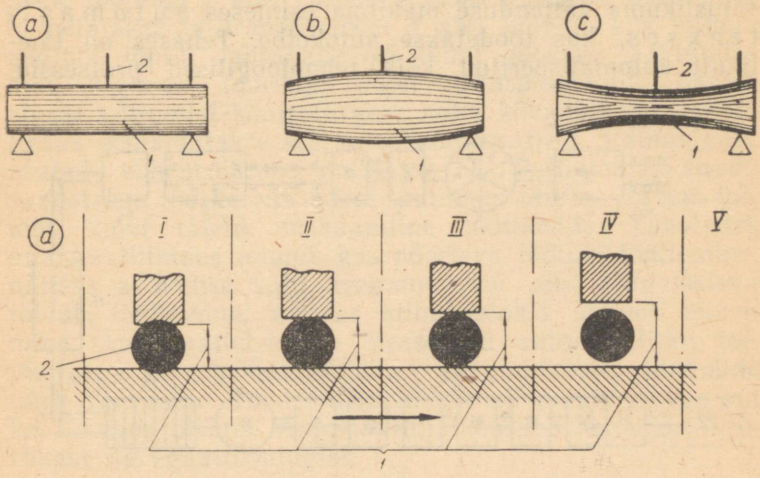
Valtsitav toormaterjal kuumutatakse elektrilisel teel ning juhitakse spetsiaalsete valtside vahele, mille ehitus on kujutatud joonisel 100. Valtside *1* vahelt väljuvad juba kuulikujulised toortooted *2*. Sääraseid valtse võib kasutada kuni 50-mm läbimõõduga kuulide valtsimisel.

Teiseks samalaadseks näiteks võiks olla torujuhtmete ehitamine. Seni kuni nafta- ning gaasitorusid toodeti lühikeste lõikudena, mida alles trassil üksteise külge keevitati, oli torujuhtmete ehitamise automatiseerimine seotud suurte raskustega. Kui aga võeti kasutusele pikad lindikujulised lapikuks surutud terastorud, mis alles trassil lahti rulliti ning suruõhu abil ümmarguseks paisutati, sai võimalikuks mitmesaja meetri pikkuste torude mahapanek ainsagi kohapeal tehtava keevisõmbluseta. Suurem osa tööst tehakse nüüd tehases automaatselt.

Automaatne kontroll. Automaatliinide ja -tööpinkide abil toodetud masinaosad nõuavad niisama täpset kontrollimist nagu käsitsi toodetavadki. Mitmesuguste toodete mõõtmete kontrollimiseks kasutatakse laialdaselt

elektrilisi, pneumaatilisi ja muutüübilisi andureid (vt. II peatükk).

Joonisel 101, *a* on kujutatud kontrolloperatsioon, mida peab läbima silindriline detail *1*, näiteks kolvisõrm. Automaatne seade kontrollib vastavate andurite *2* abil detaile



Joonis 101

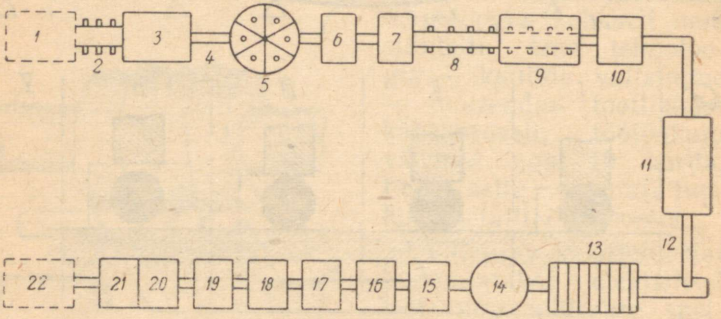
a — koonilisuse kontroll; *b*, *c* — läbimõõtude erinevuse kontroll; *d* — laagrikuulide läbimõõtude kontroll

koonilisuse (*a*) ja läbimõõtude erinevuse (*b* ja *c*) suhtes ning jaotab siis detailid läbimõõdu järgi nelja klassi: ülemõõduline praak, kaks kõlbulikku klassi ja alamõõduline praak.

Mõnikord, näiteks laagrikuulide läbimõõtude kontrollimisel, on jaotamist võimalik teostada ka ilma erilisi andureid kasutamata. Joonisel 101, *d* on kujutatud rida kalibreeritud avasid *1*. Vastava lihtsa seadise abil asetab automaat kuulid *2* järgemööda järjest suurenevatele kalibreeritud avadele. Kui kuul on jõudnud avani, mis on juba pisut suurem tema läbimõõdust, siis langeb ta otsekohe vastavasse allasuvasse punkrisse. Kui näiteks antud juhul avade laiused on 9,7; 9,9; 10,1 ja 10,3 mm, siis esimesse punkrisse satuvad kuulid läbimõõduga alla

9,7 mm, teise läbimõõduga 9,7—9,9 mm, kolmandasse läbimõõduga 9,9—10,1 mm, neljandasse läbimõõduga 10,1—10,3 mm, viiendasse aga need, mis kusagil läbi ei kukkunud, s. o. läbimõõduga üle 10,3 mm.

Automaattehas autokolbide tootmiseks. Masinaehituse kompleksse automatiseerimise printsiibid on leidnud kõige täiuslikuma väljenduse maailma esimeses *automaattehases*, kus toodetakse autokolbe. Tehases on täielikult automatiseeritud kõik tehnoloogilised protsessid,



Joonis 102
Autokolbide automaattehase struktuurskeem

alates alumiiniumi sulatamisest ning valust kuni valmistoote pakkimiseni. Teenindav personal selles tehases koosneb ainult vähestest kõrge kvalifikatsiooniga töötajaist, kelle ülesandeks on mehhanismide töö jälgimine. Vajaduse korral teostavad nad selle või teise seadme järelreguleerimist. Tehase agregaatide asetusskeem on toodud joonisel 102.

Lähtematerjal — alumiiniumkangid — toimetatakse iga 3 minuti järel laost *1* transportööri *2* abil elektriahju *3*. Siin toimub esmakordselt tehnika ajaloos täielikult automatiseeritud valu. Iga 15 sekundi järel lastakse doseeriva seadme abil kindel hulk sulametalli renni *4* kaudu kokilli (metallist valuvormi). Kokillid asuvad kuuepositsioonilises karusselltüüpi valamismasinas *5*. Valamismasina platvorm pöördub kuuendikpöörete kaupa. Kolmandal kuuendikpöördel, s. o. samuti 15-sekundiliste

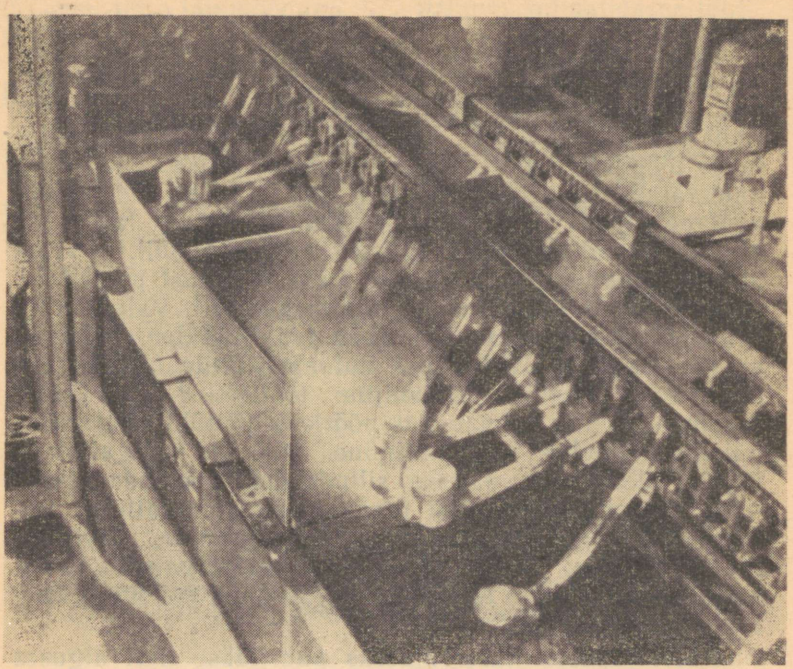
vaheaegade järel, eemaldatakse jahtunud toorik. Kui selgub, et kokill ei olnud täielikult suletud, samuti muude häirete esinemisel, signaliseerib seade sellest automaatselt. Otsekohe pärast kokillist väljumist jahutatakse toorikut jahutuskambris *6*. Veel kuumalt toorikult eemaldatakse tööpingi *7* abil valamisel jäänud liigsed osad ning toimetatakse ta transportööri *8* abil ahju *9*, kus toimub aeglane lõplik jahtumine 5,5 tunni jooksul. Jahtumise ajal liiguvad toorikud pikal transportlindil. Pärast ahjust väljumist kontrollitakse kolvi kõvadust pressil *10*. Praak eemaldatakse seejuures automaatselt. Valmis valu saabub vahepealsesse hoidlasse *11*. Rulliktee *12* kaudu saadetakse toorkolvid edasi automaatliinile *13*, kus toimub kolvi täielik mehaaniline töötlemine. Tavalistes automaatliinides toimub kas pöörleva töötüki töötlemine, näiteks astmelise võlli treimine, või siis paigalseisva töötüki töötlemine, näiteks silindriplokki aukude puurimine. Automaattehasesse ülesseatud automaatliinil toimub aga järgemööda treimine ja puurimine, lihvimine ning freesimine. Toodet töödeldakse nii paigalseisvas kui ka liikuvas olekus. Automaatliin koosneb seitsmest keerukast agregaattööpingist.

Kolvi täpseks fikseerimiseks puuritakse liini alguses kolvi keresse kaks seadeava, mis võimaldavad kolbi täpselt alusplaadile kinnitada. Koos viimasega läbib kolb kõik töötlemise faasid.

Mehaanilise töötlemise lõppedes eraldatakse alusplaat kolvist ning saadetakse tagasi liini algusse, kolb aga suundub viiepositsioonilisse karussellautomaati *14*. Esimesel positsioonil kinnitatakse kolvid platvormile, teisel lõigatakse ära liigne osa koos varem puuritud kinnitusavadega. Kolmandal positsioonil satub kolb täpsele vedrukaalule.

Kaalumine on vajalik järgnevaks kolvi kaalu ettenähtud piiridesse viimiseks. Kolb vajub kaalul seda madalamale, mida raskem ta on. Selles asendis kolb fikseeritaksegi ning saadetakse edasi neljandale positsioonile, kus spetsiaalne vertikaalfrees lõikab kolvi alumisest osast ära kolvi kaalu reguleerimiseks ettenähtud väljaulatuvad osad. Materjali lõigatakse ära seda rohkem, mida madalamale kolb kaalul vajus. Nii saavutatakse täpne kaal mitmekordse kontrollimiseta.

Viiendal positsioonil pööratakse kolb normaalsesse



Joonis 103
Automaat autokolbide tinatamiseks

asendisse ning saadetakse peenlihvimispinki *15*. Lihvimise järel kaetakse ta tinakihiga tinatamisagregaadis *16*. Tinatamisagregaadis läbib kolb rea vanne — rasvast vabastamiseks, pesemiseks, tegelikuks tinatamiseks ja loputamiseks. Pärast seda kolb kuivatatakse ja juhitakse vahepealsesse hoidlasse *17*. Hoidlast satub kolb automaati *18*, kus toimub kolvisõrme ava lõplik töötlemine. Pärast rasvast vabastamist ning kuivatamist pesemismasinas *19* juhitakse kolb kontrolli- ja sorteerimisautomaati *20*. Automaat jagab kolvid mõõtmete alusel nelja gruppi ja varustab nad templitega. Mõõtmistäpsuse tagamiseks asub automaat termostaadis.

Kolbide pakkimine toimub pakkimismasinas *21*. Kolvid määritakse, mähitakse paberisse, pakitakse kuuekaupa pappkarpidesse ja saadetakse valmistoodete lattu *22*.

Peale ülalmainitud kontrolli- ning sorteerimisautomaadi on tehases veel arvukalt kontrollseadmeid, mis on orgaaniliselt seotud tehase tööga. Kontrollseadmeid on kahte liiki — passiivsed kontrollseadmed, mis kontrollivad töödeldavate kolbide asendit masinais, lõiketerade korrasolekut tööpinkides ja muud, signaliseerides otsekohe ettetulevaist riketest. Aktiivsed kontrollseadmed seevastu mitte ainult ei fikseeri, vaid ka väldivad praaki, seisates automaadi näiteks ebaõige termilise režiimi või kolvi ebaõige asendi puhul automaatliinis. Aktiivsete kontrollseadmete hulka kuuluvad ka automaatsed regulaatorid temperatuuri ning tinatamislahuste keemilise koostise püsivana hoidmiseks.

Tehase töötsükkel on nii korraldatud, et järgmine töötlemisprotsess võib alles siis alata, kui eelmine on lõpetatud. Selleks on üksikud agregaadid omavahel seotud juhtimis- ja signalisatsiooniseadmete kaudu, mis käivitavad järgmise agregaadi, kui töötükk on saabunud. Sellega tagatakse üksikute agregaatide kooskõlastatud töö. Juhtimisseadmed on elektromehaanilist tüüpi, põhinedes peaasjalikult kontaktandureil. Remonttööde puhuks on ette nähtud üksikute agregaatide eraldi käivitamise võimalus. Andmed üksikute agregaatide töö kohta on koondatud tsentraalsele puldile, kus vastavad loendajad näitavad kulutatud metalli, toorikute, valminud ning praagitud kolbide jne. hulka.

Automaattehase tootlikkus ületab mitu korda mitteautomatiseeritud, massiliseks tootmiseks määratud tehase tootlikkuse.

Programmjuhtimisega metallilõikepingid. Ülalkirjeldatud automaadid, automaatliinid, -tsehhid ja -tehased on kohased ainult masstootmisel kasutamiseks. Väikeste ja keskmiste seeriate viisi tootmisel muutuvad sagedased automaatide ümberhäälestustööd niivõrd mahukaks, et otstarbekam on seda laadi automaatide kasutamisest hoopis loobuda. Ometi moodustab just seeriaviisiline produktsioon toodangu suurema osa. Ameerika Ühendriikides näiteks toodetakse 90% kõikide masinate ning

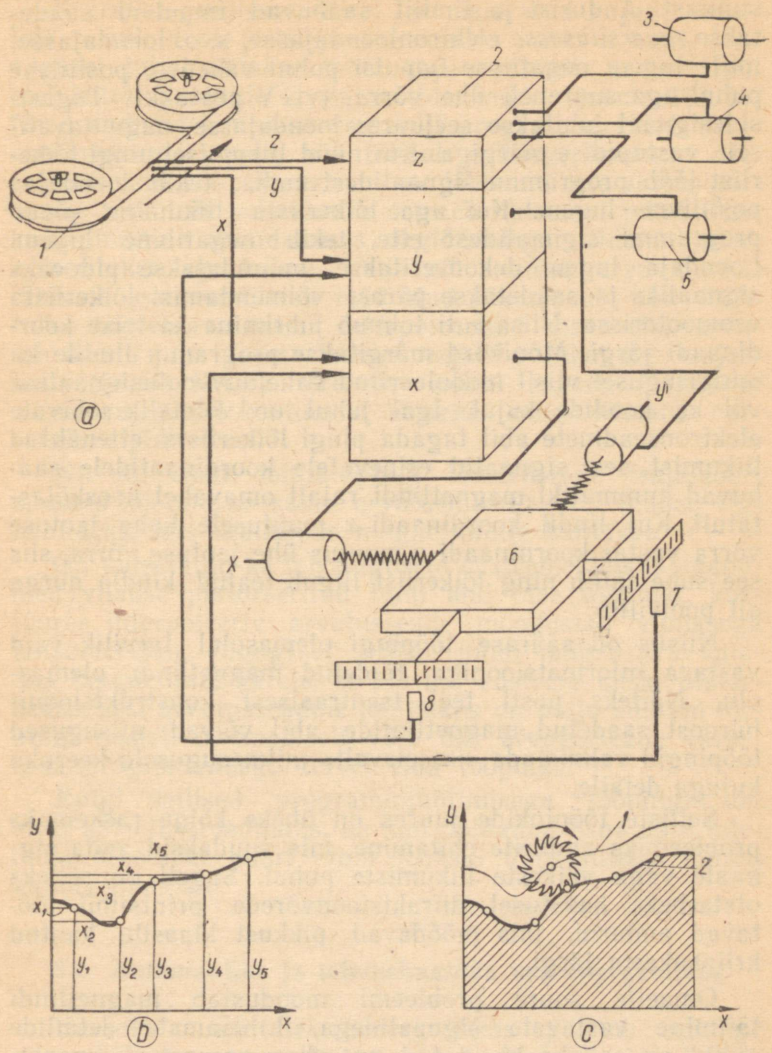
aparaatide liikidest väikeste, kuni 25-st üksusest koosnevate seeriatena.

Teiselt poolt on viimasel ajal, eriti seoses lennukitööstuse arenguga, tekkinud vajadus väga keeruka ning täpse konfiguratsiooniga pressimatriitside, turbiinilabidate ja muu taolise valmistamiseks. Sageli on niisuguse matriitsi kuju ette antud matemaatiliste valemite või arvudetabelite näol, mis esitavad keeruka kõverpinna punktide koordinaate. Niisuguseid tooteid vajatakse tavaliselt ainult üks või paar eksemplari, käsitsi valmistamisel on selleks aga vajalik nädalatepikkune kõrge kvalifikatsiooniga meistrite töö.

Nii sel kui ka teisel juhul on väljapääsuks elektronseadmetel põhinevad programmjuhtimisega tööpingid.

Tööpingi programmjuhtimiseks tuleb tagada kas töötüki või tööriista liikumine vastavalt programmile. Enamasti on piisav, kui programmeerida tööorgani liikumine töödeldava eseme suhtes kahe koordinaadi (x ja y) järgi. Nii võib automatiseerida trei- ja puurpinke, samuti ka mitmesuguste tasapinnaliste kontuuride freesimist. Ruumiliste kujundite freesimisel tuleb aga programmeerida freesi tasapinnaline liikumine mõlemas sihis ning peale selle vertikaalne liikumine, seega siis kolm koordinaati. Peale selle võib sama programm sisaldada andmeid lõikeriista ajami ja mitmesuguste tööpingi abiseadmete juhtimiseks.

Joonisel 104, *a* on kujutatud kahekoordinaadilise tööpingi automaatse programmjuhtimisseadme üldskeem. Magnetlindile on kantud signaalid, mis juhivad lõikeriista või eseme liikumist kahe koordinaadi järgi ja samuti abiseadmete tööd. Vastavad signaalid on kantud magnetlindi eriradadele ning võetakse vastu erinevate helipeade poolt. Signaalid on tavaliselt lindile kantud delta-modulatsiooni printsiibil, s. o. iga positiivne signaal tähendab lõikeriista liikumist näiteks 0,001 millimeetri võrra edasi, negatiivne signaal aga 0,001 millimeetri võrra tagasi. Teise liikumissuuna jaoks on analoogilised signaalid kantud magnetlindi naaberrajale. Signaalid mõjutavad elektronseadmete kaudu vastavaid liikumisi teostavaid elektrimootoreid. Liikumiste kontrollimiseks on tööpingi juhitav osa seotud anduritega, mis annavad samuti ühe impulsi iga 0,001-millimeetrise nihke kohta, kusjuures impulsi märk oleneb liikumise



Joonis 104

a — metallilõike-tööpingi automaatse programmjuhtimise seadme ehitus: *1* — magnetlint, *2* — elektroonikablokk, *3* — veomootor, *4* — õlipump, *5* — jahutusvedeliku pump, *6* — töölaud või suport, *7* — andur *y*, *8* — andur *x*; *b* — töödeldava profiili kuju esitamine profiili üksikute punktide koordinaatide kaudu; *c* — erinevus freesi tsentri trajektoori *1* ja töödeldava kontuuri *2* vahel

suunast. Andurist ja lindilt saabuvad impulsid saadetakse *reversiivsesse* elektronloendajasse, s. o. loendajasse, mille lugem negatiivse impulsi puhul väheneb, positiivse puhul aga suureneb ühe võrra (vt. V peatükk). Tagasisidesignaal juhitakse seejuures loendajasse, nagu tavaliselt, vastupidise märgiga. Kui nüüd liikumisel pingi lõikeriist jääb programmi signaalidest maha, tekib loendajas positiivne lugem. Kui aga lõikeriista liikumine jõuab programmi signaalidest ette, tekib negatiivne lugem. Loendaja lugem dekodeeritakse, muundatakse pidevaks signaaliks ja saadetakse pärast võimendamist lõikeriista veomootorisse. Niisamuti toimub juhtimine ka teise koordinaadi järgi. Mõnikord märgitakse programm lindile ka mingisugusel viisil moduleeritud vahelduvvoolusignaalina või ka koodide kujul. Igal juhul on võimalik sobivate elektronseadmete abil tagada pingi lõikeriista ettenähtud liikumist, sest signaalid erinevatele koordinaatidele saabuvad kummaltki magnetlindi rajalt omavahel kooskõlastatult. Kui lindil koordinaadi x muutusele kahe jaotuse võrra vastas koordinaadi y muutus ühe jaotuse võrra, siis see suhe säilib ning lõikeriist liigub teatud kindla nurga all poolviltu.

Niisiis on säärase tööpingi olemasolul tarvilik vaid vastava informatsiooniga täidetud magnetlindi olemasolu. Näiteks posti teel tsentraalsest konstruktsioonibüroost saadetud magnetlintide abil võivad niisugused tööpingid valmistada «iseseisvalt» mitmesuguseid keeruka kujuga detaile.

Selliste tööpinkide juures on üheks kõige raskemaks probleemiks andurite ehitamine, mis suudaksid anda signaale väga väikeste liikumiste puhul. Sageli on selleks otstarbeks kasutusel difraktsioonvõrede printsiibil töötavad andurid, mis mõõdavad pikkust klaasile kantud kriipsukeste järgi.

Omaette suure probleemi moodustab magnetlindi täitmine vastavate signaalidega. Lihtsamate detailide puhul on selleks kasutatud nn. «hea operaatori» menetlust. Selleks tarvitseb vaid lindile märkida otseselt koordinaatide andurite signaalid, sellal kui esimest detaili töötleb küllalt suurte kogemustega ning osav treial või freesija. Hiljem on tööpink nende üleskirjutuste alusel suuteline tootma täpselt samasuguse kujuga detaile soovitud hulgal.

Keerukate, matemaatilisel teel määratud kujuga detailide puhul ei ole niisugune menetlus siiski kohane. Niisugusel juhul antakse toote kuju enamasti arvutuslikul teel leitud punktide koordinaatide kaudu (joonis 104, *b*). Need andmed juhitakse vastavalt programmeeritud elektronarvutusmasinasse, kus toimub eelkõige kontuuri ülejäänud punktide «äraarvamine» lähteandmete *interpoleerimise* teel. Interpoleerimine seisneb lihtsamal juhul üksikute punktide ühendamises sirglõikudega. Üldiselt interpoleeritakse aga kolme, nelja või enamat arvu punkte läbivate matemaatiliselt määratud kõverjoonte abil. Lähtudes töödeldava eseme interpoleeritud kontuurist, arvutab masin juba freesi tsentri vajaliku liikumise trajektoori (joonis 104, *c*). Treimise puhul suporti trajektoor eseme vajalikust kontuurist ei erine ning viimane operatsioon jääb ära.

Nii või teisiti leitud pingi lõikeriistade trajektoori andmed töötatakse sama arvutusmasina abil ümber signaalideks, mis sealsamas magnetlindile kantakse.

On katsetatud ka teistsuguseid süsteeme, kus lähteandmed viiakse perforeeritud lindi abil otse tööpinki, kusjuures interpoleeriv arvutusseade moodustab viimasega ühise terviku. Olgugi et sellisel juhul langeb ära vajadus magnetlindi järele, ei ole see süsteem siiski otstarbekas, sest arvutusseadme tootlikkus on palju suurem tööpingi omast. Normaalselt võib üks arvutusseade varustada programmidega tervet rida tööpinke.

Kuigi sellised programmjuhtimisega tööpingid on alles katsetusstaadiumis, on nad näidanud üsna häid tulemusi, teostades paari tunni jooksul töid, milleks muidu kuluks nädalaid.

31. Automaatika ja telemehaanika osa energeetikas

Käesoleva aja elektroenergeetikas paistab eelkõige silma kõrgete parameetrite, suurte võimsuste ja pikkade ülekandeliinide kasutamine. Ehitatakse ning kavandatakse 300- ning isegi 500-megavatise võimsusega turbogeneraatoreid. Üksainus niisugune generaator toodab rohkem energiat, kui seda suudaksid kõik Eesti NSV elanikud oma lihaste abil üheskoos. Vastavalt on ka turbiinidesse juhitava auru parameetrid kõrged: kuni 300

atmosfääri ja 650 kraadi. Turbogeneraatoreist ei jää oma võimsuselt palju maha ka hüdrogeneraatorid.

On loomisel NSV Liidu Euroopa-osa ühtne energiasüsteem, kuhu kuuluvad kõik olemasolevad energiasüsteemid Lääne-Ukrainast Uraali mäestikuni ja Kaukaasiast Leningradi ümbruseni. Suuri energiasüsteeme luuakse ka tohutul alal ida pool Uraali mäestikku. Kõik need energiasüsteemid vajavad tuhandete kilomeetrite pikkusi liine. Suure võimsuse tõttu toimub siin energia ülekanne 400-, 500- või alalisvoolu kasutamisel isegi tuhande kilovoldisel pingel. Tuhat kilovolti on aga pinge, mille abil võib tekitada 2—3 meetri pikkusi elektrilahendusi.

Tänu tootmisprotsessi pidevusele on energeetikaseadmed üldiselt hästi automatiseeritavad. Seadmete suure võimsuse tõttu on tasuv ja otstarbekas ka kõige keerukamate ja täiuslikumate automaatikaseadmete rakendamine. Laialdaste energeetiliste ühenduste — energiasüsteemide töö ei ole üldse mõeldav tsentraliseeritud telemehaanilise juhtimiseta. Neil põhjustel ongi käesoleva aja energeetikaseadmed väga suurel määral automatiseeritud ja telemehhaniseeritud.

Elektrijaamade automatiseerimine. Energeetikaseadmete automatiseerimisel on kõige olulisemaks etapiks elektrijaamade automatiseerimine. Parimaid tulemusi on seni saavutatud hüdroelektrijaamade automatiseerimisel. Suurem osa väikese ja keskmise võimsusega hüdroelektrijaamadest on käesoleval ajal täielikult automatiseeritud. Säärased elektrijaamad töötavad lukustatud ustega — neis puudub ekspluateeriv personal hoopis. Selliste jaamade valvekorrainsenerid, -tehnikud või -montöörid viibivad põhiliselt kodus, käies ainult kord või paar päeva jooksul jaama üle vaatamas. Avariide puhuks on valvepersonali kodudega ühendatud avariisignalisatsioon. Suurtes automatiseeritud hüdroelektrijaamades viibib siiski veel valvepersonal, mis koosneb paarist montöörist ja valveinsenerist.

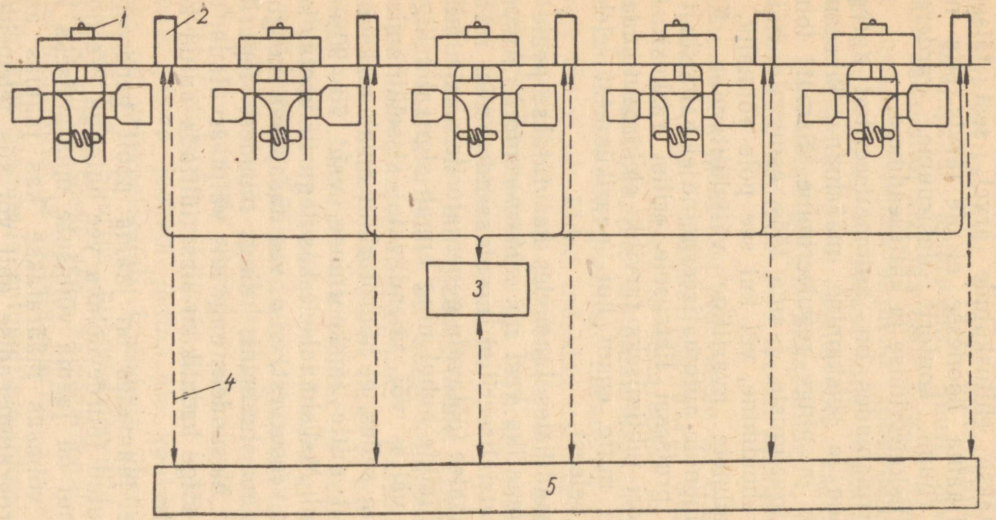
Hüdroelektrijaamade automatiseerimine on tehniliselt suhteliselt hõlpsasti teostatav. Automaatikaseadmete maksumus moodustab siin kõigest umbes 2% hüdroelektrijaama kogumaksumusest. Kui tavaliselt automatiseeritud tootmisvahendid on tunduvalt kallimad automatiseerimata tootmisvahendeist ning ökonoomia saavu-

tatakse alles personali töötasu arvel mitmete aastate jooksul, siis automatiseeritud hüdroelektrijaamad on algmaksumuselt isegi odavamad automatiseerimata hüdroelektrijaamadest. See paradoksaalsena näiv kokkuhoid saavutatakse ehituskulude arvel, sest täisautomaatse elektrijaama hoonesse ei ole tarvis ette näha juhtimispuldi ruumi, kontorit, duširuume, garderoobe ning õhu konditsioneerimise ja kütteseadmeid.

Hüdroelektrijaamades on automatiseeritud agregaatide käivitamine ja seiskamine, määrimine, jahutamine ning võimsuse ja pinge reguleerimine. Samuti toimub automaatselt igasuguste jaama töös esinevate häirete ning rikete ärahoidmine, või kui see pole võimalik, siis vastavate seadmete avariiline väljalülitamine. Kõigi nende operatsioonide automatiseerimine ei valmista tänu tehnoloogilise protsessi lihtsusele erilisi raskusi. Ühe hüdrogeneraatori juhtimiseks tarvilik elektroautomaatika seade koosneb mitte enam kui paarikümnest elektromagnetilisest releest.

Paljuagregaadilistes jaamades kasutatakse peale eelloetletud automaatika veel nn. *autooperaatorit.* Autooperaator on spetsialiseeritud arvutusseade, mis määrab kindlaks optimaalse töötavate generaatorite arvu mitmesuguste töörežiimide puhul ning annab signaalid liigsete generaatorite välja- või täiendavate sisselülitamiseks. Asi seisneb siin selles, et hüdroturbiin omab maksimaalset kasutegurit mitte täiskoormuse, vaid 70—90%-lise koormuse puhul. Maksimaalsele kasutegurile vastav koormus oleneb ka veesurvest, s. o. vee tasapinna kõrgusest hüdroelektrijaama basseinis ning muudest teguritest. Autooperaatori ülesandeks ongi siis välja arvutada, mitu agregaati on kõige kasulikum sisse lülitada antud koormuse katmiseks.

Veehoidlate jaamades on jaama poolt genereeritav võimsus määratud juurdevoolava vee hulgaga. Veehoidla olemasolu puhul on jaama võimsuse määramiseks kaks võimalust — võimsus määratakse kas jaamas asuva automaatse programmseadise abil või siis telemehaanilisel teel dispetšeripunktist. Sageli kasutatakse telemehaanilist ühendust ka jaama muude seadmete juhtimiseks dispetšeripunktist või lähedalasuvast valvepersonaliga elektrijaamast.



Joonis 105

Hüdroelektrijaama telemehaanilise automaatjuhtimise struktuurskeem: *1* — agregaadid, *2* — turbiinide regulaatorid, *3* — autooperaator, *4* — telemehaaniline side, *5* — dispetšeripunkt

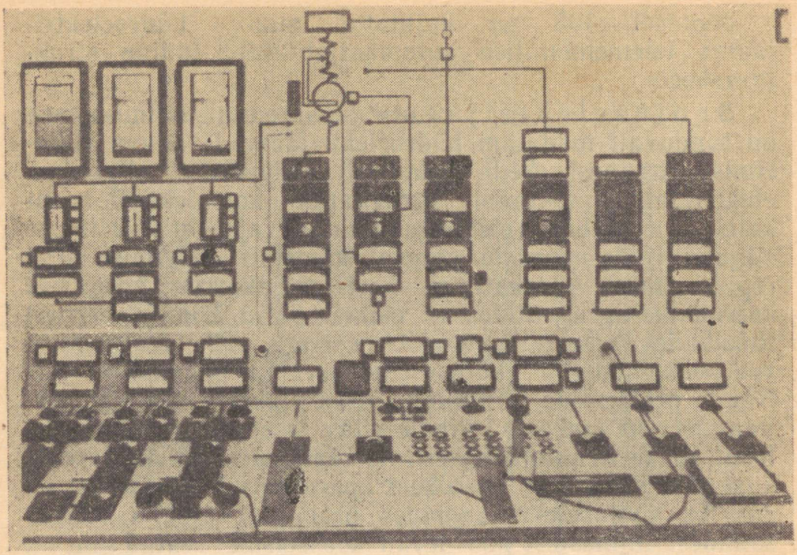
Joonisel 105 on kujutatud suure hüdroelektrijaama telemehaanilise automaatjuhtimise üldine struktuurskeem.

Soojuselektrijaamade automatiseerimise tase on tunduvalt madalam hüdroelektrijaamade automatiseerimise tasemest. Seda peamiselt sellepärast, et soojuselektrijaama põhilisest agregaatide komplektist aurukatel—auruturbiin—elektrigeneraator vajab eriti esimene väga paljude suuruste pidevat kontrolli, jälgimist ning reguleerimist. Aurukatlais — viie majakorruse kõrgustes keerukates agregaatides — esineb palju komplitseeritud füüsikalisi ja keemilisi protsesse, nagu tuha eraldamine, vee pehmendamine, kütuse transport ja põletamine jne. Nende protsesside juhtimine sõltub olukorra üldisest hinnangust, on raskesti formuleeritav ja seetõttu põhimõtteliselt raskesti automatiseeritav, rääkimata selleks tarvilikust ulatuslikust ja keerukast aparatuurist. Seepärast on siis ka soojuselektrijaamades praegusel ajal tavalised sadadest inimestest koosnevad koosseisud. Teatud edu on soojuselektrijaamade personali vähendamisel siiski saavutatud juhtimise tsentraliseerimise teel.

Tsentraliseeritud juhtimise puhul on iga komplekti või nn. *bloki* (katel—turbiin—generaator) kohta üksainus operaator, kes koos abilisega juhib nende seadmete tööd tsentraalselt juhtimispuldilt. Blokkide arv moodsates võimsates elektrijaamades ulatub kahest kuni seitsmeni.

Tsentraliseeritud juhtimise puhul kasutatakse laialdaselt televisiooni katelde vee nivoo, kolletes asuva leegi, tuhaeraldamisseadmete ja muude oluliste sõlmede töö jälgimiseks. Ka Balti soojuselektrijaamas on ette nähtud vee nivoo jälgimine televisiooniseadme vahendusel.

Energiasüsteemide automatiseerimine. Energiasüsteem, kujutatuna maakaardil, moodustab tiheda võrgu, kus jämedad jooned — magistraalliinid — ühendavad omavahel üksikuid elektrijaamu ning tähtsamaid tarbimiskeskusi. Otseselt tarbijatega on ühenduses peenemad ja tihedakoelisemad tarbijate võrgud. Süsteemide konfiguratsioon võib olla väga mitmesugune. Üheks tüüpiliseks konfiguratsiooniks on tähekujuline süsteem, kus keskel asuva tarbijaga, näiteks suurlinnaga, on ühenduses rida kiirekujuliselt laialihargnevate liinidega seotud elektrijaamu.

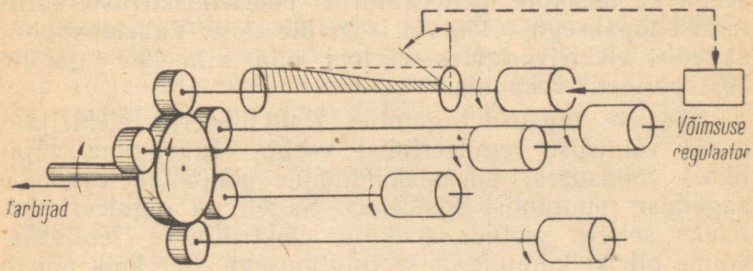


Joonis 106

Katelseadme juhtimispult. On näha katelseadme mnemoskeem ja suur hulk kontrollmõõteriistu. Vasakul ülal — isekirjutavad mõõteriistad

Et paremini ette kujutada energiasüsteemi kui terviku juhtimisel ja reguleerimisel üleskerkivaid küsimusi, võib lähtuda lihtsast mehaanilisest analoogiast. Joonisel 107 on kujutatud ajam, kus terve rida väikesi mootoreid peab pikkade peente võllide kaudu käitama ühte tsentraalset töömasinat. Oletame veel, et tsentraalsele võllile töömasina poolt avaldatav koormus muutub pidevalt, võlli pöörlemiskiirus aga tuleb üsna suure täpsusega konstantsena hoida. Niisugustel tingimustel tekib küsimus, kuidas tuleks reguleerida üksikute mootorite pöördemomenti. Kõige lihtsam oleks muidugi pöördemomendi püsivana hoidmine kõigi mootorite juures peale ühe, mis teostakski reguleerimist. Selleks peab regulaator selle mootori pöördemomenti suurendama, kui koormuse suurenemisel üldine pöörlemiskiirus väheneb, ning vastupidi. Niisugune reguleerimismeetod on kasutatav, kui üksikute mootorite

võimsused on suhteliselt suured, võrreldes ajami koguvõimsusega. Kui aga vedavaid mootoreid on väga palju ning kõige suurema mootori võimsus ei ületa paari protsenti ajami koguvõimsusest, ei ole niisugune reguleerimine võimalik. Tõepoolest, töömasina poolt tarbitava võimsuse kasvamisel, s. o. koormuse suurenemisel peaks reguleeriv mootor kogu koormuse juurdekasvu enese peale võtma. Selle tagajärjel koormuksid üle nii vastav mootor kui ka võll. Võlli väändenurk kasvaks suureks ning võll võiks murduda. Et seda ära hoida, tuleb mingi-



Joonis 107
Energiasüsteemi analoogia

sugusel viisil reguleerida kõiki või tunduvat osa vedavaist mootoreist. Igale üksikule mootorile eespool mainitud kiiruseregulaatorite asetamine ei ole võimalik, sest üksikute kiiruseregulaatorite omadused on paratamatult pisut erinevad. Selle tõttu koormuksid sellisel juhul ühed mootoreist üle, teised jookseksid aga tühjalt. Ilmselt on veel vaja mootorid kuidagi omavahel siduda, et reguleerida võimsuste jagunemist üksikute mootorite vahel. Niisiis on tarvilik keeruline s e o t u d r e g u l e e r i m i s e süsteem, et tagada niihästi ühtlast koormuse jaotust vedavate mootorite vahel kui ka veetava võlli püsivat kiirust, kui koormus veetaval võllil muutub.

Kui kõnelda pikkade painduvate võllide asemel pikkadest elektriliinidest, mootorite asemel elektrijaamadest, töömasina asemel elektrivoolu tarbijaist, võlli pöörlemiskiiruse asemel vahelduvvoolu sagedusest, võlli väändenurga asemel *faasinihkest* vahelduvvoolude vahel liini

alguses ja lõpus ja mootorite pöördemomendi reguleerimise asemel elektrijaamade võimsuse reguleerimisest, saaksimegi kujutluse võimsuse ja sageduse reguleerimise probleemidest suurtes energiasüsteemides.

Pikkade elektriliinidega seotud elektrijaama võimsuse suurendamisel üle teatud piiri esineb eriline nähtus, nn. *staatilise stabiilsuse kaotus,* mille tagajärjel jaam lülitatakse avariiautomaatide poolt süsteemist välja. Kirjeldatud mudelis vastaks staatilise stabiilsuse kaotusele võlli murdumine liigkoormuse tagajärjel.

Energiasüsteemides nõutakse süsteemi sageduse, seega ka üksikute generaatorite pöörlemiskiiruste säilitamist täpsusega 0,4% või isegi üle selle. Vahelduvvoolu sagedus elektrivõrkudes ei tohi olla alla 49,8 ega üle 50,2 perioodi sekundis.

Säärase täpsuse tagamine komplitseerib elektrijaamade võimsuse reguleerimist veelgi. Igasugune vajalikust võimsusest kõrvalekaldumine põhjustab otsekohe sageduse muutumist süsteemis. Sageli on reguleerimine lisaks sellele seotud üksikute elektriliinide läbilaskevõime piirist kinnipidamise tingimusega. See kõik nõuab spetsiaalseid seotud reguleerimise seadmeid, mis muutuvad keerukateks ka selletõttu, et jaamad on üksteisest küllaltki kaugel ning nende omavaheline sidumine on võimalik ainult telemehaaniliste kanalite abil. Veelgi keerukamaks kujuneb olukord, kui reguleerimissüsteem peab arvestama jaamade ökonoomilisi näitajaid koormuse jaotamisel süsteemi üksikute elektrijaamade vahel. Teatavasti ei ole energia hind kõikides jaamades ühesugune, samuti on ka kaod ülekandeliinides mitmesugused. Seepärast arvutatakse spetsiaalsete arvutusseadmete abil iga koormuse jaoks selle kõige sobivam jaotus üksikute tarbijate vahel ning tagatakse sellest jaotusest kinnipidamine automaatse reguleerimise vahendite abil.

Sageduse ja võimsuse reguleerimise probleemid võimsates energiasüsteemides ei ole veel lõplikku lahendust leidnud. On tekkinud teravmeelne idee elektrijaamade võimsuste ja süsteemi sageduse reguleerimiseks *nurga järgi.* Nurga järgi reguleerimisel võrreldakse üksikute elektrijaamade poolt genereeritava vahelduvpinge faasi teatud etaloonpinge faasiga, mida saadetakse näiteks raadio teel üheaegselt kõikidesse jaamadesse. Jaama võimsust reguleeritakse sellisel juhul nende pingete vahe-

lise faasinihke alusel, sest sagedus energiasüsteemis hoidub siis iseenesest võrdsena etaloonsagedusega (vt. joonis 107). Meetodi põhiline iseärasus seisneb selles, et generaatori p ö ö r l e m i s k i i r u s e asemel reguleeritakse generaatori võlli p ö ö r d e n u r k a. Õige pöörlemiskiirus tagatakse seejuures niikuinii. Vaatamata nurga järgi reguleerimise mitmesugustele eelistele ei ole seda seni veel nimetamisväärsel määral praktiliselt rakendatud.

Kaitseautomaatika. Väga olulist rolli energiasüsteemide töös mängib *releekaitse*. Releekaitseks nimetatakse peaasjalikult elektromagnetiliste releede baasil töötavaid automaate, mille ülesandeks on mitmesugustel põhjustel elektrivõrkudes tekkivate lühiste puhul vigastatud võrguosa väljalülitamine. Väljalülitamine toimub suure katkestusvõimsusega *võimsuslülitite* abil, mis käivitatakse vastavate releekaitseseadiste poolt. Üldiselt reageerib releekaitse voolu suurenemisele üle lubatud piiri. Paljudel juhtudel võetakse voolu muutumise kõrval arvesse ka pinge muutumist liinis, voolude erinevust liini kummaski otsas, lühise kestust jne. Seda kõike tehakse selleks, et releekaitse oleks võimalikult *selektiivne*, s. o. lülitaks välja tõepoolest ainult selle liiniosa, kus tegelikult toimus lühiühendus. Vastasel korral võib juhtuda, et tähtsusetus haruliinis toimunud lühise tõttu lülitakse välja vastutav magistraalliin.

Lühiste põhjusi liinides on väga mitmesuguseid. Osa lühiseid on põhjustatud elektriliinide purunemisest tormi, jäite vms. tagajärjel. Neil juhtudel tuleb liin täielikult välja lülitada ning remontida. Teistel juhtudel aga on lühis lühiajaline. Näiteks välgu tagajärjel võib tekkida lühis kaarlahenduse kujul, ilma et juhtmed või isolaatorid puruneksid. Tuntud on ka «vareselühised», mida tekitavad juhtmete vahele sattunud suuremad linnud. Niisuguse lühise puhul võib liini otsekohe pärast avariilist väljalülitamist jälle uuesti tööle lülitada. Selleks rakendatakse samuti automaatikat — *korduvlülitamisautomaat* lülitab liini uuesti sisse sekundi murdosa pärast, nii et tarbijad lühise tekkimist peaaegu ei märkagi. Liin lülitatakse lõplikult välja alles siis, kui mitmekordse korduvlülitamise järel lühis ei likvideeru.

Mõnikord, tavaliselt avariide tagajärjel, hakkab süsteemis vahelduvvoolu sagedus langema, sest generaato-

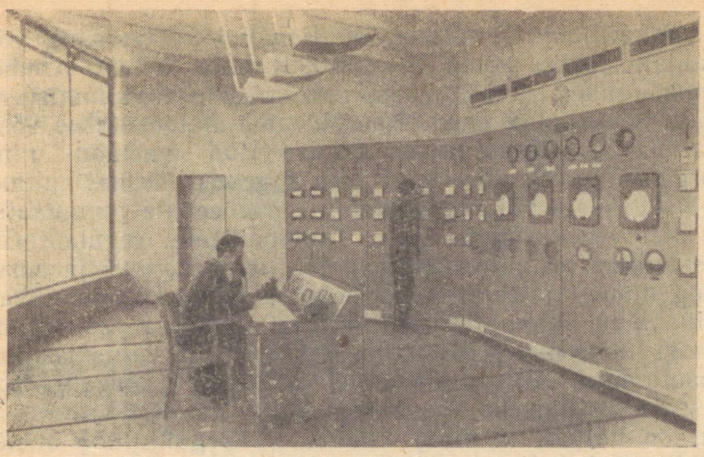
rite koormus muutub väga suureks. Erilised automaadid reageerivad niisugusele sageduse langemisele ning lülitavad välja osa vähemtähtsaid tarbijaid, et tagada tähtsaile tarbijaile vajaliku kvaliteediga energiat. Säärast menetlust nimetatakse automaatseks avariiliseks koormuse vähendamiseks. Avariiautomaatika hulka kuuluvad ka mitmesugused automaadid turbiinide väljalülitamiseks, kui nende pöörlemiskiirus kasvab ohtlikult suureks, katelde kaitseventiilid ning muud seadmed, mis inimese kaastegevuseta hoiavad ära raskete avariide tekkimise.

32. Muude tööstusharude automatiseerimisest

Käesoleval ajal automatiseeritakse kõige erinevamaid tootmisprotsesse, alates polügraafiatööstusest kuni põllumajanduseni, elektroonikaseadmete tootmisest kuni ehitustegevuseni, kondiitritööstusest metallurgiani. Kõigi nende tööstusharude automatiseerijail tuleb kokku puutuda väga mitmesuguste, esimesel pilgul diametraalselt erinevate ülesannetega. Lähem analüüs näitab ometi, et põhilised automatiseerimisele kuuluvad tootmisoperatsioonid omavad paljudel täiesti erinevatel aladel ühiseid jooni. Kõige üldisemalt võib automatiseeritavad tootmisprotsessid jaotada kahte põhigruppi. Ühe põhigrupi moodustavad *transpordi* või *liikumisega* seotud protsessid, nagu näiteks toodete edastamine või lõikeriista liikumise juhtimine. Seda liiki protsesside automatiseerimine toimub peamiselt programmjuhtimise teel. Teise põhigrupi moodustavad mitmesugused *füüsikalised* või *keemilised muundusprotsessid*, nagu need esinevad näiteks energia tootmisel. Muundusprotsesside automatiseerimisel on peamiseks ülesandeks automaatsete regulaatorite abil mitmesuguste näitajate konstantsetena hoidmine või siis ka optimaalse režiimi leidmine ja säilitamine ekstreemregulaatorite abil.

Esineb ka protsesse, kus need ülesanded omavahel kombineeruvad. Näiteks keevitamise automatiseerimisel tuleb tagada nii tööriista liikumine mööda keevisõmblust kui ka keevitusprotsessi enese stabiilsus ja ühtlus.

Niisugustel asjaoludel on võimalik automaatikaseadmeid suurel määral unifitseerida. Unifitseerimine ja tüpi-



Joonis 108
Kõrgahjuseadme reguleerimis- ja kontrollikeskus

seerimine lihtsustab tohutult mitmesuguste tööstusharude automatiseerimist. Selles suhtes on siiski veel vähe ära tehtud, peaasjalikult probleemi uudsuse tõttu.

Metallurgia. Metallurgiatööstuses on ühelt poolt tegemist peamiselt kõrgahju- ja martäänprotsesside, teiselt poolt aga valtsimistööstuse automatiseerimisega.

Kõrgahjude ja martäänahjude automatiseerimisel on peamiseks probleemiks gaaside rõhu, temperatuuri, põlemisprotsessi käigu, lähteainete koosseisu ja muude oluliste näitajate automaatne reguleerimine. Erinevalt näiteks masinaehitusest, kus automatiseerimise peasihiks on tööjõu kokkuhoid, on kõrgahjuprotsesside kui ka mitmesuguste keemiatööstuse protsesside automatiseerimisel peasihiks seadmete produktiivsuse ja toodangu kvaliteedi tõstmine. Töötajate arv on sellistes tootmisharudes protsesside mehhaniseerituse ja agregaatide suurte võimsuste tõttu niikuinii suhteliselt väike.

Näiteks suurendab automaatne soojuslike protsesside reguleerimine kõrgahjude tootlikkust 7—10% võrra. Samal ajal väheneb kütusekulu 6% võrra. Kõrgahjuprotsesside automatiseerimine annab rahvamajandusele

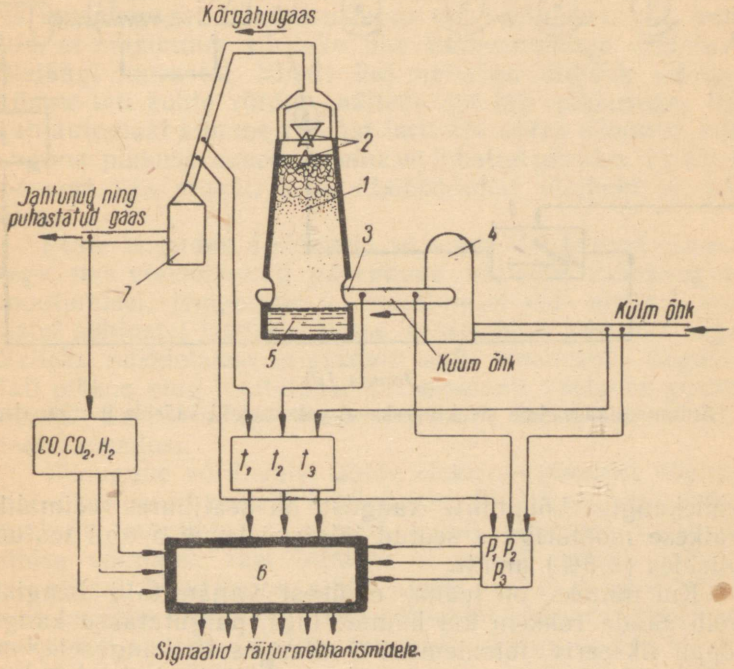
täiendavalt üle 3 miljoni tonni malmi aastas ning võimaldab kokku hoida üle 50 000 tonni kütust. Umbes samasugune on ka martäänprotsesside automatiseerimisel saavutatav efekt. Käesoleval ajal toodetakse 95% malmist ja terasest automatiseeritud martään- ning kõrgahjudes. Seejuures on siin tegemist üksnes mitmesuguste kõrg- või martäänahju parameetrite automaatse *stabiliseerimisega*. Automaatsete regulaatorite ülesandeks on ahju puhutava õhu temperatuuri ja surve ning muude näitajate konstantsena hoidmine. Tunduvalt täiuslikum automatiseerimine, mis võimaldab saavutada veelgi suuremat kokkuhoidu, põhineb arvutusmasinate kasutamisel. Arvutusmasinate kasutamine kõrgahjuprotsesside juhtimiseks on praegu veel katsetusstaadiumis. Nii on näiteks kindlaks tehtud, et kõrgahju töö oleneb põhiliselt kaheksast näitajast. Nendeks näitajateks on kuuma ning külma õhu temperatuur, külma õhu rõhk ja hulk, väljuvate kõrgahjugaaside temperatuur ja CO, CO_2 ning H_2 sisaldus kõrgahjugaasis. Mainitud näitajaid mõõdetakse vastavate andurite abil ning juhitakse arvutusseadmesse, kus arvutatakse välja kõrgahju tootlikkus, süsiniku erikulu tonni malmi kohta ning muud näitajad, mis võimaldavad määrata ahju antavat õhuhulka ning täite koosseisu nii, et oleks tagatud teoreetiliselt kõige otstarbekam režiim (joonis 109).

Kõrgahju täidetakse pidevalt koksi, maagi ja mitmesuguste abimaterjalidega. Et määrata nende materjalide hulka ja vahekorda, on kasutusel *vagunkaalud*. Vagunkaalud võimaldavad doseerida üksikuid täitematerjali komponente kuni 50-kilogrammise täpsusega. Ka vagunkaalude töö on täielikult automatiseeritav, nii et ahju täitmiseks piisab operaatori või arvutusseadise poolt etteantud täite koosseisust. Programmseade korraldab siis üksikute komponentide kaalumist vastavalt nõutud koosseisule. Käesoleval ajal on vagunkaalude töö osaliselt automatiseeritud.

Valtsimisprotsesside automatiseerimisel on esmaseks ülesandeks valtsmetalli paksuse stabiliseerimine automaatsete regulaatorite abil. Need automaatsed regulaatorid mõõdavad pidevalt, näiteks radioaktiivsete andurite abil, väljuva valtsmetalli paksust. Vastavalt sellele toimub valtside vahekauguse reguleerimine.

Huvi pakub ka valtsmetalli tükeldavate kääride töö

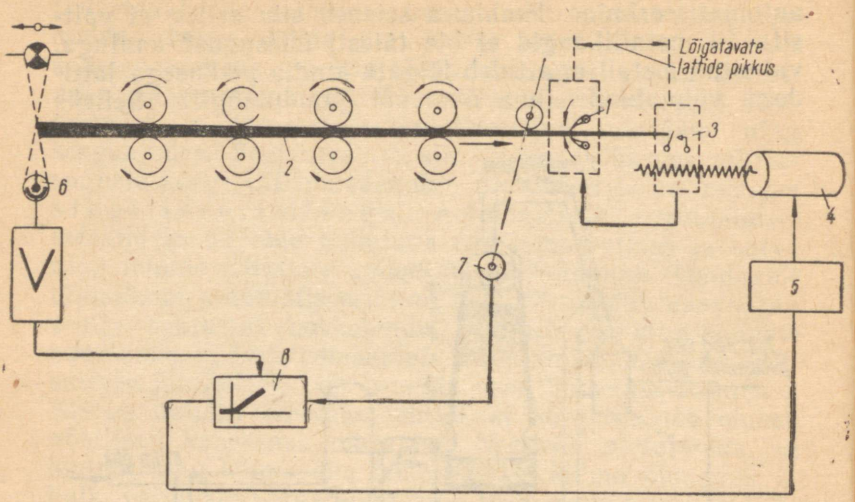
automatiseerimine. Probleem seisneb siin selles, et valtsitavad metallikangid ei ole täiesti ühesuguse kaaluga, valtsitud metall aga tuleb lõigata kindla pikkusega lattideks, võimalikult ilma üle- või puudujäägita. Selleks



Joonis 109

Arvutusseadme kasutamine kõrgahju töörežiimi automaatseks juhtimiseks: *1* — kõrgahi, *2* — toitekoonused, *3* — õhupuhurid, *4* — õhukuumendi, *5* — sulametall, *6* — arvutusseade, *7* — tsüklon

peab automaat valima lõigatavate tükkide pikkuse väikese lubatud kõrvalekaldumise ulatuses nii, et tulla «ots otsaga» kokku. Kuidas see toimub, nähtub jooniselt 110. Joonisel on skemaatiliselt kujutatud metallikangi valtsimine. Metalli tükeldamine toimub spetsiaalsete käigult töötavate kääride *1* abil, mis käivituvad iga kord, kui valtsitud metallikangi *2* ots puudutab lõpplülitit *3*. Saadud lattide pikkuse määrab niisiis kääride ja lõpplüliti



Joonis 110

Automaatikaseadme struktuurskeem valtsmetalli kääride juhtimiseks

vahekaugus. Lõpplüliti kaugust on sealjuures võimalik väikese mootoriga *4* seotud jälgivsüsteemi *5* abil teatud piirides (±5%) muuta.

Kui näiteks on teada, et ühest valtsmetalli kangist võib saada rohkem kui kümme latti, paigutatakse kangi lõppu fikseeriv fotoelement *6* niisugusele kaugusele, et teda valgustataks parajasti sel hetkel, kui valtside vahele on jäänud viimase kümne lati jagu materjali. Kui nüüd fotoelemendile langeb valgus täpselt kääride käivitamise hetkel, siis ülejäänud materjalihulk vastab täpselt kümne lati pikkusele ning lõigatavate lattide pikkust ei tarvitse muuta. Kui aga ülejäägist piisab kümne lati jaoks teatud liiaga, siis ei reageeri fotoelement üheaegselt kääride teotsemisega, vaid pisut hiljem. Selle ajavahemiku jooksul väljub valtside vahelt just ülejäägi pikkune latiosa. See latiosa mõõdetakse tahhodünamo *7* (vt. § 4) ja integraatori *8* (vt. § 14) abil. Tõepoolest, latiga rulli kaudu seotud tahhodünamo pinge on võrdeline lati liikumise kiirusega. Integraatori väljundsuurus on aga võrdeline nii sisendsignaali suurusega kui ka integreerimise kestusega. Kui integraator lülitatakse

sisse just lati mahalõikamise hetkel, välja aga sel hetkel, mil saab valgust kangi lõppu registreeriv fotoelement, on integraatori väljundis tekkinud pinge võrdeline ülejäägi suurusega. Järgnevalt nihutatakse jälgivsüsteemi kaudu lõpplülitit kääridest eemale võrdeliselt integraatori väljundpingega. Võrdelisustegur on sealjuures nii valitud, et nihkumine võrduks ühe kümnendikuga oodatava ülejäägi suurusest. Niisiis kui materjali ülejääk viimase kümne lati kohta võrdub näiteks 0,4 lati pikkusega, lõikab automaat kümme viimast latti 4% võrra pikemad. Niisugune pikkuse suurendamine on lubatud piirides (±5%), see-eest aga praaki, s. o. alamõõdulist ülejääki ei teki üldse.

Peale kirjeldatud sõlmede on seade varustatud organitega, mis võimaldavad parandada valtside vahekauguse muutumisel, temperatuuri muutumisel või muudel taolistel põhjustel lattide pikkuse määramisel tekkinud viga. Selleks mõõdetakse eriseadme abil viimasena lõigatud lati pikkus ning teostatakse automaatselt vastavad parandused. Selles mõttes omab automaat isekohastuva süsteemi omadusi.

Niisugune võrdlemisi lihtne elektronautomaat võimaldab üsna suurt metalli kokkuhoidu. Käsitsi ei oleks lõikepikkuse muutmiseks vajaliku kalkulatsiooni tegemine üldse võimalik, sest inimene ei suuda küllalt kiiresti arvutada. Arvutamise ajaks tuleks valts seisma jätta, mis on juba tehnoloogilistel põhjustel võimatu. Elektroonika abil on aga vajalike arvutuste «käigu pealt» teostamine täiesti võimalik.

Mäetööstus. Töötingimused mäetööstuses on üldiselt raskemad kui teistes tööstusharudes. Seepärast on mäetööstuse automatiseerimine väga aktuaalne küsimus. Majandusliku efekti kõrval on siin peamiseks eesmärgiks kaevurite töö hõlbustamine.

Kõige radikaalsemaks meetodiks kivisöe- ja põlevkivitootmise automatiseerimisel on täiesti erineva ning progressiivse tehnoloogia valik, nimelt kütuste maa-alune gaasistamine. Nimetatud meetod pandi ette juba 1888. aastal D. I. Mendelejevi poolt. Hoolimata suurest huvist selle küsimuse vastu ja üsna laialdasest katsetustööst ei ole allmaagaasistamine veel tööstuslikuks menetluseks kujunenud. Eriti suurt huvi pakub põlevkivi maa-alune šahtideta töötlemine, sest põlevkivi sisaldab suurel mää-

ral orgaanilist ainet hõlpsasti lenduval kujul, teisest küljest on tema tuhasisaldus väga suur. Maa-alune gaasistamine võimaldaks kätte saada põlevkivi väärtusliku orgaanilise osa ja jätta maapinnale vedamata mineraalosa, mis moodustab üle poole põlevkivi üldkaalust.

Maa-aluse gaasistamise protsessi oleks võimalik suure efektiivsusega ja suhteliselt lihtsate vahenditega kompleksselt automatiseerida. Käesoleval ajal tegeldakse nii puurimistööde, maa-aluse põlemise juhtimise kui ka kaugkontrolli automatiseerimise küsimustega vastavalt maa-aluse gaasistamise tehnoloogilise protsessi tarvidustele.

Samal ajal toimub intensiivne tavaliste kaevandamistööde automatiseerimine. Teatud määral iseloomustab seda lahtiste karjääride laialdasem kasutamine. Nii näiteks toodeti 1940. aastal lahtistes karjäärides 3,8% kivisöe kogutoodangust, 1960. aastal aga 20,6%. Palju allmaakaevandamisel vajalikke operatsioone jääb lahtiste karjääride puhul üldse ära, ülejäänute teostamine ja automatiseerimine aga hõlbustub üsna tunduvalt.

Allmaakaevandamisel esineb seevastu terve rida spetsiifilisi pea- ning abioperatsioone, mille kompleksne automatiseerimine on üsna raske ülesanne.

Kaevandamine kui niisugune, s. o. kivimi lahtimurdmine ja tükeldamine etes toimub käesoleval ajal peamiselt kas lõhkamismenetlusel koos soonimismasinate kasutamisega või siis söekombainide rakendamise teel. Lõhkamine loomulikult nõuab inimese otsest kaastegevust, vaevalt on kohane püüda seda automatiseerida. Uuem ja produktiivsem söekombainide rakendamise meetod aga on põhimõtteliselt täiel määral automatiseeritav. Nii on olemas automatiseeritud söekombainide tüübid, mis distantsjuhtimise seadmete kaudu juhituna võivad läbida paarisajameetrise vahemaa. Osaline automatiseerimine, mis võib nii soonimismasinate kui ka kombainide puhul märgatavat efekti anda, seisneb läbimiskiiruse automaatses reguleerimises vastavalt kihi kõvadusele. Niisuguse reguleerimise puhul on masina elektrimootorid alati täie võimsusega rakendatud ning masina tootlikkus võib tõusta 20—30% võrra.

Söekombain kujutab endast iseliikuvat masinat, mille esiosas asuvad kivimit purustavad lõiketerad. Purustatud kivim juhitakse kombaini juures asuvale konveierile.

Järgmiseks kaevandamistööde tehnoloogiliseks operatsiooniks on purustatud kivimi transport konveieritel vagonettideni. Konveierite pikkus võib ulatuda kilomeetriteni. Konveierite automatiseerimine põhimõttelisi raskusi ei paku, ometi on selleks vajalik ulatuslik ning töökindel aparatuur. See asjaolu on mõningal määral pidurdanud konveierite automatiseerimist. Peamine efekt, mis saadakse konveierite automatiseerimisel, on konveierite veomootorite juures töötavate motoristide arvu vähenemine. Automatiseerimine näeb siin ette mootorite automaatset või distantskäivitust ning -seiskamist, samuti kaitset ülekoormuse vastu.

Konveieritelt juhitakse kivim tavaliselt vagonettidesse tõstukiteni transportimiseks. Allmaatranspordi automatiseerimine seisneb käesoleval ajal nagu tavalise raudteetranspordi puhulgi peamiselt automaatpöörangute, tsentraalse signalisatsiooni ning blokeerimise, valgusfooride ja muu taolise rakendamises.

Tõstukite automatiseerimise eesmärgiks on peamiselt motoristide ja muude abitööjõudude arvu vähendamine ning tõstukite juhtimise tsentraliseerimine ühte, tavaliselt maapinnal asuvasse punkti.

Umbes sama teed kulgeb ka veepumpade ja ventilatsiooniseadmete automatiseerimine. Tuleb märkida, et nii liigvee kõrvaldamine kui ka õhuvahetuse tagamine on šahtides esmajärgulise tähtsusega probleemid. Automaatikat rakendatakse siin pumpade ja ventilaatorite sisse- ning väljalülitamiseks sõltuvalt vee nivoost või siis õhu koosseisust šahtis. Kasutatakse õhuanalüsaatoreid, mis annavad signaali ventilaatorite sisselülitamiseks, kui plahvatusohtlike gaaside sisaldus kaevanduse õhus ligineb lubatud ülempiirile. Loomulikult on ventilaatorite ja pumpade mootorid varustatud ka ülekoormuse automaatidega. Mõnikord on mootorid ka distantsjuhitavad.

Seega on siis kaevanduste automatiseerimisel tarvis lahendada esmajoones mitmesuguste suurel arvul esinevate transpordi- ning muude elektrimootorite juhtimise probleem. Põhimõtteliselt ei paku see raskusi. Arvestades aga objektide suurt hulka ning automaatseadmetele esitatavaid kõrgendatud nõudeid plahvatus- ning töökindluse osas, selgub, et automatiseerimistööde maht on väga suur.

Oluline tähtsus kaevanduste töö juhtimisel ning kont-

rollimisel on ka dispetšerisidel. Viimasel ajal püütakse koondada konveierite, soonimismasinate, kombainide, tõstukite, ventilaatorite, kompressorite, pumpade ja tõstukite töö kontroll ning võimaluse piirides ka juhtimine ühte tsentraalsesse dispetšeripunkti. Et selleks vajalikkude sidekanalite arv on suur, siis rakendatakse sageli telemehaanika meetodeid, kuigi kaugused on võrdlemisi väikesed. Kasutatakse ka kõrgsagedussidet.

Aktiivne ning suurel määral telemehhaniseeritud dispetšerjuhtimine võimaldab muuta kaevanduse tööd tunduvalt rütmilisemaks ning vähendada seadmete seisuaegu.

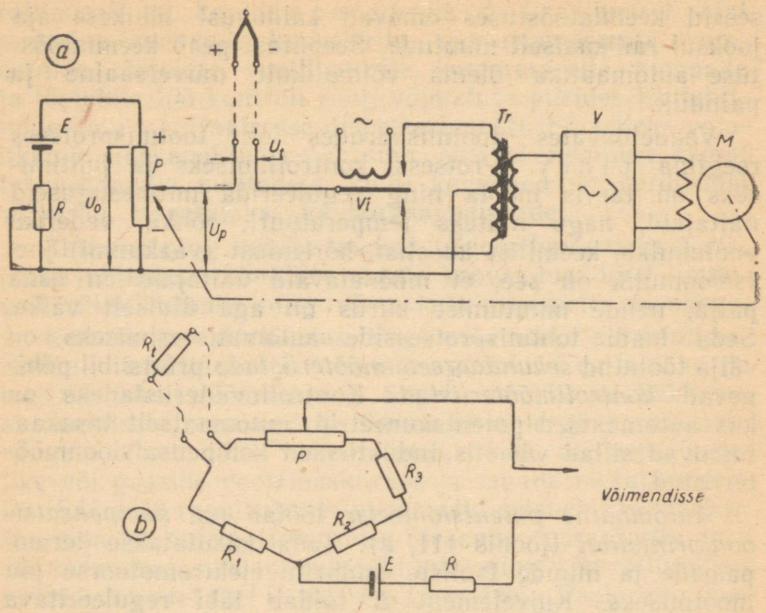
Keemia- ja naftatööstus. Väga sobivateks automatiseerimise objektideks on mitmesugused keemia- ja naftatööstuse harud. Sageli on keemiatööstuses automaatsete regulaatorite kasutamine isegi paratamatu rangete nõuete tõttu temperatuuri, rõhu, niiskuse, vedelike või gaaside voolamaskiiruse ja muude näitajate suhtes. Sääraste regulaatorite olemasolul seisneb keemiatööstuse edasise automatiseerimise ülesanne operaatorite arvu vähendamises, mis toimub juhtimis- ning kontrollfunktsioonide tsentraliseerimise teel. Peale regulaatorite juhtimise võimaluste on tsentraalses juhtimispuldis olemas andmed protsessi mitmesuguste parameetrite kohta, signaalid ventiilide asendite kohta ja samuti seadmed ventiilide juhtimiseks operaatori puldilt. Parema ülevaate saamiseks on operaatori puldil, täpselt nagu energiasüsteemide dispetšereilgi, kasutusel nn. *mnemoskeemid,* s. o. kogu juhitava aparatuuri miniatuurne skemaatiline kujutus. Üksikute ventiilide ja muude seadmete seisukorda tähistavad seejuures mnemoskeemil asuvad signaallambid või elektromehaanilised näiteriistad. Viimased on aparatuuriga telemehaaniliste või distantsjuhtimise kanalite kaudu otseühenduses, nii et operaator on vahetpidamata täpselt kursis seadmete seisukorra ning režiimidega. Et operaatori töö mahtu vähendada, seotakse seadmed distants- või telejuhtimiskanalite abil mitmesuguste programm-, loogikaliste või arvutusseadmetega.

Käesoleval ajal on olemas suure tootlikkusega automaattehased väävelhappe, lämmastikhappe ning süsihappelume tootmiseks, mida juhib ainult üks või kaks operaatorit. Kuigi lihtsamate keemiatööstuse harude täielik automatiseerimine on tehniliselt teostatav, sunnib siin mõningale ettevaatusele asjaolu, et tehnoloogilised prot-

sessid keemiatööstuses omavad kalduvust lühikese aja jooksul radikaalselt muutuda. Seepärast peab keemiatööstuse automaatika olema võimalikult universaalne ja paindlik.

Vaadeldavates tootmisharudes on tootmisprotsess reeglina p i d e v. Protsessi kontrollimiseks ja juhtimiseks on tarvis mõõta ning reguleerida mitmesuguseid näitajaid, nagu näiteks temperatuuri, rõhku, vedeliku vooluhulka, keemilist koostist, hõrendust (vaakuumi) jne. Iseloomulik on see, et mõõdetavaid näitajaid on üsna palju, nende muutumise kiirus on aga üldiselt väike. Seda laadi tootmisprotsesside automatiseerimiseks on välja töötatud *sekundaarsete mõõteriistade* printsiibil põhinevad *kontrollmõõteriistad.* Kontrollmõõteriistadeks on kas automaatsed potentsiomeetrid, automaatselt tasakaalustuvad sillad või siis induktiivsed kompensatsioonmõõteriistad.

Automaatne potentsiomeeter töötab nn. *kompensatsiooniprintsiibil* (joonis 111, *a*). Teda kasutatakse termopaaride ja muude taoliste andurite elektromotoorse jõu mõõtmiseks. Kuivelement *E* toidab läbi reguleeritava takisti *R* täpset potentsiomeetrit *P*. Potentsiomeetri kogupinget U_0 kontrollitakse aeg-ajalt, milleks seda võrreldakse riista sisse ehitatud kontrollelemendi pingega. Seega on pinge U_0 praktiliselt püsiva suurusega. Potentsiomeetri väljundpinget U_p v õ r r e l d a k s e termoelemendilt (või mingilt muult samalaadselt andurilt) saadava pingega U_t. Selleks muudetakse nende pingete *vahe* vibraatori *Vi* ja võimendi sisendtrafo *Tr* abil v a h e l d u v p i n g e k s. Viimast võimendatakse suure võimendusteguriga vahelduvvoolu-elektronvõimendi *V* (vt. § 5) abil ning juhitakse asünkroonmootorisse *M*. Viimane on sobiva aeglustava ajami abil seotud potentsiomeetriga *P*. Seega moodustab seade jälgivsüsteemi, mis püüab potentsiomeetri liugkontakti pidevalt niisuguses asendis hoida, et U_p võrduks mõõdetava pingega U_t. Järelikult vastab potentsiomeetri liugkontakti asend suure täpsusega mõõdetavale pingele. Potentsiomeetri liugkontakti asendit näidatakse vastava osuti abil piisavalt suuremõõdulisel s k a a l a l. Selles seisnebki sekundaarse mõõtmise printsiip — osutit ei pane liikuma mitte väikese võimsusega mõõdetav signaal, vaid viimase väärtust jälgiv suhteliselt suuremavõimsuseline süsteem. Seetõttu on osuti liikumis-



Joonis 111

a — automaatse potentsiomeetri lihtsustatud lülitusskeem; *b* — automaatselt tasakaalustuva silla lihtsustatud lülitusskeem

jõud piisav mõõteriista näitude pidevaks automaatseks üleskirjutamiseks. Selleks on osutiga seotud kirjutusseadis (tavaliselt mittekuivava tindivaruga varustatud sulg). Viimane märgib mõõdetava suuruse pideva kõverana kas rullilt rullile liikuvale diagrammpaberi lindile või siis kettakujulisele pöörlevale diagrammile. Diagrammpaberi liikumiskiirus on valitav vastavalt vajadusele 60-st kuni umbes 10 000 millimeetrini tunnis.

Automaatselt tasakaalustuv sild erineb automaatsest potentsiomeetrist peaasjalikult ainult sisendringi osas, kus kompensatsioonlülituse asemel esineb sildlülitus (joonis 111, *b*). Jälgivsüsteem on seejuures lülitatud nii, et ta püüab silda tasakaalustada. Üheks silla õlaks on *takistustermomeeter* R või mingi muu oomtakistuse muutumisel põhinev andur, sildlülituse ülejäänud õlgades asuvad aga püsiva väärtusega takistid R_1, R_2, R_3. Silla

tasakaalustamine toimub samuti täpse potentsiomeetri *P* abil. Potentsiomeetriga seotud osuti näitab vastavalt graadueeritud skaalal juba otseselt mõõdetavat suurust. Mõõdetav suurus registreeritakse samuti graafiliselt.

Induktiivsed kompensatsioonmõõteriistad erinevad eelkirjeldatutest selle poolest, et nende sisendringid töötavad vahelduvvooluga ja registreerivad induktiivtakistuse muutumisel põhinevate andurite (vt. § 4) signaale.

Kontrollmõõteriistad võivad teostada kas *ühepunktilist* või *mitmepunktilist* kontrolli. Viimasel juhul on kontrollmõõteriist varustatud spetsiaalse ümberlülitiga, mis lülitab kontrollmõõteriista perioodiliselt ümber 2, 3, 6, 12, 24 või isegi 96 suuruse mõõtmiseks. Üksikute mõõtmistulemuste eraldamine diagrammil toimub kas graafikute erineva asukoha, värvuse või muude tunnuste abil.

Kontrollmõõteriistad võivad lihtsate lisaseadmetega varustatult täita automaatsete regulaatorite ülesandeid. Eristatakse kahepositsioonilisi ja proportsionaalseid regulaatoreid. *Kahepositsioonilise reguleerimise* puhul on potentsiomeetri osutava seadisega seotud kontaktipaar, mis lülitab teatud mõõdetava suuruse väärtuste korral täiturmehhanismi (pumbamootorit, lihtsa ajami kaudu ventiili sulgevat või avavat elektrimootorit, kütteseadet vms.) sisse või välja.

Proportsionaalsetes regulaatorites on põhilise potentsiomeetriga seotud täiendav potentsiomeeter, millelt võetavat pinget kasutatakse täiturmehhanismi juhtimiseks. Seega siis sisaldab kahepositsiooniline regulaator releetüüpi mittelineaarsust, proportsionaalne regulaator aga omab praktiliselt lineaarset sõltuvust sisend- ja väljundsuuruste vahel.

Kontrollmõõteriistade baasil ehitatakse ka programmjuhtimisseadmeid. Siin on sõltuvuste käik vastupidine. Diagrammi asemel asub aeglaselt pöörleval võllil kettakujuline šabloon, mille serva profiili kohaselt muudetakse reguleeritavat suurust vastava jälgivsüsteemi abil.

Kirjeldatud seadmete rakendamine ei piirdu üksnes keemia- ja naftatööstusega. Laialdaselt rakendatakse kontrollmõõteriistadel põhinevat automaatikat ka katelseadmeis, metallurgiatööstuses ja mujal. Kontrollmõõteriistadel põhineva automaatika kasutamine on õigustatud lihtsamate objektide puhul.

Keerukate, suure hulga kontrollpunktidega seotud objektide korral on otstarbekam automaatikaseadmeid võimalikult suurel määral tsentraliseerida. Tsentraliseerimise eelised ilmnevad eelkõige numbriliste andurite kasutuselevõtmisel. Enamik andureid on sellisel juhul tavalist tüüpi, ent nende väljundsuurus muundatakse numbriliseks vastava muundaja abil (vt. § 24). Numbrilisel kujul esinevate andmete registreerimine ja töötlemine toimub siis juba suuremal või vähemal määral operaatori kaasabita tsentraalselt. Numbrilisel kujul vastava trükkivseadise (vt. § 22) abil trükitud andmeid on hõlpsam lugeda kui näitusid osutiga varustatud skaaladelt või ka diagramme. Peale selle on numbrilisi andmeid võimalik elektronarvutusmasina abil analüüsida, eraldada olulised andmed mitteolulistest. Viimane asjaolu on keerukate süsteemide puhul eriti tähtis, et vältida operaatori ülekoormamist.

Üheks näiteks tsentraliseeritud automaatjuhtimise kohta võiks olla kodumaine süsteem *Mars-300,* mida on muide edukalt kasutatud sünteetilise kummi tootmise automatiseerimisel. Süsteem omab kuni 300 mõõtepunkti temperatuuri, vedelikukulu, vaakuumi jne. mõõtmiseks. Mõõtmine toimub järjekorras kõikides punktides, kiirusega kuni 10 punkti sekundis. Niisiis kulub kõikide punktide kontrollimiseks pool minutit. Kontroll seisneb selles, et tehakse kindlaks, kas kontrollitav suurus vastab normile või mitte. Mittevastamise korral trükib seade kõrvalekaldunud suuruse punase värviga. On võimalik ka režiim, kus seade trükib järgemööda kõik kontrollitavad suurused.

Süsteem koosneb peamiselt elektromehaanilistest elementidest. Elementide hulk ühe kontrollpunkti kohta ei ole tänu tsentraliseerimisele suur: 2,6 releed, 0,11 sammvalijat, 0,09 elektronlampi, 2,0 germaaniumdioodi, 6,7 takistit ja 0,66 kondensaatorit.

Veelgi suuremate tsentraliseeritud automaatjuhtimise süsteemide puhul osutub elektromehaaniline arvutusseade mittepiisavaks ning tuleb rakendada impulsstehnikal põhinevaid elektronarvutusseadmeid. Sääraste seadmete tähtsus on eriti suur pidevate protsesside juhtimisel. Tsentraliseeritud automaatjuhtimisseadmeid nimetatakse sageli *juhtivateks masinateks.*

Teised tootmisharud. Tunduvalt erinevad automatiseerimise probleemid esinevad näiteks raudteetranspordi alal. Tööjõu kokkuhoidu saavutatakse siin eelkõige rööpaseadjate koosseisu likvideerimise teel, mis osutub võimalikuks seoses distants- või kaugjuhitavate automaatpöörangute kasutuselevõtmisega. Teatud kütuse või elektrienergia kokkuhoidu annab kõige kohasemate veograafikute arvutamine spetsiaalsete arvutusseadmete abil. Samuti on dispetšeriteenistuses kasutatavate arvutusseadmete abil võimalik korraldada veerevkoosseisu ja jaamaseadmete efektiivsemat kasutamist. Selleks peab dispetšeril olema hea telemehaaniline side objektidega. Sobiv on siin kasutada rakendustelevisiooni seadmeid, mis võimaldavad kindlaks teha vagunite üldist paiknemist, teatud juhtudel aga ka nende sisu ja seisukorda.

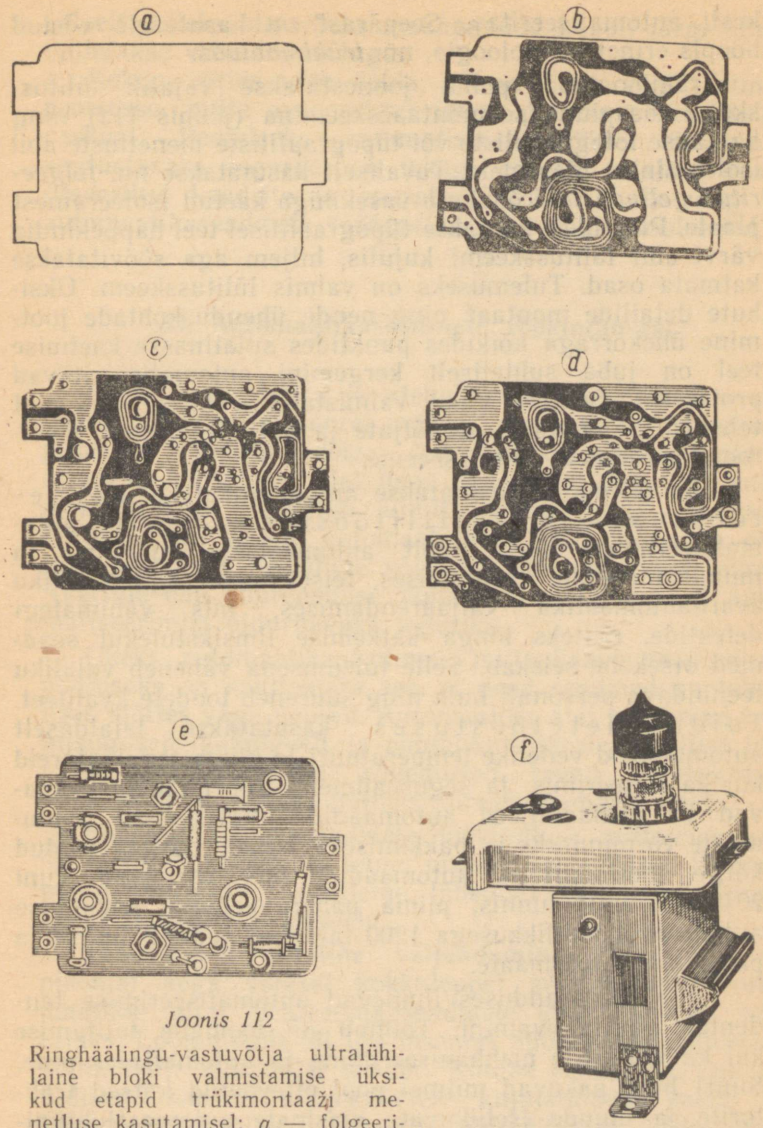
Automaatika kõige tähtsamaks ülesandeks raudteetranspordis on ohutu liikluse tagamine. Selleks on raudtee jagatud lõikudeks, kusjuures iga lõigu alguses asub kolmevärviline valgusfoor. Kui eelseisev teelõik ei ole kasutatav, lülitub valgusfooris sisse punane tuli. Kui eelseisev teelõik on vaba, suletud on aga järgnev teelõik, põleb kollane tuli. Alles juhul, kui mõlemad eelseisvad teelõigud on vabad, lülitub sisse roheline tuli. Tulede lülitamine valgusfoorides toimub spetsiaalsete releelülituste abil, kusjuures andurina leiab kasutamist otseselt rööpapaar. Kui vastaval teelõigul asub mingi veerevkoosseisu osa, on rööpad omavahel lühistatud ning vool ei pääse rööbaste otstele lülitatud releesse. Kui aga rööpad on kusagilt vigastatud ning ühendus katkenud, siis relee samuti ei rakendu. Keelusignaali tekitab seega nii rööbastee vigastus kui ka hõivatud seisund. Et tagada ohutust sõltumatult vedurijuhist, kasutatakse peale valgussignaalide ka vedurite automaatset peatamist. Selleks antakse keelumärgist möödasõitvale vedurile elektriline signaal, mis veduri automaatselt peatab. Mõnel juhul on keelusignaal seotud ka spetsiaalse hoovaga, mis haakub möödasõitva veduri pidurihoovaga ning lülitab niiviisi mehaaniliselt sisse pidurdusseadise.

Nagu tööstuses nii on ka transpordi automatiseerimisel üheks põhijooneks juhtimise üha ulatuslikum tsentraliseerimine. Nõndanimetatud *dispetšeritsentralisatsioon* võimaldab ühel dispetšeril juhtida ning kontrollida pööranguid ja signalisatsiooni kuni kahesaja-kilo-

meetrise ulatusega teelõigul. Selle tulemusena suureneb tee läbilaskevõime kuni 40%. Side toimub sealjuures impulsskoodide abil kahejuhtmeliste liinide kaudu. Uuemates süsteemides kasutatakse ka sagedus- ning polaarsustunnustega signaale.

Omapäraseks efektiivse automatiseerimise objektiks on finants- ja majandusalane arvestus. Tavaline raamatupidamine ning aruandlus on väga aeglane ja ebaoperatiivne ning nõuab suurt arveametnike kaadrit. Automatiseeritud arvestussüsteemi puhul teostatakse kõik arvutused elektronarvutusmasina abil, lähteandmed ja tulemused esitatakse aga perfokaartidel. Sageli on keskuses asuva arvutusmasina sisendid telemehaanilise kanalite kaudu ühendatud punktidega, kus otseselt toimuvad operatsioonid, näiteks hoiukassadega või äride osakondadega. Tsentraalne arvutusmasin võib siis üsna kiiresti koostada bilansid ning muud kokkuvõtted kas üksikute objektide järgi või mõnes muus lõikes ilma inimeste olulise kaastegevuseta. Nii näiteks on teada juhtum, kus kokkuvõtete tegemine, mis varem nõudis 1000 inimtundi tööd, toimub nüüd elektronseadmete abil kümne minuti jooksul. Tööjõu kokkuhoid arvestuse automatiseerimisel on peaaegu sajaprotsendiline. Huvi pakub ka Ameerika Ühendriikides kasutusel olev automatiseeritud hoiukassade süsteem, kus hoiustaja võib teostada operatsioone ükskõik millise hoiukassa kaudu kogu riigi ulatuses. Hoiustaja allkirja kontrollimiseks saadetakse hoiukassasse, kus operatsioon toimub, kaugnägemisseadiste abil hoiustaja allkirja kujutis sellest hoiukassast, kus hoiustaja on registreeritud. On olemas ka automaate, mis on võimelised paberrahasid vastu võtma ning vajaduse korral vahetusraha tagastama.

Käesoleva aja automaatika põhineb peamiselt elektroonikal. Elektroonika muud kasutusalad arenevad samuti kiiresti. Seepärast on väga aktuaalne elektroonikaseadmete tootmise automatiseerimise küsimus. Põhiliseks tehnoloogiliseks operatsiooniks elektroonikaseadmete tootmisel on teatavasti elektrilise lülitusskeemi montaaž. See toimub üldiselt jooksval lindil, kusjuures iga töötaja on spetsialiseerunud teatud operatsioonile — teatud lülituselementide monteerimisele või juhtmete jootmisele. Sellisel viisil toimuv montaaž on äärmiselt ras-



Joonis 112

Ringhäälingu-vastuvõtja ultralühilaine bloki valmistamise üksikud etapid trükimontaaži menetluse kasutamisel: *a* — folgeeritud getinaksist stantsitud pooltoode; *b* — trükiskeem pärast söövitamist; *c* — trükiskeem pärast aukude puurimist ja stantsimist; *d* — trükiskeem pärast detailide montaaži ja ühenduste külgejootmist; *e* — vaade plaadile monteeritud detailide poolt küljest; *f* — üldvaade lõplikult monteeritud blokile

kesti automatiseeritav. Seepärast on kasutusele võetud hoopis erinev tehnoloogia, nn. *trükimontaaž*.

Trükimontaaži puhul joonestatakse vajalik lülitusskeem tasapinnalise montaažskeemina (joonis 112) ning kantakse fotograafiliste või tüpograafiliste menetluste abil isoleerainest plaatidele. Tavaliselt kasutatakse nn. *folgeeritud getinaksi* — õhukese vasekihiga kaetud isoleerainest plaate. Plaatidele kantakse tüpograafilisel teel happekindla värvi abil lülitusskeemi kujutis, hiljem aga söövitatakse katmata osad. Tulemuseks on valmis lülitusskeem. Üksikute detailide montaaž ning nende ühenduskohtade jootmine ühekorraga kõikides punktides sulatinasse kastmise teel on juba suhteliselt kergemini automatiseeritavad protsessid. Sellisel viisil valmistatakse käesoleval ajal televiisorite, raadiovastuvõtjate ja paljude muude elektroonikaseadmete lülitusskeeme.

Üha laiemalt rakendatakse automaatikat ka kergetööstuses. Tekstiilitööstuses seisneb automatiseerimine ühelt poolt automaatsete kudumis- ja muude masinate kasutamises, teiselt poolt aga tundliku avariiautomaatika väljaarendamises, mis vähimategi defektide, näiteks lõnga katkemise ilmsikstulekul seadmed otsekohe seiskab. Selle tulemusena väheneb vajaliku teenindava personali hulk ning suureneb toodete kvaliteet. Toiduainetetööstuses kasutatakse laialdaselt automaatseid vedelike temperatuuri ja nivoo regulaatoreid kui ka doseerimis- ja seguseadmeid. Suurt tähtsust omavad ka mehaanilised automaadid mitmesuguste toiduainete vormimiseks ja pakkimiseks. Nii on näiteks loodud kõrge tootlikkusega automaadid, mis vormivad kuni 20 000 kotletti tunnis, piima paberpudeleisse pakkimise automaadid tootlikkusega 1200 täidetud pudelit tunnis ja palju muid automaate.

Ka põllumajanduses ilmnevad automatiseerimise tendentsid üha tugevamini. Toimub nii loomade talitamise kui ka välitööde mehhaniseerimine ja automatiseerimine. Suurt huvi pakuvad mitmel pool ettevõetud katsed traktorite ja muude iseliikuvate masinate automaatjuhtimiseks. Selleks on püütud kasutada kõige mitmesugusemaid süsteeme, alates kaugjuhtimisest juhtmete kaudu ning raadio teel kuni jälgivsüsteemideni, mis orienteerivad traktori liikumist kas naaberveo, teeserva või siis spetsi-

aalselt selleks otstarbeks mahapandud kaabli järgi, mida toidetakse vahelduvvooluga.

Kokku võttes võib öelda, et on väga vähe tootmisprotsesse, mille automatiseerimine pakuks põhimõttelisi raskusi. Peamiseks automatiseerimistööde läbiviimist aeglustavaks teguriks on ikkagi selleks vajalike kvalifitseeritud kaadrite ja aparatuuri tohutu hulk ning ka automaatikaseadmete *töökindlusega* seotud probleemid.

33. Automaatikaseadmete töökindlusest

Sõnad «automaat» ja «tehniline rike» assotsieeruvad meie teadvuses nii suurel määral, et muutuvad mõnikord peaaegu sünonüümideks. Automaatikaseadmete rikked esinevad käesoleval ajal üsna sageli. On hea, kui automaatide rike põhjustab ainult tootmisseisaku. Paljudel juhtudel aga võivad automaatide rikked põhjustada ohtlikke avariisid, seadmete või isegi inimeste vigastamist. Avariide ohu suurenemise võimalus on kujunenud automatiseerimist pidurdavaks teguriks.

Üheks automaatikaseadmete mittepiisava töökindluse põhjuseks on kahtlemata see, et need seadmed on tehnilises mõttes väga noored. Automaatika alal puuduvad veel niisugused igakülgselt ja põhjalikult järeleproovitud tehnilise ekspluatatsiooni kogemused, tavad ja eeskirjad, nagu need on olemas näiteks aurujõuseadmete kohta.

Ent automaatikaseadmete töökindluse mittepiisavusel on teatud juhtudel ka teine, orgaaniline põhjus. Et seda põhjust selgitada, vaatleme lähemalt töökindluse probleemi teaduslikku käsitelu.

Töökindluse arvuline väljendamine. Töökindlus oli pikemat aega vaiksel kokkuleppel arvestatavaks automaatika- ning elektroonikaseadmete kvalitatiivseks näitajaks. Loomulikult oli iga inseneri püüdeks projekteerida võimalikult töökindlat seadet. Kuidas seda teha, see jäi üldiselt inseneri subjektiivsete kujutelmade, vaistu ja kogemuste hooleks. Mingeid objektiivseid kriteeriume konstruktsiooni töökindluse üle otsustamiseks tarvitusel ei olnud. Alles mõned aastad tagasi tehti esimesed sihikindlad sammud elektroonikaseadmete töökindluse arvuliseks väljendamiseks.

Idee iseenesest oli lihtne — katsetada teatud arvu samatüübilisi seadmeid normaalsetes talitlustingimustes näiteks tuhande tunni kestel ning arvutada siis välja töökorras seadmete protsent. Küllalt suure katseobjektide arvu puhul väljendabki siis arvutatud protsent *matemaatilist tõenäosust*, et antud seade on suuteline töötama tuhat tundi. Selle tõenäosuse arvulist suurust nimetataksegi vastava seadme *töökindluseks* ehk *usaldatavuseks*. Loomulikult võib seadme töökindlus olla ainult väiksem kui 1 (või 100%).

Seadme konstruktorile aga katsetamisest üksi ei piisa — tarvis on juba eelnevalt, arvutuslikul teel seadme töökindlust prognoosida, et mitmesuguseid konstruktsiooni variante töökindluse seisukohalt võrrelda.

Et seda võimaldada, tuli leida moodus seadme töökindluse arvutamiseks, lähtudes tema üksikute *koostisosade* töökindlusest. Osutus, et see on enamiku praktikas kasutatavate seadiste puhul üsna lihtne. *Seadme töökindlus väljendub nimelt tema üksikute koostisosade töökindluste korrutisena*. Selleks et arvutus oleks õige, tuleb üksikute elementide töökindlused väljendada mitte protsentides, vaid lihtsalt kümnendmurdudena. Loomulikult on siis arvutatud töökindlus alati väiksem ühest, olgugi et see kvaliteetsete elementide puhul võib ulatuda ühele üsna lähedale. Elementide arvu suurenemisel väheneb aga seadme kui terviku töökindlus kiiresti. Olgu automaatikaseadme koosseisus näiteks kümme elektronlampi. Võrdugu iga elektronlambi töökindlus 0,9-ga. Regulaatori töökindlus on siis kõigest $0{,}9^{10} \approx 0{,}35$.

Sageli kasutatakse seadme töökindluse mõõdupuuna mitte töökindluse arvulist väljendust, vaid antud seadme või elemendi *keskmist rikkesagedust*. Elementide keskmine rikkesagedus tehakse kindlaks samuti eksperimentaalsel teel ning väljendatakse keskmise rikete arvuna tuhande töötunni ja ühe elemendi või seadme kohta. Keskmine rikkesagedus on tavaliselt väike murdarv. Nii on näiteks elektronlampide keskmine rikkesagedus 0,09 riket 1000 töötunni kohta, takistite rikkesagedus 0,005 riket 1000 töötunni kohta, kondensaatorite rikkesagedus 0,002 riket 1000 töötunni kohta. Toodud arvud on näitlikud, tegelikult võivad nad muutuda suurtes piirides sõltuvalt elementide tüübist ning töötingimusist. Seadme keskmist

rikkesagedust väljendatakse tema koostisosade rikkesageduste summana.

Koosnegu elektronarvutusmasin näiteks 5000-st elektronlambist, 20 000-st takistist ja 10 000-st kondensaatorist eespool mainitud keskmiste rikkesagedustega. Masina kui terviku rikkesagedus moodustab siis

$$5000 \cdot 0{,}09 + 20\,000 \cdot 0{,}05 + 10\,000 \cdot 0{,}002 = 570 \text{ riket}$$

1000 tunni kohta ehk ligikaudu üks rike iga 2 töötunni kohta. Käesoleval ajal kasutatavate elektronarvutusmasinate keskmine rikkesagedus on arvutatule lähedane. See ei valmista erilist probleemi, kui masin töötab arvutustsentris kõrge kvalifikatsiooniga personali järelevalvel. Kui aga arvutusmasinat kasutatakse tootmisprotsessi automaatseks juhtimiseks, on nii sagedased rikked loomulikult vastuvõetamatud.

Nagu öeldud, kasvab seadme keskmine rikkesagedus võrdeliselt tema elementide arvuga; töökindlus väheneb samal ajal kiiresti. See ongi üha keerukamaks muutuvate automaatikaseadmete väikese töökindluse üks peapõhjusi. Eriti teravasti avaldub see asjaolu diskreetse toimega elektronarvutusmasinate juures, kus elementide arv on niigi väga suur ja näitab edasist kasvutendentsi. Ka teistes automaatikaseadmeis on areng seotud esmajoones elementide ja sõlmede arvu suurenemisega. Selles peitub tõsine oht automaatika progressile. Tõepoolest, kui suureneb avariide tekkimise oht automaatikaseadmete rikete tagajärjel, rikete kõrvaldamiseks aga osutub vajalikuks suurearvulise kõrge kvalifikatsiooniga abipersonali juuresviibimine, võib kaduma minna kogu automatiseerimiselt oodatav efekt.

Seda laadi puhtpraktilised kaalutlused ongi olnud põhjuseks, miks töökindlusealased uurimused on sõna otseses mõttes kahe-kolme viimase aasta jooksul paisunud terveks laialdasel matemaatilisel baasil põhinevaks teadusharuks. Samal ajal on töökindluse tõstmiseks kasutusele võetud mitmesuguseid organisatsioonilisi ja administratiivseid abinõusid.

Reserveerimine. Toodud arvutused ja arutlused on kehtivad juhul, kui mistahes elemendi või üksikosa rikke puhul kogu seade lakkab töötamast. Enamikul juhtumeist ongi see tõepoolest nii. Vajaduse korral aga on võimalik konstrueerida seadmeid, kus teatud elementide

rikete puhul seade tervikuna ei lakka töötamast. Sellisel juhul seadme töökindlus tõuseb suurel määral. Selline olukord saavutataksegi *reserveerimise* teel. Reserveerimise puhul kasutatakse ühe elemendi, näiteks elektronlambi asemel kahte või enamat, kusjuures üks nendest töötab, teised aga moodustavad reservi. Töötava elemendi rikke puhul lülitatakse automaatselt sisse reserveeriv element. Et nüüd jääb riknenud elemendi asendamiseks piisavalt aega, tagab selline reserveerimine seadmete praktiliselt katkestusteta töö. Riknenud elementide asendamist võib aga teostada vähest tööjõukulu nõudvate regulaarsete ringkäikude korras. Ometi kerkivad reserveerimise laiemal rakendamisel üles mitmesugused raskused. Aparatuuri suurekspaisumise kõrval on raskuseks ka rikete avastamise ja reservi sisselülitamise probleemid. Kui rikete avastamiseks ning reservi sisselülitamiseks määratud elemendid ja seadmed ei ole piisavalt töökindlad, võib reserveerimine olukorda isegi halvendada.

Seepärast toimub praegu uurimistöö ühelt poolt sobivamate reserveerimislülituste leidmiseks, teiselt poolt aga püütakse tõsta üksikute elementide kvaliteeti ning töökindlust. Väga suur tähtsus töökindluse tõstmisel on ka t ö ö k u l t u u r i l ning mitmesugustel profülaktilistel abinõudel.

VIII PEATÜKK

KÜBERNEETIKA

34. Küberneetika mõiste

Küberneetika on termin, mida aktuaalsuselt võib julgesti kõrvutada mõistetega, nagu automatiseerimine, kosmoselennud ja tuumaenergia. Erinevalt viimastest tehnika- ja teaduseharudest, mille sihid ja saavutused on kõige laiemate rahvahulkade silme ees selgel ja hõlpsasti mõistetaval kujul, on küberneetika oma tekkimise momendist alates seotud teatud salapärasusega, võiks isegi öelda müstikaga. Osalt on küberneetika «kurja kuulsuse» tekkimisele kaasa aidanud mõned lühinägelikud filosoofid, ristides küberneetika reaktsiooniliseks ebateaduseks, osalt aga populaarsete väljaannete autorid, omistades tulevikumasinatele üleloomulikke võimeid.

Küberneetika mõneteistkümneaastase eluea jooksul on paljugi selgunud. Käesoleval ajal on mõistetud ülalnimetatud äärmuslike vaadete ekslikkust. Ometi, küsides spetsialistilt: mis on siis küberneetika? võime saada kõige erinevamaid vastuseid. On spetsialiste, kes väidavad, et küberneetika ei olevat isegi mitte teadusharu, vaid lihtsalt liikumine. Seda väidet põhjendatakse asjaoluga, et küberneetikal puudub teaduslikule distsipliinile omane range teoreetiline alus. Siiski on käesoleval ajal ilmne, et niisugune range teoreetiline alus luuakse. Küberneetika tähtsamaid aluseid, nimelt *informatsiooniteooria*, on juba nüüd märkimisväärsel määral välja kujunenud.

Küberneetika päritolu. Sõna «küberneetika» on üle võetud prantsuse füüsikult Ampère'ilt. Juba 1834. aastal, püüdes anda kõikehaaravat teaduste klassifikatsiooni, nimetas ta nii hüpoteetilist teadust inimühiskonna juhtimisest. Sõna «küberneetika» ei ole neologism. Küllalt

sageli esineb ta kreeka antiikaja filosoofil Platonil laevajuhtimise kunsti tähenduses, mõnikord aga ka ülekantud tähenduses.

1948. aastal ilmus ameerika matemaatiku Norbert Wieneri sulest teos «Küberneetika ehk juhtimine ja side loomas ning masinas». Selle töö tulemusena omandas küberneetika oma kaasaegse mõtte ning sisu.

On tähelepanuväärne, et nimetatud teos valmis tööde kokkuvõttena, mida matemaatik ja insener Wiener oli teostanud kümmekonna aasta jooksul koostöös arsti A. Rosenbluethiga. Niisiis püüab küberneetika leida kokkupuutepunkte ühelt poolt tehnika ja teiselt poolt bioloogia ning meditsiini vahel.

Ei tule arvata, et tehnika ja bioloogia olid enne küberneetika väljakujunemist teineteisele täiesti võõrad alad. Kangi seadus on näiteks ühevõrra kasutatav nii kaevuvinna kui ka küünarvarre liikumise määramiseks, silma ning fotoaparaadi ehituses on mõndagi analoogilist; sama võib ka öelda terve rea muude organite ning seadmete kohta. Mida tõi siis uut küberneetika? Sellele küsimusele vastamiseks tuleb silmas pidada mõisteid «juhtimine ja side», mis figureerivad eelnimetatud Wieneri teose pealkirjas. Nende terminite tähenduse selgitamiseks on kasulik jälgida, kuidas tekkis ning arenes t ö ö.

Töömeetodite arengust. Inimene ning töö tekkis teatavasti siis, kui inimese esivanemad hakkasid kasutama t ö ö r i i s t a. Kui loom kaevab enesele küünte abil uru, ei räägita tööst ega mõistusest, vaid instinktiivsest tegevusest. Kui seda teeb ürginimene, kasutades selleks algelist kivist tööriista, oleme juba õigustatud kõnelema tööst ja mõistusest. Mõistus, töö ning inimene tekkisid siis, kui inimese esivanem õppis oma organismi liikmete funktsioonide laiendamiseks teadlikult kasutama looduses leiduvaid e s e m e i d ja m a t e r j a l e. Niisiis oli töö esimeseks põhiliseks eelduseks eluta looduse — mitmesuguste esemete, materjali, aine mõistusepärane organiseerimine inimese poolt. See toimus eranditult inimese enese organismi füüsiliste ja vaimsete ressursside abil. Puutüvest paadi ehitamisel kavandas inimene mõttes paadi kuju, võib-olla ka joonistas selle kuhugi ning teostas kava algusest lõpuni ise. Ühelt poolt määras inimene kindlaks, kuhu, millises suunas ja millise tugevusega tuleb suunata kirvehoobid paadi tahumiseks, teiselt poolt

andis ise kirvele vajaliku liikumise hoo. Väliseid energiaallikaid inimesed tol ajajärgul ei kasutanud. Sel ajajärgul tegi inimene esimesi samme mitmesuguste lihtsate mehhanismide (kang, kaldpind, plokk) kasutamiseks. Niisiis võib sel etapil täheldada esimesi mehhaniseerimise algeid.

Järgmiseks suureks etapiks töö arengus oli energia looduslike varude ärakasutamine mitmesuguste tööülesannete täitmiseks. Sel ajajärgul hakkas inimese töö iseloom üha enam lähenema masinate juhtimise ülesannetele. Tööks vajalik liikumisenergia saadi mitte enam inimese või üldse elusolendi lihaste, vaid tuule, kütuse või muu taolise looduslikku energiaallika arvel. See oli tohutu samm töö arenguteel. Ometi tuli sel ajajärgul ja tuleb veelgi selle ajajärgu pärandina sageli teha igavat, mehaanilist tööd.

Pikkamisi hakkasid töötegijal või tööprotsessiga kuidagi teisiti lähedalt seotud isikutel tekkima ideed, kuidas hõlbustada masinate juhtimist. Inimese ülesanded masinate juhtimisel muutusid järk-järgult ikka üldisemateks, algas tööprotsessi automatiseerimine. See toimus esialgu kuidagi märkamatult, evolutsiooni teel, tööstuste tsehhides. Kuni küberneetika tekkimiseni ei seadnudki rakendusteadused tõsiselt üles küsimust, kuidas toimub juhtimine inimese enese organismis mingisuguse töö teostamisel. Kas inimorganismi tegevust juhivad mingid erilised «psüühilised» jõud ja nähtused, mida laboratooriumi tingimustes reprodutseerida ei ole võimalik, või on siin maksvad needsamad seaduspärasused mis eluta mateeria puhulgi? Milles seisneb üldse juhtimise ning järelikult ka mõtlemise olemus?

Küberneetika seadis selle küsimuse üles täie teadusliku printsipiaalsusega. Ja mitte ainult ei seadnud üles, vaid andis ka küllalt põhjendatud vastuse. N. Wiener ja mõned teised autorid analüüsisid mitmesuguseid juhtimise nähtusi elusorganismides ning võrdlesid neid tollal juba hästi väljakujunenud automaatse reguleerimise printsiipidega. Tehti kindlaks nende printsiipide kehtivus elusorganismide puhul. Samuti juhiti tähelepanu mõningaile analoogiaile elektronarvutusmasinate ja inimese kesknärvisüsteemi osade, eeskätt aju talitlusviisides. Märgiti ära närvisüsteemi teatud sarnasus telemehaanilise sidega.

Kokku võttes küberneetika teadaolevad resultaadid, võib praegu juba täie kindlusega väita, et nii masinate-automaatide, elusorganismide kui ka organismide kollektiivide käitumisajenditeks on informatsiooni, mitmesuguste teadete ja signaalide säilitamise, edasiandmise ja muundamise protsessid. Automaatse reguleerimise puhul on tegemist informatsiooni edasiandmise ja muundamisega, olgu siis korrigeerivates ahelates, olgu siis andureis, kus informatsioon reguleeritava parameetri kohta muudab oma kuju. Telemehaanika tegeleb peamiselt informatsiooni edasiandmisega. Mitmesugused arvutusseadised tegelevad peaasjalikult informatsiooni muundamisega. Programmjuhtimise puhul omab väga olulist osa programmis sisalduva informatsiooni säilitamine, et seda juhtimise käigus realiseerida. Kõik need informatsiooninähtused esinevad ka elusorganismides, olgugi et viimastes on nende protsesside jälgimine äärmiselt raske — igatahes palju raskem, kui inimese enese ehitatud masinais ja aparaatides. Igal juhul võib väita, et igasugune sihipäraselt teotsev elusorganism või masin peab tingimata omama organeid informatsiooni säilitamiseks, muundamiseks ja edasiandmiseks.

Mateeria ja informatsioon. Informatsiooniprotsesside olemasolu näitab õieti süsteemide kõrget organiseeritust. Ookeanid, kinnistähed, atmosfäär, tuli, kosmiline ruum on aine ja energia, s. o. mateeria[1] võrdlemisi korrapäratud kuhjumised. Elu, orgaanilise looduse tekkimisega omandab mateeria kõrgemalt organiseeritud vormid ning struktuuri. Elu on isegi kõige primitiivsemate vormide puhul seotud informatsiooniprotsessidega. Isegi muude informatsiooninähtuste puudumisel on elu ja arengu vältimatuks eelduseks pärilike tunnuste edasiandmine. Viimase mehhanism on käesoleval ajal selgunud niisugusel määral, et võib kindlaks teha isegi pärilikkude tunnuste üldarvu, mida organism põhimõtteliselt edasi anda võib. Orgaanilise elu arenedes kasvab informatsiooninähtuste osatähtsus. Inimühiskonnas on informatsiooni tähtsus üsna suur. Inimühiskond on võimeline looma ka sekun-

[1] Mateeria võib teatavasti esineda nii aine kui ka energia kujul. Aine ning energia on mateeria esinemisvormid.

daarseid, mitteorgaanilise päritoluga seadmeid informatsiooni töötlemiseks, mis otseselt looduses, evolutsioonilisel teel kuidagi tekkida ei saaks. Sihipärase tegevuse esinemisel ei ole informatsiooniprotsesside tähtsus sugugi väiksem aine ja energia muundumise protsesside tähtsusest. Järelikult on ka informatsiooninähtusi uuriv teadus — küberneetika — mitte vähema tähtsusega kui aine muundumisi käsitlev teadus — keemia — või peamiselt energia ilmingutega tegelev teadus — füüsika.

Nende kapitaalsete, klassikaliste teadustega võrreldes on küberneetika täiesti lapsekingades. Sellal kui energia või aine muundumiste kohta on käesoleval ajal täiesti selge, märkimisväärsete «valgete laikudeta» kujutlus, on küberneetika tervikuna üksainus valge laik, kus puuduvad veel sootuks üldised seaduspärasused. Enam-vähem selgunud on seni ainult informatsiooni h u l g a määritelu. Puuduvad seadused, mis oleksid võrreldavad energia jäävuse seadusega, ei tunta konstante, mis vastaksid soojuse mehaanilisele ekvivalendile või Avogadro arvule. Võib-olla on ka asjatu sääraste analoogiate otsimine. Kindel on ainult see, et informatsiooninähtused hakkavad juba alluma matemaatilisele käsitelule, kuigi võib-olla matemaatika ise elab seejuures üle kõige kardinaalsemaid muutusi.

35. Informatsioon

Väide, et informatsiooni küsimuses puuduvad avastatud seaduspärasused hoopis, ei ole päris täpne. Informatsiooniteooria kitsamal alal, mille rakendusväärtus on käesoleval ajal suurim, nimelt informatsiooni edasiandmise teooria ehk üldise sideteooria valdkonnas on juba mõningaid põhjapanevaid avastusi, mille eest oleme tänu võlgu peaasjalikult ameerika insenerile ja matemaatikule Claude Shannonile. [1]

Need tööd puudutavad informatsiooni koguse ehk hulga määritelu, sidekanalite läbilaskevõime küsimust ning sidekanalis esinevate häirete mõju. Kuigi viimased küsimused omavad eelkõige praktilist, insenerlikku rakendusväärtust, on ka nende üldine tunnetuslik väärtus üsna

[1] Sama Shannon rakendas muide ühena esimesist matemaatilist loogikat elektriliste lülituste uurimisel.

suur, sest avastatud seaduspärasused on küllalt lihtsalt ning üldiselt formuleeritavad. Informatsiooni tekkimise, säilitamise ja muundamise kohta seevastu teoreetilised üldistused seni peaaegu puuduvad.

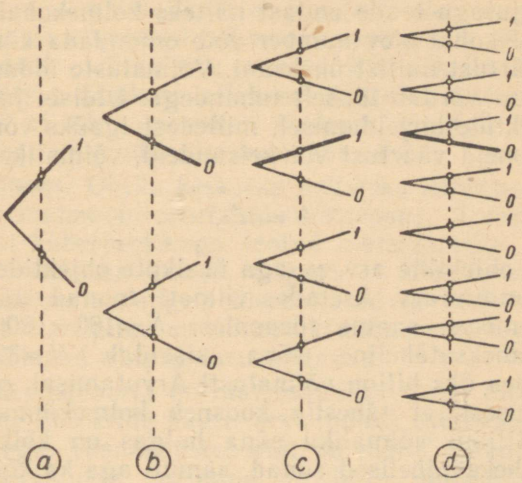
Informatsiooni hulga määramine. Informatsiooni all sõna tavalises tähenduses mõistetakse eelkõige ajalehtede ja raadio kaudu levitatavaid poliitilisi ja muid uudiseid. Pisut laiemalt võttes kuuluvad informatsiooni mõiste alla ka mitmesugused teated, mis antakse edasi ühelt isikult teisele ning mis omavad enam või vähem olulist tähtsust just antud isikute jaoks. Isiklikku või ametialast laadi informatsiooni võidakse edasi anda suuliselt, kirja, telegraafi või telefoni teel.

Informatsiooni h u l g a määramise tarvidus tekkiski eelkõige seoses telefoni- ja telegraafiühenduse probleemidega. Nii ühel kui ka teisel juhul võib edasiantavat informatsiooni väljendada mingisuguse teksti kujul. Kõige loomulikum oleks kasutada informatsiooni hulga määramiseks tähtede või sõnade arvu, millest tekst koosneb. Praktiliselt kasutataksegi säärast näitajat kõige enam. Ka informatsiooniteooria lähtub informatsiooni elementaarsete koostisosade hulgast. Ometi on siin tarvilik lisada rida täpsustusi. Eelkõige tuleb lahendada küsimus, kuidas arvutada informatsiooni hulka, kui informatsioon on esitatud mitmesugustes vormides. Näiteks sama teate puhul sisaldab tema venekeelne kuju tavaliselt pisut rohkem tähti kui eestikeelne kuju, morsemärkide abil esitatuna on aga üksikute märkide, s. o. punktide ja kriipsude arv hoopis suurem kui esialgne tähtede arv. Nii et tähtede või märkide arv teates on muutlik, eriti siis, kui teadet ei anta edasi tavalise alfabeedi abil, vaid mingisugusel viisil k o o d i t u n a. Ometi on teate informatsiooniline sisu mistahes vormi puhul täpselt ühesuguse väärtusega. Oleks loomulik, kui informatsiooni mõõtühik seda asjaolu arvestades näitaks s i s u l i s t informatsiooni hulka.

Selleks et määrata informatsiooni hulka sõltumatult tema avaldusvormist, tuleb lähtuda sellest, kui keerukat küsimust saadud informatsioon aitab selgitada. Küsimuse keerukuse üle võib otsustada võimalike vastuste arvu järgi.

Tundmatul teelahkmel sisaldab meile tarvilik informatsioon üht kahest võimalikust vastusest: «sõita pare-

male» või «sõita vasakule». Vastava kokkuleppe olemasolul võib seda informatsiooni lühiduse mõttes kahendsüsteemis koodida; näiteks nii: «sõita vasakule» — 0 ja «sõita paremale» — 1. Võimalike vastuste arv antud juhul $N=2$. Pikemaks ja keerulisemaks osutub juba teade,



Joonis 113

Diagramm võimaluste arvu kohta ühe (*a*), kahe (*b*), kolme (*c*) ja nelja (*d*) pileti puhul

mis näitab, millised loteriipiletid teatud arvu piletite hulgas on võitnud. Informatsioon esimese pileti kohta sisaldab kaks võimalikku vastust. Informatsioon teise ja järgmiste piletite kohta sisaldab samuti kaks võimalikku vastust iga pileti kohta.

Joonisel 113 on skemaatiliselt kujutatud, kuidas ühe pileti puhul on meil tegemist kahe võimaliku vastusega, kahe pileti puhul nelja võimaliku vastusega, kolme pileti puhul kaheksa võimaliku vastusega ja nii edasi. Jämeda joonega on joonisel kujutatud juhtum, kus neljast piletist esimene ja kolmas on võitnud (1), teine ja neljas pilet aga ei ole võitnud (0). Vastuste või kombinatsioonide üldarv N on mitmesugustel juhtudel määratav valemiga

$$N=2^n,$$

kus n on küsimuste üldarv, mille kohta teade peab andma «ei—jaa»-tüüpi vastused.

Veel keerukamaks kujuneb teade siis, kui iga objekti puhul on tegemist mitte k a h e, vaid m i t m e võimalusega. Kujutagu teade endast näiteks kolmekohalist arvu. Arvu igal kohal olev number võib omandada kümme erinevat väärtust nullist üheksani. Võimaluste üldarv 000-st kuni 999-ni võrdub täpselt tuhandega. Üldisel juhul, paljude objektide kirjeldamisel, milledest igaüks võib omandada mitmeid väärtusi või seisundeid, võimalike teadete üldarv

$$N=m^n,$$

kus n on objektide arv, m aga üksikute objektide võimalike seisundite arv. Asetades viimati toodud näite andmed valemisse, saame tõepoolest $N=10^3=1000$. Tundmatu kaheksatäheline sõna sisaldab $N=32^8\cong 10^{12}$, s. o. umbes üks biljon võimalust! Arvutamisel on lähtutud eeldusest, et tähestik koosneb kolmekümne kahest tähest. Biljoni võimaliku sõna hulgas on kõik tuntud keelte kaheksatähelised sõnad, samuti aga ka kõik mõttetud kaheksatähelised tähtedekombinatsioonid.

Mitmesugustel põhjustel eelistatakse informatsiooni mõõduna kasutada siiski mitte otseselt võimaluste arvu, vaid selle logaritmi, tavaliselt kahendlogaritmi.

Informatsiooni hulk I võrdub niisiis

$$I=\log_2 N=n\log_2 m. \qquad (1)$$

On huvitav märkida, et kui võimaluste arv $m=2$, s. o. kui informatsioon on väljendatud kahendkoodi kujul, siis $\log_2 2=1$ ja $I=n$, s. o. informatsiooni hulk võrdub objektide arvuga. Niisiis tuhandest kahe seisundiga ferriitsüdamikust koostatud mäluseadis on võimeline mahutama täpselt tuhat informatsiooni kahendühikut. Alfabeedi abil väljendatud teate puhul informatsiooni hulk $I=5n$, kus n on tähtede arv, kuna $\log_2 32=5$.

Ülalvaadeldud kaheksatäheline sõna sisaldab niisiis $5\cdot 8=40$ informatsiooni kahendühikut. Väljendades kõik alfabeedi tähed viiekohaliste kahendsüsteemis arvude kujul — niisuguseid arve on just 32 — võime mainitud sõna esitada 40 kahendsüsteemi märgi abil. Ka sellisel

juhul, vastavalt valemile (1), informatsiooni hulk $I = 40$ kahendühikut.

Niisiis võimaldab toodud informatsiooni mõõt anda valemit informatsioonihulga arvutamiseks üldjuhul, kusjuures informatsiooni hulk ei sõltu informatsiooni avaldusvormist, vaid ainult informatsiooni sisulisest ulatuslikkusest, s. o. võimalikust erinevate teadete arvust. Eeltoodud viisil arvutatud informatsioonihulk on õige ainult *võrdtõenäoste* võimaluste puhul. Kui üksikute võimaluste, näiteks üksikute alfabeedi tähtede esinemise tõenäosused ei ole omavahel võrdsed, muutub informatsioonihulga väljendamine keerukamaks.

Tõenäosus. Üheks keskseks mõisteks küberneetikas ja eriti informatsiooniteoorias on *tõenäosus*. Terve rida nii või teisiti küberneetikaga seotud matemaatilisi uurimusi rajaneb tõenäosusteoorial. Olgugi et käesoleval ajal on tõenäosusteooria rangelt ülesehitatud ja keerukas matemaatiline distsipliin, on mitmed tõenäosusteooria olulised mõisted lihtsad ning üldarusaadavad.

Tõenäosusteooria on matemaatika haru, mis tegeleb uuritavate objektide suure arvu puhul esinevate seaduspärasustega. Tõenäosusteooriat on mõtet rakendada siis, kui üksiknähtuste uurimine on liiga ulatuslik ja seepärast mõttetu ülesanne. Näiteks on suletud nõus asuva gaasi molekulid pidevas liikumises. Põrkudes üksteisega ja anumaseintega, muudavad molekulid pidevalt oma trajektoore. Põhimõtteliselt on võimalik välja arvutada kõigi molekulide trajektoore, nende vastastikust mõju ning põrgete arvu vastu anuma seinu. Tegelikult on seda ülesannet molekulide suure arvu tõttu täiesti võimatu lahendada, kasvõi seepärast, et arvutuste käigus esineva informatsiooni ülesmärkimiseks ei piisaks kaugeltki kasutada olevast ajast ja vahendeist.

Teisest küljest on enamikel praktika juhtumeil piisav teada gaasimolekulide liikumiskiirusi ja põrkejõude üldistavaid k e s k m i s i suurusi, s. o. gaasi temperatuuri ja rõhku.

Täpselt samuti on ka sidekanali arvutamisel võimatu ja mõttetu viia läbi arvutusi kõigi võimalike teadete kohta, mis seda kanalit võivad kunagi läbida. On küllaldane, kui need arvutused viiakse läbi, arvestades üksikute signaalide esinemise tõenäosust iseloomustavaid tegu-

reid. Mõnikord on isegi piisav, kui arvutused viiakse läbi signaalide keskmiste väärtustega.

Statistilise tõenäosuse mõistet kasutatakse juhtudel, mil on tegemist väga suure arvu juhtumite, nähtuste või esemetega. Seejuures räägitakse teatud tunnuse esinemise tõenäosusest, mis esineb ainult osal nähtustest, juhtumeist või esemeist — muidu poleks mõtet rääkida tõenäosusest. Tõenäosust väljendatakse arvu kujul, mis väljendub nimetatud tunnusega nähtuste, juhtumite või esemete s u h t e n a vaadeldud nähtuste, juhtumite või esemete koguarvusse. Tõenäosusteooria kinnitab, et kui vaadeldud juhtumite, esemete või nähtuste arv on küllalt suur, siis see suhe jääb enam-vähem püsivaks, lähenedes tunnuse esinemise *matemaatilisele tõenäosusele.*

Tõenäosust tähistatakse tavaliselt tähega p, tema väärtus aga võib muutuda vahemikus nullist üheni: $0 \leqslant p \leqslant 1$.

Heites münti, jääb peale kord vapp, kord kiri. Igal üksikul juhtumil eraldi võetuna on täiesti võimatu ette arvata, kas ilmub vapp või kiri. Suure arvu katsete korral võib ometi öelda, et ligikaudu pooltel juhtumeist jääb peale vapp, pooltel kiri. Seega vapi ilmumise tõenäosus $p=0{,}5$. Kirja ilmumise tõenäosus on samuti 0,5.

Kuuetahulise korrapärase täringu heitmisel pole muidugi võimalik ette öelda, milline number ilmub. Ometi võib öelda, et kõigi numbrite ilmumine on võrdtõenäone. Järelikult on «1» ilmumise tõenäosus $p_1=\frac{1}{6}$, «2» ilmumise tõenäosus $p_2=\frac{1}{6}$, «3» ilmumise tõenäosus $p_3=\frac{1}{6}$ jne. Heites täringut küllalt suur arv kordi, võime veenduda, et täringu iga tahu ilmumiste arv võrdub ligikaudu ühe kuuendikuga heidete koguarvust.

Ka mitmesuguse informatsiooni puhul on tegemist tõenäosustega. Vaadeldes informatsiooni loterii resultaatide kohta, võime väita, et kui võitvate piletite arv võrdub poolega loteriipiletite üldarvust, siis iga üksiku pileti puhul on võidu tõenäosus 0,5. Kui aga võitvate piletite arv võrdub ühe tuhandikuga piletite koguarvust, siis üksiku pileti puhul on võidu tõenäosuseks ainult 0,001.

On ilmne, et mingi teate keskmine informatsioonisisaldus on suurim, kui vastuse tõenäosus läheneb 0,5-le,

s. o. kui mõlemad vastused on võrdtõenäosed. Kui aga teise vastuse tõenäosus on tühiselt väike, siis on vastus juba peaaegu ette teada, ning kinnitava teate informatsioonisisaldus vastavalt väiksem.

Informatsioonisisaldus I ühe «ei—jaa»-tüüpi teate — *elementaarteate* — kohta on sellisel juhul määratav valemiga

$$I = -(p_1 \log_2 p_1 + p_2 \log_2 p_2), \qquad (2)$$

kus p_1 ja p_2 on ühe või teise vastuse tõenäosused. Loomulikult siis ka $p_1 + p_2 = 1$.

Toodud avaldis on huvitav selle poolest, et võrdub nulliga siis, kui $p_1 = 1$ ja $p_2 = 0$, samuti aga ka siis, kui $p_1 = 0$ ja $p_2 = 1$. Tõepoolest, tõenäosus, mis võrdub ühega või nulliga, tähendab sündmuse kindlat esinemist. Teate informatsioonisisaldus, mis kinnitab juba ette kindlasti teada olevat, peabki loomulikult nulliga võrduma.

Teiselt poolt, informatsiooni avaldis saab võrdseks ühega, kui $p_1 = p_2 = 0{,}5$. Kui teade peab andma otsuse kahe võrdtõenäose võimaluse kohta, sisaldab ta üht elementaarteadet. Muude tõenäosuste puhul omandab informatsiooni hulk ühest vähema väärtuse.

Informatsioonisisaldust on võimalik välja arvutada ka keerukamatel juhtudel, kui teade peab andma selguse mitme võimaliku vastuse olemasolu puhul. Seejuures võivad võimaluste tõenäosused olla erinevad.

Üldjuhul avaldatakse informatsiooni hulk valemiga:

$$I = -\sum_{i=1}^{n} p_i \log_2 p_i = -(p_1 \log_2 p_1 + p_2 \log_2 p_2 + \ldots$$

$$\ldots + p_i \log_2 p_i + \ldots + p_n \log_2 p_n), \qquad (3)$$

kus $p_1, p_2, \ldots p_i, \ldots p_n$ on üksikute võimaluste *aprioorsed* tõenäosused (s. o. tõenäosused enne informatsiooni saamist). Pärast informatsiooni saamist üks tõenäosustest muutub võrdseks ühega, teised muutuvad nulliks ja informatsiooni avaldis muutub samuti nulliks.

Logaritmilise mõõdu kasutamise tõttu on informatsiooni väärtused liidetavad (nn. aditiivsus), s. o. mitme sõltumatu teate abil edasiantud informatsiooni koguhulk võrdub üksi-

kute teadete informatsioonihulkade summaga.

Mitmesugustel juhtumitel muutub informatsiooni hulga määramise probleem keerukamaks seetõttu, et üksikute võimalike vastuste tõenäosused sõltuvad teiste vastuste tõenäosusest.

Nii on näiteks tavalise tähestiku abil sõnades väljendatud teadaannete informatsioonisisalduse määramine üsna keerukas probleem. Asi ei seisa mitte üksnes selles, et mitmesuguste tähtede tekstis esinemise tõenäosused on erinevad, vaid ka selles, et tähed esinevad teatud gruppidena. Mõningate diftongide, nagu näiteks «ei» esinemise tõenäosus on eesti keeles võrdlemisi suur, teised tähtedekombinatsioonid aga, nagu näiteks «gd» ei esine seevastu peaaegu üldse. Teatud side on ka sõnade vahel. Sõnad «ja nii edasi» esinevad nii sageli koos, et neid on osutunud otstarbekaks erilise lühendiga märkida.

Sideme tõenäosust üksikute informatsioonielementide vahel väljendatakse korrelatsiooniteguri kaudu, sidet ennast nimetatakse aga *korrelatsiooniks*. Korrelatsioonihtuste esinemine raskendab informatsioonihulga arvutamist, ei tee seda aga võimatuks.

Korrelatsiooni mõiste omab suurt tähtsust tõenäosusteoorias, informatsiooniteoorias ja küberneetikas. Korrelatsiooni all mõistetakse seost kahe suuruse vahel, mis avaldub alles suure hulga vaatluste tulemusena. Üksiku vaatluse tulemus on korrelatiivse seose puhul juhuslik. Korrelatsiooni suurust väljendatakse tavaliselt *korrelatsioonitegurigа*. Korrelatsioonitegur võrdub nulliga siis, kui vaadeldavad suurused on omavahel täiesti sõltumatud, ja ühega siis, kui nende suuruste vahel on üheselt määratud, kindel seos. Korrelatiivse seose puhul on korrelatsiooniteguri suurus nulli ja ühe vahel. Iseloomulikuks näiteks korrelatiivsest seosest on seos inimese kaalu ja kehapikkuse vahel. Üksiku katse puhul siin mingit seaduspära ei selgu, sest on võimalikud kõige erinevamad kehapikkuse ja kehakaalu kombinatsioonid. Suure arvu katsete puhul aga võib näiteks kindlaks teha igale kehapikkusele vastava keskmise kehakaalu.

Liigsusest ja sidekanalite läbilaskevõimest. «Terve mõistus» ütleb meile, et teade võib olla kas õige või väär. Kolmandat võimalust ei ole. Tundub loomulikuna ka järeldus, et juba ühe väära elemendi esinemisel teates teade

muutub vääraks. Ometi teame igapäevasest praktikast, et näiteks suulisel kõnelusel edasiantud teade jääb arusaadavaks mitmete häälikute või isegi sõnade kadumamineku puhul. Näiteks selle kohta võib olla järgmine tähtede kombinatsioon: «-äna - - il-s ilm».

Pole raske aimata, et puuduvate, kriipsudega märgitud tähtede lisamisel saame lause: «Täna on ilus ilm.»

Niisiis on selles kolmeteistkümnest tähest koosnevas lauses vähemalt neli liigset tähte. Pole raske arvutada, et ainult kolmetähelistest sõnadest koosnev keel sisaldaks $32^3=32768$ sõna, kui kasutada ära kõikvõimalikud kolmetähelised kombinatsioonid. Tõsi küll, säärane keel ei oleks kõneldav, sest muude sõnade hulgas esineksid ka säärased nagu «kpt» või «rkn»; kirjutatav oleks aga säärane keel küll. Sõnavara enam kui kolmekümnest tuhandest sõnast oleks samuti täiesti piisav isegi ilukirjanduslike teoste kirjutamiseks. Ometi on tuntumais kultuurkeeltes kasutatavad sõnad märksa pikemad, sisaldades kolme tähe asemel keskmiselt 5—8 tähte. Kaheksatähelisi sõnu võiks konstrueerida 32-tähelise alfabeedi alusel enam kui 10^{12}. Niisuguse sõnade arvuga võiks aga täita suures raamatukogus leiduvad 10 miljonit raamatut, kusjuures kõik sõnad oleksid erinevad, kuigi suurem osa neist sõnust oleksid mõttetud ning suurt osa neist oleks võimatu hääldada.

Liigsete osade esinemist teatęs nimetatakse teate *liigsuseks*. *Liigsus* mängib, nagu selgus, väga olulist osa suuliselt või kirjalikult üleantavate teadete õigsuse tagamisel. Ka tehnikas rakendatakse liigsust näiteks isekorrigeerivate koodide puhul (vt. § 19.).

Üldisel juhul on sidekanali läbilaskevõime määratud valemiga

$$C=F\log_2\left(1+\frac{P_s}{P_h}\right), \qquad (4)$$

kus C on sidekanali läbilaskevõime (informatsiooniühikut sekundis), F — sidekanali ribalaius, s. o. maksimaalne sagedus või ligikaudu ka impulsside arv, mida selle kanali kaudu on võimalik sekundis edasi anda, P_h — häirete keskmine võimsus ja P_s — edasiantava signaali keskmine võimsus.

On näha, et häirete tugevnemisel edasiantava informatsiooni hulk väheneb. Ometi — ja see on üks kõige

huvitavamaid informatsiooniteooria resultaate — on häirete olemasolul võimalik informatsiooni praktiliselt veatu ülekanne, kui vaid edasiantava informatsiooni hulk ei ületa sidekanali läbilaskevõimet. Näiteks on võimalik teadete õige edasiandmine isegi siis, kui häirivsignaalide võimsus paljukordselt ületab informatsioonisignaalide võimsuse; selleks kulub vaid palju aega, sest häirete tõttu kanali läbilaskevõime väheneb.

Ometi ei ole see võimalik mistahes koodimise puhul, vaid ainult antud olukorras kõige sobivamate, nn. optimaalsete koodide kasutamisel.

Niisiis määrab valem (4) õieti kanali läbilaskevõime ülempiiri, mida optimaalse koodi kasutamisel on antud olukorras võimalik saavutada.

Sellel resultaadil on väga suur tähtsus sidetehnikas. Toodud seose põhjal on võimalik kontrollida, kas leitud lahendus on parim võimalikest või kui ei, siis millisel määral on seda veel võimalik parandada. Sidevahendite konstruktorid ja projekteerijad on vabanenud vajadusest pimesi töötada.

Informatsioon ja organisatsioon. Informatsiooni mõiste sõna laiemas tähenduses ei piirdu ei sõnades formuleeritava informatsiooniga ega ka sidetehnikaga. Informatsioon sõna kõige laiemas tähenduses on õieti vaadeldava süsteemi organiseerituse määra näitajaks. Pole juhus, et valem (3) informatsiooni hulga määramiseks on üllatavalt sarnane valemiga, mida kasutatakse termodünaamikas *entroopia* hulga määramiseks.

Termodünaamiline entroopia on teatavasti näitaja, mis iseloomustab temperatuurijaotuse erinevust vaadeldavas süsteemis. Teooria väidab, et igasugustes väliste mõjudeta süsteemides entroopia kasvab, s. o. temperatuurijaotus ühtlustub. Et kogu kosmoses entroopia siiski kokkuvõttes ei kasva, peavad esinema teatud protsessid, kus entroopia kahaneb, s. o. kus temperatuuride erinevused suurenevad.

Entroopia üldisemas mõttes iseloomustab vaadeldava süsteemi segipaisatuse, juhuslikkuse, kaootilisuse määra. Informatsioon seevastu näitab elementaarteadete hulka, mida on tarvis, et selles süsteemis «korda luua», s. o. likvideerida igasugune juhuslikkus.

Sisaldagu näiteks fotograafiline klišee miljon pildipunkti. Lihtsuse mõttes võib eeldada, et iga pildipunkt

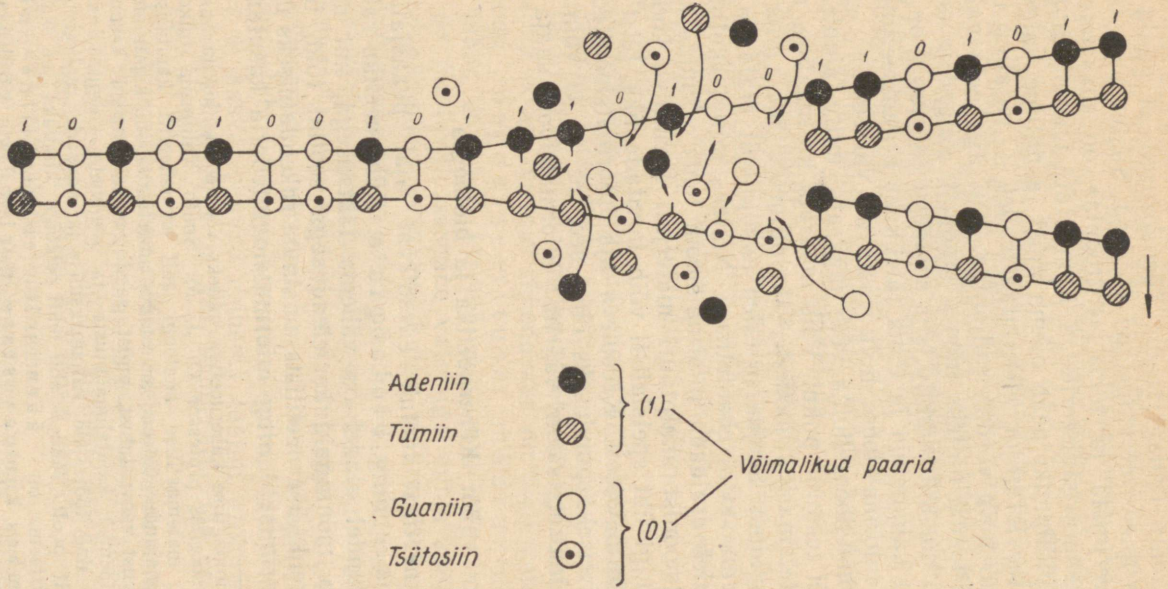
võib olla ainult kas must või valge. Esialgu ei ole ühegi punkti kohta midagi teada. Tõenäosused, et punkt võib olla kas must või valge, on võrdsed. Süsteem on täiesti organiseerimata ja tema «entroopia» on maksimaalne. Et süsteemi organiseerida, s. o. määrata üheselt kindlaks, milline pildipunkt peab olema must ja milline valge, on ilmselt tarvis miljon elementaarteadet — vajaliku informatsiooni hulk võrdub miljoniga. Kui aga eelnevalt on üht-teist teada, näiteks mõned kindlasti valged ja mõned kindlasti mustad punktid, siis süsteemi entroopia on juba eelnevalt kahanenud ja tema täielikuks organiseerimiseks tarvilik informatsiooni hulk vastavalt väiksem.

Informatsiooni hulka võib määrata mitte ainult kliišeede või tekstide puhul. Võib määrata ka maalide, muusikateoste, masina jooniste, skulptuuride jne. informatsioonisisaldust. Seejuures tuleb loomulikult eraldada olulist informatsiooni ebaolulisest. Näiteks mingi skulptuuri puhul tuleb eraldada informatsiooni tema vormide kohta informatsioonist skulptuuri materjali keemilise koostise kohta, kuigi üht spetsialisti võib huvitada üks, teist aga teine informatsioon. Käesoleva aja informatsiooniteooria üheks oluliseks puuduseks ongi see, et ta ei võimalda hinnata informatsiooni väärtust informatsiooni saaja seisukohalt.

36. Küberneetika ja bioloogia

Küberneetika toetub käesoleval ajal peaasjalikult tehnikale ning bioloogiale. Küberneetika rakendused muudel aladel on vähema tähtsusega, kui mitte arvestada mõningaid keeleteadusega seotud töid, üksikuid katseid küberneetiliste masinate rakendamiseks ühiskonna uurimisel [1] ning informatsiooniteooria kasutamist

[1] Sotsioloogilise küberneetika näiteks võivad olla huvitavad katsed, mida sooritas professor O. J. M. Smith Kalifornia ülikoolis. Spetsiaalse matemaatilise analoogi abil modelleeriti kapitalistliku ühiskonna majandussüsteem, arvestades amortisatsiooni, kapitalimahutuste sõltuvust rahvustulust, püüet saada maksimaalseid kasumeid, samuti hilinemist kapitalimahutuste ja seadmete valmimise vahel ühelt poolt ning töötasude väljamaksmise ja kaupade realiseerimise vahel teiselt poolt. Mudeli abil tehti eelkõige kindlaks, et säärane majandussüsteem on äärmiselt ebastabiilne ning allub umbes kümneaastase perioodiga kõikumistele. Tööstusseadmete moraalse kulumise faktori sisseviimine mudelisse põhjustas võnkumiste amplituudi suurenemist.



Joonis 114

Nukleiinhappe ahelmolekuli kahekordistumine

mitmesugustel aladel. Küberneetika rakendamine tehnikas — *tehniline küberneetika* — langeb oma tähenduselt praktiliselt ühte automaatika ja automatiseerimisega, olles käesoleva raamatu põhilise osa sisuks.

On loomulik, et tehniline küberneetika on tunduvalt kaugemale arenenud kui bioloogiline küberneetika, sest tehniliste seadmete ehitus ja töötamise printsiibid on nende konstruktoreile ideaalse täpsuse ja üksikasjalikkusega teada. Hoopis raskemas olukorras on bioloogid, kes on sunnitud puudulike, puhtväliste tunnuste kaudu aimama ülikeerukate organite töötamise printsiipe. Olukord raskeneb veel seetõttu, et igasugune sissetungimine vaatluse eesmärgil mõjutab elava koe funktsioone väga suurel määral või isegi laostab need täielikult.

Bioloogide olukorda küberneetika küsimuste uurimisel võiks võrrelda inimese olukorraga, kellelt nõutakse televiisori töötamisprintsiipide ja lülitusskeemi väljaselgitamist ainult televiisori välise vaatluse varal.

Aja jooksul on ometi kogunenud fakte, mis võimaldavad pisutki valgust heita bioloogiliste juhtimisnähtuste olemusele.

Pärilikkus. P ä r i l i k k u s on üks kõige huvitavamaid ja salapärasemaid elavorganismide probleeme. Võib kindlasti väita, et pärilikkuseta oleks võimatu orgaanilise elu areng.

On selgunud, et pärilike omaduste kandjaks on keeruka ehitusega orgaaniline aine — desoksüribonukleiinhape (DNH). DNH on pikkadest ahelmolekulidest koosnev polümeer. Ahelad koosnevad neljast komponendist, mis on võimelised ainult paarikaupa ühenduma (adeniintümiin, guaniin-tsütosiin).

Joonisel 114 on skemaatiliselt kujutatud säärane nukleiinhappe ahelmolekul. Ahelmolekul koosneb paarikaupa ühendatud komponentidest. See ahelmolekul võib lõhestuda kaheks. Vabaks jäänud ühendused otsivad endale keskkonnas vabalt leiduvate üksikute komponentide hulgast sobivad paarilised. Seetõttu tekib nüüd ühe ahela asemel k a k s ahelat, mis sarnanevad täpselt teineteisega kui ka esialgse, lõhenenud ahelaga. Sarnased on nad selles mõttes, et paaride vaheldumise järjekord ahelas on seesama. Üldse on võimalikud k a k s erinevat paari. Märkides tinglikult ühe paari 0-ga ja teise paari 1-ga, selgub, et nukleiinhappe ahelad esitavad k a h e n d a r v e.

On kindlaks tehtud, et niisugused nukleiinhappe ahelmolekulid, mis koosnevad mõnest tuhandest komponentide paarist, ongi pärilike omaduste kandjaks. Ahelmolekulid asuvad elusaine rakutuumades ning on võimelised mitte üksnes iseennast reprodutseerima, s. o. paljunema, vaid ka ümbritsevat orgaanilist ainet «oma näo järgi» organiseerima. Nii et siin on tegemist mitte üksi informatsiooni säilitamisega, vaid ka teatud mõttes valkainetest elusorganismide «ehitamise» automaatse juhtimisega.

On kindlaks tehtud, et vähimad elusolendid — *viirused ja bakteriofaagid* koosnevad nukleiinhappe DNH molekulist, mis on ümbritsetud valkainekihiga. Väljaspool elavaid rakke bakteriofaagid ja viirused ei saa elada ning paljuneda, mõnikord nad isegi kristalliseeruvad.

Katseliselt eraldati puhas nukleiinhape DNH tubaka mosaiiktõve viirusest. Kui seda nukleiinhapet viidi rakkudesse, tekkis ilmse mosaiikhaiguse pilt.

Loomulikult ei piirdu nukleiinhapete organiseeriv toime bakteriofaagide ning viirustega. Nukleiinhapped omavad samasugust tähtsust ka kõrgemate loomade arenemisel ja paljunemisel. Olgugi et nukleiinhappe DNH ahelmolekule, mis omavad iseloomulikku spiraalikujuliselt keerdunud struktuuri, on õnnestunud elektronmikroskoopide abil vaadelda, on ometi suurem osa küsimusi eelmainitud protsesside kohta lõplikult välja selgitamata. Käesoleval ajal ei ole veel teada mehhanism, kuidas just nukleiinhappe molekulid juhivad organismi kujunemist.

Selles, et ühe sugurakus leiduva nukleiinhappe ahelmolekuli informatsioonisisaldus on piisav pärilike omaduste edasiandmiseks, võib hõlpsasti veenduda. Kui ahelmolekul sisaldab 2000 üksikut elementi, siis esitab ta kahendarvu, mille suurus võib olla alates nullist kuni $2^{2000} \cong 10^{600}$!

Niisiis on DNH molekuli abil pärilikul teel võimalik edasi anda 10^{600} esinevat «ehituskirjeldust» 10^{600} erineva organismi loomiseks. Ei tarvitse üldse karta, et variantidest puudus tuleb, sest aatomite arv päikesesüsteemis on ligikaudu «kõigest» 10^{60}. Nii et isegi kui iga päikesesüsteemi aatom oleks üks elusolend, võiksid nad kõik erinevad olla. Tegelikult on nukleiinhappemolekuli informatsioonisisaldus veel suurem arvutatust, sest et iga komponentide paar võib omada kahte erinevat asendit.

Informatsiooniteooria seisukohast lähtudes võib selgitada veel ühe põhilise küsimuse: miks on järeltulijate saamine looduses enamasti võimatu ü h e indiviidi puhul, miks on selleks tarvilik k a h e indiviidi koostegevus? Selgub, et põhjus on umbes seesama, mis sunnib elektronarvutusmasinate programmeerijaid kaht ühetaolist linti perforeerima, et neid hiljem vigade avastamiseks võrrelda. Kahe indiviidi nukleiinhappemolekulide kombineerimine võimaldab looduses vältida juhuslikke defekte, mis võiksid viia organismi hukutavate tagajärgedeni.

Kui aga sellest hoolimata saadud kombinatsioon osutub defektseks, kõrvaldub ta loomuliku valiku teel.

Bioloogilised regulaatorid. Miks langeb meelemärkuse kaotanud inimene otsekohe pikali? Kuidas on võimalik köietantsu numbrite teostamine? Nii ühele kui ka teisele küsimusele võib saada vastuse, kui pidada silmas, et seisev inimene omab erilisi automaatse reguleerimise kontuure, mis aitavad tal tasakaalu hoida.

Teatud lihastegrupid on ühenduses vastavate, kui kasutada tehnilist terminoloogiat, anduritega, mis määravad keha asendi ruumis (poolringkanalid keskkõrvas). Keha kõrvalekaldumisel tõmbuvad alati kokku need lihastegrupid, mis aitavad tasakaalu taastada, s. o. nihutada keha vastassuunas kõrvalekaldumisele. Kõik see toimub teadvusest ja tahtest sõltumatult, tingimatute reflekside toimel. Köietantsijal on need refleksid eriti suurel määral välja arendatud. Teisiti oleks raske inimese hämmastavat tasakaalu säilitamise võimet seletada.

Wiener ja Rosenblueth otsisid siiski käegakatsutavamaid ning veenvamaid tõendeid selle kohta, et juhtimisprotsessid elusorganismis alluvad automaatse reguleerimise printsiibile. Selleks pöördusid nad erilise, meditsiinis tuntud nähtuse poole, mida nimetatakse *kloonuseks*. Kui mingil loomal, näiteks kassil, eraldada operatiivsel teel peaaju seljaajust, jääb loom ellu, ent ilmneb omapärane nähtus. Kui painutada säärase *detserebreeritud* looma jalga tahapoole, s. o. pingutada, siis tekivad jalas rütmilised t õ m b l u s e d — kloonus.

Selgus, et need tõmblused on põhjustatud automaatse reguleerimise kontuuri: seljaaju — jalalihas — seljaaju e b a s t a b i i l s u s e s t. Wiener arvutas kontuuri üksikute elementide andmete põhjal välja tekkivate võnkumiste iseloomulikud suurused, kasutades automaatikas üldiselt

tarvituselolevaid meetodeid. Need suurused langesid hästi ühte katseandmetega.

On huvitav märkida, et peaaju avaldab nimetatud reguleerivale kontuurile *stabiliseerivat* toimet, seepärast tekibki kloonus ainult peaaju ning seljaaju vahelise sideme katkestamisel (võrdle § 8).

Automaatne reguleerimine ei esine elavorganismides sugugi mitte ainult lihaskonna tegevuse juhtimisel. Võib-olla isegi suurema tähtsusega on mitmesugused keemilist laadi reguleerimisprotsessid.

Lihaste töö on näiteks seotud hapniku tarvitamise ning süsihappegaasi eraldamisega. Nende gaaside kandjaks on teatavasti *veri*. Osutub, et vere juurdevoolu reguleerimine lihaseis vastavalt lihase töö intensiivsusele toimub süsihappegaasi kaudu. Lihase intensiivse töö puhul eralduva süsihappegaasi hulga suurenemine veres avaldab mõju veresoontele. Süsihappegaasi toimel veresooned laienevad ning lihasesse pääseb rohkem verd ning hapnikku. Kui süsihappegaasi eraldumine lakkab, toimub vastupidine reaktsioon.

Glükoosi (suhkru) hulk veres sõltub paljudest teguritest, ometi on ta terves organismis küllalt püsiv. See saavutatakse sel teel, et glükoosisisalduse suurenemine veres mõjutab aju teatud piirkondi, mis omakorda annavad signaali edasi *insuliini* eritavatele näärmetele. Hormoon insuliin omakorda põhjustab suhkru suuremat assimileerimist organismi kudede poolt. Niisiis on siin võrdlemisi keerukas automaatse reguleerimise kontuur: suhkrusisaldus — aju — insuliini eritav nääre — insuliini hulk — suhkru assimileerimine.

Üldse on organismis väga palju taolisi reguleerimisprotsesse. Kõikides neis protsessides võib selgesti eristada andureid, signaali edasiandjaid, täitureid ning enamasti ka korrigeerivaid toimusi. Nagu motoorsetegi regulaatorite puhul, võib ka siin protsessi kohta teatud selgust saada rikete, defektide ja ebanormaalsete olukordade sihilikul tekitamisel. Näiteks võib jälgida tüüpilisi siirdenähtusi, kui muuta hüppeliselt, süstimise teel vere suhkrusisaldust ning vaadeldes siis endise suhkrusisalduse järkjärgulist taastumist.

Ilma reguleerimisprotsesse arvestamata oleks täiesti võimatu ette kujutada, mil viisil organism võib säilitada küllalt püsivatena temperatuuri, hingamissagedust, pulsi

sagedust, vererõhku ja muid olulisi näitajaid, sellal kui välised tingimused muutuvad väga suurtes piirides.

Närvisüsteem. Teatud informatsioon kandub organismis edasi, nagu selgus, vere koostise muutumise, eriti aga mitmesuguste hormoonide verre eritumise teel. Ometi on säärane informatsiooni edasiandmise viis võrdlemisi aeglane. Informatsiooni kiire edasiandmine, eelkõige lihaste töö juhtimisel, toimub *närvikiudude* kaudu. Närvikiudude kaudu antakse informatsioon edasi elektriliste impulssidena. Selles mõttes meenutavad närvikiud telemehaanilisi kanaleid. Analoogia läheb veelgi kaugemale, sest signaale antakse edasi sagedustunnuse abil — mida intensiivsem signaal, seda suurema sagedusega järgnevad üksteisele impulsid. Impulsside amplituud on seejuures püsiv ega sõltu signaali iseloomust. Närvikiud koosneb samuti südamikust ja kattekihist, nagu elektrijuhegi koosneb traadist ning isolatsioonist. Siin aga lõpeb analoogia. Kui elektrilised impulsid telemehaanikas antakse edasi juhtivuslikul teel ning levivad valguse kiirusega, siis närvikiu «elektrijuhtimise» mehhanism on hoopis omapärane. Nimelt on jõudeolukorras, kui signaal puudub, närvikiu südamikku koondatud negatiivsed, kattesse aga positiivsed *ioonid*. Närvikiud moodustab otsekui torukujulise, teatud pingeni laetud kondensaatori. Signaali andmisel, s. o. närvikiu ergutamisel tekib kondensaatori tühjenemine, s. o. positiivsed ja negatiivsed ioonid neutraliseeruvad omavahel. See neutraliseerumine levib lainena mõlemas suunas, arvates ärritamise kohast, hiljem aga potentsiaalide erinevus taastub. Paigalseisva punkti suhtes avaldub laengute neutraliseerumine ja taastekkimine pingeimpulsina. Selliste pingeimpulsside levimiskiirus on suhteliselt väike, paar kuni paarsada meetrit sekundis, impulsi amplituud aga on umbes 30—60 millivolti. Nagu öeldud, on närviimpulsi amplituud võrdlemisi püsiv. Seejuures see amplituud ei sõltu ärrituse tugevusest, vaid omab tüüpilist diskreetset iseloomu. Küllalt tugeva ärrituse puhul tekib närvikius normaalne impulss, nõrgema ärrituse puhul aga impulssi üldse ei teki.

Üksikud närvikiud on organismis koondatud kimpudeks, mis kannavad närvide nime. Üksikud närvikiud annavad seejuures edasi erinevaid teateid, nagu

telefonikaabliski erinevad juhtmepaarid on määratud erinevate teadete edasiandmiseks. Närvid moodustavad elusorganismis keeruka võrgu, mis kannab *perifeerse närvisüsteemi* nimetust, vastandina peaajust ja seljaajust koosnevale *kesknärvisüsteemile.*

Perifeerne närvisüsteem omab põhiliselt kahte liiki kanaleid — sensoorseid ja motoorseid närve. Sensoorsed närvid on ühenduses mitmesuguste retseptoritega, mis asuvad organismi mitmesugustes punktides ning reageerivad puudutustele, survele, külmale või soojale ning muudele ärritustele. Katseliselt on kindlaks tehtud, et näiteks survele reageeriva retseptori puhul on temaga ühenduses oleva närvikiu poolt ajusse edasiantavate impulsside sagedus võrdeline surve suurusega.

Motoorsed närvid toimetavad informatsiooni edasi vastupidises suunas — ajust lihastesse. Seejuures on samuti kehtiv seos, mille kohaselt lihas tõmbub seda tugevamini, mida suurema sagedusega saabuvad impulsid motoorse närvi kaudu.

Peale motoorsete ja sensoorsete närvide kuuluvad närvisüsteemi peaasjalikult seljaaju ning peaaju kuklaosadega seotud närvid, mille kaudu teostuvad mitmesugused tahtest sõltumatud refleksid ning organismi sisemiste organite töö juhtimine. Need närvid avaldavad siseorganeile vastavalt vajadusele kas pidurdavat või ergutavat toimet, moodustades niiviisi automaatse reguleerimise kontuure.

Aju. Kahtlemata omab kesknärvisüsteem organismi talitluses keskset tähtsust. Pole juhus, et nii pea- kui ka seljaaju on ainukesed tervenisti luuümbrisesse kapseldatud organid: seljaaju — selgroogõnes ja peaaju — kolbas.

Pikaajalised kogemused, spetsiaalsed katsed ja mitmesuguste vigastuste ning haigusjuhtumite jälgimine on võimaldanud kindlaks teha kesknärvisüsteemi makrostruktuuri, s. o. kesknärvisüsteemi üksikute osade otstarbe ning organid, millega vastavad osad on seotud. Eelkõige on kindlaks tehtud, et seljaaju on seotud peamiselt mitmesuguste refleksidega, peaaju kuklaosad aga südame, sisemiste organite, hingamistalitluse jne. juhtimisega. Kõik see toimub väljaspool teadvust. Teadvusega seotud nähtused on koondunud *suuraju poolkerasid* katvasse *ajukoorde.* Ajukoor koosneb halli värvusega

massi moodustavatest *neuroonidest*, kuna poolkerade sisemuses asuv valge ollus koosneb närvikiududest ja täidab peamiselt sidefunktsioone ajukoore osade omavahelisel ning muude organitega ühendamisel. Ajukoor, eriti aga selle laubaosad, on seotud kõrgema närvitalitluse keerukate funktsioonidega, psüühika ning tundmustega. Ajukoore laubaosad moodustavad näiteks kassil 3%, inimesel aga 29% ajukoore üldpindalast. Inimese ajukoor omab ligikaudu $^1/_4$ ruutmeetri suurust pindala. Nii suur pindala on võimalik aju pinna keeruka käärulise ehituse tõttu.

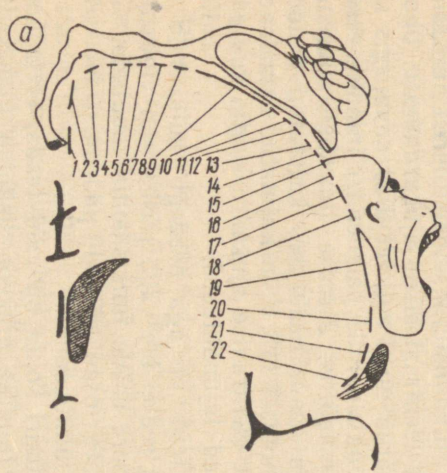
Ajukoor ei ole organismide elutegevuseks hädavajalik. Loomad, kellel katseks ajukoor eemaldati, säilitasid põhilised elutegevuseks tarvilikud funktsioonid. Ometi puudus neil täielikult mälu ning võime sihikindlalt tegutseda, näiteks toitu hankida. Toidu otse suhu viimisel aga olid loomad võimelised seda tarvitama.

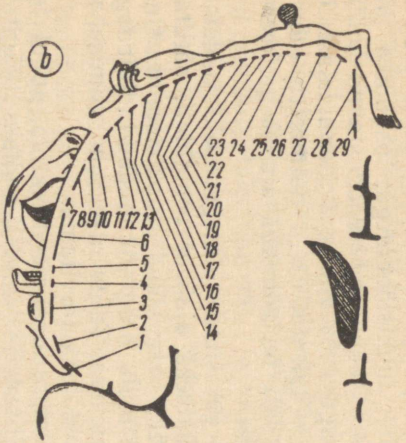
Mitmesuguste ajukoore osaliste defektide puhul tekivad keerukad psüühilised häired. Nii näiteks räägitakse keeleteadlasest, kes ajuvigastuse tagajärjel säilitas küll võime grammatiliselt õigesti võõrkeelset teksti tõlkida, kuid ei olnud võimeline seda võõrkeelt mõistma.

Ajukoore «topograafia» on käesoleval ajal võrdlemisi hästi teada osas, mis käsitleb mitmesuguseid teadvusega seotud taju- ning liikumisfunktsioone. Need funktsioonid on koondunud tsentraalseisse ajukurdudesse. Joonisel 115, *a* on kujutatud nn. Penfieldi diagramm, mis näitab keha liikumisfunktsioonide paiknemist inimese eesmises tsentraalses ajukäärus. Joonise ilmekuse suurendamiseks on ajukääru osade naabruses kujutatud nendega seotud kehaosad. Joonisel 115, *b* on kujutatud samalaadne diagramm tagumise tsentraalse ajukääru kohta, kus paiknevad mitmesugused tajunähtused.

See makrostruktuur on aga peaaegu kõik, mis aju kohta teada on. Ka see ei ole väga püsiv, sest vigastuste puhul võivad ajukoore osade funktsioonid muutuda, s. o. ajukoore vigastamata osad võivad pikkamisi üle võtta vigastatud osade funktsioonid.

Aju mikrostruktuuri kohta on vaid teada, et ta koosneb neuroonidest. Inimese ajukoor sisaldab umbes 10^{10} neurooni. Neuroonid, samuti nagu närvikiudki, on võimelised diskreetselt ergastuma. See tähendab, neuroon võib olla kas täielikult ergastunud või täielikult





Joonis 115

a — liikumiskeskuste paiknemine ajus: *1* — varbad, *2* — säär, *3* — põlv, *4* — puus, *5* — kere, *6* — õlg, *7* — küünarnukk, *8* — küünarvars, *9* — ranne, *10* — väike sõrm, *11* — neljas sõrm, *12* — keskmine sõrm, *13* — osutussõrm, *14* — põial, *15* — kael, *16* — kulm, *17* — silmalaug ja silmamuna, *18* — nägu, *19* — huuled, *20* — lõug, *21* — keel, *22* — neel; *b* — tajukeskuste paiknemine ajus: *1* — siseorganid, *2* — neel, *3* — keel, *4* ja *5* — lõualuud, *6* — alumine huul, *7* — ülemine huul, *8* — põsk, *9* — nina, *10* — silm, *11* — põial, *12* — osutussõrm, *13* — keskmine sõrm, *14* — neljas sõrm, *15* — väike sõrm, *16* — ranne, *17* — küünarvars, *18* — õlavars, *19* — küünarnukk, *20* — õlg, *21* — turi, *22* — pea, *23* — kael, *24* — kere, *25* — puus, *26* — põlv, *27* — jalalaba, *28* — varbad, *29* — genitaalid

ergastamata, vahepealsed seisundid ei ole võimalikud. Selles mõttes meenutab neuroon diskreetse elektronarvutusmasina elemente, mis on samuti võimelised kaht püsivat seisundit omandama. Neuroon omab samuti väljundit, mis on võimeline teisi neuroone ergastama, ja kaht liiki sisendeid — pidurdavaid ning ergastavaid. Pidurdava sisendi mõjutamisel neuroon satub mitteergastunud seisundisse, ergastava sisendi mõjutamisel aga ergastub.

Matemaatilise loogika varal on tõestatud, et neurooni tüüpi elementidest on võimalik koostada loogikalisi lülitusi samuti nagu elementidest «või», «ja» ning «ei» (vt. V peatükk). Edasi aga valitseb juba teadmatus. Tuleb arvata, et neuroonid moodustavad struktuure, mis on võimelised loogikalisi funktsioone teostama. Kuidas on need struktuurid «lülitatud» ja millised on need funktsioonid, seda käesoleval ajal keegi ei tea. Tuleb arvata, et seda teada saada on küllalt raske, kasvõi sellepärast, et neuroonide üldhulk on väga suur ning informatsiooni hulk, mis kirjeldab nendevahelisi ühendusi, tohutu. Ühenduste kindlakstegemine on aga esialgu küllalt tülikas ja aeganõudev protsess. Ent isegi omades aju täielikku «lülitusskeemi», tekiksid uued raskused. Kui iga «skeemielement» — neuroon — oleks kujutatud ühe ruutsentimeetri suurusel pindalal, siis joonise kogupindala oleks parajasti üks ruutkilomeeter! Köites selle joonise kokku tavalise projektide formaadi kohaselt, saaksime 20 miljonit lehekülge või 100 000 köidet. Seevastu elektronarvutusmasina struktuuri näitamiseks oleks täiesti küllalt ühest köitest.

Neist andmetest on näha, et elektronarvutusmasina ning aju kvantiteetides on esialgu nii suur erinevus, mis sunnib rääkima üsna põhjalikust kvalitatiivsest erinevusest, hoolimata mõningate ühiste joonte olemasolust. Nii et termin «elektronaju» on parimal juhul vaid kujukas metafoor.

37. Küberneetilised masinad

Teadliku küberneetika tekkimisel, mõnedel juhtudel aga palju varemgi, hakati tegema katseid matkida juhtimisprotsesside osas loodust või viimast isegi ületada. Kuigi need katsed iseenesest on teadmisi kiiduväärselt

edasi viinud, ei saa jätta märkimata, et matkimine on toimunud siiski üsna jämedates joontes.

Üsna hämmastav analoogia mitmesuguste inimese poolt ehitatud masinate ning looduslike organismide vahel ei anna siiski veel põhjust nende töötamispõhimõtete samastamiseks. Piltlikult öeldes, asjaolu, et latern ja kuu tekitavad ühepikkused varjud, ei luba veel järeldada, et nad on meist võrdsel kaugusel.

Kõige olulisem lahkuminek on see, et elusorganismid koosnevad keerukatest kõrgmolekulaarsetest valkainetest, küberneetilised masinad aga metallidest, magnetilistest materjalidest ja isoleerainetest. Peale selle, organismid arenesid iseseisvalt välja väga pika ajavahemiku jooksul, küberneetilisi masinaid aga konstrueeritakse ja ehitatakse inimese poolt suhteliselt kiiresti.

Nii et sellest seisukohast lähtudes tuleb küberneetiliste masinate poolt saavutatud tulemusi vaadelda ikkagi kui masinate ja organismide mõnede väliste tunnuste ühtelangemist teatud üldiste reguleerimise ja juhtimise põhimõtete raamides.

Robotid, hiired ning kilpkonnad. Alates keskajast on osavad meistrid ehitanud roboteid — inimesetaolisi nukke, mis, varustatuna kellamehhanismi tüüpi mehhanismidega, olid võimelised mitmesuguseid toiminguid sooritama.

XIII sajandil ehitas saksa filosoof ja alkeemik Albert Suur mehaanilise uksehoidja. Uksehoidja avas ning sulges ukse tulijatele. Räägitakse, et ta olevat mõistnud isegi kõnelda.

Viissada aastat hiljem demonstreeriti Pariisis näitusel mehaanilist kirjutajat, joonistajat ning tütarlast-muusikut. Kirjutaja oli võimeline sulge tindisse kastma, lehekülge korrapärase käekirjaga täis kirjutama ning isegi kirjutatule liiva raputama — tindi kuivatamiseks. Pärast seda raputas robot liiva paberilt nagu tõeline kirjutaja. Kirjutamise ajal aga pööras ta pead, otsekui silmadega kirjutatut jälgides.

Joonistaja, kummardudes paberi kohale, joonistas mitmesuguseid siluette. Valmistanud ühe silueti, peatus ta otsekui järele mõeldes ning hakkas siis kiirustamata järgmist siluetti joonistama.

Tütarlaps-muusik mängis klavessiinil, kord aeglasemalt, kord kiiremini, vastavalt palale, jälgides silmadega

oma käte liikumist. Kord olevat ta isegi andnud kontserdi koos tõelise viiuldaja ja tšellistiga.

Kõik need mänguasjad-robotid kujutasid enesest programmjuhtimisega mehaanilisi automaate, sageli üsna komplitseerituid. [1]

Paljud väga andekad mehaanikud pühendasid oma elu seda laadi teravmeelsete mehhanismide väljamõtlemisele ja teostamisele.

Nende mehhanismide saladus seisnes silindri- või muukujulises šabloonis, mille pind oli töödeldud vastavalt robotilt nõutavale liikumisele. Kirjutaja käega seotud rullik või teravik, järgides šablooni liikumisel selle pinna kõiki üksikasju, pani roboti käe liikuma täpselt nii, nagu oli tarvis varem ettenähtud teksti kirjutamiseks. Kirjutatav tekst oli masina ehitaja poolt n.-ö. šablooni kujusse peidetud. Teistsuguse teksti kirjutamiseks oli loomulikult tarvis varustada robot teistsuguse šablooniga. Ümbes samasugusel põhimõttel teotsesid ka mehaanilised joonistajad, muusikud ja tantsijannad. Igal juhul puudus selliste robotite tegevuses vähimgi vaheldusrikkus. Nad teostasid alati täpselt selle liigutuste järjestuse, mida nende konstruktor oli ette näinud.

Pisut «iseseisvamad» olid peamiselt kahe maailmasõja vahel moes olnud elektromehaanilised robotid. 1938. aastal demonstreeriti New Yorgis hiiglaslikku, poolteise inimkasvuga raudmeest, kes oli võimeline liikuma jalataldade alla asetatud roomikute abil, üksikuid lauseid ütlema, paberossi suitsetama, värvusi eristama ning teatud käsklusi kuulama.

Pole kahtlust, et käesoleva aja arenenud elektroonika võimaldaks ehitada roboteid, mis oma väliselt käitumisjoonelt veelgi enam inimest matkiksid. Ometi ei tunta seesuguste robotite vastu käesoleval ajal enam erilist huvi. Kui nad kusagil ilmuvadki päevavalgele, ei tekita see erilist sensatsiooni.

Moodsad robotid seevastu ei püüa matkida elusolendeid tervikuna. Nende eesmärgiks on elusolendite teatud käitumisjoonte matkimine mitte puhtvälise kopeerimise kaudu, vaid lähtudes vaadeldava nähtuse teaduslikult uuritud olemusest.

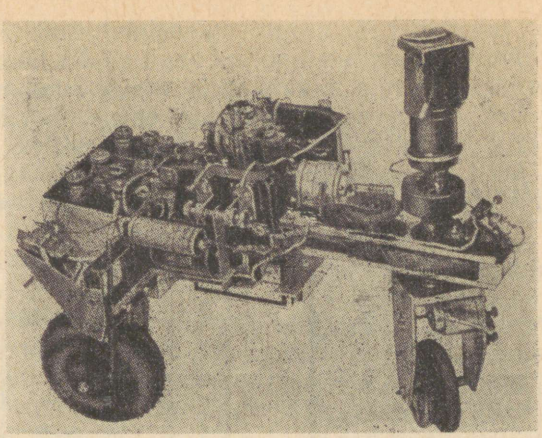
---

[1] Seda laadi automaate nimetatakse ka *androiididdeks* Sveitsist pärineva kellameistri ja mehaaniku Henri Droz' järgi.

Kõige tuntumateks moodsateks robotiteks on küll vist inglise psühholoogi ja küberneetiku Gray Walteri leiutatud küberneetilised kilpkonnad.

Küberneetiline kilpkonn on oma ehituselt varasemate robotitega võrreldes väga lihtne. Väikesel kolmerattalisel platvormil asuvad kaks elektrimootorit. Üks nendest on määratud edasiliikumiseks, teine aga esimese, tüüriva ratta abil kilpkonna liikumissuuna muutmiseks. Mõlemad mootorid võivad pöörelda kahes suunas. Kui mõlemad mootorid pöörlevad, siis kilpkonn liigub edasi, samal ajal esimene, tüüriv ratas muudab pidevalt oma suunda. Tulemuseks on eriline silmuseline teekond. Tüüriva ratta püstvõlliga on ühenduses fotoelement. Kui tüüriva ratta pöördumisel satub fotoelemendi vaatevälja valgusallikas, muudetakse vastava võimendi ning releelülituse abil esiratta pöördumist nii, et kilpkonn liigub valgusallika suunas. Väga tugeva valguse puhul asub aga tegevusse teine relee ning kilpkonn eemaldub valgusallikast. See reaktsioon võib ka sõltuda seadet toitva akupatarei seisukorrast. Kui toiteallikas on täis, liigub kilpkonn tagurpidi — valgusallikast eemale, kui aga toiteallikas on tühjenenud, liigub kilpkonn valgusallika suunas. Ruumis asuvad valgusallikad võivad olla varustatud toitepunktiga akupatarei laadimiseks. Valgusallikale liginenud kilpkonn lülitub automaatselt toitepunktiga vastava pistiku abil, akupatarei täitumisel aga eemaldub. Peale selle on kilpkonna esiosa varustatud kontaktiga, mis takistusele sattudes sulgub ning lülitab kilpkonna juhtimisorganid nii ümber, et viimane liigub ümber takistuse.

Kogu kilpkonna aparatuur on küllalt lihtne; küberneetiline kilpkonn ei ületa oma mõõtmeilt tõelist. Ometi meenutab üksikute valguspunktidega valgustatud põrandal liikuva kilpkonna käitumine üsna suuresti elusolendi käitumist. Eriti efektne on pilt, kui mitu kilpkonna asuvad ühes ruumis ning igaüks neist on varustatud oma valgusallikaga. Siis esineb peale «toiduotsimise» liikumise üksteise «äratundmine» valgusallika järgi ning mitmesugused otsekui tahte poolt dikteeritud liikumised ning manöövrid. Võrdlemisi lihtsate abinõudega on võimalik teostada ka muid funktsioone, näiteks tingreflekse ning reageerimist helile. Nii näiteks on võimalik «õpetada» vastava lülitusega kilpkonnale tingrefleksi, mis



Joonis 116

Gray Walteri küberneetiline kilpkonn (kate eemaldatud)

seisneb selles, et kilpkonnale, kes on harjunud liikuma valgusallika suunas, antakse koos valgussignaaliga alati ka helisignaal. Viimaks piisab üksnes helisignaalist kilpkonna kutsumiseks. Kui aga kauemat aega valgussignaali ei järgne, siis helisignaalile reageerimise võime kaob. Tingrefleksi taolise nähtuse tekitab sellistes lülitustes kondensaator, mida laetakse vastava loogikalise lülituse kaudu ainult siis, kui heli ja valgus koos esinevad.

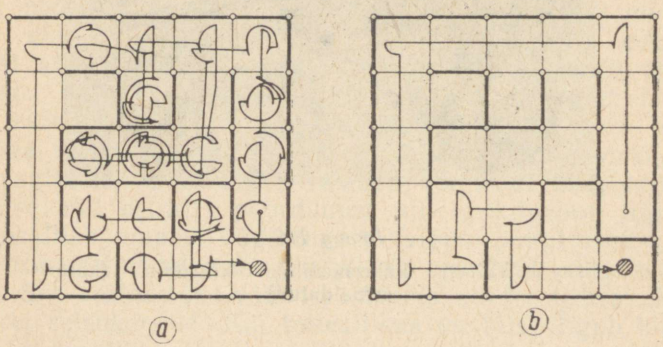
Kilpkonnalaadne on ka orav, kes korjab põrandalt valgeid kuule, näiteks piljardikuule, ning kannab need teatud kohta — «pessa». Küberneetilise orava ehitus on samuti väga lihtne.

Muidugi on küberneetikud kaugel soovist väita, nagu vastaks nende küberneetiliste loomakeste toimimise mehhanism täpselt toitu otsivate loomade käitumisele. Mida need loomakesed siiski tõestavad, on see, et võrdlemisi lihtsate automaatse reguleerimise struktuuride abil on võimalik jäljendada paljusid elusolendite käitumisfunktsioone.

Pisut keerukam, aga ka kõrgemalt «arenenud» ning

suurema rakendusväärtusega on eelmainitud Shannoni poolt ehitatud küberneetiline hiir labürindis.

Küberneetiline hiir oskab leida rasva sümboliseeriva rauatüki kahekümne viiest lahtrist koosnevas labürindis. Hiire eriline «intelligents» avaldub aga selles, et olles esimene kord «rasvatükini» jõudnud pikkade eksirännakute järel (joonis 117, *a*) suudab ta järgmisel korral



Joonis 117

Küberneetilise hiire teekond labürindis esimesel läbimisel (*a*) ja teisel läbimisel (*b*).

sama «rasvatükini» jõuda kõige otsemat teed pidi (joonis 117, *b*). Niisiis on küberneetiline hiir varustatud teekonna meelespidamise võimega. Säärane võime on olemas kõrgematel loomadel, puudub aga näiteks kärbsel; kärbes võib seni ühes kohas vastu klaasi põrkuda, kuni on enese uimaseks tagunud, kuigi kõrval on avatud aken.

Küberneetilise hiire «ajuks» on 50 releest koosnev lülitus, mis juhib labürindi all asuva elektromagneti liikumist. Viimane aga veab endaga kaasa labürindis asuvat raudset hiirt. Selle küberneetilise mänguasja ehitamisel kasutatud ideed pakkusid ka praktilist huvi automaattelefoni keskjaamade ehitamiseks, mis suudaksid iseseisvalt leida kõige lühemaid teid kahe abonendi ühendamiseks. Nimelt näitab statistika, et igal telefoniabonendil on võrdlemisi piiratud «klientuur» — mõnikümmend abonenti, kellega peetakse sageli ühendust. Ühenduse tõenäosused sama keskjaama ülejäänud kümnete või sadade

tuhandete abonentidega on üldiselt kaduvväiksed. Loomulik oleks siis konstrueerida automaattelefonijaam nii, et sageli kasutatavad ühendused kulgeksid otse, vältides keerukaid teid läbi automaatkeskjaama tsentraalsete organite. Et aga «eelistatud» sidemete nomenklatuur vahetpidamata muutub, peab otseühenduste valik toimuma isekohastuva süsteemi abil, mis arvestab ühe või teise ühenduse keskmist esinemissagedust. «Hiire» põhimõtete alusel ongi püütud luua seda laadi automaattelefonijaamu.

Küberneetika ja mõtlemisprotsess. Ülalkirjeldatud küberneetilised masinad modelleerisid peaasjalikult elusorganismide reflekse või instinktiivset tegevust. Küberneetika üheks kõige olulisemaks sihiks on siiski inimese mõtlemisprotsessi saladuste lahtiharutamine. Et sellele ülikeerukale probleemile pisutki läheneda, on küberneetiliste masinate abil püütud jäljendada mitmesuguseid kõrgema mõttetegevuse vorme. Naiivne oleks loomulikult arvata, et mingisugust aju funktsiooni jäljendav masin töötab niisamuti nagu aju vastaval juhul. Teiselt poolt on siiski selge, et iga ehitatud küberneetiline masin aitab kas või väheselgi määral läheneda aju saladuste selgitamisele.

Üheks tüüpiliseks kõrgema mõttetegevuse näiteks on malemäng. Siin esineb nii loogiline kui ka teatud intuitiivne loov element. Käesoleval ajal on koostatud mitmesuguseid programme, mille järgi elektronarvutusmasinad on suutelised malet mängima.

Ühe niisuguse programmi kohaselt omistatakse igale malendile teatud «kaal»: kuningas 200, lipp 9, vanker 5, oda ja ratsu 3 ning ettur 0,5 punkti. Teatud positsioonielementidele, nagu näiteks patt, kaksikettur, kergete vigurite liikumisvabadus jne. omistatakse samuti sobivad punktiväärtused.

Need punktiväärtused, samuti kui andmed seisu kohta kooditakse kasutatava masina arvusüsteemi kohaselt ning juhitakse masinasse. Masinas teostub nn. *positsioonifunktsiooni* arvutamine järgmise valemi kohaselt:

$$f(P) = 200(K-K') + 9(L-L') + 5(V-V') + 3(O-O') + \\ + 3(R-R') + 0{,}5(e-e') + \ldots.$$

Üldiselt kasutusel olevate malendite sümbolitega on

siin tähistatud arvutatava seisu puhul laual olevate malendite arvud. Primmita tähised vastavad oma, primmiga tähised vastase malendeile.

Programmi kohaselt proovib masin kõik võimalikud käigud ning kõik võimalikud vastused kuni kolme käigu ulatuses ette. Kõikidest võimalikkudest käikudest valib masin selle, mis annab maksimaalse positsioonifunktsiooni väärtuse kolme käigu järel tekkinud positsiooni jaoks.

Sellise programmi alusel töötav masin võib võita nõrka või isegi keskmise tugevusega maletajat. Tugevale maletajale, kes on suuteline suuremat käikude arvu läbi mõtlema, masin kaotab. Igal juhul ei jäta masin kunagi vigurit ette; samuti ei jäta ta kunagi kasutamata matistamise võimalust, kui selleks piisab kolmest või vähemast arvust käikudest.

Loomulikult oleks sel viisil põhimõtteliselt võimalik programmeerida ka tugevamat «masinmaletajat», nähes ette suurema käikude arvu «läbimõtlemise». Kogu raskus seisneb õieti selles, et käesoleva aja «pedantsed» masinad ei ole suutelised vähe huvi pakkuvaid käike otsekohe kõrvale heitma, nagu seda vilunud maletaja teeb, vaid proovivad piinliku järjekindlusega kõik antud seisus võimalikud käigud läbi. Loomulikult kujuneb selle tõttu arvutatavate variantide arv nii tohutult suureks, et üle kolme käigu ei suuda isegi kõige kiiremini toimivad masinad «ette mõelda». Näib tõenäone, et selle tehnilist laadi raskuse puudumisel võiks masin võistelda ka väga tugevate mängijatega, toimides rangelt loogiliselt, omamata mingeid loomingulisi võimeid. Praktiliselt ei tuleks säärase absoluutselt eksimatu malemasina töömahuga toime ka tuleviku elektronarvutusmasinad. Seepärast tuleks seesuguse malemasina tööd lähendada maletaja toimimisele, modelleerides ühel või teisel viisil maletaja intuitsiooni.

Maletajatele sellised masinad siiski vaevalt konkurentsi valmistaksid, täpselt niisamuti nagu sportlastel — jooksjail ei tarvitse karta mootorratturite konkurentsi.

Pisut teisiti on lugu tekstide tõlkimisega ühest keelest teise.

Kaua aega näis tõlkimise vältimatuks eelduseks olevat see, et tõlkija saaks aru tõlgitava mõttest ning väljendaks siis selle mõtte teises keeles.

Masin, mis piirduks lihtsalt sõnade «ümberpanemisega» ranges vastavuses sõnastikuga, jättes sõnade järjekorra lauses muutmata, oleks küll väga lihtne, ent temast poleks tõlkimisel enam kasu kui tavalisest sõnastikust — tõlkija abita jääks «tõlgitud» lausete mõte enamasti arusaamatuks. Samuti oleks säärane masin nõutu, kui ühel sõnal on mitu tähendust.

Osutub siiski, et võrdlemisi arusaadava tõlke võib saada, toetudes rangelt loogilistele reeglitele ühe ja teise keele lauseehituse sidumisel. Mingisugusel kujul kooditakse tõlgitava lause struktuur, s. o. aluse, öeldise jne. asukohad lauses. Muundades seda koodi kindlate reeglite kohaselt, saadakse sama lause struktuur teises keeles. Mitmetähenduslikkude sõnade puhul aitab enamasti küsimust lahendada konteksti kontrollimine. Nii näiteks võib venekeelne sõna «дом» tähendada nii «maja» kui ka «kodu». Et masin võiks seda laadi sõnu õigesti tõlkida, piisab enamasti, kui masina mäluseadmes on vastavad täiendavad juhendid. Antud juhul võiks juhend olla umbes taoline: kui sõna «дом» esineb koos sõnadega «ehitus», «valitsus» jne. — tõlkida «maja», kui aga koos sõnadega «kasvatus», «kolle», «perenaine» jne., siis tuleb ta tõlkida sõnaga «kodu».

Õigete käändelõppude ja grammatiliste vormide tagamiseks eraldatakse tõlkimisel sõna tüvi käändelõpust. Tüvi tõlgitakse eespool toodud reeglite alusel, käändelõpp aga vastavalt kummagi keele grammatikareeglitele. Et grammatikareeglid on üsna täpselt formuleeritud, ei valmista vastava programmiosa koostamine erilisi raskusi.

Käesoleval ajal ei ole masintõlge üldiselt väljunud laboratoorsest staadiumist. Ometi on juba olemas võrdlemisi arusaadavaid masinal tõlgitud tekstinäiteid. Need näited ning tähelepanu, mida osutatakse masintõlke arendamisele, lubavad oletada, et juba üsna pea võidakse teaduslikku informatsiooni masinal tõlkida. Ilukirjanduse masintõlge ei tule aga niipea kõne alla, sest ilukirjanduslik tekst nõuab mõtte- ning tundevarjundite edasiandmist, mille arvestamine masina programmeerimisel pole esialgu üldse kujutletav.

Kõnelevad, kuulavad, lugevad ja kirjutavad automaadid. Tõlkimise ja ka muude küberneetika probleemidega on teatud määral seotud automaadid, mille ülesanne on

esimesel pilgul väga tagasihoidlik. Kõne all on inimese kui orgaanilise süsteemi poolt kasutatavate informatsioonivormide sidumine küberneetilistes masinates tsirkuleerivate informatsioonivormidega, peaasjalikult elektriliste impulsskoodidega.

K õ n e l e v a t e automaatide ehitus põhineb inimese kõne moodustumise printsiipidel. Kõneleva inimese häältrakt moodustab võnkumisvõimelise kõrist ja suukoopast koosneva resonaatorite süsteemi, mis peaasjalikult annabki inimese häälele üksikuid häälikuid iseloomustavad tunnused. Kõneleva automaadi puhul modelleeritakse kõnetrakt elektriliselt. Resonaatorite asemel kasutatakse siin vastavalt häälestatud elektrilisi võnkeringe. Muutes spetsiaalse programmi kohaselt nende võnkeringide näitajaid, võibki saada seadme väljundis elektripinge, mis valjuhääldajasse juhituna tekitab inimkõnet meenutava hääle.

Niisugused kõnelevad automaadid pakuvad esimeses järjekorras huvi telefoniside seisukohalt. Nimelt sisaldab resonaatoreid mõjutav programm kümme või enam korda väiksemat informatsioonihulka kui kõne ise; kõne liigsus on teatavasti väga suur. Niisiis oleks liigse informatsiooni ärajätmise arvel võimalik ühe kanali kaudu samaaegselt edasi anda kümmekond telefonikõnet. Hoolimata intensiivsetest uurimis- ja konstrueerimistöödest ei ole see probleem leidnud veel praktilist lahendust.

K u u l a v a t e automaatide võimalik kasutamisala on laiem. Eelnimetatud telefoniseadiste kõrval võiksid nad leida kasutamist automaatsetes dikteerimisseadmeis (diktograafides), kõne tõlkimisel ja masinate juhtimisel suuliste komandode abil. Kuulavate automaatide ülesandeks on õieti mitmesugustele häälikutele vastavate helisignaalide d e k o d e e r i m i n e (dešifreerimine). Et kogu heli analüüs osutub väga keerukaks, kasutatakse üksikute häälikute äratundmiseks teatud iseloomulikke tunnuseid. Probleem valmistab küllalt suuri raskusi, sest inimeste hääldusviisid erinevad, teatud häälikuid (näiteks *h* sõna alguses) sageli üldse ei hääldata või siis hääldatakse erinevates sõnades erinevalt jne. Seepärast ei ole seni katseks ehitatud diktograafid, s. o. kõne abil juhitavad kirjutusmasinad, eriti töökindlad.

L u g e v a t e automaatide puhul on probleem peaaegu

samasugune. Käsitsi kirjutatud või trükitud tähed muudetakse siin erilise televisiooniseadmeid meenutava aparatuuri abil elektrilisteks signaalideks, viimased aga dešifreeritakse jällegi teatud iseloomulike tunnuste kohaselt. Seda laadi seadmeid kasutatakse pimedatele trükitud tekstide lugemise võimaldamiseks. Käsitsi kirjutatud tekstide dešifreerimisel aga, mis on tehniliselt palju raskemini teostatav, saab võimalikuks trükiladujate ja masinakirjutajate töö automatiseerimine.

Kirjutatavate automaatide ehitamine ei paku erilisi raskusi. Lihtsamal juhul piisab selleks elektrilisest kirjutusmasinast, s. o. kirjutusmasinast, mille sõrmistu on käivitatav elektriliste impulsside abil.

Küberneetika ja looming. Küberneetiliste masinate abil on võimalik automatiseerida mistahes vaimset tööd, kui vaid selle töö reegleid on võimalik täiesti konkreetselt ja üksikasjaliselt formuleerida. Kui aga inimene ei tea isegi täpselt, kuidas üks või teine küsimus lahendada tuleb, ei saa loomulikult ka vastavat masinat konstrueerida ega tema teotsemisjuhendit — programmi — formuleerida. Inimene ise aga on suuteline tegutsema paljudelgi juhtudel, mil tegevuse eeskirju täpselt formuleerida ei ole võimalik.

Sellisel juhul räägitakse tavaliselt, et siin on tegemist «loomingu» ning «intuitsiooniga». Lähem analüüs näitab siiski, et looming ja intuitsioon põhinevad mälufunktsioonidel, teatud juhuslikkusel ning loogilistel reeglitel. Näiteks selgub, et mitmesugused fantastilised mütoloogilised olendid, nagu sfinksid, kentaurid, faunid jne. koosnevad üsnagi hästi tuntud, loodusest võetud elementidest. Abstraktne maal aga võlgneb tänu juhuslikkusele, sest on selgunud, et ka eesel suudab saba külge seotud pintsliga niisama edukalt abstraktseid maale maalida kui kunstnik-abstraktsionistki.

See ei tähenda aga sugugi seda, et masin võib saada ekvivalentseks inimesele või viimast isegi ületada.

Põhiline raskus on siin selles, et aju on siiski võrratult keerukam kui kõige keerukamad küberneetilised masinad. Kui oletada, et konstruktoril, kes kavatseb ehitada ajule vastavat küberneetilist masinat, kulub iga neurooni ühendusviisi väljaselgitamiseks ning vastava neurooni ühendamiseks ainult üks sekund, saaks masin

valmis umbes kolmesaja aasta pärast. See on ka täiesti mõistetav, arvestades, et looduslikes tingimustes kulus aju kujunemiseks miljoneid aastaid.

Üldse aga näib olevat õigem tee küberneetiliste masinate väljatöötamisel neid mitte lõpuni konstrueerida, vaid näha ette teatud iseseisva organiseerumise võimalused, varustades masina vaid nõutava arvu elementidega. Kuidas seda aga teha, pole käesoleval ajal veel teada.

Ometi on isegi käesoleva aja primitiivsete vahenditega (tuleb arvestada, et küberneetika teeb alles oma esimesi samme) võimalik teatud loomingulise tegevuse funktsioone matkida.

Näiteks on loodud seadmeid, mis võimaldavad paigutada sõnu ridadesse nii, et oleksid rahuldatud grammatilised ning morfoloogilised reeglid, samuti aga esineks korrapärane riim ning värsimõõt. Säärasesse seadmesse tarvitseb vaid juhtida valik sõnu ning masin paigutab nad ülalnimetatud reegleile vastavaisse stroofidesse.

Katseks viidi sellisesse masinasse valik sõnu «nukrale» teemale. Muude hulgas oli tulemuseks ka järgmine nelikvärss:

Ползучий страх к развалинам приник.
И тени кружатся, край моря очертив,
и ветер повторяет чайки крик,
дождю-мечтателю дав утренний мотив.[1]

Värss on õigesti üles ehitatud, ent peaaegu täiesti mõttetu. Teatud meeleoluvarjund on põhjustatud inimese poolt teostatud sõnade valiku kaudu. Umbes vastavaid katseid on teostatud ka muusika ning kujutava kunsti valdkonnas. Kõikidel neil juhtudel on kogetud, et kui idee pärineb inimeselt, on masin suuteline teda otstarbekalt abistama selle idee reeglikohasel vormistamisel, kusjuures vorm on samuti inimese poolt ette nähtud.

---

[1] Hirm roomav tardus varemete juures.
On varjudega ääristatud rannaliiv
ja kajakate karje kostab tuules,
kui unistava vihma hommikumotiiv.

Kui aga idee asendada juhuslike signaalidega, on masin neidki võimeline reeglikohaselt formuleerima. Säärase toimingu tulemuseks on siis «teos», millel sisu puudub, on mõttetu, vorm aga on teostatud reeglikohaselt. Seda laadi masina abil tehtud teos meenutab formalistlikku loomingut.

Üldiselt tuleb siiski arvestada, et küberneetika on praegu oma arengu algjärgus. Sellelt seisukohalt lähtudes on senised resultaadid väga paljulubavad.

KASUTATUD JA SOOVITATAV KIRJANDUS

I. Sissejuhatus

Доманский Б. И. Введение в автоматику и телемеханику. Госэнергоиздат, Л.-М., 1950.

Белкин Л. О. и др. История техники. Госэнергоиздат, М.-Л., 1956.

Трапезников В. А. Автоматика и человечество: Доклад на I конгрессе международной федерации по автоматическому управлению. — «Экономическая газета», 29 июня 1960.

II. Automaatika elemendid

Шляндин В. М. Элементы автоматики и телемеханики. Оборонгиз, М., 1954.

Сотсков Б. С. Элементы автоматической и телемеханической аппаратуры. Госэнергоиздат, М.-Л., 1950.

Декабрун И. Е. и *Тедер Н. Р.* Справочник по элементам автоматики и телемеханики. Госэнергоиздат, М.-Л., 1960.

Бутусов И. В. Автоматические контрольно-измерительные и регулирующие приборы. Гостоптехиздат, Л., 1958.

Миронов К. А., Шипетин Л. И. Теплотехнические измерительные приборы. Справочные материала. Машгиз, М., 1958.

Конев И. П. Полупроводниковые триоды в автоматике. «Сов. Радио», М., 1960.

Розенблат М. А. Магнитные усилители. «Сов. Радио», М., 1960.

Шляндин В. М. Основы автоматики. Госэнергоиздат, М.-Л., 1958.

Основы автоматического регулирования. Том 2. Под ред. В. В. Солодовникова. Машгиз, М., 1959.

Крассов И. М. Гидравлические усилители. Госэнергоиздат, М.-Л., 1959.

Сэй М. Электромашинные усилители. Госэнергоиздат, М.-Л., 1959.

III. Automaatne reguleerimine

Küppar, E. Automaatreguleerimine. ERK, Tallinn, 1960.

Воронов А. А. Элементы теории автоматического регулирования. Воениздат, М., 1954.

Айзерман М. А. Лекции по теории автоматического регулирования. Физматгиз, М., 1958.

Фельдбаум А. А. Электрические системы автоматического регулирования. Оборонгиз, М., 1957.

IV. Matemaatilised mudelid

Этерман П. П. Математические машины непрерывного действия. Машгиз, М., 1957.

Кобринский И. Е. Математические машины непрерывного действия. Основы их устройства. Гостехиздат, М., 1954.

Коган Б. Я. Электронные моделирующие устройства и их применение для исследования систем автоматического регулирования. Физматгиз, М., 1959.

Труды второго всесоюзного совещания по теории автоматического регулирования. Том III. Изд. АН СССР, М.-Л., 1955.

Корн Г. и *Корн Т.* Электронные моделирующие устройства. Перевод с английского. ИИЛ, М., 1955.

Тетельбаум И. М. Электрическое моделирование. Физматгиз, М., 1959.

Johnson, G. L. Analog Computer Tehniques. New York, McGraw-Hill book co., 1956.

Martens, H. Prinzip und Anwendung der Analog-Rechenmaschine. «Elektronik», Nr. 5, Mai 1958.

V. Numbrilised arvutusseadmed

Kaasik, Ü., Salum, H., Sinisoo, M. Elektronarvutusmasinad. ERK, Tallinn, 1960.

Майоров Ф. В. Электронные вычислительные машины и их применение. Воениздат, М., 1959.

Фельдбаум А. А. Вычислительные устройства в автоматических системах. Физматгиз, М., 1959.

Цифровые дифференциальные анализаторы. Сборник переводов. Под ред. Б. Я. Когана. ИИЛ, М., 1959.

Китов А. И. и Криницкий Н. А. Электронные вычислительные машины. Изд. АН СССР, М., 1958.

Китов А. И. Электронные цифровые машины. «Сов. Радио», М., 1956.

Крайзмер Л. П. Техническая кибернетика. Госэнергоиздат, М.-Л., 1958.

Архангельский Н. А. и *Зайцев Б. И.* Автоматические цифровые машины. ГИФМЛ, М., 1958.

Richards, R. K. Digital Computer Components and Circuits. Princeton, New York, O. Van Nostrand co., 1958.

Smith, C. V. L. Electronic Digital Computers. New York, McGraw-Hill book co., 1959.

Williams, S. B. Digital Computing Systems. New York, McGraw-Hill book co., 1959.

Rajchman, J. A. Ferrite Apertured Plate for Random Acess Memory. Proc. IRE, N 3, 1957.

VI. Telemehaanika

Малов В. С. Телемеханика. Госэнергоиздат. М.-Л., 1960.

Илын В. А. Система телемеханики для рассредоточенных объектов. Госэнергоиздат, М.-Л., 1960.

Красивский С. П. Управление производством на расстоянии. «Моск. рабочий», М., 1958.

Горяинов О. А. и *Райнес Р. Л.* Телеуправление. Госэнергоиздат, М.-Л., 1954.

Техника передачи измерений по радио с ракет и снарядов. Сборник переводов иностранных журнальных статей по радиотелеметрии. Под ред. В. К. Морозова и др. Воениздат, М., 1959.

Полоник В. Аппаратура промышленного телевидения и ее применение. ЦБТИ, Л., 1958.

Свиридонов В. Т. Радиорелейные линии связи. Физматгиз, М., 1959.

VII. Tootmisprotsesside automatiseerimine

Рыбаков Б. В. Автоматика и телемеханика в народном хозяйстве. АН СССР, ВИНТИ, М., 1960.

Красивский С. П. Автоматизация производства. Трудрезервиздат, М., 1956.

Майзель М. М. Основы автоматизации технологических процессов. Ростехиздат, М., 1960.

Трапицын В. И. Автоматизация производственных процессов промышленных установок. Машгиз, М.-Л., 1957.

Жуковицкий А. Ф. Автоматизация технологических процессов в машиностроении. ЦБТИ, М., 1959.

Кошкин Л. Н. Автоматические роторные линии. «Знание», М., 1960.

Смольников Л. П. Электроавтоматика технологических процессов в металлургических цехах. Металлургиздат. Свердловск, 1960.

Челюсткин А. Б. Применение вычислительной техники для управления металлургическими агрегатами. Металлургиздат, М., 1960.

Автоматизация энергосистем и электростанции. Сборник под ред. Н. М. Чупранова. АН СССР, МИНТИ, М., 1957.

Русинов Ф. М. и *Попов Л. Г.* Автоматизация управления тракторами и самоходными сельскохозяйственными машинами. Машгиз, М., 1960.

Жуков В. А. Новые способы изготовления печатных схем. ДИТП, Л., 1959.

Хорнауер В. Техника автоматизации производственных процессов. Перевод с немецкого. Машгиз, 1958.

Балда М., Стрейц В. Применение автоматизации в промышленности. Перевод с чешского. М., Гостоптехиздат, 1960.

Якобсон Б. М. Электронная машина для централизованного контроля. «Приборостроение», № 7, 1958.

Automation in Business and Industry. Edited by Eugene M. Grabbe. New York, J. Wiley & sons, London, Chapman & Hall, 1957.

Handbuch der Automatisierungstechnik. Mit Beiträgen von Dr.-Ing. J. S. Dieckmann, Ing. A. Haidecker, Prof. Dr. H. Herrman u. a. Herausgeber: Dr. R. Kretzmann. Verl. für Radio-Foto-Kinotechnik, Berlin-Borsigwalde, 1959.

VIII. Küberneetika

Agur, U. Mõtlevad masinad. ERK, Tallinn, 1961.

Wiener, N. Küberneetika ehk juhtimine ja side loomas ning masinas. Tõlge inglise keelest. ERK, Tallinn, 1961.

Полетаев И. А. Сигнал. О некоторых понятиях кибернетики. «Сов. Радио», М., 1958.

Теплов Л. П. Очерки о кибернетике. «Моск: рабочий», М., 1959.

Гаазе-Рапопорт М. Г. Автоматы и живые организмы. Моделирование живых организмов. ГИФМЛ, М., 1961.

Эшби У. Р. Введение в кибернетику. Перевод с английского. ИЛЛ, М., 1959.

Винер Н. Кибернетика и общество. Перевод с английского. ИИЛ, М., 1958.

Косса П. Кибернетика. «От человеческого мозга к мозгу искусственному». Перевод с французского. ИИЛ, М., 1958.

Мясников Л. Л. Говорящие, читающие и слушающие автоматы. Изд. о-ва по распр. полит. и научных знаний, Л., 1957.

Араб-Оглы Э. А. Социология и кибернетика. (Применение кибернетики в общественных науках). — «Вопр. философии», № 5, 1958.

Бриллюэн Л. Наука и теория информации. Перевод с английского. ГИФМЛ, М., 1960.

SISUKORD

I peatükk. SISSEJUHATUS

1. Automaatika tähtsusest 3
2. Automaatika olemusest, ajaloost ning arenguperspektiividest 4

II peatükk. AUTOMAATIKA ELEMENDID

3. Automaatse juhtimise süsteemid 8
4. Mõõteelemendid 13
   Elektrilised mõõteelemendid 14
   Mitteelektrilised mõõteelemendid 27
5. Võimenduselemendid 28
   Releed 29
   Elektronvõimendid 32
   Pooljuhtvõimendid 43
   Magnetvõimendid 44
   Elektrimasinvõimendid 50
   Mitteelektrilised võimendid 52
6. Muud automaatse juhtimise süsteemide elemendid . . . 55
   Täiturelemendid 55
   Selsüünülekanded 60
   Aegreleed 62
   Programmide reprodutseerimisest 65

III peatükk. AUTOMAATNE REGULEERIMINE

7. Automaatse reguleerimise süsteemid 68
   Automaatse reguleerimise üldpõhimõtted 68
   Regulaatori statism 75
   Astaatilised regulaatorid 77
   Stabilisaatorid 78
   Jälgivsüsteemid 82
8. Reguleerimise kvaliteet ja regulaatori stabiilsus . . . 84
   Automaatse reguleerimise süsteemi tüüplülid 85
   Proportsionaalne lüli 86
   Inertne lüli 86
   Integreeriv lüli 90
   Diferentseeriv lüli 92
   Võnkuv lüli 95
   Viitlüli 97
   Reguleerimise kvaliteet 99
   Regulaatorite stabiilsus 107

9. Mittelineaarsed ja releelised automaatse reguleerimise süsteemid 114
Lineaarsed ning mittelineaarsed elemendid 114
Mittelineaarsete elementide toime 116
Releelised regulaatorid 120
10. Komplitseeritud automaatse reguleerimise süsteemid . . 123
Seotud reguleerimine 123
Ekstreemreguleerimine 125
Isekohastuvad süsteemid 131

IV peatükk. MATEMAATILISED MUDELID

11. Arvutamisest ning modelleerimisest 133
Füüsikaline modelleerimine 134
Matemaatiline modelleerimine 135
12. Põhitehete teostamine matemaatiliste mudelite abil . . . 138
Liitmine ja lahutamine 139
Korrutamine ja jagamine 143
13. Mittelineaarsete sõltuvuste matemaatiline modelleerimine . 147
Mittelineaarsete sõltuvuste modelleerimine mehaanilistes süsteemides 147
Mittelineaarsuste elektriline ja elektromehaaniline modelleerimine 148
14. Dünaamiliste protsesside matemaatiline modelleerimine . . 151
15. Ruumiliste protsesside matemaatiline modelleerimine . . 155
16. Matemaatiliste mudelite tüübid ning ehitus 156
Üldisi andmeid 156
Levinumaid matemaatiliste analoogide tüüpe . . . 158
Operatsioonvõimendid 159
Staatilised mudelid 162
17. Matemaatiliste mudelite kasutamine 163

V peatükk. NUMBRILISED ARVUTUSSEADMED

18. Üldisi andmeid 168
Matemaatilised mudelid ja numbrilised arvutusmasinad 168
Numbriliste arvutuste mehhaniseerimisest ja automatiseerimisest 169
Diskreetse toimega arvutusmasinad 171
19. Arvusüsteemidest ja koodidest 173
Suuruste esitamine kümnendsüsteemis 174
Suuruste esitamine kahendsüsteemis 174
Arvutamine kahendsüsteemis 175
Arvude säilitamine ja edasiandmine elektronarvutusmasinas 178
Koodidest ja kodeerimisest 181
20. Algmõisteid matemaatilisest loogikast ning tema rakendamisest automaatikas 185
Loogikalise algebra tehted 187
Loogikalistest lülitustest 189
21. Aritmeetiliste tehete teostamine masina abil 190
Summaatorite ehitusest 190
Kümnendsüsteemiline summaator 193
Muud aritmeetilise seadme elemendid 195

22. Mäluseadmed 197
Magnetilised operatiivmäluseadmed 198
Muud mäluseadmete tüübid 202
Sisend- ja väljundseadmed 204
23. Elektronarvutusmasina üldine struktuur ja programmeerimine 206
Arvude esitamine masinas 207
Programmi koostamisest 209
Programmeerimise automatiseerimise võimalused . . . 210
Programmeerimise näide 211
Iteratsioonimeetod 212
24. Diskreetse toimega seadmed automaatikas 215
Impulsside loendajad 215
Numbrilised automaatse reguleerimise süsteemid . . . 220
Muundajad 221
Numbriliste seadmete rakendustest 224

VI peatükk. TELEMEHAANIKA

25. Telemehaanika üldpõhimõtteid 227
Dispetšeriteenistus 228
Otsene juhtimine 229
Distantsjuhtimine 230
Telemehaaniline juhtimine 233
26. Signaalide edasiandmise võimalused 235
Elektriliste signaalide tunnused 236
Vahelduvvoolu abil edasiantavad signaalid 239
Jaotusmeetod 242
27. Telemehaanilised seadmed 244
Kaugjuhtimine ja kaugsignalisatsioon 244
Kaugmõõtmine 249
Sageduslik kaugmõõtmine 251
Muud kaugmõõtmise süsteemid 253
Kaugreguleerimine 256
28. Raadiotehnilistest meetoditest telemehaanikas 257
Raadioreleeliinid 257
Rakendustelevisioon 258

VII peatükk. TOOTMISPROTSESSIDE AUTOMATISEERIMINE

29. Automatiseerimise üldistest printsiipidest 261
30. Masinaehituse ning metallide töötlemise automatiseerimisest 264
Automaadid ja automaatliinid 265
Sobiva tehnoloogia valikust 272
Automaatne kontroll 272
Automaattehas autokolbide tootmiseks 274
Programmjuhtimisega metallilõikepingid 277
31. Automaatika ja telemehaanika osa energeetikas 281
Elektrijaamade automatiseerimine 282
Energiasüsteemide automatiseerimine 285
Kaitseautomaatika 289
32. Muude tööstusharude automatiseerimisest 290
Metallurgia 291
Mäetööstus 295

Keemia- ja naftatööstus 298
Teised tööstusharud 303
33. Automaatikaseadmete töökindlusest 307
Töökindluse arvuline väljendamine 307
Reserveerimine 309

VIII peatükk. KÜBERNEETIKA

34. Küberneetika mõiste 311
Küberneetika päritolu 311
Töömeetodite arengust 312
Mateeria ja informatsioon 314
35. Informatsioon 315
Informatsiooni hulga määramine 316
Tõenäosus 319
Liigsusest ja sidekanalite läbilaskevõimest 322
Informatsioon ja organisatsioon 324
36. Küberneetika ja bioloogia 325
Pärilikkus 327
Bioloogilised regulaatorid 329
Närvisüsteem 331
Aju 332
37. Küberneetilised masinad 335
Robotid, hiired ning kilpkonnad 336
Küberneetika ja mõtlemisprotsess 341
Kõnelevad, kuulavad, lugevad ja kirjutavad automaadid . 343
Küberneetika ja looming 345
Kasutatud ja soovitatav kirjandus 348

Ыуду, Куста Аугустович
АВТОМАТИКА
На эстонском языке
Оформление В. Варе
Эстонское Государственное Издательство
Таллин, Пярнуское шоссе, 10

*

Toimetaja L. Abo
Kunstiline toimetaja R. Tungla
Tehniline toimetaja Ü. Laul
Korrektorid A. Nurmoja ja E. Tuulik

Ladumisele antud 6. I 1962. Trükkimisele antud 26. III 1962. Paber 54×84, 1/16. Trükipoognaid 22,25. Formaadile 60×92 kohaldatud trükipoognaid 18,25. Arvutuspoognaid 19,69. Trükiarv 4000. MB-01594. Tellimise nr. 150.
Hans Heidemanni nim. trükikoda, Tartu, Ülikooli 17/19. III

Hind 95 kop.

3—2

95 kop.

A-24523

TÜ RAAMATUKOGU
1 0300 00375605 5